



## Sensor Mecânico Acelerométrico

RAFAEL ANDRADE E SILVA <sup>1</sup>, YOSHIO YAMADA <sup>2</sup>, MAURÍCIO GUIMARÃES  
DA SILVA <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Taubaté, Taubaté, SP, Brasil

Aluno de Graduação do curso de Engenharia Aeronáutica.

<sup>2</sup>Universidade de Campinas, Campinas, SP, Brasil

Aluno de Doutorado do curso de Engenharia Mecânica.

<sup>3</sup>Instituto de Aeronáutica e Espaço, São José dos Campos, SP, Brasil

rafael.andradeesilva@hotmail.com

---

**Resumo.** Este trabalho apresenta o projeto do dispositivo de segurança Sensor Mecânico Acelerométrico (SMA). Este dispositivo tem como objetivo bloquear a ordem de ignição intempestiva do segundo estágio de um dado veículo, quando o mesmo se encontrar ainda na rampa de lançamento. Este bloqueio é feito através do SMA que fica na linha de fogo entre a fonte de energia e o iniciador pirotécnico (ignitor).

---

**Palavras-chave:** Aeroespacial; Defesa; SMA.

### 1. Introdução

A preocupação principal que gerou a necessidade de projeto de um SMA está associada ao efeito que a ocorrência de uma falha intempestiva do sistema de alimentação ou desconexão do umbilical do segundo estágio do foguete durante a fase de preparo pré-voos poderiam provocar na missão. De fato, estas ocorrências poderiam gerar risco de explosão do veículo na própria plataforma de lançamento.

De acordo com o Requisito de Missão e o Plano Preliminar de Projeto do Sensor Mecânico Acelerométrico – 002/SESP-PE/14 (2014) o SMA deverá utilizar a aceleração do foguete como fonte de energia para permitir a ordem de ignição do segundo estágio. Utilizando este conceito de projeto, o projeto do SMA foi concebido baseado em um sistema Massa-Mola. Esta definição é justificada por duas características que o projeto mecânico proporciona: simplicidade e maior segurança quando comparado ao sistema eletro-eletrônico. Utilizando este conceito, a configuração de massa e mola selecionada para o sensor deve apresentar elevada confiabilidade e nível de confiança, desde que o mau funcionamento do SMA pode conduzir à perda da missão do veículo.



## Princípio de Funcionamento do SMA

O projeto atual do SMA é composto pelos seguintes sistemas, Figura 1.

- a) Sistema Estrutural: Corpo, Tampa Equipada e Trava de Segurança Manual.
- b) Sistema Massa Mola: conjunto Massa Inercial.
- c) Sistema Elétrico: conjunto de componentes e conexões elétricas.

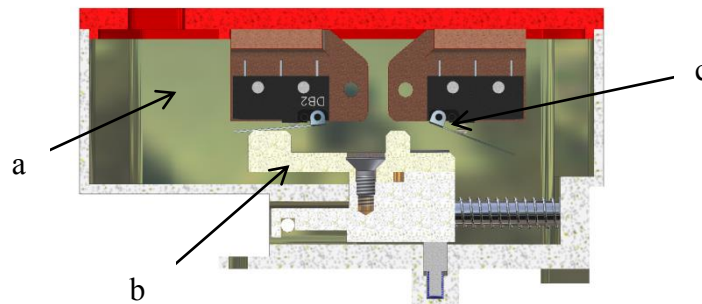


Figura 1. SMA (Detalhe interno)

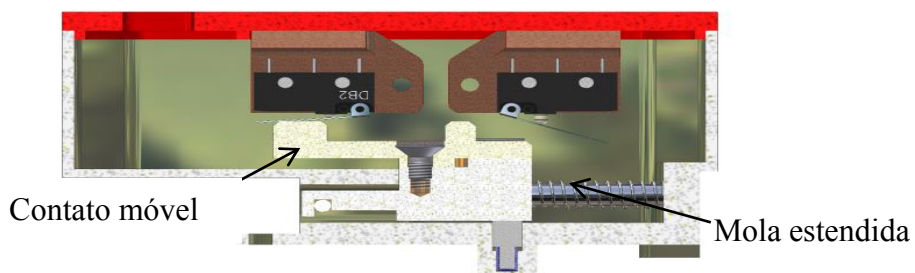
Conforme apresentado no relatório: Especificação Técnica do Sensor Mecânico Acelerométrico – 012/SESP-PE/14 (2014) o princípio de funcionamento do SMA segue os seguintes eventos:

Inicialmente o SMA se encontra no modo de segurança. Nesta condição a linha de fogo do pirotécnico está em curto circuito;

Após a decolagem, com a ação da aceleração, o subconjunto “contato móvel” se desloca para baixo, comprimindo a mola, Figura 1a. Com este deslocamento é retirado o curto circuito da linha do pirotécnico;

