

# Relatório de algumas observações e resultados do Mach2D-5.8.2.1-Revisão 21 do código.

Guilherme Bertoldo

6 de Agosto de 2012

## Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Modelagem numérica</b>	<b>2</b>
2.1	Geração da malha . . . . .	2
2.1.1	Geração dos nós do contorno norte . . . . .	2
2.1.2	Geração dos nós do contorno sul . . . . .	2
2.1.3	Geração dos nós intermediários . . . . .	2
2.2	Aproximações para os termos geométricos . . . . .	3
2.2.1	Cálculo de $x$ e $y$ nos centroides . . . . .	3
2.3	Aproximações para as codições de contorno . . . . .	4
2.3.1	Contorno sul . . . . .	4
2.3.2	Contorno leste . . . . .	4
2.3.3	Contorno oeste . . . . .	5
2.3.4	Canto sudoeste . . . . .	5
2.4	Extrapolações das velocidades nodais para os volumes fictícios . . . . .	5
2.4.1	Contorno sul . . . . .	5
2.4.2	Contorno leste . . . . .	5
2.4.3	Contorno oeste . . . . .	6
2.5	Extrapolação das temperaturas nodais para os volumes fictícios . . . . .	6
2.6	Extrapolação das pressões nodais para os volumes fictícios . . . . .	6
2.7	Coefficientes do SIMPLEC para as faces dos contornos . . . . .	6
2.7.1	Contorno sul . . . . .	6
2.7.2	Contorno leste . . . . .	6
2.7.3	Contorno oeste . . . . .	6
2.8	Resolução dos sistemas lineares . . . . .	6
2.9	Resíduos dos sistemas lineares . . . . .	7
2.10	Estimativa do erro de iteração . . . . .	7
2.11	Aproximações para as grandezas de interesse . . . . .	7
2.11.1	Distribuição de temperatura . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Testes</b>	<b>7</b>
3.1	Teste 1 . . . . .	7
3.2	Teste 2 . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Teste 3</b>	<b>14</b>

## 1 Introdução

Uma descrição inicial de como deveria ser o código Mach2D-5.8.2.1 foi feita na

*“Documentação do código Mach-2D. escoamento bidimensional externo sobre a parte frontal de um corpo de simetria plana ou axial. Euler. Versão: 5.8.2.1. Revisão 001(do texto). Julho de 2012”.*

A tentativa de implementar esta descrição do código iniciou-se com uma revisão do código já existente (revisão 6). Ao longo da implementação, novas revisões foram geradas e percebeu-se que nem todas as características listadas na documentação supracitada poderiam ser utilizadas. Este relatório apresenta o que foi realmente implementado no código Mach2D-5.8.2.1 até a sua revisão 21 e alguns resultados obtidos para o escoamento de ar ( $M_\infty = 4$ ) sobre um cone com semi-ângulo de  $10^\circ$ .

## 2 Modelagem numérica

### 2.1 Geração da malha

O método de geração da malha foi modificado e está como descrito a seguir.

#### 2.1.1 Geração dos nós do contorno norte

$$x(\xi) = l_a \left( \frac{\xi - \xi_i}{\xi_f - \xi_i} \right)^{(a_\xi)_n} + l_r - l_a, \quad \xi_i \leq \xi \leq \xi_f \quad (1)$$

$$y(\xi) = l_b \sqrt{1 - \left( \frac{x - l_r}{l_a} \right)^2}, \quad (2)$$

onde  $(a_\xi)_n$  é um parâmetro livre. Se  $(a_\xi)_n = 1$ , então há uma distribuição uniforme em  $x$ , se  $(a_\xi)_n > 1$ , há uma concentração de nós próximos à origem.

#### 2.1.2 Geração dos nós do contorno sul

$$x(\xi) = l_r \left( \frac{\xi - \xi_i}{\xi_f - \xi_i} \right)^{(a_\xi)_s}, \quad \xi_i \leq \xi \leq \xi_f \quad (3)$$

$$y(\xi) = g(x), \quad (4)$$

onde  $(a_\xi)_s$  é um parâmetro livre idêntico a  $(a_\xi)_n$ .

#### 2.1.3 Geração dos nós intermediários

Há três possibilidades para a geração dos nós intermediários:

1. **Distribuição uniforme** Sejam  $(x_i, y_i)$  e  $(x_f, y_f)$  pontos do contorno sul e norte, respectivamente. A distribuição de nós no segmento de reta que une estes pontos é dada por

$$x(\eta) = (x_f - x_i) \left( \frac{\eta - \eta_i}{\eta_f - \eta_i} \right) + x_i, \quad \eta_i \leq \eta \leq \eta_f, \quad (5)$$

$$y(\eta) = (y_f - y_i) \left( \frac{\eta - \eta_i}{\eta_f - \eta_i} \right) + y_i, \quad \eta_i \leq \eta \leq \eta_f. \quad (6)$$

2. **Distribuição tipo progressão geométrica** Sejam  $(x_i, y_i)$  e  $(x_f, y_f)$  pontos do contorno sul e norte, respectivamente. A distribuição de nós no segmento de reta que une estes pontos é dada por

$$\psi_k = \frac{(\psi_f - \psi_i)}{r} \left( \frac{q^{k-1} - 1}{q - 1} \right) + \psi_i, \quad 1 \leq k \leq n, \quad \psi \in \{x, y\}, \quad (7)$$

onde  $n$  representa o número de volumes entre os contornos sul e norte,

$$r = \frac{\sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2}}{a_1}, \quad (8)$$

$a_1$  é a largura dos volumes contíguos ao contorno sul e  $q$  é obtido através da solução da equação

$$h(q) = q^n + r(1 - q) - 1 = 0. \quad (9)$$

A solução desta equação é obtida iterativamente através do método de Newton:

$$q_{i+1} = q_i - \frac{h(q_i)}{h'(q_i)}, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

onde  $q_1 = 0.5$  se  $n > r$  e  $q_1 = 2$  caso contrário.

3. **Distribuição tipo lei de potência.** Sejam  $(x_i, y_i)$  e  $(x_f, y_f)$  pontos do contorno sul e norte, respectivamente. A distribuição de nós no segmento de reta que une estes pontos é dada por

$$x(\eta) = (x_f - x_i) \left( \frac{\eta - \eta_i}{\eta_f - \eta_i} \right)^{\alpha_\eta} + x_i, \quad \eta_i \leq \eta \leq \eta_f, \quad (11)$$

$$y(\eta) = (y_f - y_i) \left( \frac{\eta - \eta_i}{\eta_f - \eta_i} \right)^{\alpha_\eta} + y_i, \quad \eta_i \leq \eta \leq \eta_f, \quad (12)$$

onde o coeficiente  $\alpha_\eta$  é ajustado pela fórmula

$$\alpha_\eta = \frac{\log \left( \frac{\sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2}}{a_1} \right)}{\log(\eta_f - \eta_i)} \quad (13)$$

de modo que a largura dos volumes contíguos ao contorno sul seja sempre  $a_1$ .

## 2.2 Aproximações para os termos geométricos

As aproximações a seguir são baseadas nas coordenadas dos vértices de um volume de controle genérico do sistema coordenado  $\xi\eta$ , conforme a Fig. 1.

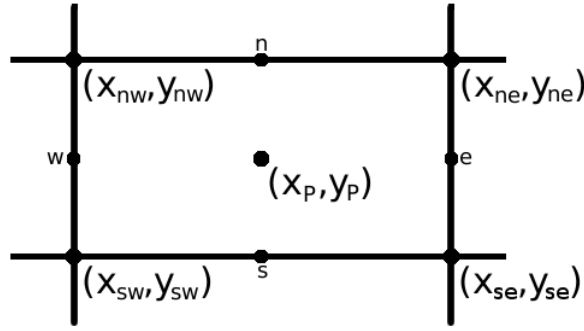


Figura 1: Volume de controle genérico P no sistema coordenado curvilíneo

### 2.2.1 Cálculo de $x$ e $y$ nos centroides

Além da aproximação para as coordenadas dos centroides dos volumes de controle reais com base na média aritmética das coordenadas dos vértices dos contornos, *i.e.*,

$$\psi_P = \frac{\psi_{ne} + \psi_{nw} + \psi_{se} + \psi_{sw}}{4} + \mathcal{O}(\Delta\xi^2) + \mathcal{O}(\Delta\eta^2), \quad \psi \in \{x, y\}, \quad (14)$$

também está implementado um método que utiliza uma média ponderada. Neste caso, o quadrilátero é dividido em dois triângulos formados pelos vértices  $(sw, se$  e  $ne)$  e  $(sw, nw$  e  $ne)$ . As coordenadas dos centroides dos dois triângulos são calculadas através da média aritmética das coordenadas dos seus vértices e em seguida as coordenadas do centroide do quadrilátero são calculadas com a média ponderada dos centroides dos triângulos, utilizando como peso a área de cada triângulo, ou seja,

$$\psi_P = \frac{\frac{(\psi_{ne} + \psi_{se} + \psi_{sw})}{3} A_1 + \frac{(\psi_{ne} + \psi_{nw} + \psi_{sw})}{3} A_2}{A_1 + A_2}, \quad \psi \in \{x, y\}, \quad (15)$$

onde  $A_1$  é a área do triângulo formado pelos vértices  $sw, se$  e  $ne$ , *i.e.*,

$$A_1 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ (x_{se} - x_{sw}) & (y_{se} - y_{sw}) & 0 \\ (x_{ne} - x_{sw}) & (y_{ne} - y_{sw}) & 0 \end{vmatrix} \quad (16)$$

e  $A_2$  é a área do triângulo formado pelos vértices  $sw, nw$  e  $ne$ , *i.e.*,

$$A_2 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ (x_{ne} - x_{sw}) & (y_{ne} - y_{sw}) & 0 \\ (x_{nw} - x_{sw}) & (y_{nw} - y_{sw}) & 0 \end{vmatrix}. \quad (17)$$

A ordem do erro desta aproximação ainda não foi avaliada.

