

## **LANÇADOR HIPERSÔNICO DE MASSA: UM DISPOSITIVO UTILIZADO PARA ACELERAR MODELOS HIPERSÔNICOS**

**Marcos de Melo Borges, mborges@ieav.cta.br<sup>1</sup>**  
**Marco Antonio Sala Minucci, sala@ieav.cta.br<sup>1</sup>**  
**Oseas Domingos de Abreu, oseas@ieav.cta.br<sup>1</sup>**  
**Paulo Gilberto de Paula Toro, toro@ieav.cta.br<sup>1</sup>**  
**Alberto Monteiro dos Santos, alberto@ieav.cta.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Estudos Avançados (IEAv) – Rod. dos Tamoios, km 5,5 – Putim – CEP 12.228-001 – São José dos Campos – SP – Brasil – Tel. +55 (12) 3947-5360 – Fax +55 (12) 3944-1177

**Resumo:** *Os avanços na tecnologia aeroespacial tornaram imprescindíveis ensaios em laboratórios de veículos hipersônicos. Em consequência houve a necessidade de desenvolver dispositivos capazes de gerar tais condições. Um dos métodos utilizados para simular essas condições é o Lançador Hipersônico de Massa (LHM), que vem merecendo considerável interesse, tanto no campo experimental quanto no teórico. Este trabalho consiste no estudo experimental deste dispositivo, que é utilizado no Instituto de Estudos Avançados (IEAv). O Lançador Hipersônico de Massa é dividido em duas partes, a seção de compressão e a seção de aceleração. A seção de compressão é composta de um compressor a pistão livre, do qual são descritos resumidamente neste trabalho detalhes técnicos e operacionais de cada componente do sistema. Os parâmetros: massa do pistão, comprimento do tubo de compressão, pressão no tanque de alta pressão e pressão no interior do tubo de compressão, os quais são analisados experimentalmente. Na seção de aceleração são descritos resumidamente detalhes técnicos e operacionais de cada componente do sistema. É descrito o conceito de velocidade de detonação de Chapman Jouguet da mistura energética, verificando sua influência na aceleração do modelo através dos regimes de propulsão. São apresentados dados experimentais da velocidade do modelo antes e após penetrar no estágio da seção de aceleração que contém em seu interior uma mistura propelente.*

**Palavras-chave:** *Hipersônica, Compressor a Pistão Livre, Ram Accelerator, Two Stage Light Gas Gun.*

### **1. INTRODUÇÃO**

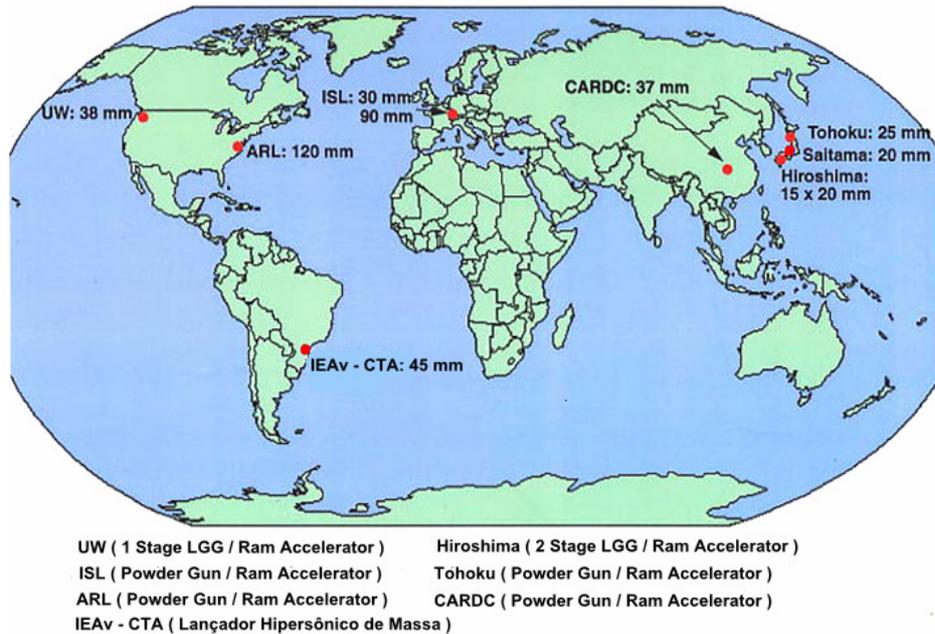
Os pioneiros a desenvolver a tecnologia do “Ram-accelerator” para acelerar modelos a velocidades hipersônicas foram os professores da Universidade de Washington Abe Hertzberg, Adam Bruckner e David Bogdanoff (1986), onde conseguiram atingir velocidades próximas a 2700 m/s. Motivados pelo sucesso alcançado pela Universidade de Washington, UW, o Instituto Francês French-German Research Institute of Saint – Louis (ISL), em 1992, conseguiu atingir velocidades próximas a 2000 m/s (G iraud et. al., 1992). Alguns meses depois o laboratório American Army Research Laboratory (ARL) em cooperação com a UW atinge a velocidade de 1600 m/s (Kruczynski, 1992). Alguns anos depois, duas universidades do Japão, a Hiroshima University (Chang et. al., 1995) e a Tohoku University (Sasoh et al., 1996), também conseguiram sucesso e, uma outra universidade japonesa, a Saitama University, iniciou pesquisas nessa área. A China, com o centro de pesquisas Aerodynamics Research and Development (CARD), em 1988, conseguiu alcançar a velocidade de 2000 m/s (Liu et. al., 1988).

A contribuição brasileira para o desenvolvimento das pesquisas nesta área teve início nos primórdios dos anos 90 com o projeto SUPERS (Salvador et. al., 2000). Além disso, o IEAv, no final da mesma década, com Minucci (Morales et. al., 1997) iniciam seus trabalhos, desenvolvendo programas computacionais, bem como a montagem de um túnel de choque para a realização de experimentos. Mais recentemente, uma dissertação de mestrado intitulada “Estudo Experimental do Lançador Hipersônico de Massa” ( Borges, 2009).

