

## Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: **Simulação Computacional da Dinâmica 4DOF de Paraquedas**

Bolsista: **Lucas Andrade E Silva**

Orientador(a): **Maurício Guimarães da Silva**

Período a que se refere o relatório: Janeiro de 2015 a Julho de 2015

### Resumo

Este trabalho visa desenvolver um modelo matemático, e correspondente implementação numérica, que permita o dimensionamento de um sistema de recuperação baseado em paraquedas para a estabilização de veículos aeroespaciais em termos de suas características de desempenho. A dinâmica do voo do sistema de recuperação utiliza 4 graus de liberdade, associados aos deslocamentos espaciais (direções x e z) do paraquedas e da carga útil separadamente. É considerado também que as linhas apresentam comportamento elástico conhecido. Entre as principais contribuições associadas à este trabalho, destacam-se: determinação da força atuante no sistema quando no momento do estiramento das linhas (*snatch force*), determinação da maior força longitudinal (*opening force*) e determinação das características de voo do sistema quando é considerada a força elástica representativa das linhas e umbilical do paraquedas.

### 1. Introdução

Nas últimas décadas, o Brasil teve significativa evolução no domínio de tecnologia de projeto, construção, testes e lançamento de veículos espaciais. Como exemplo, citam-se o Veículo Lançador de Satélites (VLS) e o Veículo de Sondagem VSB-30, qualificado internacionalmente, tendo como importante cliente a Agência Espacial Alemã (DLR - *Deutsches Zentrum für Luft*). O VSB-30 vem sendo utilizado, desde 2004, em lançamentos no Brasil e no exterior, possibilitando a realização de experimentos científicos em ambiente de microgravidade.

Apesar do sucesso no desenvolvimento e lançamento destes veículos, não existe no mercado interno, uma tecnologia de recuperação dos experimentos embarcados qualificada e certificada por órgãos de fomento. Atualmente o sistema de recuperação utilizado é adquirido a partir da empresa alemã DLR, o que encarece significativamente o custo do lançamento, uma vez que sua produção e posterior integração no veículo envolvem processos complexos e consequente mão de obra especializada além de dependência tecnológica. Neste contexto, este projeto de pesquisa se insere nesta necessidade: estudo de sistemas de recuperação aplicados a recuperação de cargas úteis de experimentos aeroespaciais. Ressalta-se que este estudo pode ser aplicado tanto para fins civis como militares (recuperação de componentes de elevados custos de mísseis e recuperação de sistemas de aquisição de dados, entre outros). Dentro deste enfoque, foi desenvolvido no período de 2013 e 2014, pelos mesmos autores do atual trabalho, um programa cujo objetivo foi simular computacionalmente a dinâmica de voo de uma carga com sistema de recuperação por paraquedas, em 2DOF. O atual projeto de pesquisa é uma extensão deste desenvolvimento.

## 1.1 Objetivos

Neste projeto de pesquisa foram definidos como objetivos os tópicos descritos a seguir:

- i. Desenvolver um modelo matemático que represente a dinâmica de voo de um sistema paraquedas-carga útil, em voo atmosférico e regime de velocidades subsônico;
- ii. Implementar e simular numericamente o voo do sistema de recuperação com 4 (quatro) graus de liberdade (4 DOF). É importante ressaltar que o código computacional deve apresentar uma estrutura modular que permita a simulação de diferentes tipos de paraquedas como também diferentes configurações aerodinâmicas de cargas úteis;
- iii. Determinar as principais forças sofridas pela carga e pelo paraquedas, separadamente, de forma que seja possível o dimensionamento geométrico do sistema de recuperação.

## 2. Materiais

Neste trabalho são utilizadas literaturas técnicas no estudo de dinâmica de paraquedas, e referências específicas associadas à formulação matemática do estiramento de linhas (*stretching*). É utilizado o *software* MATLAB® na implementação numérica do modelo matemático desenvolvido e na visualização dos respectivos resultados.

## 3. Métodos: Desenvolvimento Realizado no Semestre: Jan 2015 - Jul 2015

O desenvolvimento da proposta de pesquisa neste semestre foi organizado nos seguintes tópicos:

- i. Levantamento de bibliografia base relacionada à dinâmica do voo 4DOF de sistemas paraquedas-carga útil e estimativa de estiramento de linhas flexíveis quando sob carregamento estático;
- ii. Definição do modelo matemático representativo da fenomenologia em estudo, e
- iii. Implementação numérica e análise de resultados.

