


RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 21/09/2017.

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

LEONARDO POTOLSKI

PROJETO PRELIMINAR DE PARAQUEDAS DE USO AEROESPACIAL

Guaratinguetá - SP
2017

Leonardo Potolski

Projeto Preliminar de Paraquedas de Uso Aeroespacial

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Projetos.

Orientador:

Prof. Dr. Victor Orlando Gamarra Rosado

Coorientador:

Prof. Dr. Maurício Guimarães da Silva

Guaratinguetá - SP
2017

P864p Potolski, Leonardo.
Projeto preliminar de paraquedas de uso aeroespacial / Leonardo Potolski – Guaratinguetá, 2017.
99 f : il.
Bibliografia: f. 98

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. Victor Orlando Gamarra Rosado
Coorientador: Dr. Maurício Guimarães da Silva

1. Aerodinâmica - Modelos matemáticos 2. Paraquedas 3. Estatística - Análise I. Título


CDU 533.6 (043)

LEONARDO POTOLSKI

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: PROJETOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. VICTOR ORLANDO GAMARRA ROSADO
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA
UNESP-FEG


Prof. Dr. ROBERTO GIL ANNES DA SILVA
ITA/IEA

Março de 2017

DADOS CURRICULARES

LEONARDO POTOLSKI

NASCIMENTO	08.10.1967 – SÃO PAULO / SP
FILIAÇÃO	Jayme Potolski Fani Potolski
1987/1992	Curso de Graduação Engenharia Aeroespacial - Technion Instituto de Tecnologia de Israel
2015/2017	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista

Dedico este trabalho à minha querida mãe, pelo amor que ela sempre irradia, e ao meu pai z"l (in memoriam), pelo amor que sempre irradiou.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Victor Orlando Gamarra Rosado* que sempre me incentivou e me ajudou nos momentos difíceis,

aos professores da banca examinadora por seus comentários construtivos,

a minha querida mãe, que sempre me incentivou a estudar,

a minha querida irmã, Renata, que sempre me ajuda nos momentos mais difíceis,

e finalmente, ao meu coorientador e caro amigo, *Prof. Dr. Maurício Guimarães da Silva*, pois sem o seu incentivo, ajuda e dedicação este trabalho não teria sido concluído.

“O mais importante para desenvolvermos o nosso intelecto é saber o que perguntar, não responder!”

Provérbio Judaico

POTOLSKI, L. **Projeto preliminar de paraquedas de uso aeroespacial**. 2017, 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Campus Guaratinguetá, 2017.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é elaborar uma metodologia matemática e respectiva implementação numérica que possa ser utilizada no projeto preliminar de uma dada classe de sistemas de recuperação baseados em paraquedas. O modelo matemático permite a inclusão de requisitos de projeto em sua formulação. A metodologia considera a geometria do paraquedas na estimativa do processo de abertura, viabilizando o cálculo de parâmetros de desempenho como, por exemplo, tempo de abertura do paraquedas, sem grandes custos computacionais. O fator de choque de abertura é calculado através da simulação virtual do paraquedas no interior de um túnel de vento. A partir de análises estatísticas é possível estimar um intervalo de confiança para o fator de choque de abertura, bem como avaliar sua sensibilidade com relação ao coeficiente de amortecimento, coeficiente de enchimento do paraquedas e configuração geométrica no início do processo de abertura. A metodologia é validada por meio dos valores obtidos para o fator de choque de abertura e outros parâmetros de desempenho do paraquedas. Os resultados são considerados compatíveis com dados publicados na literatura e em artigos científicos.

PALAVRAS-CHAVE: Paraquedas. Dinâmica de voo. Fator de choque de abertura. Simulação virtual. Análise estatística.

POTOLSKI, L. **Preliminary design for aerospace parachute**. 2017, 99 p. Master thesis (MSc in Mechanical Engineering) – São Paulo State University (Unesp), School of Engineering, Guaratinguetá Campus, 2017.

