

Relatório Final

Verificação e Validação de Modelos de Turbulência para Formulações Médias

Bolsista: Thamires das Chagas Silva

Orientador: João Luiz Filgueiras de Azevedo

Fevereiro de 2017 a Julho de 2017

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. Nesta primeira parte do trabalho foi feita uma revisão bibliográfica das equações da mecânica dos fluidos, realizado um estudo da formulação utilizada no código e dos modelos de turbulência escolhidos para validação. Na segunda etapa será realizado um estudo de refinamento de malha para as geometrias de interesse. Os resultados obtidos nas simulações serão então comparados com soluções experimentais presentes na literatura.

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 a 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 essa abordagem requer o uso de malhas muito refinadas e passos no tempo muito pequenos para poder representar as menores escalas de turbulência de Kolmogorov. Tal premissa torna o uso desse método inviável para a indústria devido ao elevado custo computacional de memória e 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 a 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, pois parte do modelamento de turbulência é elaborado a partir de natureza empírica.

Neste trabalho serão estudados alguns desses modelos de turbulência que já se encontram disponíveis no código BRU3D. O objetivo é validar o uso dos modelos nos casos que serão simulados. Para essa validação os resultados obtidos serão comparados com dados experimentais.

Dentro desse contexto, a primeira parte do trabalho abrange o estudo e compreensão da formulação utilizada no código e dos modelos de turbulência selecionados. Posteriormente, serão realizadas as simulações dos casos escolhidos. Para as simulações será realizado um estudo de refinamento de malha para cada geometria de interesse. As soluções serão comparadas com dados de testes experimentais em túnel de vento, validando ou não a utilização dos modelos de turbulência escolhidos para cada condição simulada.

2 Formulação Teórica

Na nomenclatura da mecânica dos fluidos, as equações de Navier-Stokes são apenas as equações de quantidade de movimento. Contudo nesse trabalho será adotada a terminologia utilização na dinâmica dos fluidos computacional, em que as chamadas equações de Navier-Stokes abrangem as equações de quantidade de movimento, da continuidade e de energia.

2. 1 Equações de Navier-Stokes

As equações de Navier-Stokes são as equações governantes que melhor descrevem a física para um escoamento aeroespacial (BIGARELLA, 2008). Elas podem ser escritas conforme as equações 1-3.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot u = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}, \quad (2)$$

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

Nas equações 1-3, ρ representa a densidade, u é o vetor de velocidades 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 o tempo. Para fechar esse conjunto de equações são necessárias equações adicionais, chamadas de relações constitutivas, que relacionem as propriedades físicas do fluido em questão.

Para a primeira relação, admite-se nesse trabalho que o ar é um gás perfeito. A determinação do estado do ar é dada pela equação 4.

$$p = \rho RT = (\gamma - 1)\rho e_i, \quad (4)$$

em que R é a constante dos gases, T a temperatura do fluido e γ representa a razão entre os calores específicos à pressão e volume constantes. A energia interna específica e_i é dada pela equação

$$e_i = C_v T, \quad (5)$$

sendo C_v o calor específico a volume constante. O fluxo de calor q é calculado pela lei de Fourier, conforme a equação 6.

$$q = -\kappa \nabla T, \quad (6)$$

onde κ é o coeficiente de condutividade térmica do fluido, calculada por

$$\kappa = \frac{C_p \mu}{Pr}. \quad (7)$$

Na equação 7, μ é o coeficiente de viscosidade molecular dinâmica e P_r o número de Prandtl, que é admitido como constante 0,72 para um gás ideal (BIGARELLA, 2008). O tensor de tensões viscosas é dado pela equação 8,

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \lambda_\mu (\nabla \cdot u) \delta_{ij}, \quad (8)$$

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

$$\lambda_\mu = -\frac{2}{3}\mu. \quad (9)$$

Os coeficientes de viscosidade são função da temperatura (ANDERSON, 2011) relacionados pela lei de Sutherland. A entalpia total do fluido, H , é calculada pela equação 10 e a derivada material é definida pela equação 11.

$$H = h + \frac{1}{2}|u|^2 = e_i + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}|u|^2, \quad (10)$$

$$\frac{D}{Dt}(\quad) = \frac{\partial}{\partial t}(\quad) + u \cdot \nabla(\quad). \quad (11)$$