## 2.3 Aproximações para as codições de contorno

### 2.3.1 Contorno sul

- $\hat{\mathbf{n}} \cdot \nabla p = 0$

Ao invés de

$$A_p^{p'} = \frac{1}{\Delta\eta}, \quad A_N^{p'} = \frac{-1}{\Delta\eta}, \quad \text{demais} \quad A^{p'} = 0, \quad b_p^{p'} = \frac{p_N^* - p_P^*}{\Delta\eta} - \frac{\beta_n p_{NE}^m + p_E^m - p_{NW}^m - p_W^m}{4\Delta\xi}, \quad (18)$$

utilizou-se

$$A_p^{p'} = \frac{1}{\Delta\eta}, \quad A_N^{p'} = \frac{-1}{\Delta\eta}, \quad \text{demais} \quad A^{p'} = 0, \quad b_p^{p'} = \frac{p_N^* - p_P^*}{\Delta\eta}. \quad (19)$$

- $\hat{\mathbf{n}} \cdot \nabla T = 0$

Ao invés de

$$A_p^T = \frac{1}{\Delta\eta}, \quad A_N^T = \frac{-1}{\Delta\eta}, \quad \text{demais} \quad A^T = 0, \quad b_p^T = -\frac{\beta_n T_{NE}^m + T_E^m - T_{NW}^m - T_W^m}{4\Delta\xi}, \quad (20)$$

utilizou-se

$$A_p^T = \frac{1}{\Delta\eta}, \quad A_N^T = \frac{-1}{\Delta\eta}, \quad \text{demais} \quad A^T = 0, \quad b_p^T = 0. \quad (21)$$

- $\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{u} = 0$

Ao invés de

$$A_p^u = 1, \quad A_N^u = 1, \quad \text{demais} \quad A^u = 0, \quad b_p^u = 2 \frac{(x_\xi)_n}{(y_\xi)_n} v_n^m \quad (22)$$

$$A_p^v = 1, \quad A_N^v = 1, \quad \text{demais} \quad A^v = 0, \quad b_p^v = 2 \frac{(y_\xi)_n}{(x_\xi)_n} u_n^m. \quad (23)$$

utilizou-se uma extrapolação simples:

$$A_p^u = 1, \quad A_N^u = -1, \quad \text{demais} \quad A^u = 0, \quad b_p^u = 0, \quad (24)$$

$$A_p^v = 1, \quad A_N^v = -1, \quad \text{demais} \quad A^v = 0, \quad b_p^v = 0. \quad (25)$$

Esta mudança foi feita porque observou-se que ao se utilizar as aproximações (22) e (23) obtinha-se um campo de velocidade nulo sobre a superfície do corpo. Além disso, as aproximações (22) e (23) oferecem problemas quando  $x_\xi$  ou  $y_\xi$  são pequenos.

### 2.3.2 Contorno leste

Ao invés de

$$A_p^\phi = \frac{1}{\Delta\xi}, \quad A_w^\phi = \frac{-1}{\Delta\xi}, \quad \text{demais} \quad A^\phi = 0, \quad b_p^\phi = -\frac{V_w \phi_N^m + \phi_{NW}^m - \phi_s^m - \phi_{sw}^m}{4\Delta\eta}, \quad \phi \in \{T, u, v\}, \quad (26)$$

utilizou-se

$$A_p^\phi = \frac{1}{\Delta\xi}, \quad A_w^\phi = \frac{-1}{\Delta\xi}, \quad \text{demais} \quad A^\phi = 0, \quad b_p^\phi = 0, \quad \phi \in \{T, u, v\}, \quad (27)$$

No caso da pressão, ao invés de

$$A_p^{p'} = \frac{1}{\Delta\xi}, \quad A_w^{p'} = \frac{-1}{\Delta\xi}, \quad \text{demais} \quad A^{p'} = 0, \quad b_p^{p'} = -\frac{p_P^* - p_W^*}{\Delta\xi} - \frac{V_w p_N^m + p_{NW}^m - p_s^m - p_{sw}^m}{4\Delta\eta}. \quad (28)$$

utilizou-se

$$A_p^{p'} = \frac{1}{\Delta\xi}, \quad A_w^{p'} = \frac{-1}{\Delta\xi}, \quad \text{demais} \quad A^{p'} = 0, \quad b_p^{p'} = -\frac{p_P^* - p_W^*}{\Delta\xi}. \quad (29)$$

### 2.3.3 Contorno oeste

Ao invés de

$$A_P^\phi = \frac{1}{\Delta\xi}, \quad A_E^\phi = \frac{-1}{\Delta\xi}, \quad \text{demais} \quad A^\phi = 0, \quad b_P^\phi = -\frac{\beta_e}{\alpha_e} \frac{\phi_{NE}^m + \phi_N^m - \phi_{SE}^m - \phi_S^m}{4\Delta\eta}, \quad \phi \in \{T, u\} \quad (30)$$

e

$$A_P^{p'} = \frac{1}{\Delta\xi}, \quad A_E^{p'} = \frac{-1}{\Delta\xi}, \quad \text{demais} \quad A^{p'} = 0, \quad b_P^{p'} = \frac{p_E^* - p_P^*}{\Delta\xi} - \frac{\beta_e}{\alpha_e} \frac{p_{NE}^m + p_N^m - p_{SE}^m - p_S^m}{4\Delta\eta}. \quad (31)$$

utilizou-se

$$A_P^\phi = \frac{1}{\Delta\xi}, \quad A_E^\phi = \frac{-1}{\Delta\xi}, \quad \text{demais} \quad A^\phi = 0, \quad b_P^\phi = 0, \quad \phi \in \{T, u\} \quad (32)$$

e

$$A_P^{p'} = \frac{1}{\Delta\xi}, \quad A_E^{p'} = \frac{-1}{\Delta\xi}, \quad \text{demais} \quad A^{p'} = 0, \quad b_P^{p'} = \frac{p_E^* - p_P^*}{\Delta\xi}. \quad (33)$$

### 2.3.4 Canto sudoeste

Ao invés de

$$A_P^{p'} = 1, \quad \text{demais} \quad A^{p'} = 0, \quad b_P^{p'} = \frac{p_N^m + p_E^m + p_{NE}^m}{3} - \frac{p_N^* + p_E^* + p_{NE}^*}{3}. \quad (34)$$

utilizou-se

$$A_P^{p'} = 1, \quad \text{demais} \quad A^{p'} = 0, \quad b_P^{p'} = 0. \quad (35)$$

O mesmo foi feito para os demais cantos.

Observação: tentou-se utilizar uma fórmula de segunda ordem para extrapolação para os fictícios. No canto sudoeste, por exemplo, utilizou-se

$$\phi_P = 4\phi_{NE} - \phi_{NN} - \phi_{EE} - \phi_{NNEE}. \quad (36)$$

```

-----
| NN | NNE | NNEE |
-----
| N  | NE  | NEE  |
-----
| P  | E   | EE   |
-----

```

Entretanto, os resultados obtidos foram muito piores que os da extrapolação simples, isto é,

$$\phi_P = \frac{\phi_{NE} + \phi_N + \phi_E}{3}. \quad (37)$$

## 2.4 Extrapolações das velocidades nodais para os volumes fictícios

### 2.4.1 Contorno sul

Ao invés de

$$u_P = 2 \frac{(x_\xi)_n}{(y_\xi)_n} v_n - u_N + \mathcal{O}(\Delta\eta^2) \quad (38)$$

e

$$v_P = 2 \frac{(y_\xi)_n}{(x_\xi)_n} u_n - v_N + \mathcal{O}(\Delta\eta^2) \quad (39)$$

utilizou-se

$$u_P = u_N + \mathcal{O}(\Delta\eta) \quad (40)$$

e

$$v_P = v_N + \mathcal{O}(\Delta\eta). \quad (41)$$

### 2.4.2 Contorno leste

Ao invés de

$$\phi_P = \phi_W - \Delta\xi \frac{V_w}{U_w} \frac{\phi_N + \phi_{NW} - \phi_S - \phi_{SW}}{4\Delta\eta} + \mathcal{O}(\Delta\xi^2) + \mathcal{O}(\Delta\eta^2), \quad \phi \in \{u, v\}, \quad (42)$$

utilizou-se

$$\phi_P = \phi_W, \quad \phi \in \{u, v\}. \quad (43)$$

### 2.4.3 Contorno oeste

Ao invés de

$$u_P = u_E - \Delta\xi \frac{\beta_e}{\alpha_e} \frac{u_N + u_{NE} - u_S - u_{SE}}{4\Delta\eta} + \mathcal{O}(\Delta\xi^2) + \mathcal{O}(\Delta\eta^2), \quad (44)$$

utilizou-se

$$u_P = u_E. \quad (45)$$

## 2.5 Extrapolação das temperaturas nodais para os volumes fictícios

Estas extrapolações são desnecessárias.

## 2.6 Extrapolação das pressões nodais para os volumes fictícios

Estas extrapolações são desnecessárias.

## 2.7 Coeficientes do SIMPLEC para as faces dos contornos

### 2.7.1 Contorno sul

Ao invés de

$$d_n^u = (d_P^u)_N + \mathcal{O}(\Delta\eta), \quad (46)$$

$$d_n^v = (d_P^v)_N + \mathcal{O}(\Delta\eta), \quad (47)$$

$$d_n^V = 0, \quad (48)$$

utilizou-se

$$d_n^u = (d_n^u)_N + \mathcal{O}(\Delta\eta), \quad (49)$$

$$d_n^v = (d_n^v)_N + \mathcal{O}(\Delta\eta), \quad (50)$$

$$d_n^V = 0. \quad (51)$$

### 2.7.2 Contorno leste

Ao invés de

$$d_e^u = d_P^u + \mathcal{O}(\Delta\xi), \quad (52)$$

$$d_e^v = d_P^v + \mathcal{O}(\Delta\xi), \quad (53)$$

utilizou-se

$$d_e^u = (d_e^u)_W + \mathcal{O}(\Delta\xi), \quad (54)$$

$$d_e^v = (d_e^v)_W + \mathcal{O}(\Delta\xi). \quad (55)$$

### 2.7.3 Contorno oeste

Ao invés de

$$d_e^u = (d_P^u)_E + \mathcal{O}(\Delta\xi), \quad (56)$$

$$d_e^v = (d_P^v)_E + \mathcal{O}(\Delta\xi), \quad (57)$$

utilizou-se

$$d_e^u = (d_e^u)_E + \mathcal{O}(\Delta\xi). \quad (58)$$

$$d_e^v = (d_e^v)_E + \mathcal{O}(\Delta\xi). \quad (59)$$

## 2.8 Resolução dos sistemas lineares

Os sistemas lineares são resolvidos apenas com o método MSI.

