

DIEGO FERNANDO MORO

BANCO ESTÁTICO CASEIRO

Relatório do grupo de pesquisa CFD,
propulsão e aerodinâmica de foguetes , Setor
de Tecnologia da Universidade Federal do
Paraná.

CURITIBA

20 OUT 2015

SUMÁRIO

1 Introdução.....	2
2 Materiais e Métodos	3
2.1 Mola calibrada	3
2.2 Berço para o motor durante o TE.....	4
2.3 Obtenção dos dados de deslocamento da mola ao longo do tempo.....	6
2.4 Pós processamento	7
3 Testes experimentais.....	8
4 Discussões e Conclusão.....	10
5 Referências	11

1 INTRODUÇÃO

A proposta deste trabalho é viabilizar a medição da curva de empuxo de motores-foguete para equipes de minifoguetes que não possuam acesso a célula de carga e módulo de aquisição de dados.

O banco estático em si serve para obter a cada instante de tempo o valor da força de empuxo do motor-foguete.

No caso da célula de carga, a força de empuxo produz um pequeno deslocamento (da ordem de micrômetros) que é transformado em sinal elétrico por um strain gage, este sinal elétrico passa para um módulo de aquisição de dados que está conectado ao computador (a frequência utilizada geralmente é de 200 Hz).

No caso de um banco estático analógico a força de empuxo gera um grande deslocamento (da ordem de milímetros), pela ação de uma mola calibrada, este deslocamento deve ser avaliado ao longo do tempo para obter-se a curva de empuxo do motor-foguete.

Geralmente, os bancos estáticos analógicos marcam o deslocamento devido à força de empuxo com um marcador, que percorre uma trajetória ao longo de um cilindro que possui um papel giratório com rotação também calibrada.

Neste trabalho o banco estático analógico será utilizado de forma diferente, sendo feito a aferição do deslocamento da mola via vídeo e a marcação de tempo se dá pelo próprio

tempo do vídeo, isto facilita muito a aferição do empuxo do motor ao longo do tempo, retirando as variáveis da rotação do cilindro giratório e a marcação no papel. A taxa de aquisição de dados é dada pelo número de quadros por segundo que a câmera fornece, geralmente 30 quadros por segundo ou 30 Hz.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais necessários para fabricar um banco estático analógico são os seguintes:

- Mola calibrada
- Berço para manter o motor durante o teste estático (TE)
- Forma de obter os dados de deslocamento da mola ao longo do tempo
- Pós-processamento dos dados de força de empuxo em função do tempo obtidos

Será abordado cada tópico mostrado acima separadamente:

2.1 MOLA CALIBRADA

A forma mais simples de obter uma mola calibrada é realizar a calibração de uma mola de fácil obtenção e barata.

Neste trabalho a mola utilizada é a de uma balança analógica de cozinha, disponível em lojas de presente ou afins, geralmente ela vem com limite de peso máximo de 1 a 5 kg (Fig. 1).

A calibração desta mola deve ser realizada comparando-se os deslocamentos obtidos com massas padrão, ou que foram aferidas em balanças de precisão.

O objetivo é obter uma curva de deslocamento em função da força peso aplicada na mola, para ser utilizada posteriormente de forma inversa para transformar o deslocamento da balança durante o TE em força.



Figura 1 Balança de cozinha de 1 kg, possui uma mola que deve ser calibrada.

2.2 BERÇO PARA O MOTOR DURANTE O TE

A posição do motor durante o teste estático pode ser na vertical ou na horizontal. Há diferenças na análise e na forma dos berços adotados nos dois casos:

1) No caso do TE na posição vertical (Fig. 2), a força medida possui mascarado o peso do fluxo de massa de propelente, que geralmente é da ordem de g/s. Há portanto neste caso a medição simultânea da força de empuxo com o peso do fluxo de massa de propelente. Se a força medida for superior a 2 ordens de grandeza do que o fluxo de massa de propelente, isso significa que o erro desta medição é da ordem de 1%. O que é praticamente da mesma ordem que o erro da medição experimental, ou seja, não há inserção de erro significativo pela posição do motor no TE estar na vertical.