ABSTRACT

The objective of the present work is to elaborate a mathematical methodology and its numerical implementation for preliminary design of a given class of parachute recovery systems. The mathematical model allows the inclusion of design requirements in its formulation. The methodology considers the geometry of the parachute in the estimation of the opening process, making feasible the calculation of performance parameters, such as parachute opening time, without large computational costs. The opening shock factor is calculated through the virtual simulation of the parachute within a wind tunnel. From statistical analyzes it is possible to estimate a confidence interval for the opening shock factor as well as to evaluate its sensitivity with respect to the damping coefficient, parachute filling coefficient and geometric configuration at the beginning of the parachute opening process. The methodology is validated by means of the values obtained for the opening shock factor and other parachute performance parameters. The results are considered compatible with data published in the literature and scientific articles.

KEYWORDS: Parachute. Dynamics of flight. Opening shock factor. Virtual simulation. Statistical analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes de um sistema de recuperação.....	20
Figura 2 – Forças na dinâmica de voo.....	29
Figura 3 – Geometria do problema de abertura do paraquedas.....	32
Figura 4 – Volume de controle do paraquedas.....	32
Figura 5 – Correlação entre C_k e R_m	40
Figura 6 – Perda de arrasto devido à esteira da carga útil.....	42
Figura 7 – Algoritmo do projeto preliminar.....	44
Figura 8 – Configuração utilizada nas simulações.....	49
Figura 9 – Variação do coeficiente de arrasto com número de Mach.....	51
Figura 10 – Diagrama de esforços sofrido pelo sistema.....	54
Figura 11 – Diagrama de forças no elemento (1): compressão.....	58
Figura 12 – Diagrama de forças no elemento (1): tração.....	59
Figura 13 – Exemplo de condição de interface.....	61
Figura 14 – Exemplo de campo de escoamento.....	63
Figura 15 – Exemplo de campo de esforços aerodinâmicos.....	64
Figura 16 – Exemplo de fitas utilizadas em umbilicais.....	65
Figura 17 – Exemplo de resultados em ensaios de tração.....	66
Figura 18 – Esforços atuantes em paraquedas na condição de “massa infinita”.....	67
Figura 19 – Condições iniciais de lançamento.....	76
Figura 20 – Dados de trajetória (dimensional).....	77
Figura 21 – Dados de trajetória (adimensional).....	78
Figura 22 – Esforços na abertura do paraquedas (106 m/s, 457 m, $R_m = 67,46$).....	79
Figura 23 – Esforços na abertura do paraquedas (59,62 m/s, 823 m, $R_m = 64,94$).....	81
Figura 24 – Dimensionamento preliminar.....	82
Figura 25 – Curva de abertura do paraquedas (59,62 m/s, 823 m, $R_m = 64,94$).....	84
Figura 26 – Nomenclatura adotada no problema.....	86
Figura 27 – Análise Estática das Deformações.....	86
Figura 28 – Força no mastro do túnel de vento: análise dinâmica ($\zeta = 0,70$, $\xi = 30$).....	87
Figura 29 – Força de tração nos elementos: análise dinâmica ($\zeta = 0,70$, $\xi = 30$).....	88
Figura 30 – Posição vertical dos elementos: análise dinâmica ($\zeta = 0,70$, $\xi = 30$).....	88
Figura 31 – Posição horizontal dos elementos: análise dinâmica ($\zeta = 0,70$, $\xi = 30$).....	89
Figura 32 – Força no mastro do túnel de vento: análise dinâmica ($\zeta = 0,70$, $\xi = 15$).....	89

