

**Simulação numérica de escoamento reativo, transferência de calor
e termoelasticidade em motor-foguete - parte 2**

Projeto CFD-14/AEB-3 apoiado financeiramente pela
Agência Espacial Brasileira (AEB)
Anúncio de Oportunidades 01/2006 do Programa UNIESPAÇO
Tema: Veículos Espaciais
Tópico: Processos de Combustão em Motores-Foguete

**Relatório técnico do projeto CFD-14/UFPR:
solução de escoamentos invíscidos, laminares e
turbulentos com o código Mach2D 5.8**

Diego Fernando Moro, gr. Eng. Mec.
Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Curso de Engenharia Mecânica (CEM)

Guilherme Bertoldo, Me. Física
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Câmpus Francisco Beltrão

Carlos Henrique Marchi, Dr. Eng. Mec.
Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)

Curitiba, 10 de outubro de 2012

1 INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta resultados de simulações de escoamentos em uma tubeira de motor-foguete. Os objetivos do estudo eram verificar o efeito do (1) modelo físico e da (2) malha sobre os resultados, bem como (3) fazer comparações com resultados experimentais.

O código computacional utilizado no estudo foi o Mach2D 5.8, que está descrito no relatório [1]. Ele foi adaptado para resolver a tubeira da figura 3 de Back et al. [2].

Os modelos físicos avaliados foram todos para um gás monoespécie considerando escoamentos invíscidos, laminares e turbulentos. O modelo numérico usado é de primeira ordem de acurácia. As malhas empregadas variaram entre 56 x 20 (1.120) volumes e 1.792 x 640 (1.146.880) volumes.

2 MODELAGEM

2.1 MODELOS FÍSICOS

O código computacional Mach2D 5.8 considera um gás monoespécie, compressível, contínuo, não-reativo e termicamente perfeito. As propriedades termodinâmicas do gás (os calores específico à pressão e volume constante, a razão entre eles, a viscosidade, e a condutividade térmica) podem ser constantes ou variáveis. A pressão, a massa específica e a temperatura são relacionadas através da equação de estado dos gases perfeitos. São desconsideradas forças externas, como a força gravitacional. O escoamento pode ser invíscido, laminar ou turbulento (modelo de Baldwin-Lomax). Mais informações sobre os modelos matemáticos do código Mach2D estão no relatório técnico [1].

2.2 GEOMETRIA DO MOTOR-FOGUETE

A geometria do motor-foguete está ilustrada na Fig. 1. Ela é um dos problemas abordados por Back et al. [2]. O motor tem comprimento total $L = 185,039 \text{ mm}$, raio interno máximo $R_c = 63,5 \text{ mm}$ e raio interno mínimo (garganta) de $R_g = 20,32 \text{ mm}$.

A geometria foi dividida em 6 partes, da esquerda para a direita:

- 1) Câmara de combustão: seção constante de raio $R_c = 63,5 \text{ mm}$ e comprimento $L_c = 7,874 \text{ mm}$.
- 2) Transição de seção com raio de arredondamento $r_i = 20,32 \text{ mm}$ e comprimento $L_i = 14,3764 \text{ mm}$.
- 3) Tronco de cone convergente de comprimento $L_{ic} = 33,6296 \text{ mm}$ e ângulo com a horizontal de 45° .
- 4) Transição de seção até a garganta com raio de arredondamento $r_g = 12,7 \text{ mm}$ e comprimento $L_{ag} = 8,9916 \text{ mm}$.
- 5) Transição de seção após a garganta com raio de arredondamento $r_g = 12,7 \text{ mm}$ e comprimento $L_{dg} = 3,2766 \text{ mm}$.
- 6) Tronco de cone divergente de comprimento $L_{id} = 116,8908 \text{ mm}$ e ângulo com a horizontal de 15° .

2.3 DADOS

As Tabelas 1 a 3 apresentam os dados usados nas simulações com o código Mach2D 5.8. Para os escoamentos invíscidos e laminares foi utilizado o solver MSI [3] com os dados mostrados na

Tabela 2. Já para os escoamentos turbulentos foi utilizado o solver ADI [3] com os dados mostrados na Tabela 3.

Todas as simulações foram executadas até o dobro do número de iterações necessárias para chegar-se ao erro de arredondamento de máquina do resíduo das equações diferenciais discretizadas. Em todas as simulações, foi utilizado $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t$.

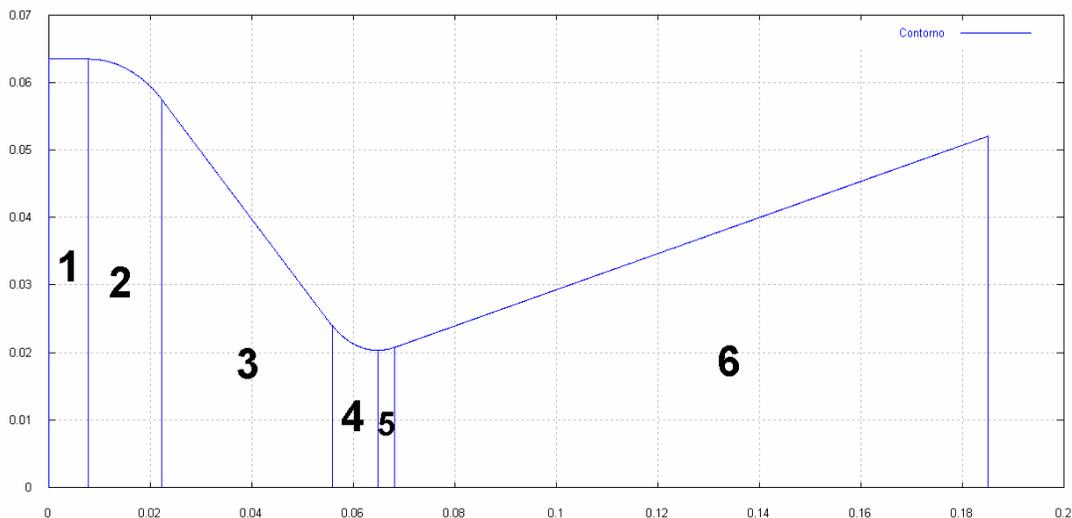


Figura 1. Geometria da tubeira do motor-foguete.

Tabela 1. Parâmetros usados nas simulações com o código computacional Mach2D 5.8.

Tipo de parâmetro	Descrição	Dado
Parâmetros físicos	Temperatura de estagnação (T_0)	833,33 K
	Pressão de estagnação (P_0)	1 725 068,0 Pa
	Razão entre calores específicos (γ)	1,4
	Constante do gás (R)	286,9 J/kg · K
Parâmetros ao nível do mar	Pressão atmosférica (P_r)	101 325,0 Pa
	Aceleração gravitacional (g_0)	9,80665 m/s ²
Computador	Tipo de processador	Intel Dual Core E7500 2,93 GHz
	Memória RAM	2 GB
	Número de processadores	1
	Número total de núcleos	2
	Sistema Operacional	Linux Ubuntu 2-6-32
Compilador	Linux (com otimização)	Gfortran 4.13

2.4 MALHAS

Para os escoamentos invíscidos, a malha base escolhida é mostrada na Figura 2. Ela tem 56 volumes na horizontal e 20 volumes na vertical. Os volumes são uniformes em cada linha vertical. Para todos os tipos de escoamento, os volumes são uniformes dentro de cada uma das seis regiões

da Figura 1, na direção horizontal. As malhas mais finas são geradas pelo método da subdivisão uniforme [4], a partir da malha base e com razão de refino igual a dois.

Tabela 2. Parâmetros usados com o solver MSI nos escoamentos invíscidos e laminares.

Parâmetro	Descrição	Valor
beta1	Coefficiente de mistura até itb1	0.0
beta2	Coefficiente de mistura a partir de itb2	0.0
itb1	Número de iterações com beta1	100
itb2	Número de iterações com variação linear entre beta1 e beta2	1000
imax	Número de iterações para p'	2
nitm_u	Número máximo de iterações do método MSI para u, v e T	5
tolu	Tolerância do método MSI para u, v e T	1E-1
nitm_p	Número máximo de iterações do método MSI para p'	10
tolp	Tolerância do método MSI para p'	1E-2

Tabela 3. Parâmetros usados com o solver ADI nos escoamentos turbulentos.

