

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MANUAL TÉCNICO DO APLICATIVO COMPUTACIONAL CD 1.0

CURITIBA
2015

1- INTRODUÇÃO

O coeficiente de arrasto (C_d) é uma variável adimensional muito importante para o cálculo da força de arrasto ao longo de uma trajetória. Ele pode ser matematicamente definido como o mostrado na equação 1, onde D é a força de arrasto (N), ρ é a massa específica do ar (kg/m^3), V é a velocidade do espaçomodelo (m/s) e A é a área de referência (m^2), normalmente igual à seção transversal de maior diâmetro do foguete.

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

Como a força de arrasto, na maioria das análises, não é conhecida, o coeficiente de arrasto precisa ser calculado de forma independente. No entanto, a sua determinação teórica é complexa e não apresenta um modelo padrão definido. Dependendo do tipo de aplicação e objeto de estudo, um modelo matemático distinto é pressuposto e utilizado. Na área do espaçomodelismo, existem alguns programas computacionais que possibilitam o cálculo dessa propriedade, mas geralmente sem apresentar de forma clara como ele foi feito e a teoria envolvida. Além disso, após uma série de lançamentos e comparações dos resultados simulados nesses programas com os experimentais, chegou-se à conclusão de que os valores de coeficiente de arrasto estimados não refletiam perfeitamente a realidade, sendo normalmente subestimados. Por causa disso, visando aprimorar as estimativas de voo dos minifoguetes projetados e também para aumentar e compartilhar o conhecimento sobre o coeficiente de arrasto e aerodinâmica de modo geral, foi desenvolvido um programa computacional que calcula o C_d de várias geometrias de minifoguetes ao longo de sua trajetória, baseado na literatura existente e em lançamentos experimentais.

Este relatório tem o objetivo de apresentar a teoria envolvida no programa, além de comparar os valores de coeficientes de arrasto gerados com os obtidos tanto em aplicativos já existentes como na literatura conhecida.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desenvolvimento do aplicativo computacional $CD1p0$ e do seu modelo matemático foi baseado principalmente em três relatórios técnicos. O coeficiente de arrasto de atrito foi calculado de acordo com o texto de Hault (2013), "Drag Coefficient (rev.3.2)". Já o método de cálculo para os coeficientes de arrasto de base, pressão e parasita foi retirado do relatório "OpenRocket technical documentation" (Niskanen, 2013). Por fim, o coeficiente arrasto de interferência foi obtido de acordo com o trabalho de Cannon (2004), "Model Rocket Simulation with Drag Analysis". Também foram consultados o livro "Fluid-Dynamic Drag" (Hoerner, 1965) e o relatório técnico TR-11 da empresa

Estes, "Aerodynamic Drag of Model Rockets" (Gregorek, 1970), para comparações entre as teorias e verificação da coerência dos cálculos. Os detalhes do modelo matemático e as considerações feitas no programa serão discutidos posteriormente.

Para a execução do trabalho, foi necessária a aquisição de uma diversidade de dados referentes a coeficientes de arrastos para diferentes tipos de geometria. Os coeficientes de arrasto experimentais dos modelos de minifoguetes citados nesse trabalho foram retirados do relatório técnico 52094 da NAR (National Association of Rocketry) "Model Rocket Drag Analysis using a Computerized Wind Tunnel" (DeMar, 1995).

Os cinco programas computacionais que serviram como base para esse trabalho e para o código computacional desenvolvido possuem endereços virtuais e documentos técnicos que apresentam mais informações sobre os seus métodos de análise e funcionamento. O principal programa estudado foi o aplicativo gratuito *OpenRocket*. O programa e o seu relatório técnico podem ser encontrados no endereço <http://openrocket.sourceforge.net/>. Já o *Rocksim* é um programa pago, disponibilizado pela empresa americana *Apogee*, que descreve o produto em seu site (<http://www.apogeerockets.com/rocksim.asp>). Outro programa gratuito utilizado foi o *RASAero*. Suas características encontram-se no manual do usuário disponível no endereço do aplicativo <http://www.rasaero.com/>. Também foi consultado o aplicativo *Aerolab* de Toft, H.O., também gratuito. Ele não apresenta site associado. O último programa utilizado, o *Trajectoria1p1*, foi desenvolvido pelo Grupo de Foguetes Carl Sagan (GFCS) da Universidade Federal do Paraná e está disponível no endereço online <ftp://ftp.demec.ufpr.br/foguete/Aplicativos/>. O GFCS é um grupo formado por alunos e professores que desenvolve espaçomodelos, propelentes e aplicativos computacionais com objetivo de estudar a aerodinâmica e propulsão de foguetes de maneira geral. Informações adicionais sobre o grupo podem ser encontradas nos endereços <ftp://ftp.demec.ufpr.br/foguete/> e <http://fogueteufpr.blogspot.com.br/>.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa do trabalho foi a pesquisa, na literatura e outros meios, de formas de calcular o coeficiente de arrasto e também de valores conhecidos de C_d que pudessem ser comparados posteriormente e auxiliassem no desenvolvimento de um método que pudesse calcular tal propriedade.

A segunda etapa foi a escolha do modelo matemático. Essa escolha baseou-se na necessidade do Grupo de Foguetes Carl Sagan, que produz, atualmente, espaçomodelos de pequeno porte e geometrias simples que não ultrapassam velocidades acima de 800 km/h. O modelo foi implementado na forma de um aplicativo computacional denominado de *CD1p0*.

O último procedimento realizado foi a comparação entres os valores gerados pelo aplicativo e os valores coletados durante a pesquisa. Primeiramente, o coeficiente de arrasto calculado pelo

CD1p0 foi comparado com coeficientes obtidos numericamente por diversos aplicativos e também com os determinados experimentalmente por meio de testes em túneis de vento. Logo após, foi feita uma análise entre a trajetória real, de minifoguetes lançados pelo grupo GFCS, e as simuladas pelos programas *Rocksim* e pelo *Trajatória1p1*, o segundo utilizando a curva de coeficiente de arrasto gerada pelo *CD1p0*.

