



SIMULAÇÕES DE ESCOAMENTO EM QUALQUER REGIME DE VELOCIDADES UTILIZANDO MALHAS MULTIBLOCO

Robson Leal da Silva

Centro Técnico Aeroespacial, Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Caixa Postal 6030 – 12231-970 – São José dos Campos, SP, Brasil

João Luiz F. Azevedo

Centro Técnico Aeroespacial, Instituto de Aeronáutica e Espaço
CTA / IAE / ASE-N – 12228-904 – São José dos Campos, SP, Brasil

***Resumo.** A resolução de escoamentos internos em configurações geometricamente complexas é buscada no contexto de malhas estruturadas multibloco utilizando uma variação do algoritmo de Beam e Warming juntamente com um método para aceleração de convergência. Os campos de escoamento de interesse foram assumidos como adequadamente modelados pelas equações de Euler 2-D. O trabalho apresenta simulações de escoamento em configurações cujo propósito é a validação da metodologia proposta. Comparação de resultados com dados da literatura é feita e demonstra-se que a capacidade de uso do método para configurações verdadeiramente complexas está disponível.*

***Palavras-chave:** Métodos multibloco, Aerodinâmica computacional, Métodos numéricos aplicados, Mecânica dos fluidos, Configurações complexas.*

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido objetivando a simulação de escoamentos a baixas velocidades em configurações geométricas complexas. O método numérico utilizado é uma extensão de um algoritmo para escoamentos compressíveis (Beam e Warming, 1978), no qual as variáveis de trabalho são pressão, temperatura e componentes cartesianas de velocidade. Configurações geométricas como canais e outros dispositivos industriais com escoamento interno são os modelos principais dos estudos desenvolvidos. O objetivo fundamental a longo prazo seria obter a capacidade de simular com grande precisão o escoamento em tais dispositivos, de forma a ser capaz de utilizar a simulação numérica no processo de otimização da configuração geométrica dos mesmos. A solução numérica é obtida para a condição de estado estacionário com ajuda da aceleração de convergência de um método desenvolvido anteriormente (Ferrari e Azevedo, 1996). Inicialmente somente o sistema não-viscoso, com um tratamento 2-D é pesquisado, de forma a reduzir significativamente o trabalho computacional despendido e ainda assim obter as propriedades físicas necessárias para o completo conhecimento dos sistemas de interesse.

Uma geometria previamente utilizada por Ferrari (1996), o degrau com face voltada para trás, considerando escoamento externo, é escolhido como forma de investigar o bom funcionamento e confiabilidade do código desenvolvido. Faz-se notar que no trabalho anterior, a solução foi obtida para malha única e no presente trabalho deu-se com 3 malhas no contexto multibloco. Foram também incluídas no trabalho a condição de escoamento interno em um canal utilizando degraus simétricos, neste caso 4 malhas foram usadas, e finalmente uma condição de jato insuflando ar em um compartimento fechado, ou duto, com o uso de 3 malhas. Na apresentação dos resultados é possível perceber linhas de separação entre as malhas utilizadas para cada configuração.

O objetivo do código em desenvolvimento é buscar então um método centrado capaz de resolver escoamentos internos em uma faixa de velocidades indo do regime incompressível até o compressível. Esta fase inicial do trabalho está voltada para a validação da utilização de um algoritmo para qualquer regime de velocidade dentro do contexto de um procedimento de malhas de blocos múltiplos. A análise efetiva de configurações complexas será abordada em uma etapa posterior do trabalho. Deve-se salientar que, uma vez validada a capacidade de blocos múltiplos, a adição de novas regiões à uma configuração previamente resolvida, ou mesmo a modificação de uma área particular, é facilmente realizada independentemente das demais partes representativas de uma determinada configuração. Maiores detalhes e exemplos dessas possibilidades estarão disponíveis no trabalho de Leal da Silva (1999).

O presente trabalho vai apresentar um breve resumo da formulação teórica do método para qualquer regime de velocidade aqui preconizado, juntamente com detalhes da implementação multibloco do mesmo. Posteriormente, serão apresentados resultados sobre configurações simples, porém utilizando malhas de blocos múltiplos, de forma a demonstrar a potencialidade da técnica proposta.