### 3.1 Formulação Matemática

Neste tópico são apresentadas as principais características do modelo matemático implementado no desenvolvimento deste trabalho. Com a finalidade de organizar esta apresentação, este tópico é dividido nos seguintes itens: (i) hipóteses aplicadas ao modelo matemático; (ii) formulação matemática da dinâmica do voo em um contexto adimensional e (iii) detalhamento do modelo adotado para a abertura do sistema de recuperação baseado em 1(um) paraquedas.

### 3.1.1 Hipóteses

- i. Terra é considerada plana;
- ii. Formulação Massa-Ponto. A carga, o paraquedas e o umbilical são modelados separadamente;
- iii. Dinâmica de três corpos. Dinâmica do voo com quatro graus de liberdade (4DOF): Coordenadas espaciais associadas aos deslocamentos horizontal ( $x$ ), vertical ( $z$ );
- iv. O coeficiente de arrasto do corpo é constante em toda a dinâmica do voo;
- v. O coeficiente de sustentação do corpo e PQD são desprezados;
- vi. São desprezados os efeitos aeroelásticos do PQD;
- vii. Não é considerada a influência do vento na dinâmica do voo do sistema;
- viii. A massa e arrasto do umbilical é desprezada.

É importante mencionar que as hipóteses (ii), (iv), (vii) e (viii) podem ser facilmente excluídas em propostas futuras desde que o grupo de trabalho tem domínio tanto do respectivo modelo matemático como também dos detalhes da implementação numérica em um contexto 6DOF. Tendo em vista que o principal objetivo nesta fase de desenvolvimento do trabalho é disponibilizar modelos matemáticos para simular as forças relacionadas ao processo de abertura do paraquedas e de estiramento de linhas, procurou-se focar no desenvolvimento de um código computacional que permita a realização destas análises e que seja modular o suficiente para que seja possível a inclusão dos modelos mencionados nas hipóteses (ii), (iv) e (vii).

### 3.1.2 Modelo Matemático

O modelo matemático que descreve o sistema de recuperação baseado em paraquedas (PQD) é deduzido a partir das leis de Newton. O modelo matemático do voo do sistema de recuperação, representado no plano cartesiano ( $x, z$ ), é dado pelas Equações (1) e (2). Estas equações foram apresentadas no primeiro relatório parcial desta pesquisa.

$$\dot{x}_i = \frac{-F_{xi}}{m_i}, \quad (1)$$

$$\ddot{z}_i = \frac{-m_i g - F_{zi}}{m_i} \quad (2)$$

O subscrito  $i$  se refere à carga útil ( $i=1$ ), ao PQD ( $i=2$ ) e ao umbilical ( $i=3$ ). sendo  $m_i$  a massa do subsistema e  $g$  a aceleração da gravidade. No caso do umbilical, apenas a massa não entra nas equações. As forças aerodinâmicas são modeladas em três fases da dinâmica de voo do sistema de recuperação, sejam elas: queda livre da carga, processo de abertura do paraquedas e voo do sistema (carga + PQD totalmente aberto). A Figura 1 exibe o diagrama de forças utilizado no presente trabalho para o caso de um voo vertical.