Figura 33 – Fator de choque de abertura ($0,65 \leq \zeta \leq 0,75$)	91
Figura 34 – Fator de choque de abertura ($0,60 \leq \zeta \leq 0,80$)	92
Figura 35 – Fator de choque de abertura ($\xi = 30$; $t_{open} = 0,2$ s).....	93
Figura 36 – Fator de choque de abertura ($\xi = 15$; $t_{open} = 0,5$ s).....	94
Figura 37 – Interface gráfica POLYTOOL do MATLAB® ($\xi = 15$; $t_{open} = 0,5$ s).....	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Requisitos da missão	27
Quadro 2 – Parâmetros adimensionais	30
Quadro 3 – Parâmetros para dimensionamento do PQD.....	38
Quadro 4 – Parâmetros adimensionais na formulação dinâmica.....	53
Quadro 5 – Requisitos de missão para o caso estudo.....	53
Quadro 6 – Quadro de sinais para as forças nas molas	55
Quadro 7 – Análise da condição de interface	61
Quadro 8 – Síntese do equacionamento de análise dinâmica.....	69
Quadro 9 – Parâmetros de entrada da simulação dinâmica	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constante de enchimento η_{fill}	36
Tabela 2 – Estimativa de diâmetro projetado de paraquedas	37
Tabela 3 – Requisitos de missão para o caso de estudo	73
Tabela 4 – Condições de lançamento	73
Tabela 5 – Estágios de voo.....	74
Tabela 6 – Parâmetros associados à carga útil	74
Tabela 7 – Parâmetros associados ao PQD principal	74
Tabela 8 – Projeto preliminar do sistema PQD carga útil	82
Tabela 9 – Tabela parcial de cumprimento de requisitos	83
Tabela 10 – Requisitos de missão: análise dinâmica.....	84
Tabela 11 – Parâmetros de abertura do paraquedas	85
Tabela 12 – Dados dos elementos de mola.....	87
Tabela 13 – Estratégia de análise estatística.....	90
Tabela 14 – Parâmetros de enchimento ($A= 5,353 \cdot 10^{-10}$).....	92
Tabela 15 – Síntese dos resultados obtidos	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASD	Divisão de Sistemas de Defesa
CG	Centro de Gravidade
DLR	Deutschen Zentrums für Luft
EDO	Equações Diferenciais Ordinárias
ESDU	Engineering Sciences Data Unit
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MRCEP	Módulo de Recuperação de Cargas Espaciais por Paraquedas
PQD	Paraquedas

LISTA DE SÍMBOLOS

A	constante da fórmula S^*	
a_0	velocidade do som na estagnação do túnel de vento	m/s
A_p	superfície do paraquedas exposta ao escoamento	m^2
B	constante da fórmula S^*	
C_D	coeficiente de arrasto	
C_{D0}	coeficiente de arrasto nominal	
C_k	fator de choque	
d	diâmetro do paraquedas	m
D_0	diâmetro nominal do velame	m
d_b	diâmetro da base da carga útil	m
D_{open}	diâmetro de abertura do velame	m
F_{aer}	força aerodinâmica	N
$F_{aer_{close}}$	força aerodinâmica no paraquedas fechado	N
F_{max}	força máxima no sistema	N
F_{pqd}	força de arrasto no paraquedas	N
F_s	força de arrasto na carga	N
g	aceleração da gravidade	m/s^2
H	altitude	m
k	constante elástica da mola	N/m
L	comprimento de equilíbrio	m
L_s	comprimento da linha de suspensão	m
L_t	distância paraquedas-carga útil	m
L_u	comprimento do umbilical	m
m	massa do sistema	kg
M	número de Mach	
m_a	massa aparente	kg
\dot{m}_{in}	razão de massa entrando no volume de controle	kg/s
\dot{m}_{out}	razão de massa saindo no volume de controle	kg/s
m_{pqd}	massa do paraquedas	kg
m_s	massa da carga	kg
p	pressão	N/m^2
P_{dyn}	pressão dinâmica	N/m^2

R	raio da trajetória	m
r_m	raio de entrada do paraquedas	m
Rm	razão de massa	
r_p	raio projetado do paraquedas	m
S	área de referência	m^2
S^*	razão de área	
T	força elástica	N
t	tempo	s
t_{fill}	tempo de enchimento do velame	s
u	velocidade na direção x	m/s
V	velocidade do sistema de recuperação	m/s
v	velocidade na direção y	m/s
V_{cr}	velocidade crítica	m/s
V_{max}	velocidade máxima no túnel de vento	
W_{pqd}	peso do paraquedas	N
W_s	peso da carga	N
x,y,z	coordenadas cartesianas	