2. FORMULAÇÃO TEÓRICA

As equações utilizadas consideram as variáveis primitivas p , u , v , e T (pressão estática, componentes cartesianas de velocidade e temperatura, respectivamente). O escoamento é modelado via formulação de Euler em 2-D conforme Eq. (1), na forma de lei de conservação,

$$\frac{\partial Q(q)}{\partial \tau} + \frac{\partial E(q)}{\partial \xi} + \frac{\partial F(q)}{\partial \eta} = 0. \quad (1)$$

As equações governantes são discretizadas no contexto de diferenças finitas utilizando malhas estruturadas que se conformam à geometria da configuração em questão. O vetor de variáveis conservadas, Q , o vetor de variáveis primitivas, q , e os vetores de fluxo E e F , são baseados nas propriedades de interesse e nas coordenadas curvilíneas, conforme descrito por Martins (1994) e Ferrari (1996), onde também é possível encontrar maiores detalhes da formulação aqui utilizada. Estes vetores podem ser escritos como

$$Q = J^{-1} \cdot \left\{ \begin{array}{l} p \\ T \\ p \cdot u \\ T \\ p \cdot v \\ T \\ \frac{p}{(\gamma - 1)} + \frac{p}{2 \cdot R \cdot T} \cdot (u^2 + v^2) \end{array} \right\}, \quad q = \left\{ \begin{array}{l} p \\ u \\ v \\ T \end{array} \right\}, \quad (2)$$

$$E = J^{-1} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{p.U}{T} \\ \frac{p.u.U}{T} + R.p.\xi_x \\ \frac{p.v.U}{T} + R.p.\xi_y \\ \left[\frac{\gamma.p}{(\gamma-1)} + \frac{p}{2.R.T} \cdot (u^2 + v^2) \right] U - p.\xi_t \end{array} \right\}, F = J^{-1} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{p.V}{T} \\ \frac{p.u.V}{T} + R.p.\eta_x \\ \frac{p.v.V}{T} + R.p.\eta_y \\ \left[\frac{\gamma.p}{(\gamma-1)} + \frac{p}{2.R.T} \cdot (u^2 + v^2) \right] V - p.\eta_t \end{array} \right\} \quad (3).$$

Componentes contravariantes de velocidade, U e V , podem ser escritas como função das componentes cartesianas de velocidade e dos termos de métrica:

$$U = \xi_t + \xi_x . u + \xi_y . v \quad ; \quad V = \eta_t + \eta_x . u + \eta_y . v \quad (4)$$

Além disto, na presente nomenclatura, γ representa a razão de calores específicos e R é a constante do gás. As equações (1) a (4) já estão adequadamente adimensionalizadas, sendo que os valores de referência são baseados nas propriedades do escoamento não-perturbado, para escoamentos externos, e nas propriedades de estagnação do escoamento ou do jato, quando se tratar de escoamentos internos. Maiores detalhes do procedimento de adimensionalização podem ser encontrados nos trabalhos de Martins (1994) e Ferrari (1996).

3. IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA

3.1 Esquema de convergência da solução

A derivação numérica do sistema de equações utilizados na formulação teórica podem ser encontradas em Azevedo, Fico e Ortega (1995).

O esquema de marcha no pseudo-tempo para convergência da solução típica de estado estacionário é o de Euler implícito:

$$Q(q)^{n+1} = Q(q)^n + \Delta t \cdot \left[\frac{\partial Q(q)}{\partial \tau} \right]^{n+1} + \Delta t O(\Delta t) \quad (5)$$

Através de manipulações algébricas e desenvolvimento do sistema de equações, é possível chegar à forma final do algoritmo a ser implementado no código (ver Ferrari, 1996), que pode ser expresso como

$$\begin{aligned} & (I_{I/R} \cdot T_\xi)^n \cdot \left[I + \Delta t \cdot \left(\frac{\partial \Lambda_\xi}{\partial \xi} \right)^n \right] \cdot (T_\xi^{-1} \cdot T_\eta)^n \cdot \left[I + \Delta t \cdot \left(\frac{\partial \Lambda_\eta}{\partial \eta} \right)^n \right] \cdot (T_\eta^{-1} \cdot I_R \cdot D)^n \cdot \Delta q^n = \\ & - \Delta t \cdot \left(\frac{\partial E(q)^n}{\partial \xi} + \frac{\partial F(q)^n}{\partial \eta} \right) + O(\Delta t) \end{aligned} \quad (6)$$

O algoritmo para todos os regimes de velocidades apresentado na Eq. (6) foi desenvolvido a partir do trabalho de Martins (1994) e finalizado com um processo de aceleração de convergência no qual as matrizes jacobianas possuem formas diferentes

daquelas apresentadas no algoritmo original de Beam e Warming, conforme pode ser acompanhado no trabalho de Ferrari e Azevedo (1996). A descrição das expressões das matrizes $I_{1/R}$, I_R , Λ_ξ , Λ_η , D , T_ξ e T_η também podem ser encontradas em Ferrari (1996).