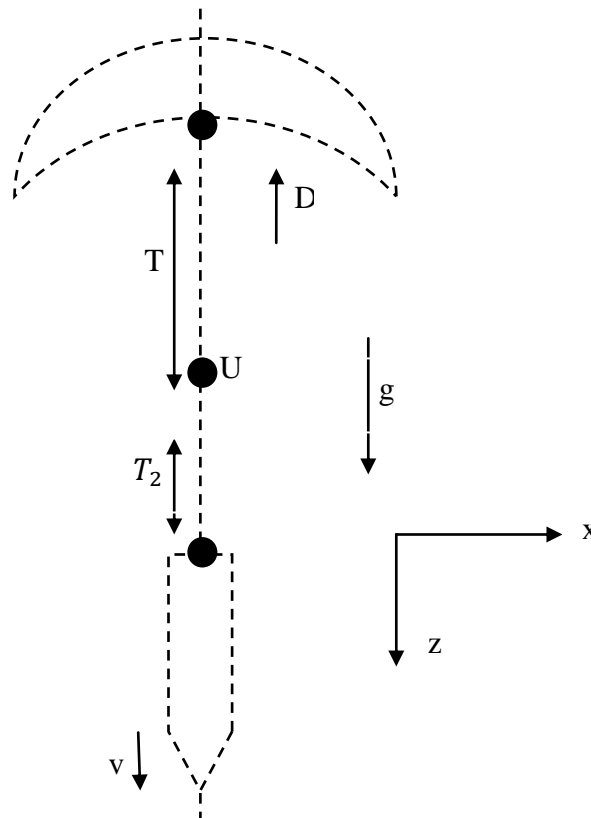


Figura 1: Diagrama de forças utilizadas na formulação matemática

O sistema umbilical está representado pelo ponto U. Este ponto apresenta massa desprezível. As variáveis  $T$  e  $T_2$  representam as forças de tração verificadas entre o umbilical e linhas de suspensão e umbilical e carga útil, respectivamente. A força de arrasto é representada pela letra  $D$  e o sentido de voo segue a direção positiva de  $z$ . As forças de tração  $T$  e  $T_2$  são calculadas de acordo com a Lei de Hooke:

$$T = k\Delta l, \quad (3)$$

O amortecimento do sistema foi representado pela seguinte equação:

$$F_{\text{amortecimento}} = c(v_{pqd} - v_{\text{carga}}), \quad (4)$$

sendo  $c$  calculado de acordo com (Koldaev, 1996):

$$c = 2\omega m_{pqd} \sqrt{k/m_{pqd}} \quad (5)$$

A variável  $\omega$  é escolhida com base empírica. Neste trabalho adotou-se  $\omega = 0,1$ . O parâmetro  $k$  é a constante elástica da linha ou umbilical do paraquedas e  $\Delta l$  a variação do comprimento da linha ou umbilical do paraquedas. É importante ressaltar que todas as linhas de suspensão do paraquedas são representadas por apenas uma constante  $k$ , dimensionado de acordo com o valor equivalente de todas as linhas. Para o umbilical, este valor é diferente e calculado quando o peso do sistema é igual a força de arrasto, ou seja, quando o sistema está em equilíbrio, melhor explicando, quando o sistema atinge a velocidade terminal. De acordo com ESDU (2012), a velocidade terminal, é calculada conforme segue:

$$V_{cr} = \sqrt{\frac{2gm_{total}}{\rho(C_{d_{pqd}}S_{ref_{pqd}} + C_{d_{carga}}S_{ref_{carga}})}} \quad , \quad (6)$$

A força de arrasto  $D$  foi calculada seguindo a equação mencionada na referência Anderson (2001):

$$D = p_{dyn} S_{ref} C_D, \quad (7)$$

sendo  $p_{dyn}$  a pressão dinâmica,  $S_{ref}$  a área de referência (baseada no diâmetro do PQD), e  $C_D$ , o coeficiente de arrasto. Este coeficiente foi estimado com base na referência Knacke (1991), para um PQD particular.

O modelo atmosférico adotado no presente desenvolvimento é o modelo padrão (Anderson, 2001). A partir deste é possível obter o valor da massa específica ( $\rho$ ) como função da altitude ( $z$ ) em que se encontra o sistema. Neste trabalho, o modelo representativo do arrasto do paraquedas quando em processo de abertura é dado pela Eq.(8).

$$\frac{(C_d S)}{(C_d S)_0} = \left(\frac{t}{t_0}\right)^6, \quad (8)$$

sendo  $C_d S$ , associado ao paraquedas, uma função do tempo ( $t$ ). O termo  $(C_d S)_0$  está associado ao paraquedas completamente aberto e  $t_0$  é o tempo de abertura (tempo de enchimento). O valor de  $t_0$  foi calculado utilizando a referência ESDU (2012), na qual é proposta a seguinte equação:

$$t_0 = \frac{nd_o}{V_s} \quad (9)$$

Nesta equação,  $n$  representa a constante de enchimento do velame (valor retirado da referência ESDU-2012),  $d_o$  é o diâmetro nominal do velame e  $V_s$  é a velocidade instantânea da carga no momento da abertura do PQD. A área do paraquedas durante o processo de abertura é dada pela equação (10):