Parâmetro	Descrição	Valor
beta1	Coefficiente de mistura até itb1	0.0
beta2	Coefficiente de mistura a partir de itb2	0.0
itb1	Número de iterações com beta1	1000
itb2	Número de iterações com variação linear entre beta1 e beta2	1000
imax	Número de iterações para p'	5
nitm_u	Número de iterações do método ADI para u, v e T	2
nitm_p	Número de iterações do método ADI para p'	2

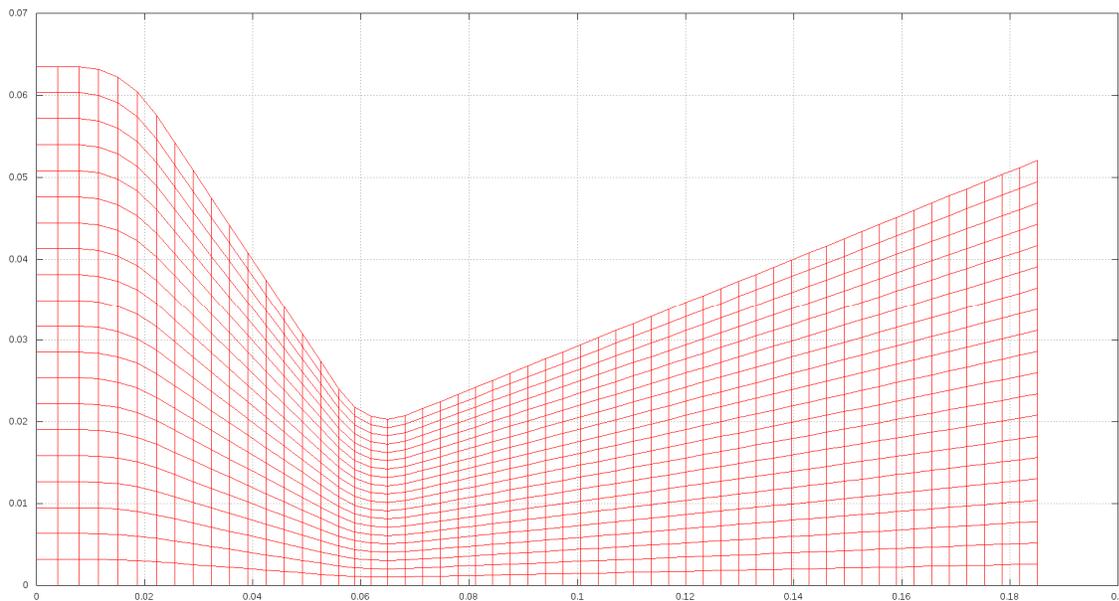


Figura 2. Malha com 56 x 20 volumes para escoamento invíscido.

Para os escoamentos laminares, a malha base escolhida é mostrada na Figura 3. Ela tem 56 volumes na horizontal e 50 volumes na vertical. Em cada linha vertical, o tamanho de cada volume

segue uma progressão geométrica cujo primeiro volume (menor) fica junto à parede e tem tamanho de $10\ \mu\text{m}$. As malhas mais finas são geradas pelo método da progressão geométrica [4], a partir da malha base e com razão de refino igual a dois.

Para os escoamentos turbulentos, a malha base escolhida é mostrada na Figura 4. Ela tem 56 volumes na horizontal e 50 volumes na vertical. Em cada linha vertical, o tamanho de cada volume segue uma progressão geométrica cujo primeiro volume (menor) fica junto à parede e tem tamanho de $1\ \mu\text{m}$. As malhas mais finas são geradas pelo método da progressão geométrica [4], a partir da malha base e com razão de refino igual a dois.

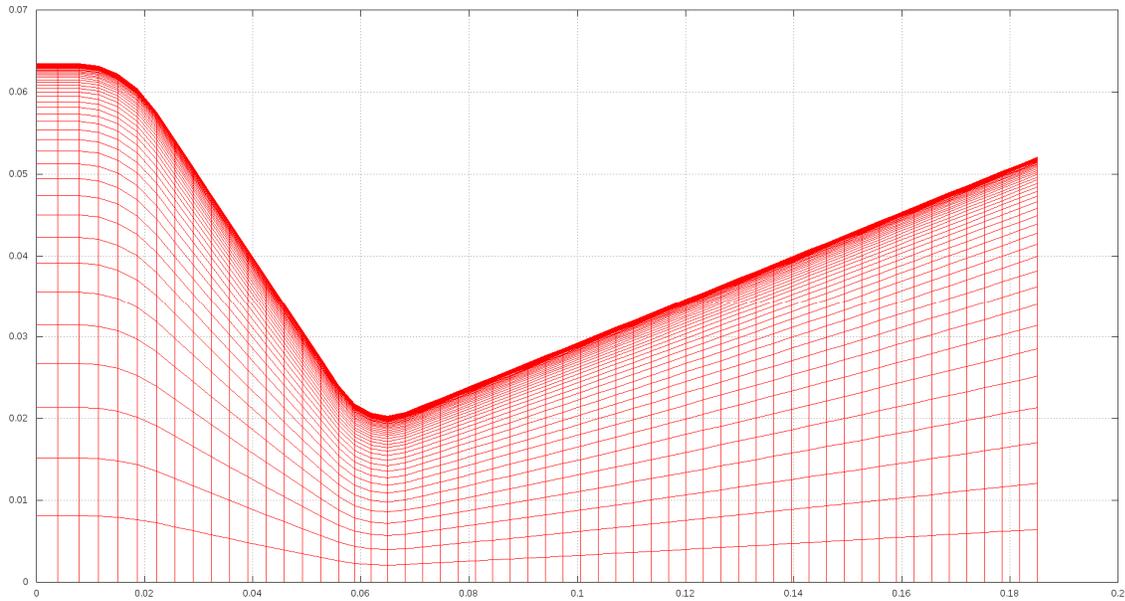


Figura 3. Malha com 56 x 50 volumes para escoamento laminar.

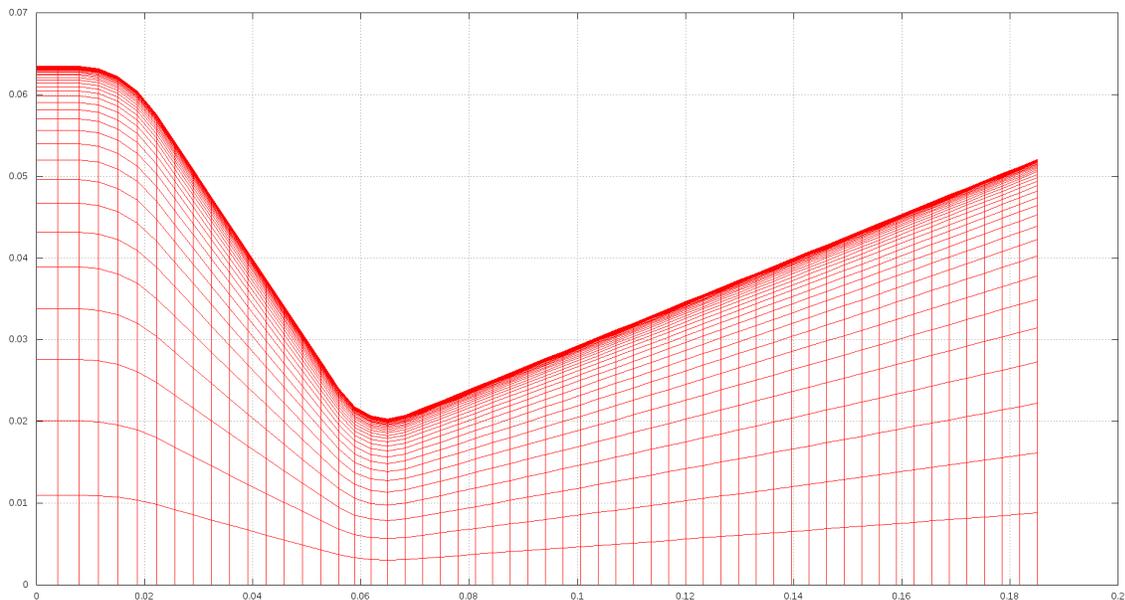


Figura 4. Malha com 56 x 50 volumes para escoamento turbulento.