3.2 Implementação computacional do algoritmo

As equações governantes foram discretizadas no contexto de diferenças finitas em malhas estruturadas que se conformam ao formato da configuração desejada. O algoritmo utiliza operadores para derivadas espaciais do tipo centrado de 3 pontos e de segunda ordem de precisão. Dessa forma faz-se necessário adicionar termos de dissipação artificial para assegurar a estabilidade numérica e convergência, conforme Azevedo (1995).

É possível rescrever o algoritmo, representado pela Eq. (6) acima na seguinte forma:

$$L_\xi \cdot L_\eta \cdot \Delta q^n = (D^n)^{-1} \cdot (R_\xi + R_\eta) \quad (7)$$

$$L_\xi = I + \Delta t \cdot (D^n)^{-1} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \cdot A^n \right] = I + \Delta t \cdot (D^n)^{-1} \cdot \delta_\xi (A^n) - \varepsilon_I \cdot \Delta t \cdot \nabla_\xi \cdot \Delta_\xi \quad (8)$$

$$L_\eta = I + \Delta t \cdot (D^n)^{-1} \left[\frac{\partial}{\partial \eta} \cdot B^n \right] = I + \Delta t \cdot (D^n)^{-1} \cdot \delta_\eta (B^n) - \varepsilon_I \cdot \Delta t \cdot \nabla_\eta \cdot \Delta_\eta \quad (9)$$

$$R_\xi = -\Delta t \cdot (D^n)^{-1} \left[\frac{\partial E(q)^n}{\partial \xi} \right] = -\Delta t \cdot \delta_\xi (E^n) - \varepsilon_E \cdot \Delta t \cdot (\nabla_\xi \cdot \Delta_\xi)^2 Q \quad (10)$$

$$R_\eta = -\Delta t \cdot (D^n)^{-1} \left[\frac{\partial F(q)^n}{\partial \eta} \right] = -\Delta t \cdot \delta_\eta (F^n) - \varepsilon_E \cdot \Delta t \cdot (\nabla_\eta \cdot \Delta_\eta)^2 Q \quad (11)$$

Os operadores descritos acima são do tipo diferenças centradas (δ_ξ e δ_η) e de diferenças *backward* e *forward* (∇_ξ , ∇_η , Δ_ξ e Δ_η), ambos representam a derivada primeira das propriedades que operam. As definições das matrizes A , B e D encontram-se no trabalho de Ferrari (1996).

Os termos de dissipação artificial necessários à estabilidade do método numérico centrado foram adicionados explicitamente à forma dos operadores, conforme apresentado nas Eqs. (8) a (11), sendo os coeficientes ε_E e ε_I controladores da intensidade de dissipação a ser inserida. Embora uma análise de estabilidade linear garanta a condição de estabilidade incondicional para métodos implícitos, estes são afetados pela ocorrência de interações não lineares nos termos convectivos, gerando instabilidades que afetam a convergência da solução. Uma descrição mais detalhada do assunto pode ser encontrada em Pulliam (1986). Foram realizados também testes com modelos de dissipação artificial não linear, porém os resultados que serão apresentados aqui utilizaram o modelo linear simples indicado acima. A ordem de precisão do método, que é de segunda ordem no espaço e primeira ordem no tempo, se mantém uma vez que os termos de dissipação artificial possuem ordem de precisão espacial igual ou maior.

A equação (7) é válida para as equações de Euler, de forma que fenômenos de camada limite e formação de bolhas de recirculação secundárias (Ferrari, 1996), características da separação de camada limite (girando no sentido contrário à de recirculação principal) não podem ser capturados na solução de estado estacionário do código aqui utilizado. Por outro lado, existem diversas situações onde o ponto de separação é fixado geometricamente, através da existência, por exemplo, de descontinuidades na geometria do corpo. Nestes casos, mesmo uma formulação não viscosa pode capturar corretamente o vórtice, ou a recirculação, principal

presente no escoamento. Esta é exatamente a situação física que ocorre a jusante de um degrau, que será um dos casos-teste de interesse no presente trabalho.

