

PARÂMETROS DE PROPULSÃO ①

28 Nov 97
23 Abr 12

FONTE: [1] HUZAR, D.K. & HUANG, J.H., 1992, AIAA

[2] BROWN, C.D., AIAA, 1996

[3] SUTTON, G.P., BIBLARZ, O., 2001, Wiley

EMPUXO (ver fig. 1.7, p.5 [1]) e fig. 2.1 [2]

$$F = \dot{m} V_e + (p_e - p_a) A_e \quad [N] \quad (1-5) [1]$$

\dot{m} = fluxo de massa

V_e = velocidade dos gases na saída da tubeira

p_e = pressão " " " " " "

p_a = " ambiente, externa à "

A_e = área na saída da tubeira

g_0 = aceleração gravitacional ao nível do mar (referência) = 9.80665 m/s² [p. 727, 3]

P = peso do projétil
 \dot{P} = fluxo de massa

Na condição do projeto, $p_e = p_a \Rightarrow F = \dot{m} V_e = F_d$
ou ao nível do mar

No vácuo,

$$F_0 = \dot{m} V_e + p_e A_e$$

empuxo devido à variação da quant. de mov.: $F_m = \dot{m} V_e \quad (2.3) [2]$

" " " " " " pressão: $F_p = (p_e - p_a) A_e \quad (2.7) [2]$

→ o empuxo no vácuo (F_0) é maior que o empuxo ao nível do mar (F_d);
o empuxo aumenta com a altitude pois p_a diminui (fig. 2.2 [2] e 1.8 [1])

→ p. 12/3 de [2]: hipóteses assumidas para o foguete ideal; e p. 7 [1]

empuxo de referência: $F_0 = P_0 A_t$

MOTOR FOGUETE IDEAL (hipóteses)

- composição do gás é homogênea
- gás perfeito
- processo isentrópico
- sem transferência de calor p/ as paredes
- sem fricção
- estado permanente
- escoamento 1D
- equilíbrio químico é atingido na câmara de combustão e permanece constante ao longo da tubulina ~~(escoamento compressível)~~

VELOCIDADE DE EXAUSTÃO EFETIVA (C)

[W/s]

$$F = \dot{M} V_e + (p_e - p_a) A_e = \dot{M} C \Rightarrow C = V_e + \frac{(p_e - p_a) A_e}{\dot{M}} = \frac{F}{\dot{M}} \quad (1.8) [1]$$

VELOCIDADE NA SAÍDA (V_e): $C = V_e$ na condição do projeto

$$V_e = \left\{ \frac{2\gamma R T_0}{(\gamma-1)} \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2} \quad [W/s] \quad (1.18) [1] \text{ e } (2.17) [2]$$

γ = razão dos calores específicos

R = constante do gás

T_0 = temperatura de estagnação

p_0 = pressão " "

$$V_{e, \max} \leftarrow p_e/p_0 = 0 \text{ (expansão infinita)} \Rightarrow V_{e, \max} = \left[\frac{2\gamma R T_0}{(\gamma-1)} \right]^{1/2} \quad (2.18) [2]$$

ou vácuo ($p_a = 0$)

OBS.:
→ p/cálculo de F , C_F , ... locais será considerado
 $p_e = p_a$ antes da gorganta (solução analítica)
ou para $M < 1$

PARÂMETROS DE PROPULSÃO (3)

28 Nov 97
23 Abr 12

COEFICIENTE DE EMPUXO (C_f): eficiência da tubeira (expansão)

$$F = p_0 A_t C_f = C_f F_0 \rightarrow C_f = \frac{F}{p_0 A_t} = \frac{F}{F_0} \text{ [adim]}$$

$$C_f = \left\{ \frac{2\gamma^2}{(\gamma-1)} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2} + \frac{(p_e - p_a) A_e}{p_0 A_t} \quad \begin{matrix} 2.33 [2] \\ (1-330) [1] \end{matrix}$$