3 RESULTADOS

Nas Tabelas 4 a 9 são apresentadas as malhas usadas nas simulações, para as quais se obteve convergência, bem como alguns resultados. Quanto mais complexo é o modelo matemático, menos malhas se conseguiu convergir: seis para o escoamento invíscido; quatro para o laminar; e três para o turbulento. Os parâmetros mostrados nestas tabelas são definidos por:

- caso = identificação da simulação
- nx-2 = número de volumes de controle reais na direção horizontal
- ny-2 = número de volumes de controle reais na direção vertical
- RAM = memória utilizada
- Δt = passo de tempo (parâmetro de relaxação)
- Itmax = número máximo de iterações globais
- It(Epi) = número de iterações até atingir o erro de arredondamento de máquina
- tCPU = tempo de CPU
- res = resíduo final adimensionalizado das equações diferenciais discretizadas
- Cd = coeficiente de descarga da tubeira; é a razão entre o fluxo de massa simulado e o da solução analítica unidimensional
- Fd* = empuxo dinâmico adimensional; é a razão entre o empuxo dinâmico simulado e o da solução analítica unidimensional

Tabela 4. Malhas do escoamento invíscido.

Caso	nx-2	ny-2	RAM (MB)	Δt (s)	Itmax	It (Epi)	tCPU	res
SE_UDS01	56	20	12,9	4,00E-05	900	300	1,63 s	3,72E-13
SE_UDS02	112	40	16,2	2,00E-05	900	300	8,06 s	2,75E-13
SE_UDS03	224	80	29,5	1,00E-05	1500	700	1,2 min	2,85E-13
SE_UDS04	448	160	80,9	5,00E-06	3400	1600	15,7 min	3,94E-13
SE_UDS05	896	320	285,4	2,00E-06	8800	4400	3,7 h	8,40E-13
SE_UDS06	1792	640	1100	1,00E-06	17200	8600	21,75 h	1,51E-12

Tabela 5. Resultados do escoamento invíscido.

Caso	nx-2	ny-2	Cd	Fd*
SE_UDS01	56	20	1.047043467655140E+00	9.770880501599819E-01
SE_UDS02	112	40	1.016945929768769E+00	9.720992543663989E-01
SE_UDS03	224	80	1.000833853462430E+00	9.702418693333662E-01
SE_UDS04	448	160	9.914738348276561E-01	9.686907100283813E-01
SE_UDS05	896	320	9.864695202976426E-01	9.678067460143287E-01
SE_UDS06	1792	640	9.839178842047833E-01	9.673714775841111E-01

Tabela 6. Malhas do escoamento laminar.

Caso	nx-2	ny-2	RAM (MB)	Δt (s)	Itmax	It (Epi)	tCPU	res
SNS_UDS01	56	50	14,5	4,00E-005	1200	600	7,74 s	6,25E-013
SNS_UDS02	112	100	22,7	2,00E-005	2800	1400	2,8 min	7,08E-013
SNS_UDS03	224	200	55,2	1,00E-005	7200	3600	32,2 min	3,87E-013
SNS_UDS04	448	400	183,1	9,00E-007	30000	15000	5,6 h	2,68E-010

Tabela 7. Resultados do escoamento laminar.

Caso	n_x-2	n_y-2	Cd	Fd*
SNS_UDS01	56	50	1.044001882236161E+00	9.729492640474889E-01
SNS_UDS02	112	100	1.016972674508828E+00	9.711408094389533E-01
SNS_UDS03	224	200	1.000598499360868E+00	9.690830458419292E-01
SNS_UDS04	448	400	9.908986996223319E-01	9.672134002519932E-01

Tabela 8. Malhas do escoamento turbulento.

Caso	n_x-2	n_y-2	RAM (MB)	Δt (s)	Itmax	It (Epi)	tCPU	res
Sim.BL.100	56	50	14,4	5,00E-005	4000	800	30,59 s	2,02E-008
Sim.BL.101	112	100	22,2	9,00E-006	4000	1600	2,2 min	1,73E-014
Sim.BL.102	224	200	53,1	1,00E-007	200000	100000	7,8 h	6,57E-012

Tabela 9. Resultados do escoamento turbulento.

Caso	n_x-2	n_y-2	Cd	Fd*
Sim.BL.100	56	50	1.043771726054339E+00	9.697797090354962E-01
Sim.BL.101	112	100	1.016108670777695E+00	9.672876162458617E-01
Sim.BL.102	224	200	9.995896483483554E-01	9.650340285157468E-01

Para o escoamento invíscido, com a malha de 1.792 x 640 volumes, a seguir são apresentados:

- Campos de propriedades nas Figuras 5 a 10.
- Perfis de propriedades nas Figuras 11 a 16. Nestas figuras, center e wall representam respectivamente a solução numérica na linha de centro e na parede da tubeira, ao longo da direção horizontal, e 1D representa a solução analítica unidimensional.
- A variação do empuxo produzido pela tubeira, a partir de sua garganta, na Figura 17. Podem ser vistos os empuxos: dinâmico (dynamic); de pressão ao nível do mar (pressure-sea); de pressão no vácuo (pressure-vacuum); total ao nível do mar (total-sea); e total no vácuo (total-vacuum).
- Isolinhas de propriedades nas Figuras 18 a 23.

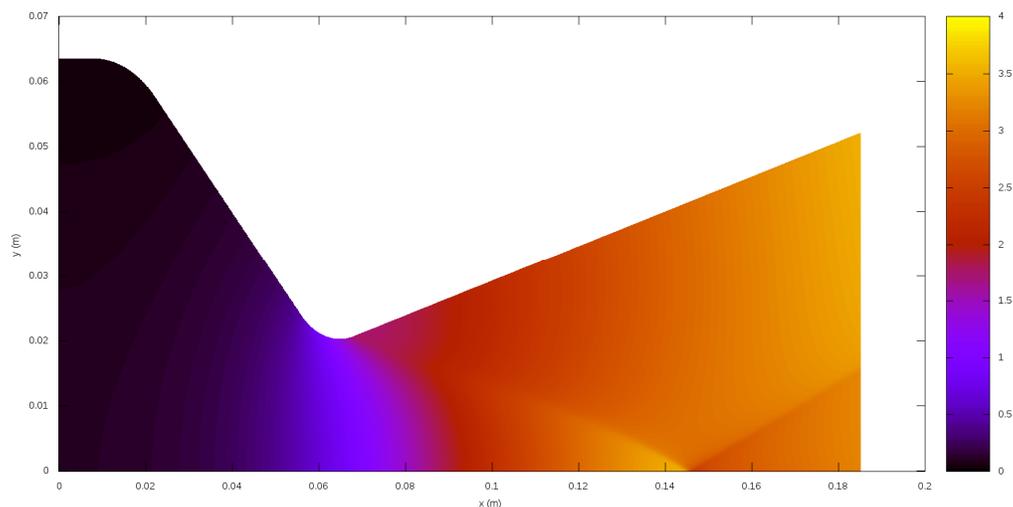


Figura 5. Campo de número de Mach do escoamento invíscido com 1.792 x 640 volumes.