3.1 APLICATIVO COMPUTACIONAL *CD1P0*

A primeira versão do programa, escrita em linguagem Fortran 90, permite calcular o coeficiente de arrasto de espaçomodelos em escoamento subsônico. Os narizes podem apresentar formato cônico, ogiva, elíptico ou parabólico. As empenas são sempre trapezoidais e suas bordas podem ter um perfil arredondado ou quadrado. O efeito do tubo-guia sobre o arrasto pode ser considerado. Também pode ser considerada a influência do escoamento de gases do motor durante o voo sobre o arrasto no minifoguete. O ângulo de ataque é sempre considerado 0° .

3.1.1 Modelo matemático

Durante a sua trajetória, um minifoguete está sujeito a vários tipos de força de arrasto, que interferem no seu desempenho e estabilidade. Para cada força envolvida, existe um coeficiente de arrasto relacionado:

- Coeficiente de arrasto de atrito
- Coeficiente de arrasto de base
- Coeficiente de arrasto de pressão
- Coeficiente de arrasto de interferência
- Coeficiente de arrasto parasita
- Coeficiente devido a ondas de choque
- Coeficiente devido a vórtices gerados na ponta da empena

A soma de todos esses coeficientes resulta no coeficiente de arrasto total, utilizado nas simulações e nos cálculos da trajetória do espaçomodelo. Os dois últimos itens não foram incluídos no modelo do aplicativo computacional pois são gerados apenas em escoamentos supersônicos e em voos com ângulo de ataque diferente de 0° . A FIGURA 1 apresenta todas as forças a que um espaçomodelo pode estar submetido.

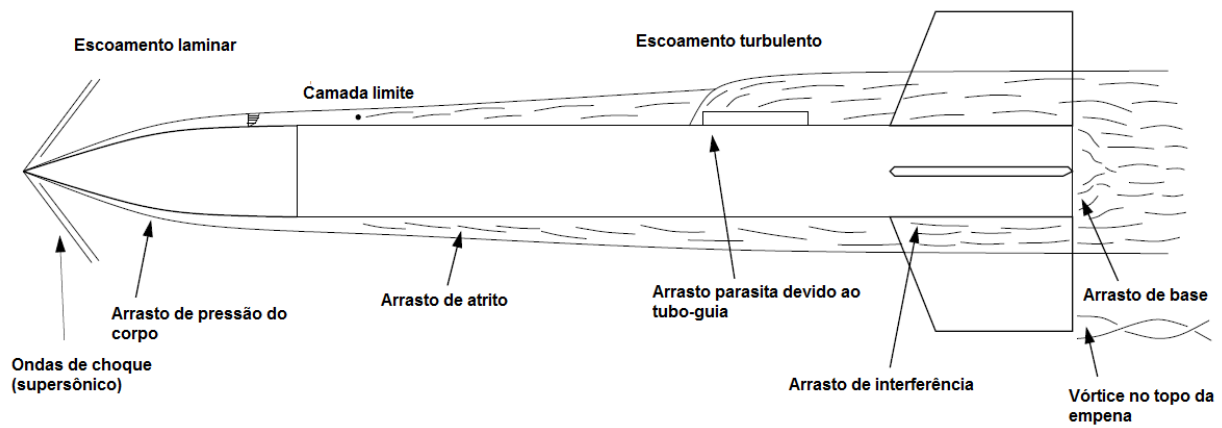


FIGURA 1 – FORÇAS DE ARRASTO ATUANTES EM UM MINIFOGUETE
 FONTE: NISKANEN (2013, p42, editado)

3.1.1.1 Coeficiente de arrasto de atrito (C_{d_a})

A força de arrasto mais predominante em escoamentos subsônicos é aquela que ocorre devido ao atrito entre o fluido e a superfície do objeto de estudo. O cálculo do seu coeficiente depende da rugosidade dos componentes do minifoguete, do número de Reynolds gerado ao longo do escoamento de ar e do tipo de escoamento. O número de Reynolds pode ser definido pela equação (2), onde V é a velocidade do escoamento (m/s), ρ é a massa específica do ar (kg/m^3), l é o comprimento característico do espaçomodelo (m) e μ é viscosidade atmosférica (N.s/m^2).

$$Re = \frac{V\rho l}{\mu} \quad (2)$$

Segundo o relatório técnico de Hoult (2013) o coeficiente de arrasto de atrito de cada componente pode ser calculado pela equação (3):

$$Cd_{componente} = \frac{C_f S_{wet} C}{S_{ref}} \quad (3)$$

Na equação, C_f é o coeficiente de atrito, S_{wet} é a área do componente em contato com o ar, C é o fator de correção de compressibilidade e S_{ref} é a área de referência do minifoguete. O fator de correção para escoamentos subsônicos é dado por:

$$C = 1 - 0.09M^2 \quad (4)$$

Na equação (4), M é o número de Mach, que pode ser definido como a razão entre a velocidade do minifoguete e a velocidade do som no ar, equivalente a 340 m/s.

$$M = \frac{V}{340} \quad (5)$$

Já o coeficiente de atrito é uma soma de dois termos, o primeiro referente ao escoamento laminar e o segundo referente ao escoamento turbulento. A equação (6) apresenta a forma de obter esse coeficiente, considerando que a superfície de todo o foguete é lisa e sem variações:

$$C_f = \left(\frac{1.38}{\sqrt{Re_t}} \right) \cdot \frac{S_{wetl}}{S_{wet}} + \left(\frac{0.471}{(\log(Re_t) - 0.407)^{2.64}} \right) \cdot \left(1 - \frac{S_{wetl}}{S_{wet}} \right) \quad (6)$$

Na equação, S_{wetl} é a área superficial do componente em contato com o escoamento laminar do ar e Re_t é o número de Reynolds de transição. De acordo com o relatório citado, os valores típicos para esse número são equivalentes a 400000 para os corpos de revolução (nariz e tubo-foguete) e a 25000 para as empenas.

