

Estimativa Computacional de Letalidade de uma Cabeça de Guerra de Fragmentação contra um Alvo

João Paulo Dias, Paulo Cesar Miscow Ferreira

Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE)

Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 – Vilas das Acácias – CEP 122228-904 - São José dos Campos - SP, Brasil

Resumo — O objetivo deste trabalho é apresentar um programa de simulação para análise da letalidade de uma cabeça de guerra e da vulnerabilidade de um alvo. Dentro deste escopo, serão apresentados os principais pontos do desenvolvimento do programa de simulação assim como os resultados do programa. A cabeça de guerra modelada é de fragmentos pré-formados e o alvo modelado possui componentes críticos e geometria externa convexa. Na simulação, os pontos de detonação, da cabeça de guerra são amostrados segundo técnicas de Monte Carlo. Os resultados permitem avaliar tanto o desempenho da cabeça de guerra quanto à sua letalidade, como a vulnerabilidade do alvo quanto aos seus componentes críticos e áreas ou faces em que é mais vulnerável.

Palavras-chave — Cabeça de Guerra, Simulação de Monte Carlo, Letalidade, Vulnerabilidade.

I. INTRODUÇÃO

O melhor método para avaliar a letalidade de um armamento e a vulnerabilidade de um alvo consiste na realização de ensaios em escala real. Entretanto, a realização de ensaios é extremamente dispendiosa em recursos financeiros, tempo de preparação e tempo de análise de resultados. Além disso, muitas vezes não é possível fazer uso de um alvo real, como, por exemplo, uma aeronave de combate. Assim, a utilização de programas de computador que simulem as condições reais de encontro armamento x alvo é uma alternativa que deve ser considerada. Atualmente, existem diversos softwares voltados para a avaliação de letalidade/vulnerabilidade, tais como AVAL, UWM, AJEM, SHAZAM, JSEM, UVLAS e TARVAC. Entretanto, uma característica quase comum a todos eles é o acesso restrito. A restrição ao acesso é justificada pelos seguintes motivos: primeiro, porque a modelagem de uma cabeça de guerra revela dados de desempenho do armamento e, segundo, a modelagem do alvo mostra detalhes constitutivos do alvo. Ambas as informações podem resultar em alguma vantagem competitiva a um eventual inimigo.

No âmbito do COMAER, a Divisão de Sistemas de Defesa (ASD), do Instituto de Aeronáutica e Espaço, tem como uma de suas atribuições a avaliação de armamentos de interesse da Força Aérea Brasileira. No tocante à análise de letalidade, desde 2008, a ASD tem utilizado o software AVAL (*Assessment of Vulnerability and Lethality*), de procedência sueca, e o software SPLIT-X, de procedência alemã. O

AVAL oferece a possibilidade de modelagem de armamentos, em termos de seus mecanismos de dano (sopro, fragmentação e penetração) e de alvos com todas suas características constitutivas e relações funcionais. O SPLIT-X é um software que permite a modelagem de cabeça de guerra, principalmente as do tipo de fragmentação, gerando arquivos de saída prontos para utilização no AVAL.

Das atividades de modelagem, a que se reveste de grande dificuldade é que trata da modelagem do alvo, uma vez que esta deve considerar todos os elementos, críticos ou não, suas constituições físicas, modos de falha e relações funcionais (árvore de falha). Portanto, é uma atividade que exige, além de experiência, conhecimentos em diversas áreas de engenharia.

Assim, com o objetivo de desenvolver parte dessas habilidades, foi elaborado um programa de simulação para análise de letalidade e vulnerabilidade, em um nível simplificado. Primeiramente, esse programa foi apresentado como Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Extensão em Engenharia de Armamento Aéreo (CEEAA), realizado por Dias [2009].

Particularmente quanto ao presente artigo, o objetivo é apresentar o programa de simulação, as técnicas utilizadas para a modelagem do armamento e do alvo, e os resultados de algumas simulações.

II. CARACTERÍSTICAS DO MODELO

Antes de apresentar as características do modelo propriamente dito, é conveniente introduzir o conceito de neutralização, amplamente usado em análises de letalidade/vulnerabilidade, que é a capacidade do armamento, por intermédio dos seus mecanismos de dano, infringir danos ao alvo de modo a interferir na capacidade deste de cumprir total ou parcialmente sua missão.