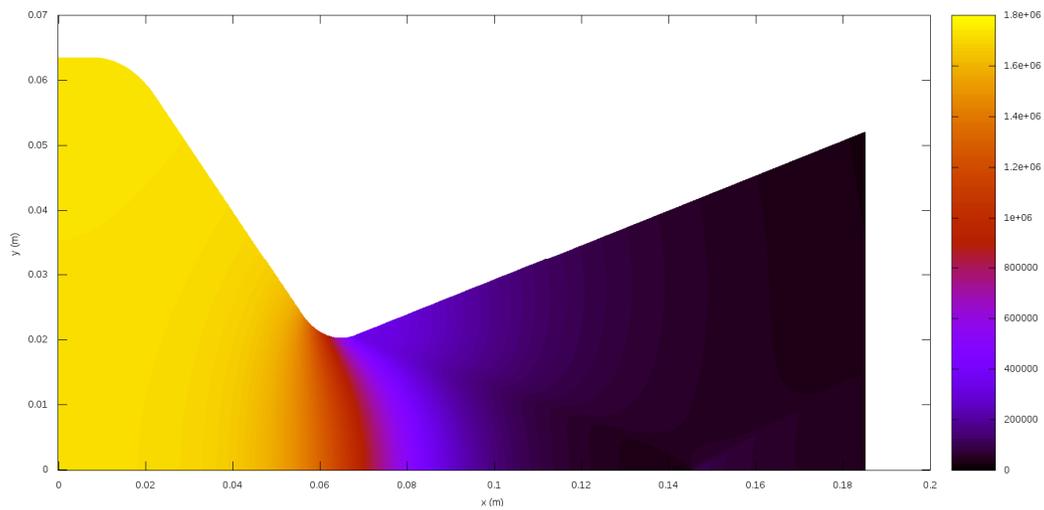


Figura 6. Campo de pressão do escoamento invíscido com 1.792 x 640 volumes.

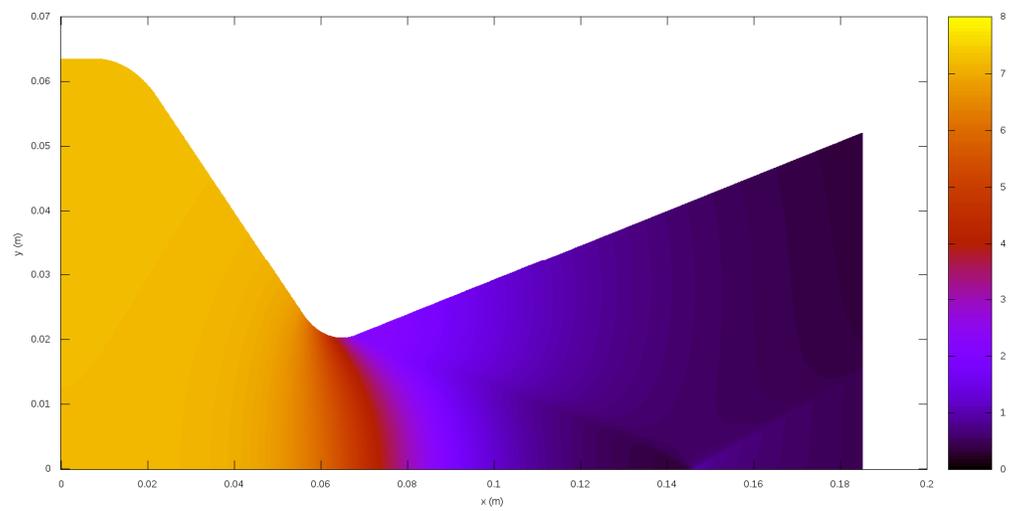


Figura 7. Campo de massa específica do escoamento invíscido com 1.792 x 640 volumes.

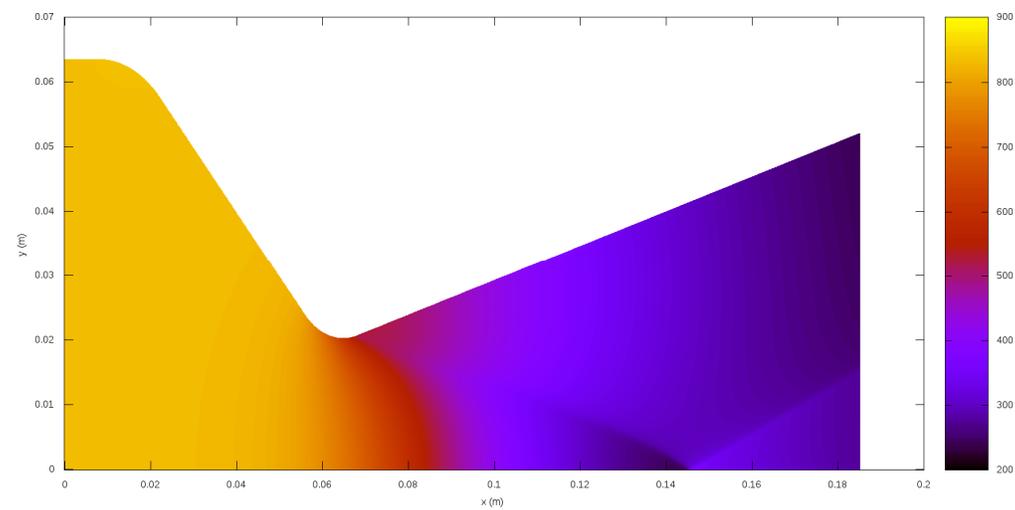


Figura 8. Campo de temperatura do escoamento invíscido com 1.792 x 640 volumes.

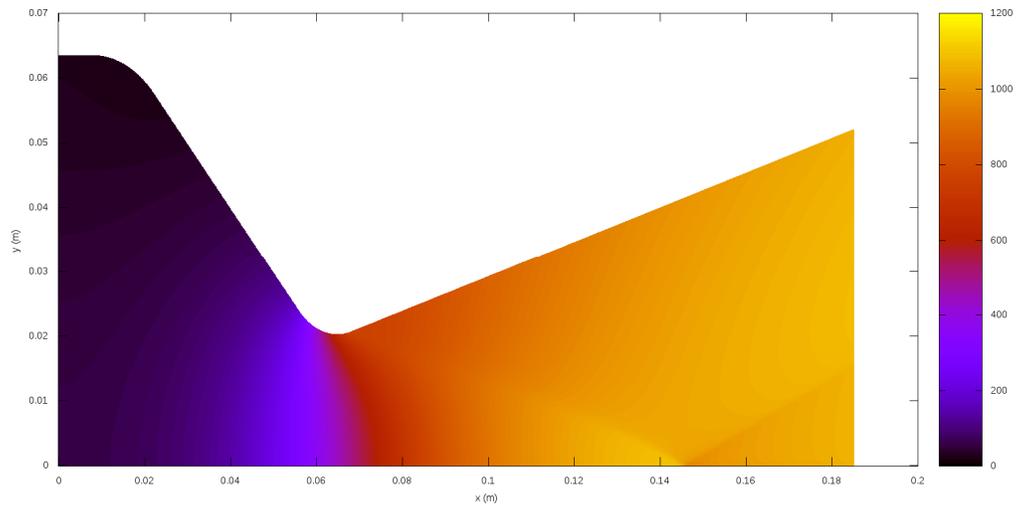


Figura 9. Campo de velocidade axial u do escoamento invíscido com 1.792×640 volumes.

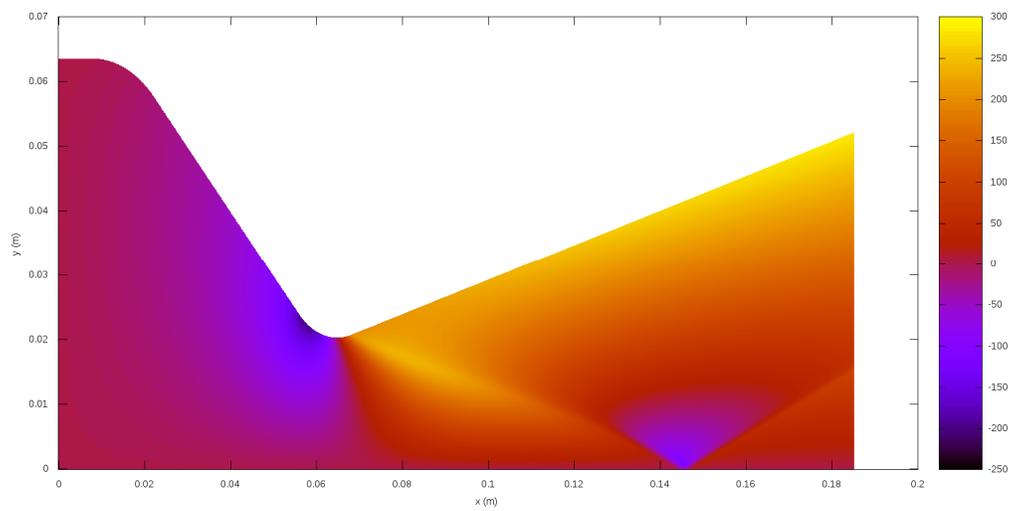


Figura 10. Campo de velocidade radial v do escoamento invíscido com 1.792×640 volumes.