Com o avanço na tecnologia aeroespacial as velocidades de interesse para veículos hipersônicos aumentaram cada vez mais, alcançando velocidades próximas a 8000 m/s, velocidade próxima à de satelitização.

Para conseguir acelerar modelos a velocidades hipersônicas utilizando a técnica do “Ram Accelerator”, é preciso utilizar dois dispositivos, um para lançar ou injetar os modelos a velocidades supersônicas no interior de um tubo contendo uma mistura energética (propelentes em fase gasosa) e o outro dispositivo que irá acelerar esses modelos a velocidades hipersônicas através de processo de combustão/detonação (“Ram Accelerator”). Os dispositivos comumente utilizados para lançar o modelo são: Powder Gun; One Stage Light Gas Gun (One Stage LGG); Two Stage

Light Gas Gun (Two Stage LGG). No Instituto de Estudos Avançados (IEAv) optou-se por utilizar o Two Stage LGG associado a um Ram Accelerator. Esse conjunto foi denominado Lançador Hipersônico de Massa. A Fig. (1.1) apresenta os locais no mundo onde essa tecnologia é desenvolvida, mostrando seus respectivos dispositivos de aceleração.



**Figura 1.1 Two Stage LGG/Ram Accelerator - Lançador Hipersônico de Massa ao redor do mundo**  
 Fonte: [www.aa.washington.edu/AERP/ramac](http://www.aa.washington.edu/AERP/ramac).

O LHM é um dispositivo essencial para quem deseja investigar escoamentos hipersônicos e ele é estudado praticamente por várias potências mundiais. Este dispositivo tem inúmeras aplicações, dentre estas podemos citar que este sistema permite: estudar escoamentos hipersônicos, testar parâmetros de impactos em velocidades hipersônicas, lançar um satélite em órbita e lançar uma carga útil ao espaço, além de ter aplicações aeroespaciais.

As pesquisas no IEAv com o LHM começaram no final dos anos 90, onde Minucci (Morales et. al., 1997) contava com uma pequena equipe de colaboradores e um espaço laboratorial bastante reduzido. O LHM, que no passado estava disposto numa configuração em U por falta de espaço, com as novas instalações seu comprimento foi aumentado e sua configuração foi linearizada, sendo construído em cima de uma base inercial e com isso melhorando a sua eficiência e segurança para as pessoas envolvidas neste trabalho. A Fig. (1.2) ilustra a duas fases do LHM, cuja infraestrutura é suficiente para gerar trabalhos científicos.

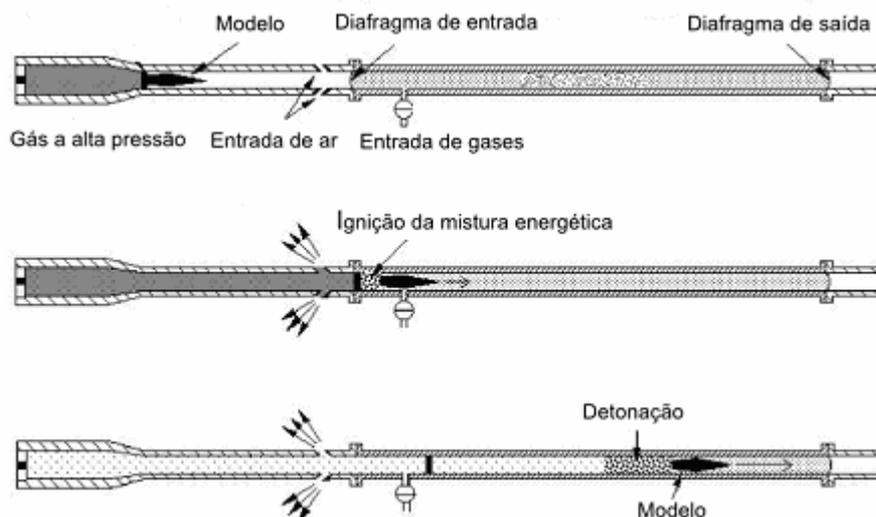


**Figura 1.2 Fases do LHM: (a) no passado, (b) atualmente.**

## 2. LANÇADOR HIPERSÔNICO DE MASSA

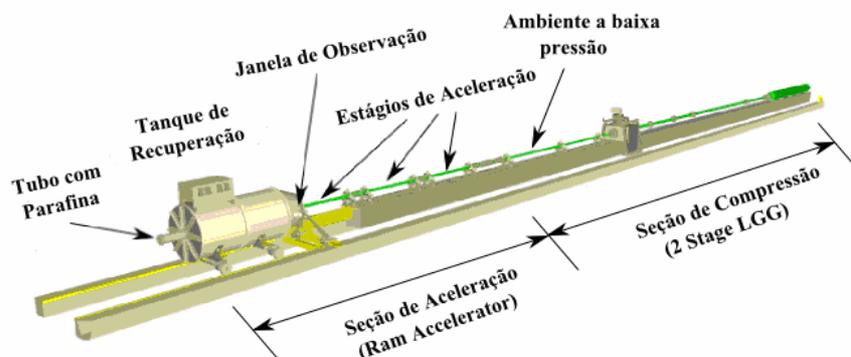
Os princípios gerais de funcionamento do LHM baseiam-se em sua estrutura que é constituída, principalmente, por um tubo longo, Fig. (2.1), pressurizado com uma mistura energética composta por combustível, oxidante e diluente.

Um modelo é lançado no interior deste tubo com velocidade supersônica empurrado pela expansão de um gás a alta pressão. Esta pressão e as altas temperaturas em seu interior são obtidas através de um compressor a pistão livre. A onda de choque formada no nariz do modelo é refletida nas paredes do tubo, concentra-se na sua traseira, produzindo um aumento de temperatura suficiente para detonar a mistura energética, criando uma onda de detonação que empurra o modelo e aumenta a sua aceleração (Bruckner, 1997). Os gases mais utilizados neste processo são: o metano como combustível, o oxigênio como oxidante e o nitrogênio como diluente.