Atingindo o final do seu curso, o conjunto de contato móvel liga a chave elétrica;

Com o aumento da aceleração decorrente do processo de decolagem, o contato móvel se desloca até o final do curso, ocorrendo o travamento por um pino, permitindo a continuidade do sinal elétrico para o pirotécnico (Figura 1b);



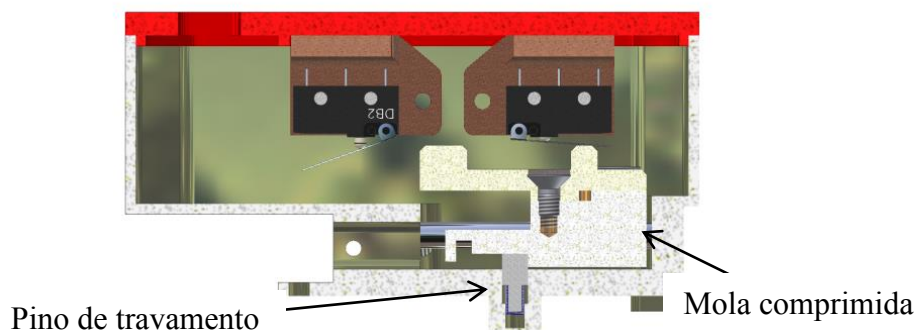


Figura 1b. Posição após a decolagem

## 2. Metodologia

### Formulação Matemática para o SMA

A Figura 2 mostra internamente o sistema inercial. Com base neste projeto, a representação matemática do SMA pode ser definida conforme indica a Figura 3. Nesta figura é possível identificar os parâmetros de projeto, quais sejam: (i) vetor aceleração do veículo; (ii) massa do Sistema Massa-Mola; (iii) a constante de mola  $k$  e (iv) o pino de travamento.

Este modelo é resolvido em 4 (quatro) fases, quais sejam: (1) deslocamento sob ação de mola; (2) contato entre a massa e a base do SMA; (3) impacto; e (4) travamento da massa por um pino de segurança.



Figura 2. Detalhe do Sistema Inercial



## Hipóteses

O modelo matemático do SMA é um modelo de ordem reduzida. Os componentes do SMA que afetam o cumprimento do requisito de aceleração são a massa e mola;

As acelerações impostas pelo veículo são praticamente constantes em toda a sua seção transversal. Neste contexto, não são considerados os efeitos 2D ou 3D que poderiam ocorrer durante o voo em virtude da presença de duas molas. Portanto, toda a análise é conduzida em um contexto unidimensional. O tempo de duração do impacto é definido em função dos resultados de deformação que sofre a base e massa do SMA. Com base neste valor, calcula-se a força de cisalhamento de requisito para o dimensionamento do pino de travamento.

## Sistema Massa-Mola Equivalente

O SMA é constituído por uma massa e duas molas e estará submetida à aceleração do veículo e ao peso da massa inercial, conforme indica a Figura 3a. A variável  $a_v$  representa a aceleração do veículo. As forças  $F_{k_1}$  e  $F_{k_2}$  representam as forças elásticas devido a atuação da mola. Finalmente,  $W$  representa o peso da massa.

O modelo reduzido, Figura 3b, utiliza a plataforma (veículo) fixa e a constante elástica equivalente, calculada em função das constantes exibidas na Figura 3a. O uso do movimento relativo é justificado pela facilidade de implementação e interpretação dos dados. Na Figura 3b está exibida também a linha de referência. Esta linha delimita a distância entre a massa e plataforma em que não existe deflexão de mola. Trata-se da condição de equilíbrio do sistema massa-mola.

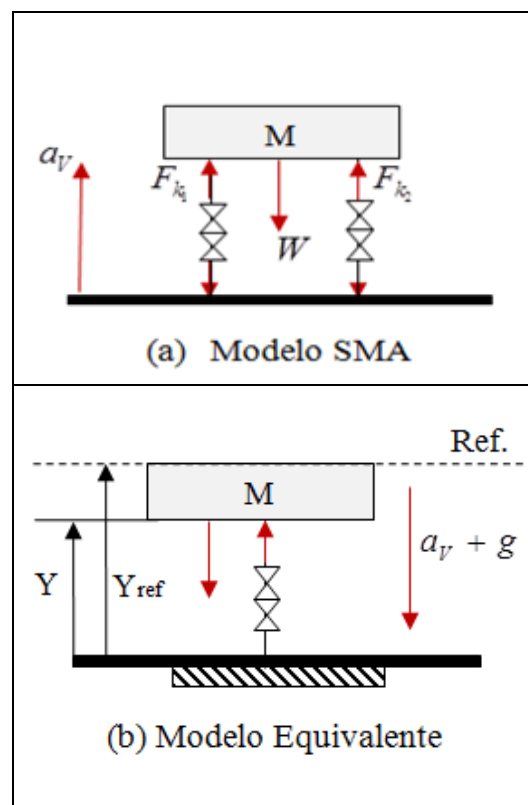


Figura 3. Modelo Matemático para o SMA



### Modelo Matemático para as Fases (1 e 2): Sistema Massa-Mola

As equações que regem o SMA na fase (1) são definidas com base na Figura 3b. O sistema de equações diferenciais tem como variáveis dependentes  $Y$  e  $V_R$ , a posição da massa e a velocidade relativa, respectivamente, em (1). A variável independente é o tempo e está representada por  $t$ .