3.3 Condições de contorno e iniciais

Para os problemas de interesse no presente trabalho, as condições de contorno que precisam ser consideradas incluem: entrada, saída, escoamento livre e parede.

Propriedades na entrada do escoamento são obtidas através do uso de relações características unidimensionais (Azevedo, Fico e Ortega, 1995), de forma que propriedades como temperatura e velocidades são fixadas e a pressão é calculada. A saída possui tratamento similar à entrada, utilizando relações características, porém é fixada a pressão e as demais propriedades são calculadas. O escoamento livre é necessário quando se tem escoamento externo e é tratado também com o uso de relações características idênticas às da entrada.

Para o cálculo da pressão e temperatura na parede, são impostos gradientes nulos destas propriedades. Dessa forma as propriedades de pressão e temperatura são atualizadas como idênticas às de seus pontos vizinhos e as componentes cartesianas de velocidade são calculadas por meio das componentes contravariantes de velocidade, U e V , de forma que a velocidade na parede seja tangente à mesma. As condições de contorno, incluindo as fronteiras computacionais entre blocos, são tratadas de forma explícita, embora o código seja tipicamente implícito.

Para escoamentos externos, as propriedades de escoamento livre são fixadas em todo o campo como condições iniciais. Nos casos de escoamento interno, com um jato de ar posicionado na entrada do canal, admite-se como condição inicial que todo o campo possua propriedades iguais às propriedades de estagnação do jato.

4. ALGORITMO MULTIBLOCO

O desenvolvimento de um código numérico baseado em uma malha única torna-se restritivo quando o escoamento a ser resolvido se desenvolve em configurações complexas que exigem grande refinamento da malha para captura de fenômenos singulares da geometria ou do fenômeno físico em estudo. Essa necessidade acaba por elevar substancialmente o número de pontos a serem resolvidos na malha como um todo e não somente na região desejada, fazendo ser necessário um maior esforço computacional para se obter a solução das propriedades físicas do escoamento.

O algoritmo multibloco se propõe a ter uma maior controle do refinamento das regiões necessárias da geometria, sem comprometer o conjunto e a solução física obtida. A qualidade da solução pode ser melhorada sem custos extremos. O uso de blocos múltiplos alivia o trabalho pesado da geração de malhas estruturadas em configurações muito complexas.

A idéia básica da implementação desenvolvida por Strauss e Azevedo (1997) é que cada bloco é capaz de reconhecer internamente os tipos de contorno em cada um de seus 4 lados e para isso, cada lado deve consistir de um, e somente um, tipo de contorno (por exemplo: parede, jato, outro bloco, entrada ou saída do escoamento). Dessa forma a resolução de cada bloco é implementada de maneira independente do seu formato, número de pontos, etc, permitindo um código geral uma vez definido o domínio computacional em questão e, se necessário, detalhes adicionais de uma determinada configuração podem ser adicionados à solução criando novos blocos/malhas que descrevem tais configurações. O código implementado aplica-se somente aos pontos interiores de cada malha, de forma que os pontos de contorno são sempre atualizados através de condições de contorno. Detalhes da passagem

de informações entre blocos e da implementação de condições de contorno para fronteiras internas entre blocos podem ser encontradas em Azevedo, Strauss e Ferrari (1997).

5. RESULTADOS

Baseado nas experiências acumuladas pelo grupo de trabalho, que são a formulação de um código para qualquer regime de velocidades e o contexto multibloco de solução, desenvolvidos separadamente, o presente trabalho busca unir as duas capacidades objetivando tratar configurações complexas. Porém, para validação da metodologia, configurações simples foram resolvidas como modelos a serem comparados com resultados existentes na literatura.

O primeiro resultado apresentado nas Figs. 1 a 4, é obtido para uma configuração conhecida como degrau de face voltada para trás, separando-a em 3 blocos. Para todas as soluções aqui apresentadas, considerou-se: $\gamma = 1,4$, $R = 287 J/Kg.K$ e $C_v = 718 J/Kg.K$.

Sendo este um escoamento externo, a adimensionalização foi feita com base nas propriedades de escoamento não-perturbado, utilizando um valor de $M_\infty = 0,1$.