## 2.9 Resíduos dos sistemas lineares

Ao invés de

$$R_{L_1} = R_{L_1}^u + R_{L_1}^v + R_{L_1}^T + R_{L_1}^{p'}, \quad (60)$$

onde  $R_{L_1}^\phi$  é a norma  $L_1$  do resíduo de cada sistema linear

$$R_{L_1}^\phi = \sum_P \left| A_P^\phi \phi_P + \sum_{nb} A_{nb}^\phi \phi_{nb} - b_P^\phi \right| \quad \phi \in \{p', T, u, v\}, \quad (61)$$

utilizou-se

$$R_{L_1} = \frac{R_{L_1}^u}{\|b^u\|_{L_1}} + \frac{R_{L_1}^v}{\|b^v\|_{L_1}} + \frac{R_{L_1}^T}{\|b^T\|_{L_1}} + R_{L_1}^{p'}, \quad (62)$$

onde

$$\|b^\phi\|_{L_1} = \sum_P |b_P^\phi| \quad (63)$$

e a soma é feita sobre todos os volumes reais.

## 2.10 Estimativa do erro de iteração

Ao invés do estimador de Ferziger e Peric[1], o erro de iteração é estimado com base no resíduo  $R_{L_1}$ .

## 2.11 Aproximações para as grandezas de interesse

### 2.11.1 Distribuição de temperatura

Ao invés de

$$T_{ne} = \frac{T_P + T_N + T_E + T_{NE}}{4} + \mathcal{O}(\Delta\xi^2) + \mathcal{O}(\Delta\eta^2) \quad (64)$$

e

$$T_{se} = \frac{T_P + T_N + T_W + T_{NW}}{4} + \mathcal{O}(\Delta\xi^2) + \mathcal{O}(\Delta\eta^2). \quad (65)$$

utilizou-se

$$T_{ne} = \frac{T_N + T_E + T_{NE}}{3} + \mathcal{O}(\Delta\xi) + \mathcal{O}(\Delta\eta) \quad (66)$$

e

$$T_{se} = \frac{T_N + T_W + T_{NW}}{3} + \mathcal{O}(\Delta\xi) + \mathcal{O}(\Delta\eta). \quad (67)$$

O mesmo vale para a pressão nos cantos.

## 3 Testes

Esta seção apresenta os resultados de três testes do escoamento de ar sobre um cone com semi-ângulo de  $10^\circ$  no regime supersônico com  $M_\infty = 4$  realizados com o código Mach2D-5.8.2.1-Revisão-21. Os dois primeiros testes utilizam o esquema UDS e diferem entre si apenas pela geometria dos contornos. O terceiro teste é semelhante ao primeiro, diferindo apenas pelo esquema numérico, que no terceiro teste é UDS com correção adiada para o CDS.

### 3.1 Teste 1

Neste primeiro teste, realizou-se um conjunto de simulações (S0036) com diversas malhas. A malha mais grossa (entitulada S01) tem 30x30 volumes e a mais fina (entitulada S06) tem 960x960 volumes. O contorno do domínio de cálculo é mostrado na Fig. 2. Os parâmetros numéricos deste conjunto de simulações são mostrados na Fig. 23. O intervalo de tempo  $\Delta t$  foi variável de  $\Delta t_1$  a  $\Delta t_2$ , onde

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta t_2}{100} \quad (68)$$

e

$$\Delta t_2 = \frac{\sqrt{\frac{l_a l_b}{2n_x n_y}}}{u_\infty}. \quad (69)$$

O significado de  $l_a$  e  $l_b$  é ilustrado na Fig. 3.  $n_x$  e  $n_y$  representam, respectivamente, o número de volumes nas direções  $\xi$  e  $\eta$  e  $u_\infty$  representa a velocidade da corrente-livre.

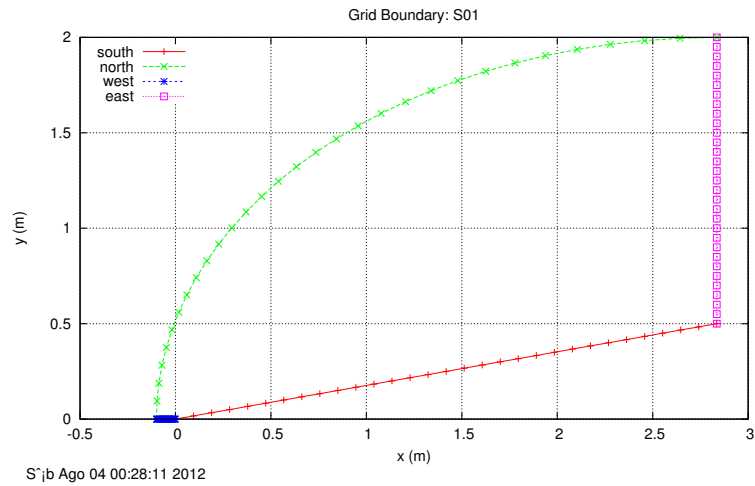


Figura 2: Contorno do domínio de cálculo para o conjunto de simulações S0036.

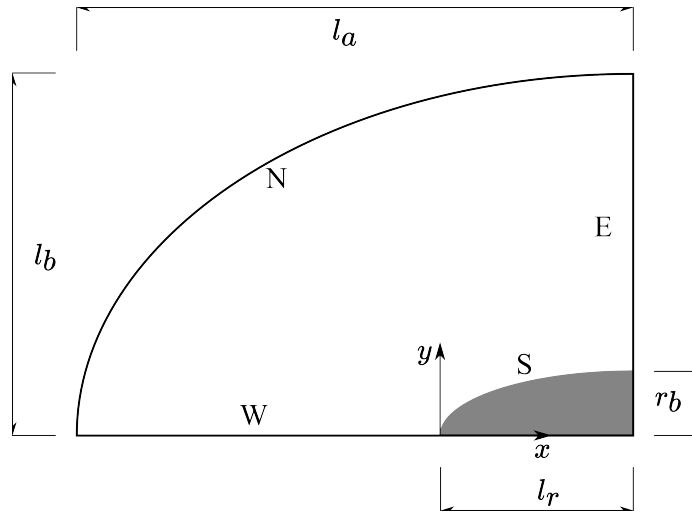


Figura 3: Esquema ilustrativo do domínio de cálculo.

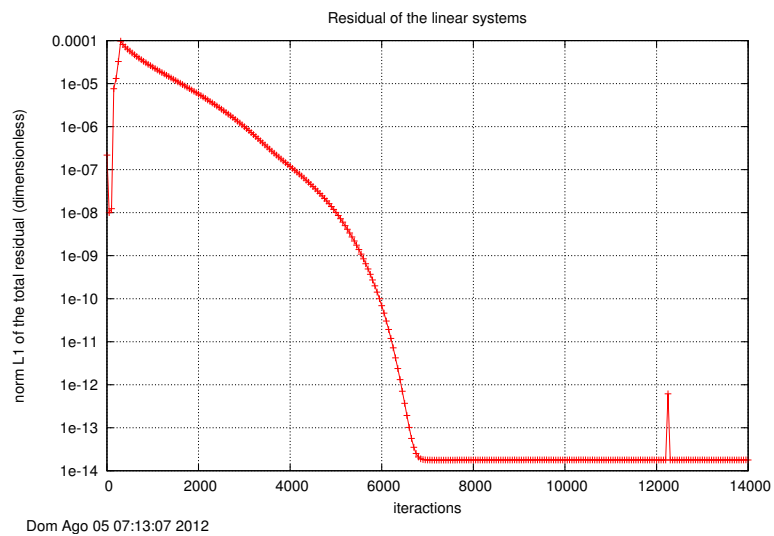


Figura 4: Variação do resíduo dos sistemas lineares ao longo das iterações, conjunto S0036, malha S07.

O resíduo dos sistemas lineares é mostrado na Fig. 4



As variáveis de interesse são o coeficiente de arrasto de pressão frontal  $C_{Dr}^p$  e a distribuição de pressão, temperatura, massa específica e velocidades sobre a superfície do cone.

Os resultados para  $C_{Dr}^p$  nas diversas malhas são mostrados na Fig. 5. Esta figura também mostra a ordem aparente  $p_U$ , a ordem assintótica  $p_L$ , as soluções extrapoladas com o extrapolador de Richardson, a solução convergente e sua estimativa de erro e a estimativa de erro do estimador GCI, bem como o tempo de simulação. Pode-se observar que a ordem aparente aumenta com o refino da malha, mas ainda está distante da ordem assintótica. Além disso, observa-se que o tempo computacional aumenta cerca de uma ordem de grandeza para cada refino de malha, o que impõe uma limitação sobre o aumento dos refinamentos. Sims[2] obteve  $C_{Dr}^p = 7.939344 \times 10^{-2}$  a partir da equação de Taylor-Maccoll, que difere cerca de 0.03% da solução extrapolada com o estimador convergente.

	N	Cdfp	r	psi	log(psi)	pU	pL	phi(pU)	phi(pL)	phi_C	U_C	Ugci	CPU time(s)
S01	30	7.8520E-02					1						2.2041E+00
S02	60	7.8730E-02	2				1	7.8939E-02	7.9088E-02	7.9539E-02	4.5038E-04	6.2757E-04	1.3017E+01
S03	120	7.8909E-02	2	1.1661E+00	6.6730E-02	2.2167E-01	1	7.9989E-02	7.9088E-02	7.9539E-02	4.5038E-04	5.3819E-04	5.7288E+01
S04	240	7.9069E-02	2	1.1212E+00	4.9676E-02	1.6502E-01	1	8.0389E-02	7.9229E-02	7.9809E-02	5.8019E-04	4.8002E-04	3.1556E+02
S05	480	7.9189E-02	2	1.3333E+00	1.2493E-01	4.1499E-01	1	7.9549E-02	7.9309E-02	7.9429E-02	1.2003E-04	3.6003E-04	1.7342E+03
S06	960	7.9267E-02	2	1.5303E+00	1.8476E-01	6.1377E-01	1	7.9415E-02	7.9346E-02	7.9381E-02	3.4738E-05	2.3527E-04	1.1009E+04
S07	1920	7.9313E-02	2	1.7105E+00	2.3314E-01	7.7446E-01	1	7.9378E-02	7.9359E-02	7.9369E-02	9.3383E-06	1.3754E-04	7.6334E+04

Figura 5:  $C_{Dr}^p$  do conjunto de simulações S0036, soluções extrapoladas e estimativas de erro.

Abaixo são mostrados alguns valores de  $u$ ,  $v$ ,  $p$ ,  $T$  e  $\rho$  sobre a superfície do cone obtidos na malha mais fina (S07) juntamente com os resultados de Sims. Os valores de  $x$  são uniformemente distribuídos e as variáveis foram interpoladas nestes pontos com um polinômio de grau dois. Deveria se esperar que todas as propriedades listadas abaixo fossem constantes ao longo da superfície do cone, entretanto, observa-se que elas variam. Estas variações são melhor visualizadas nas Figs. 6-8. Destas figuras se observa que a variação é mais intensa na ponta do cone, o que ocorre devido à onda de choque. Observou-se que esta enorme variação é reduzida se o comprimento do contorno oeste for reduzido a zero. Os resultados deste teste são mostrados na próxima seção.

