

Aerodinâmica e Estabilidade do Foguete

Contribuição de Bruno Ferreira Porto
03 de December de 2007
Última Atualização 18 de December de 2007

A principal característica de um foguete é sua estabilidade, que pode ser interpretada como capacidade de manter a trajetória projetada. A estabilidade de um foguete é influenciada pela posição relativa do centro de gravidade e do centro de pressão.

Essa influência pode ser observada pelos diagramas de corpo livre da Figura 41 e nas trajetórias da Figura 42. O foguete instável, Figura 41, possui o centro de pressão, CP, mais próximo da ogiva do que o centro de gravidade, CG. Quando sofre uma força de arrasto lateral de qualquer amplitude gera um momento de forma a ampliar essa força, entrando em uma trajetória imprevisível de voltas, Figura 42. Quando o CG está no mesmo ponto do CP o comportamento é indiferente, o foguete adquire uma velocidade horizontal em resposta à força de arrasto lateral, mas não sofre nenhum momento. Não é considerada uma opção estável, pois o foguete sai da trajetória projetada. De acordo com a Figura 41 para que o foguete tenha estabilidade aerodinâmica e mantenha sua rota o centro de pressão deve estar atrás do centro de gravidade (CG mais próximo da ogiva). Assim, quando o foguete sofre um empuxo lateral gera um momento em torno do CG que direciona o foguete de forma a reagir ao empuxo lateral, com um momento gerado pelo arrasto, entrando em equilíbrio. Existe um limite para essa distância, onde o foguete se torna super estável e o momento gerado pelo empuxo lateral sobrepuja o momento do arrasto fazendo com que o foguete se vire na direção do vento, o ultimo caso da Figura 41.

Instável

Indiferente

Estável

Super estável

Figura 41 - Diagramas de corpo livre de foguetes com diferentes configurações aerodinâmicas.

Figura 42 – Trajetórias de diferentes configurações aerodinâmicas.

O coeficiente de estabilidade, CE, é a distância entre o CP e o CG dividida pelo diâmetro do foguete, Equação 98:

Equação 98

O coeficiente deve ser entre um e dois, como mencionado em textos do U.S. Army Missile Command, (7), Barrowman, (27), e Nakka, (2), sendo instável quando menor que um e super estável quando maior que dois. Para o caso do foguete apresentar múltiplos diâmetros o valor de D, neste projeto, será a média obtida pelo método dos pesos, sendo o fator de peso o comprimento de cada seção de diâmetro diferente, Equação 99 e Figura 43.

Equação 99

Figura 43 - Exemplo de um foguete com múltiplos diâmetros.

O centro de gravidade varia ao longo do vôo em razão do consumo do propelente. Para se conhecer o CG pode-se: medir no próprio foguete, sendo o ponto de equilíbrio, calcular, conhecendo-se as massas de cada um dos componentes e suas posições relativas e por meio do projeto do foguete em software CAD 3D, Figura 44.

Figura 44 - Centros de gravidade inicial e pós combustão do foguete AKK, obtidos através do software CAD 3D SolidWorks.

Aletas

A função das aletas é dar estabilidade e controle de trajetória aos foguetes. Elas funcionam pelo aumento localizado da área lateral do foguete, ajustando a posição do centro de pressão de forma a tornar o foguete estável. O efeito do tamanho das aletas no centro de pressão pode ser observado na Figura 41. Em geral são dispostas uniformemente em torno do diâmetro do foguete e são no mínimo três, para prover estabilidade nos eixos. O valor mínimo de aletas é limitado pela velocidade máxima que o foguete deve atingir. Em velocidade transônicas uma baixa razão de alongamento, razão entre a altura e o comprimento da aleta, diminui a variação do centro de pressão como pode ser observado na Figura 45. Uma razão menor, em alguns casos, significa a necessidade de um número maior de aletas para se garantir um coeficiente de estabilidade dentro da faixa desejável, número é limitado pelo arrasto, principalmente, e pela interferência aerodinâmica entre aletas, como discutido por U.S. Army Missile Command, (7).

Figura 45 – Influência da razão de alongamento das aletas na força normal e por consequência na posição do CP, U.S. Army Missile Command , (7).

A forma geométrica do plano de cada aleta não é importante em voos subsônicos, sua geometria influencia na posição do CP, mas de forma pouco significativa para todo o foguete. As formas mais comuns são o triângulo, o trapézio e o

trapézio cortado, Figura 47. A geometria mais importante é o perfil, que deve minimizar o arrasto tendo formas aerodinâmicas. A Figura 46 exemplifica três tipos comuns de perfis. Os perfis do tipo plano com bordos chanfrados ou diamante são muito eficientes, mesmo em vôos supersônicos. O uso de aerofólios como o NACA-0012 deve ser criterioso. Flutuações assimétricas nas ondas de choque em cada face, em vôos supersônicos, podem provocar esforços não previstos e conseqüente quebra do foguete em vôo, caso em particular do foguete Frostfire III de Richard Nakka, (2) , Figura 48 e a Figura 49 descreve o fenômeno enfrentado pela aleta do foguete, sendo: 1 - fluxo transônico simétrico em torno do aerofólio; 2 - Um distúrbio assimétrico (mudança no ângulo de ataque ou vento, por exemplo) provoca o deslocamento da onda e desprendimento da camada limite e em 3 - a aleta reage, entrando em oscilação.

Figura 46 - Tipos comuns de perfis usados em aletas de foguetes.

Figura 47 - Diversas geometrias de aletas e suas razões de aspecto. U.S. Army Missile Command , (7) .

Figura 48 - Fuselagem fragmentada por esforços aerodinâmicos no foguete Frostfire III durante a fase transônica do vôo. Nakka, (2)

Figura 49 - Fluxo transônico com vibração induzida por desequilíbrio nas ondas de choque em torno da aleta.

A obtenção da posição do centro de pressão e sua variação em função da velocidade serão discutidas no artigo Determinação da estabilidade e coeficiente de arrasto .