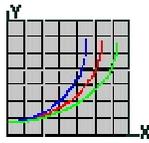


Web site de foguetaria experimental de Richard Nakka



Teoria de motor-foguete sólido

9 Escoamento Bifásico

A maioria dos propelentes de foguetes sólidos produz produtos de combustão que são uma mistura de gases e partículas na fase condensada (líquido ou sólido) que é evidente como fumaça visível na pluma de exaustão. Estes propelentes contêm metais, tais como alumínio e magnésio, gerando óxidos de metais como produtos de combustão na fase condensada. Oxidantes compostos por metais, tais como nitrato de potássio (KN) ou perclorato de potássio (KP), geram produtos na fase condensada de massa molecular particularmente alta, que é preferivelmente indesejável. Os propelentes KN-açúcar produzem uma nuvem branca densa de fumaça de carbonato de potássio. De fato, aproximadamente 44% da massa de exaustão é matéria sólida.

A ocorrência de sólidos e líquidos na exaustão leva a uma redução no desempenho por diversas razões:

- Esta porção da massa de combustão não pode promover qualquer trabalho de expansão e portanto não contribui para acelerar o escoamento de exaustão.
- Quanto mais alta a massa molecular efetiva destes produtos, mais baixa a Velocidade Característica (c^*).
- Devido à inércia térmica, o calor da fase condensada é parcialmente ejetado para fora da tubeira antes de transferir este calor para os gases vizinhos, e é portanto não convertido em energia cinética. Isto é conhecido como **atraso térmico de partícula**.
- Além disso, devido a relativamente grande massa de partículas (comparada aos gases), estes não podem acelerar tão rapidamente quanto os gases vizinhos, especialmente naquela porção da tubeira onde a aceleração do escoamento é extremamente alta (região da garganta). A aceleração das partículas depende do arrasto de fricção no escoamento do gás, que necessita uma velocidade diferencial. O resultado líquido é que as partículas na fase condensada saem da tubeira em uma velocidade mais baixa do que os gases. Isto é referido como **atraso de velocidade da partícula**.

Em termos dos parâmetros de desempenho do foguete, a presença de produtos na fase condensada é refletido em uma Velocidade Característica reduzida, devido à massa molecular efetiva mais alta da mistura gás/partícula. O Coeficiente de Empuxo C_f , por outro lado, é aumentado com o aumento da fração de partícula, uma consequência de um valor reduzido de k . Contudo, o C_f produzido sofre significativamente, devido ao atraso térmico e ao atraso de velocidade. Isto é provavelmente a maior perda específica de eficiência sofrida por um motor com uma fração significativa de partículas na exaustão. Como é especialmente verdade com uma tubeira subexpandida (isto é, a porção divergente subdimensionada). A importância aparente de ter uma boa porção divergente da tubeira é clara pelo exame da Figura 9.1, que mostra a variação do Coeficiente de Empuxo ideal para o escoamento através da tubeira do motor-foguete Kappa. A tubeira é projetada com uma razão de expansão quase ideal de $A_e/A_t = 11,4$, que resulta em um Coeficiente de Empuxo ideal de 1,69. Contudo, se a tubeira fosse truncada na garganta (linha tracejada vermelha), o coeficiente seria somente de 0,62. Portanto o divergente amplia o empuxo ideal por um fator de 2,73! Claro que os valores “reais” são provavelmente menos pronunciados do que os valores ideais. O Coeficiente de

Empuxo real para este motor é aproximadamente 1,5. É desconhecido qual é o Coeficiente de Empuxo real para uma tubeira truncada, já que esta configuração não foi testada.

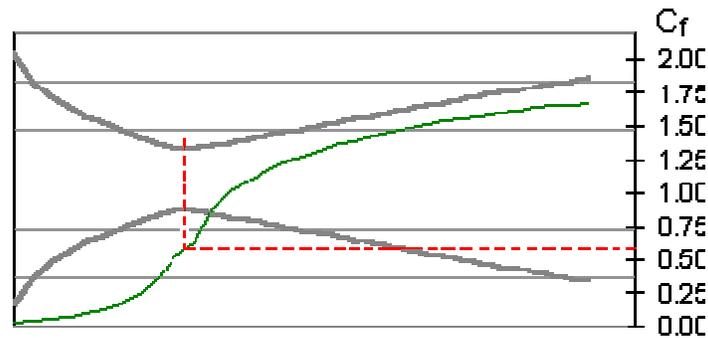


Figura 9.1 C_f ideal para escoamento bifásico através da tubeira Kappa.