S07 - Euler

	x	u	v	p	T	ro
7.08910227452225E-02	1.32379429093132E+03	2.33045343537400E+02	1.88791605577442E+05	3.60265396630814E+02	1.82590523138521E+00	
2.12673068235667E-01	1.32379010447236E+03	2.33062346675165E+02	1.88793973603214E+05	3.60267177683118E+02	1.82591910699883E+00	
3.54455113726112E-01	1.32378750946998E+03	2.33070633747628E+02	1.88796626381093E+05	3.60268875001403E+02	1.82593616082456E+00	
4.96237159216557E-01	1.32378517968107E+03	2.33077201223717E+02	1.88799440650566E+05	3.60270619616831E+02	1.82595453662381E+00	
6.38019204707002E-01	1.32378288515479E+03	2.33083304652397E+02	1.88802387673739E+05	3.60272423945137E+02	1.82597389350906E+00	
7.79801250197447E-01	1.32378054973266E+03	2.33089372165268E+02	1.88805454141475E+05	3.60274288817376E+02	1.82599409852723E+00	
9.21583295687892E-01	1.32377813991949E+03	2.33095598956542E+02	1.88808631762319E+05	3.60276212615442E+02	1.82601507966739E+00	
1.06336534117834E+00	1.32377563819350E+03	2.33102092646434E+02	1.88811914186471E+05	3.60278192855076E+02	1.82603678808791E+00	
1.20514738666878E+00	1.32377303420009E+03	2.33108922322234E+02	1.88815295624713E+05	3.60280226448046E+02	1.82605918343080E+00	
1.34692943215923E+00	1.32377032126510E+03	2.33116138754448E+02	1.88818769980736E+05	3.60282309611469E+02	1.82608222588999E+00	
1.48871147764967E+00	1.32376749486725E+03	2.33123784071924E+02	1.88822330123236E+05	3.60284437628060E+02	1.82610587038733E+00	
1.63049352314012E+00	1.32376455196099E+03	2.33131897050997E+02	1.88825967130948E+05	3.60286604495299E+02	1.82613006105011E+00	
1.77227556863056E+00	1.32376149073207E+03	2.33140516445367E+02	1.88829669402958E+05	3.60288802451755E+02	1.82615472500873E+00	
1.91405761412101E+00	1.32375831061935E+03	2.33149683451804E+02	1.88833421536128E+05	3.60291021344678E+02	1.82617976474719E+00	
2.05583965961145E+00	1.32375501254240E+03	2.33159443886080E+02	1.88837202857032E+05	3.60293247782675E+02	1.82620504820226E+00	
2.19762170510190E+00	1.32375159932720E+03	2.33169850438525E+02	1.88840985465388E+05	3.60295463993602E+02	1.82623039563343E+00	
2.33940375059234E+00	1.32374807635413E+03	2.33180965321472E+02	1.88844731598511E+05	3.60297646275983E+02	1.82625556198777E+00	
2.48118579608279E+00	1.32374445247629E+03	2.33192863655520E+02	1.88848390061387E+05	3.60299762889398E+02	1.82628021307362E+00	
2.62296784157323E+00	1.32374074127271E+03	2.33205638055576E+02	1.88851891384202E+05	3.60301771171951E+02	1.82630389334682E+00	
2.76474988706368E+00	1.32373696271111E+03	2.33219405075643E+02	1.88855141277597E+05	3.60303613600584E+02	1.82632598259454E+00	
Sims						
-----	1.323695E+03	2.334032E+02	1.889207E+05	3.607232E+02	1.824834E+00	

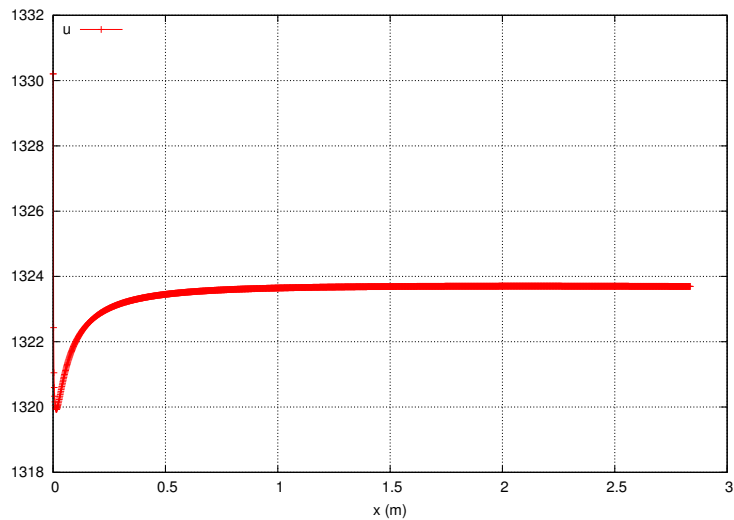


Figura 6: Variação de  $u$  ao longo da superfície do cone, conjunto S0036, malha S07.

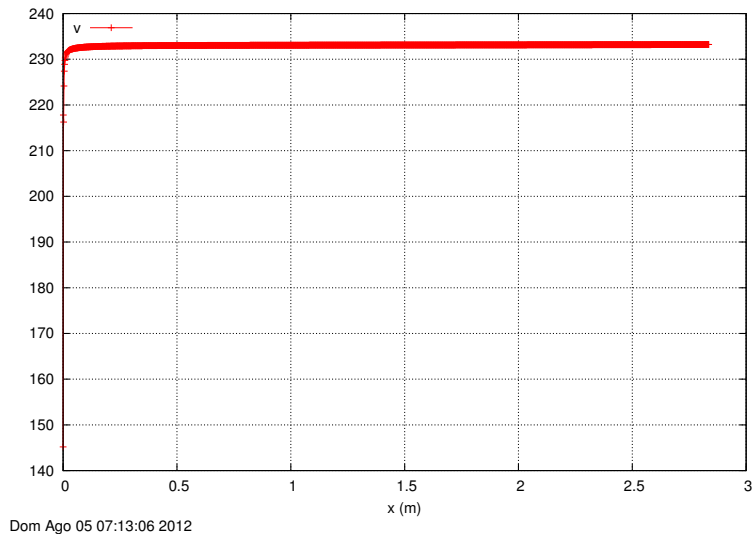


Figura 7: Variação de  $v$  ao longo da superfície do cone, conjunto S0036, malha S07.

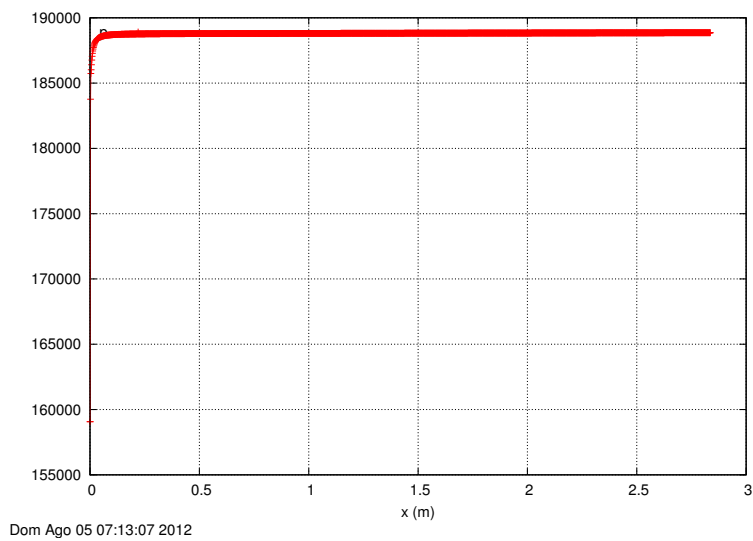


Figura 8: Variação de  $p$  ao longo da superfície do cone, conjunto S0036, malha S07.

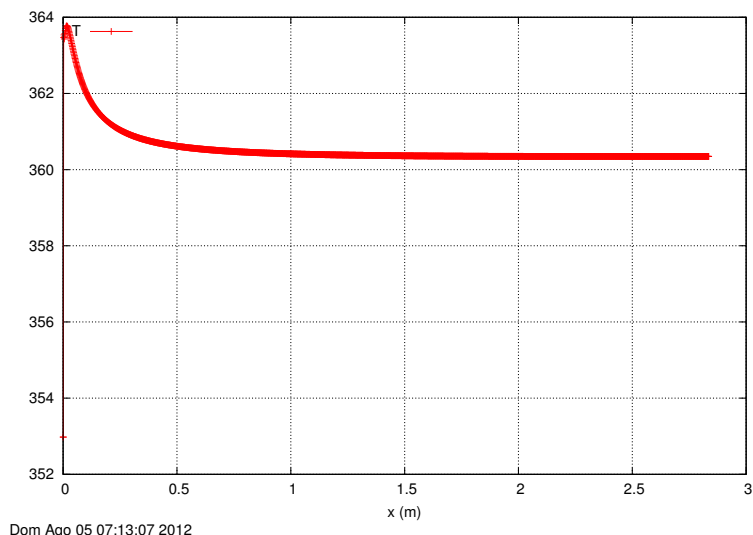


Figura 9: Variação de  $T$  ao longo da superfície do cone, conjunto S0036, malha S07.

### 3.2 Teste 2

Realizou-se um conjunto de simulações idêntico ao do primeiro teste, exceto por uma mudança nos contornos do domínio de cálculo. Neste teste o comprimento do contorno oeste, como mostra a Fig. 10, foi reduzido a zero. O resíduo dos sistemas lineares é mostrado na Fig. 11.

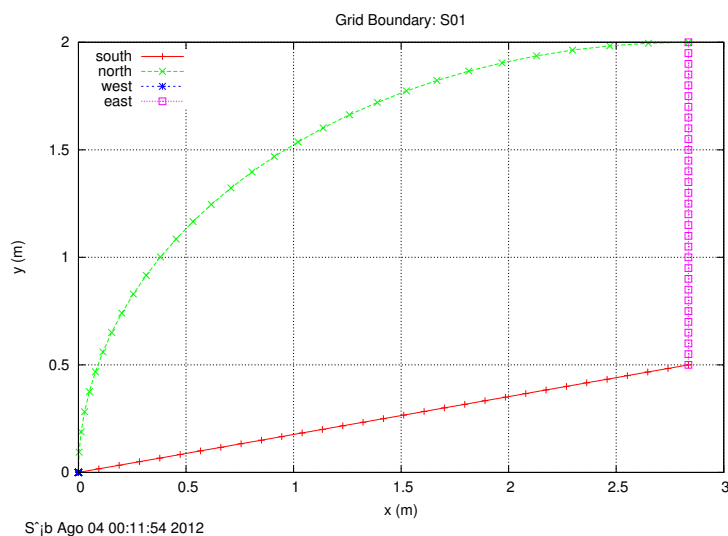


Figura 10: Contorno do domínio de cálculo para o conjunto de simulações S0035.

