



QUALIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE SEPARAÇÃO DOS ESTÁGIOS EM TANDEN DO VEÍCULO LANÇADOR DE SATÉLITES -VLS-1

Franco Jr. , Odilon Costa

Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE - Centro Técnico Aeroespacial – CTA
12228-904 – S. J. Campos - SP – Brasil - odilon@iae.cta.br

Villas Boas, Danton J. F.

Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE - Centro Técnico Aeroespacial – CTA
12228-904 - São José dos Campos - SP – Brasil - danton@iae.cta.br

Nogueira, Valmir J.

Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE - Centro Técnico Aeroespacial – CTA
12228-904 - São José dos Campos - SP - Brasil

Resumo: *O VLS-1 (Veículo Lançador de Satélite) desenvolvido pelo CTA-IAE é composto por quatro estágios com motores a propelente sólido. Quatro motores com configuração “strap-on” compõem o primeiro estágio. Os demais estágios formam o corpo central em configuração “tandem”. Os Sistemas de Separação dos Estágios em “tandem” foram projetados e desenvolvidos para serem simples, seguros e eficientes. Nesta publicação são consideradas as separações do 2º estágio, 3º estágio e da baía de equipamentos, que formam o corpo central juntamente com o 4º estágio. Este trabalho apresenta a qualificação através dos ensaios realizados em solo para o desenvolvimento dos sistemas de separação. São apresentados os ensaios realizados para os componentes e também os ensaios realizados para os sistemas completos.*

Palavras chave: *ensaios, qualificação, separação, estágios, veículo lançador, foguete, VLS.*

1. INTRODUÇÃO

A separação de estágios de um veículo lançador de satélite usualmente é feita em duas etapas: liberação e afastamento. Para isto os sistemas podem possuir dispositivos distintos que realizam cada etapa; ou dispositivos únicos mais sofisticados que realizam as duas etapas seqüencialmente (Gluckman, 1988). Os Sistemas de Separação do VLS foram desenvolvidos e qualificados em solo por meio de ensaios funcionais. Foram realizados ensaios em componentes e nos sistemas, simulando-se algumas condições possíveis de voo. Aqui serão citados os sistemas e meios de ensaios utilizados e apresentaremos os principais resultados obtidos para a separação dos estágios em tandem. O principal parâmetro medido em ensaio foi a velocidade de separação obtida com os Corpos de Prova equipados com os Sistemas de Separação.

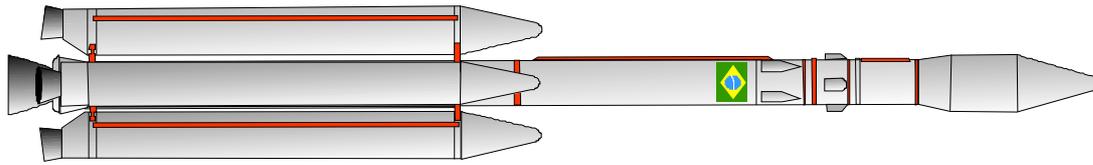


Figura 1. Veículo Lançador de Satélites - VLS-1

2. SISTEMAS DE SEPARAÇÃO DE ESTÁGIOS DO VLS E DISPOSITIVOS DE LIBERAÇÃO E AFASTAMENTO

A Tab. (1) resume todos os sistemas de separação e ejeção do VLS, com os valores da energia requerida para cada um dos sistemas:

Tabela 1. Sistemas de Separação do VLS PT-01:

SEPARAÇÃO	ENERGIA (J)	TIPO
1° Estágio	20000	Atuadores Pneumáticos e COL.
2° Estágio	16500	Atuadores Pneumáticos e Cinta Ejetável Rígida.
Coifa	200	Atua.: Pneum. c/ Gerador de Gás, Travas Mecânicas e Cinta Ejetável Flexível.
3° Estágio	280	Atuadores Molas Helicoidais e Cinta Ejetável Rígida.
Baía de Equipamentos	58	Atuadores: Molas Helicoidais e Cinta Ejetável Rígida.
4° Estágio/Satélite	23	Atuadores c/ Molas Helicoidais e Cinta Ejetável .

Nos estágios em tandem, o elemento que une estruturalmente é uma cinta rígida que possui duas articulações e duas travas as quais são liberadas por pirotécnicos

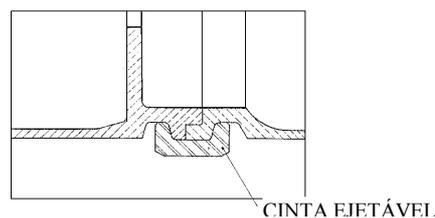


Figura 2. Cinta Rígida Ejetável unindo estruturalmente as interfaces dos estágios.