Outro fator que é importante com relação às perdas de escoamento bifásico é o *contorno da tubeira*, especialmente na região da garganta. A Figura 9.2 ilustra a aceleração do escoamento para a tubeira Kappa. A aceleração na região da garganta (linha tracejada vermelha) é extremamente alta, especialmente logo após, onde ela é máxima. Muito do atraso de partícula, que é uma função forte da aceleração, ocorre nesta região, por isso a importância de projetar uma tubeira com um contorno bem arredondado na garganta, sem qualquer variação abrupta na seção transversal.

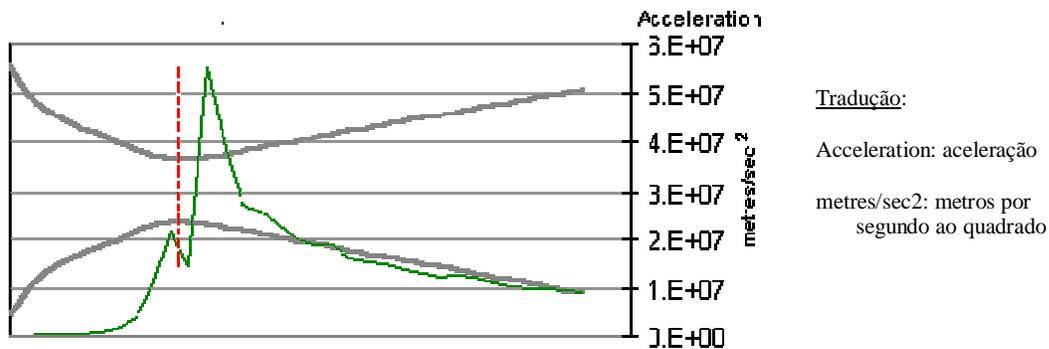


Figura 9.2 Aceleração gás/partícula para escoamento bifásico através da tubeira Kappa.

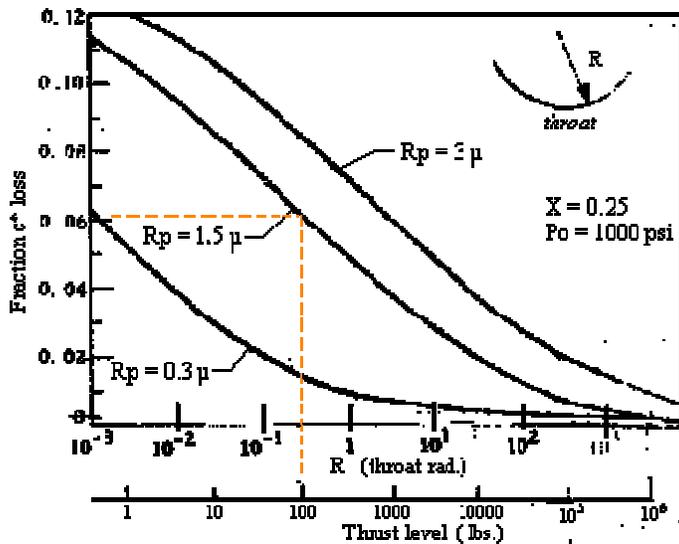
O *tamanho do motor-foguete* bem como o *tamanho das partículas na fase condensada* ambos tem uma papel importante em relação à influência dos efeitos do escoamento bifásico. Isto é ilustrado na Figura 9.3, que plota a fração da perda de Velocidade Característica em relação ao:

- Tamanho do motor (empuxo)
- Tamanho da partícula

Notar que a fração mássica de partículas na exaustão para este estudo era $X = 0,25$. Para propelentes KN-açúcar padrão, $X = 0,44$.

Por exemplo, para um motor com empuxo de 100 libras-força [45,36 newtons], o motor sofre uma perda de 6% na Velocidade Característica se o tamanho médio das partículas é 1,5 micrometros [$1,5 \times 10^{-3}$ mm], como mostrado pela linha tracejada vermelha.

Fica claro deste gráfico que para motores experimentais amadores, que são tipicamente de 1000 libras-força [453,6 newtons] de empuxo ou menos, que as perdas de escoamento bifásico podem ser significativas, mas provavelmente podem ser desconsideradas para motores “profissionais” grandes.



