

Capítulo 4.

Aerodinâmica de foguetemodelo

Curitiba, 28 Jan 2020.

Curso: Projeto e Teste de Minifoguete

Prof. Carlos Henrique Marchi

Grupo de Foguetes Carl Sagan (GFCS)

Laboratório de Atividades Espaciais (LAE)

Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)

Setor de Tecnologia (TC)

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba (PR), 2020.

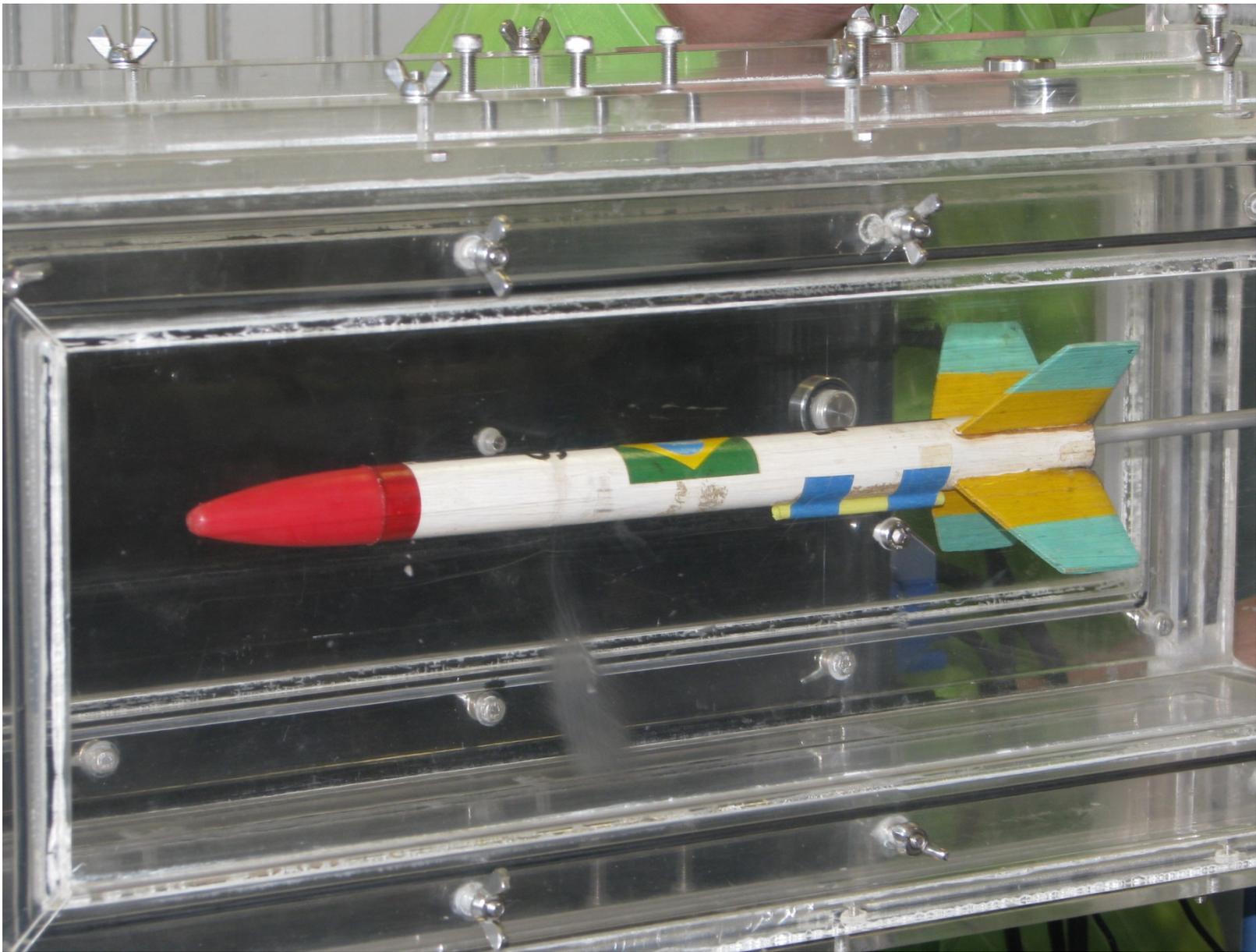


Figura 4.0. Minifoguete Sondinha II do GFCS dentro do túnel de vento da Universidade Positivo (UP) durante testes aerodinâmicos em 13 Fev 2015 em Curitiba (PR). Foto: Diego Fernando Moro.