Os parâmetros numéricos deste conjunto de simulações são mostrados na Fig. 24.

Os resultados para  $C_{Dr}^p$  nas diversas malhas são muito semelhantes ao do teste anterior e são mostrados na Fig. 12.

Abaixo são mostrados alguns valores de  $u$ ,  $v$ ,  $p$ ,  $T$  e  $\rho$  sobre a superfície do cone obtidos na malha mais fina (S07) juntamente com os resultados de Sims. Novamente se observa uma variação destas variáveis ao longo da superfície do cone. Entretanto, como pode ser visto nas Figs. 19-22, a variação neste teste é bem menor que a do teste anterior.

S07 - Euler

	x	u	v	p	T	$\rho$
7.08910227452225E-02	1.32148825705975E+03	2.32531329746564E+02	1.88644017111432E+05	3.62510409309252E+02	1.81317890450037E+00	
2.12673068235667E-01	1.32288273751512E+03	2.32872148830189E+02	1.88762738470124E+05	3.61181183751374E+02	1.82099710541273E+00	
3.54455113726112E-01	1.32327533592680E+03	2.32962870280907E+02	1.88781228552035E+05	3.60792628107090E+02	1.82313679457216E+00	
4.96237159216557E-01	1.32344840553408E+03	2.33005676903223E+02	1.88789701409886E+05	3.60618296813078E+02	1.82410000678932E+00	
6.38019204707002E-01	1.32354100536540E+03	2.33031460711055E+02	1.88795479532872E+05	3.60523676626393E+02	1.82463458892192E+00	
7.79801250197447E-01	1.32359626964150E+03	2.33049582201423E+02	1.88800240379959E+05	3.60466442378963E+02	1.82497032032621E+00	
9.21583295687892E-01	1.32363160656920E+03	2.33063804225961E+02	1.88804552309273E+05	3.60429329563035E+02	1.82519991854350E+00	
1.06336534117834E+00	1.32365523967345E+03	2.33075913669513E+02	1.88808654431291E+05	3.60404106059924E+02	1.82536731686912E+00	
1.20514738666878E+00	1.32367149295399E+03	2.33086862366174E+02	1.88812661613321E+05	3.60386405860111E+02	1.82549571148171E+00	

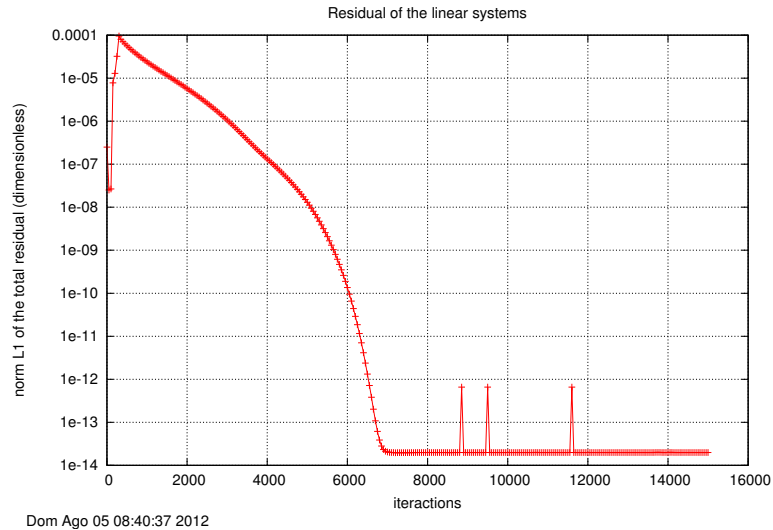


Figura 11: Variação do resíduo dos sistemas lineares ao longo das iterações, conjunto S0035, malha S07.

	N	Cdfp	r	psi	log(psi)	pU pL	phi(pU)	phi(pL)	phi C	U C	Ugci	CPU time(s)
S01	30	7.8607E-02				1						2.10E+00
S02	60	7.8777E-02	2					7.8948E-02			5.1191E-04	1.19E+01
S03	120	7.8935E-02	2	1.0779E+00	3.2568E-02	1.0819E-01	8.0968E-02	7.9094E-02	8.0031E-02	9.3728E-04	4.7493E-04	4.94E+01
S04	240	7.9083E-02	2	1.0700E+00	2.9389E-02	9.7629E-02	8.1197E-02	7.9231E-02	8.0214E-02	9.8261E-04	4.4385E-04	2.83E+02
S05	480	7.9197E-02	2	1.3066E+00	1.1615E-01	3.8585E-01	7.9566E-02	7.9310E-02	7.9438E-02	1.2802E-04	3.3969E-04	1.53E+03
S06	960	7.9271E-02	2	1.5152E+00	1.8048E-01	5.9954E-01	7.9416E-02	7.9346E-02	7.9381E-02	3.5154E-05	2.2419E-04	1.27E+04
S07	1920	7.9315E-02	2	1.7018E+00	2.3090E-01	7.6703E-01	7.9378E-02	7.9359E-02	7.9369E-02	9.3307E-06	1.3174E-04	8.19E+04

Figura 12:  $C_{Df}^p$  do conjunto de simulações S0035, soluções extrapoladas e estimativas de erro.

1.34692943215923E+00	1.32368282571983E+03	2.33097203997741E+02	1.88816633334410E+05	3.60373725124706E+02	1.82559834764790E+00
1.48871147764967E+00	1.32369072361164E+03	2.33107285374778E+02	1.88820600774855E+05	3.60364538619679E+02	1.82568324696351E+00
1.63049352314012E+00	1.32369612785115E+03	2.33117339007915E+02	1.88824578574807E+05	3.60357871228346E+02	1.82575548758009E+00
1.77227556863056E+00	1.32369965797723E+03	2.33127531678177E+02	1.88828570104523E+05	3.60353074132252E+02	1.82581838726150E+00
1.91405761412101E+00	1.32370173449687E+03	2.33137991796869E+02	1.88832569588182E+05	3.60349700684980E+02	1.82587415193996E+00
2.05583965961145E+00	1.32370264975484E+03	2.33148825946241E+02	1.88836562434886E+05	3.60347434073032E+02	1.82592424500103E+00
2.19762170510190E+00	1.32370261045388E+03	2.33160129722267E+02	1.88840524312794E+05	3.60346043387205E+02	1.82596960068042E+00
2.33940375059234E+00	1.32370176379103E+03	2.33171995613989E+02	1.88844419114585E+05	3.60345356078379E+02	1.82601074383023E+00
2.48118579608279E+00	1.32370021347385E+03	2.33184519532396E+02	1.88848195742407E+05	3.60345240427580E+02	1.82604784758535E+00
2.62296784157323E+00	1.32369802873827E+03	2.33197807081757E+02	1.88851783488862E+05	3.60345594775874E+02	1.82608074323319E+00
2.76474988706368E+00	1.32369524734581E+03	2.33211980435325E+02	1.88855085678670E+05	3.60346342383808E+02	1.82610888475758E+00

Sims

----

1.323695E+03	2.334032E+02	1.889207E+05	3.607232E+02	1.824834E+00
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

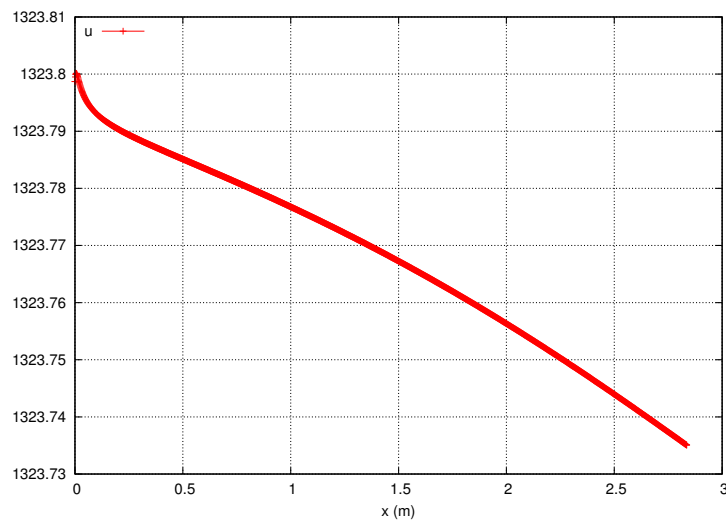


Figura 13: Variação de  $u$  ao longo da superfície do cone, conjunto S0035, malha S07.

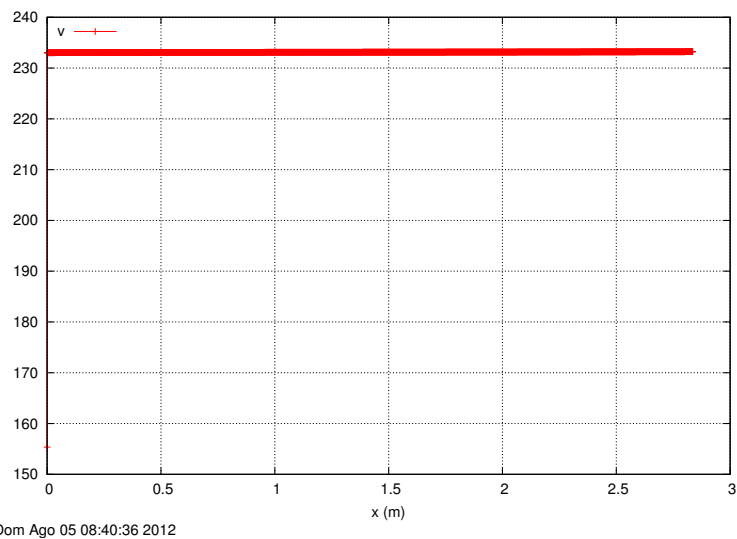


Figura 14: Variação de  $v$  ao longo da superfície do cone, conjunto S0035, malha S07.