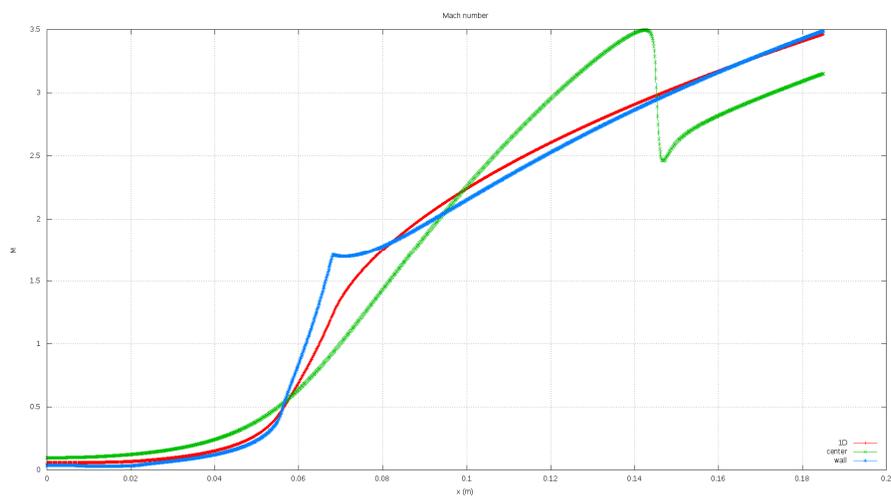


Figura 11. Perfis do número de Mach do escoamento invíscido com 1.792×640 volumes.

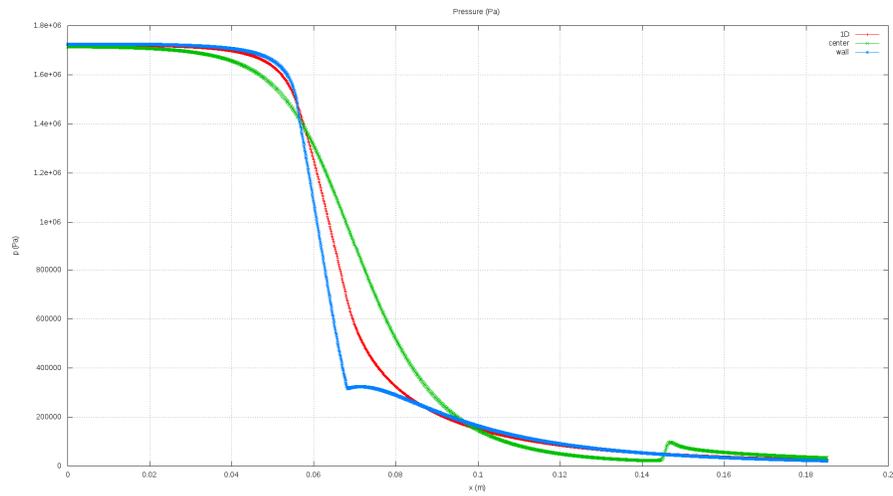


Figura 12. Perfis da pressão do escoamento invíscido com 1.792 x 640 volumes.

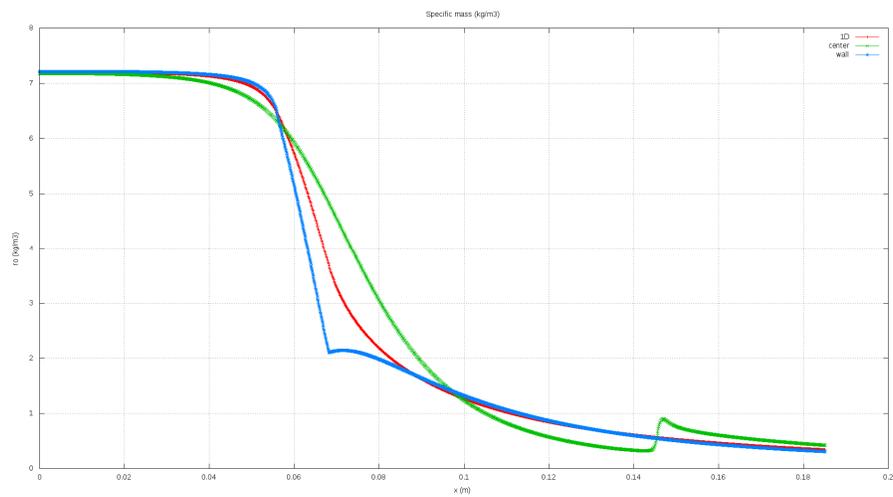


Figura 13. Perfis da massa específica do escoamento invíscido com 1.792 x 640 volumes.

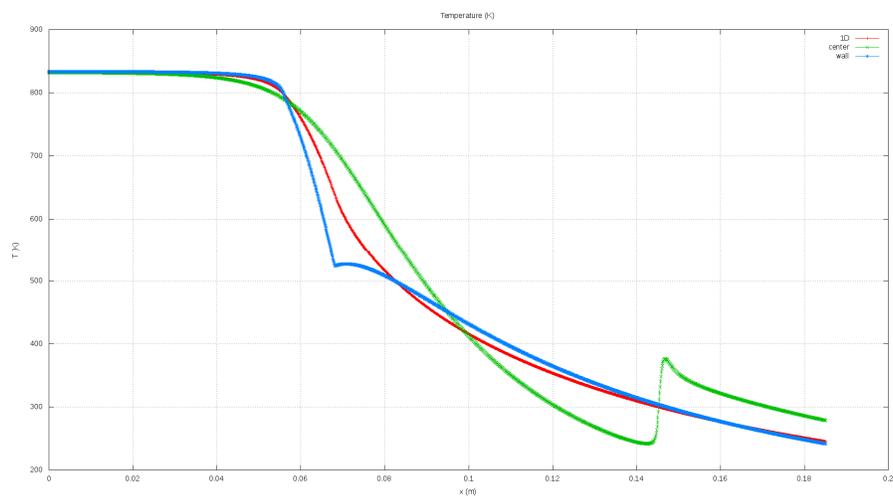


Figura 14. Perfis da temperatura do escoamento invíscido com 1.792 x 640 volumes.

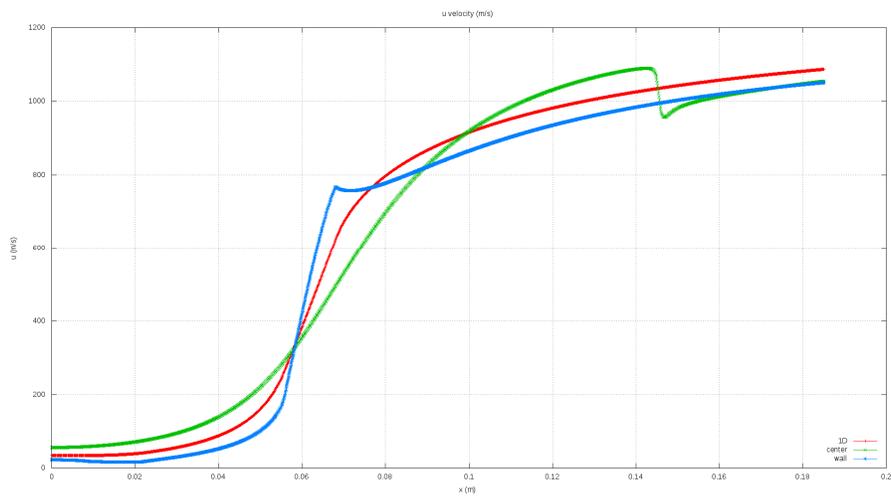


Figura 15. Perfis da velocidade axial u do escoamento invíscido com 1.792×640 volumes.