Conforme a literatura [10], no que se aplicam as aeronaves, os graus de neutralização são classificados da seguinte forma:

- *Attrition Kill* - Medida do grau de dano de uma aeronave que a deixa incapacitada de ser reparada, ou mesmo é não economicamente viável de ser reparada. O intervalo de tempo é entre o dano causado e aeronave perdida é o parâmetro principal, que resulta na seguinte subclassificação:
 - KK “*Kill*”: o dano causado resulta na completa desintegração do alvo imediatamente após ser atingido pelos fragmentos (falha catastrófica);

- K “Kill”: o dano causado pelos fragmentos resulta na total perda de controle dentro de trinta segundos;
- A “Kill”: o dano causado pelos fragmentos resulta na perda de controle dentro de cinco minutos;
- B “Kill”: o dano causado pelos fragmentos resulta na perda de controle dentro de trinta minutos.
- *Mission Abort Kill* - O dano causado pelos fragmentos resulta na perda de controle da aeronave antes que esta complete sua missão, mas não é suficiente para a perda total da aeronave.
- *Forced Landing Kill* - Categoria de dano de helicóptero em que o dano força o piloto a pousar porque ele recebeu alguma indicação de dano como luz vermelha, alerta de falta de combustível, dificuldade de controle, ou perda de potência.

No modelo usado na construção do programa, considerou-se o grau de neutralização em que dado que o alvo foi atingido e danificado, é neutralizado, isto é, considerou-se grau *Attrition Kill*, nível KK.

A cabeça de guerra foi concebida da seguinte forma:

- Cilíndrica: Interior de um cilindro preenchido com alto explosivo.
- Fragmentos pré-formados.
- Espoleta: Não foi modelada. Considerando então como 100% de probabilidade de funcionamento da mesma.
- Parâmetros considerados:
 - Forma de fragmento;
 - Massa do fragmento;
 - Número de fragmentos por anel ou seção transversal;
 - Constante de *Gurney*;
 - Comprimento da cabeça de guerra;
 - Número de seções transversais (ou número de anéis) da cabeça de guerra;
 - Velocidade de detonação do explosivo; e
 - Diâmetro da carga explosiva.

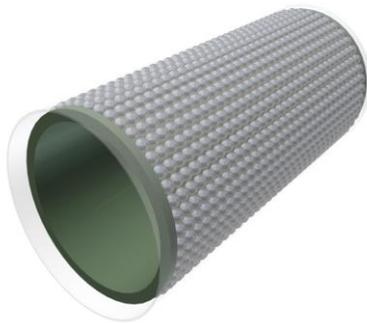


Fig. 1. Representação esquemática de uma cabeça de guerra com fragmentos pré-formados

Em termos estruturais, o alvo foi modelado da seguinte forma:

- Superfícies externas são triangulares, metálicas, com espessura constante e que resultam em uma geometria convexa.
- Resistência à penetração e perfuração em cada superfície e chapa equivalente para cada

componente crítico é dada por equações empíricas denominadas equações de *Thor* [14].

Quanto aos seus componentes, o alvo é constituído apenas por componentes que, por simplificação, são tratados como chapas metálicas, de tal forma que se possam utilizar as já mencionadas equações de *Thor*. Cada componente possui seus modos de falha, sendo que cada modo de falha pode resultar de dois critérios: número de fragmentos que atingem o componente e/ou a energia dos fragmentos. A relação funcional entre os componentes críticos é dada pela árvore de falhas do alvo.

III. CARACTERÍSTICAS DA SIMULAÇÃO

A simulação é realizada definindo-se primeiramente a geometria do encontro que é expressa pela condição de aproximação armamento x alvo. Para tanto, é estabelecida a face do alvo que será atacada e as coordenadas do ponto de detonação da cabeça de guerra, bem como a orientação angular da cabeça de guerra em relação à face atacada. Em seguida, são estabelecidos os desvios-padrões das coordenadas do ponto de detonação, dois a dois, isto é, xOy , xOz , e yOz , admitindo-se que as variações obedecem a uma distribuição normal.

A modelagem do movimento dos fragmentos é baseada em equações experimentais [6], tanto para o módulo da velocidade de ejeção (equação de *Gurney*), quanto para os ângulos de ejeção em relação ao eixo longitudinal da cabeça de guerra (relações de *Shapiro*). A velocidade do fragmento varia em função da distância do ponto de detonação da cabeça de guerra, com o coeficiente de arrasto dado de acordo com a referência [6], com a massa do fragmento, com a densidade do ar e com velocidade inicial dada pela equação de *Gurney*. A trajetória dos fragmentos é considerada linear e unidimensional, sendo desconsiderados efeitos gravitacionais.