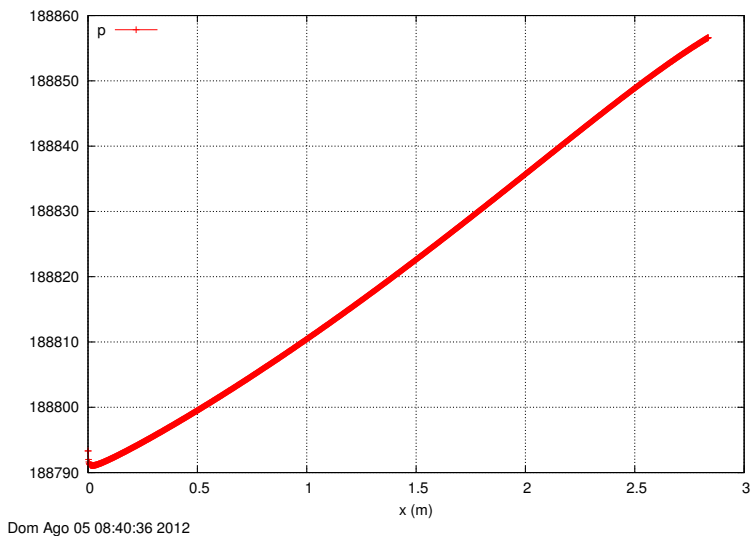


Figura 15: Variação de  $p$  ao longo da superfície do cone, conjunto S0035, malha S07.

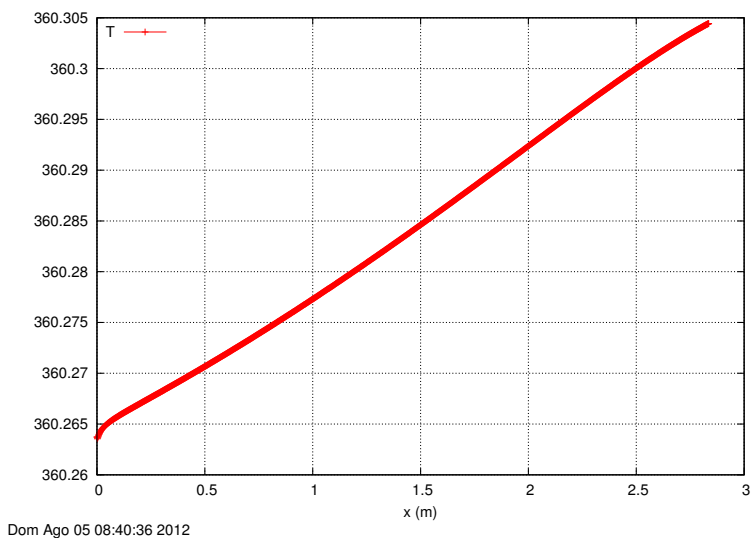


Figura 16: Variação de  $T$  ao longo da superfície do cone, conjunto S0035, malha S07.

## 4 Teste 3

O terceiro teste é semelhante ao primeiro, exceto pelo esquema numérico que é o UDS com correção adiada para o CDS. A constante de acoplamento entre os esquemas foi  $\hat{\beta} = 0.99$ . O conjunto de simulações composto por seis malhas (S01-S06) foi chamado de S0037. Os parâmetros numéricos destas simulações são mostrados na Fig. 25. Das seis malhas testadas, obteve-se convergência apenas para as três primeiras, como é possível ver na Fig. 17. Comparando-se os resultados das Fig. 5 e 17, percebe-se que o esquema numérico deste teste produz,

	N	Cdfp	r	psi	log(psi)	pU	pL	phi(pU)	phi(pL)	phi_C	U_C	Ugci	CPU time (s)
S01	30	7.9334E-02					1						1.6973E+01
S02	60	7.9358E-02	2						7.9381E-02			7.1328E-05	7.9853E+01
S03	120	7.9383E-02	2	9.2270E-01	-3.4939E-02	-1.1606E-01	1	7.9050E-02	7.9409E-02	7.9230E-02	1.7956E-04	7.7304E-05	3.1678E+02
S04	240	NaN	2	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	1	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	
S05	480	NaN	2	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	1	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	
S06	960	NaN	2	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	1	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	

Figura 17:  $C_{Df}^p$  do conjunto de simulações S0037, soluções extrapoladas e estimativas de erro.

na malha 120x120, resultados próximos aos extrapolados da malha 960x960 do primeiro teste. O resíduo dos sistemas lineares é mostrado na Fig. 18.

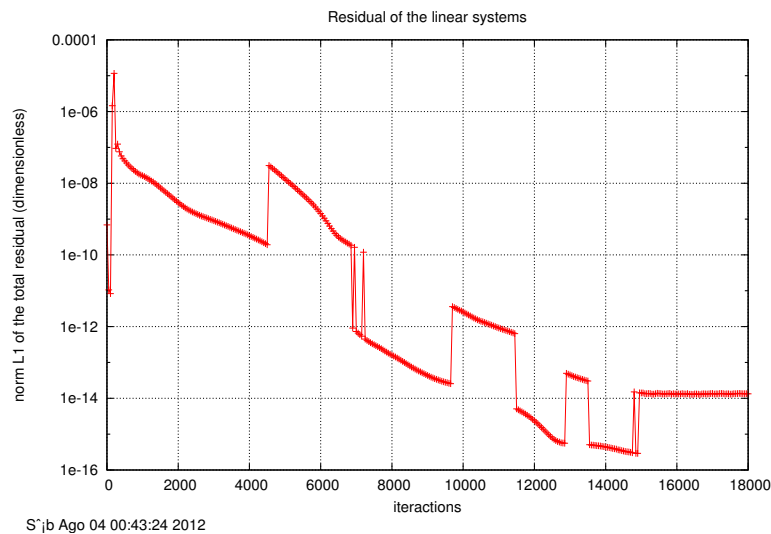


Figura 18: Variação do resíduo dos sistemas lineares ao longo das iterações, conjunto S0037, malha S03.

A distribuição dos campos  $u$ ,  $v$ ,  $p$ ,  $T$  e  $\rho$  sobre a superfície do cone obtidos na malha S03 juntamente com os resultados de Sims são apresentados abaixo. Novamente se observa uma variação destas variáveis ao longo da superfície do cone. Nas Figs. 19-22 é possível observar uma oscilação das variáveis ao longo da superfície, uma característica do esquema CDS.

S03 - Euler

x	u	v	p	T	$\rho$
7.08910227452225E-02	1.32564560830754E+03	2.29605429812420E+02	1.89037153112198E+05	3.61093135672775E+02	1.82410609510189E+00
2.12673068235667E-01	1.32422852600295E+03	2.28662541109981E+02	1.88886905599168E+05	3.60298289337629E+02	1.82666358581357E+00
3.54455113726112E-01	1.32451254295863E+03	2.28574882444431E+02	1.88820870336335E+05	3.60438649103772E+02	1.82531017357549E+00
4.96237159216557E-01	1.32454685463936E+03	2.28545852797680E+02	1.89043632817560E+05	3.60628019526568E+02	1.82650357567811E+00
6.38019204707002E-01	1.32450049748054E+03	2.28537166261983E+02	1.89078001438836E+05	3.60635875782600E+02	1.82679550018966E+00
7.79801250197447E-01	1.32448037939420E+03	2.28559008700826E+02	1.89105442762510E+05	3.60648805926591E+02	1.82699483929109E+00
9.21583295687892E-01	1.32460224063789E+03	2.28763206317094E+02	1.88684349034722E+05	3.60438782951258E+02	1.82398865987946E+00
1.06336534117834E+00	1.32458073435222E+03	2.28843706572152E+02	1.88698183154695E+05	3.60450210183002E+02	1.82406468628607E+00
1.20514738666878E+00	1.32444952582309E+03	2.28757554407462E+02	1.89085934435936E+05	3.60644437628216E+02	1.82682890767920E+00
1.34692943215923E+00	1.32444373252262E+03	2.28865434862759E+02	1.89049358648700E+05	3.60628458373307E+02	1.82655682499817E+00
1.48871147764967E+00	1.32443702188507E+03	2.28988979927590E+02	1.89008839138426E+05	3.60610169849546E+02	1.82625822113165E+00
1.63049352314012E+00	1.32445907095590E+03	2.29196662512916E+02	1.88846664300287E+05	3.60534656816344E+02	1.82507356603934E+00
1.77227556863056E+00	1.32441293688321E+03	2.29266732743489E+02	1.88943987768813E+05	3.60580667104600E+02	1.82578121991052E+00
1.91405761412101E+00	1.32439348532236E+03	2.29414470961707E+02	1.88927440695982E+05	3.60573626728672E+02	1.82565698707862E+00
2.05583965961145E+00	1.32437590144816E+03	2.29583046115848E+02	1.88888210296201E+05	3.60559278024334E+02	1.82535053409316E+00
2.19762170510190E+00	1.32433878777727E+03	2.29722286070954E+02	1.88928571424318E+05	3.60577394613554E+02	1.82564883973257E+00
2.33940375059234E+00	1.32431800803644E+03	2.29907915573904E+02	1.88893389702959E+05	3.60563211712256E+02	1.82538502191460E+00
2.48118579608279E+00	1.32427515072853E+03	2.30072275848277E+02	1.88934243144059E+05	3.60582921240638E+02	1.82567566470118E+00
2.62296784157323E+00	1.32424117611199E+03	2.30266708747013E+02	1.88934220044231E+05	3.60583844730859E+02	1.82567076581414E+00
2.76474988706368E+00	1.32420991677217E+03	2.30494910687161E+02	1.88912981171406E+05	3.60573229650094E+02	1.82551927742539E+00
Sims	1.323695E+03	2.334032E+02	1.889207E+05	3.607232E+02	1.824834E+00

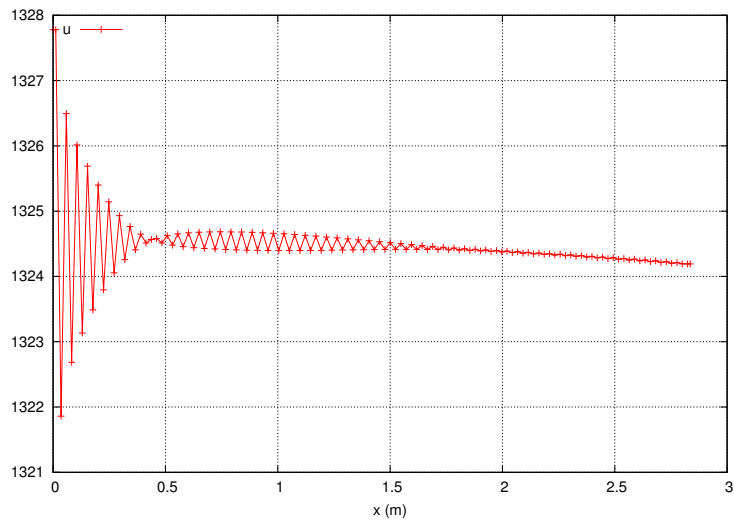


Figura 19: Variação de  $u$  ao longo da superfície do cone, conjunto S0037, malha S03.