$$S^* = A\tau^B + (1 - A)\tau^2 \quad (10)$$

A variável  $\tau$  é definida por  $\tau = t/t_0$ . Os parâmetros A e B são constantes determinadas empiricamente, ou seja, com base em dados experimentais. Nesta fase de desenvolvimento, foram adotados os valores disponibilizados na referência ESDU (2012). A variável  $S^*$  representa a variação da área do PQD durante o processo de abertura em um contexto adimensional, ou seja:

$$S^* = \frac{(C_d S)}{(C_d S)_0} \quad (11)$$

Finalmente, é importante mencionar que quando a simulação é conduzida segundo uma atitude diferente da vertical, é necessário definir os ângulos  $\varphi$  e  $\gamma$ . Estes se referem ao ângulo entre a tração nas linhas e a horizontal, e ao ângulo de trajetória (vetor velocidade e o eixo horizontal), respectivamente, Figura 2.

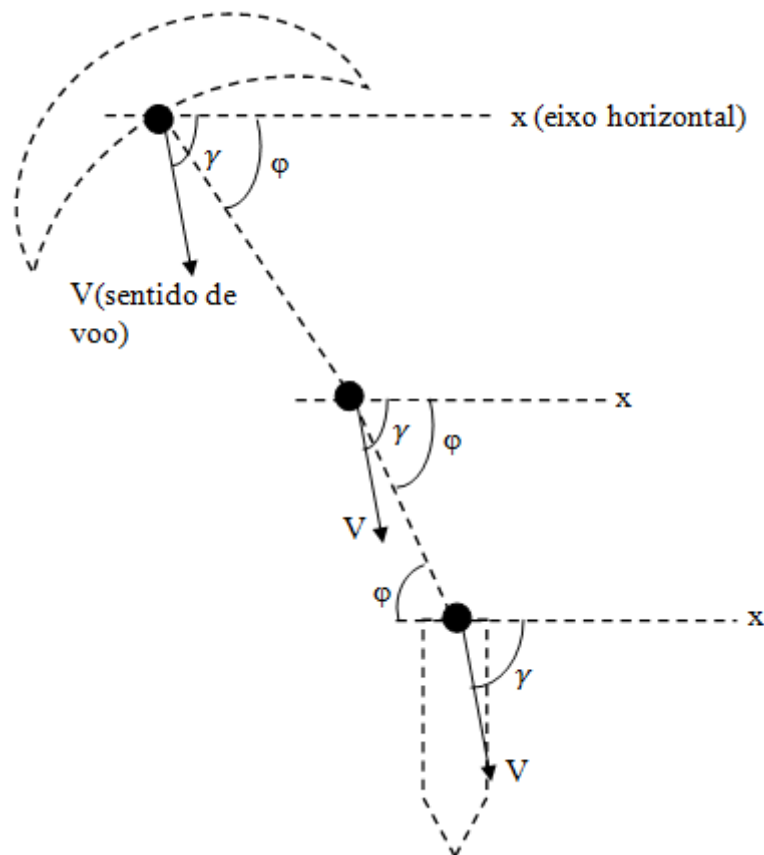


Figura 2: Diagrama dos ângulos utilizados na formulação matemática



### 3.2 Implementação Numérica

As equações (1) e (2) foram integradas em um ambiente MATLAB® utilizando como *solver* o método Runge-Kutta de 4ª ordem. A função selecionada para integração foi a **ode45**.

### 3.3 Resultados Numéricos

O processo de validação do programa desenvolvido nesta pesquisa foi dividido em duas partes, sejam elas: comparação de resultados obtidos a partir de outros códigos de simulação desenvolvidos pela Divisão de Sistemas de Defesa (ASD) e comparação com resultados de voos reais. Estes últimos foram omitidos tendo em vista que os resultados foram obtidos para artefatos bélicos, os quais são classificados. Não obstante, os resultados foram analisados pelo grupo de trabalho da ASD e demonstraram ser satisfatórios.

A simulação escolhida foi aquela utilizada no primeiro relatório deste desenvolvimento. Esta simulação compreende três eventos: queda livre, abertura do PQD e dinâmica do voo com o PQD completamente aberto. A Tabela 1 exibe as configurações de entrada e as condições iniciais adotadas na simulação. A Tabela 2 indica as condições de referência e os coeficientes de arrasto utilizados para cada um dos subsistemas. A Tabela 3 exibe as forças aerodinâmicas verificadas durante cada um dos eventos da dinâmica de voo.