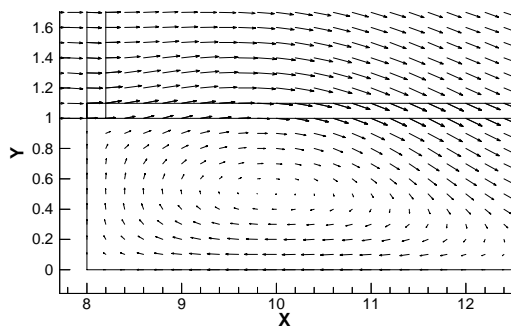


Figura 1 – Vetores velocidade no degrau

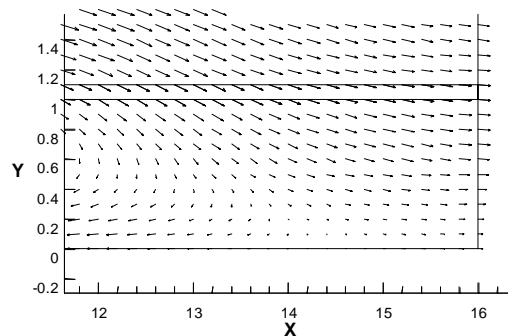


Figura 2 – Vetores velocidade na saída

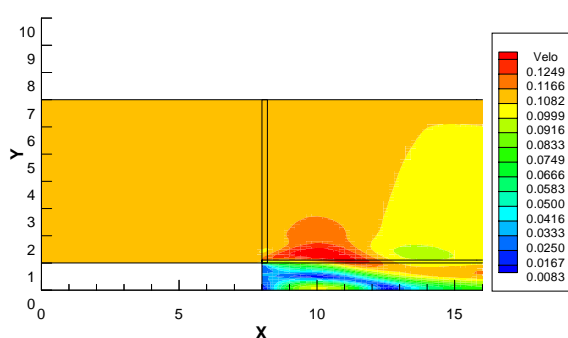


Figura 3 – Campo da magnitude de velocidade

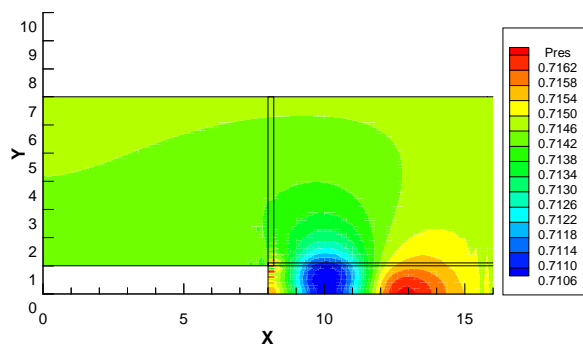


Figura 4 – Campo de pressão

Observa-se que o ponto de recolamento do escoamento na parede se dá a uma distância de 6 vezes a altura do degrau ($x \approx 14$) para a presente formulação, que é não-viscosa com $\Delta t = 0,3$ e com um total de 5555 pontos. No resultado de Ferrari (1996) isso acontece a uma distância de 3 vezes para uma malha única mas bastante refinada de 16821 pontos com $\Delta t = 0,0002$. Por

outro lado, no trabalho de Ortega e Azevedo (1995), baseado em uma formulação de volumes finitos, isso ocorre em torno de 7 vezes a altura do degrau. Esta é a solução típica disponível na literatura para as equações de Euler, onde o descolamento dos vetores velocidade é definido por uma geometria do tipo quina. Na região de recolamento é também visível o aumento de pressão. Próximo à face vertical do degrau, é possível observar algumas oscilações de pressão. Acredita-se que estas oscilações possam ser causadas pela falta de refinamento adequado da malha nesta região, além do procedimento de definição das propriedades na quina. Estas são assumidas como uma média entre as propriedades dos pontos vizinhos, embora este seja um aspecto que mereça mais estudos no futuro. A região de expansão do escoamento, quando este encontra o degrau, induz uma queda de pressão, tanto do escoamento externo quanto do interno, e formação de uma bolha de recirculação cujo centro ($x \approx 10$) é visível na região de baixa pressão, como se pode observar na Fig. 4.