O coeficiente de arrasto de atrito é dado pela soma dos coeficientes resultantes de cada componente:

$$Cd_a = Cd_{anariz} + Cd_{atubo-foguete} + Cd_{aempenas} \quad (7)$$

3.1.1.2 Coeficiente de arrasto de base (Cd_b)

Esse coeficiente é gerado por causa da baixa pressão existente na traseira do espaçomodelo. Assim como no caso do Cd_a , ele também pode ser dividido por componentes. O Cd do nariz é considerado zero por estar encaixado no tubo-foguete. Já o coeficiente do tubo-foguete pode ser encontrado, para escoamentos subsônicos, pela fórmula experimental apresentada no relatório de Niskanen (2013):

$$Cd_{btubo-foguete} = (0.12 - 0.13M^2) \cdot \frac{S_b}{S_{ref}} \quad (8)$$

Na equação, S_b é a área da base. Para o caso em que se considera o efeito do motor ligado durante a trajetória, S_b é dada pela área da base do tubo menos a área da tubeira.

O C_d de base das empenas depende do formato de seu perfil. Para um perfil arredondado, Niskanen afirma que o coeficiente é equivalente à metade do C_{db} do tubo-foguete. Já para um perfil quadrado, o C_{db} da empena pode ser aproximado ao do próprio tubo-foguete.

O coeficiente de base total é dado pela soma do coeficiente do tubo-foguete e do coeficiente das empenas:

$$C_{d_a} = C_{d_{btubo-foguete}} + C_{d_{bempenas}} \quad (9)$$

3.1.1.3 Coeficiente de arrasto de pressão (C_{d_p})

O C_{d_p} depende principalmente da geometria do nariz e das empenas. No aplicativo desenvolvido, o coeficiente de pressão devido ao nariz foi considerado apenas para o formato cônico. Nos outros casos, o valor obtido para escoamento subsônico foi muito pequeno e pouco relevante para a análise.

A equação (10), retirada do relatório de Niskanen, apresenta o valor do coeficiente para o caso citado, onde \emptyset é o ângulo da junta do nariz (FIGURA 3) com o tubo foguete:

$$C_{d_{pnariz}} = 0.8(\sin\emptyset)^2 \cdot \frac{S_{wet}}{S_{ref}} \quad (10)$$

Do mesmo modo que no cálculo do coeficiente de arrasto de base, o C_{d_p} da empena também depende do formato do seu perfil. A equação (11) define o C_d para o caso de um perfil retangular e a equação (12) para o caso de um perfil arredondado. Ambas as equações apresentam um caráter experimental e também estão presentes no relatório de Niskanen.

$$C_{d_{pempenas}} = [(1 - M^2)^{-0.417} - 1] \cdot (\cos\tau)^2 \cdot \left(\frac{S_{wet}}{S_{ref}}\right) \quad (11)$$

$$C_{d_{pempenas}} = 0.85 \cdot \left[1 + \frac{M^2}{4} + \frac{M^4}{40}\right] \cdot (\cos\tau)^2 \cdot \left(\frac{S_{wet}}{S_{ref}}\right) \quad (12)$$

Nas equações, τ é o ângulo de inclinação da empena (FIGURA 2). Assim como nos casos anteriores, o coeficiente de arrasto de pressão total será dado pela soma dos coeficientes individuais dos componentes.

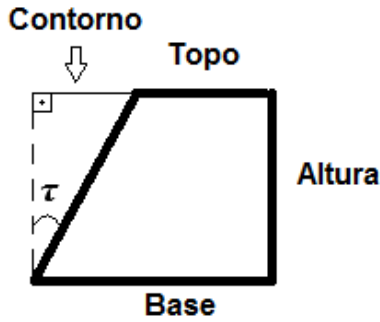


FIGURA 2 – GEOMETRIA DE EMPENA

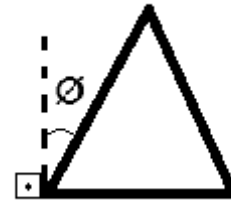


FIGURA 3 - ÂNGULO DA JUNTA DO NARIZ

3.1.1.4 Coeficiente de arrasto de interferência (Cd_i)

O arrasto de interferência é aquele gerado pelo contato entre dois componentes sujeitos a um escoamento de ar. No aplicativo computacional, foi considerado apenas o Cd de interferência entre as empenas e o tubo-foguete. A equação apresentada foi encontrada no relatório de Cannon (2004):

$$Cd_i = C_{fe} \cdot \frac{D_c R_c N}{S_{ref}} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{e}{\bar{c}}\right) \quad (13)$$

Na equação, C_{fe} é o coeficiente de atrito da empenas, D_c é o diâmetro do tubo-foguete, R_c é o comprimento da base da empena, N é o número de empenas, e é a espessura da empena e \bar{c} é o comprimento médio da empena, dado pela média aritmética entre o comprimento da base da empena e o comprimento do topo da empena.

3.1.1.5 Coeficiente de arrasto parasita (Cd_{pa})

Quando algum componente secundário interfere no escoamento de ar ao longo do foguete, ocorre o arrasto parasita. Ele é gerado normalmente por tubos-guia ou pinos inseridos no minifoguete para o auxílio no lançamento. Segundo o relatório técnico de Niskanen (2013), o Cd devido o arrasto parasita pode ser calculado pela equação (14), onde St_e é a área transversal externa do tubo-guia e St_i é a área transversal interna do tubo-guia:

$$Cd_{pa} = \left[0.85 \left(1 + \frac{M^2}{4} + \frac{M^4}{40}\right) \cdot \max(A, 1)\right] \cdot (St_e - St_i \cdot \max(B, 0)) \quad (14)$$

Os parâmetros A e B são definidos pelas equações (15) e (16) respectivamente:

$$A = 1.3 - 0.3 \cdot \left(\frac{Ltb}{Detb} \right) \quad (15)$$

$$B = 1.0 - \left(\frac{Ltb}{Detb} \right) \quad (16)$$

Nas equações, Ltb é o comprimento do tubo-guia e $Detb$ é o diâmetro externo do tubo-guia.