4.1 DEFINIÇÕES

O objetivo deste capítulo é determinar o coeficiente de arrasto (C_D) e a força de arrasto (D) de minifoguetes (MF).

O C_D e D são variáveis importantes para prever adequadamente a trajetória de um MF real.

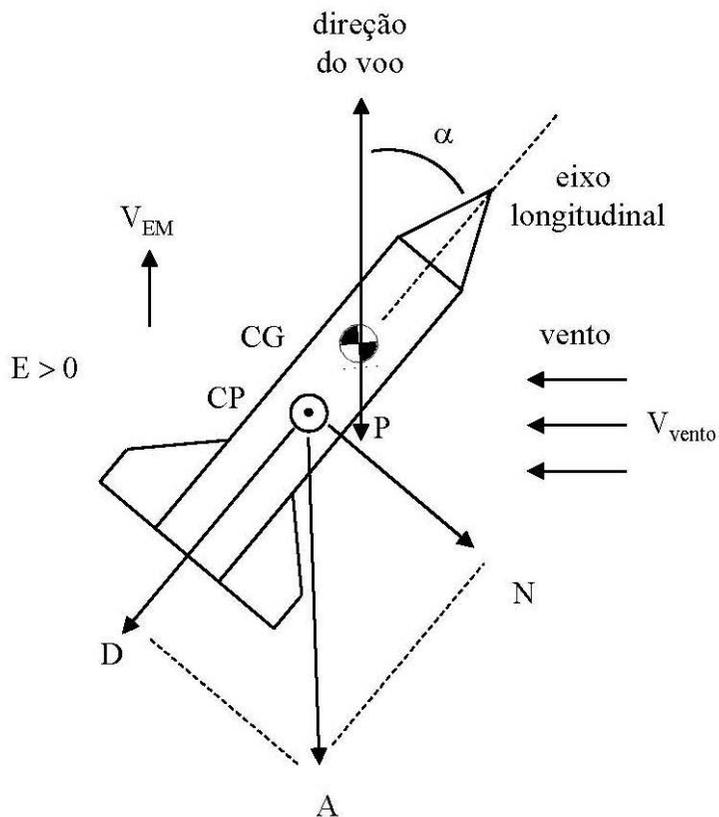


Figura 4.1. Força de arrasto (D) sobre um foguete modelo.

Mostrar o experimento de queda livre de um martelo e uma pena na Lua
<https://youtu.be/HqcCpwIeiu4> 0:55 min

Mostrar o experimento de queda livre de penas e bola de boliche em
 laboratório da NASA (<https://youtu.be/E43-CfukEgs>) com ar e vácuo
 4:41 min

A força de Arrasto (D) é a componente da força aerodinâmica (A) que atua no eixo longitudinal do minifoguete, no sentido contrário ao seu movimento, como mostrado na Figura 4.1. A força aerodinâmica é causada pelo movimento do MF no ar e pelo vento que sopra sobre o MF.

Tipos de arrasto:

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

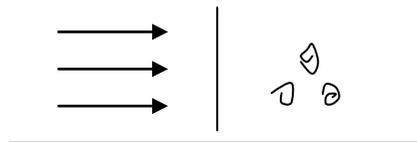


Figura 4.2. Arrasto de forma.

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



Figura 4.3. Arrasto de fricção.

c) De **base**: devido à baixa pressão que se forma atrás do MF.