LETRAS GREGAS

α	nível de significância	
Δ	variação	
ε	erro do parâmetro empírico	
ζ	parâmetro empírico da hipótese de Jamison	
η_{fill}	variável de enchimento do velame	
θ	ângulo entre trajetória e horizonte	rad
λ	porosidade do tecido do velame	kg/Ns
ξ	coeficiente de amortecimento	Ns/m
ρ	massa específica do ar	kg/m ³
σ	dispersão estatística	
φ	parâmetro de redução de velocidade	

SUBSCRITOS E SOBRESCRITOS

*	relacionado ao adimensionamento
0	valor nominal
∞	escoamento não perturbado
i	pontos nodais
P	condições de projeto
PQD	paraquedas
Req	requisitos da missão
S	carga útil
SS	estado de equilíbrio
VC	volume de controle

SUMÁRIO

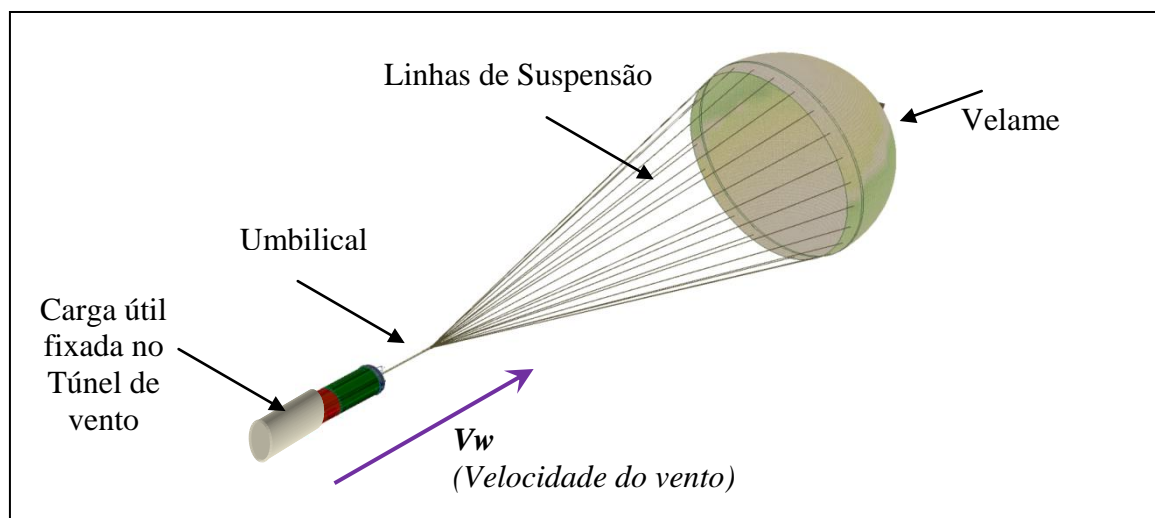
1	INTRODUÇÃO	20
1.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	21
1.2	OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	23
1.3	DIVISÃO DO TRABALHO	24
2	DIMENSIONAMENTO PRELIMINAR	25
2.1	REQUISITOS DE MISSÃO	26
2.2	HIPÓTESES ADOTADAS NA FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	27
2.3	METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO.....	28
2.3.1	Velocidade de abertura do pararquedas	28
2.3.2	Processo de abertura do paraquedas	30
2.3.3	Força de abertura do paraquedas	38
2.3.4	Dimensionamento preliminar e parâmetros de desempenho	41
2.4	SÍNTESE DO ALGORITMO DE DIMENSIONAMENTO PRELIMINAR	42
3	ANÁLISE NÃO ESTACIONÁRIA	45
3.1	HIPÓTESES ADOTADAS NA FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	47
3.2	MODELO MATEMÁTICO PARA PARAQUEDAS ELÁSTICOS.....	48
3.3	FORMULAÇÃO DA DINÂMICA DE VOO.....	49
3.3.1	Equações adimensionais	52
3.3.2	Equações constitutivas	53
3.3.3	Condições iniciais de interface	59
3.4	CAMPO DE ESCOAMENTO	62
3.5	CONSTANTES ELÁSTICAS E DE AMORTECIMENTO	64
3.5.1	Constante elástica	65
3.5.2	Constante de amortecimento	67
3.5.3	Constante de massa nodal	68
3.6	DETERMINAÇÃO DO FATOR DE CHOQUE DE ABERTURA	68
3.6.1	Definição de amostras	69
3.6.2	Teste de hipóteses	70
4	RESULTADOS	73
4.1	DINÂMICA DE VOO: REGIME PERMANENTE	75
4.2	VALIDAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA.....	75
4.3	AVALIAÇÃO DE REQUISITOS.....	77