Basicamente no VLS foram adotados dois tipos de atuadores:

- Atuadores pneumáticos para as separações onde se requer energias maiores que 500 J;
- Atuadores acionados por molas para energia menor que 500 J.

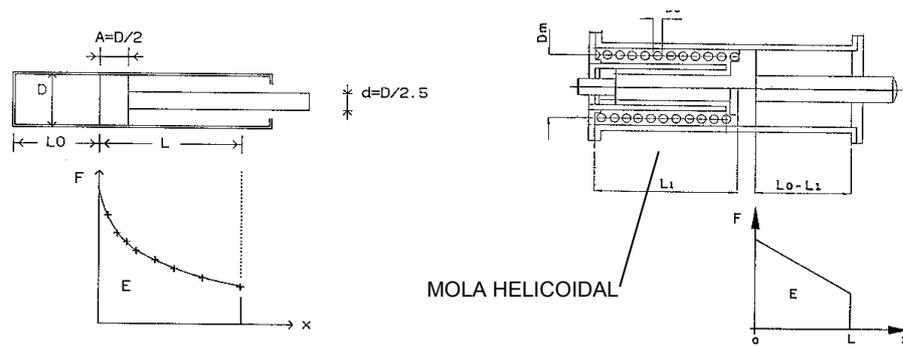


Figura 3. (a) Modelo do Atuador Pneumático (esquerdo)
 (b) Modelo do Atuador com Mola Helicoidal (direito)

2.1. Sistema de Separação e Ejeção com Atuadores Pneumáticos (2º Estágio)

O Sistema de Separação e Ejeção do 2º Estágio é composto por um conjunto de 12 atuadores pneumáticos. Os atuadores são interligados entre si em três circuitos pneumáticos independentes. Cada um é alimentado por uma garrafa pressurizada com N2 seco. A ligação entre os estágios é feita através de uma cinta rígida ejetável por dispositivo pirotécnico. O sistema é acionado pelo computador de bordo e pela rede pirotécnica.