$$\begin{cases} \frac{DY}{DT} = V_R \\ \frac{DV_R}{DT} = F_K + F_G \end{cases} \quad (1)$$

As forças que atuam no sistema são representadas pela força de inércia  $F_G$  e força elástica de mola  $F_K$ . Estas forças são modeladas conforme indica (2). É importante mencionar que a constante de mola representada em (2) se refere à constante de mola equivalente ao sistema em paralelo que representa o SMA real, Figura 3.

$$\begin{cases} F_G = -m(g + a_v t) \\ F_K = k(Y + Y_{Ref}) \end{cases} \quad (2)$$

### Modelo Matemático da Fase (3): Impacto

O modelo matemático de impacto é baseado em colisões elásticas unidimensionais. Neste modelo, a energia cinética total também se conserva e a velocidade relativa deve satisfazer a condição, NUSSENZVEIG (2016):

$$V_{1i} - V_{2i} > 0 \quad (3)$$

Ou seja, a velocidade da massa 1 (representativa do foguete) no instante imediatamente anterior ao impacto ( $V_{1i}$ ) deve ser maior que a velocidade da massa 2 (massa do SMA) antes de ocorrer o impacto. Parte-se deste pressuposto no desenvolvimento do modelo matemático de impacto. Segundo NUSSENZVEIG (2016), a conservação da energia cinética ( $T_k$ ,  $k = i$ : início do impacto e  $f$ : depois do impacto) na colisão é dada por:

$$T_i = \frac{p_{1i}^2}{2m_1} + \frac{p_{2i}^2}{2m_2} = \frac{p_{1f}^2}{2m_1} + \frac{p_{2f}^2}{2m_2} = T_f \quad (4)$$



Sendo que  $p_{jk}$  representa a quantidade de movimento da massa  $m_j$  ( $j= 1,2$ ) no instante  $k$  ( $i$ : início do impacto e  $f$ : depois do impacto). Observe também que, o momento total no sistema, também se conserva, ou seja:

$$P_i = p_{1i} + p_{2i} = p_{1f} + p_{2f} = P_f \quad (5)$$

Conhecendo-se a condição inicial  $p_{ji}$  e as massas envolvidas no processo de colisão, pode-se calcular as condições de impacto com base no sistema formado por (4) e (5). Resolvendo-se o sistema, obtém-se (NUSSENZVEIG, 2016, pg. 215):

$$\begin{cases} V_{1f} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} V_{1i} + \frac{2m_2}{m_1 + m_2} V_{2i} \\ V_{2f} = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} V_{1i} + \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} V_{2i} \end{cases} \quad (6)$$

É importante mencionar que as velocidades  $V_{ji}$  ( $j= 1,2$ ;  $i= i,f$ ) são grandezas escalares cujo módulo é dado por (6). O caso estudo SMA é uma condição particular de (6), qual seja, trata-se do caso em que  $m_1 \gg m_2$ , sendo  $m_1$  a massa do veículo e  $m_2$  a massa do SMA. Para este caso, as equações de (6) podem ser simplificadas conforme segue:

$$\begin{cases} V_{1f} = V_{1i} \\ V_{2f} = 2V_{1i} \end{cases} \quad (7)$$

As forças de contato que atuam durante uma colisão são forças extremamente intensas, que atuam durante um intervalo de tempo extremamente curto, denominado de “tempo de colisão”, ou “tempo de contato”. O efeito de tal força impulsiva pode ser estimada por intermédio do impulso que produz. Considere o exemplo de uma colisão frontal. Para este caso, as equações de movimento são dadas por:

$$\frac{dP_1}{dt} = F_{1(2)} = -F_{2(1)} = -\frac{dP_2}{dt} \quad (8)$$



Sendo  $F_{i(j)}$  as forças de contato que obedecem a 3ª lei de Newton. A força  $F_{i(j)}$  representa a força sobre o corpo  $i$  devido ao corpo  $j$ . Estas forças atuam durante o intervalo de tempo  $\Delta t = t_f - t_i$ . Integrando ambos os termos de (8), tem-se, para uma força qualquer:

$$\int_{t_i}^{t_f} F dt = \Delta P \quad (9)$$

Ou seja, o impulso de uma força aplicada a um corpo durante o intervalo  $\Delta t$  é igual a variação da quantidade de movimento do referido corpo durante esse intervalo. A duração da colisão pode ser estimada com base na definição apresentada em NUSSENZVEIG (2016, pg. 213):

$$\Delta t = \frac{\bar{F}}{\Delta P} \quad (10)$$

Sendo  $\bar{F}$  a força de contato média exercida pelo corpo 1 sobre o corpo 2 durante a colisão. Neste contexto, a condição de colisão é caracterizada pelo tempo de impacto, em (10), e velocidade de impacto, em (7).