**Figura 2.1 Funcionamento do Lançador Hipersônico de Massa**  
 Fonte: [www.aa.washington.edu/AERP/ramac](http://www.aa.washington.edu/AERP/ramac).

O LHM pode ser dividido em duas seções principais: a seção de compressão (2 Stage LGG) e a seção de aceleração (Ram Accelerator) como vistos na Fig. (2.2), A seção de compressão é composta por um compressor a pistão livre (CPL) e um estágio de aceleração em ambiente a baixa pressão.



**Figura 2.2 Vista geral do Lançador Hipersônico de Massa.**

A seção de aceleração é composta de vários estágios de aceleração cada um deles com uma mistura energética diferente de gases e um tanque de recuperação. O tanque de recuperação é utilizado para desacelerar o movimento do modelo e permite também que sejam efetuadas algumas medições através de técnicas não intrusivas. A medida de dados experimentais como, por exemplo, a velocidade final do modelo, pode ser feita através de janelas transparentes nas paredes do tanque. O tanque de recuperação possui uma área controlada por pressão cujo controle é importante para simular a altitude de vôo do modelo. Para a desaceleração do modelo é utilizado um tubo contendo parafina dentro do tanque.

### 2.1. Seção de Compressão

A função da seção de compressão é acelerar o modelo, centrado na seção de aceleração, a velocidades supersônicas, pela expansão do gás a alta pressão. As altas temperaturas e pressões nessa seção são obtidas através de um compressor a pistão livre, dispositivo que foi inicialmente proposto por (Stalker, 1961), e inclusive no IEAv por (Moreira e Minucci, 1994; Borges et. al., 2008).

No compressor a pistão livre a compressão é analisada como sendo um processo adiabático, onde as velocidades envolvidas estão abaixo da velocidade do som no meio. O funcionamento do compressor é simples: ao se abrir, a válvula de disparo provoca uma diferença de pressão entre os lados do pistão, fazendo com que ele acelere no interior do tubo de compressão até o momento em que as pressões sejam equalizadas. A partir deste momento o pistão é desacelerado, mas ainda possui energia cinética suficiente para comprimir o gás no interior do tubo de compressão até temperaturas e pressões maiores que as do gás no tanque de alta pressão. A Fig. (2.1.1) mostra o compressor a pistão livre com todos os seus componentes.

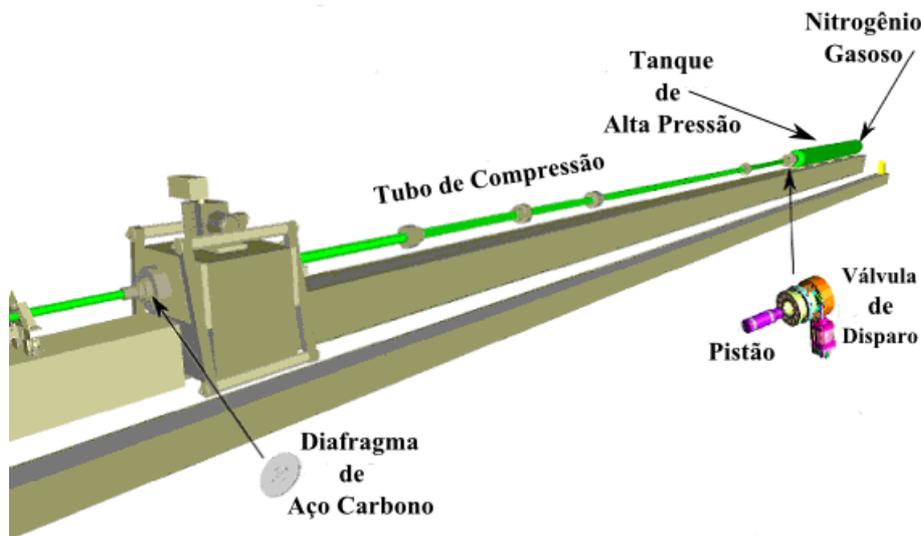


Figura 2.1.1 Vista geral do compressor a pistão livre do IEAv.

O tanque de alta pressão desempenha um papel importante, pois a energia necessária para a compressão e o aquecimento do gás presente no interior do tubo de compressão é dele extraída. O reservatório de alta pressão tem uma capacidade de armazenamento de  $0,5 \text{ m}^3$ , sendo pressurizado com nitrogênio gasoso, fornecido por uma bomba criogênica que trabalha acoplada a um tanque com capacidade de armazenamento de 500 litros de nitrogênio líquido.

Convencionalmente a separação do tanque de alta pressão do tubo de compressão é feita por diafragmas, e o método de disparo consiste em algum dispositivo utilizado para romper este diafragma. No caso do LHM o diafragma foi substituído por uma válvula de disparo. A função da válvula de disparo é liberar o gás a alta pressão para impulsionar o pistão no interior do tubo de compressão com energia suficiente para comprimir o gás de compressão alcançando temperaturas e pressões elevadas.

O pistão tem a função de comprimir o gás do tubo de compressão, impedindo a sua fuga no sentido do tanque de alta pressão, a vedação do gás de compressão é feita através dos anéis de nylon, que apresentam ótima eficiência para evitar vazamentos, apesar de ocasionarem pequenos atritos. No compressor a pistão livre do IEAv, o pistão é confeccionado em aço carbono 1020 pesando aproximadamente 13 kg.

Para conseguir altas temperaturas e altas pressões é preciso que o tubo de compressão seja longo, por esse motivo, essa seção normalmente é uma união de tubos menores e brunidos internamente. O tubo de compressão do LHM mede 15 metros, divididos entre cinco tubos de comprimentos diferentes. Os gases mais utilizados em tubos de compressão são Hélio e Hidrogênio, que possuem baixo peso molecular, o que retarda a formação de efeitos de compressibilidade à frente do pistão.