Um exemplo é um motor que tem fluxo de massa da ordem de 5 g/s, ou seja, o peso do fluxo de massa é de 0,05 N/s e gera 5 N de empuxo médio.

É possível utilizar, portanto, essa metodologia para estimar o erro experimental no caso do TE estar na posição vertical da seguinte forma:

$$U_{\text{exp}} \approx 100 \left(\frac{f m_{\text{med}}}{F_{\text{med}}} \right) \quad (1)$$

Onde: U_{exp} é a estimativa do erro experimental a cada segundo pelo fato do TE estar na posição vertical (%/s).

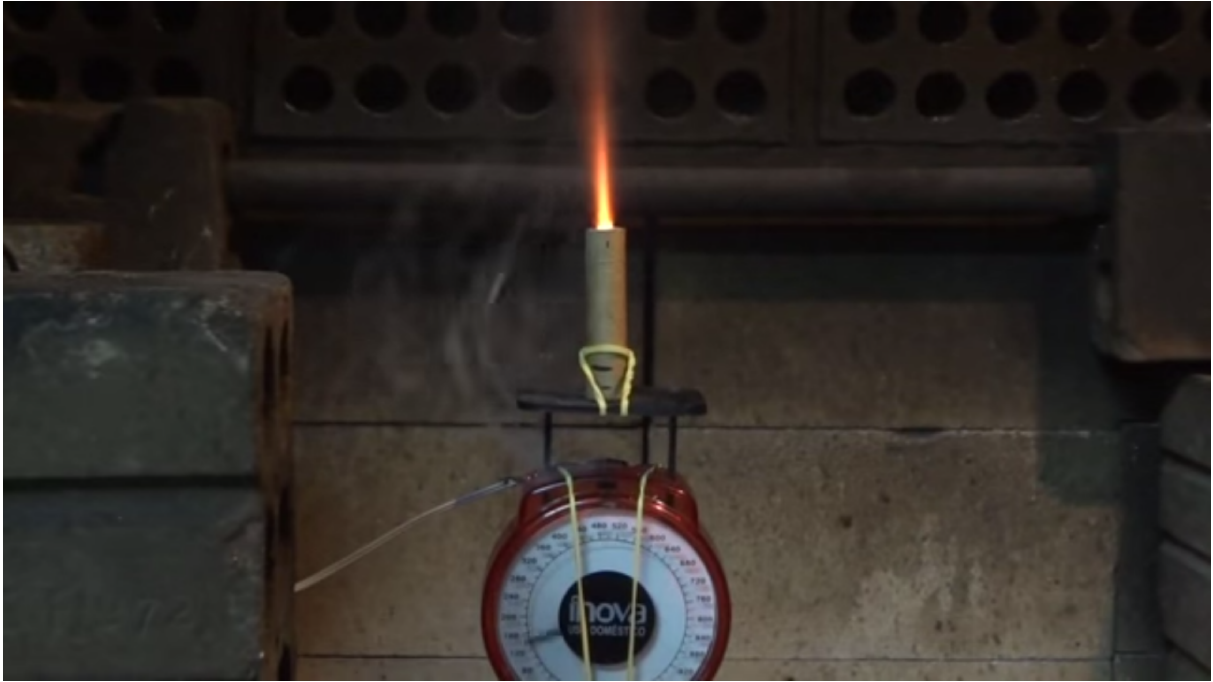


Figura 2 Exemplo de um TE na posição vertical em um banco estático analógico

É possível observar também que quanto maior o tempo de queima, maior será o erro total ao se adotar o TE na posição vertical, pode-se no entanto fazer correções na medição da força de empuxo para considerar o fluxo de massa, desta forma, obtêm-se a força mais próxima do real produzido pelo motor-foguete.

Neste trabalho a posição vertical para o TE foi adotada por ser a mais simples de utilizar e o erro adotado geralmente é da ordem do erro experimental. É possível notar também que o ‘berço’ para o motor é simplesmente um ou dois elásticos que seguram o motor-foguete na posição vertical.