3.1.1.6 Coeficiente de arrasto total (C_d):

Como já citado anteriormente, o coeficiente de arrasto total é resultante da soma de todos os C_d s individuais. Para compensar o fato da rugosidade ter sido desconsiderada e as variações na força de arrasto devido a interferência entre os componentes e transições menos suaves, Hault propõe em seu texto que seja acrescentado ao C_d total 5% do seu valor:

$$C_d = (C_{d_a} + C_{d_b} + C_{d_p} + C_{d_i} + C_{d_{pa}})1.05 \quad (17)$$

3.2. COMPARAÇÃO COM GEOMETRIAS DE ESPAÇOMODELOS DA LITERATURA

O primeiro estudo realizado foi para coeficientes de arrasto de espaçomodelos completos presentes na literatura. Ao todo, 3 modelos de foguetes diferentes foram estudados nos cinco programas computacionais citados: *Aerolab*, *RASAero*, *Rocksim*, *OpenRocket* e *CD1p0*.

As geometrias do primeiro modelo (modelo A) não são baseadas em nenhum espaçomodelo específico, não existindo, portanto, dados experimentais que pudessem ser comparados com os resultados obtidos pelos programas computacionais. Já os outros dois modelos (B e C) foram testados em túneis de vento. As suas geometrias e valores experimentais utilizados de C_d podem também ser encontrados no relatório técnico de DeMar (1995). Comparou-se, também, os coeficientes de duas variações do modelo C presentes no relatório técnico, descritas nesse trabalho como modelos D e E. A primeira variação não apresenta tubo-guia enquanto a segunda não apresenta tubo-guia e possui um nariz em formato cônico.

O programa *RASAero* não possui opção para simulações com narizes elipsoides, sendo necessário realizar as simulações com um nariz em forma de ogiva. Já o programa *Aerolab* não contém a possibilidade de simular o C_d de um espaçomodelo que contenha empenas com seção transversal arredondada. Nesse caso, foi escolhida uma seção de empena transversal biconvexa.

AS TABELAS 1, 2 e 3 apresentam as geometrias e características dos modelos A, B e C respectivamente. O material dos minifoguetes B e C não foram especificados no relatório técnico e tiveram de ser estimados.

TABELA 1 – MODELO A

Nariz	Comprimento: 150 mm
	Diâmetro: 50 mm
	Material: PVC
Tubo-foguete	Comprimento: 400 mm
	Diâmetro: 50 mm
	Material: PVC
Empenas	Formato: Retangular (Seção transversal quadrada)
	Altura: 60 mm
	Largura: 40 mm
	Espessura: 5 mm
	Material: Balsa
Tubo-guia	Nenhum
Acabamento	Nenhum

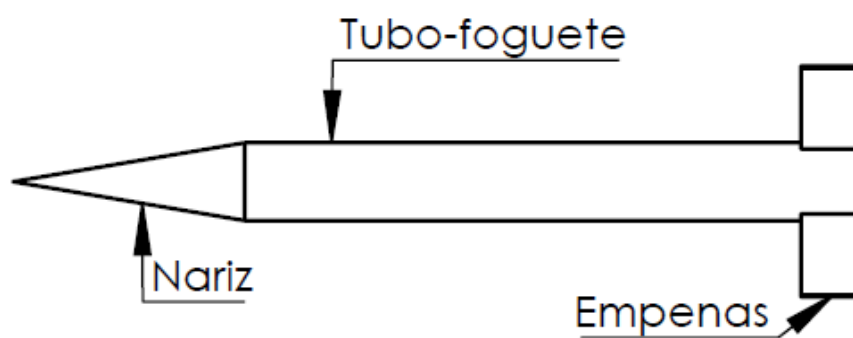


FIGURA 4: ESQUEMA DO MINIFOGUETE MODELO

TABELA 2 – MODELO B

Nariz (Elipsoide)	Comprimento: 2 pol (50,8 mm)
	Diâmetro: 1 pol (25,4 mm)
	Material: PVC
Tubo-foguete	Comprimento: 11,33 pol (287,8 mm)
	Diâmetro: 1 pol (25,4 mm)
	Material: PVC
Empenas	Formato: Trapezoidal (Seção transversal arredondada)
	Altura: 1,5 pol (38,1 mm)
	Largura da base: 1,5 pol (38,1 mm) Largura do topo: 1,0 pol (25,4 mm)
	Espessura: 0,2 pol (5,1 mm)
	Material: Balsa
Tubo-guia	Nenhum
Acabamento	Regular