Em seguida, resultados para o mesmo modelo, considerando escoamento interno com degraus simétricos é apresentada, separando a configuração em 4 blocos. Nesta configuração de escoamento interno, a adimensionalização foi feita com base nas propriedades de estagnação do escoamento ($T_0 = 302,5K$), utilizando um valor de velocidades na entrada $U = 43,80 m/s$ ($\approx 0,1376$ adimensionalizado). Os resultados para esta configuração são apresentados nas Figs. 5 a 8.

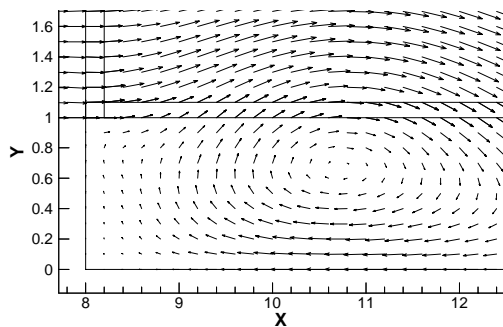


Figura 5 – Vetores velocidade no degrau

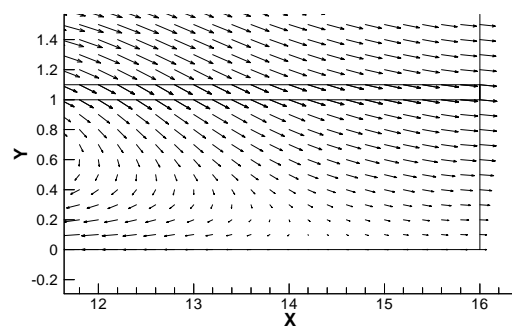


Figura 6 – Vetores velocidade na saída

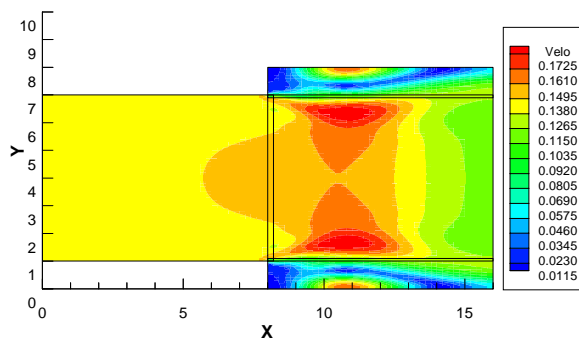


Figura 7 – Campo da magnitude de velocidade

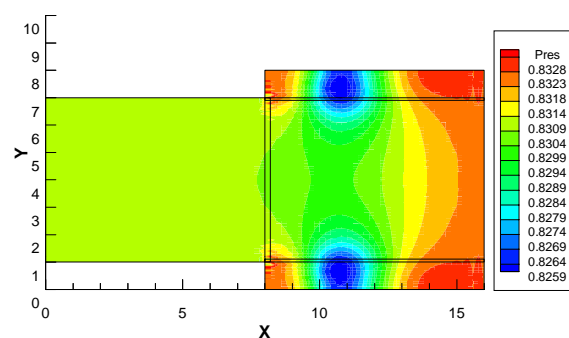


Figura 8 – Campo de pressão

O trabalho também realizou estudos sistemáticos de refinamento de malha, sendo que a Fig. 9 mostra um exemplo do conjunto de malhas mais grossas utilizadas nesta análise.

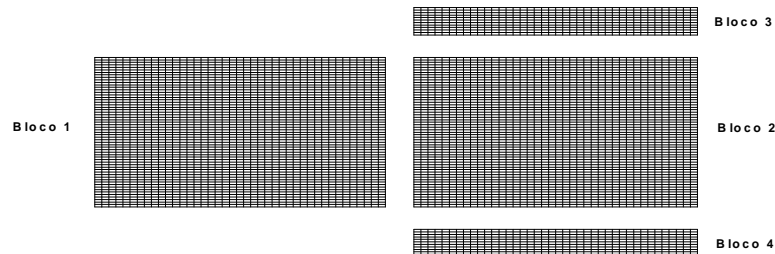


Figura 9 – Esquema da malha de blocos múltiplos

O ponto de recolamento encontra-se a 6,5 vezes a altura do degrau ($x \approx 14,5$), mas a região com aumento de pressão, que se observou na Fig. 4, não está tão bem definida neste caso. Acredita-se que seria necessário estender a região a jusante de forma que as condições de contorno na saída não interfiram no ponto de recolamento. A ordem de grandeza da instabilidade numérica no campo de pressão próximo a quina mostra-se desprezível, sendo esta de ordem abaixo da precisão do método. O centro da bolha de recirculação desloca-se para $x \approx 11$.