Tabela 1 – Dados de entrada na simulação

PARÂMETRO	VALOR	UNIDADE
Altitude	100	m
Velocidade inicial no eixo x	0	m/s
Velocidade inicial no eixo y	0	m/s
Massa da carga	230	kg
Massa do paraquedas	6	kg
Tempo de queda	2	s

Tabela 2 – Condições de referência e coeficientes de arrasto

PARÂMETRO	VALOR	UNIDADE
$d = 0,342$ m (maior diametro) para calculo da $S_{ref}$	0,09	m <sup>2</sup>
$d = 4$ m (diametro de projeto) para calculo da $S_{ref}$ paraquedas	12,64	m <sup>2</sup>
$C_d$ da carga	0,25	-
$C_d$ do paraquedas	0,8	-

Tabela 3: Forças aerodinâmicas verificadas no processo de recuperação

Queda livre (carga)		Processo de abertura (carga+PQD)		Voo (carga+PQD totalmente aberto)	
Carga	$F_x = -D \cos \gamma$ $F_z = -D \sin \gamma$	Carga	$F_x = -T_2 \cos \varphi - D \cos \gamma$ $F_z = -T_2 \sin \varphi - D \sin \gamma$	Carga	$F_x = -T_2 \cos \varphi - D \cos \gamma$ $F_z = -T_2 \sin \varphi - D \sin \gamma$
Umbilical	-	Umbilical	$F_x = -T \cos \varphi + T_2 \cos \varphi$ $F_z = -T \sin \varphi + T_2 \cos \varphi$	Umbilical	$F_x = -T \cos \varphi + T_2 \cos \varphi$ $F_z = -T \sin \varphi + T_2 \cos \varphi$
PQD	-	PQD	$F_x = T \cos \varphi - D \cos \gamma$ $F_z = T \sin \varphi - D \sin \gamma$	PQD	$F_x = T \cos \varphi - D \cos \gamma$ $F_z = T \sin \varphi - D \sin \gamma$

A Figura 3 exibe a variação da altitude ( $H$ ), velocidade da carga ( $V$ ), velocidade horizontal ( $V_x$ ) e deslocamento horizontal ( $x$ ) em cada um dos eventos supracitados. Estes resultados foram utilizados no processo de validação do programa. O valor da velocidade terminal é de aproximadamente 20m/s. Tendo como referência este parâmetro, pode-se observar na Figura 3 que o sistema atinge a velocidade terminal, conforme esperado, na altitude de 20 m.

Como o lançamento é vertical, o sistema mantém o angulo de trajetória  $\gamma$  (gama) sempre em  $-90^\circ$  e o deslocamento horizontal é mínimo (da ordem de  $10^{-17}$ , caracterizando erro numérico). Com isso, pode-se concluir que o código é representativo quando comparado com os resultados obtidos no primeiro relatório.