O diafragma é utilizado no compressor a pistão livre para separar inicialmente o gás a ser comprimido pelo pistão e o ambiente a baixa pressão existente na região de aceleração onde se encontra o modelo.

No Lançador Hipersônico de Massa os diafragmas são confeccionados em aço carbono 1020 e possuem concentradores de tensão que são os rasgos em forma de X presentes em um dos lados, onde a função do rasgo é favorecer a ruptura do diafragma.

Os diafragmas são posicionados no final do tubo de compressão, onde se atinge as maiores temperaturas e pressões e a repetibilidade de abertura é um fator limitante para um bom funcionamento de um compressor a pistão livre. O mecanismo de ruptura do diafragma tem uma duração da ordem de milissegundos (ms). Ao sofrer uma carga de pressão inicia-se um processo de deformação do diafragma, como visto na Fig. (2.1.2), que vai evoluindo até que nas regiões reduzidas pelos concentradores de tensão fiquem frágeis e conseqüentemente ocorra a ruptura.

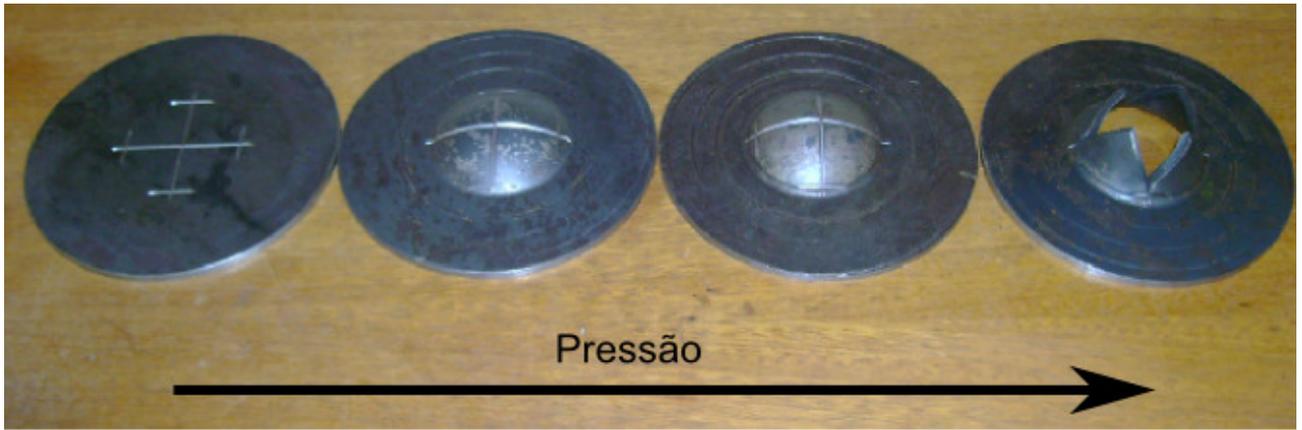


Figura 2.1.2 Evolução da deformação do diafragma até a ruptura.

## 2.2. Seção de Aceleração

É a seção que acelera o modelo a velocidade hipersônica. Com o disparo do compressor a pistão livre, o modelo que no início permanecia em repouso após um intervalo de alguns milissegundos, é lançado no interior do tubo a velocidade supersônica, sendo injetado numa região contendo uma mistura energética, composta por um combustível, um oxidante e um diluente. A onda de choque formada no nariz do modelo é refletida nas paredes do tubo concentrando-se na sua traseira e produz um aumento de temperatura suficiente para detonar a mistura energética criando uma onda de detonação que gera um empuxo que empurra o modelo, por fim aumentando a sua aceleração.

A modelagem analítica utiliza um volume de controle em uma dimensão e assume um escoamento quasi-estável (Bruckner et. al., 1991). A Fig. (2.2.1) mostra alguns dos parâmetros do modelamento. O empuxo,  $F$ , e o coeficiente de empuxo,  $\tau$ , podem ser obtidos através da Eq. (1), assumindo escoamento de gás ideal e caloricamente perfeito.

Sendo  $F$  o empuxo aplicado ao modelo,  $P_1$  a pressão total da mistura energética,  $M_1$  o numero de Mach do escoamento entrando no volume de controle,  $M_2$  o numero de Mach do escoamento saindo do volume de controle,

$Q = \frac{\Delta q}{cp_1 \cdot T_1}$ , é o calor liberado pela reação de combustão,  $\Delta q$  é o calor da combustão,  $cp_1$  e  $T_1$  são o calor específico e a temperatura da mistura energética a pressão constante,  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  são as razões entre os calores específicos (cp/cv) para o tubo de aceleração.

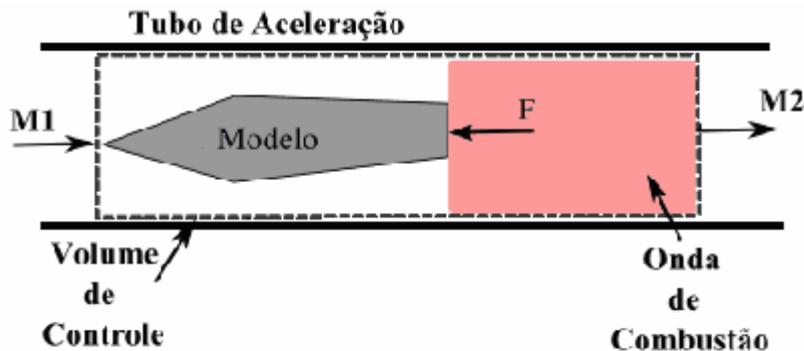


Figura 2.2.1 Volume de controle ao redor do modelo e onda de detonação.

$$\tau = \frac{F}{P_1 \cdot A} = \frac{\gamma_1 \cdot M_1}{\gamma_2 \cdot M_2} \cdot (1 + \gamma_2 \cdot M_2^2) \cdot \left[ \left( \frac{\gamma_2 - 1}{\gamma_1 - 1} \right) \cdot \left( \frac{1 + \frac{(\gamma_1 - 1)}{2} + Q}{1 + \frac{(\gamma_2 - 1) \cdot M_2^2}{2}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} - (1 + \gamma_1 \cdot M_1^2) \quad (1)$$

A velocidade de detonação de Chapman-Jouguet da mistura ( $V_{cj}$ ) é a velocidade da onda de detonação gerada pela reação de combustão da mistura energética. Durante a sua propagação ela apresenta regiões de mudanças nas

propriedades do escoamento. Uma dessas mudanças é o aumento significativo da pressão que, conseqüentemente, irá aumentar o empuxo aplicado ao modelo, incrementando a sua velocidade. A Fig. (2.2.2) mostra resultados experimentais da dependência do coeficiente de empuxo,  $\tau$ , com a razão das velocidades de injeção do modelo,  $V_i$  e  $V_{c_j}$  (Hertzberg et. al., 1991).