O vôo de cada fragmento é analisado até que este pare por ter atingido um superfície do alvo e/ou componentes, ou por ter percorrido uma distância na qual não provocará mais nenhum dano ao alvo. A determinação da neutralização do alvo é dada pela aplicação de álgebra booleana na árvore de falha elaborada para o alvo. Ao final, tem-se a informação consolidada dos danos que a cabeça de guerra infringiu ao alvo. Este procedimento é realizado para cada ciclo de Monte Carlo. Ao final da simulação, isto é, quando são realizados os “N” ciclos de Monte Carlo previamente definidos, obtêm-se as probabilidades dos modos de falha, e por conseqüência, a probabilidade dos componentes serem atingidos e falharem e a probabilidade de neutralização do alvo que, no presente artigo, é uma aeronave simplificada. Nas figuras 2 e 3 abaixo, são ilustradas as trajetórias dos fragmentos que atingem a superfície externa do alvo.

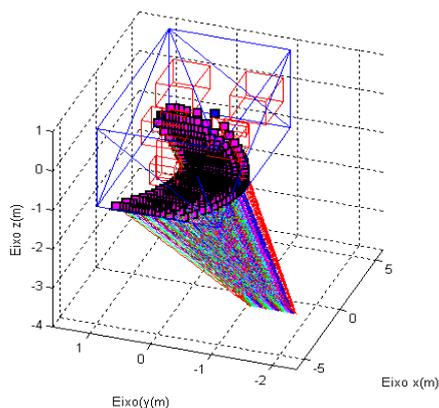


Fig. 2. Trajetória e pontos de encontro dos fragmentos que atingem o alvo

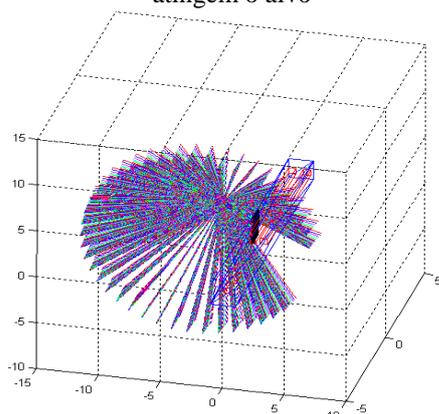


Fig. 3. Trajetória de todos os fragmentos ejetados da cabeça de guerra e pontos de chegada dos fragmentos no alvo

A seguir, são apresentadas as características da cabeça de guerra utilizada, e o alvo e seus componentes.

IV. CABEÇA DE GUERRA

As tabela 1, 2 e 3 abaixo apresentam os dados da cabeça de guerra que foram utilizados na modelagem.

TABELA I DADOS DOS FRAGMENTOS DA CABEÇA DE GUERRA MODELADA

Tipo	Esférico
Material	Tungstênio
Densidade (kg/cm ³)	18,1
Diâmetro da esfera (mm)	10
Massa do fragmento (g)	9,48

Tabela II DADOS DO EXPLOSIVO DA CABEÇA DE GUERRA MODELADA

Material	PBXN5
Densidade (kg/cm ³)	1,83
V _d (ft/s)	28742
Constante de Gurney(g)	9544

Tabela III DADOS GEOMÉTRICOS DA CABEÇA DE GUERRA MODELADA

Comprimento (mm)	320
Diâmetro externo (mm)	160
Diâmetro interno (mm)	133
Espessura do invólucro metálico (mm)	2
Espessura da carenagem (mm)	1,5
Nº de anéis de esferas	32
Nº de fragmentos por anel	46

V. ALVO

O alvo, representado na fig. 4, apresenta geometria poliédrica, com 12 superfícies triangulares externas e é constituído de 8 componentes críticos, que também apresentam geometrias poliédricas com 12 superfícies triangulares (2 triângulos por face). Os componentes críticos do alvo são

- 1 piloto
- 1 conjunto de equipamentos eletrônicos
- 2 bombas de combustível elétricas
- 2 tanques de combustível
- 2 motores

Na tabela 4 são dadas as dimensões do alvo e de seus componentes.