4.4	DIMENSIONAMENTO PRELIMINAR	81
4.5	ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE CHOQUE DE ABERTURA	83
4.5.1	Estimativas do coeficiente de choque de abertura	83
4.5.2	Análise estatística	90
4.5.3	Força máxima na abertura do paraquedas	95
5	COMENTÁRIOS FINAIS	96
	REFERÊNCIAS	98
	APÊNDICE A – Ensaio de tração	99

1 INTRODUÇÃO

Embora a tecnologia empregada em sistemas de recuperação baseados em paraquedas (PQD) pareça relativamente simples, tendo em vista o pequeno número de subsistemas envolvidos no processo, de fato, tal desenvolvimento é extremamente complexo. Trata-se de um sistema cujo projeto envolve diferentes áreas de atuação e cada uma das quais é interligada às demais. Dentre estas áreas, destacam-se: (i) Aerodinâmica – descreve o campo de escoamento em torno do sistema PQD e carga útil. Trata-se de um escoamento não estacionário tendo em vista o movimento relativo do PQD durante a dinâmica do voo; (ii) Dinâmica do Voo – descreve as posições e velocidades do PQD no espaço durante o voo atmosférico, assim como as atitudes de ambos subsistemas: PQD e carga útil; (iii) Dinâmica Estrutural – descreve todas as tensões e deformações sofridas pelas linhas de suspensão, umbilical e velame do PQD envolvidas durante o voo do sistema de recuperação e (iv) Aeroelasticidade – descreve o acoplamento fluido-estrutura verificado durante o voo do sistema. A partir destes estudos, é possível estimar a frequência natural do sistema de recuperação, níveis de amortecimento e estabilidade. Neste contexto, a resolução do modelo matemático que contempla toda a fenomenologia do processo de recuperação é extremamente complexo e de resolução inviável em termos de custo computacional na fase de projeto preliminar do sistema de recuperação, Figura 1.

Figura 1 – Componentes de um sistema de recuperação



Fonte: Autoria própria

O projeto de sistemas de recuperação utiliza figuras de mérito que procuram representar os requisitos de projeto definidos para o PQD em determinadas aplicações, definidos como requisitos de missão. Considere, por exemplo, a recuperação de um veículo aeronáutico tal

qual um ultraleve, SILVA et al. (2005). Esta recuperação deve satisfazer requisitos que estão associados diretamente à sobrevivência dos tripulantes da aeronave. Neste contexto, as principais figuras de mérito dizem respeito aos esforços de abertura do PQD no momento da recuperação e a velocidade com que o veículo atinge o solo. Já, na recuperação de um veículo espacial, dentre os requisitos de missão, destacam-se aqueles associados à altitude em que serão realizados os experimentos. Desde que se trata de experimentos em micro gravidade, é de se esperar que as altitudes envolvidas sejam da ordem de quilômetros e, neste caso, o processo de recuperação deverá envolver mais de uma fase. Inúmeros outros exemplos podem ser citados e para cada uma destas condições deverão existir parâmetros de projeto (figuras de mérito), previamente aceitas pelo grupo de desenvolvimento, que direcionarão o projeto do sistema de recuperação.