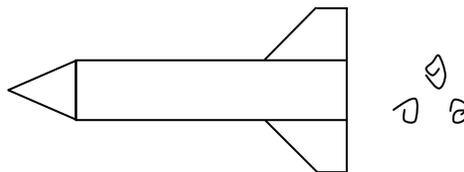


Figura 4.4. Arrasto de base.

d) **Induzido**: devido ao vento que causa α (ângulo de ataque).

e) De **interferência**: interação entre tubo-foguete e empenas.

A força de arrasto (D) é definida e pode ser calculada através da seguinte equação:

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

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 calculada por

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

onde

d = diâmetro máximo do MF (m).

4.2 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO C_D E D

Com o minifoguete dentro de um túnel de vento, como na Figura 4.0, obtém-se:

- D (força de arrasto) com sensor de força sobre o minifoguete no túnel de vento;
- ρ (massa específica) de tabela da atmosfera-padrão ou da equação de estado dos gases perfeitos: $\rho = p/RT$ onde 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-se d, e A com a Eq. (4.2); e
- 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

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

4.3 C_D E D TEÓRICOS

O C_D e D também podem ser obtidos de forma teórica através de dois conjuntos de métodos: (1) analíticos, resolvendo-se equações da Mecânica dos Fluidos que governam escoamentos, como as equações de Euler e Navier-Stokes, através de Cálculo Diferencial e Integral; e (2) numéricos, resolvendo-se as mesmas equações através da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Em seguida, para qualquer método usado, será necessário integrar os campos de pressão e velocidade para se obter as forças de arrasto devido à pressão e fricção sobre o minifoguete.

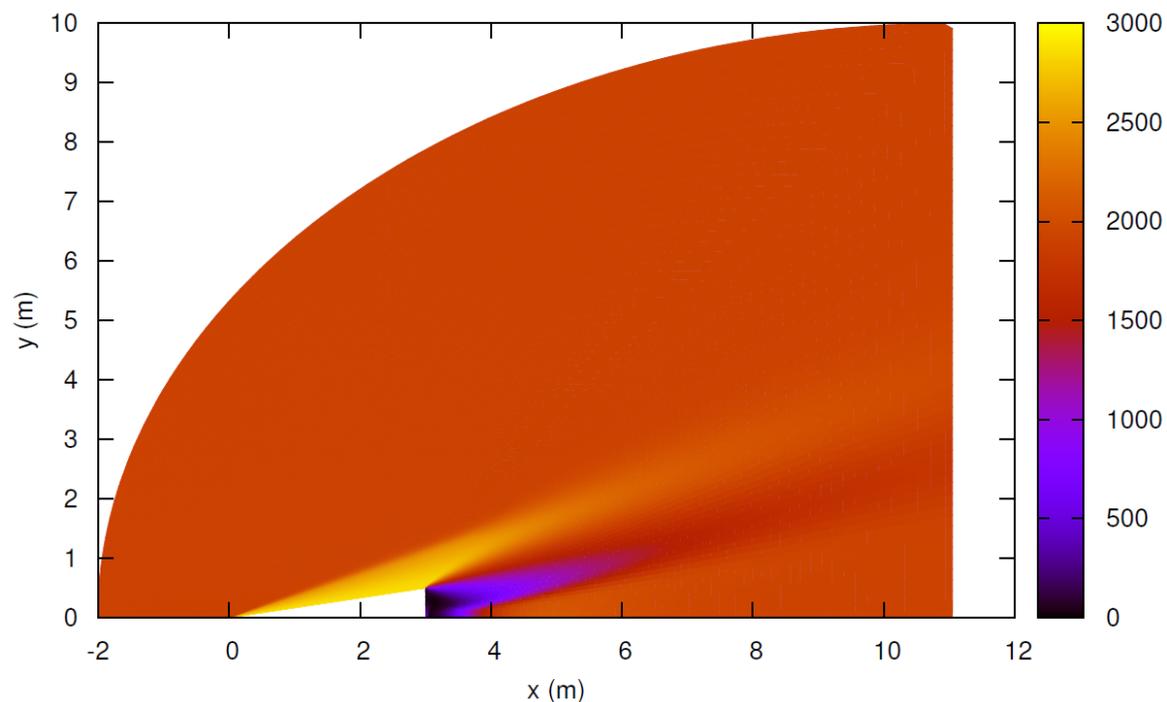


Figura 4.5. Campo de pressão do escoamento supersônico sobre um cone ($L/D = 3$) resolvido com CFD.