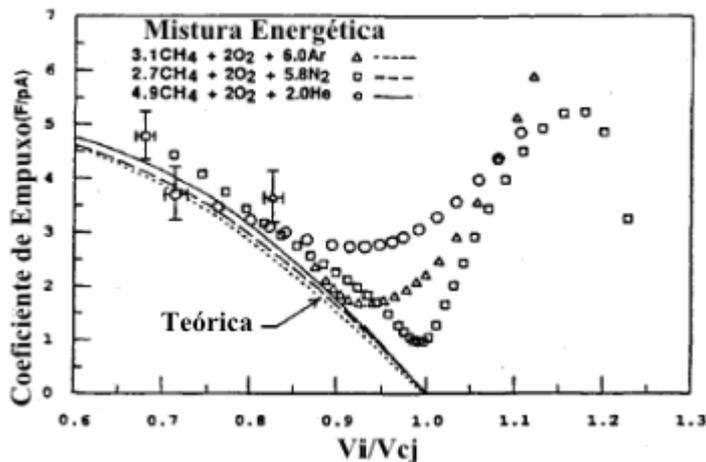


Figura 2.2.2 A dependência entre o  $\tau$  e a razão  $V_i$  e a  $V_{c_j}$

Fonte (HERTZBERG et. al., 1991).

Foram utilizados três misturas energéticas, cada uma com um diferente diluente. Através do gráfico é observado que:

- A razão  $V_i/V_{c_j}$  interfere no coeficiente de empuxo,  $\tau$ , conseqüentemente variando a aceleração do modelo;
- As misturas apresentam comportamentos diferentes;
- No modelamento teórico quando  $V_i = V_{c_j} \rightarrow \tau = 0$ , não há aceleração no modelo;
- $\tau$  aumenta quando  $V_i > V_{c_j}$  é a condição de trabalho favorável, para todas as misturas.

Os valores de  $V_{c_j}$  são calculados onde os resultados mais precisos podem ser obtidos usando uma formulação que considera a variação das propriedades entre reagentes e produtos e com a dissociação dos produtos nas altas temperaturas, alcançadas após a onda de detonação. Outra maneira para obter resultados com valores próximos aos medidos experimentalmente é utilizar os programas como Gaseq, Teqworks.

Existem três regimes de propulsão que são o subdetonativo, transdetonativo e superdetonativo. No subdetonativo a  $V_i$  é menor que  $V_{c_j}$  ( $V_i < 0,9V_{c_j}$ ). Para algumas misturas energéticas o coeficiente de empuxo nessa faixa tende a aumentar.

O regime transdetonativo é uma transição entre o regime subdetonativo e o regime superdetonativo, onde  $0,9 V_{c_j} < V_i < 1,1 V_{c_j}$  e as ondas de detonação estão mais próximas do modelo com uma parcela dessas ondas atuando em sua cauda. No regime superdetonativo  $V_i$  maior que  $V_{c_j}$  ( $V_i > 1,1V_{c_j}$ ), onde as ondas de detonação surgem sobre o corpo do modelo e a parede do tubo da seção aceleração.

A máxima relação que o regime superdetonativo poderá alcançar será  $V_i = 2 V_{c_j}$ . Num exemplo para uma mistura contendo hidrogênio que possua  $V_{c_j}$  entre 3000 e 4000m/s, a velocidade do modelo poderá alcançar valores entre 7000 e 9000m/s.

O sabot e o modelo, juntamente com o diafragma de aço carbono, como visto na Fig. (2.2.3), desempenham um papel muito importante no LHM. A combinação dos três elementos é primordial para um ensaio bem sucedido.

O sabot é o componente que primeiro sofre a ação das altas pressões e temperaturas do gás de compressão emanado pela ruptura do diafragma de aço carbono. Ele dissipa uma parcela dessa energia que poderia danificar o modelo e ao mesmo tempo aumenta a área de contato do modelo com escoamento produzido pela seção de compressão. O sabot é confeccionado em alumínio aeronáutico e possui um formato aerodinâmico menos favorável do que o modelo. Por esse motivo atinge velocidades menores, fazendo que ele seja desacelerado dentro do tubo de aceleração ao encontrar as ondas de detonação da mistura energética em sentido contrário ao seu movimento. No regime subdetonativo ele ignita a mistura energética.