A_t = área da garganta da tubeira

~~VELOCIDADE~~

VELOCIDADE CARACTERÍSTICA (C^*): eficiência do propelente e da combustão

$$F_0 = C^* \dot{M} = p_0 A_t \rightarrow C^* = \frac{F_0}{\dot{M}} = \frac{p_0 A_t}{\dot{M}} \text{ [m/s]}$$

IMPULSO ESPECÍFICO (I_{sp}): eficiência global do motor

$$F = I_{sp} \dot{M} g_0 \rightarrow I_{sp} = \frac{F}{\dot{M} g_0} = \frac{\dot{M} C}{\dot{M} g_0} = \frac{C}{g_0} = \frac{C^* C_f}{g_0} [\Delta] \quad (1-31a) [1]$$

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{P}} = \frac{I_t}{P}$$

RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS

$$C = C^* C_f \quad (1-31b) [1]$$

$$C_f = \frac{C}{C^*}$$

$$\Rightarrow C^* = \frac{1}{\gamma} \left[\frac{\gamma R T_0}{\left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \right]^{1/2} \quad (1-32a) [1] \text{ e } (2.29) [2]$$

$$F = \dot{M} C^* C_f$$

- p.15/6 [1]: descreve influências de p_a , ϵ , γ , R e p_0 sobre o desempenho do motor

FATORES DE CORREÇÃO PARA MOTORES A PROPULSÃO LÍQUIDO [1] p.16
 E FAIXAS DOS PARÂMETROS $n = \text{real}$ $t = \text{teórico}$

$$\bullet \eta_f = \frac{C_{f_n}}{C_{f_t}} = \frac{F_n}{F_t} = 0,92 \text{ a } 1,00$$

$$\bullet \eta_v = \frac{C_n}{C_t} = \frac{(I_{sp})_n}{(I_{sp})_t} = 0,85 \text{ a } 0,98$$

$$\bullet \eta_{v^*} = \frac{C_n^*}{C_t^*} = 0,87 \text{ a } 1,03$$

$$\bullet \eta_w = \frac{\dot{M}_n}{\dot{M}_t} = 0,98 \text{ a } 1,15$$

$$\eta_v = \eta_{v^*} \cdot \eta_f$$

$$\eta_v = \frac{1}{\eta_w}$$

FLUXO DE MASSA (\dot{M})

$$\dot{M} = p_0 A_t \left[\left(\frac{\gamma}{R T_0} \right) \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \right]^{1/2} \quad (\text{limite } p/M=1)$$

(1-19) [1]
 (2.25) [2]

PARÂMETROS DE PROPULSÃO (5)

22 Jan 98
3 Feb

$$C_d = \frac{\dot{M}_n}{\dot{M}_a} = \text{coeficiente de descarga}$$

$$C_{fN} = \frac{\dot{M}_N C_N}{F_0}$$

$$F_0 = p_0 A_t$$

$$F_N = \dot{M}_N C_N$$

$$C_{fA} = \frac{\dot{M}_A C_A}{F_0}$$

$$F_A = \dot{M}_A C_A$$

$$I_{D,N} = \frac{F_N}{\dot{M}_N g}$$

$$\frac{I_{D,N}}{I_{D,A}} = \frac{F_N}{F_A} \cdot \frac{\dot{M}_A}{\dot{M}_N} = \frac{F^*}{C_d}$$

$$I_{D,A} = \frac{F_A}{\dot{M}_A g}$$

$$\frac{C_{fN}}{C_{fA}} = \frac{\dot{M}_N C_N}{\dot{M}_A C_A} = F^*$$

eficiência da vel. característica

$$C_N^* = \frac{F_0}{\dot{M}_N}$$

$$\eta_{C^*} = \frac{C_N^*}{C_A^*} = \frac{\dot{M}_A}{\dot{M}_N} = \frac{1}{C_d}$$

$$C_A^* = \frac{F_0}{\dot{M}_A}$$

$$\frac{I_{D,N}^{oa}}{I_{D,N}^d} = \frac{F_N^{oa}}{F_N^d} \cdot \frac{\dot{M}_N g}{\dot{M}_N g} = \frac{F_N^{oa}}{F_N^d} = \frac{C_{oa}}{C_d}$$