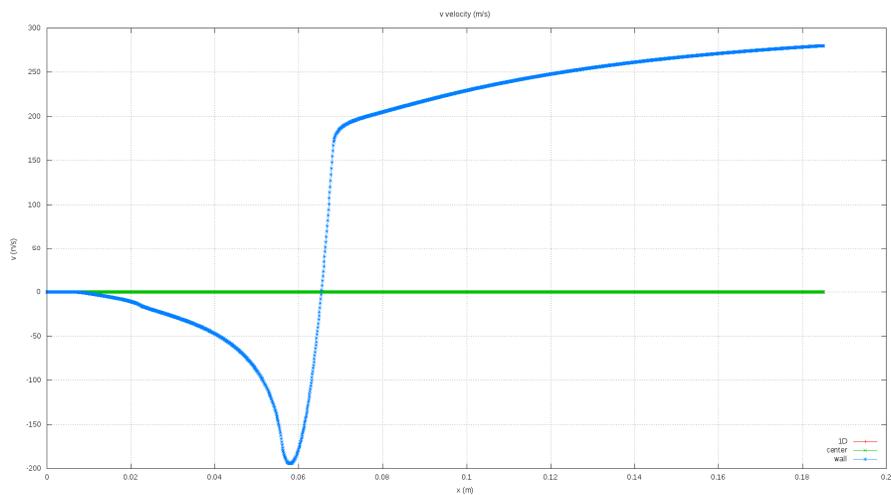


Figura 16. Perfis da velocidade radial v do escoamento invíscido com 1.792×640 volumes.

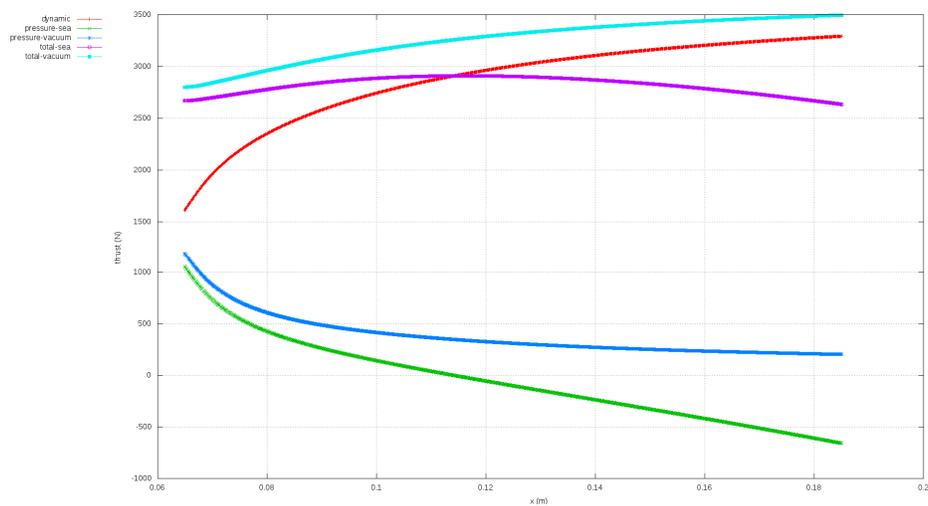


Figura 17. Empuxo a partir da garganta da tubeira do escoamento invíscido com 1.792×640 volumes.

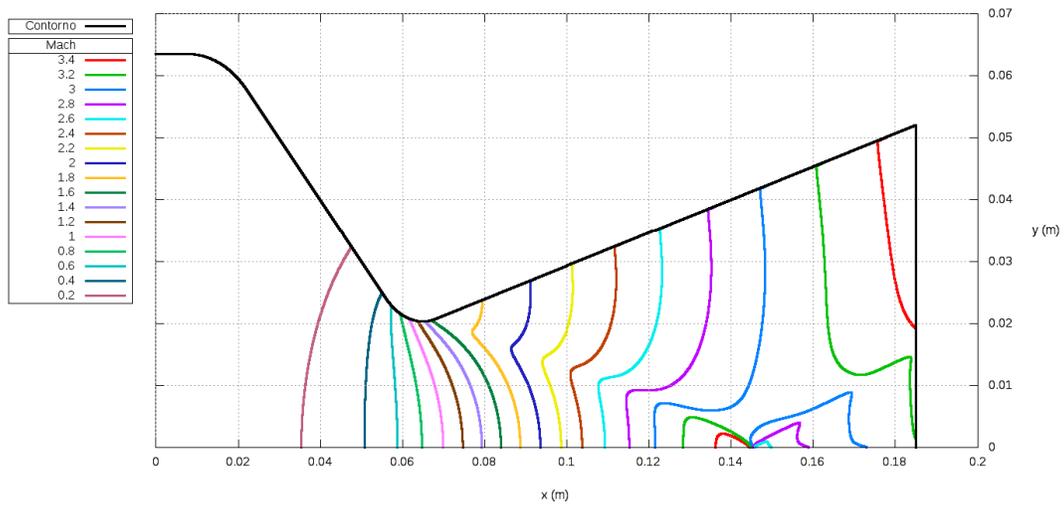


Figura 18. Linhas de número de Mach constante do escoamento invíscido com 1.792 x 640 volumes.

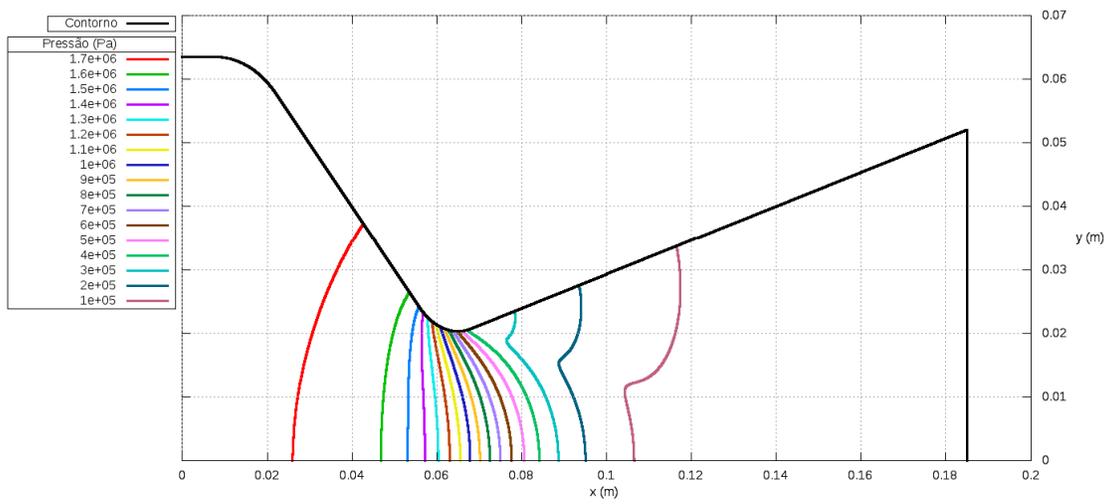


Figura 19. Isobáricas do escoamento invíscido com 1.792 x 640 volumes.

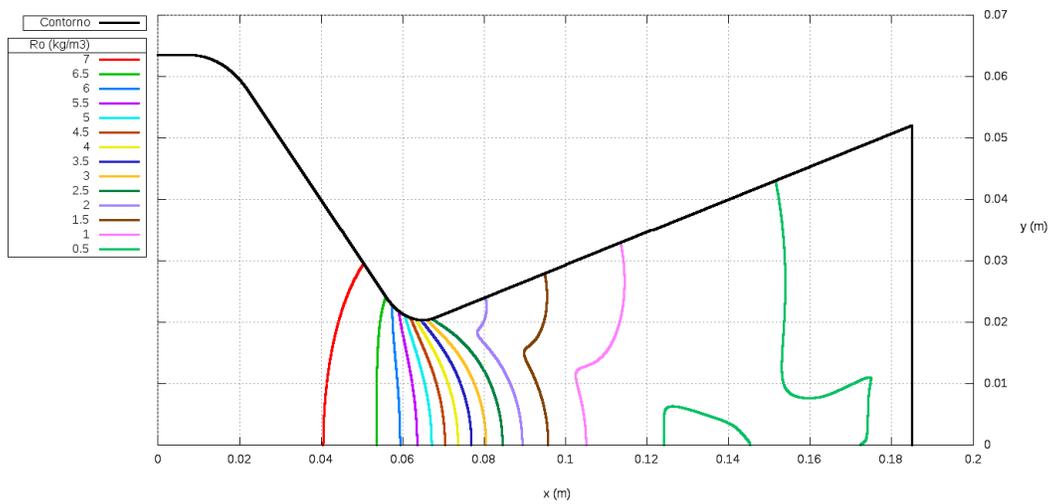


Figura 20. Linhas de massa específica constante do escoamento invíscido com 1.792 x 640 volumes.