Uma vez assegurada a confiabilidade e consistência físicas das soluções apresentadas, buscou-se resolver o escoamento em um canal interno com insuflamento de ar por meio de um jato posicionado na face de entrada, utilizando para tal 3 malhas. A adimensionalização usada foi baseada nas propriedades de estagnação do jato ($T_0 = 302,5K$) e velocidade do jato $U_{jato} = 43,80m/s$ ($\approx 0,1376$ adimensionalizado). Os resultados para esta configuração são apresentados nas Figs. 10 a 13.

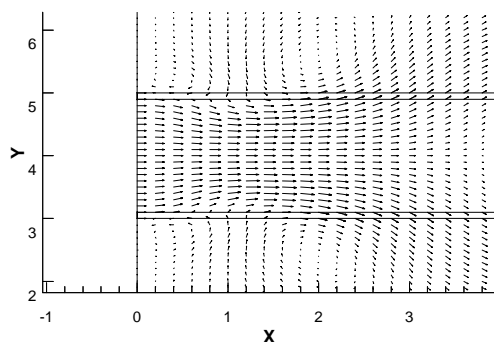


Figura 10 – Vetores velocidade na entrada

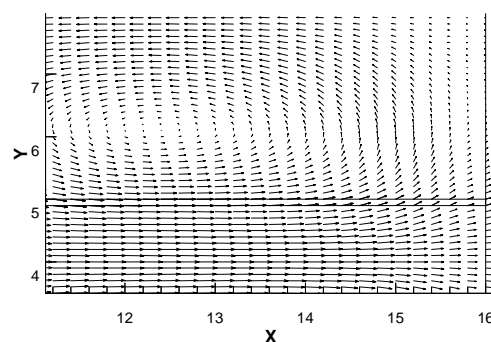


Figura 11 – Vetores velocidade na saída

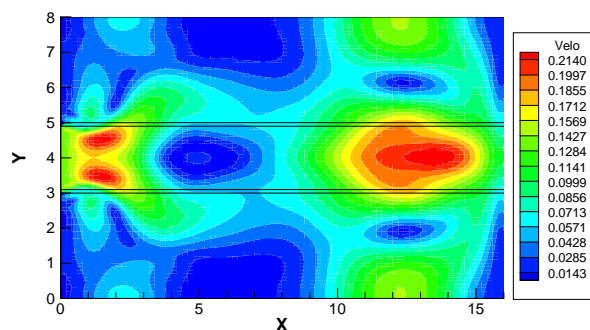


Figura 12 – Campo da magnitude de velocidade

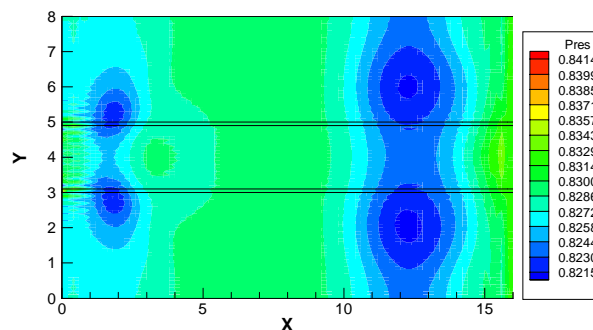


Figura 13 – Campo de pressão

A solução, neste caso, mostra-se não estacionária. Observa-se que os vórtices formados na borda do jato são carregados pelo escoamento, como pode ser visto na Fig. 13. Neste caso, temos dois vórtices sendo formados logo na saída do jato, enquanto dois outros vórtices, bem maiores em tamanho, já se encontram próximos à saída do domínio de cálculo. Nas simulações realizadas, entretanto, a solução evolui continuamente como descrito até que o primeiro par de vórtices alcance a fronteira de saída do domínio de cálculo. Neste instante, ocorre divergência numérica da simulação. Pode-se explicar tal comportamento pelo fato da extensão e altura do canal não serem suficientes para o desenvolvimento do perfil de velocidades. Desta forma, aparentemente, informação é refletida na seção de saída do canal pela imposição de uma condição de contorno muito simplificada para este caso.