$$\frac{F_N^{oa}}{F_N^d} = \frac{\dot{M}_N C_{oa}}{\dot{M}_N C_d} = \frac{C_{oa}}{C_d}$$

$$F_{N,d} = \dot{M}_N u_{e,N}$$

$$F_{N,v} = \dot{M}_N u_{e,N} + p_{e,N} A_e = \dot{M}_N C_{o,N}$$

$$F_{A,d} = \dot{M}_A u_{e,A}$$

$$F_{A,v} = \dot{M}_A u_{e,A} + p_{e,A} A_e = \dot{M}_A C_{o,A}$$

$$\frac{F_{N,d}}{F_{A,d}} = \frac{F_d^*}{F_d} = C_d \frac{u_e^*}{u_e}$$

$$\frac{F_{N,v}}{F_{A,v}} = \frac{F_v^*}{F_v} = C_d \frac{u_e^*}{u_e} + \frac{p_{e,v}^*}{p_{e,v}} = C_d C_{o,v}$$

$$\frac{F_{v,v}^*}{F_d^*} = \frac{C_d C_{o,v}^*}{C_d u_e^*} = \frac{C_{o,v}^*}{u_e^*}$$

$$C_{f,d,N} = \frac{F_{d,N}}{F_0}$$

$$C_{f,d,A} = \frac{F_{d,A}}{F_0}$$

$$C_{f,d}^* = \frac{C_{f,d,N}}{C_{f,d,A}} = \frac{F_{d,N}}{F_{d,A}} = \frac{F_v^*}{F_d}$$

$$u_e^* = \frac{F_d^*}{C_d}$$

$$C_{o,v}^* = \frac{F_v^*}{C_d}$$

$$F_d^* = \frac{F_{d,n}^*}{F_{d,a}} = \text{eficiência do empuxo dinâmico} = \frac{\text{empuxo dinâmico numérico}}{\text{" " analítico}}$$

$$F_{va}^* = \frac{F_{va,n}^*}{F_{va,a}} = \text{eficiência do empuxo no vácuo} = \frac{\text{empuxo no vácuo (numérico)}}{\text{" " (analítico)}}$$

$$F_{d,n} = \dot{m} V_e$$

$$F_{va} = \dot{m} V_e + p_e A_e$$

$$\eta_{va}^* = \frac{F_{va,n}^* / F_{d,n}^*}{F_{va,a}^* / F_{d,a}^*} = \frac{\eta_{va,n}}{\eta_{va,a}}$$

$$\eta_{va} = \frac{F_{va}^*}{F_d^*} \rightarrow \text{eficiência do empuxo no vácuo obtido}$$

$$\eta_{C_d} = \text{eficiência da velocidade característica} = \frac{1}{C_d}$$

$$\rightarrow \text{sua incerteza}^{(1)} = I_{C_d}$$

$$C_{f,d}^* = F_d^* \Rightarrow \text{incerteza de } C_{f,d}^* = I_{F_d^*}$$

$$V_e^* = \frac{u_{e,n}}{u_{e,a}} = \text{eficiência da velocidade de ejeção}$$

$$I_{\Delta}^* = \frac{I_{\Delta,n}}{I_{\Delta,a}} = \text{eficiência do impulso específico}$$

26 MAR 08

$$C_{Fv} = \frac{F_v}{F_0}$$

$$C_{F_0}^* = \frac{C_{Fv}^{\text{numérico}}}{C_{F_0}^{\text{analítico}}} = \frac{\frac{F_v^n}{F_0}}{\frac{F_v^a}{F_0}} = \frac{F_v^n}{F_v^a} = F_v^* \quad \leftarrow$$

13 MAR 13

$$C^* = \frac{F_0}{\dot{m}} = \frac{p_0 A_t}{\dot{m}}$$

$$\text{mas } \dot{m} = C_D \dot{m}_{1D}$$

Então:

$$C^* = \frac{p_0 A_t}{C_D \dot{m}_{1D}}$$