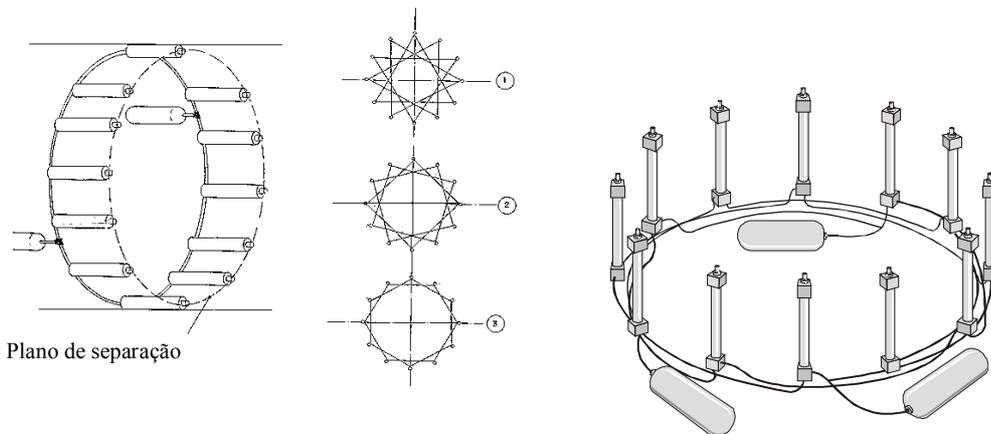


Figura 4. Circuito Pneumático do Sistema de Separação do Segundo Estágio



Figura 5. Sistema de Separação do 2º Estágio montado no VLS

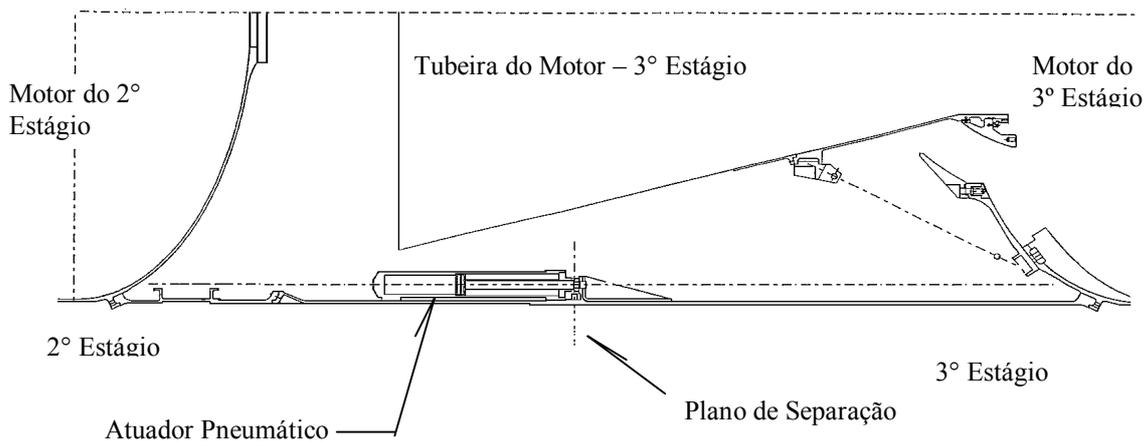


Figura 6. Sistema de Separação do Segundo Estágio - VLS PT-01

2.2. Sistemas de Separação com Atuadores acionados por mola (3º Estágio e Baia de Equip.)

Para a separação e ejeção do 3º Estágio e também da Baia de Equipamentos foram concebidos e projetados sistemas convencionais com cinta rígida ejetável e pistões com molas helicoidais conforme a Fig. (7). O acionamento é similar ao da Separação do 2º Estágio, ou seja, por computador de bordo e rede pirotécnica.

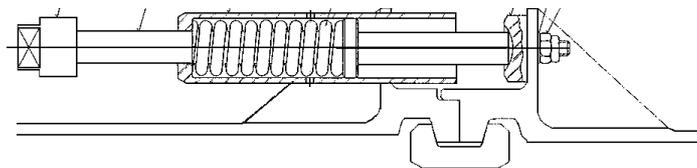


Figura 7. Sistema de Separação da Baia de Equipamentos.

3. ENSAIOS DE QUALIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE SEPARAÇÃO

Os parâmetros considerados no projeto dos sistemas de separação, para cada tipo de estágio e, avaliados em ensaios de qualificação em solo são:

- energia necessária
- velocidades relativas
- confiabilidade
- perturbação causada
- resistência estrutural
- retenção de fragmentos e gases
- segurança
- precisão

São avaliados também os efeitos do ambiente de vôo como:

- temperatura
- vibração
- choque

O principal parâmetro de dimensionamento é a energia de separação. Este é portanto o principal parâmetro medido em ensaios.

A qualificação em solo dos sistemas foi realizada basicamente em duas etapas: qualificação de cada um dos componentes e subsistemas e qualificação de todo o sistema integrado como nas condições de vôo.

3.1 Qualificação dos Atuadores de Separação

Os ensaios funcionais têm por finalidade verificar dinamicamente o desempenho dos atuadores. Estes ensaios consistem basicamente em se lançar uma massa por meio do atuador a fim de se obter os parâmetros: força, deslocamento e tempo de atuação.

No caso de atuadores pneumáticos, preliminarmente são realizados nos atuadores testes de estanqueidade com pressão 1,5 vezes a pressão de trabalho e ensaio de vibração com pressurização nominal de operação.

O dispositivo desenvolvido para os ensaios funcionais consiste em um trilho horizontal por onde se desloca um carro com lastro impulsionado pelo atuador de separação. É equipado com uma célula de carga, transdutores de deslocamentos, referência para filmagem de alta velocidade e vídeo. Uma válvula solenóide libera o acionamento do atuador no carro.