2) No caso do TE na posição horizontal (Fig. 3), não há qualquer erro na medição causado pelo fluxo de massa, no entanto o atrito no berço aonde o motor é apoiado durante o TE pode causar erros na medição da força de empuxo. Este erro pode ser reduzido ao utilizar-

se um apoio por pêndulo, esferas ou rodinhas com baixo atrito, mas geralmente é utilizado uma forma mais simples como simplesmente apoiado em um tubo de aço ou alumínio.

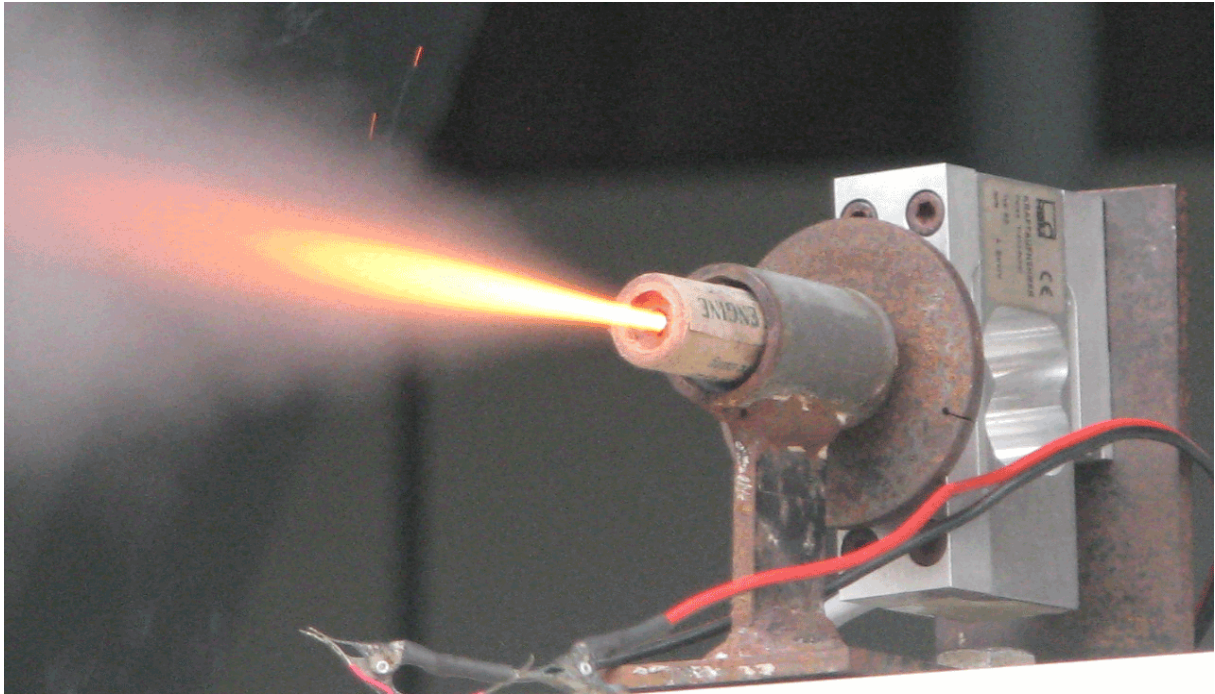


Figura 3 Exemplo de um TE na posição horizontal em um banco estático digital (célula de carga)

Independentemente do apoio utilizado, o atrito será causado pelo próprio peso do motor, então quanto mais leve o motor menor será este erro e quanto menos peças móveis ou que possuam menor atrito (pêndulo) melhor serão os resultados experimentais.

2.3 OBTENÇÃO DOS DADOS DE DESLOCAMENTO DA MOLA AO LONGO DO TEMPO

A parte que há mais variáveis e que geralmente ocorrem grandes erros na curva de empuxo de um banco estático analógico é na obtenção do deslocamento da mola ao longo do tempo.

A forma mais usual de realizar isto é acoplar na parte exterior da mola um marcador, o qual registra o deslocamento da mola que é transmitido a um rolo de papel giratório cuja velocidade tangencial é proporcional à escala de tempo utilizada. Este método de obtenção do

deslocamento em função do tempo pode possuir erros pelo atrito do marcador com o papel giratório e a própria rotação do rolo do papel.

Neste trabalho a forma de obtenção do deslocamento da mola é via vídeo do TE. Após realizar o TE, o vídeo passa por um pós-processamento com um código livre chamado Tracker (Fig. 4).