Tradução:

Fraction c^* loss: fração de perda de c^*

throat: garganta

Thrust level (lbs.): nível de empuxo (libra-força)

throat rad.: raio de curvatura na garganta

Figura 9.3 Influência do tamanho do motor e do tamanho da partícula sobre c^* .
Referência: *Dynamics of Two-Phase Flow in Rocket Nozzles*, ARS Journal, Dec. 1962.

Como o escoamento bifásico é levado em conta em relação aos cálculos de desempenho do motor, tais como aqueles apresentados nos capítulos anteriores? Eu me perguntei sobre esta questão muito boa quando eu comecei a pesquisar o propelente KN-açúcar de um aspecto de desempenho teórico, em 1983 quando eu comecei a fazer o meu trabalho de graduação **Projeto e Teste de Motor-Foguete a Propelente Sólido**. Todas as equações no Sutton e outros livros-texto pareciam ignorar a existência de partículas na exaustão, mas eu sabia que eu não poderia ignorá-las, não quando a exaustão do propelente contém 44% de matéria sólida! Depois de muita consternação, eu achei dois livros, e em particular, artigos no *ARS Journal*, que tocavam neste tópico. Eu acabei rederivando todas as equações de desempenho pertinentes dos princípios básicos, então fiz as modificações necessárias para considerar a presença de fase condensada. A hipótese chave necessária foi que as partículas escoam na mesma velocidade do gás (isto é, sem atraso na velocidade), assim as equações modificadas representam um limite superior do desempenho. Os detalhes são muito complicados para apresentar aqui, então eu apresentarei somente o resultado final, que felizmente, é muito simples. Com esta alteração, a mistura gás-partícula comporta-se como um gás com um expoente isentrópico k modificado. Todas as equações fundamentais permanecem as mesmas e são totalmente aplicáveis ao escoamento bifásico, com as únicas modificações sendo:

- A **Massa Molecular** M deve levar em conta a presença da fase condensada no cálculo da *Massa Molecular efetiva*, que é obtida pela divisão da massa do sistema pelo número de moles do gás no sistema. Por exemplo, se a massa do sistema é 100 gramas e o número de moles do gás é 2,3819, então

$$M = \frac{100}{2,3819} = 41,98 \text{ g/mol} \quad (9.1)$$

- O **expoente isentrópico** modificado tem duas formas, uma para condições onde a velocidade do escoamento (ou realmente, aceleração) é baixa, e a outra para condições de escoamento com alta aceleração. Onde a aceleração do escoamento é baixa, tal como na câmara de combustão,

$$k = \frac{C_{p-mix}}{C_{p-mix} - R'} \quad (9.2)$$

onde C_{p-mix} é o *calor específico efetivo da mistura gás e sólido* e R' é a constante universal dos gases. O método de calcular C_{p-mix} é fornecido na *Web Page Bloco de Notas Técnico*.

Esta é a forma de k para ser usada, portanto, quando calcular a **pressão na câmara** e a **Velocidade Característica**.

Onde a velocidade do escoamento e a aceleração são altas, isto é, na tubeira:

$$k = k' \left[\frac{1 + \psi \frac{C_S}{C_{p-gas}}}{1 + k' \psi \frac{C_S}{C_{p-gas}}} \right] \quad (9.3)$$

onde k' é o expoente isentrópico para *somente a mistura de gases*,

$$\psi = \frac{X}{1 - X} \quad (9.4)$$

onde X é a fração mássica de partículas na exaustão. C_S é o calor específico para a mistura sólida (ou líquida) na exaustão, e C_{p-gas} é o calor específico para somente a mistura de gases.

Esta é a forma de k para ser usada, portanto, quando calcular a **Velocidade de Exaustão**, **Empuxo**, **Coefficiente de Empuxo** e outros parâmetros de escoamento em tubeira.

A derivação desta forma do expoente isentrópico modificado assume condição de escoamento congelado onde nenhum atraso térmico ou de velocidade é assumido existir, e é baseado na equações de quantidade de movimento linear e energia para escoamento isentrópico permanente. Detalhes adicionais sobre o cálculo deste expoente isentrópico modificado pode ser encontrado na *Web Page Bloco de Notas Técnico* e no periódico *ARS Journal*, artigo “*Recent Advances in Gas-Particle Nozzle Flows*”, R. F. Høglund, maio de 1962.

Para aqueles interessados em mais sobre tratamento teórico do escoamento bifásico, eu sugeriria ler com atenção *Solid Propellant Rocket Motor Design and Testing* que está disponível para *download* no formato PDF.