Não obstante a instabilidade numérica descrita, o comportamento da solução parece ser qualitativamente correto enquanto o cálculo permanece numericamente estável. A solução resultante reproduz os aspectos físicos esperados e, inclusive, pode-se observar que uma aceleração das velocidades acontece quando os vórtices comprimem o escoamento no centro do canal.

6. COMENTÁRIOS FINAIS

A resolução de escoamentos utilizando a formulação de Euler 2-D, com o uso de blocos múltiplos para um código com aceleração de convergência foi apresentada para configurações simples, a qual mostrou-se fisicamente consistente. Comparação com soluções previamente obtidas no grupo de trabalho e na literatura mostraram-se satisfatórios para o processo de validação do código desenvolvido. As próximas etapas de desenvolvimento da presente capacidade de simulação vão envolver a continuação da validação do código para escoamentos viscosos e a sua utilização para configurações de efetiva complexidade geométrica.

Agradecimentos

O trabalho teve suporte parcial da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES. Agradecimentos são também devidos à Empresa Brasileira de Aeronáutica, EMBRAER, pela oportunidade do primeiro autor continuar a realizar seu curso

de mestrado paralelamente às suas funções na empresa. Os autores também agradecem o suporte parcial do CNPq através do Projeto Integrado de Pesquisa No. 522413/96-0.

REFERÊNCIAS

- Azevedo, J.L.F., 1988, Aerodynamic Flow Simulation Using a Finite Difference Method, Proceedings of the 2nd National Meeting of the Thermal Sciences, Águas de Lindóia, SP, Brasil, pp. 3-6.
- Azevedo, J.L.F., Fico, N.G.C.R., Jr., e Ortega, M.A., 1995, Two-Dimensional and Axisymmetric Nozzle Flow Computations Using the Euler Equations, RBCM – Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, Vol. 17, No. 2, pp. 147-170.
- Azevedo, J.L.F., Strauss, D., e Ferrari, M.A.S., 1997, Viscous Multiblock Simulations of Axisymmetric Launch Vehicle Flows, AIAA Paper 97-2300, Proceedings of the 15th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Part 2, AIAA CP-78, Atlanta, GA, pp. 664-674.
- Beam, R.M., e Warming, R.F., 1978, An Implicit Factored Scheme for the Compressible Navier-Stokes Equations, AIAA Journal, Vol. 16, No. 4, pp. 393-402.
- Ferrari, M.A.S., e Azevedo, J.L.F., 1996, Análise de um Método Numérico Implícito Aplicável a uma Extensa Faixa de Velocidades, Anais do IV Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste – CEM-NNE/96, Vol. 2, Recife, PE, pp. 791-796.
- Ferrari, M.A.S., 1996, Aceleração de Convergência de um Método Numérico Implícito para Escoamentos em Qualquer Regime de Velocidade, Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP.
- Leal da Silva, R., 1999, Simulações Multibloco para Configurações Complexas em Qualquer Regime de Velocidade, Tese de Mestrado (em andamento), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP.
- Martins, R.J., 1994, Um Método de Diferenças Finitas para Simulação de Escoamentos em Qualquer Regime de Velocidade, Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP.
- Ortega, M.A., e Azevedo, J.L.F., 1995, A New Explicit Finite Volume Algorithm for Euler Equations, Anais do 4th Pan-American Congress of Applied Mechanics, Vol. 3, Buenos Aires, Argentina, pp. 101-106.
- Pulliam, T.H., 1986, Artificial Dissipation Models for the Euler Equations, AIAA Journal, Vol. 24, No. 12, pp.1931-1940.
- Strauss, D., e Azevedo, J.L.F., 1997, Multiblock Simulations of Turbulent Viscous Flows over the VLS Afterbody Region, XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Bauru, Brasil (publicação em CD-ROM sem numeração de páginas).

Abstract. *The solution of internal flows in geometrically complex configurations is addressed in the context of structured multiblock grids using a modified version of the Beam and Warming algorithm together with a convergence acceleration method. The flowfields of interest were assumed to be adequately modeled by the 2-D Euler equations. The work presents flow simulations over simple configurations which serve the purpose of validating the proposed methodology. Results are compared to data from the literature and demonstrate that the capability is ready to handle truly complex configurations.*

Keywords: *Multiblock algorithms, Computational aerodynamics, Applied numerical methods, Fluid mechanics, Complex configurations.*