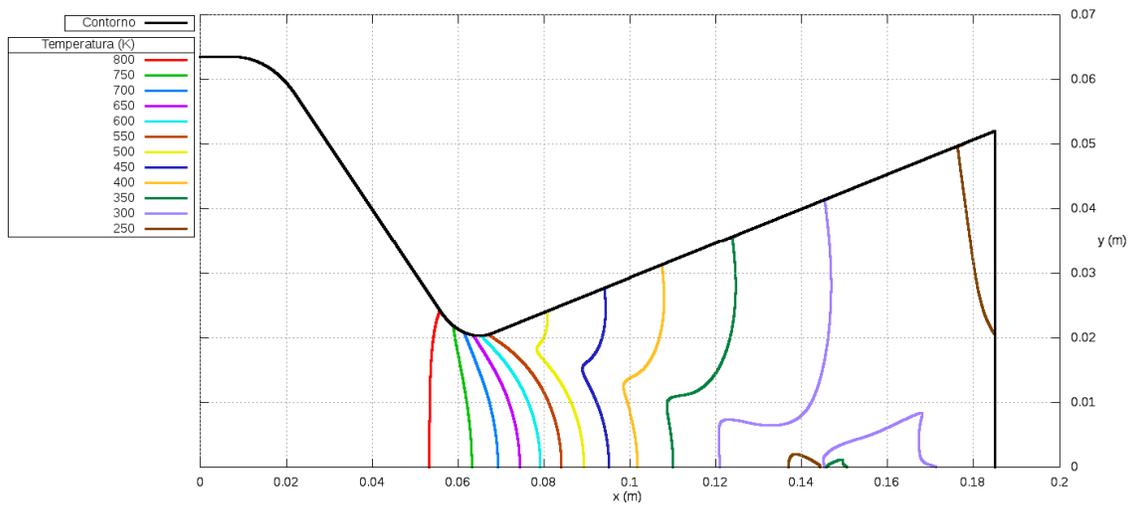


Figura 21. Isotermas do escoamento invíscido com 1.792×640 volumes.

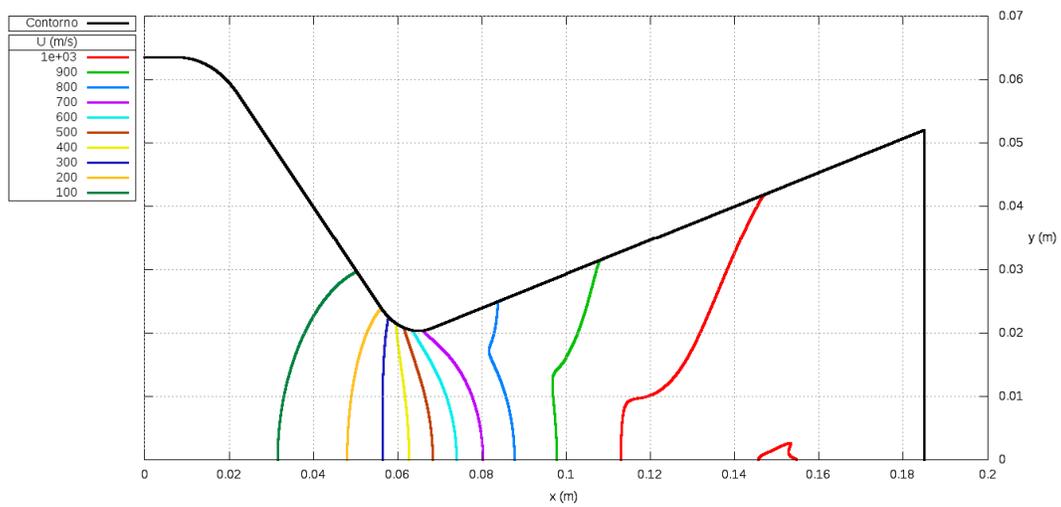


Figura 22. Linhas de velocidade axial u constante do escoamento invíscido com 1.792×640 volumes.

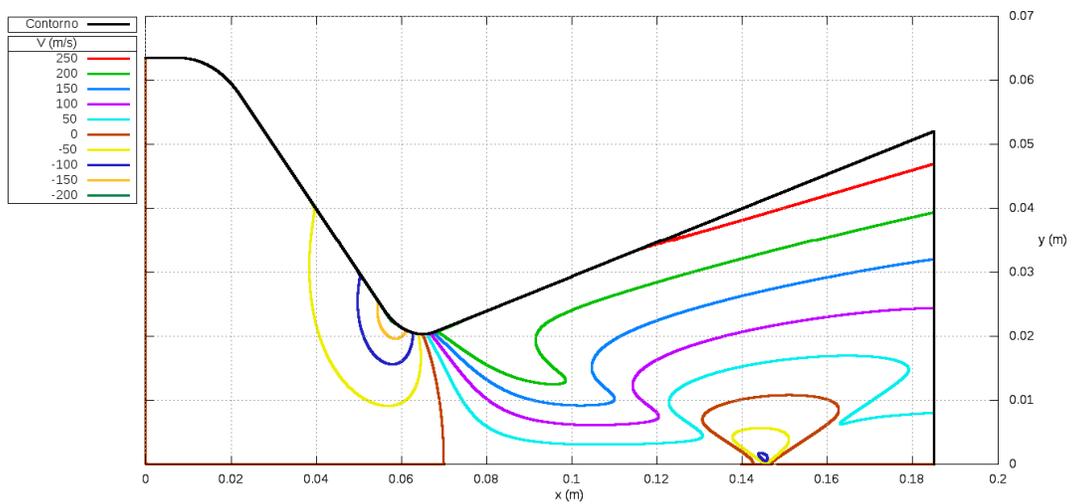


Figura 23. Linhas de velocidade radial v constante do escoamento invíscido com 1.792×640 volumes.

A temperatura na linha de centro da tubeira é mostrada na Figura 24 em função do tipo de escoamento: invíscido, laminar e turbulento. Nesta figura, a solução analítica unidimensional (1D) também é mostrada. Graficamente, a solução dos três tipos de escoamento coincide. Isso já não ocorre no caso da temperatura ao longo da superfície interna da parede da tubeira, conforme a Figura 25: os três tipos de escoamento apresentam perfil de temperatura muito diferente a partir da região da garganta e no divergente. O escoamento laminar apresenta o maior nível de temperatura, seguido pelos escoamentos turbulento e invíscido, e finalmente a solução 1D.

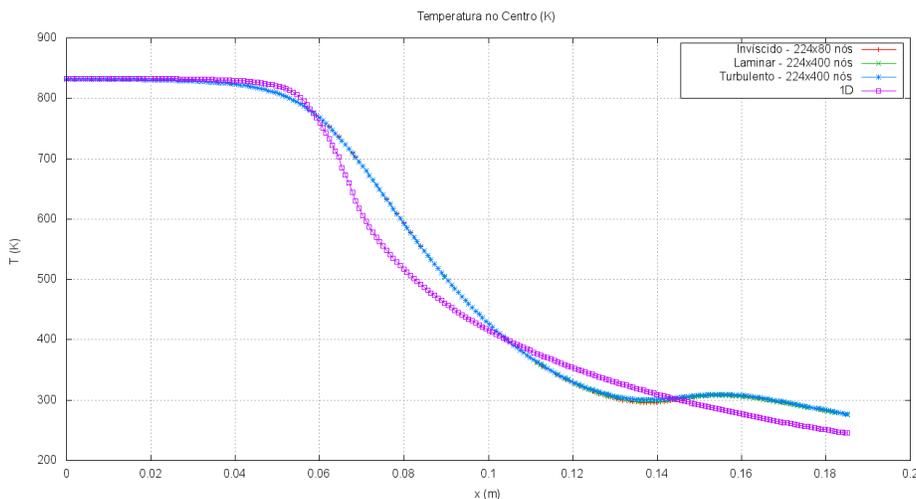


Figura 24. Temperatura na linha de centro da tubeira em função do tipo de escoamento.