Figura 4 Logo do aplicativo Tracker

Este programa foi desenvolvido para ser utilizado como software de ensino de física, ele permite acompanhar a posição via vídeo uma determinada região deste vídeo e calcula dados secundários como velocidade e aceleração.

O software Tracker é utilizado neste trabalho para acompanhar o prato da balança ao longo de toda a queima do propelente do motor-foguete, ou ainda a posição do próprio motor, uma vez que ele está acoplado ao prato da balança.

Um bom tutorial deste software está disponível no link (em inglês):

<http://www.wired.com/2013/10/whats-the-acceleration-of-a-grasshoper>

No caso do tutorial, foi realizada uma análise da aceleração de um gafanhoto utilizando o Tracker. Basta aplicar os mesmos passos para acompanhar o deslocamento em função do tempo do prato da balança ao longo do tempo.

2.4 PÓS PROCESSAMENTO

Uma vez obtido a curva de deslocamento em função do tempo do motor-foguete, basta transformá-la em curva de força ao longo do tempo ao realizar a transformação inversa da curva de deslocamento em função da força, obtida no passo de calibração da mola.

O chamado pós-processamento neste trabalho consiste em integrar a curva de força em função do tempo para obter o impulso total do motor-foguete, geralmente para isto é utilizado à integração numérica da regra do trapézio.

Foi elaborado no grupo de pesquisa de CFD, propulsão e aerodinâmica de foguetes um código chamado Curva_Empuxo que realiza esta integração e mostra resultados secundários do motor-foguete, seu uso pode ser compreendido ao realizar a disciplina optativa da graduação da engenharia mecânica da UFPR chamada TM273 – Projeto e lançamento de espaçomodelos. Se o leitor não tiver a oportunidade de cursar esta disciplina, pode aprender o funcionamento deste código pelo seu tutorial, disponível na pasta do aplicativo Curva_Empuxo a partir do link abaixo:

<ftp://ftp.demec.ufpr.br/foguete/Aplicativos/>

3 TESTES EXPERIMENTAIS

Os materiais/locais utilizados foram:

- Local seguro para realizar os TE (no interior de uma churrasqueira)
- Balança de 1kg de força máxima da marca Inova, previamente calibrada
- Elásticos e espeto de churrasco
- Madeira para servir de apoio a balança
- Tripé com uma câmera/filmadora digital

Tendo como base a Fig. 2, os passos para realizar o teste estático são os seguintes:

- 1) A madeira de apoio da balança é colocada no interior da churrasqueira e presa por tijolos para ficar bem rígida.
- 2) A balança é inserida no interior da churrasqueira e é presa por um elástico e um espeto de churrasco na parte inferior.
- 3) O motor-foguete é preso ao prato da balança na posição vertical por 1 ou 2 elásticos.
- 4) O sistema de ignição do motor-foguete é preparado, no caso da Fig. 2 era ignição por estopim, mas também pode ser ignição elétrica.
- 5) A câmera e seu tripé são posicionados o mais paralelo possível ao prato da balança para não haver erros de paralaxe nas medições posteriores

- 6) É realizado o teste estático e o vídeo deste teste é gravado na câmera/filmadora
- 7) Com o vídeo do TE, é realizado o pós-processamento com o código Tracker para obter o deslocamento do prato da balança em função do tempo
- 8) Com o código Curva_Empuxo obtêm-se o impulso total e resultados secundários do motor-foguete em análise

O motor testado está mostrado na Fig. 5, sua curva de empuxo está mostrada na Fig. 6 e suas características e resultados estão mostradas na Fig. 7.