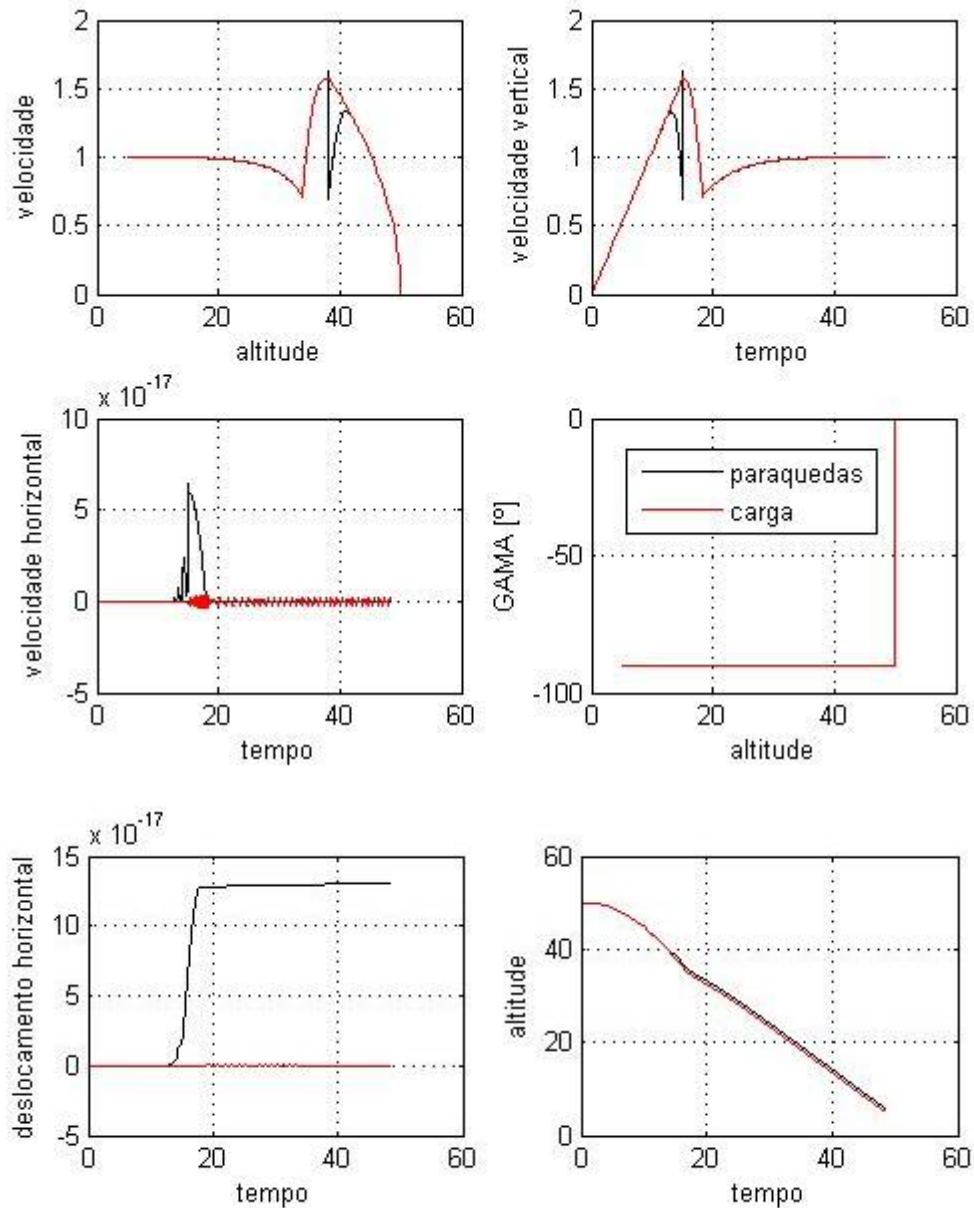


Figura 3 – Resultados da simulação do lançamento de uma carga com sistema de recuperação

A Figura 4 exibe os resultados referentes às forças sofridas pelo PQD e pela carga, variação da área do paraquedas e seu respectivo coeficiente de arrasto. Segundo a equação (11),  $S^*$  assume o valor 1 (um) quando a área final é igual a área calculada a partir do diâmetro do paraquedas. Pode-se concluir, com os resultados da Figura 4 que a simulação captura a abertura total do PQD.

A força de tração exercida sobre o umbilical e linhas de suspensão representa a força máxima no momento de abertura do paraquedas, numa ordem de grandeza coerente com as verificadas em literaturas, como ESDU(2012) e KNACKE, e no meio aeroespacial. E novamente, ao decair e atingir o equilíbrio por uma curva, caracteriza o processo de abertura do paraquedas.

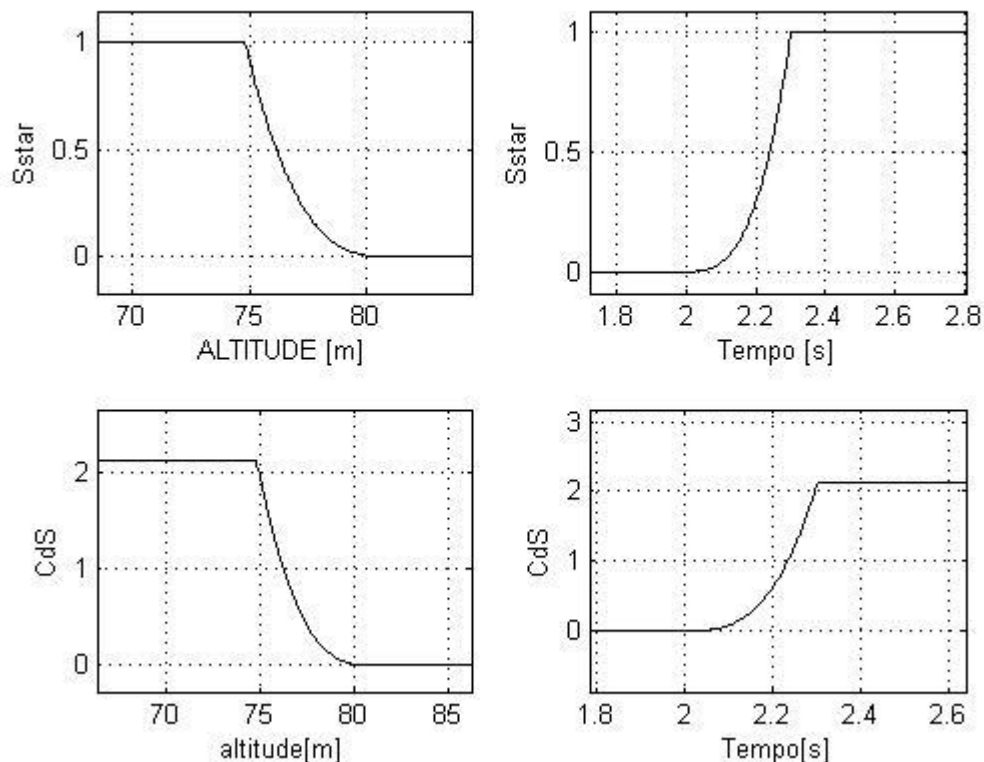


Figura 4 – Resultados estruturais.

A Figura 5 representa a deformação das linhas de suspensão e umbilical do PQD. É interessante ressaltar que o modelo matemático procura representar todas as deformações verificadas no PQD com base na deformação das linhas de suspensão e umbilical. Neste contexto, embora a deformação de 30% não seja realística (baseada em observações do voo real), este dado representa um parâmetro de referência que quantifica a deformação estrutural de todo o sistema no processo de abertura.

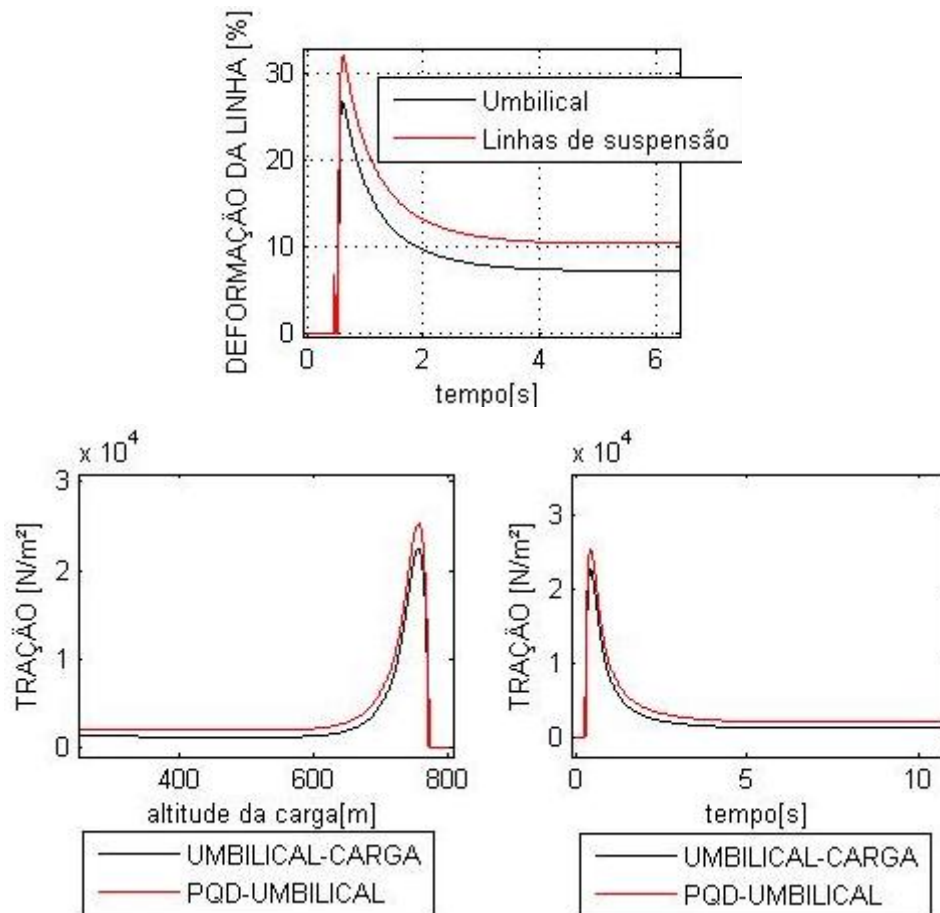


Figura 5 : Resultados estruturais

#### 4. Conclusões

Este trabalho trata do desenvolvimento do modelo matemático e implementação numérica da dinâmica do voo de um sistema de recuperação baseado em paraquedas. Tanto a metodologia como também o código computacional produzidos por este projeto constituem em ferramentas básicas que podem ser utilizadas no anteprojeto da geometria do(s) PQD(s) que deve(m) ser utilizado(s) no dimensionamento de um sistema de recuperação de cargas aeronáuticas. Foi possível concluir, a partir dos resultados produzidos neste desenvolvimento, que os resultados obtidos neste trabalho estão consistentes com a fenomenologia física esperada. Contudo, antes de se emitir um parecer efetivo, é importante implementar técnicas de identificação de parâmetros para a estimativa dos parâmetros livres que são entrada para o programa de simulação como, por exemplo, os coeficientes de arrasto dos PQD empregados e os parâmetros associados ao processo de enchimento do PQD.

É importante mencionar também que a metodologia matemática não comporta uma análise da dinâmica de voo de cargas espaciais pois ainda não foram implementados modelos atmosféricos e de gravidade que permitam análises em ambiente microgravidade. Não obstante, ressalta-se que o programa computacional foi gerado de forma modular o que facilitará sobremaneira a implementação de modelos mais complexos para os parâmetros atmosféricos e demais fenomenologias associadas ao PQD. Neste contexto, são sugeridos os seguintes trabalhos para pesquisas futuras:

- i. Inclusão de modelo atmosférico para altitudes superiores a 10 km;
- ii. Inclusão de modelos matemáticos de massa aparente no cômputo da dinâmica de abertura de PQD;
- iii. Inclusão de modelo matemático para umbilicais que apresentam mais de um elemento estrutural;
- iv. Implementar os modelos supracitados e prover melhores meios de visualização de resultados (malha do PQD: umbilical, linhas de suspensão, velame);
- v. Incluir o modelo 3DOF ( $x$ ,  $z$  e ângulo de arfagem) para a carga útil.

## 5. Divulgação dos Resultados

Os resultados obtidos por este trabalho estão em processo de descaracterização para futura publicação. Serão publicados os resultados provenientes de campanhas de ensaio em voo realizados pela ASD no processo de desenvolvimento de itens bélicos.

## Referências

- ANDERSON, J.D. **Fundamentals of Aerodynamics**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- CAVCAR, M. **International Standard Atmosphere (ISA)**, Eskisehir: Anadolu University, 2000. Disponível em: <<http://home.anadolu.edu.tr/~mcavcar/common/ISAweb.pdf>>. Acesso em: 05 jul 2015.
- ESDU, **Aerodynamics of parachutes**. The Royal Aeronatical Society, 2012.



KNACKE, T.W., **Parachute Recovery Systems Design Manual**, Naval Weapons Center NWC TP 6575, Para Publishing, Santa Barbara, CA, March 1991.

LUDTKE, W.P. **A Technique for the Calculation of the Opening-Shock Forces for Several Types of Solid Cloth Parachutes**. Naval Ordnance Laboratory, 1972 (NOLTR 72-146).

SILVA, M.G. **Dynamic Analysis of the Multistage Parachute-Store System**. 2005, 18° Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Ouro Preto, MG, Brasil.

KOLDAEV, V., SILVA, M.G., MORAES, P., **Simulation of Dynamic Parachutes**, 1999, 15° Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Vol.1, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 41-44.

DOHERR, K.F, **Parachute Flight Dynamics and Trajectory Simulation**, 2005, Sundern, Alemanha. Disponível em: <http://www.mrc.uidaho.edu/~atkinson/IPPW/IPPW-3/Parachute%20Course%20Material/10%20Parachute%20Flight%20Dynamics%20and%20Trajectory%20Simulation%20Doher.pdf>. Acesso em: 05 jul 2015.