

PROPULSÃO II

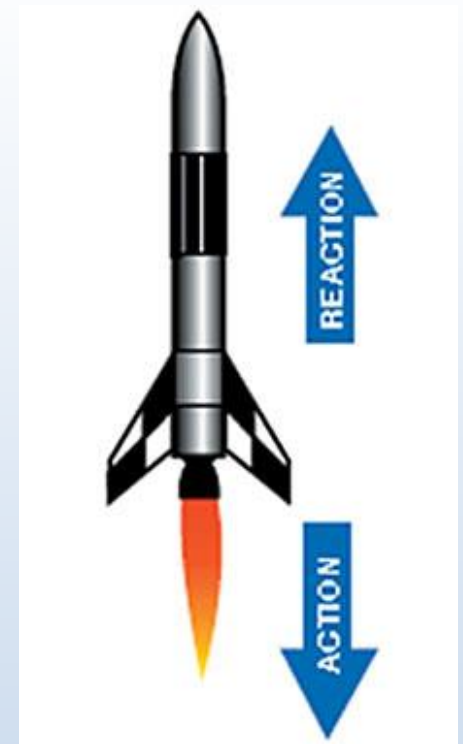
Motores Foguete

Bocais Convergente-Divergente

Prof. José Eduardo Mautone Barros

mautone@demec.ufmg.br

www.mautone.eng.br



Motores Foguete

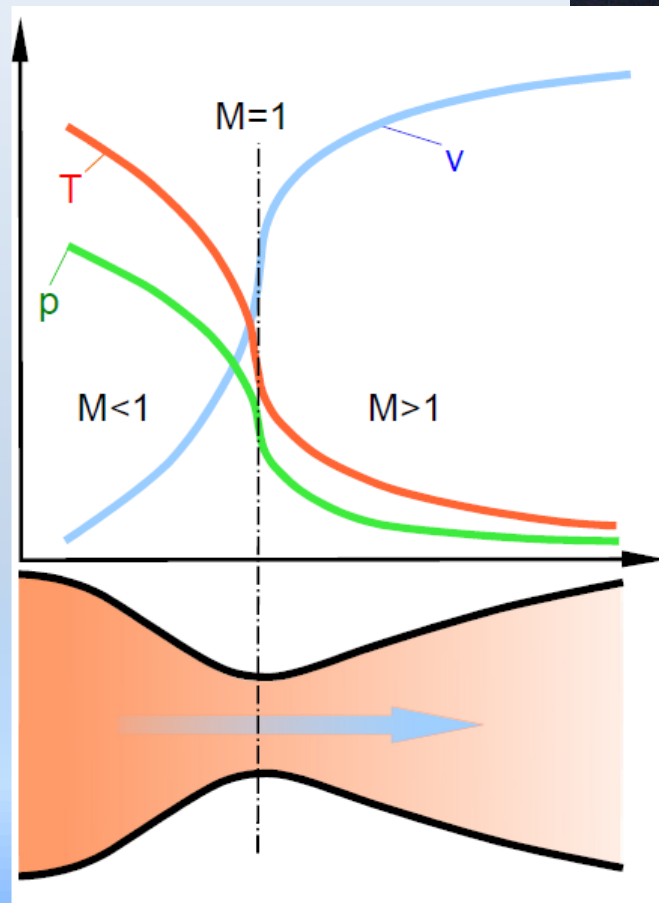
□ Bocais Convergente-Divergente

- Definição
- escoamento compressível com área variável
- Onda de choque normal e oblíqua
- Parâmetros da tubeira
- Sobre-expansão e Subexpansão
- escoamento sônico na garganta
- Formato da tubeira e tubeira ótima
- Controle do vetor empuxo
- escoamento com duas fases
- escoamento em equilíbrio químico
- escoamento com cinética química

Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

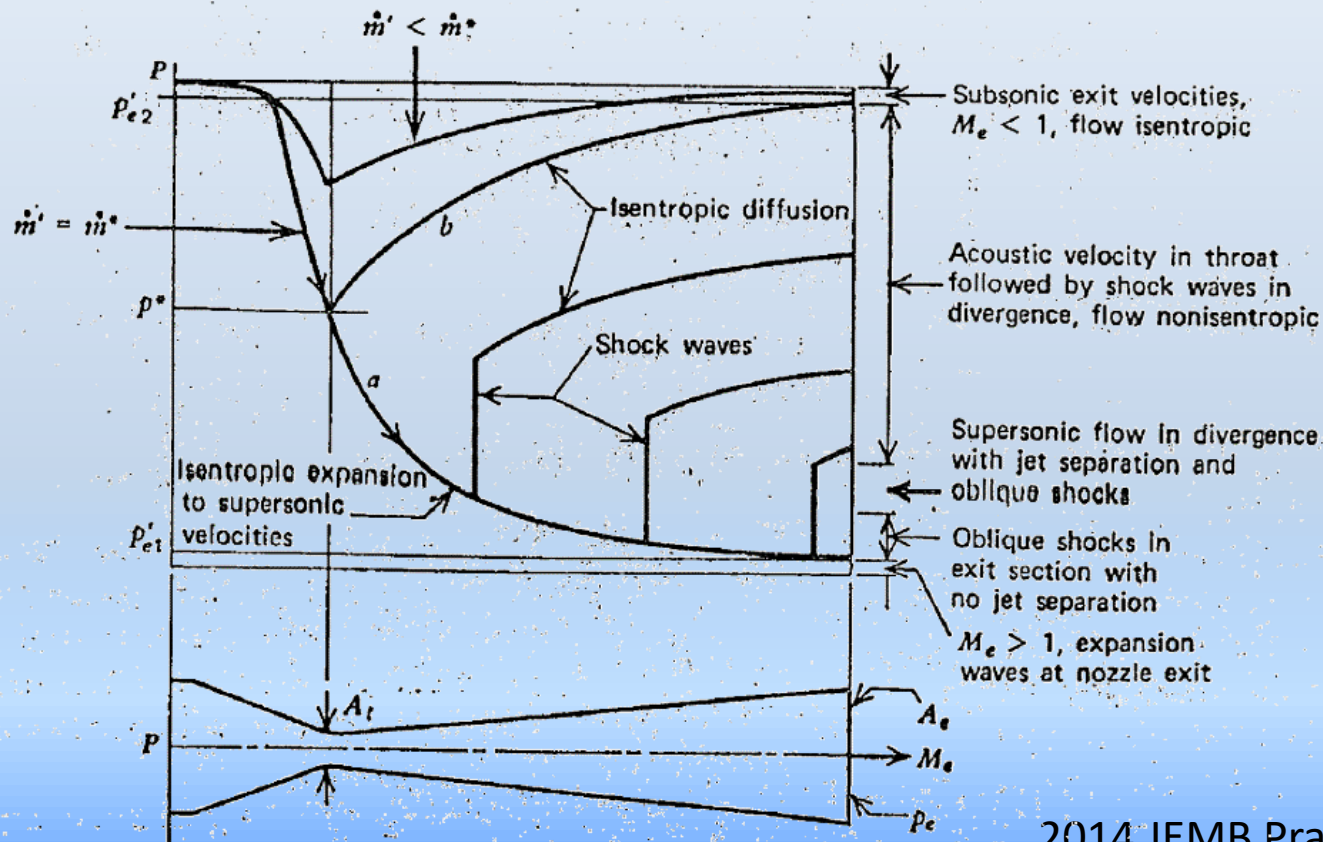
- Definição
 - Tubeira
 - Bocal De Laval (1890)
 - Tem a função de converter a energia térmica dos gases em energia cinética, usada para gerar a propulsão do foguete.



Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

- escoamento compressível com área variável



Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

- Onda de choque normal e oblíqua

Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

- Parâmetros da tubeira
 - Constante gama maiúsculo $\Gamma = \sqrt{\gamma} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$
 - Velocidade do som na câmara de combustão $a_c = \sqrt{\gamma RT_c}$
 - Velocidade característica $c^* = \frac{\sqrt{RT_c}}{\Gamma} = \frac{P_c A_t}{\dot{m}}$
 - Vazão mássica da tubeira (entupida) $\dot{m} = \Gamma \frac{P_c A_t}{\sqrt{RT_c}}$
 - Coeficiente de descarga $C_D = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{IsoS}}$
 - Coeficiente de tração

$$C_F = \frac{F}{P_c A_t} = \frac{\dot{m} V_e}{P_c A_t} + \left(\frac{p_e}{P_c} - \frac{p_0}{P_c} \right) \frac{A_e}{A_t}$$

Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

- Parâmetros da tubeira
 - Coeficiente de tração

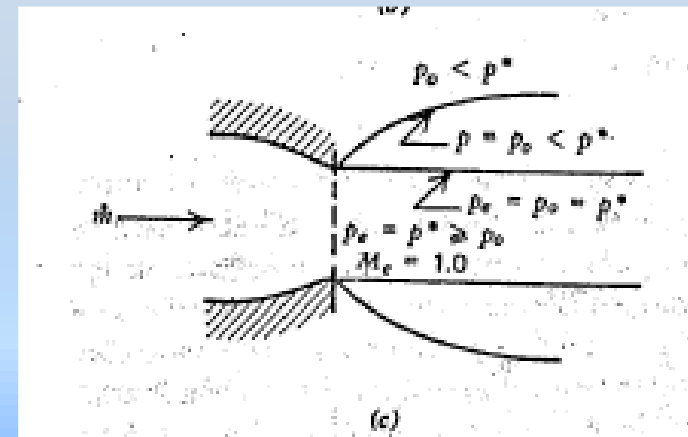
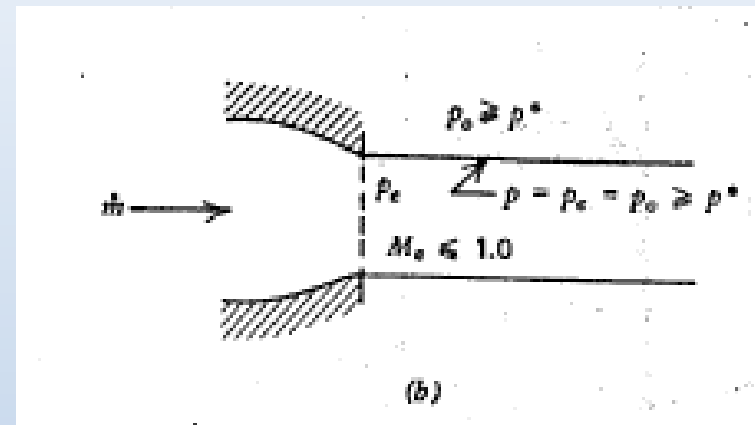
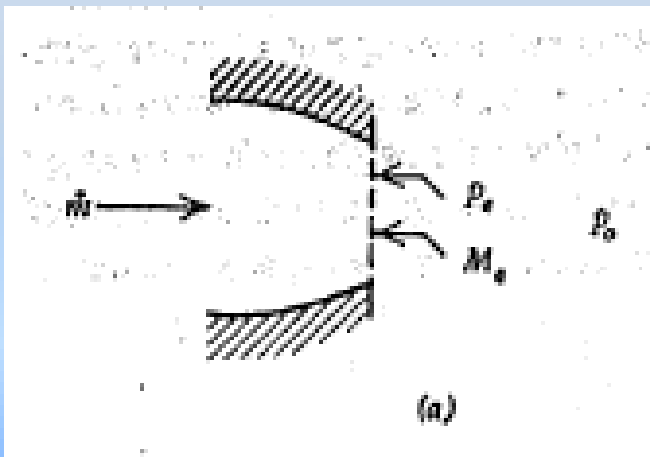
$$C_F = \frac{F}{P_c A_t} = \frac{\dot{m} V_e}{P_c A_t} + \left(\frac{p_e}{P_c} - \frac{p_0}{P_c} \right) \frac{A_e}{A_t}$$

$$C_F = \gamma \left\{ \frac{2}{\gamma - 1} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \left[1 - \left(\frac{p_e}{P_c} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2} + \left(\frac{p_e}{P_c} - \frac{p_0}{P_c} \right) \frac{A_e}{A_t}$$

Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

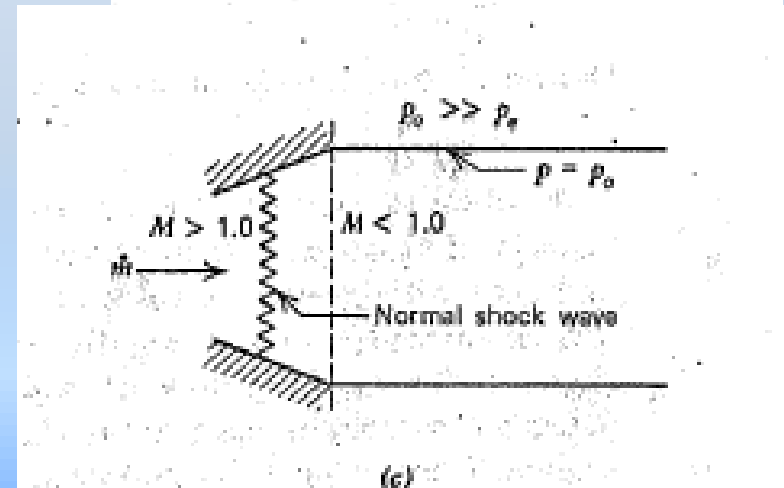
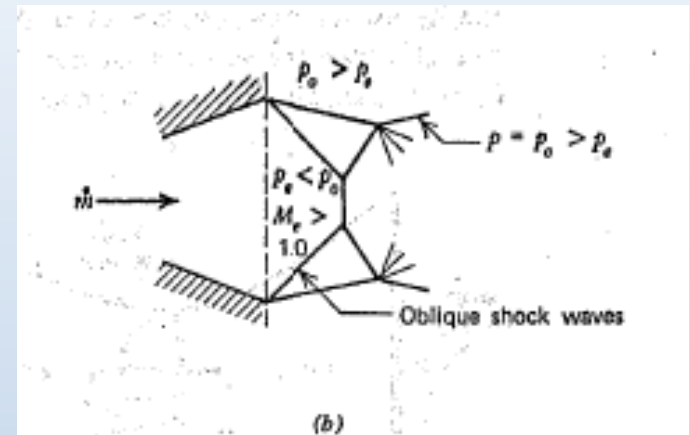
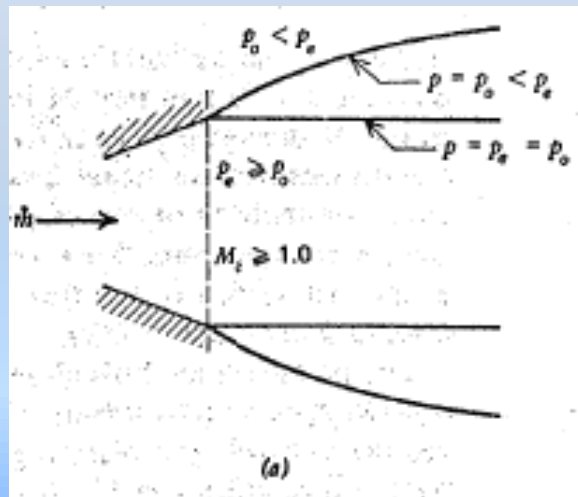
- Expansão ótima (a)
- Sub-expansão (b e c)
- Bocal convergente
- $M \leq 1$



Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

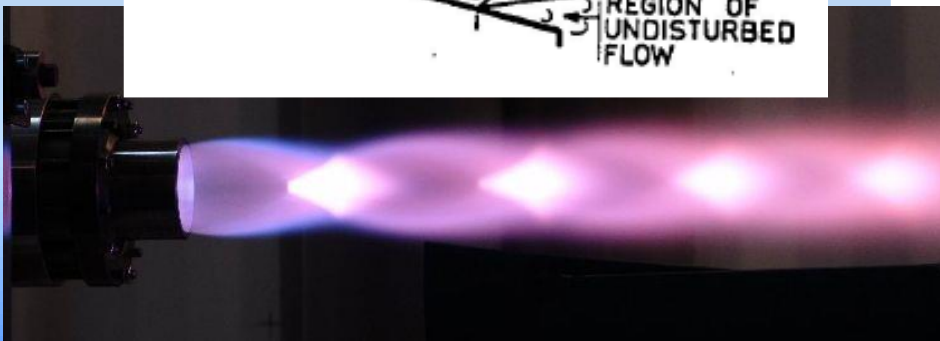
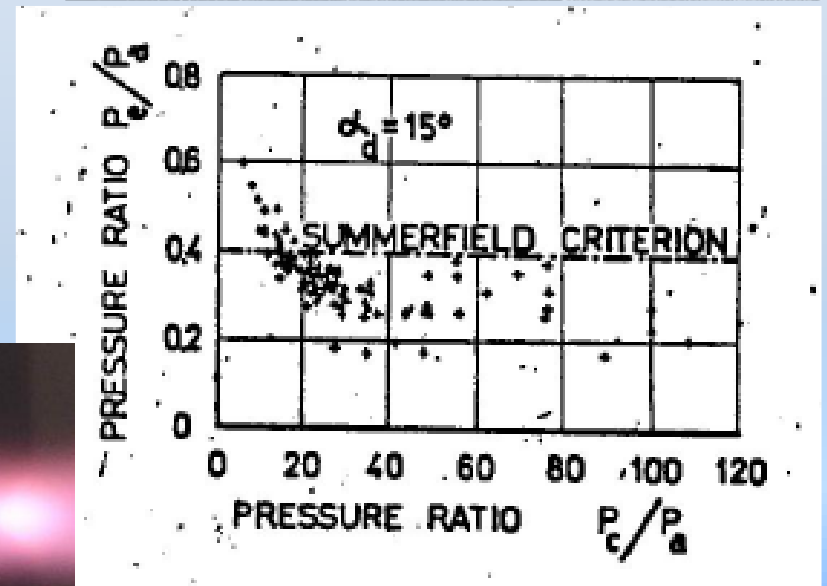
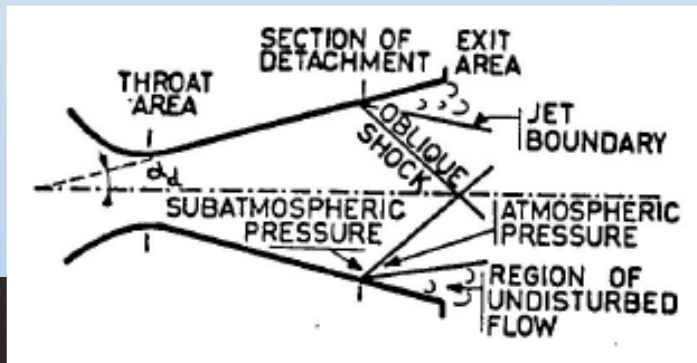
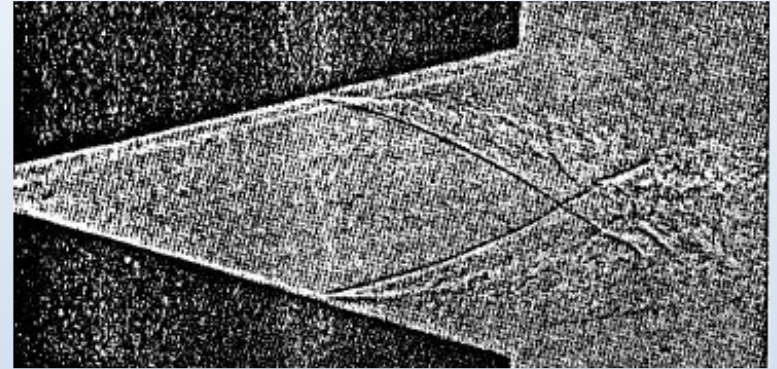
- Sobre-expansão (b e c)
- Subexpansão (a)
- $M > 1$



Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

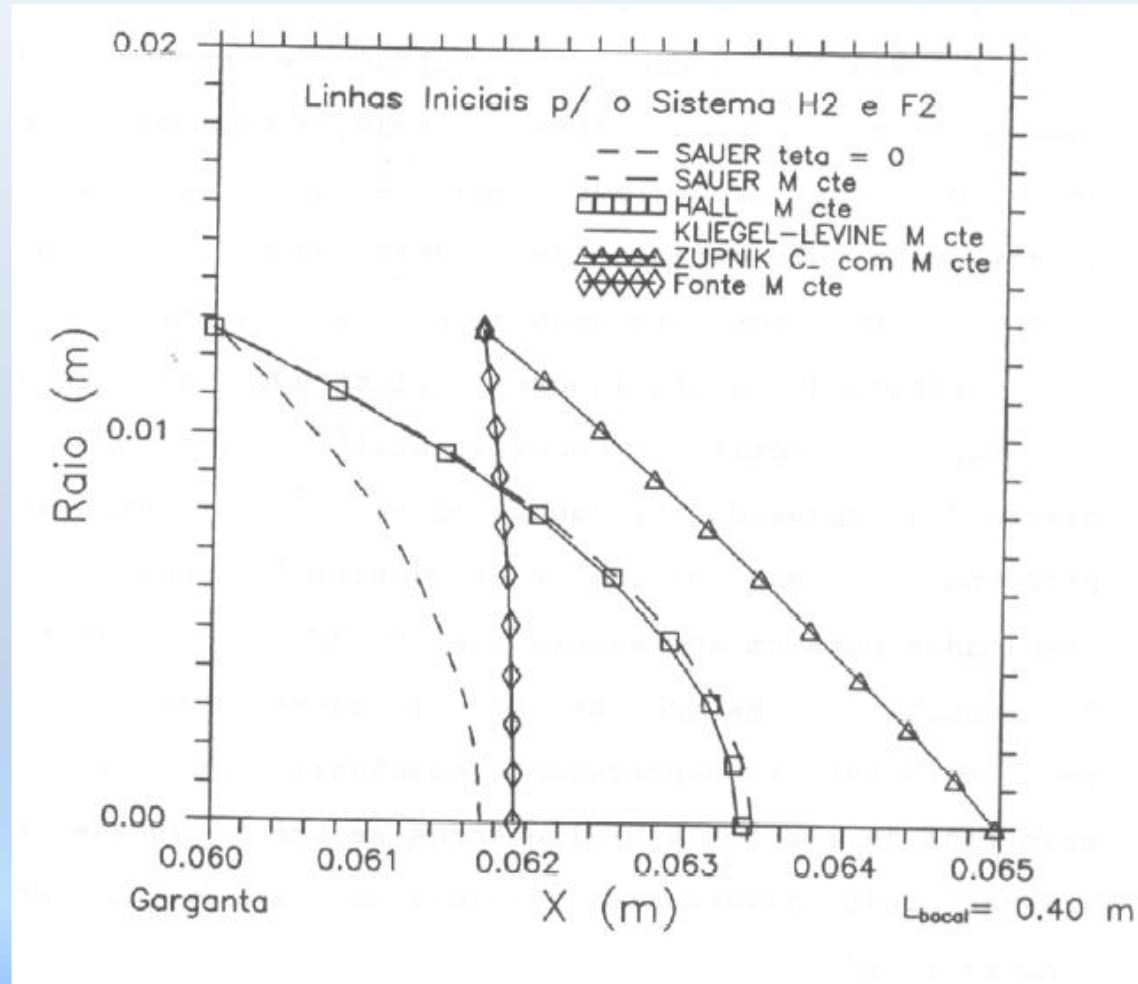
- Sobre-expansão
- Critério de Summerfield
 $P_s/P_a = 0,282$ para separação do escoamento



Motores Foguete

□ Bocais Convergente- Divergente

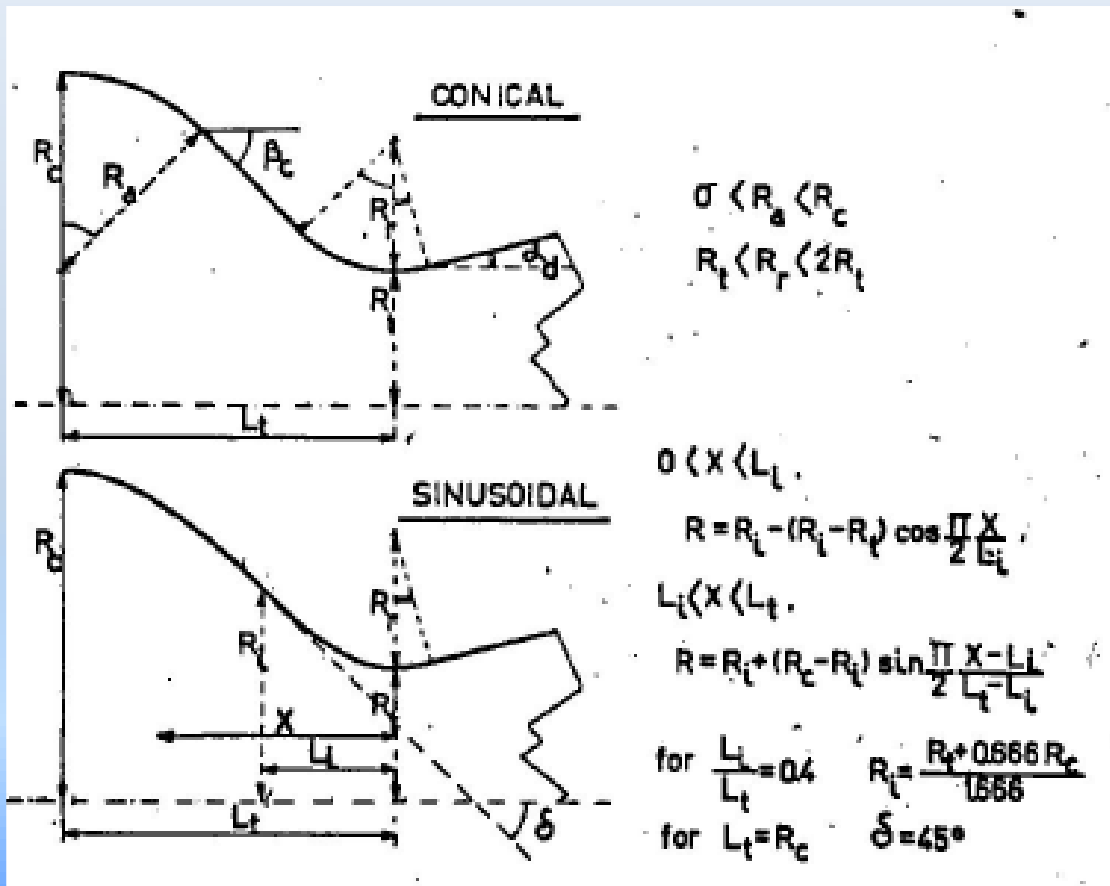
- Escoamento Sônico
- Garganta da Tubeira, tipo circular
- Linha de escoamento sônico ($M=1$)
- Série de Kliegel-Levine é a mais apropriada (método das pequenas perturbações)



Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

- Formato da tubeira

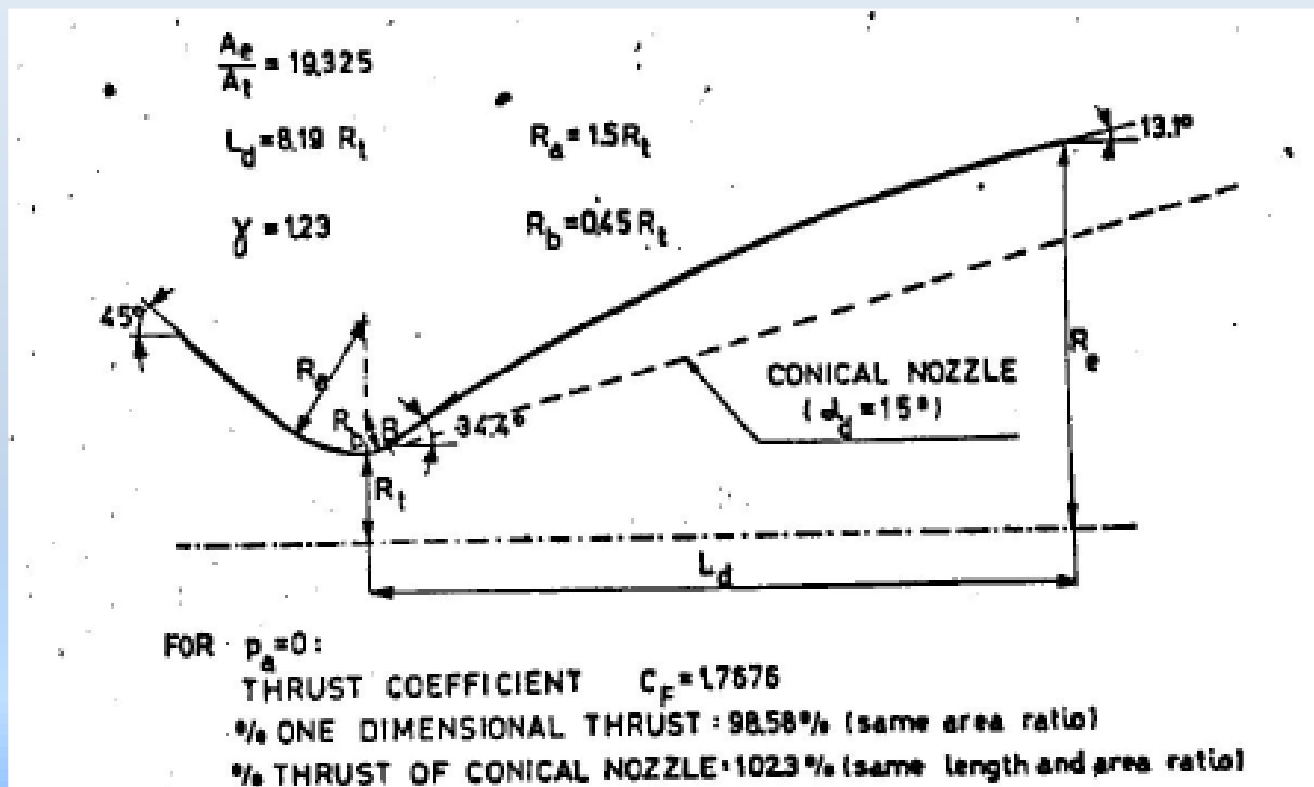


Convergente 45°
 Garganta cilíndrica
 $(R_r \geq 0,8R_t)$
 Divergente 15°

Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

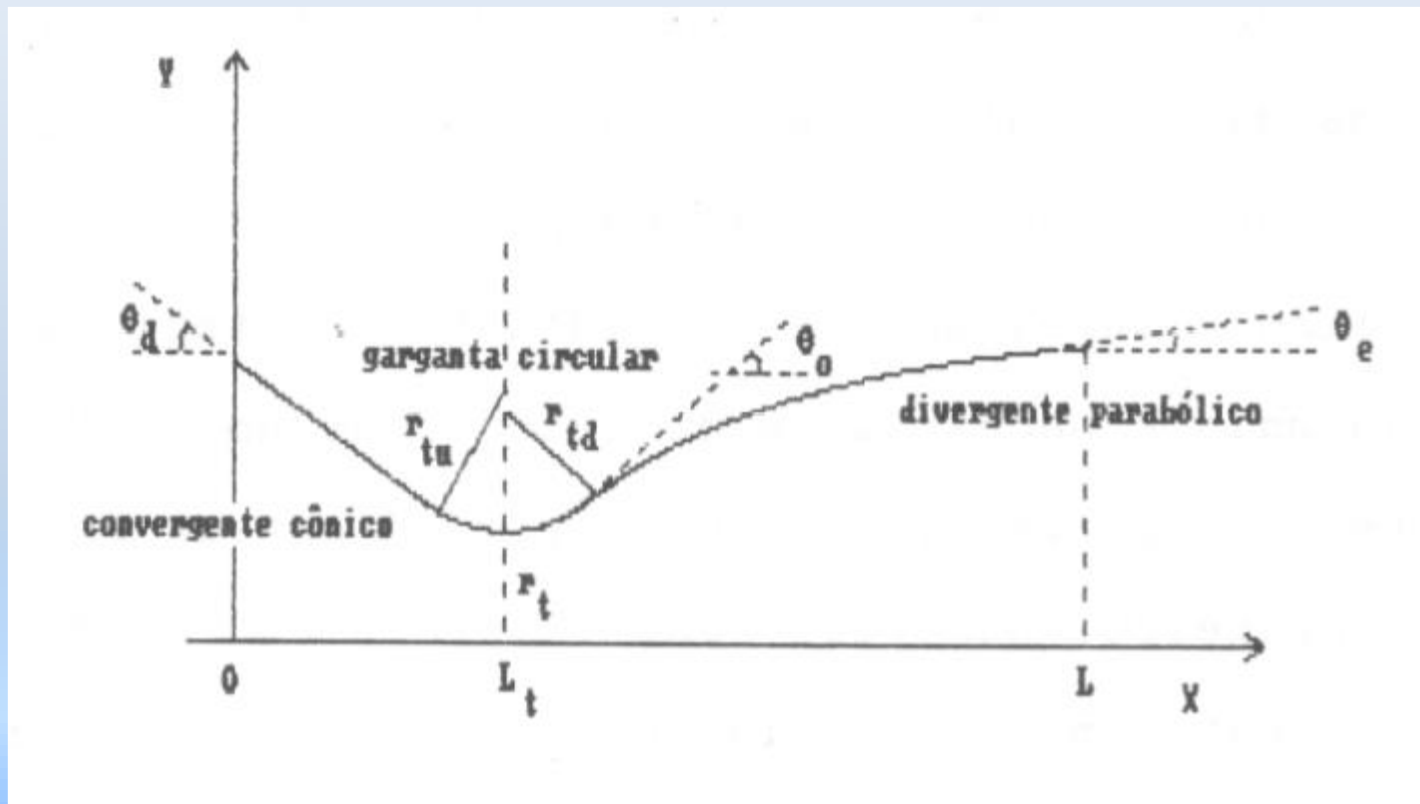
- Formato em Sino da tubeira (*bell shaped*)



Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

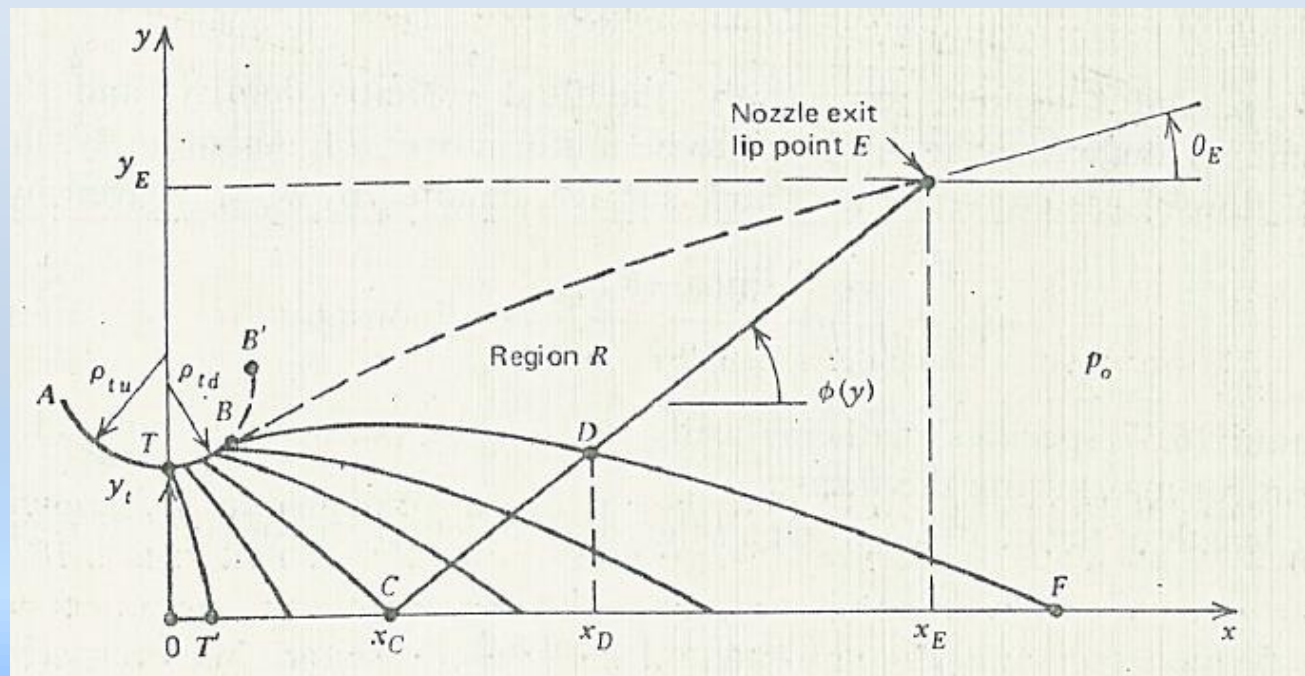
- Formato da tubeira ótima



Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

- Formato da tubeira ótima
- Método de Rao, 1958
- Programa FORTRAN por DLR
- Matlab por B. J. Olson



Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

- Exercício de formato da tubeira ótima usando as ferramentas de Matlab por B. J. Olson. Projetar o bocal ótimo em tração, para o motor foguete que compõem o motor RISCARAM do POHOX. Considerar:
 - Convergente cônico de 45°
 - Garganta circular de 9 mm de diâmetro e com raio de 10 mm
 - Comprimento total da tubeira de 40 mm
 - Pressão de câmara de combustão de 5 bar
 - Gama de 1,3, T_c de 3400 K e $c^* = 1673$ m/s
 - Pressão na seção de saída de 0,3 bar (razão de expansão de área de $A_e/A_t = 6:1$)

Motores Foguete

❑ Bocais Convergente-Divergente

- Controle do vetor empuxo
 - Aletas (vanes)
 - Inspeção secundária
 - Tubeira móvel
 - Motor móvel (suporte pivotado)