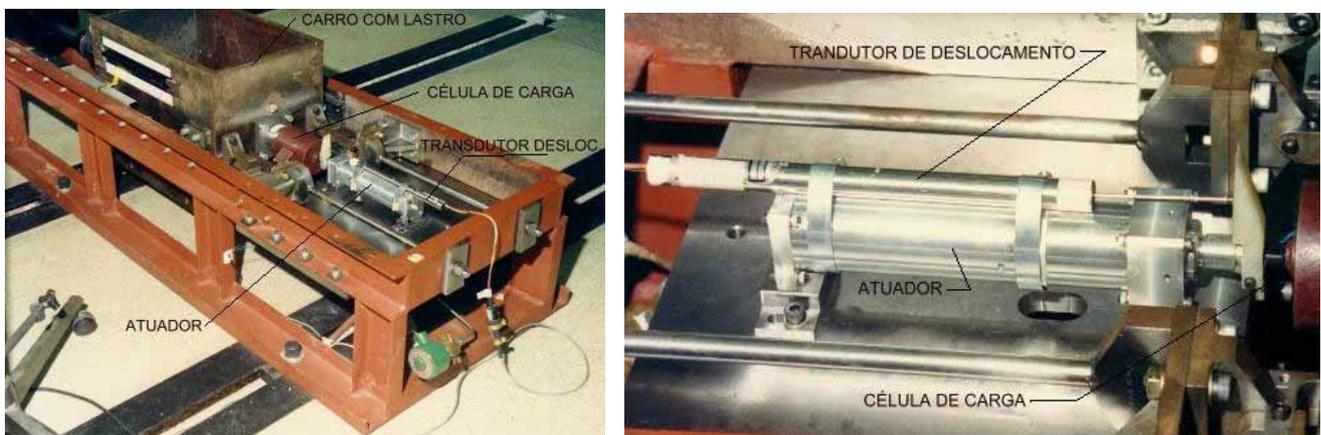


Figura 8. Dispositivo de Ensaio Funcional de Atuadores.

Os sinais dos sensores são registrados, tratados e processados logo em seguida a cada teste. Comparado-se com os dados teóricos verifica-se a dispersão e repetibilidade no lote. Assim os critérios de aceitação são definidos a partir dos ensaios de qualificação. Estes ensaios passam a ser realizados nas etapas posteriores em todos os lotes, como critérios de aceitação dos atuadores que são utilizados no VLS.

3.1.1. Resultados Obtidos nos Ensaios Funcionais com Atuadores de Separação do 2º Estágio

O principal parâmetro medido é a energia de cada atuador. Esta é obtida pela integração da curva Força x Deslocamento resultante do ensaio funcional. As curvas obtidas do primeiro lote de atuadores em qualificação são mostradas na fig. 9. Foram ensaiados 24 atuadores com algumas séries de testes repetidas para ajustes de dispositivos, dos sensores e instrumentação. Também foram implementados programas computacionais para aquisição, tratamento e análise de dados.

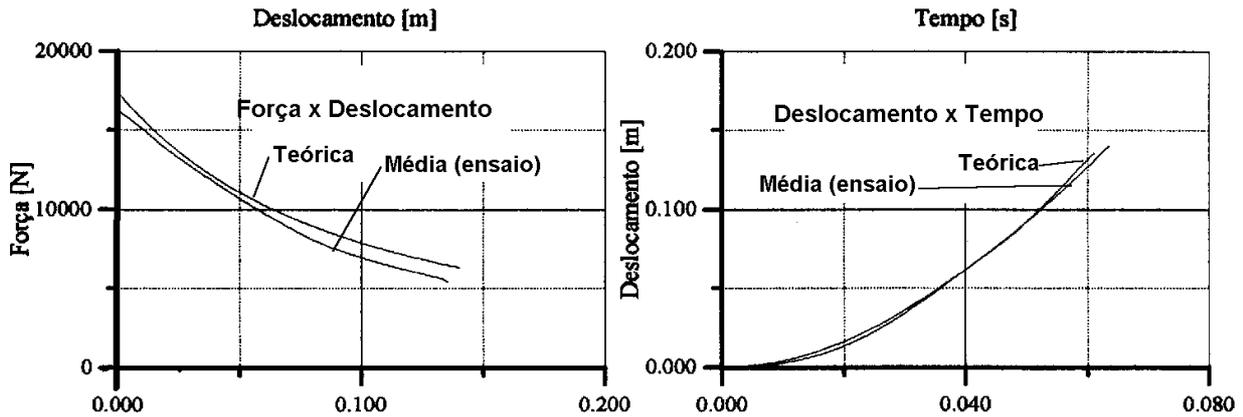


Figura 9. Gráficos Força x Deslocamento e Deslocamento x Tempo obtidos nos Ensaio Funcionais dos Atuadores de Separação do 2º Estágio.

3.2. Ensaio Funcionais dos Sistemas de Separação em Tandem

3.2.1. Meios de Ensaio Funcionais dos Sistemas de Separação em Tandem

Os ensaios funcionais de separação com o sistema completo são realizados utilizando-se um Corpo de Prova (CDP) que simula a região de separação no VLS. O CDP é fixado num pórtico. O ensaio consiste basicamente na separação e ejeção do módulo inferior do CDP, que cai em queda livre, sendo amortecido por uma mesa dotada de amortecedores hidráulicos.