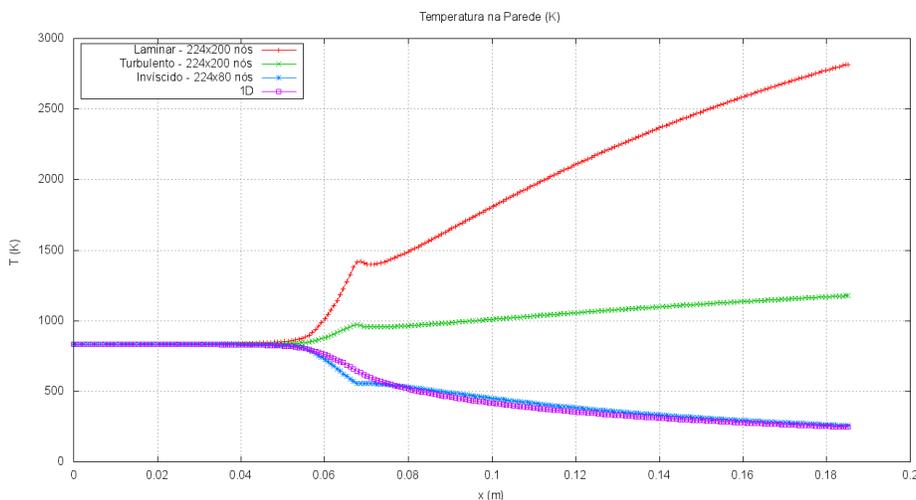


Figura 25. Temperatura na parede da tubeira em função do tipo de escoamento.

A pressão na linha de centro da tubeira é mostrada na Figura 26 em função do tipo de escoamento: invíscido, laminar e turbulento. Nesta figura, a solução analítica unidimensional (1D) também é mostrada. Graficamente, a solução dos três tipos de escoamento coincide.

A pressão ao longo da superfície interna da parede da tubeira é mostrada na Figura 27 em função do tipo de escoamento: invíscido, laminar e turbulento. Nesta figura, a solução analítica unidimensional (1D) também é mostrada bem como resultados experimentais de Back et al. [2]. No caso do escoamento invíscido são mostrados resultados para duas malhas: 224x80 e 1792x640.

Graficamente, a solução dos três tipos de escoamento coincide no caso da malha com 224 volumes na direção horizontal. A solução da malha com 1792 volumes na direção horizontal tem pequena diferença dos demais resultados numéricos apenas na região da garganta da tubeira. A solução 1D apresenta diferença significativa para as demais na região da garganta. Todas as soluções numéricas têm ótima concordância gráfica com os resultados experimentais.

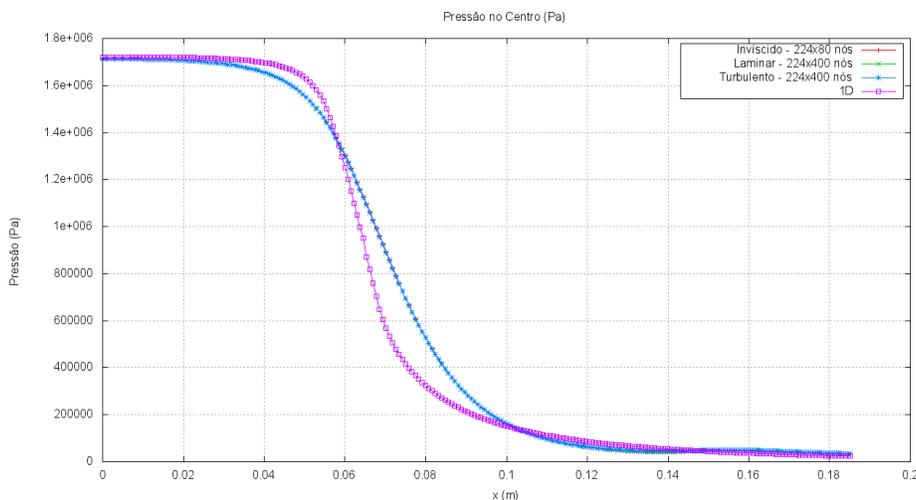


Figura 26. Pressão na linha de centro da tubeira em função do tipo de escoamento.

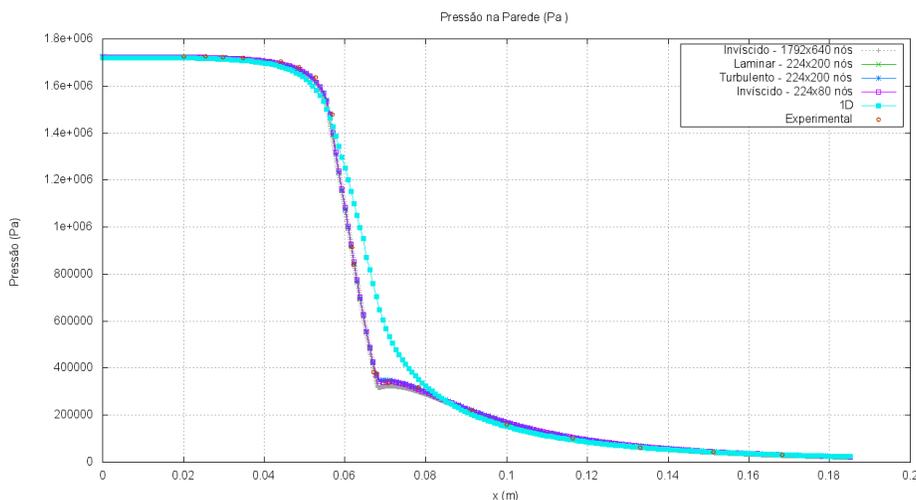


Figura 27. Pressão na parede da tubeira em função do tipo de escoamento.

4 CONCLUSÃO

Este relatório apresentou resultados obtidos pelo código computacional Mach2D 5.8, implementado durante a execução deste projeto CFD-14/AEB-3 financiado pelo AEB. Foram simulados escoamentos invíscidos, laminares e turbulentos em uma tubeira de motor-foguete real testada por Back et al. [2].

Com a execução deste estudo, verificou-se que:

1) Quanto mais complexo é o modelo matemático, menos malhas se consegue convergir.

- 2) A solução numérica dos três tipos de escoamento coincide graficamente para a temperatura e a pressão na linha de centro da tubeira, bem como para a pressão ao longo da parede da tubeira.
- 3) A solução numérica dos três tipos de escoamento para a temperatura ao longo da parede da tubeira é muito diferente a partir da região da garganta e no divergente da tubeira.
- 4) A solução numérica dos três tipos de escoamento para a pressão ao longo da parede da tubeira têm ótima concordância gráfica com os resultados experimentais.

REFERÊNCIAS

- [1] MARCHI, C. H.; BERTOLDO, G. **Relatório técnico do projeto CFD-14/UFPR: modelagem de escoamento turbulento (Baldwin-Lomax) do código Mach2D**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. 26 p.
- [2] BACK, L. H.; MASSIER, P. F.; GIER, H. L. Comparison of measured and predicted flows through conical supersonic nozzles, with emphasis on the transonic region. **AIAA Journal**, v. 3, n. 9, p. 1606-1614, 1965.
- [3] MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: LTC, 1995.
- [4] MARCHI, C. H. **Verificação de soluções numéricas unidimensionais em dinâmica dos fluidos**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2001. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica.