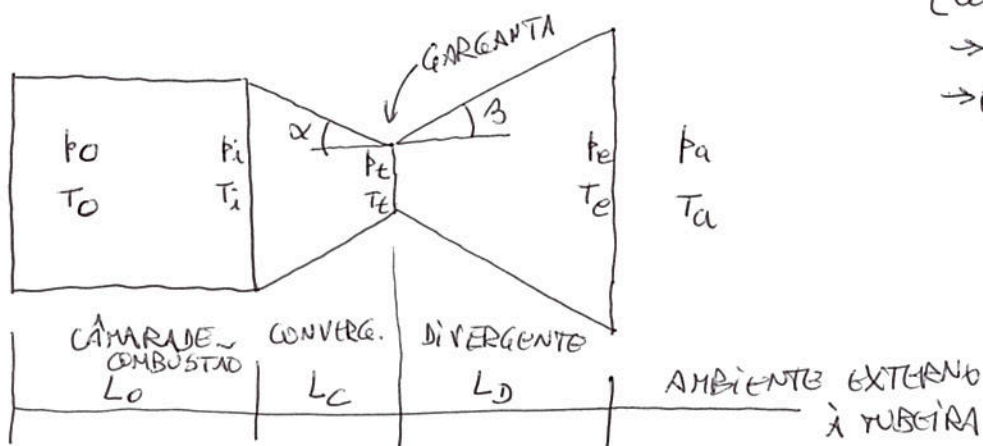


CAP. 7 TUBEIRA

[LEVAR TUBEIRAS ~~DE~~
VÁRIAS DO NETUNO]
(4)7.1 DEFINIÇÕES

TUBEIRA: É UM BOCAL CONVERGENTE-DIVERGENTE USADO EM MOTORES-FOGUETE PARA AUMENTAR O EMPUXO.



[COMENTAR:

- RAIOS DE ARREDONDAMENTO
- OUTROS TIPOS DE TUBEIRAS

BOCAL: DISPOSITIVO USADO PARA AUMENTAR A VELOCIDADE DO ESCOAMENTO.

NÚMERO DE MACH: RAZÃO ENTRE A VELOCIDADE ^(V) DO ESCOAMENTO E A VELOCIDADE ~~DE~~ DO SOM (a),
(M)

$$M = \frac{V}{a} = \frac{V}{\sqrt{\gamma R T}} \text{ para gases perfeitos} \quad (7.1)$$

ONDE γ = RAZÃO ENTRE OS CALORES ESPECÍFICOS (ADIM.)
 T = TEMPERATURA (K)
 R = CONSTANTE DO GÁS (J/kg.K)

TIPOS DE ESCOAMENTO:

- SUBSÔNICO: $M < 1$
- TRANSÔNICO: $0,9 \lesssim M \lesssim 1,1$
- SÔNICO: $M = 1$
- SUPERSÔNICO: $1 < M \lesssim 5$
- HIPERSÔNICO: $M \gtrsim 5$

PARA AUMENTAR A VELOCIDADE:

- SE $M < 1$, DEVE-SE DIMINUIR A ÁREA (A) DO ESCOAMENTO
- SE $M > 1$, " AUMENTAR " " " " " "

RAZÕES DE ÁREAS:

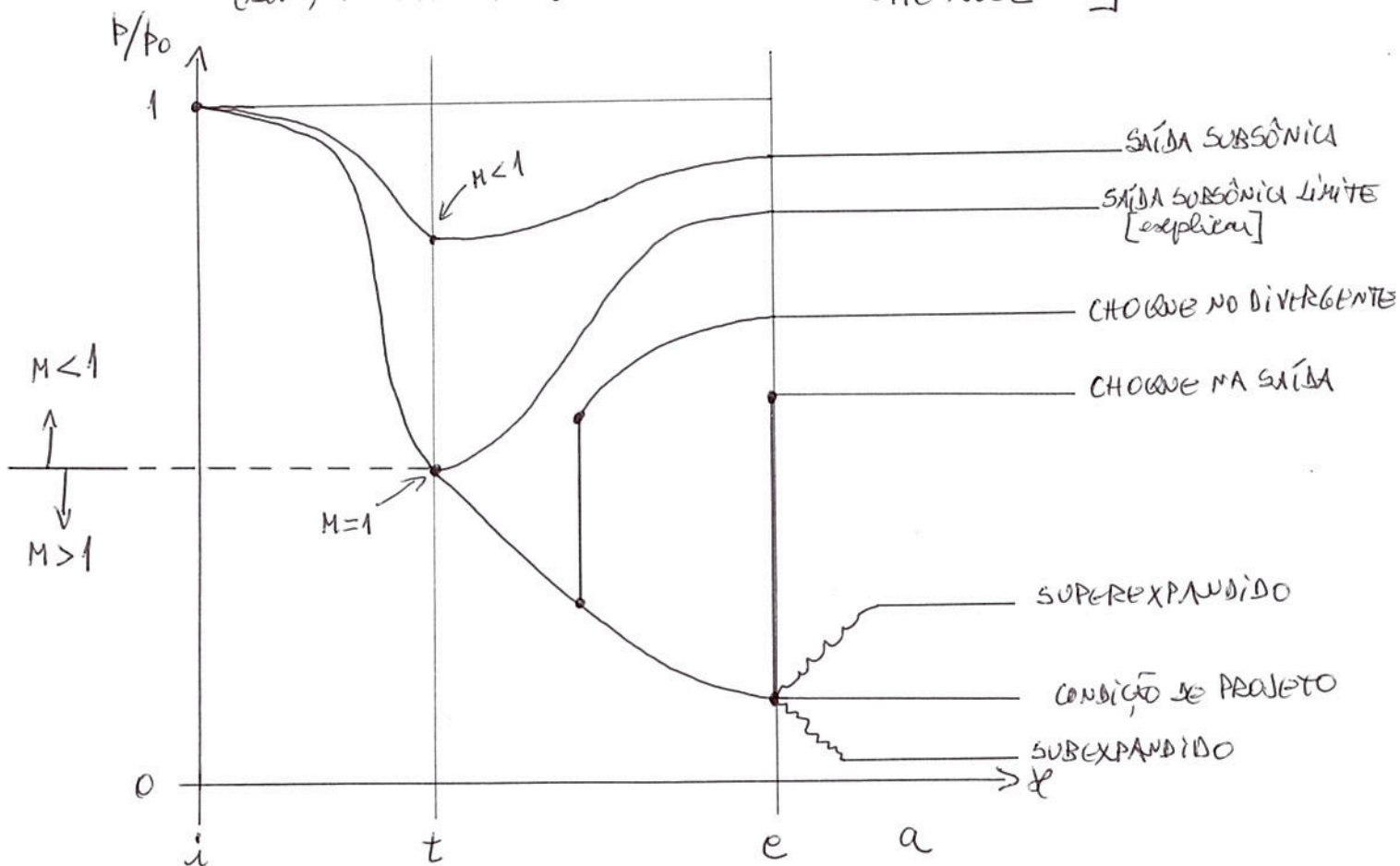
• RAZÃO DE COMPRESSÃO: $\epsilon_c = \frac{A_i}{A_e}$ MOTORES REAIS $[< 5]$ (7.2)

• RAZÃO DE EXPANSÃO: $\epsilon_e = \frac{A_e}{A_t}$ $[> 5]$ (7.3)

ÂNGULOS DA TUBERIA

- DO CONVERGENTE, $15^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$; RECOMENDADO: $\alpha = 45^\circ$
- DO DIVERGENTE, $8^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$; " : $\beta = 15^\circ$
- a região da garganta deve ser arredondada

CASOS DE ESCOAMENTO EM TUBERIA [INDICAR/MOSTRAR O SITE NOZZLE]



[MESMO NO VÁCUO, HÁ UM M LIMITE]

7.2 EMPUXO (F)

$$F = \underbrace{\dot{M} V_e}_{F_{\text{dinâmico}}} + \underbrace{(p_e - p_a) A_e}_{F_{\text{destatico p}}} \quad [N] \quad (7.4)$$

ONDE \dot{M} = FLUXO DE MASSA QUE ESCOZA NA TUBERIA [kg/s]

• F AUMENTA COM A ALTITUDE DEVIDO A DIMINUIÇÃO DE p_a

• F É MÁXIMO NO VÁCUO ONDE $p_a \cong 0$

• NA CONDIÇÃO DE PROJETO, $p_e = p_a \rightarrow F = \dot{M} V_e \quad (7.5)$

EMPUXO DE REFERÊNCIA: $F_0 = p_0 A_t \quad [N] \quad (7.6)$

7.3 COEFICIENTE DE EMPUXO (C_F)

→ VEM DE

$$F = C_F F_0 \quad (7.7)$$

OU

$$C_F = \frac{F}{F_0} = \frac{F}{p_0 A_t} \quad [\text{ADIM.}] \quad (7.8)$$

→ MEDE A EFICIÊNCIA DA TUBERIA (EXPANSÃO)

7.4 VELOCIDADE CARACTERÍSTICA (C^*)

MEDDE A EFICIÊNCIA DO PROPELENTE E DA COMBUSTÃO

VEM DE

$$F_0 = \cancel{p_0 A_t} \dot{M} C^* \quad (7.9)$$

OU

$$C^* = \frac{F_0}{\dot{M}} = \frac{p_0 A_t}{\dot{M}} \quad [m/s] \quad (7.10)$$

7.5 IMPULSO ESPECÍFICO (I_{Δ})

MEDE A EFICIÊNCIA GLOBAL DO MOTOR-FOGUETE

$$\text{VEN DE} \quad F = I_{\Delta} \dot{m} g \quad (7.11)$$

OU

$$I_{\Delta} = \frac{F}{\dot{m} g} \quad [\Delta] \quad (7.12)$$

ONDE g = ACELERAÇÃO GRAVITACIONAL $[m/\Delta^2]$ 7.6 MOTOR-FOGUETE IDEAL

- 1) COMPOSIÇÃO DO GÁS É HOMOGÊNEA
- 2) GÁS PERFEITO
- 3) PROCESSO ISENTRÓPICO
- 4) SEM TRANSFERÊNCIA DE CALOR PARA AS PAREDES
- 5) SEM FRICÇÃO
- 6) ESTADO PERMANENTE
- 7) ESCOAMENTO UNIDIMENSIONAL
- 8) EQUILÍBRIO QUÍMICO É ATINGIDO NA CÂMARA DE COMBUSTÃO E PERMANECE CONSTANTE AO LONGO DA TUBEIRA

$$\dot{m} = p_0 A_t \left[\left(\frac{\gamma}{R T_0} \right) \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \right]^{1/2} \quad [kg/\Delta] \quad (7.13)$$

(LÍMITE PARA $M=1$)

$$V_e = \left\{ \frac{2\gamma R T_0}{(\gamma-1)} \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2} \quad [m/\Delta] \quad (7.14)$$

$$\text{NO VÁCUO,} \quad V_{e_{\max}} = \left(\frac{2\gamma R T_0}{\gamma-1} \right)^{1/2} \quad [m/\Delta] \quad (7.15)$$

$$C_F = \left\{ \frac{2\gamma^2}{(\gamma-1)} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2} + \frac{(p_e - p_a) A_e}{p_0 A_t} \quad [\text{ADIM.}] \quad (7.16)$$

$$C^* = \frac{1}{\gamma} \left[\frac{\gamma R T_0}{\left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \right]^{1/2} \quad [m/\Delta] \quad (7.17)$$

7.7 ROTEIRO DE PROJETO PARA A (CONDIÇÃO DE PROJETO E MOTOR IDEAL)

- ① DEFINIR OS DADOS: $P_0, T_0, \gamma, R, A_i, A_t, \alpha, \beta, P_a$
- ② CALCULAR \dot{M} COM A EQ. (7.13)
- ③ " V_e COM A EQ. (7.14)
- ④ " D_t COM ~~EQ. (7.13)~~ $D_t = \left(\frac{4A_t}{\pi}\right)^{1/2}$ (7.18)
- ⑤ " D_i COM $D_i = \left(\frac{4A_i}{\pi}\right)^{1/2}$ (7.19)
- ⑥ " L_c COM $L_c = \frac{1}{2} \left(\frac{D_i - D_t}{\tan \alpha}\right)$ (7.20)
- ⑦ " M_e COM ~~$M_e = \frac{V_e}{a_e} = \frac{V_e}{\sqrt{\gamma R}}$~~
 $M_e = \left\{ \frac{2}{(\gamma-1)} \left[\left(\frac{P_0}{P_a}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] \right\}^{1/2}$ (7.21)
- ⑧ CALCULAR ξ_e COM $\xi_e = \frac{1}{M_e} \left\{ \frac{2}{(\gamma+1)} \left[1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_e^2 \right] \right\}^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)}$ (7.22)
- ⑨ CALCULAR A_e A PARTIR DA EQ. (7.3), ISTO É, $A_e = \xi_e A_t$ (7.23)
- ⑩ CALCULAR D_e COM $D_e = \left(\frac{4A_e}{\pi}\right)^{1/2}$ (7.24)
- ⑪ CALCULAR L_D COM $L_D = \frac{1}{2} \left(\frac{D_e - D_t}{\tan \beta}\right)$ (7.25)
- ⑫ CALCULAR F COM A EQ. (7.5)

7.8 EXERCÍCIO

EXERCÍCIO 7.1: APLIQUE O ROTEIRO DE PROJETO AO SEGUINTE CASO:

$$p_0 = 1.5 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$T_0 = 1200 \text{ K}$$

$$\gamma = 1.35$$

$$R = 649.6 \text{ J/kg.K}$$

$$A_t = \pi \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$E_c = 16$$

$$\alpha = 45^\circ$$

$$\beta = 15^\circ$$

$$p_a = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$$

DEVE-SE OBTER: $\dot{M} \approx 0.361 \text{ kg/s}$

$$v_e \approx 2134 \text{ m/s}$$

$$F \approx 770 \text{ N}$$

$$C_F \approx 1.63$$

$$C^* \approx 1306 \text{ m/s}$$

$$I_s \approx 218 \text{ N}$$

EXERCÍCIO 7.2: CALCULE A RAZÃO ENTRE O EMPUXO COM TUBERIA E O EMPUXO SEM O DIVERGENTE:

$$\approx 2.25$$

EXERCÍCIO 7.3: CALCULE A RAZÃO ENTRE O EMPUXO COM TUBERIA E SEM:

$$\approx 57$$