Existem diferentes metodologias de projeto preliminar tendo em vista os diferentes requisitos de missão que devam ser satisfeitos para cada projeto. Contudo, todos os projetos adotam as mesmas formulações matemáticas em seu desenvolvimento. A referência KNACKE (1991) relaciona inúmeros dados de projetos e as metodologias comumente utilizadas no projeto e desenvolvimento de sistemas de recuperação. A referência ESDU-09012 (2009) sintetiza várias informações provenientes de referências consagradas no estudo da aerodinâmica de paraquedas, dentre estas o próprio KNACKE (1991), e disponibiliza na forma de uso prático em projeto.

5 COMENTÁRIOS FINAIS

Este trabalho apresentou uma metodologia de dimensionamento de PQDs, de uso aeroespacial, que permite a inclusão de várias figuras de mérito normalmente utilizadas na definição de requisitos de projeto de sistemas de recuperação baseados em paraquedas. Dentre estas figuras de mérito, destacam-se: velocidade crítica, força máxima verificada no processo de abertura, tempo de voo e tempo de abertura de PQD. Cada um destes parâmetros pode ser incluso no projeto de forma simples o que permite a obtenção de diferentes configurações que cumpram os mesmos requisitos de projeto.

Ressalta-se que tanto os modelos como os métodos matemáticos utilizados na resolução do problema foram baseados apenas em métodos de engenharia. Esta característica foi constante em todo o trabalho. O objetivo principal foi o desenvolvimento de modelos matemáticos que permitam o dimensionamento aerodinâmico completo de sistemas de recuperação sem grandes custos computacionais.

A metodologia foi implementada numericamente por meio de uso da plataforma MATLAB®. Esta opção foi adotada em função de inúmeros *toolboxes* disponibilizados pela referida plataforma e pelo grupo de trabalho. O *toolbox* POLYTOOL, em particular, foi adaptado para ser utilizado no programa de análise estatística do fator de choque de abertura, desenvolvido neste trabalho. O programa computacional foi desenvolvido no formato modular. Neste contexto, foi possível o uso de muitas das funções já desenvolvidas pelo grupo de trabalho. Dentre estas se destacam o modelo atmosférico, o modelo de dinâmica de voo 2dof (dois graus de liberdade) e a análise estatística. O uso de códigos de engenharia já validados facilitou, sobremaneira, o processo de validação da implementação numérica da metodologia apresentada.

Neste trabalho foi apresentado um exemplo de dimensionamento completo de um PQD para a recuperação de cargas aeronáuticas em elevadas velocidades subsônicas. A partir deste exemplo foram identificados, no formato tabular, todos os dados necessários para o dimensionamento preliminar de forma a informar ao projetista sobre todas as necessidades de projeto, de forma rápida e instrucional. Neste exemplo também foi ressaltada a sequência de desenvolvimento do projeto. Não existe uma sequência generalizada desenvolvida para o projeto de sistemas de recuperação. Na medida em que são realizados os cálculos, são executadas também as tomadas de decisão. Estas são baseadas na tabela de cumprimento de requisitos. Uma das contribuições deste trabalho foi a inclusão do nível de significância (α) no conjunto de requisitos de projeto. Esta característica de projeto permite quantificar os

esforços de abertura com base em um intervalo de confiança. De fato, este é um dos principais parâmetros de projeto. É com base neste valor que são selecionados os materiais e processos de confecção de PQD. Quanto maior o nível de confiança, maiores serão os custos de projeto. Portanto, trata-se de um parâmetro que deverá ser definido em nível gerencial.