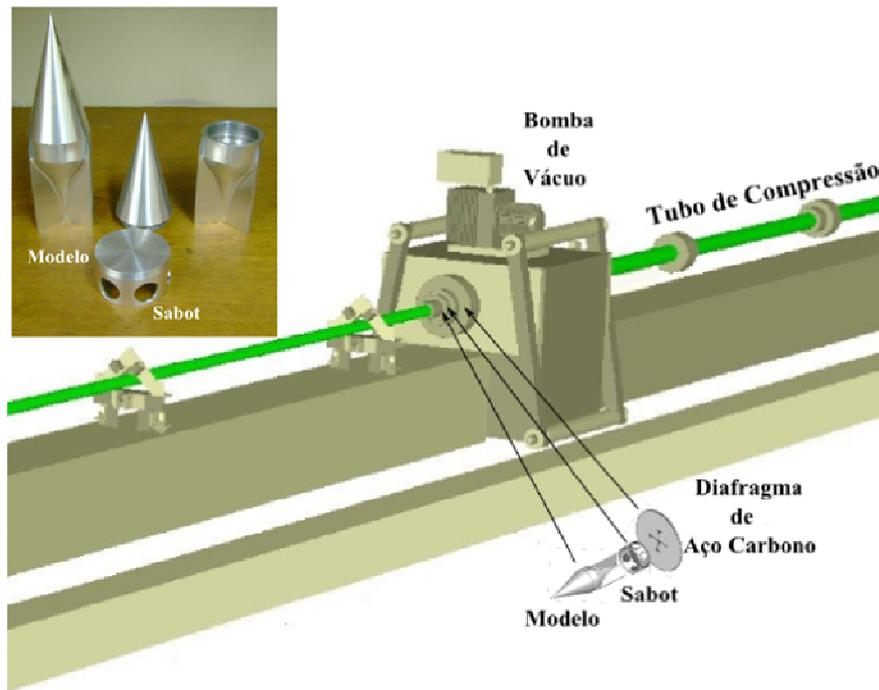


Figura 2.2.3 Disposição do modelo, sabot e diafragma de aço carbono no LHM.

O sabot é o componente que primeiro sofre a ação das altas pressões e temperaturas do gás de compressão emanado pela ruptura do diafragma de aço carbono. Ele dissipa uma parcela dessa energia que poderia danificar o modelo e ao mesmo tempo aumenta a área de contato do modelo com escoamento produzido pela seção de compressão. O sabot é confeccionado em alumínio aeronáutico e possui um formato aerodinâmico menos favorável do que o modelo. Por esse motivo atinge velocidades menores, fazendo que ele seja desacelerado dentro do tubo de aceleração ao encontrar as ondas de detonação da mistura energética em sentido contrário ao seu movimento. No regime subdetonativo ele ignita a mistura energética.

O modelo é o componente que é acelerado a velocidades hipersônicas, possui geometria aerodinâmica que o mantém justamente posicionado no centro do tubo da seção de aceleração. Deve possuir resistência material suficiente para suportar as altas temperaturas geradas pelas ondas de detonação. O modelo utilizado no IEAV pesa 0,13 kg e possui 3 aletas, sendo confeccionado em alumínio aeronáutico e produzido em duas partes. Alguns parâmetros são importantes para o projeto de um modelo, sendo eles o ângulo do cone ao nariz, o diâmetro da garganta, o número de aletas e os materiais para sua confecção.

Com a ruptura do diafragma de aço carbono o modelo é lançado no interior da seção de aceleração do tubo e viaja em um ambiente a baixa pressão numa distância de 6 metros até atingir a velocidade supersônica próxima à saída de exaustão, onde os gases vindos da seção de compressão são liberados para a atmosfera. À frente da saída de exaustão o modelo encontra uma seção contendo uma mistura energética. Ao penetrar nesta seção ocorre a combustão da mistura energética gerando ondas de detonação que aceleram o modelo. Na sequência, o modelo adentra a outro estágio contendo uma mistura mais energética que a primeira, com velocidade de Chapman-Jouguet maior. Para se incrementar mais ainda a velocidade do modelo, pode-se colocar vários estágios na sequência com misturas energéticas crescentes (Bruckner et. al., 1991).

O Ram Accelerator do LHM possui três estágios ou seções de aceleração. As seções são separadas por diafragmas de alumínio que fazem a vedação impedindo a fuga dos gases gerados pelas misturas energéticas.

### 3. RESULTADOS E COMENTÁRIOS FINAIS

São obtidos resultados experimentais e numéricos no Compressor a Pistão Livre (CPL) do LHM, empregando-se um tampão no local do diafragma de aço carbono para que ele não se rompa, e considerando que o pistão tenha uma massa de 13 kg, uma pressão inicial de nitrogênio gasoso no tanque de alta pressão de 12 MPa e que a pressão de gás hélio ( $P_{tc}^{(0)}$ ) no tubo de compressão varie de (0,3; 0,4 e 0,5) MPa.

De acordo com a Fig. (2.2.4), observam-se valores para a máxima pressão no final do tubo de compressão ( $P_{tc}$ ), para diversos valores de pressão inicial no tubo de compressão ( $P_{tc}^{(0)}$ ). As Figuras (2.2.4-a, b e c) são resultados obtidos experimentalmente, enquanto a Fig. (2.2.4-d) é obtida através de uma simulação numérica (software MATHCAD).

A comparação dos resultados experimentais e numéricos mostrou uma concordância entre os valores de pico de pressão e também dos respectivos instantes de ocorrência, apresentando um erro relativo inferior a 12%, em todos os casos. Isso demonstra que a simulação pode ser uma ferramenta útil, tanto no auxílio a experimentos, quanto para a otimização de características do CPL.

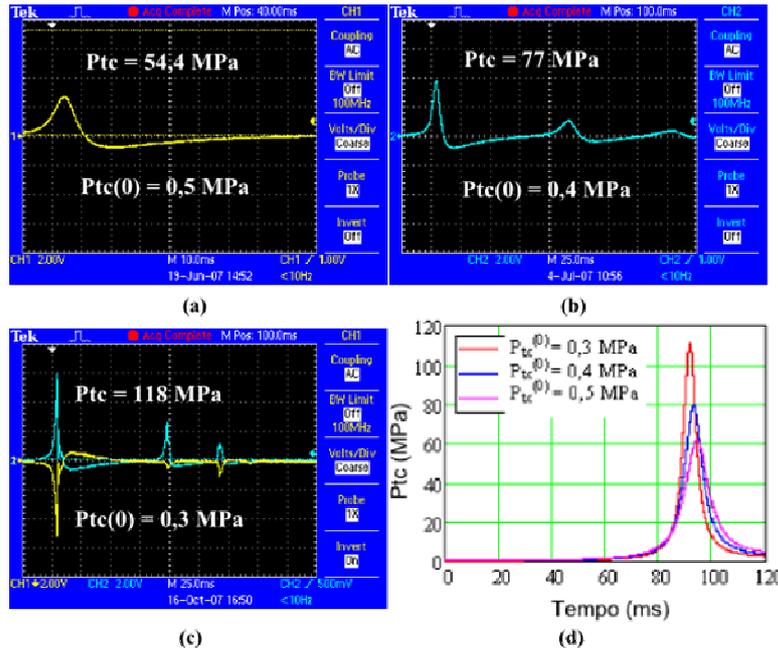


Figura 2.2.4 Comparação entre os resultados experimentais (a, b e c) e a simulação numérica (d).