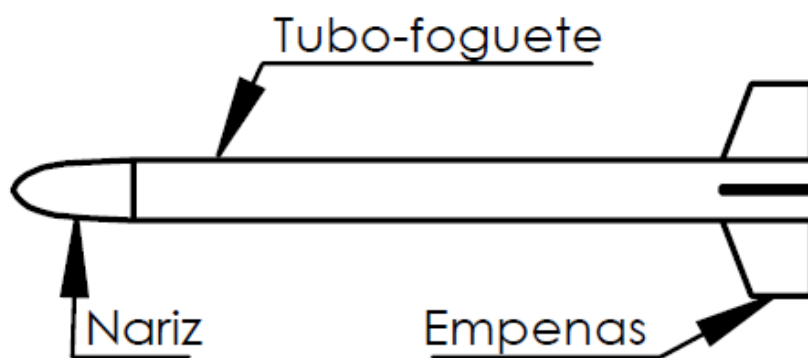


FIGURA 5: ESQUEMA DO MINIFOGUETE MODELO B

TABELA 3 – MODELO C

Nariz (Elipsoide)	Comprimento: 1,5 pol (38,1 mm)
	Diâmetro: 0,75 pol (19,05 mm)
	Material: PVC
Tubo-foguete	Comprimento: 8,5 pol (215,9 mm)
	Diâmetro: 0,75 pol (19,05 mm)
	Material: PVC
Empenas	Formato: Trapezoidal (Seção transversal arredondada)
	Altura: 1,125 pol (28,6 mm)
	Largura da base: 1,125 pol (28,6 mm) Largura do topo: 0,75 pol (19,05 mm)
	Espessura: 0,14 pol (3,6 mm)
	Material: Balsa
Tubo-guia	Comprimento: 2 pol (50,8 mm) Diâmetro: 1/8 pol (3,2 mm) Espessura: 0,003 pol (0,08mm) Material: papelão
Acabamento	Regular

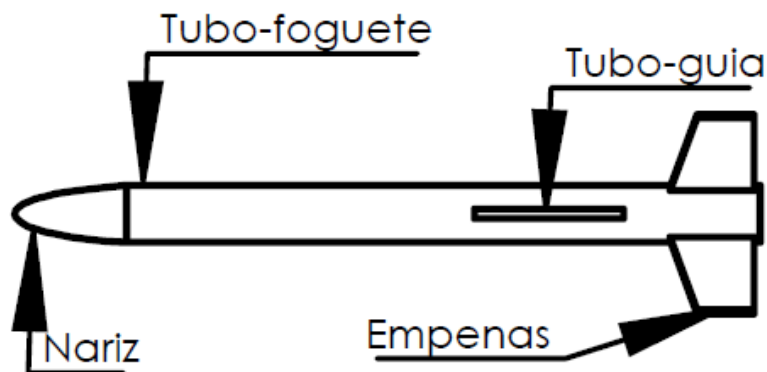


FIGURA 6: ESQUEMA DO MINIFOGUETE MODELO C

3.3. COMPARAÇÃO COM GEOMETRIAS DE ESPAÇOMODELOS DO GFCS

A próxima comparação realizada foi entre o apogeu real e o simulado pelos programas computacionais *Rocksim*, *OpenRocket* e *Trajectoria1p1*. O apogeu real foi obtido utilizando-se o altímetro *micropeak* dentro dos minifoguetes, da empresa *AltusMetrum*.

Para a simulação dos apogeus, a mesma curva de empuxo do motor foi utilizada nos dois aplicativos. As curvas foram geradas com base no desempenho médio dos motores utilizados em

cada espaçomodelo. A temperatura, pressão e altitude consideradas nos programas foram as mesmas medidas no dia do lançamento dos minifoguetes. A diferença nas simulações é dada basicamente pelo modelo matemático e a curva de coeficiente de arrasto que cada programa utiliza. No *Trajectoria1p1*, foi utilizada a curva de velocidade, em km/h, *versus* coeficiente de arrasto gerada pelo aplicativo *CD1p0*.

Ao todo, foram simuladas as trajetórias para 5 geometrias de minifoguetes diferentes, todos construídos e lançados pelo Grupo de Foguetes Carl Sagan. As tabelas e figuras a seguir apresentam as características principais de cada um desses minifoguetes. Todas as medidas apresentadas nas tabelas estão em milímetros.

A TABELA 4 contém as características gerais do corpo dos espaçomodelos (nariz+tubo-foguete). Na tabela, Dna é o diâmetro máximo do nariz, Lna é o comprimento do nariz, Dt é o diâmetro do tubo-foguete e Lt é o comprimento do tubo-foguete. A FIGURA 7 mostra os formatos dos diferentes tipos de narizes.

TABELA 4 – GEOMETRIA DO CORPO DOS MINIFOGUETES

Espaçomodelo	Tipo de nariz	Dna	Lna	Dt	Lt	Tubo-guia
LAE - 44	parabólico	20,20	50,00	20,20	200,0	Não
Pluto -1	parabólico	19,90	60,00	20,00	150,8	Sim
Alfa - 2	parabólico	19,73	59,00	20,32	200,0	Não
Alfa - 6	parabólico	15,88	22,00	15,88	114,4	Não
LAE - 22	ogiva	25,10	83,00	25,20	335,0	Sim

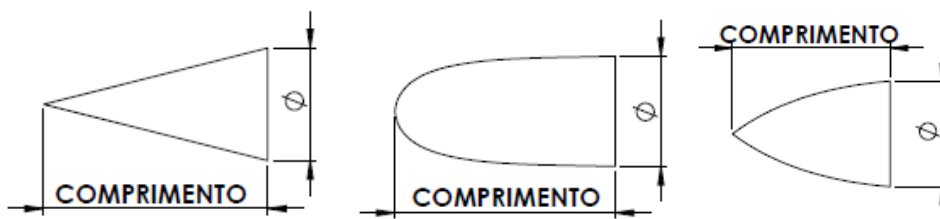


FIGURA 7: FORMATOS DE NARIZES CÔNICO, PARABÓLICO E OGIVA, RESPECTIVAMENTE

A TABELA 5 mostra as dimensões das empenas de acordo com o esquema já apresentado na FIGURA 2.

TABELA 5 – GEOMETRIA DAS EMPENAS DOS MINIFOGUETES

Espaçomodelo	Perfil da empena	Base	Topo	Altura	Espessura	Contorno
LAE - 44	quadrado	45,00	25,00	50,00	2,40	86,69
Pluto -1	quadrado	24,37	24,51	25,01	2,45	25,00
Alfa – 2	quadrado	25,00	10,00	30,00	2,45	15,00
Alfa - 6	quadrado	19,46	9,40	30,69	2,04	10,06
LAE - 22	quadrado	25,00	20,00	38,00	1,50	5,00

A TABELA 6 contém as dimensões dos tubos-guia utilizados. Nela, Ltb é o comprimento do tubo-guia e Detb é o diâmetro externo do tubo-guia. Já a FIGURA 8 apresenta a imagem de todos os minifoguetes analisados.