Os resultados obtidos podem ser considerados satisfatórios desde que estão consistentes com PQD utilizados em aplicações convencionais (PQD de “prateleira”) cujos dados estão disponibilizados em referências como ESDU-09012. Exemplificando podemos citar dados de ESDU-09012, Tabela 2, onde o paraquedas hemisférico possui fator de choque de abertura $C_k = \sim 1,6$, comparado com o valor obtido na simulação deste trabalho (apresentado na Figura 33), onde $C_k = 1,5699 \pm 0,021813$ (para $\zeta = 0,70$), ou seja, valor que varia de 99,4% a 96,8% do valor de referência $C_k = \sim 1,6$. Desde que não foi considerado o problema da interação fluido-estrutura, não obstante, a ferramenta matemática poderá se tornar bastante promissora quando aplicada de forma integrada com técnicas de análises estatísticas e resultados experimentais disponíveis na literatura técnica da área.

Como sugestões para trabalhos futuros, destacam-se as seguintes atividades:

- i. Testar diferentes modelos de perfis de velocidade no processo de abertura de PQDs;
- ii. Utilizar o modelo matemático de abertura no formato não linear. Ou seja, resolver o sistema de equações da dinâmica do PQD simultaneamente com o modelo de abertura;
- iii. Aplicar o método estatístico na análise de estabilidade do PQD no interior do túnel de vento virtual;
- iv. Desenvolver um gerador de malhas para a definição automática da geometria do PQD;
- v. Elaborar um modelo matemático não linear para a constante elástica. Esta inclusão viabilizará o uso de materiais comumente utilizados na confecção de PQDs na metodologia de dimensionamento preliminar;
- vi. Utilizar a formulação dinâmica de dois corpos no dimensionamento preliminar. Esta inclusão permitirá a avaliação do movimento da carga útil durante o processo de recuperação.

REFERÊNCIAS

BOWKER, A.H., LIEBERMAN, G.J., **Engineering Statistics**, Second Edition, Prentice-Hall, New Jersey, EUA, pp.641, 1972.

EWING, E. G., BIXBY, H. W. and KNACKE, T. W.; **Recovery Systems Design guide**; pp. 254 – 257; report AFFL-TR-78-151. Submitted to: Air Force Flight Dynamics Laboratory, AF Wright Aeronautical Laboratories, Wright-Patterson Air Forced Base, December 1978.

ESDU-09012, **Aerodynamics of Parachutes**, 2009.

K. E. FRENCH. “INFLATION OF A PARACHUTE”, **AIAA Journal**, Vol. 1, No. 11 (1963), pp. 2615-2617.

JAMISON, L.R., A Method for Calculating Parachute Opening Forces for General Deployment Conditions, **AIAA-1966-1501**.

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

KOLDAEV, V. and MORAES, P., **Parachute Recovery System: Design and Testing – An Introductory Course**, Apostila do Curso apresentado no DCTA e INPE, São José dos Campos, 1998.

KOLDAEV, V., SILVA, M.G., MORAES, P., Simulation of Dynamic Parachutes, 1999, **Proceedings of the 15th Brazilian Congress of Mechanical Engineering**, Vol.1, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 41-44.

POTVIN, J.; “On Opening Shock Factor - Mass Ratio Universality”, **Journal of Aircraft** (2006) .

POTVIN, J., and PEEK, G.; **Parachute Inflation I: General Phenomenology**; lecture delivered at the 2006 H.G. Heinrich Parachute Systems Short Course; May 15 – 19, 2006

SILVA, E.F.Jr., **SIRAC - Sistema de Recuperação de Aérea Carga**, Patente Requerida, Grupo FELIX Marcas e Patentes(Procurador), 2003.

SILVA, M.G., SILVA, E.F. Jr., de OLIVEIRA NETO, P.J., Dynamic Analysis of the Multistage Parachute Store System, 2005, **Proceedings of the 18th Brazilian Congress of Mechanical Engineering**, Ouro Preto, MG, Brazil.

WOLF, D., Opening Shock, **AIAA-99-1702**, 15th CEAS/AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference, Toulouse, France, 8-11 June 1999.

WOLF, D., A Simplified Dynamic Model of Parachute Inflation, **Journal of Aircraft**, Vol 11, No. 1, 1973.

WOLF, D., **The Dynamic Stability of Nonrigid Parachute and Payload System**, University of Rhode Island, PhD Thesis, 1968.