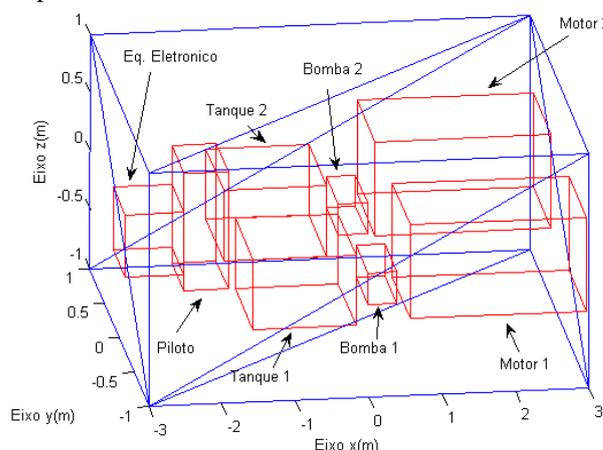


Fig. 4. Representação geométrica do alvo

TABELA IV DIMENSÕES DOS COMPONENTES DO ALVO E SUAS POSIÇÕES EM RELAÇÃO AO CENTRO DO ALVO

Componentes	Dimensão(m)			Posição em relação ao centro do alvo(m)		
	x	y	z	x	y	z
Alvo	6	2	2	0	0	0
Piloto	0,3	0,2	0,5	-2,7	0,8	0
Eq. Eletrônico	0,4	0,2	0,27	-2,6	0	-0,1
Bomba 1	0,2	0,2	0,13	0,3	-0,5	-0,25
Bomba 2	0,2	0,2	0,13	0,3	0,5	-0,25
Tanque 1	0,7	0,3	0,3	-0,8	-0,5	-0,2
Tanque 2	0,7	0,3	0,3	-0,8	0,5	-0,2
Motor 1	1,2	0,3	0,3	1,8	-0,6	0
Motor 2	1,2	0,3	0,3	1,8	0,6	0

Obs: As dimensões são simétricas em relação ao centro do componente.

Para aplicação dos critérios de falha, o alvo e seus componentes são tratados como se fossem chapas metálicas. Na tabela 5, são apresentadas as correspondências entre cada componente e a chapa metálica que o representa.

TABELA V EQUIVALENTE EM CHAPAS METÁLICAS PARA OS COMPONENTES DO ALVO

Componentes do Alvo	Material	Espessura (mm)
Superfícies Externas do alvo	Alumínio	1,57
Piloto	Alumínio	0,57
Eq. Eletrônico	Alumínio	1
Bombas	Alumínio	1,57
Tanques	Alumínio	2
Motores	Alumínio	2,5

Obs: Alumínio considerado é o 2023 T3 Al.

A relação de interdependência entre os componentes críticos do alvo está representada na figura 5.

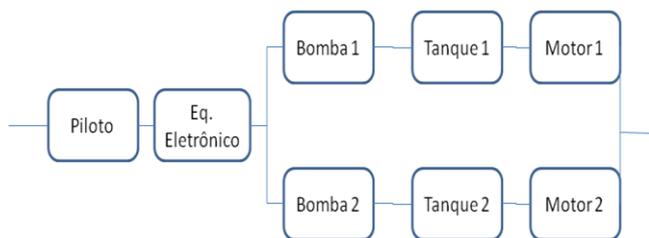


Fig. 5. Diagrama de blocos dos componentes críticos do alvo

Os modos de falha do alvo são os seguintes:

- Componente 1 (Piloto): Piloto Morto, Piloto Ferido
- Componente 2 (Equipamento Eletrônico): Equipamento eletrônico danificado
- Componente 3 (Bomba elétrica 1): Equipamento eletrônico danificado
- Componente 4 (Bomba elétrica 2): Equipamento eletrônico danificado
- Componente 5 (Tanque de Combustível 1): Tanque de combustível 1 vazando, tanque de combustível 1 pegando fogo.
- Componente 6 (Tanque de Combustível 2): Tanque de combustível 2 vazando, tanque de combustível 2 pegando fogo.
- Componente 7 (Motor 1): Motor 1 danificado.
- Componente 8 (Motor 2): Motor 2 danificado.

Nota-se que os modos de falha foram considerados bem simplificados, já que este trabalho trata-se de um estudo simplificado.

Os critérios para os modos de falha considerados para o alvo são os apresentados na tabela 6. Por exemplo, para que a bomba seja danificada será necessário que ela seja atingida por dois fragmentos.