TABELA 6 – GEOMETRIA DO TUBO-GUIA DOS MINIFOGUETES

Espaçomodelo	Ltb	Detb	Espessura
Pluto -1	68,9	4,00	0,60
LAE - 22	45,0	3,90	0,10

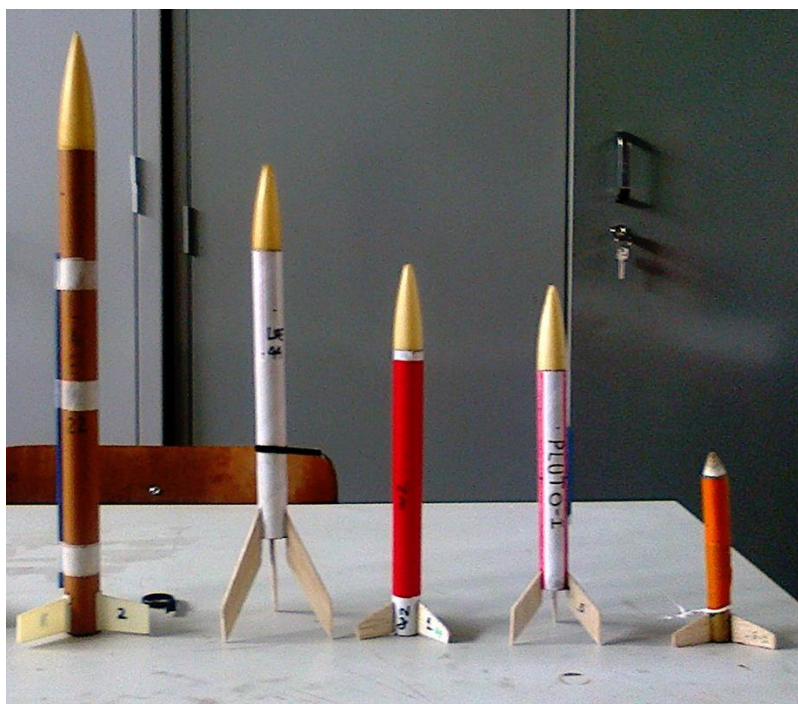


FIGURA 8: (DIREITA PARA ESQUERDA) ALFA-6, PLUTO-1, ALFA-2, LAE-44, LAE-22

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os coeficientes de arrasto obtidos para todas as geometrias descritas nesse trabalho serão apresentados a seguir na forma de gráficos e tabelas.

4.1. COEFICIENTES DE ARRASTO DE ESPAÇOMODELOS DA LITERATURA

A FIGURA 9 contém os coeficientes de arrasto obtidos para o modelo A pelos 5 programas computacionais. Os valores obtidos pelo programa *RASAero* encontram-se muito distantes dos calculados pelos outros programas. Essa disparidade é, provavelmente, resultante de uma consideração superestimada do coeficiente de pressão para empenas de perfil quadrado. A escolha de outro perfil na simulação, como o arredondado por exemplo, reduziu pela metade o valor do C_d total. Os valores simulados pelos programas *OpenRocket* e *CD1p0* ficaram muito próximos, com uma diferença máxima de 8,6%. Os valores simulados pelo *Rocksim* foram os mais baixos, produzindo um C_d médio de 0,39.

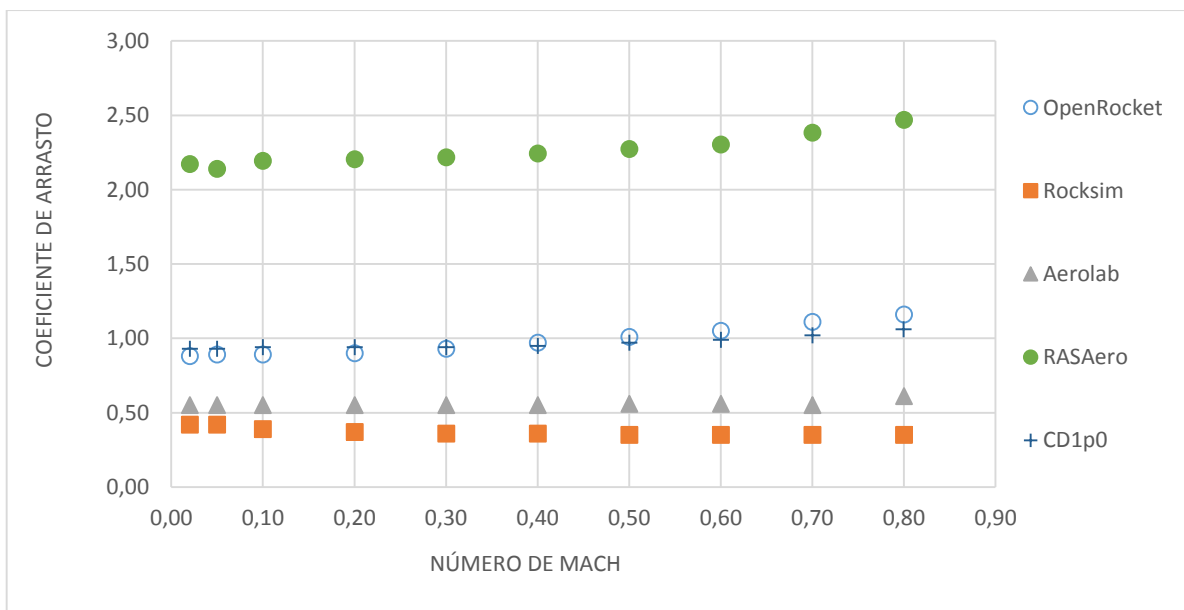


FIGURA 9: COEFICIENTE DE ARRASTO DO MODELO A

As TABELAS 7 a 10 apresentam os valores de C_d obtidos para os modelos B, C, D e E. Os valores experimentais foram retirados do relatório de DeMar (1995). Para cada tipo de espaçomodelo, os experimentos do relatório obtiveram o coeficiente de arrasto apenas para as velocidades de 80, 100 e 120 quilômetros por hora.