Figura 10. Pórtico para Ensaio de Separação em Tandem.

Quatro câmeras de alta velocidade (CAV), criteriosamente posicionadas filmam todo o evento. As câmeras foram sincronizadas através do dispositivo de *phase lock*. Um dos LED's da câmera foi destinado a marcação do disparo do pirotécnico (início da separação); este sinal foi gerado pelo circuito da linha de fogo convenientemente ajustado através de um amplificador. Um segundo LED foi alimentado pelo gerador de funções ajustado com 10V de tensão de pico e frequência de 100HZ. As marcações criadas pelo gerador no filme servem como referência para verificação de velocidade das câmeras. A velocidade de filmagem utilizada foi de 500 quadros por segundo, podendo variar em ± 2 quadros ou $\pm 2\%$ do valor ajustado, prevalecendo o que for maior. Referências posicionadas no CDP permitem medir as velocidades e rotações do módulo em queda livre e a ejeção da cinta.



Figura 11. Corpo de Prova (CDP) e mesa de amortecimento.

A seqüência de um ensaio de separação entre 2º e 3º estágios é apresentada na figura a seguir. O módulo superior possui a tubeira simulada do 3º estágio.



Figura 12. Ensaio em Solo de Separação do 2º Estágio do VLS.

3.2.2. Resultados obtidos nos Ensaio de Separação do 2º Estágio do VLS

A partir da análise dos filmes são obtidos o afastamento relativo e a rotação em queda livre do módulo ejetado do CDP. A comparação dos dados obtidos nos ensaios com dados teóricos permite avaliar o desempenho do sistema. Os principais resultados obtidos nos ensaios funcionais são sintetizados nos gráficos abaixo:

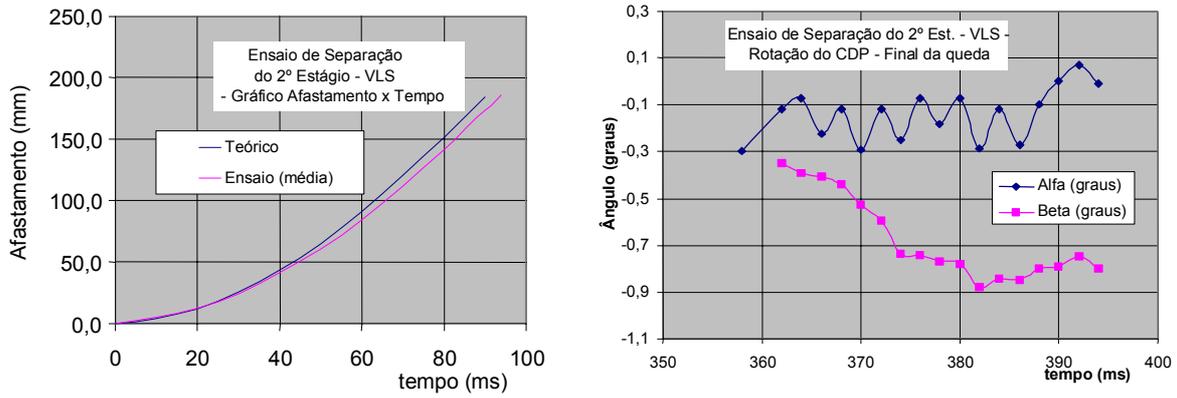


Figura 13. Gráficos Afastamento x Tempo e Velocidade Relativa x Tempo do CDP

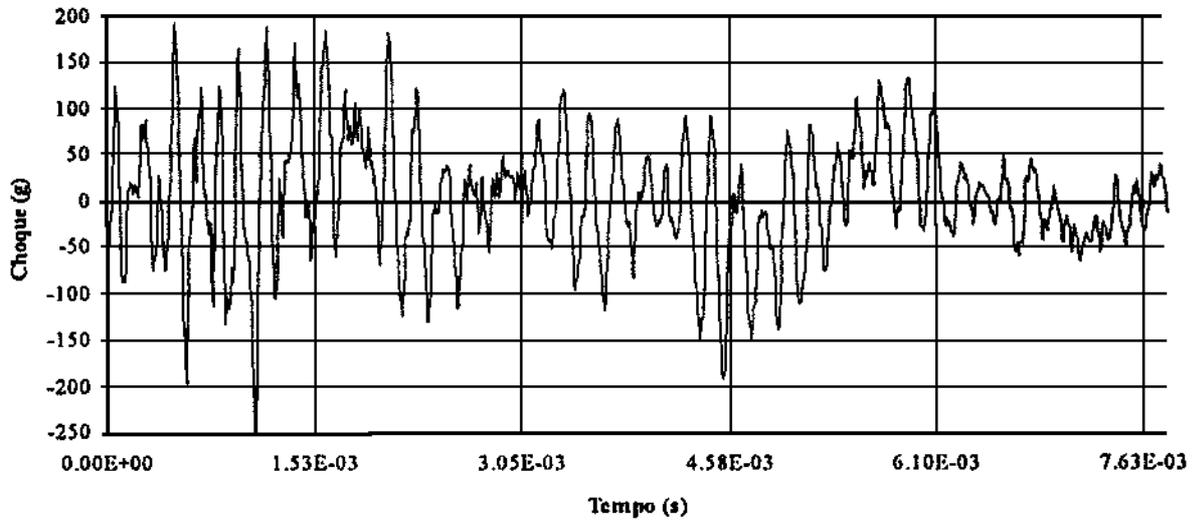


Figura 14. Ensaio de Separação do 2º/3º Estágio: Curvas de Choque no eixo longitudinal.

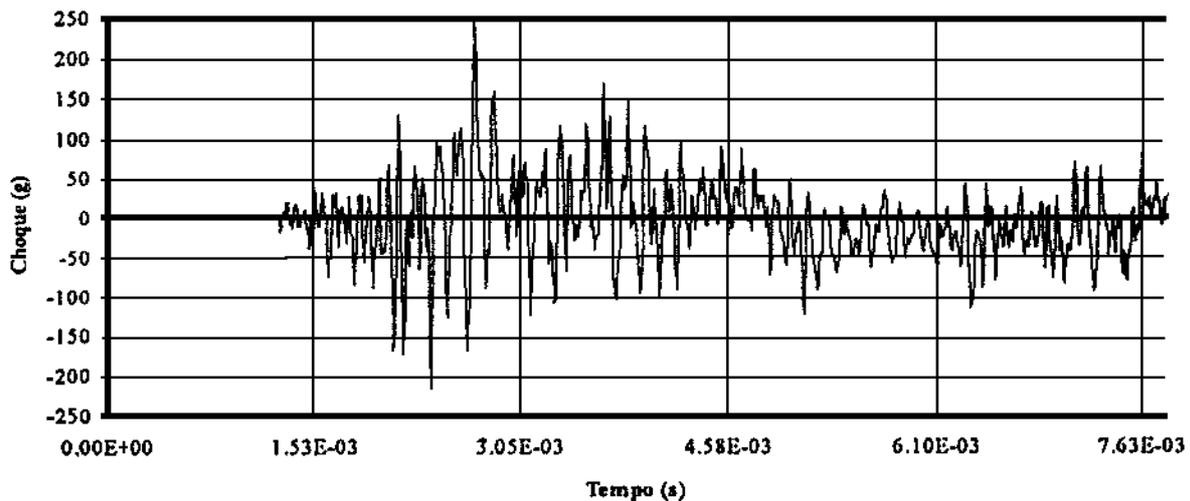


Figura 15. Ensaio de Separação do 2º/3º Estágio: Curvas de Choque no eixo transversal.

3.2.3. Resultados obtidos nos Ensaio Funcionais de Separação da Baia e do 3º Estágio

Os ensaios em solo com os Sistemas de Separação do 3º Estágio e da Baia de Equipamentos são similares e os resultados obtidos estão apresentados nos gráficos da fig. (16) e fig. (17) a seguir:

