



Instituto Politécnico, Nova Friburgo  
August 30<sup>th</sup> - September 3<sup>rd</sup>, 2004

Paper CRE04 – TF23

## Simulação Numérica de Escoamentos Super e Hipersônicos

Aline Amaral Quintella Abdu<sup>1</sup> e Luís Fernando Figueira da Silva<sup>2</sup>

Dept<sup>o</sup> de Engenharia Mecânica, DEM, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio  
22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>1</sup> alineabdu@yahoo.com.br, <sup>2</sup> luisfer@mec.puc-rio.br (orientador)

O presente trabalho tem por objetivo simular numericamente o comportamento dos escoamentos super e hipersônicos. Para este fim, utiliza-se o software Emc2 [1], gerador de malhas não estruturadas e o código de simulação BRU2D [2].

Inicialmente foram geradas algumas malhas a título de exemplo, com o objetivo de se entender o funcionamento do gerador de malhas não estruturadas. Em seguida, foi estudado o código de simulação de malhas não estruturadas. Este código foi desenvolvido em linguagem Fortran e utiliza as sub-rotinas do CHEMKIN-II [3] para o cálculo das propriedades físico-químicas de misturas de gases.

Antes de iniciar as simulações, no entanto, foi necessário compreender o mecanismo de entrada e de saída de dados do programa. O código requer vários arquivos de entrada, os quais contém os dados do problema e da malha de cálculo utilizada. A malha é especificada sob a forma de tabelas de nós, de conectividade, de vizinhança e de elementos de fronteira. Existem ainda os arquivos de saída, em particular aqueles que permitem a análise da convergência (ou não) do resíduo.

Além disso, um estudo bibliográfico sobre métodos de volumes finitos também foi realizado, com enfoque nos algoritmos do tipo *volume based*. No método dos volumes finitos utilizado, a malha é definida pelas coordenadas  $(x,y)$  dos nós, sendo que os nós que constituem um dado triângulo estão sempre ordenados no sentido anti-horário. As condições de contorno são introduzidas através dos triângulos “fantasmas” (*ghost volumes*), simétricos aos internos.

Foram realizadas algumas simulações com o objetivo de validar o procedimento de refinamento e empobrecimento da malha recentemente desenvolvido [4]. Para isto, foi gerada uma malha relativamente grosseira com o gerador de malhas não estruturadas Emc2. A configuração estudada é a de um hemisfério se deslocando a velocidades supersônicas no ar. Nesta malha faz-se o trabalho de refinamento e empobrecimento adaptativos. O refinamento é realizado onde se encontram gradientes importantes de pressão, temperatura, e número de Mach, e o empobrecimento onde há pequenos gradientes destas grandezas.

Em todos os testes considerou-se um número de Mach igual a 5, com e sem desenvolvimento de camada limite sobre o hemisfério. Foram utilizados dois esquemas de discretização espacial de malha, o de van Leer [5] de primeira ordem, e o de van Leer de segunda ordem de precisão espacial, combinando-se diferentes estratégias de refinamento e empobrecimento. Diversas combinações foram testadas, variando-se o número de iterações entre os refinamentos e empobrecimentos, isto é, utilizando refinamentos e empobrecimentos mais ou menos espaçados.

Para a visualização dos resultados foi utilizado o *software* Tecplot, com o qual foram gerados gráficos para facilitar a interpretação dos resultados. Os resultados destes testes mostram que parece ser mais interessante, de um ponto

de vista do número total de interações necessárias para obter-se convergência, realizar seqüências de refinamentos e de empobrecimentos separadas por um pequeno número de interações, do que esperar que ocorra convergência entre refinamentos sucessivos. Cabe ressaltar que esta prática pouco eficiente era a usualmente adotada até o momento.

A figura 1 mostra a malha inicial, que contém 211 nós e 360 volumes e o campo de pressão correspondente a esta malha grosseira. A geometria considerada é de um hemisfério se deslocando em um escoamento de ar cujo número de Mach é 5. Nesta figura também é mostrada a malha resultante de três refinamentos, cada qual precedido de dois empobrecimentos de malha e o campo de pressão resultante. Esta malha possui 1939 nós e 3720 volumes. A melhoria na resolução das ondas de choque e de expansão é claramente visível.

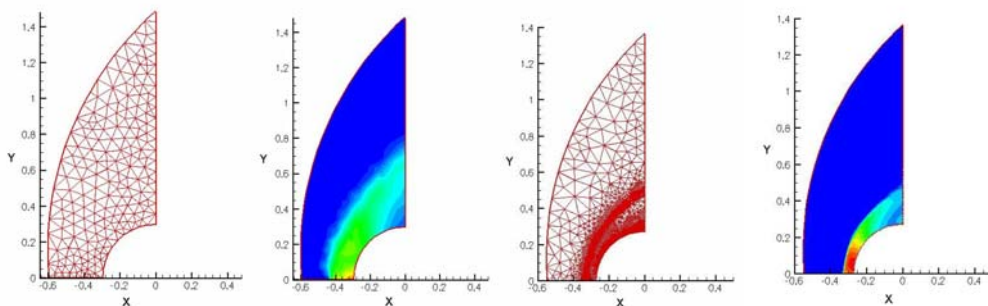


Figura 1 – Malhas inicial e refinada, e seus campos de pressão correspondentes.

## REFERÊNCIAS

- [1] Hecht, F., Saltel, E., EMC2 Um Logiciel d'édition de Maillages et de Contours Bidimensionnels, Inria, Le Chesnay, 1990.
- [2] Figueira da Silva, L. F., Azevedo, J. L. F., Korzenowski, H., Unstructured Adaptive Grid Flow Simulations of Inert and Reactive Gas Mixtures, *Journal of Computational Physics*, 160(2) pp. 522–540, 2000.
- [3] Kee, R. J., Rupley, F. M., Miller, J. A., CHEMKIN-II: A Fortran Chemical Kinetics Packages for the Analysis of Gás Phase Chemical Kinetics, Sandia National Laboratories, 1991.
- [4] Walter, M. A. T., “Estudo Numérico da Estabilização de Ondas de Detonação em Torno de Corpos de Revolução se Deslocando em Misturas Gasosas, Dissertação de Mestrado, DEM – PUC-Rio, 2004.
- [5] Hirsch, C., Numerical Computational of Internal and External Flows, Wiley, 1990.