TABELA 7 – COEFICIENTE DE ARRASTO DO MODELO B

Mach	0,07 (80km/h)	0,08 (100km/h)	0,10 (120km/h)	Média
OpenRocket	0,60	0,60	0,60	0,60
Rocksim	0,72	0,70	0,68	0,70
Aerolab	0,37	0,41	0,40	0,39
RASAero	0,87	0,88	0,89	0,88
CD1p0	0,68	0,69	0,71	0,69
Experimental	0,84	0,78	0,73	0,78

TABELA 8 – COEFICIENTE DE ARRASTO DO MODELO C

Mach	0,07 (80km/h)	0,08 (100km/h)	0,10 (120km/h)	Média
OpenRocket	0,64	0,64	0,64	0,64
Rocksim	0,76	0,73	0,71	0,73
Aerolab	0,48	0,43	0,42	0,44
RASAero	1,04	1,04	1,04	1,04
CD1p0	0,66	0,68	0,72	0,69
Experimental	0,96	0,95	0,88	0,93

TABELA 9 – COEFICIENTE DE ARRASTO DO MODELO D

Mach	0,07 (80km/h)	0,08 (100km/h)	0,10 (120km/h)	Média
OpenRocket	0,62	0,62	0,62	0,62
Rocksim	0,73	0,70	0,68	0,70
Aerolab	0,39	0,42	0,41	0,41
RASAero	0,88	0,88	0,88	0,88
CD1p0	0,63	0,65	0,69	0,66
Experimental	0,50	0,75	0,68	0,64

TABELA 10 – COEFICIENTE DE ARRASTO DO MODELO E

Mach	0,07 (80km/h)	0,08 (100km/h)	0,10 (120km/h)	Média
OpenRocket	0,65	0,65	0,65	0,65
Rocksim	0,72	0,69	0,67	0,69
Aerolab	0,38	0,41	0,40	0,40
RASAero	1,00	1,00	1,00	1,00
CD1p0	0,70	0,72	0,76	0,73
Experimental	0,77	0,98	0,80	0,85

Observando os coeficientes medidos experimentalmente, percebe-se uma variação alta entre valores para uma mesma geometria e para velocidades muito próximas, o que não é coerente

com a teoria. A variação está atribuída à incerteza das medições feitas e a qualidade dos testes feitos no túnel de vento. No entanto, como em seu relatório DeMar(1995) não especifica valores para essas incertezas, uma análise mais detalhada sobre o fato não pode ser feita. Para diminuir o efeito das variações na comparação, foi feita uma média entre os três valores de velocidade para cada geometria.

Pode-se perceber que os valores mais altos de C_d foram gerados novamente pelo programa *RASAero*, mas nesse caso não foram tão discrepantes com os valores gerados pelos outros programas e com os valores experimentais. Os coeficientes de arrasto do programa *Aerolab* foram relativamente pequenos e apresentaram as maiores diferenças em relação aos valores empíricos. A menor diferença foi de 22% na velocidade Mach 0,07 para a geometria D.

A TABELA 11 apresenta os erros médios percentuais dos coeficientes de arrasto simulados em relação aos experimentais para cada geometria. Os erros médios são a média aritmética entre os três erros percentuais (diferença percentual entre C_d simulado e o C_d experimental) de cada modelo. O erro médio total se refere à média aritmética entre os erros médios dos quatro modelos analisados.

TABELA 11 – ERROS PERCENTUAIS DOS PROGRAMAS EM RELAÇÃO A CADA MODELO

	Modelo B	Modelo C	Modelo D	Modelo E	Erro médio total
OpenRocket	23,15	31,08	16,72	22,67	23,40
Rocksim	10,46	21,10	17,56	17,45	16,64
Aerolab	49,53	52,34	35,24	52,94	47,51
RASAero	12,77	12,00	40,92	18,97	21,16
CD1p0	11,11	25,95	13,60	13,54	16,05

Observa-se que o programa *CD1p0* apresentou os menores erros médios e o menor erro total, exceto para o modelo C. Uma provável causa para o aumento considerável do erro é a influência do tubo-guia na força de arrasto, que pode estar sendo subestimada no modelo matemático do programa.

4.2. APOGEU DE ESPAÇOMODELOS DO GFCS E C_d EFETIVO MÉDIO

A TABELA 12 mostra os apogeus reais medidos a partir de lançamentos feitos pelo GFCS e os apogeus simulados pelos programas *Rocksim*, *OpenRocket* e *Trajatória 1p1*. Todas as medidas estão em metros. Já a Tabela 13 apresenta o C_d efetivo obtido por dois programas diferentes e o C_d médio obtido no programa *CD1p0*.

O Coeficiente de arrasto efetivo pode ser definido como o coeficiente constante que, ao ser utilizado no cálculo da trajetória do minifoguete, resulta em um apogeu próximo ao real. Como o *OpenRocket* não apresenta a opção de simular a trajetória com C_d constante, ele não pôde ser

incluído na análise. Já o coeficiente de arrasto médio do programa foi calculado pela média aritmética de 50 pontos de Cd calculados entre velocidade a velocidade mínima (nula) e a máxima alcançada pelo espaçomodelo. A velocidade máxima do foguete LAE-22 não pôde ser medida, tendo que ser estimada com o auxílio dos próprios programas em estudo.