A entalpia h é determinada por

$$h = e_i + \frac{p}{\rho}. \quad (12)$$

2.2 Equações de Navier-Stokes em Forma Conservativa

As equações de Navier-Stokes serão utilizadas na forma conservativa, sendo reescritas conforme as equações 13-15.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0, \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = 0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}[(e + p)u_j - \tau_{ij}u_i + q_j] = 0, \quad (15)$$

onde e é a energia total por unidade de volume do fluido, que é definida pela equação 16.

$$e = \rho(e_i + \frac{1}{2}|u|^2). \quad (16)$$

Com as equações governantes escritas na forma conservativa problemas numéricos são evitados nos casos onde existem descontinuidade no campo de escoamento. Um exemplo usual é o caso de simulações de escoamentos compressíveis, onde a presença de ondas de choque é comum. As ondas de choque são regiões extremamente finas nas quais as propriedades do escoamento podem mudar abruptamente (ANDERSON, 2011), sendo possível que essas regiões sejam menores do que o menor espaçamento de malha, o que pode gerar problemas numéricos tanto na estabilidade dos esquemas de discretização espacial quanto na marcha temporal.

As equações de Navier-Stokes, como foram escritas acima, são capazes de representar um escoamento com todas as suas escalas de turbulência (BIGARELLA, 2008). Entretanto, como foi dito anteriormente, 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 (SCALABRIN, 2002). Na maioria dos casos práticos de engenharia o cálculo de um valor médio das propriedades do escoamento é suficiente (FREIRE, 2002).

Assim, o código BRU3D utiliza o conceito da média de Reynolds para simular os casos com um menor custo computacional. A aplicação da média de Reynolds possibilita usar as equações de Navier-Stokes sem calcular todas as escalas de turbulência (FREIRE, 2002). De acordo com esse método, é possível representar todas as propriedades do escoamento como uma soma de um valor médio mais um termo de flutuação.

$$z = \bar{z} + z', \quad (17)$$

sendo z o valor instantâneo da propriedade, \bar{z} o valor de fluxo médio e z' é a uma perturbação, diretamente relacionado com a turbulência. O valor médio de cada propriedade é definido por uma média temporal,

$$\bar{z} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} z dt, \quad (18)$$

onde T é um intervalo de tempo longo o suficiente para calcular uma média das escalas de turbulência de alta frequência, contudo, é um intervalo pequeno se comparado com o escoamento médio na escala de tempo.

Ao aplicar o conceito da equação 18 à todas as variáveis das equações 13-15, as equações de Navier-Stokes com média de Reynolds são escritas como

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j) = 0, \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \overline{\rho u_i'' u_j''}) = 0, \quad (20)$$

$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\bar{e} + \bar{p}) \tilde{u}_j] + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_j'' h}) + \frac{\partial \overline{q H_j}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\tilde{u}_i (\bar{\tau}_{ij} - \overline{\rho u_i'' u_j''}) + u_i'' \left(\bar{\tau}_{ij} - \frac{\overline{\rho u_i'' u_j''}}{2} \right) \right] = 0 \quad (21)$$

Com a aplicação desse método, o termo $\overline{\rho u_i'' u_j''}$ está relacionado à turbulência, denominado tensor de Reynolds. O tensor de Reynolds representa uma adição de quantidade de movimento, interpretados como uma tensão adicional. Os vórtices gerados pelo aumento da quantidade de movimento extraem energia do escoamento médio, alimentando a produção de pequenos vórtices até atingir as menores escalas de turbulência (BIGARELLA, 2008).

Esses novos termos de turbulência que aparecem com o processo de média faz com que o número de incógnitas sejam maiores que o número de equações. Para que seja possível uma solução, é necessário que esses novos termos sejam modelados, relacionando suas variáveis com as propriedades do escoamento médio. Na dinâmica dos fluidos computacional essa situação é chamada de problema de fechamento (FREIRE, 2002).