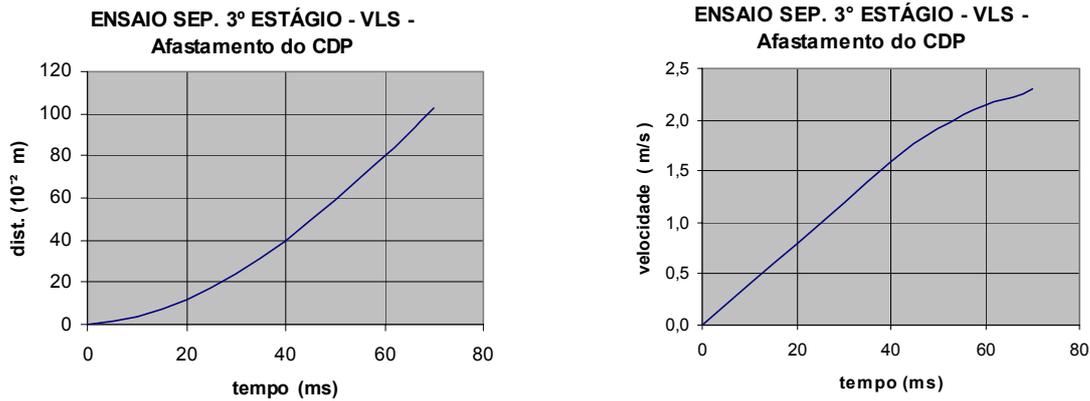


Figura 16. Gráficos Afastamento x Tempo e Velocidade Relativa x Tempo do CDP do 2º Estágio.

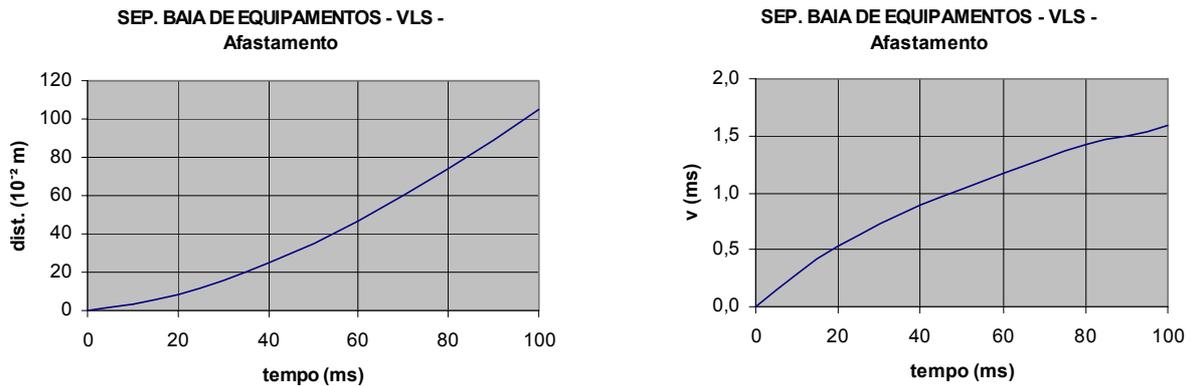


Figura 17. Gráficos Afastamento x Tempo e Velocidade Relativa x Tempo do CDP da Baia de Equipamentos.

4. PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE

O movimento de translação do CDP, durante a fase de atuação do sistema, é obtido diretamente do registro feito pela CAV 1, nos instantes iniciais da queda livre ($0,0 \text{ ms} < t < 95 \text{ ms}$). O movimento angular (perturbação) é avaliado indiretamente, a partir dos registros feitos pelas CAV 3, 3 e 4 nos instantes finais da queda livre. Os dados obtidos por cada câmera são comparados reconstituindo-se o movimento numericamente a partir de análise de quadro a quadro de cada filme. Estes dados são tratados e ajusta-se curvas que são comparadas com simulações teóricas. É feita então a verificação do desempenho do sistema e determinação das dispersões, confrontando-se com os valores e limites especificados.

Para os ensaios com os sistemas que separam estágios com grandes massas, seria mais complexo e de alto custo manter as mesmas propriedades de massa, cg e inércia do veículo real. Assim sendo o CDP possui as propriedades de massa reduzidas e conhecidos (medidos) dos valores obtidos se faz a correção por meio de cálculos e simulações.

5. COMENTÁRIOS E CONCLUSÃO

Foram realizados ensaios funcionais com cada um dos dispositivos e com cada sistema completo. Cada tipo de separação foi ensaiado em solo com corpos de prova em queda livre. Os resultados obtidos mostraram que os sistemas funcionam como se previa e confirmaram características e especificações de projeto.

O estudo comparativo entre os resultados teóricos e os resultados de ensaio, para a fase inicial de

separação (fase de atuação do dispositivo de afastamento), demonstra uma boa concordância entre esses resultados. Em ambos os casos vê-se que uma pequena divergência surge a partir de $t=0,004s$, e que essa divergência é não conservativa. Isso significa que a aceleração imposta ao CDP pelo sistema de separação é menor que os resultados obtidos teoricamente. Essa diferença é pequena e é causada pelo atito do sistema (molas, atuadores e cinta ejetável) que não é levado em consideração no modelamento da formulação teórica.