Os dados experimentais visualizados na Fig. (2.2.5) foram obtidos no CPL, utilizando uma pressão no interior do tubo de compressão de 0,33 MPa e dois tipos de diafragmas de aço carbono: (a) 0,0042 m de espessura e 0,0007 m de profundidade de rasgo, (b) 0,0042 m de espessura e 0,0005 m de profundidade de rasgo. O objetivo destes ensaios é a caracterização dos diafragmas de maneira definitiva.

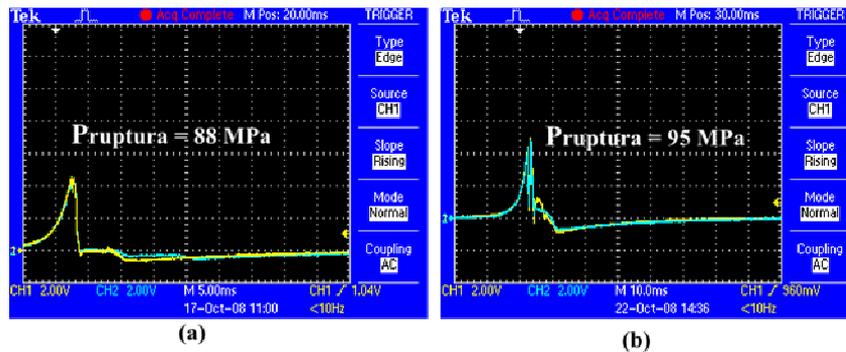


Figura 2.2.5 Pressão de ruptura para dois tipos de diafragmas de aço carbono.

Os dados experimentais mostrados na Fig. (2.2.6) foram obtidos utilizando uma pressão no interior do tubo de compressão de 0,33 MPa e um diafragma de 0,0042 m de espessura e 0,0005 m de profundidade de rasgo. Para este ensaio foram utilizados dois osciloscópios: o número 1 para medir a velocidade de injeção do modelo, e número 2 para medir a velocidade do modelo após a seção contendo a mistura energética, ambos monitorando os sensores de velocidade (fios de cobre e transdutores de pressão PCB). Para este ensaio, optou-se por empregar o regime de propulsão superdetonativo, utilizando uma mistura energética com a seguinte composição:  $3 \text{ CH}_4 + 2 \text{ O}_2 + 28 \text{ N}_2$ , a uma pressão de 0,1 MPa, cuja velocidade de Chapman Jouguet da mistura corresponde a 1215,2 m/s.

A pressão de ruptura do diafragma foi de 94,4 MPa e o modelo atingiu uma velocidade de injeção de 1324 m/s, após sair da seção que contém a mistura energética. Deste modo, o modelo atinge as velocidades observadas pelos sensores: os fios de cobre mediram 1180 m/s e os transdutores de pressão PCB mediram 1250 m/s.

Através dos dados obtidos, antes e depois da seção contendo a mistura energética, podemos concluir que:

- A detonação não ocorreu com pressão suficiente para acelerar o modelo, o que ocasionou sua desaceleração através do atrito de sua superfície com as paredes internas do tubo de compressão;
- A detonação ocorreu com pressão suficiente para provocar uma aceleração pouco pronunciada do modelo, e o contato de sua superfície com as paredes internas do tubo de compressão ocasionou sua desaceleração.

Estando o dispositivo em fase de desenvolvimento, poderão ser avaliadas diversas composições e pressões da mistura energética, através de ensaios futuros, buscando a aceleração do modelo na seção do “Ram Accelerator”.

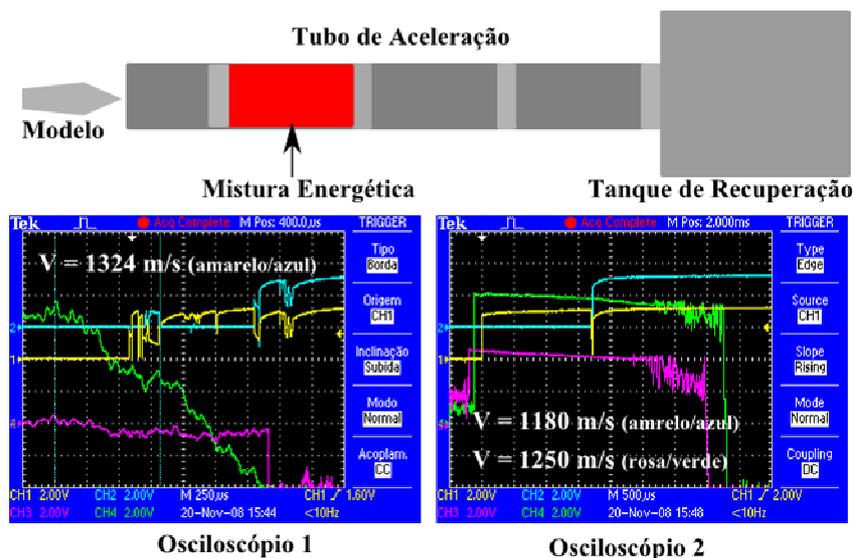


Figura 2.2.6 Dados experimentais obtidos durante a operação do LHM utilizando a mistura energética.