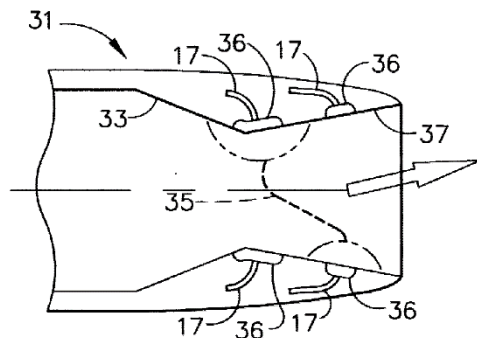
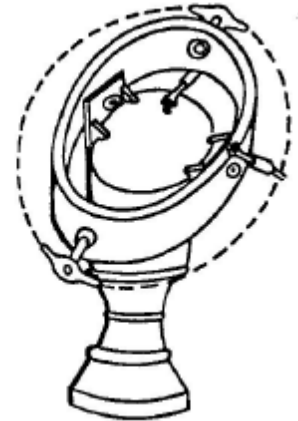
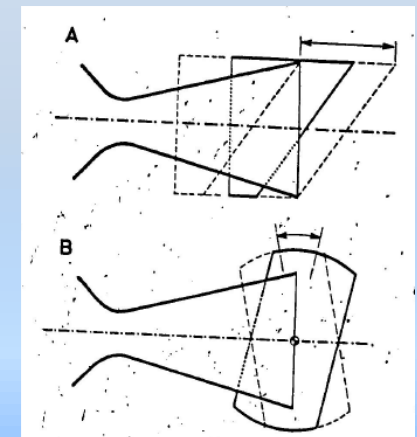
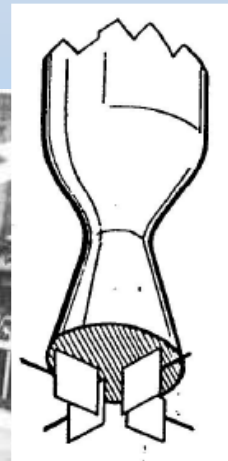
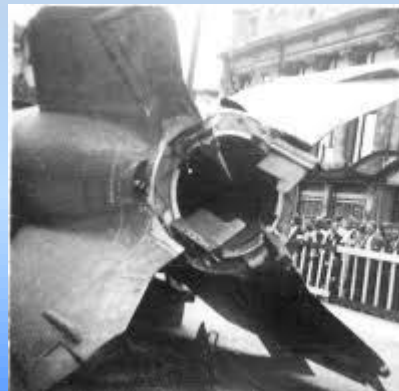


