

Capítulo 4. **COEFICIENTE DE ARRASTO (C_D)**

4.1 OBJETIVO

Determinar o C_D e D (força de arrasto) de minifoguetes (MF).

4.2 JUSTIFICATIVA

O C_D é uma variável importante para prever adequadamente a trajetória de um MF real.

4.3 DEFINIÇÕES

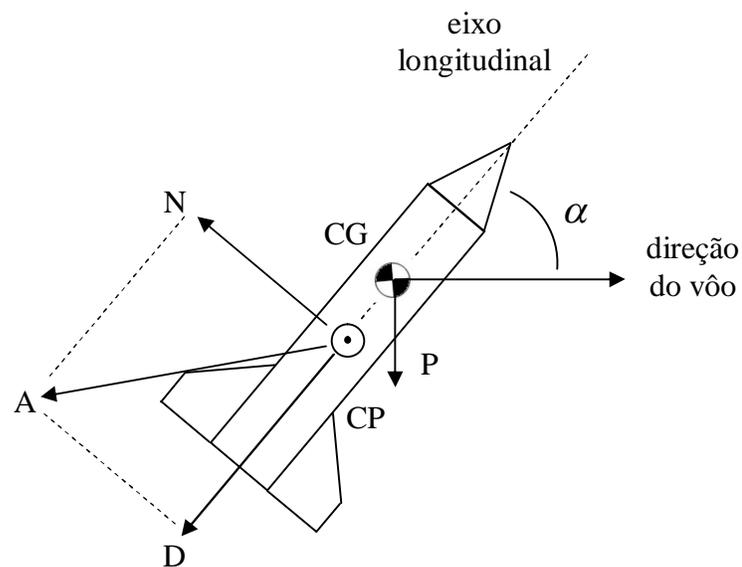


Figura 1: Forças sobre um minifoguete

Força de Arrasto (D) é a componente da força aerodinâmica (A) que atua no eixo longitudinal do minifoguete (MF), no sentido contrário ao seu movimento (figura 1).

A força aerodinâmica é causada pelo movimento do MF no ar.

Tipos de arrasto:

- a) De forma: deve-se à geometria do objeto.

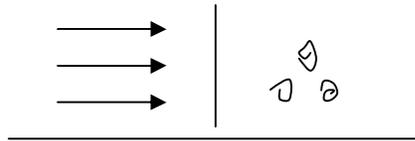


Figura 2: Arrasto de forma

- b) De fricção: deve-se à superfície do objeto.



Figura 3: Arrasto de fricção

- c) De base: devido à baixa pressão na traseira do MF.

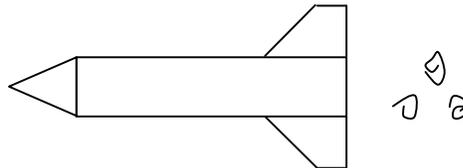


Figura 4: Arrasto de base

- d) Induzido: devido ao vento que causa α (ângulo de ataque).
- e) De interferência: interação entre tubo-foguete e empenas.

Cálculo da força de arrasto (D):

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad [\text{N}] \quad (4.1)$$

onde

C_D = coeficiente de arrasto (adimensional)

ρ = massa específica do ar (kg/m^3)

V = velocidade do MF (m/s)

A = área de referência (m^2), geralmente é dada por

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (4.2)$$

onde

d = diâmetro máximo do MF (m).

4.4 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO C_D E D

Com o MF num túnel de vento, obtém-se:

- D (força de arrasto), com sensor de força no túnel de vento
- ρ (massa específica), de tabela da atmosfera-padrão ou da equação de estado dos gases perfeitos: $\rho = \frac{p}{RT}$; neste caso, p (pressão atmosférica) é medida com um barômetro, T (temperatura) com um termômetro, e R (constante do ar) é uma constante conhecida (287 J/kg.K).
- A (área de referência do MF), com paquímetro obtém d , e A com a Eq. (4.2);
- V (velocidade), com sensor de velocidade no túnel de vento.

Com os dados acima e a Eq. (4.1), obtém-se o coeficiente de arrasto através de

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (4.3)$$

Valores de C_D para minifoguetes:

- Sondinha II: $C_D \cong 1,0$
- MF em geral, na média: $C_D \cong 0,75$
- MF de alto desempenho aerodinâmico, mínimo: $C_D \cong 0,25$

Valores de C_D para pára-quadras:

- Em geral: $C_D \cong 1,4$ a $2,0$
- Valor mais usado: $C_D \cong 1,5$

4.5 PRINCIPAIS FATORES QUE AFETAM O C_D

- Tipo de escoamento: C_D laminar é menor que turbulento; mas geralmente o escoamento em MF é turbulento.
- Ângulo de ataque (α): α menor $\rightarrow C_D$ menor.
- Perfil das empenas: tipo de asa ou arredondado $\rightarrow C_D$ menor do que o reto.

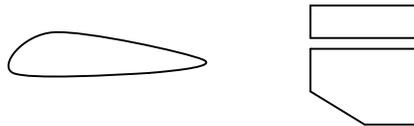


Figura 5: Perfil das empenas

- Razão entre o comprimento (L) total do MF e diâmetro (d) máximo do MF:
 L/d menor $\rightarrow C_D$ menor.

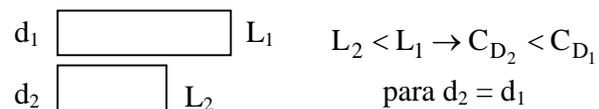


Figura 6: Razão comprimento/diâmetro

- Acabamento da superfície: mais lisa $\rightarrow C_D$ menor.
- Número de empenas: menor $\rightarrow C_D$ menor.

g) Tamanho da superfície e espessura das empenas: menores $\rightarrow C_D$ menor.

4.6 EXEMPLOS

Constante: $\rho \cong 1,2 \text{ kg/m}^3$ (ar)

$$\text{a) } \left. \begin{array}{l} d = 20\text{mm} \rightarrow A \cong 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \\ C_D = 1 \\ V = 108\text{km/h} = 30\text{m/s} \end{array} \right\} D \cong 0,17\text{N} \cong 17\text{g}$$

b) Idem ao item (a) mas com $V = 216 \text{ km/h} = 60\text{m/s} \rightarrow D \cong 0,68\text{N} \cong 68\text{g}$.

Portanto, dobrando-se V , quadruplica-se D [Item a x b]

$$\text{c) } \left. \begin{array}{l} d = 40\text{mm} \rightarrow A \cong 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \\ C_D = 0,5 \\ V = 108\text{km/h} = 30\text{m/s} \end{array} \right\} D \cong 0,34\text{N} \cong 34\text{g}$$

Entre os itens a e c, V é o mesmo. O C_D foi reduzido à metade, mas o d foi dobrado.

Portanto, C_D menor resultou em D maior!

Com a Eq. (4.2) em (4.1), tem-se

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 \frac{\pi}{4} d^2$$

ou

$$D = \frac{\pi}{8} C_D \rho V^2 d^2 \tag{4.4}$$