TABELA VI EQUIVALENTE EM CHAPAS METÁLICAS PARA OS COMPONENTES DO ALVO

Modos de Falha	Energia (lb.ft)	Qtd de Fragmentos
Piloto morto	58	2
Piloto ferido	-	1
Eq. Eletrônico danificado	-	2
Bomba danificada	-	2
Tanque vazando	-	2
Tanque pegando fogo	-	3
Motor danificado	-	3

A árvore de falha é a seguinte:

- Evento Elementar 1 - Piloto morto
- Evento Elementar 2 - Piloto Ferido
- Evento Elementar 3 - Equipamento eletrônico não funciona
- Evento Elementar 4 - Bomba elétrica 1 danificada
- Evento Elementar 5 - Bomba elétrica 2 danificada
- Evento Elementar 6 - Tanque de combustível 1 vazando
- Evento Elementar 7 - Tanque de combustível 1 pegando fogo
- Evento Elementar 8 - Tanque de combustível 2 vazando
- Evento Elementar 9 - Tanque de combustível 2 pegando fogo
- Evento Elementar 10 - Motor 1 danificado
- Evento Elementar 11 - Motor 2 danificado
- Sub Evento 1 - Piloto Eliminado
- Sub Evento 2 - Tanque de combustível 1 vazando ou Tanque de combustível 1 pegando fogo
- Sub Evento 3 - Tanque de combustível 2 vazando ou Tanque de combustível 2 pegando fogo
- Sub Evento 4 - Bomba elétrica 1 danificada ou Tanque de combustível 1 vazando ou Tanque de combustível 1 pegando fogo ou Motor 1 danificado.
- Sub Evento 5 - Bomba elétrica 2 danificada ou Tanque de combustível 2 vazando ou Tanque de combustível 2 pegando fogo ou Motor 2 danificado.
- Sub Evento 6 - Sistema de combustível e de empuxo danificados.
- Evento Topo - Alvo Neutralizado.

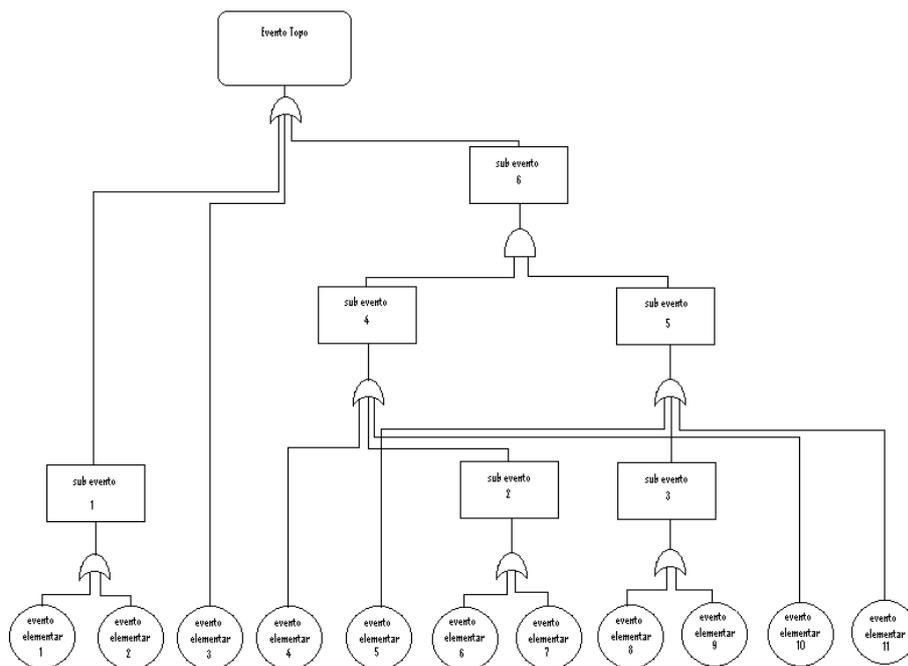


Fig. 6. Árvore de Falha do Alvo

VI. RESULTADOS

Nas simulações realizadas, o eixo de ataque (direção e sentido de ataque) é 'y-', a orientação da cabeça de guerra em relação ao eixo é de $(\pi/2, 0, 0)$, o ponto de detonação é a extremidade da cabeça de guerra oposta ao sentido e direção de ataque, a velocidade do míssil é de 500 m/s e o número de fragmentos é de 1.478.