4.4 VALORES DE C_D

Valores de C_D para minifoguetes:

- Sondinha II padrão: $C_D = 1,42$
- Minifoguetes em geral, na média: $C_D = 0,75$
- Minifoguetes de alto desempenho aerodinâmico, mínimo: $C_D = 0,25$

Valores de C_D de paraquedas circulares sem orifício central:

- Em geral: $C_D = 1,4$ a $2,0$
- GFCS/UFPR: $C_D = 1,70 \pm 0,12$ ou $7,1\%$

4.5 PRINCIPAIS FATORES QUE AFETAM O C_D

- a) **Tipo de escoamento:** C_D laminar é menor que turbulento; mas geralmente o escoamento em minifoguete é turbulento.
- b) **Ângulo de ataque (α):** α menor $\rightarrow C_D$ menor.
- c) **Acabamento da superfície:** mais lisa $\rightarrow C_D$ menor.
- d) **Número de empenas:** menor $\rightarrow C_D$ menor.
- e) **Tamanho da superfície e espessura das empenas:** menores $\rightarrow C_D$ menor.

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



Figura 4.6. Razão entre comprimento e diâmetro do tubo-foguete.

g) **Perfil das empenas:** C_D do perfil quadrado $>$ C_D do perfil arredondado $>$ C_D do perfil asa.

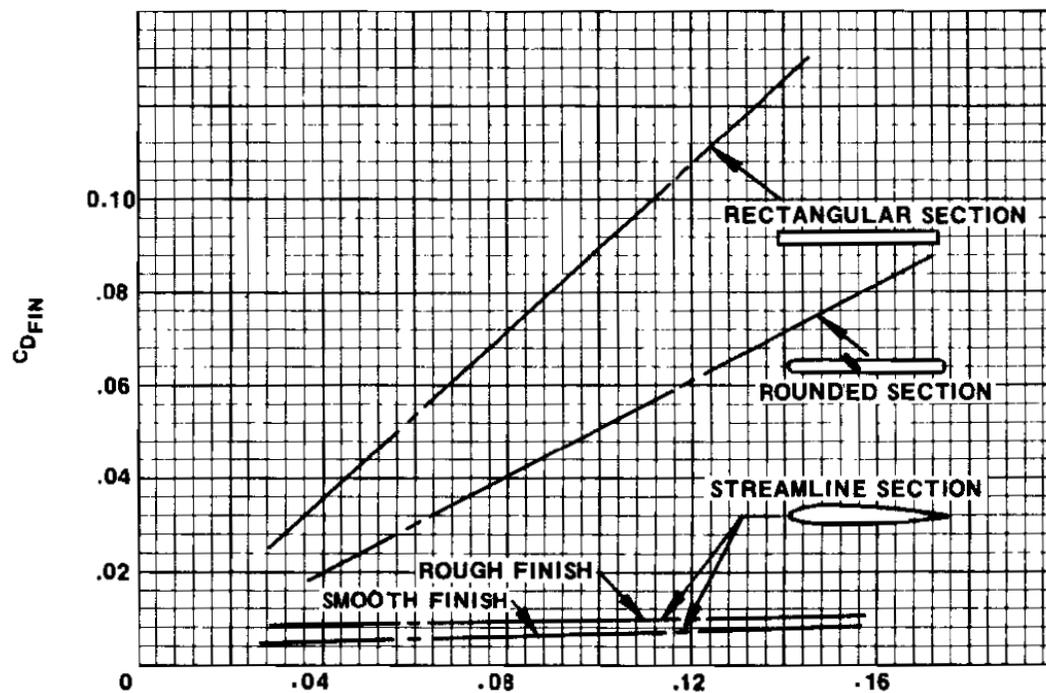


Figura 4.7. C_D x razão entre espessura e comprimento de 3 tipos de empenas
 Fonte: figura 38 de G. M. Gregorek, Aerodynamic drag of model rockets, TR-11, Penrose (CO), USA, 1970.