Um modo de resolver o problema de fechamento é admitir que os fenômenos de turbulência ocorrem de modo semelhante aos fenômenos de transferência de quantidade de movimento. Esse princípio é conhecido como a hipótese de Boussinesq (FREIRE, 2002). Com essa suposição é possível representar na equação 22 o tensor de Reynolds como um coeficiente de turbulência μ_t relacionado com o campo médio de velocidade (NETO, 2009).

$$\mu = \mu_l + \mu_t, \quad (22)$$

sendo μ o coeficiente de viscosidade efetivo e μ_l o coeficiente de viscosidade molecular e μ_t o coeficiente de viscosidade turbulento.

As modelagens de turbulência que admitem a hipótese de Boussinesq são chamadas de classes de modelos de viscosidade de vórtice lineares (MVVL). Em suma, os modelos MVVL linearizam o

tensor de Reynolds ao campo médio de velocidade através da variável μ_t . Existem versões não lineares dos MVVL, contudo no princípio desse trabalho somente um modelo linear será adotado.

2.3 Modelos de Turbulência

O primeiro modelo de turbulência escolhido foi o Spalart-Allmaras (SA) (SPALART, 1994), o qual é amplamente utilizado em aplicações aeroespaciais. O modelo de Spalart-Allmaras se enquadra na classe de modelos de viscosidade de vórtice lineares, admitindo a hipótese de Boussinesq. Ele é baseado em uma equação de transporte para o coeficiente de viscosidade turbulenta modificado, $\tilde{\mu}$. Sua equação na forma conservativa é escrita como

$$\frac{\partial \tilde{\mu}}{\partial t} + \frac{\partial(\tilde{\mu}u_j)}{\partial x_j} = c_{b1} \tilde{P} \tilde{\mu} - c_{w1} f_w \rho \left(\frac{\tilde{\nu}}{d}\right)^2 + \frac{1}{\sigma} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \tilde{\mu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right] + c_{b2} \rho \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_k} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_k} \right\}, \quad (23)$$

sendo o coeficiente de viscosidade turbulento definido por

$$\nu_t = \tilde{\nu} f_{v1}, \quad \tilde{\mu} = \rho \tilde{\nu}, \quad f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}^3}, \quad \chi = \frac{\tilde{\nu}}{\nu}. \quad (24)$$

Na equação 23, \tilde{P} é o termo de produção de turbulência, sendo

$$\tilde{P} = \Omega + \frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2 d^2} f_{v2}, \quad f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}, \quad (25)$$

onde Ω é a magnitude do tensor de vorticidade. Na equação 26 é dado Ω

$$\Omega = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}, \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (26)$$

sendo d é a distância até a parede mais próxima. A função de amortecimento para as paredes f_w é determinada por

$$f_w = g \left(\frac{1 + c_{w3}^6}{g^6 + c_{w3}^6} \right)^{\frac{1}{6}}, \quad g = r + c_{w2}(r^6 - r), \quad r = \frac{\tilde{\nu}}{\tilde{S} \kappa^2 d^2}. \quad (27)$$

As formulações de modelos de turbulência são dadas por uma linha empírica de raciocínio. Para os modelo SA, as constantes foram ajustadas de acordo com um grande número de casos típicos de turbulências (SPALART, 1994), sendo elas

$$c_{b1} = 0.1355, \quad c_{b2} = 0.622, \quad c_{v1} = 7.1, \quad \sigma = \frac{2}{3},$$

$$\kappa = 0.41, \quad c_{w1} = \frac{c_b 1}{\kappa} + \frac{1 + c_{b2}}{\sigma}, \quad c_{w2} = 0.3, \quad c_{w3} = 2. \quad (28)$$

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

No segundo período deste trabalho será estudado e aplicado aos casos de simulação o modelo de viscosidade de vórtice não linear NLBSL (BIGARELLA, 2007), já implementado no código BRU3D.

3. Resultados

Na primeira fase desse trabalho, a aluna se dedicou ao estudo para compreensão da formulação RANS utilizada no código BRU3D, entendimento do problema de fechamento de turbulência e iniciou a pesquisa a respeito dos modelos de turbulência já validados no meio aeroespacial.

As geometrias escolhidas para as simulações foram os aerofólios NACA 0012 (HARRIS, 1981) e a asa ONERA M6 (SCHMITT, 1979). As duas geometrias apresentam consolidados estudos com dados experimentais em túnel de vento, os quais servirão como parâmetros para validar a utilização dos modelos de turbulência escolhidos para as simulações da próxima fase do trabalho.