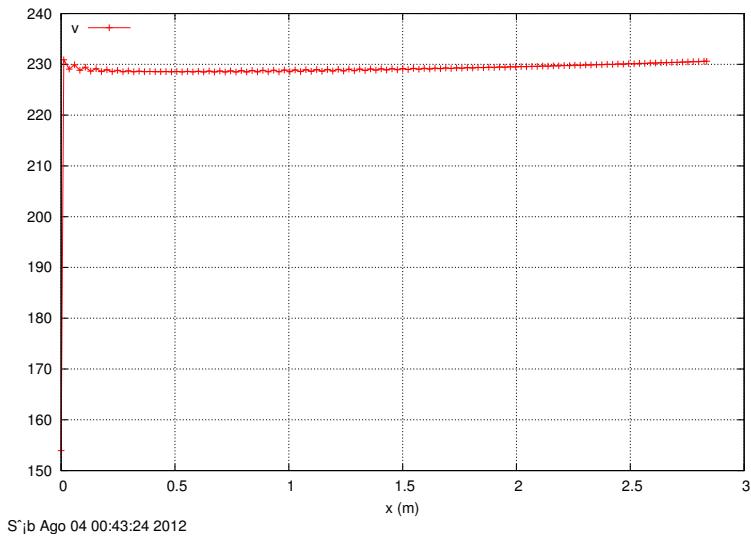


Figura 20: Variação de  $v$  ao longo da superfície do cone, conjunto S0037, malha S03.

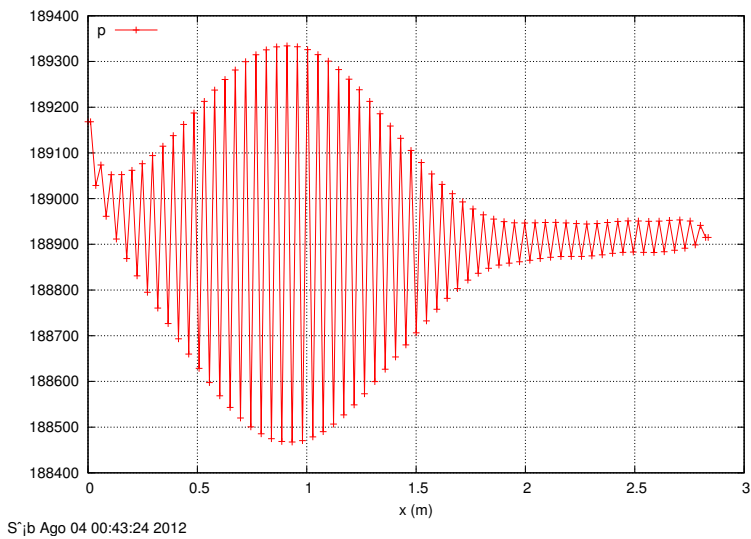


Figura 21: Variação de  $p$  ao longo da superfície do cone, conjunto S0037, malha S03.

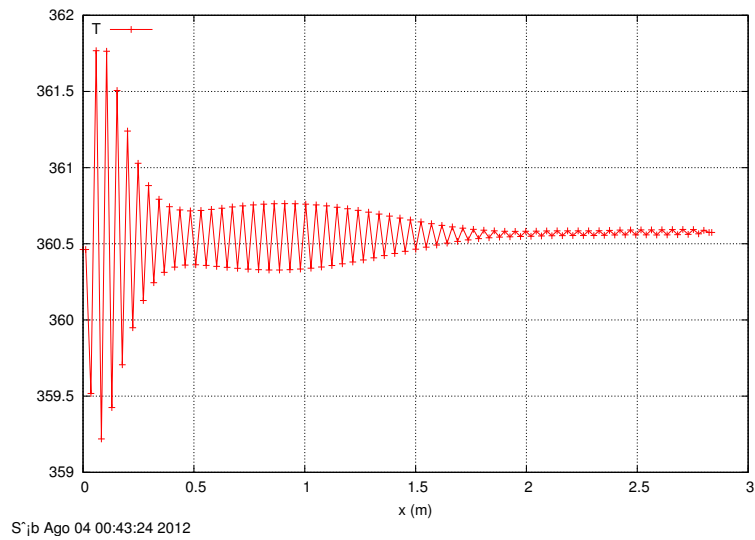


Figura 22: Variação de  $T$  ao longo da superfície do cone, conjunto S0037, malha S03.

## Referências

- [1] FERZIGER, J. H.; PERIC, M. *Computational methods for fluid dynamics*. 3. ed. Springer, 2002.
- [2] SIMS, J. L. Tables for supersonic flow around right circular cones at zero angle of attack. Technical Report SP-3004, NASA, USA, 1964.



sim. id	- Simulation identification (up to 100 characters)	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
nx-2	- Number of real volumes in the x direction	30	60	120	240	480	960	1920
ny-2	- Number of real volumes in the y direction	30	60	120	240	480	960	1920
lx	- length of the elliptical x semi-axis (m)	2.9356409089898E+00	2.9356409089898E+00	2.9356409089898E+00	2.9356409089898E+00	2.9356409089898E+00	2.9356409089898E+00	2.9356409089898E+00
ly	- length of the elliptical y semi-axis (m)	2.0000000000000E+00	2.0000000000000E+00	2.0000000000000E+00	2.0000000000000E+00	2.0000000000000E+00	2.0000000000000E+00	2.0000000000000E+00
lr	- length of the body (m)	2.8356409089898E+00	2.8356409089898E+00	2.8356409089898E+00	2.8356409089898E+00	2.8356409089898E+00	2.8356409089898E+00	2.8356409089898E+00
rb	- base radius/semi-height of the body (m)	5.0000000000000E-01	5.0000000000000E-01	5.0000000000000E-01	5.0000000000000E-01	5.0000000000000E-01	5.0000000000000E-01	5.0000000000000E-01
kg	- Kind of grid (1=uniform, 2=geometric progression, 3=power law)	1	1	1	1	1	1	1
kcm	- Kind of centroid mean (1=simple mean, 2=weighted mean)	1	1	1	1	1	1	1
coord	- Kind of coord. system (1=cylindrical, 0 = cartesian)	1	1	1	1	1	1	1
a1	- width of the volume closer to the wall (m)	1.0000000000000E-03	1.0000000000000E-03	1.0000000000000E-03	1.0000000000000E-03	1.0000000000000E-03	1.0000000000000E-03	1.0000000000000E-03
akn	- Exponent of the power law for the north boundary	2.0000000000000E+00	2.0000000000000E+00	2.0000000000000E+00	2.0000000000000E+00	2.0000000000000E+00	2.0000000000000E+00	2.0000000000000E+00
aks	- Exponent of the power law for the south boundary	1.0000000000000E+00	1.0000000000000E+00	1.0000000000000E+00	1.0000000000000E+00	1.0000000000000E+00	1.0000000000000E+00	1.0000000000000E+00
lmax	- Maximum number of iterations for time cycle	500000	500000	500000	500000	500000	500000	500000
lmax	- Maximum number of iterations for mass cycle	1	1	1	1	1	1	1
it1	- Number of iterations up to which dt = dt1	100	100	100	100	100	100	100
it2	- Number of iterations from which dt = dt2	300	300	300	300	300	300	300
dt1	- Initial time step (s)	4.1124878321694E-07	2.0562439160847E-07	1.0281219580424E-07	5.1406097902117E-08	2.5703048851059E-08	1.2851524475529E-08	6.4257622377648E-09
dt2	- Final time step (s)	4.1124878321694E-05	2.0562439160847E-05	1.0281219580424E-05	5.1406097902117E-06	2.5703048851059E-06	1.2851524475529E-06	6.4257622377648E-07
nlim u	- Maximum number of iterations for solving the linear systems for u, v and T	5	5	5	5	5	5	5
nlim p	- Maximum number of iterations for solving the linear system for p	5	5	5	5	5	5	5
nit.res	- Maximum number of iterations to calculate the mean of the residuals	500	500	500	500	500	500	500
tol u	- Tolerance in the MST for solving the linear systems for u, v and T	1.0000000000000E-02	1.0000000000000E-02	1.0000000000000E-02	1.0000000000000E-02	1.0000000000000E-02	1.0000000000000E-02	1.0000000000000E-02
tol p	- Tolerance in the MST for solving the linear system for p	1.0000000000000E-02	1.0000000000000E-02	1.0000000000000E-02	1.0000000000000E-02	1.0000000000000E-02	1.0000000000000E-02	1.0000000000000E-02
tol.res	- Tolerance for the sum of residuals	1.0000000000000E-13	1.0000000000000E-13	1.0000000000000E-13	1.0000000000000E-13	1.0000000000000E-13	1.0000000000000E-13	1.0000000000000E-13
wf	- Frequency of printing in the listing file	50	50	50	50	50	50	50
sem a	- 1 = do not open result files, 0 = open	1	1	1	1	1	1	1
sem g	- 0 = visualize the plot, 1 = do not visualize	1	1	1	1	1	1	1
w g	- Frequency of writing data for graphics	1	1	1	1	1	1	1
w cam	- 1 = write the fields, 0 = do not	0	0	0	0	0	0	0
itb1	- Number of iterations up to which beta = beta1	300	300	300	300	300	300	300
itb2	- Number of iterations from which beta = beta2	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
beta1	- Initial beta (UDS/CDS mixing constant (0=UDS, 1=CDS))	0.0000000000000E+00	0.0000000000000E+00	0.0000000000000E+00	0.0000000000000E+00	0.0000000000000E+00	0.0000000000000E+00	0.0000000000000E+00
beta2	- Final beta (UDS/CDS mixing constant (0=UDS, 1=CDS))	0.0000000000000E+00	0.0000000000000E+00	0.0000000000000E+00	0.0000000000000E+00	0.0000000000000E+00	0.0000000000000E+00	0.0000000000000E+00
GF	- GF = gamma = Cp / Cv (for the free stream)	1.4000000000000E+00	1.4000000000000E+00	1.4000000000000E+00	1.4000000000000E+00	1.4000000000000E+00	1.4000000000000E+00	1.4000000000000E+00
Rg	- Perfect gas constant (J/kg.K)	2.8700000000000E+02	2.8700000000000E+02	2.8700000000000E+02	2.8700000000000E+02	2.8700000000000E+02	2.8700000000000E+02	2.8700000000000E+02
PF	- Free stream pressure (Pa)	1.0000000000000E+05	1.0000000000000E+05	1.0000000000000E+05	1.0000000000000E+05	1.0000000000000E+05	1.0000000000000E+05	1.0000000000000E+05
TF	- Free stream temperature (K)	3.0000000000000E+02	3.0000000000000E+02	3.0000000000000E+02	3.0000000000000E+02	3.0000000000000E+02	3.0000000000000E+02	3.0000000000000E+02
MF	- Free stream Mach number	4.0000000000000E+00	4.0000000000000E+00	4.0000000000000E+00	4.0000000000000E+00	4.0000000000000E+00	4.0000000000000E+00	4.0000000000000E+00