#### 4. REFERÊNCIAS

- Borges, M. M.; Minucci, M. A. S.; Burger, D.; Ferraz, E. O.; Toro, P. G. P.; Santos, A. M. Compressor a pistão livre para tubos e túneis de choque. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 5., 2008, Salvador. Anais (CON08-1576) Rio de Janeiro: ABCM, 2008.
- Borges, M.M., “Estudo Experimental do Lançador Hipersônico de Massa”, Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos, 2009.
- Bruckner, A. P. The ram accelerator: overview and state of the art. In: Third International Workshop on Ram Accelerators, 1997, Sendai. Proceedings of the Third International Workshop on Ram Accelerators. Berlin : Springer-Verlag, p. 3-23, 1997.
- Bruckner, A. P.; Knowlen, C.; Hertzberg, A.; Bogdanoff, D. W. Operational Characteristics Of The Thermally Choked Ram Accelerator. J Prop and Power, v. 7, n. 5, p. 828-836, 1991.
- Chang, X.; Kamimoto, H.; Taki, S. A ram accelerator with Rectangular Bore is Working at Hiroshima University. AIAA Paper 95-2496, 1995.
- Giraud, M.; Legendre, J. F.; Simon, G.; Catoire, L. Ram accelerator in 90 mm Caliber: First Results Concerning The Scale Effect In Thermally Choked Propulsion Mode. 13th International Symposium on Ballistics, Stockholm, Sweden, June 1-3, 1992.
- Hertzberg, A.; Bruckner, A. P.; Bogdanoff, D. W. The Ram Accelerator: A New Chemical Method Of Achieving Ultrahigh Velocities. Proc. 37th Meeting of the Aeroballistic Range Association, Quebec, Canada. September 9-12, 1986.
- Hertzberg, A.; Bruckner, A. P.; Knowlen, C. Experimental Investigation Of Ram Accelerator Propulsion Modes. Shock Waves, v. 1, p. 17-25, 1991.
- Krucznski, D. Experimental Demonstration Of a 120 Mm Ram Accelerator. 29th JANNAF Combustion Subcommittee Meeting, NASA Langley Research Center Hampton, VA October, p.19-23, 1992.
- Liu, S.; Bai, Z. Y.; Jian, H. X.; Ping, X. H.; Bu, S. Q. 37 mm Bore Ram Accelerator of CARDC. In: Takayama, K.; Sasah, A. (eds). Ram Accelerators: Springer-Verlag, Heidelberg, p. 119-122, 1998.
- Morales, M. M.; Minucci, M. A. S.; ChaneS Júnior, J. B.; Ramos, A. G.; BastoS Netto, D. Numerical Investigation On Subdetonative Mode Ramjet-In-A-Tube. In: Third International Workshop on Ram Accelerators, 1997, Sendai. Proceedings of the Third International Workshop on Ram Accelerators. Berlin. Springer-Verlag, p.135-142, 1997.
- Moreira, A. M.; Minucci, M. A. S. Modelamento Numérico de Um Compressor a Pistão Livre Para Tubos e Túneis de Choque. Trabalho de conclusão de curso no ITA, São José dos Campos, 1994.
- Salvador, N. M. C. ; Morales, M. M. ; Migueis, C. E. S. S. ; BastoS - Netto, D. . Numerical Simulation of a Liquid Propellant Rocket Motor. In: Millenium International Symposium on Thermal and Fluid Sciences (Thermal&Fluid 2000), 2000, Xi 'An. Collected Abstracts. Beijing : Institute of Engineering Thermophysics, v. 1, p.198-199, 2000.
- Sasoh, A.; Hirakata, S.; Ujigawa, Y.; Takayama, K. Operation Tests of a 25 mm Bore Ram Accelerator. AIAA paper 96-2677, 1996.
- Stalker, R. J. The Free Piston Shock Tube. The Aeronautical Quaterly, v.17, p. 351-370. Nov.,1966.

#### 5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.



**VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil**  
*August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil*

## **HYPersonic MASS LAUNCHER: A DEVICE USED TO ACCELERATE HYPersonic MODELS**

Marcos de Melo Borges, [mborges@ieav.cta.br](mailto:mborges@ieav.cta.br)<sup>1</sup>  
Marco Antonio Sala Minucci, [sala@ieav.cta.br](mailto:sala@ieav.cta.br)<sup>1</sup>  
Oseas Domingos de Abreu, [oseas@ieav.cta.br](mailto:oseas@ieav.cta.br)<sup>1</sup>  
Paulo Gilberto de Paula Toro, [toro@ieav.cta.br](mailto:toro@ieav.cta.br)<sup>1</sup>  
Alberto Monteiro dos Santos, [alberto@ieav.cta.br](mailto:alberto@ieav.cta.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Estudos Avançados (IEAv) – Rod. dos Tamoios, km 5,5 – Putim – CEP 12.228-001 – São José dos Campos – SP – Brasil – Tel. +55 (12) 3947-5360 – Fax +55 (12) 3944-1177

**Abstract.** *Recent developments in aerospace technology have made ground tests of hypersonic vehicles mandatory. As a consequence, the need to develop facilities capable of producing hypersonic flight conditions is essential. One of the methods employed to simulate such conditions is the Hypersonic Mass Launcher (LHM), which has attracted considerable attention, both in experimental and in theoretical fields. This work discusses both the assembly and the experimental study of this facility. The LHM comprises two main sessions, one for gas compression and the other for model acceleration. The compression session is composed by one free piston compressor, whose technical and operational details of each component of the system are described. Piston mass, compression tube length, pressure at the high-pressure tank and pressure inside the compression tube have been analyzed experimentally and compared to a numerical model. In the acceleration tube, technical and operational details of each component of the system are described. The concept of the Chapman-Jouguet detonation velocity of an energetic mixture, as well the investigation of its influence on the model acceleration across the propulsion regime are presented. Velocity data, before and after the model penetration into the acceleration tube, containing an energetic gas mixture inside, are also presented and discussed.*

**Keywords:** *Hypersonic, Free Piston Compressor, Ram Accelerator, Two Stage Light Gas Gun.*

### **1. RESPONSIBILITY NOTICE**

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.