Figura 5 Motor de PVC de 20 mm

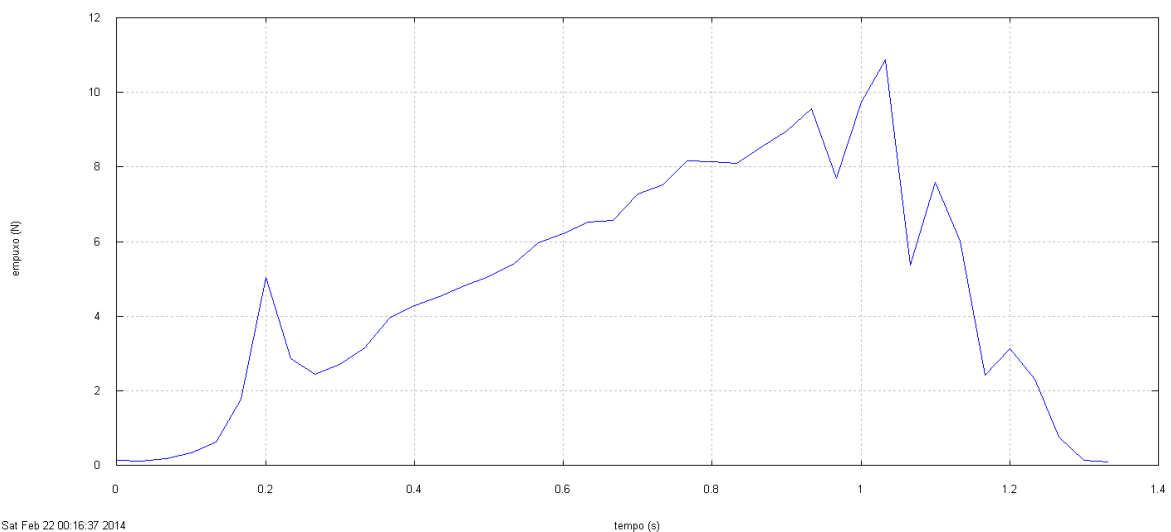


Figura 6 Curva de empuxo do motor-foguete testado no banco estático caseiro

Características do motor-foguete:Tubo do Motor:

Diâmetro externo: 20 mm

Diâmetro interno: 17 mm

Material: PVC de água fria, Pressão Nominal = 750kPa

Comprimento total: 65,0 mm

Tubeira (feita em esmectita):

Comprimento da tubeira: 20 mm

Massa de esmectita colocada: ~7.9 g

Diâmetro da garganta: 2.38125 mm ou 3/32 "

Tampa (feita em durepóxi):

Comprimento da tampa: 6 mm

Massa de durepóxi colocada: ~4.3 g

Mt = Massa do motor-foguete antes do teste estático = 28.5 g

Mf = Massa do motor-foguete após o teste estático = 20.9 g

Mp = Massa dos gases ejetados = 7.6 g

Resultados:

It = Impulso total = 6.50 N.s

Fmed = Força de empuxo média = 4.75 N

Fmax = Força de empuxo máxima = 10.86 N

tq = tempo de queima = 1.37 s

CLASSE = C 5

fm = Fluxo de massa médio = 5.56 g/s

c = Velocidade de ejeção efetiva média = 855.17 m/s

Is = Impulso específico = 87.20 s

Figura 7 Características e resultados do motor-foguete testado no banco estático caseiro, disponíveis também no blog foguetando.blogspot.com.br

4 DISCUSSÕES E CONCLUSÃO

Em relação ao uso do aplicativo Tracker, ele pode ser estendido a vários outros casos, por exemplo, o autor deste trabalho o utilizou para realizar a transformação de dados analógicos de um manômetro da pressão do motor-foguete ao longo do tempo para uma curva de pressão digital ao longo do tempo utilizando o deslocamento do ponteiro do manômetro como referência para o Tracker. Foi necessário também transformar deslocamentos

cartesianos para deslocamento angulares e discretizar a escala do manômetro, de pressão para deslocamento angular.

Ainda será necessário realizar comparações do desempenho do banco estático analógico (caseiro) deste trabalho em comparação ao banco estático digital utilizado nas análises de motores-foguete do grupo de foguetes Carl Sagan. No entanto por ser bem mais simples, a forma de análise presente neste trabalho pode ser aplicada por qualquer equipe de minifoguetes interessadas em realizar testes estáticos de motores-foguete.

5 REFERÊNCIAS

As imagens utilizadas neste documento e as características dos motores utilizados estão disponíveis na internet (Fig.1) e no blog do autor (Figs 2 a 7), as do blog do autor são de autoria própria. O link do blog do autor se encontra abaixo:

<http://foguetando.blogspot.com.br/>