TABELA VII PARÂMETROS DE ENTRADA DA SIMULAÇÃO

Caso	Nº de ciclos	Miss distance	Desvio Padrão eixo x	Desvio Padrão eixo z
1	50	10	1.5	1.5
2	100	10	1.5	1.5
3	10	5	1.5	1.5
4	50	5	1.5	1.5
5	100	5	1.5	1.5
6	200	5	1.5	1.5
7	300	5	1.5	1.5
8	1000	5	1.5	1.5
9	1000	5	1.5	1.5
10	3000	5	1.5	1.5
11	5000	5	1.5	1.5

TABELA VIII DADOS DE LETALIDADE DOS FRAGMENTOS

Casos/Saída	$P_{k/h}$	Nº médio de fragmentos	Vel. média do fragmento (m/s)
1	0.009	11.8	1831.9
2	0.026	15.2	1829.6
3	0.0135	51.5	1911.5
4	0.0185	68.7	1912.4
5	0.0171	66.7	1912.3
6	0.0181	68.5	1911.7
7	0.0180	67.4	1911.8
8	0.0170	69.2	1911.4
9	0.0170	69.2	1911.4
10	0.0169	68.2	1911.9
11	0.01685	68.5	1911.7

Obs: $P_{k/h}$ – Probabilidade média de um fragmento neutralizar o alvo dado que esse é atingido e é obtida por $P_d = 1 - e^{-N_{ciclos} * P_{k/h}}$.

Abaixo, na fig. 7, têm-se os pontos de detonação da cabeça de guerra para o caso 5.

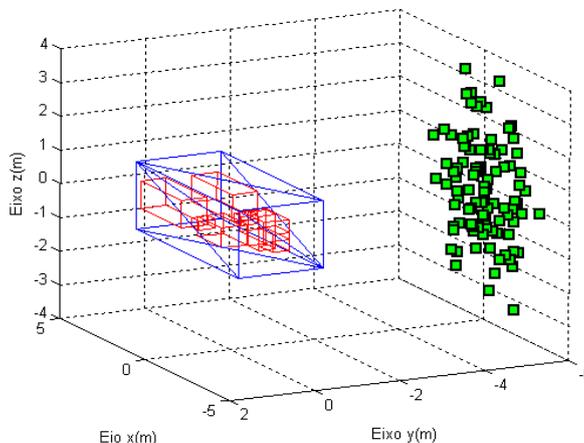


Fig. 7. Pontos de detonação para o Caso 5

A fig. 8 apresenta graficamente o resultado das probabilidades de ocorrência do evento topo e de ocorrência do componente que mais falhou. Percebe-se convergência de P_d para valores próximos a 69% e de P_{c1} para valores próximos a 42%.

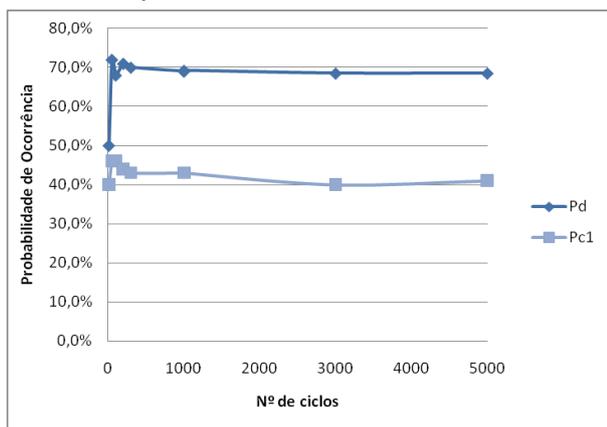


Fig. 8. Curva de convergência de Probabilidade de Ocorrência do Evento Topo e do Componente que mais Falhou (Componente 1)

O gráfico apresentado na fig. 9 mostra a variação do desvio padrão da média da probabilidade do evento topo em função do número de ciclos de Monte Carlo, mostrando a convergência a zero à proporção que se aumenta o número de ciclos. Este comportamento indica que os resultados apresentados são coerentes.