Figura 23: Parâmetros do conjunto de simulações S0036

sim. id	- Simulation identification (up to 100 characters)	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
nx-2	- Number of real volumes in the x direction	30	60	120	240	480	960	1920
ny-2	- Number of real volumes in the y direction	30	60	120	240	480	960	1920
lx	- length of the elliptical x semi-axis (m)	2.835640908089E+00	2.835640908089E+00	2.835640908089E+00	2.835640908089E+00	2.835640908089E+00	2.835640908089E+00	2.835640908089E+00
ly	- length of the elliptical y semi-axis (m)	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00
lr	- length of the body (m)	2.835640908089E+00	2.835640908089E+00	2.835640908089E+00	2.835640908089E+00	2.835640908089E+00	2.835640908089E+00	2.835640908089E+00
rb	- base radius/semi-height of the body (m)	5.000000000000E-01	5.000000000000E-01	5.000000000000E-01	5.000000000000E-01	5.000000000000E-01	5.000000000000E-01	5.000000000000E-01
kg	- Kind of grid (1=uniform, 2=geometric progression, 3=power law)	1	1	1	1	1	1	1
kcm	- Kind of centroid mean (1=simple mean, 2=weighted mean)	1	1	1	1	1	1	1
coord	- Kind of coord. system (1=cylindrical, 0 = cartesian)	1	1	1	1	1	1	1
a1	- width of the volume closer to the wall (m)	1.000000000000E-03	1.000000000000E-03	1.000000000000E-03	1.000000000000E-03	1.000000000000E-03	1.000000000000E-03	1.000000000000E-03
akn	- Exponent of the power law for the north boundary	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00
aks	- Exponent of the power law for the south boundary	1.000000000000E+00	1.000000000000E+00	1.000000000000E+00	1.000000000000E+00	1.000000000000E+00	1.000000000000E+00	1.000000000000E+00
lmax	- Maximum number of iterations for time cycle	500000	500000	500000	500000	500000	500000	500000
it1	- Number of iterations up to which dt = dt1	100	100	100	100	100	100	100
it2	- Number of iterations from which dt = dt2	300	300	300	300	300	300	300
dt1	- Initial time step (s)	4.041836830756E-07	2.020918415377E-07	1.010459207688E-07	5.052296038444E-08	2.526148019222E-08	1.263074009611E-08	6.315370480566E-09
dt2	- Final time step (s)	4.041836830756E-05	2.020918415377E-05	1.010459207688E-05	5.052296038444E-06	2.526148019222E-06	1.263074009611E-06	6.315370480566E-07
nlm u	- Maximum number of iterations for solving the linear systems for u, v and T	5	5	5	5	5	5	5
nlm p	- Maximum number of iterations for solving the linear system for p	5	5	5	5	5	5	5
ml res	- Maximum number of iterations to calculate the mean of the residuals	500	500	500	500	500	500	500
tol u	- Tolerance in the MST for solving the linear systems for u, v and T	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02
tol p	- Tolerance in the MST for solving the linear system for p	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02
tol res	- Tolerance for the sum of residuals	1.000000000000E-13	1.000000000000E-13	1.000000000000E-13	1.000000000000E-13	1.000000000000E-13	1.000000000000E-13	1.000000000000E-13
wf	- Frequency of printing in the listing file	50	50	50	50	50	50	50
sem a	- 1 = do not open result files, 0 = open	1	1	1	1	1	1	1
sem g	- 0 = visualize the plot, 1 = do not visualize	1	1	1	1	1	1	1
w g	- Frequency of writing data for graphics	1	1	1	1	1	1	1
w cam	- 1 = write the fields, 0 = do not	0	0	0	0	0	0	0
itb1	- Number of iterations up to which beta = beta1	300	300	300	300	300	300	300
itb2	- Number of iterations from which beta = beta2	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
beta1	- Initial beta (UDS/CDS mixing constant (0=UDS, 1=CDS))	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00
beta2	- Final beta (UDS/CDS mixing constant (0=UDS, 1=CDS))	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00
Gf	- GF = gamma = Cp / Cv (for the free stream)	1.400000000000E+00	1.400000000000E+00	1.400000000000E+00	1.400000000000E+00	1.400000000000E+00	1.400000000000E+00	1.400000000000E+00
Rg	- Perfect gas constant (J/kg.K)	2.870000000000E+02	2.870000000000E+02	2.870000000000E+02	2.870000000000E+02	2.870000000000E+02	2.870000000000E+02	2.870000000000E+02
Pf	- Free stream pressure (Pa)	1.000000000000E+05	1.000000000000E+05	1.000000000000E+05	1.000000000000E+05	1.000000000000E+05	1.000000000000E+05	1.000000000000E+05
TF	- Free stream temperature (K)	3.000000000000E+02	3.000000000000E+02	3.000000000000E+02	3.000000000000E+02	3.000000000000E+02	3.000000000000E+02	3.000000000000E+02
MF	- Free stream Mach number	4.000000000000E+00	4.000000000000E+00	4.000000000000E+00	4.000000000000E+00	4.000000000000E+00	4.000000000000E+00	4.000000000000E+00

Figura 24: Parâmetros do conjunto de simulações S0035

sim_id	- Simulation identification (up to 100 characters)	S01	S02	S03	S04	S05	S06
nx-2	- Number of real volumes in the xz direction	30	60	120	240	480	960
ny-2	- Number of real volumes in the yz direction	30	60	120	240	480	960
lx	- length of the elliptical x semi-axis (m)	2.835640908989E+00	2.835640908989E+00	2.835640908989E+00	2.835640908989E+00	2.835640908989E+00	2.835640908989E+00
ly	- length of the elliptical y semi-axis (m)	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00
lz	- length of the body (m)	2.835640908989E+00	2.835640908989E+00	2.835640908989E+00	2.835640908989E+00	2.835640908989E+00	2.835640908989E+00
tb	- base radius/semi-height of the body (m)	5.000000000000E-01	5.000000000000E-01	5.000000000000E-01	5.000000000000E-01	5.000000000000E-01	5.000000000000E-01
kg	- Kind of grid (1=uniform, 2=geometric progression, 3=power law)	1	1	1	1	1	1
kcm	- Kind of centroid mean (1=simple mean, 2=weighted mean)	1	1	1	1	1	1
coord	- Kind of coord. system (1=cylindrical, 0 = cartesian)	1	1	1	1	1	1
a1	- width of the volume closer to the wall (m)	1.000000000000E-03	1.000000000000E-03	1.000000000000E-03	1.000000000000E-03	1.000000000000E-03	1.000000000000E-03
skn	- Exponent of the power law for the north boundary	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00	2.000000000000E+00
aks	- Exponent of the power law for the south boundary	1.000000000000E+00	1.000000000000E+00	1.000000000000E+00	1.000000000000E+00	1.000000000000E+00	1.000000000000E+00
lmax	- Maximum number of iterations for time cycle	500000	500000	500000	500000	500000	500000
lmax	- Maximum number of iterations for mass cycle	1	1	1	1	1	1
it1	- Number of iterations up to which dt = dt1	100	100	100	100	100	100
it2	- Number of iterations from which dt = dt2	300	300	300	300	300	300
dt1	- Initial time step (s)	4.0418368307558E-08	2.0209184153778E-08	1.0104592076889E-08	5.052296038444E-09	2.526148019222E-09	1.263074009611E-09
dt2	- Final time step (s)	4.0418368307558E-06	2.0209184153778E-06	1.0104592076889E-06	5.052296038444E-07	2.526148019222E-07	1.263074009611E-07
nlm u	- Maximum number of iterations for solving the linear systems for u, v and T	5	5	5	5	5	5
nlm p	- Maximum number of iterations for solving the linear system for p	500	500	500	500	500	500
ml res	- Number of iterations to calculate the mean of the residuals	500	500	500	500	500	500
tol u	- Tolerance in the MSI for solving the linear systems for u, v and T	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02
tol p	- Tolerance in the MSI for solving the linear system for p	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02	1.000000000000E-02
tol res	- Tolerance for the sum of residuals	1.000000000000E-13	1.000000000000E-13	1.000000000000E-13	1.000000000000E-13	1.000000000000E-13	1.000000000000E-13
wf	- Frequency of printing in the listing file	50	50	50	50	50	50
sem a	- 1 = do not open result files, 0 = open	1	1	1	1	1	1
sem g	- 0 = visualize the plot, 1 = do not visualize	1	1	1	1	1	1
w g	- Frequency of writing data for graphics	1	1	1	1	1	1
w cam	- 1 = write the fields, 0 = do not	0	0	0	0	0	0
itb1	- Number of iterations up to which beta = beta1	300	300	300	300	300	300
itb2	- Number of iterations from which beta = beta2	1000	1000	1000	1000	1000	1000
beta1	- Initial beta (UDS/CDS mixing constant (0=UDS, 1=CDS))	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00
beta2	- Final beta (UDS/CDS mixing constant (0=UDS, 1=CDS))	9.900000000000E-01	9.900000000000E-01	9.900000000000E-01	9.900000000000E-01	9.900000000000E-01	9.900000000000E-01
GF	- GF = gamma = Cp / Cv (for the free stream)	1.400000000000E+00	1.400000000000E+00	1.400000000000E+00	1.400000000000E+00	1.400000000000E+00	1.400000000000E+00
Rg	- Perfect gas constant (J/kg.K)	2.870000000000E+02	2.870000000000E+02	2.870000000000E+02	2.870000000000E+02	2.870000000000E+02	2.870000000000E+02
PF	- Free stream pressure (Pa)	1.000000000000E+05	1.000000000000E+05	1.000000000000E+05	1.000000000000E+05	1.000000000000E+05	1.000000000000E+05
TF	- Free stream temperature (K)	3.000000000000E+02	3.000000000000E+02	3.000000000000E+02	3.000000000000E+02	3.000000000000E+02	3.000000000000E+02
MF	- Free stream Mach number	4.000000000000E+00	4.000000000000E+00	4.000000000000E+00	4.000000000000E+00	4.000000000000E+00	4.000000000000E+00

Figura 25: Parâmetros do conjunto de simulações S0037