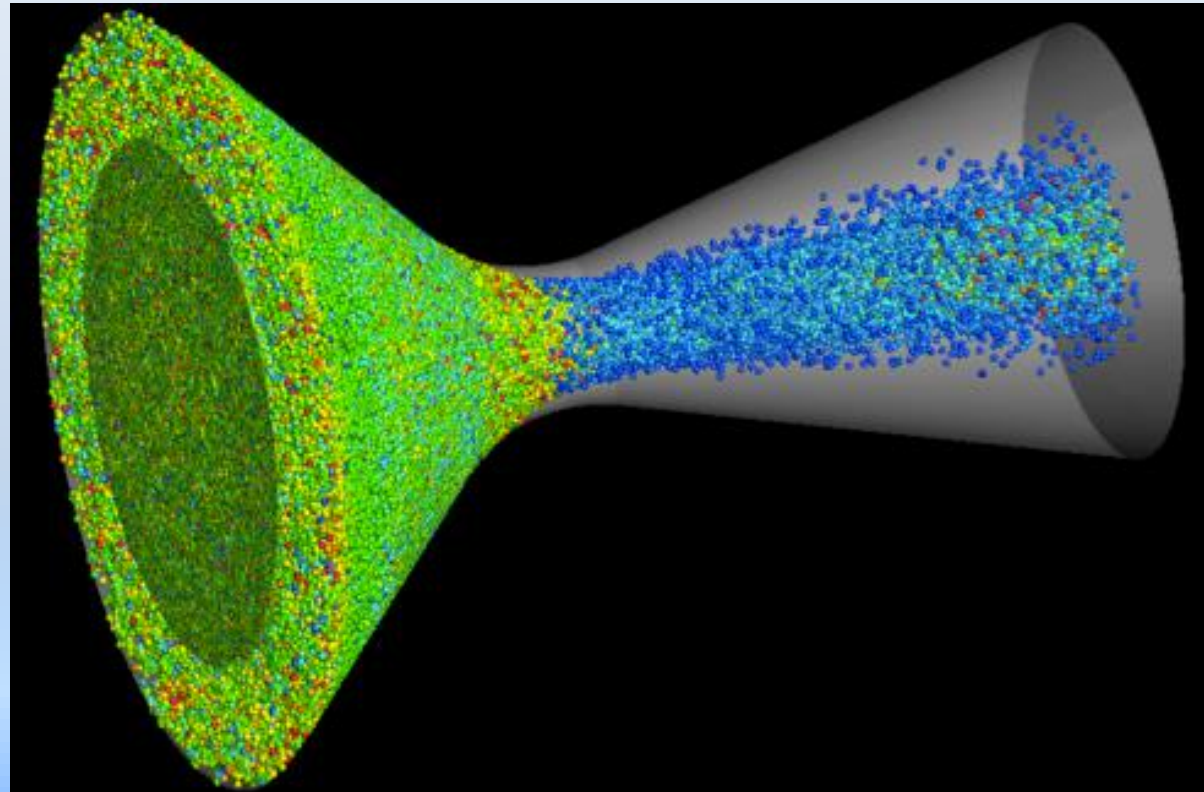
FIG. 5



Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

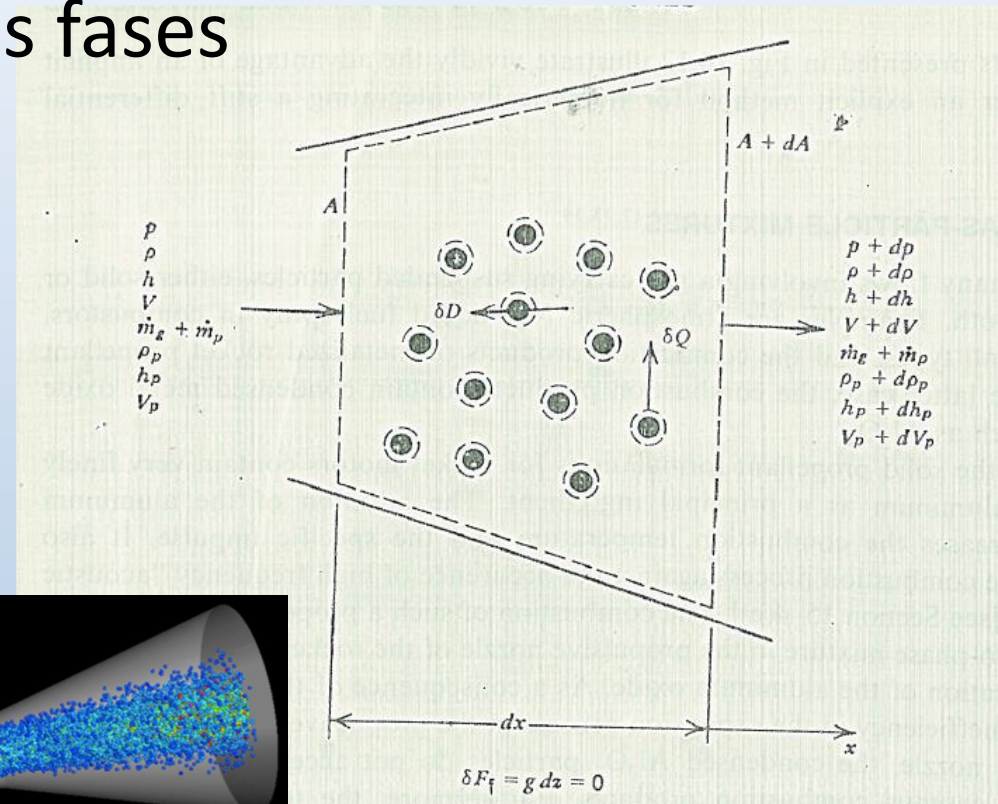
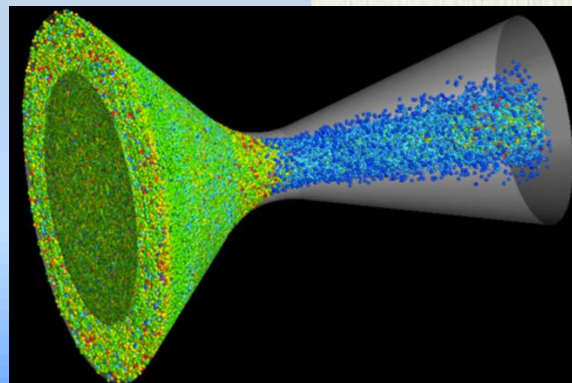
- Escoamento com duas fases
- Motor foguete a propelente sólido
- Alumínio no propelente
- Alumina na exaustão (Al_2O_3)
- Redução no Isp



Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

- escoamento com duas fases
- Alumina na exaustão (Al_2O_3)
- Modelo Euleriano gás de partículas
- Modelo Lagrangiano partículas individuais



Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

- Escoamento com duas fases
- Modelo Euleriano
gás de partículas
- Equilíbrio térmico e cinético
entre
partícula
e o gás

$$c = \frac{F}{\dot{m}} = (1-\epsilon) (u_g)_e$$

$$I_{sp} = \frac{c}{g} = \frac{1-\epsilon}{g} (u_g)_e$$

$$[u_g]_e = \left[\frac{2\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}-1} \frac{\bar{R}}{\bar{M}} T_c \left[1 - \frac{(p_g)_e}{(p_g)_c} \frac{\bar{\gamma}-1}{\bar{\gamma}} \right] \right]^{\frac{1}{2}}$$

Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

- Modelo Euleriano gás de partículas
- Modelo Lagrangiano partículas individuais

$$\bar{M} = \frac{\bar{M}_g}{1-\epsilon} \longrightarrow \text{peso molecular médio}$$

$$\bar{\gamma} = \frac{(1-\epsilon) c_p + \epsilon c_s}{(1-\epsilon) c_v + \epsilon c_s} = \gamma - \frac{(\gamma - 1)}{\left[1 + \frac{c_v}{c_s} \left(\frac{1-\epsilon}{\epsilon} \right) \right]}$$

$$R_g = \frac{\bar{R}}{M_g}; \quad \bar{R} = \text{constante universal dos gases}$$

$$T_c = 3000^\circ\text{K}; \quad \epsilon = 0,2; \quad c_p = 0,75 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg K}}$$

$$c_s = 0,5 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg K}}; \quad \bar{M}_g = 20 \text{ Kg/Kmol}; \quad \frac{(p_g)_c}{(p_g)_e} = 20,4$$

Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

- escoamento congelado (*Frozen*)
- escoamento em equilíbrio químico
NASA-SP-273
- escoamento com cinética química
ODK, TDK

Motores Foguete

□ Bocais Convergente-Divergente

- Adaptação com altitude
 - Dual Bell nozzle
 - Aerospike
 - Thrust Augmentation Nozzle (TAN)

Bibliografia

- BARRERE, M., JAUMOTTE, A., DE VEUBEKE, B. F. e VANDENKERCKOVE, J. *Rocket Propulsion*. Amsterdam: Elsevier, 1960. 829p.
- ALVIM FILHO, G. *Problemas Relativos a Motor Foguete*. Apostila de Curso, PRP-30. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos: ITA. 1982.
- ALVIM FILHO, G. *Motor Foguete*. Apostila de Curso, PRP-11. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos: ITA. 1983.
- MATTINGLY, J. D. *Elements of Gas Turbine Propulsion*. New York: McGraw-Hill, 1996. 960p.
- OATES, G. C. *Aerothermodynamics of Gas Turbine and Rocket Propulsion*, AIAA Education Series. Washington, DC: AIAA, 1988. 456p.
- CORNELISSE, J. W., SCHÖYER, H. F. R. et WAKKER, K. F. *Rocket Propulsion na Spaceflight Dynamics*. London: Pitman, 1979, 505p.

Bibliografia

- RAO, G. V. R. *Exhaust Nozzle Contour for Optimum Thrust*. Jet Propulsion. Washington: AIAA, vol. 28, no. 6, june 1958. pp. 377-382
- Dissertação Mautone
- ZUCROW e HOFFMAN

Exercícios

- 1) Otimizar a tubeira do motor foguete do sistema RISCRAAM jet cujos dados estão na prancha 15. Usar o programa de Olson.
- 2) Calcular o a velocidade característica de exaustão e o impulso específico de um propelente sólido com 15% em massa de alumínio em pó. Considere os dados da Prancha 20. Calcule o valor da razão de massa de partículas por massa de gás na exaustão considerando estas como Alumina (Al_2O_3). Comente a perda de impulsão.
- 3) Para uma tubeira de diâmetro de câmara de 25,4 mm, 45 graus de convergente, 15 graus de divergente, diâmetro de garganta de 9 mm, raio de curvatura da parede a garganta de 10 mm e razão de expansão de 6:1. Calcular a curva de pressão e temperatura estática e o número de Mach ao longo da tubeira para uma pressão de câmara de 5 bar. Determinar a posição e força do choque de um choque normal para uma pressão a jusante de 2 bar. Determinar a posição e força do choque de um choque oblíquo para uma pressão a jusante de 1 bar.