TABELA 12 – COMPARAÇÃO ENTRE APOGEUS REAIS E SIMULADOS

Minifoguete	Apogeu real	Apogeu Rocksim	Apogeu OpenRocket	Apogeu trajetória1p1
LAE - 44	318	502,9	349	272,5
Pluto -1	91,1	107,0	90,8	90,24
Alfa – 2	44,5	55,6	47,8	45,57
Alfa - 6	121,1	161,1	114,0	110,1
LAE - 22	159,1	209,6	178,0	173,1

TABELA 13 – COEFICIENTES DE ARRASTO EFETIVOS E MÉDIO

MODELO	Mach Máximo medido	Cd efetivo (Rocksim)	Cd efetivo (Trajetória)	Cd médio (CD1p0)
LAE - 44	0,35	1,31	0,98	1,29
Pluto -1	0,14	0,96	0,88	0,99
Alfa – 2	0,07	2,2	1,20	1,17
Alfa - 6	0,19	1,18	1,06	1,40
LAE - 22	0,16*	1,40	1,24	0,98

As estimativas de apogeu apresentadas pela Tabela 12 mostraram-se aceitáveis tanto para o programa *Trajétoria1p1* quanto para o programa *OpenRocket*. O primeiro apresentou um erro médio de 7,11% e o segundo de 7,05%. Os apogeus do programa *Rocksim* foram mais superestimados, apresentando um erro total médio de 33,06%.

Em relação a comparação entre os Cd efetivos e o Cd médio do programa *CD1p0*, a diferença média, nos dois casos, foi de aproximadamente 20%. A diferença foi consideravelmente grande se comparada às diferenças no apogeu, principalmente do programa *Trajétoria1p1* utilizando a curva do *CD1p0*. Esse fato demonstra uma relação não linear entre Cd e trajetória. Diferenças entre coeficientes de arrasto não geram uma diferença de altitude significativa, principalmente em velocidades menores.

5. CONCLUSÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A análise do coeficiente de arrasto é fundamental no estudo da aerodinâmica e da trajetória de espaçomodelos. O principal objetivo desse trabalho era o de desenvolver um aplicativo computacional para calcular o coeficiente de arrasto de minifoguetes e comparar os valores gerados com os coletados na literatura, experimentalmente e também simulados por outros programas.

Os valores de Cd retirados do relatório de DeMar (1995) apresentaram variações

consideráveis para velocidades relativamente próximas em uma mesma geometria. Isso pode indicar imprecisão nas medições e um ambiente de testes não totalmente controlado. O programa *CD1p0*, de todos os programas estudados, gerou coeficientes que proporcionaram o menor erro médio total em relação aos experimentais, cerca de 16%. O programa *Aerolab* estimou os valores de C_d mais distantes dos valores empíricos, com um erro médio total de 47,5%.

A utilização do programa *Trajectoria 1p1* com as curvas de arrasto do *CD1p0* para estimar o apogeu de um minifoguete provou-se eficiente, com uma diferença média total de, aproximadamente, 7% em relação à apogeu reais. Essa mesma diferença foi obtida nas estimativas feitas pelo programa *OpenRocket*. Os apogeu simulados pelo programa *Rocksim* foram os mais distantes da realidade, com um erro médio aproximado de 33%.

O C_d médio do aplicativo desenvolvido apresentou uma diferença considerável entre os C_d s efetivos estimados, de aproximadamente 20%. Essa diferença, como visto nos valores de apogeu calculados, não implica necessariamente em estimativas de trajetória afastadas da realidade. Esse fato pode ser explicado devido à relação não linear entre altitude máxima e C_d e também devido à diferença da influência de um C_d variável e um C_d constante na estimativa do apogeu.

Avaliando os dados apresentados nesse trabalho, pode-se inferir que os valores de coeficiente de arrasto estimados pelo aplicativo desenvolvido são coerentes com os de outros programas reconhecidos e com os dados experimentais. Aliado com o aplicativo *Trajectoria1p1*, ele foi capaz de estimar de maneira relativamente precisa os apogeu de minifoguetes reais. No entanto, dois fatores precisam ser destacados. A primeira é a grande diferença entre o C_d numérico e o experimental para o modelo C, provavelmente devido a uma influência maior do arrasto parasita do tubo-guia do que a considerada pelo programa. A segunda é a proporção entre o aumento do valor do coeficiente de arrasto e o aumento da velocidade. As duas estimativas de apogeu com o maior erro médio foram para os minifoguetes que atingiram as duas maiores velocidades máximas. É possível que, à medida em que a velocidade máxima aumente, a curva gerada pelo aplicativo computacional comece a distanciar-se da realidade.

Apesar das estimativas relativamente precisas feitas pelo programa, seria interessante aprofundar ainda mais as comparações feitas, para poder avaliar melhor o modelo matemático proposto e executar as alterações necessárias. A realização de testes em túneis de vento com formas de medição mais precisas e faixas de velocidade maiores também permitiria uma análise melhorada do programa, com a posterior comparação dos resultados experimentais com os valores numéricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CANNON, B. **Model Rocket Simulation with Drag Analysis**, 2004.

DEMAR, J.S. **Model Rocket Drag Analysis using a Computerized Wind Tunnel**. NAR research & development report 52094, 1995.

GREGOREK, G. M. **Aerodynamic Drag of Model Rockets** . Penrose: Estes Industries, 1970.

HOERNER, S.F. **Fluid-Dynamic Drag**: theoretical, experimental and statistical information. Publicado pelo autor, 1965.

HOULT, C.P. **Drag Coefficient (rev.3.2)**. Rocket Science and Technology, 2013.

NISKANEN, S. **OpenRocket technical documentation**. 2013.

ROGERS, C.E; COOPER, D. **Rogers Aeroscience RASero Aerodynamic Analysis and Flight Simulation Program: Users Manual**. RASAero, 2011.

STONE JR, W.K. **Collection of zero-lift drag data on bodies of revolution from free-flight investigations**. NASA technical report R-100, 1961.