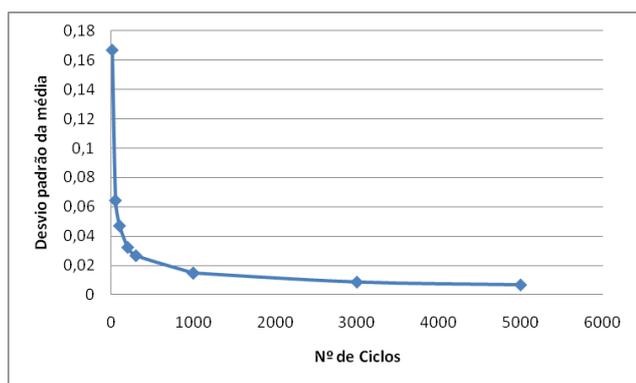


Fig. 9. Curva de convergência do desvio padrão da média da probabilidade de ocorrência do Evento Topo em função do número de ciclos

VII. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou os resultados de um programa de simulação para análise de letalidade e vulnerabilidade, utilizando o método de Monte Carlo. O programa consiste da modelagem de um alvo simplificado, definido por seus componentes críticos, estabelecendo as características constitutivas dos elementos, as relações funcionais entre si (árvore de falha) e os critérios de falha. A cabeça de guerra foi modelada segundo a teoria já disponível em literatura, tendo-se optado por fragmentos pré-formados (esferas) para facilitar a modelagem. Entretanto, é importante observar que cabeças de guerra com fragmentos pré-formados (esferas, cubos, bastões,

etc) estão presentes na grande maioria dos mísseis ar-ar da atualidade.

Em termos de resultados, observou-se que houve convergência do desvio padrão da média da probabilidade do evento topo em função do aumento do número de ciclos de Monte Carlo, indicando que os resultados apresentados são coerentes.

Evidentemente, como já mencionado, no momento programa é simplificado. Entretanto, demonstrou-se que é possível construir um programa bem mais complexo, que compreenda e permita a modelagem de alvos diversos, com todos os seus detalhes constitutivos e funcionais, bem como efeitos terminais como penetração, perfuração e sopro. Porém, para a construção de tal ferramenta, torna-se necessário o envolvimento de diversas áreas de engenharia, face à natureza sistêmica dos alvos.

Finalizando, o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para análise de letalidade e vulnerabilidade deve ser visto como prioridade pela FAB, face à economia de recursos proporcionada pela realização de um menor número de ensaios de avaliação, às restrições ao acesso de tais ferramentas no mercado externo e ao caráter sigiloso das informações envolvidas.

REFERÊNCIAS

- [1] ESTEVES, Carlos Henrique Machado Silva Esteves. Avaliação de Danos em Pessoas Causados pela Fragmentação Natural de Artefatos Bélicos, 2008.
- [2] ESTEVES, Carlos Henrique Machado Silva Esteves. Avaliação da Letalidade de uma Cabeça de Guerra com Fragmentos Pré-Formados, 2008.
- [3] McCLESKEY, Frank McCleskey. Quantity-Distance Fragment Hazard Computer Program, 1988.
- [4] BUC, Steven M. Buc. A Simplified Stochastic Munition Lethality and Target Vulnerability Computer Model, 1990.
- [5] TEIXEIRA, Adilson de Jesus Teixeira. Atraso Ótimo de Iniciação de uma Cabeça de Guerra com Distribuição Anisotrópica de Fragmentos, 1989.
- [6] FERREIRA, Paulo Cesar Miscow. Relatório de Engenharia Análise de Letalidade da Cabeça-de-Guerra do Míssil MAA-1 A/B.
- [7] FERREIRA, Paulo Cesar Miscow. Notas de aula de FQ104 – Letalidade, 2009.
- [8] FERREIRA, Paulo Cesar Miscow. Notas de aula de FQ - 102 – Armamentos e Munições Aéreas, 2009.
- [9] LLOYD, Richard M. Lloyd. Conventional Warhead Systems Physics and Engineering Design.
- [10] BALL, Robert E. Ball. The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design, 2003.
- [11] Target Description Manual for vulnerability/lethality model AVAL, 2002.
- [12] Help Software PRODA – Pacote de Fragmentação.
- [13] AZEVEDO, Irany de Andrade Azevedo. Apostila do Curso EA-160 – Confiabilidade de Componentes e Sistemas, 2009.
- [14] VICTOR, Andrew C. Victor. Warhead Performance Calculations for Threat Hazard Assessment-Victor Technology, San Rafael, California.
- [15] Notas de aula do curso de AA-298 – Simulações Balísticas, 2009.
- [16] <http://www.tungsten-alloy.com/prefabricated-fragments.htm>, acessado em 10/11/2009.