A perturbação máxima devida a separação e admitida pelo sistema de controle é de $0,1^\circ/s$ de rotação em cada eixo do veículo. Em todas as séries de ensaios, tanto de pré-qualificação como de qualificação, foram verificadas rotações bem inferiores aos limites teóricos, do corpo durante em queda livre. Os valores resultantes dos ensaios, mesmos que com pequena dispersão e, nos casos dos CDP em que as propriedades de massa não são reais (menores que o caso real), mostraram-se bem conservativos. Demonstrou-se assim que os sistemas funcionaram com simetria.

A montagem da cinta rígida requer um procedimento apropriado para acomodação da mesma, no cavalete de união (interfaces) dos estágios, a medida em que se dá o torque nos parafusos de tensionamento.

Os atuadores foram exaustivamente ensaiados, assim como os sistemas completos. A partir da qualificação e ajustes finos, foram elaborados procedimentos de ensaios, montagens e verificações para programas de aceitação para os sistemas de vôo.

Um aspecto importante a ser observado no desenvolvimento dos ensaios de qualificação em solo dos Sistemas Separação, foi o desenvolvimento necessário dos meios de ensaios e dos métodos de medição e avaliação dos parâmetros considerados em projeto. Contudo ainda é necessário se utilizar de técnicas mais precisas e automatizadas nos processos de medição e aquisição de dados. Se faz necessário implementar esses processos com utilização de sistemas de acelerômetros, plataformas inerciais instaladas no CDP, sistemas óticos (laser) etc. para obtenção de medidas e dados referentes à dinâmica do CDP em queda livre com maior precisão e rapidez.

Os Sistemas de Separação de Estágios tem se mostrado eficientes, seguros e de custos admissíveis dentro do programa no Instituto de Aeronáutica e Espaço.

6. REFERÊNCIAS

- Ball, K. J. and Osborne, G. K., 1967, "Space Vehicle Dynamics", Oxford University Press, London, U.K.
- Christensen, Kenneth L. and Narahard, M. Russel, 1966, "Spacecraft Separation", Space/Aeronautics (July 1966 pp 74-82)
- Franco Jr., Odilon Costa, Corrêa Jr., Flavio de Azevedo, 1990, "Seleção, Projeto e Considerações de Aplicações dos Mecanismos de Separação de Estágios no VLS PT-01", 1990, 1º Simpósio Brasileiro de Tecnologia Aeroespacial – 1º BSAT, São José dos Campos, S.P., Brasil.
- Gauge, P., 1978, "Stage Separation Testing for Ariane", Ariane Project Team, ESA Bulletin N° 15, pp 67-70, CNES, Evry, France.
- Gluckman, I. B., "Aerospace Vehicle Separation Mechanisms", Fifth Aerospace Mechanism Symposium, Sunnyvale, California, USA.
- Marty, Daniel, 1986, "Conception des Vehicules Spatiaux", Masson, Paris, France.
- Welch, B. H., Richter, B.J. and Sue, P., "Trident Stage Separation System", Fifth Aerospace Mechanism Symposium, Sunnyvale, California, USA.

7. DIREITOS AUTORAIS

São reservados aos autores os direitos autorais pelo conteúdo do material impresso incluído nesse trabalho.

QUALIFICATION TESTINGS FOR SEPARATION SYSTEMS OF TANDEM STAGES ON BRAZILIAN SATELLITE VEHICLE LAUNCHER

Franco Jr. , Odilon Costa

Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE - Centro Técnico Aeroespacial – CTA
12228-904 – S. J. Campos - SP – Brasil - odilon@iae.cta.br

Villas Boas, Danton J. F.

Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE - Centro Técnico Aeroespacial – CTA
12228-904 - São José dos Campos - SP – Brasil - danton@iae.cta.br

Nogueira, Valmir J.

Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE - Centro Técnico Aeroespacial – CTA
12228-904 - São José dos Campos - SP - Brasil

***Abstract:** The VLS-1 (Satellite Launch Vehicle) under development at CTA-IAE is composed by four stages with solid rocket motors. Four strap-on motors compose the first stage. The others stages are in tandem configuration. The Tandem Stages Separation Systems are projected and developed to be simple, safety and efficient. In this paper will be discussed the separations of 2° stage, 3° stage and equipment bay.*

This paper presents the ground functional testings performed for Tandem Stages Separation System development and qualification. It also presents the ejection atuators functional testings.

***Keywords:** testing, separation, stage, launcher vehicle, rocket, VLS.*