Junto ao engenheiro Edson Basso, do Instituto de Aeronáutica e Espaço, a bolsista tomou conhecimento da utilização do *software* ANSYS ICEM CFD, que é um programa muito utilizado no meio industrial para geração de malhas estruturadas e não estruturadas. Durante o período de aprendizagem, foram verificados os recursos do programa e discutido a respeito da influência da geração de malhas nos resultados das simulações.

Para maior entendimento de resultados de simulações em CFD, e também para explorar esses dados, a aluna verificou soluções prontas no *software* TecPlot 360, que será a ferramenta para pós processamento dos dados das simulações que serão realizadas na próxima fase deste trabalho.

4. Próximas Etapas

No primeiro período de pesquisa, a autora se familiarizou com as técnicas de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) aplicadas ao uso aeroespacial, tomando conhecimento da formulação utilizada no código BRU3D e dos modelos de turbulência escolhidos para aplicação nos casos escolhidos para estudo. Em pesquisa bibliográfica, foram escolhidas as duas geometrias de interesse para prosseguir com o trabalho.

A aluna tem interesse em prosseguir com o trabalho no próximo semestre, dando início ao estudo de refinamento de malha para o aerofólio NACA 0012 e para a asa ONERA M6, e em seguida realizar as simulações no código BRU3D na Divisão de Aerodinâmica (ALA) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). Os resultados desse estudo serão comparados com os dados obtidos por experimentos em túnel de vento (HARRIS, 1981) e (SCHMITT, 1979) como forma de validar ou não a escolha dos modelos de turbulência para cada caso estudado.

5. Conclusões

A primeira fase do presente projeto de pesquisa foi aproveitado pela bolsista para adquirir conhecimento das formulações utilizadas CFD, em específico sobre a formulação RANS, usada no código BRU3D. A aprendizagem de *softwares* para pré e pós processamento das simulações também foi aplicada neste primeiro momento.

A aluna tem interesse de continuar com esse projeto de pesquisa. Havendo essa oportunidade, na próxima fase serão iniciados os estudos da formulação do modelo de turbulência NLBSL e empregado o refinamento de malha nas geometrias selecionadas, com o propósito de realizar as simulações para validar a escolha dos modelos de turbulência mencionados nesse documento.

Agradecimentos

A aluna agradece ao CNPq pela oportunidade concedida pelo processo 105363/2017-0. Agradece o auxílio dos colegas Edson Basso, Leonardo Motta e Ricardo Galdino, sendo essencial para

o desenvolvimento do trabalho.

Referências

- [1] BIGARELLA, E. D. V., AZEVEDO, J. L. F., Modelagem de Turbulência para Aplicações Aeroespaciais. In: Escola de Primavera de Transição e Turbulência, 6., 2008, São Carlos. *Artigo...* São Carlos: Universidade de São Paulo, 2008. 50f.
- [2] ANDERSON, J. D. J., *Fundamentals of Aerodynamics*. 5ed. New York: McGraw-Hill International Editions, 2011.
- [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] 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.
- [5] SPALART, P. R., ALLMARAS, S. R., A One Equation Turbulence Model for Aerodynamics Flows. *La Recherche Aérospatiale*, vol. 1, 1994, pp. 5-21.
- [6] NETO, J. A. O., *Utilização de Técnicas de CFD para Análise de Dispositivos Hiper-Sustentadores*. 2009. 159f. Tese (Mestrado em Ciências) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [7] BIGARELLA, E. D. V., *Advanced Turbulence Modelling for Complex Aerospace Applications*. 2007. 321f. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [8] HARRIS, C. D., Two-Dimensional Aerodynamic Characteristics of the NACA 0012 Airfoil in the Langley 3-Foot Transonic Pressure Tunnel. 1981. 139f. *NASA Technical Report*, NASA Langley Reserach Center, Hampton, VA.
- [9] SCHMITT, V. CHARPIN, F., Pressure Distributions on the ONERA-M6-Wing at Transonic Mach Numbers: Experimental Data Base for Computer Program Assessment. 1979. *AGARD Avisory Report AR-138*.