### **3. Resultados e Discussão**

#### **Constante Elástica e Aceleração do Veículo**

Conforme explicado anteriormente, o modelo matemático que representa o SMA apresenta apenas uma mola com constante elástica equivalente  $k_{Eq}$ . A estimativa deste parâmetro é realizada a partir de ensaios de aceleração, realizados por meio de Centrífugas. Este trabalho teve o apoio do laboratório de aceleração do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). Este é composto por uma Centrífuga com controle eletrônico e transmissão Wireless de dados, com capacidade de acelerar corpos de ensaio de até 500 kg, e aceleração máxima de até 90 g's para massas de até 15 kg.

O ensaio de aceleração tem como objetivo principal verificar a capacidade do SMA desempenhar corretamente as suas funções e resistir estruturalmente, quando submetida às acelerações de voo. Ressalta-se que os ensaios realizados em centrífugas oferecem condições mais restritivas de avaliação do SMA desde que as acelerações impostas ao sensor são “quase estáticas”. Ou seja, uma vez qualificado na centrífuga, existe grande confiabilidade de o SMA cumprir o requisito de projeto (5 g's) em voo real.

O valor mínimo de aceleração que o sensor SMA deve funcionar é definido como requisito de missão. Este valor foi adotado com base no perfil de acelerações de decolagem verificadas nos veículos projetados no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), Figura 4.

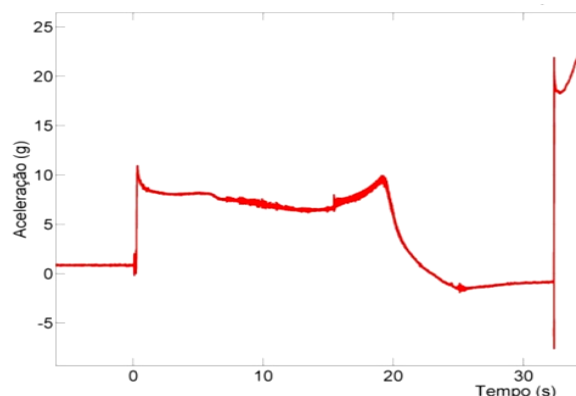


Figura 4 – Exemplo de Aceleração Nominal de Veículo Lançador

#### 4. Conclusão

Este trabalho apresentou o conceito de projeto de um Sensor Mecânico Acelerométrico e uma metodologia que pode ser utilizada em seu dimensionamento. Trata-se de mais um dispositivo de segurança que deve ser acrescentado na linha de fogo do veículo. De fato, este dispositivo é projetado para salvar vidas.

Não foi avaliada as incertezas envolvidas nos parâmetros de dimensionamento, quais sejam, aceleração nominal do veículo, constante elástica da mola e massa do sistema inercial do SMA. A principal ênfase deste artigo é apresentar o conceito de projeto e o modelo matemático que pode ser utilizado para o dimensionamento do SMA para diferentes acelerações de veículo. Não obstante, as dispersões envolvidas no aspecto construtivo da constante elástica da mola são muito pequenas. Neste contexto, o processo de qualificação do SMA é perfeitamente factível, mesmo para uma confiabilidade da ordem de 99,9% e confiança de 95 %.

Trata-se de um dispositivo de segurança para veículos suborbitais e foi desenvolvida em sua totalidade pelo IAE para atender a segurança no sítio de lançamento dos veículos suborbitais. Os voos demonstraram com sucesso que todos os ensaios realizados para qualificação foram atendidos conforme os requisitos de projeto. Foram realizados 154 ensaios com sucesso, além de embarcado em três voos, também com resultados positivos. O Instituto de Fomento e Coordenação Industrial (IFI) está em processo para emissão da Certificação oficial do SMA. É importante salientar que os próximos voos do SMA nos veículos suborbitais serão utilizados na condição real, ou seja, de produto final.

#### Referências

- 002/SESP-PE/14 – Plano Preliminar de Projeto do Sensor Mecânico Acelerométrico (2014)
- 012/SESP-PE/14 – Especificação Técnica do Sensor Mecânico Acelerométrico (2014)