4.6 EXEMPLO DO EFEITO DE d , C_D e V

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

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

b) Igual 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 [a x b]

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

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

Portanto, C_D menor resultou em D maior!

Com a Equação (4.2) em (4.1), tem-se
$$D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 \frac{\pi}{4} d^2$$

ou

$$D = \frac{\pi}{8} C_D \rho V^2 d^2 \quad [\text{N}] \quad (4.4)$$

4.7 EFEITO DAS EMPENAS DO SONDINHA II SOBRE C_D

As empenas podem afetar significativamente o voo de um minifoguete, conforme mostrado na Tabela 4.1 para o Sondinha II. Detalhes sobre o estudo são apresentados no arquivo *Otimizacao_empenas_Sondinha_II_Marchi_et_al_1989.pdf*. Na Tabela 4.1, N é o número de empenas e H é o apogeu atingido pelo minifoguete, que foi obtido através de cálculos de trajetória, bem como o C_D .

Tabela 4.1. Parâmetros das empenas do minifoguete Sondinha II.

Versão	N	a	b	S	H (m)	C_D
Padrão	4	51	28	36	117	1,42
Padrão	3	51	28	36	158	0,78
Melhorada	3	51	37	22	186	0,63

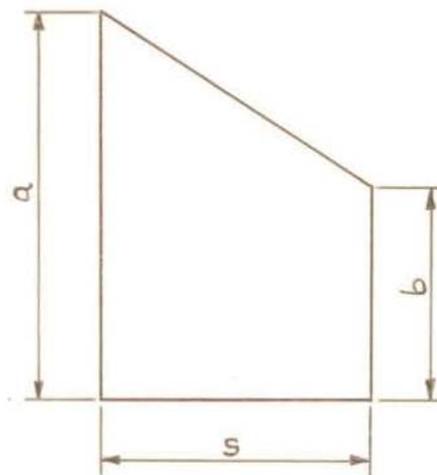


Figura 4.8. Parâmetros das empenas do minifoguete Sondinha II.

4.8 EXERCÍCIOS

Exercício 4.1

Com os dados do minifoguete Sondinha-II padrão (arquivo Sondinha-II-padrao.pdf) que resulta em coeficiente de arrasto $C_d \approx 1,4$, investigar o efeito sobre o C_d do seguinte:

- (a) Alterar a espessura das empenas de 1 mm para 2, 3 e 0,5 mm.
- (b) Alterar o acabamento das empenas de quadrada para arredondada.
- (c) Alterar o número de empenas de 4 para 5, 3 e 2.
- (d) Alterar a envergadura h das empenas de 36 mm para 50, 43, 29 e 22 mm.
- (e) Alterar o comprimento do tubo-guia de 60 mm para 100, 200 e 20 mm, e sem tubo-guia.
- (f) Alterar o tipo de nariz de parabólico para elipsoide, ogiva e cônico.
- (g) Alterar o comprimento do tubo-foguete de 252 mm para 300, 400, 200, 150 e 100 mm.

Exercício 4.2

Com os dados do minifoguete Sondinha-II padrão que resulta em coeficiente de arrasto $C_d \approx 1,4$, calcular o novo valor do C_d obtido com a empena proposta na página 155 do arquivo

Stine7_Cd-extrado_2017-09-15.pdf

Exercício 4.3

Calcular o valor do C_d para os modelos A, B e C da página 150 do arquivo

Stine7_Cd-extrado_2017-09-15.pdf