CÁLCULO TEÓRICO DE ENVELOPE DE FRAGMENTAÇÃO DA CABEÇA DE GUERRA DO SHAHED-136

Davi Rosa Pinto [a], José Atílio Fritz Fidel Rocco [a], Fausto Batista Mendonça [a]

[a] Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Resumo — O conflito contemporâneo entre a Rússia e a Ucrânia evidenciou o emprego em larga escala de drones *kamikazes*, como o Shahed-136. Diante da necessidade de estabelecer táticas de defesa antiaérea de baixo custo, helicópteros armados com metralhadoras e foguetes tem sido empregados como vetores de interceptação. Contudo, a detonação da ogiva do drone gera um envelope de fragmentação que pode oferecer riscos à aeronave interceptadora. Este trabalho apresenta uma analise teórica do envelope de projeção de fragmentos da ogiva a TBBCh-50M, documentada em relatório forense de destroços,. Foram aplicadas as equações de Gurney, de Taylor e de decaimento aerodinâmico da velocidade dos fragmentos. Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que, a distâncias de emprego superiores a 513 m, a energia cinética dos fragmentos decai a valores inferiores ao limiar de dano adotado neste estudo, sendo residual a probabilidade de danos relevantes à aeronave e à tripulação.

I. INTRODUÇÃO

O uso massivo de drones suicidas em conflitos atuais, como o Shahed-136 [1], [2], torna a interceptação por helicópteros uma opção viável de baixo custo [3], [4], [5]. Porém, a detonação da ogiva no abate gera estilhaços que podem ameaçar a aeronave interceptadora. Este trabalho busca estimar o envelope de fragmentação da ogiva TBBCh-50M, cabeça de guerra composta por fragmentos pré-formados, com base em equações de Gurney, Taylor, de decaimento aerodinâmico e de energia cinética, a fim de estimar a distância mínima de engajamento seguro.

A ogiva, cujas informações foram obtidas de documento forense de destroços [6], é localizada na parte frontal do drone (Fig. 1) [7] e possui formato cilíndrico (Fig. 2), com um alargamento na linha média.

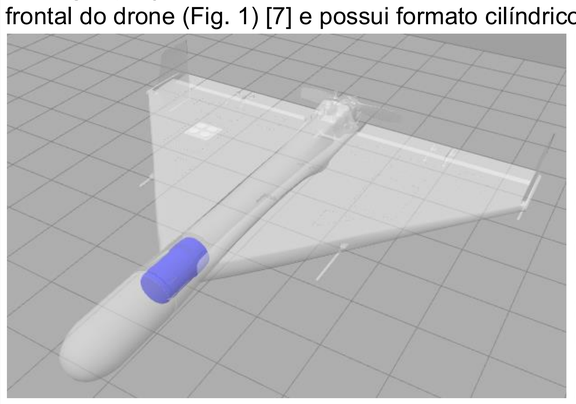


Fig. 1 . Posição da cabeça de guerra no Shahed-136 [7].



Fig. 2 . Ogiva do Shahed-136 TBBCh-50M [6]

Nela, são colocadas 2.306 esferas metálicas que são dispersas como fragmentos com a detonação (Fig. 3).

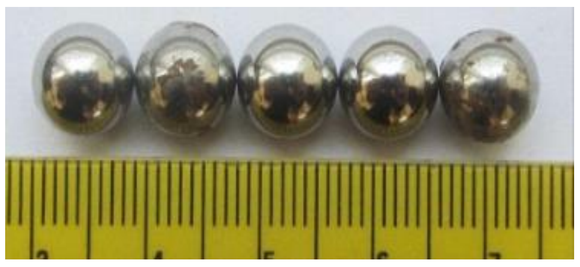


Fig. 3. Fragmentos esféricos da ogiva TBBCh-50M [6]

II. REFERENCIAL TEÓRICO

As equações e cálculos considerados são relacionados na Tabela I:

TABELA I . Equações e cálculos considerados

Equação de Gurney [8] [9]	$V_i = \sqrt{2E} \cdot \sqrt{\frac{C/M}{1+\frac{1}{2}(C/M)}}$
Ângulo de Taylor [10]	$\alpha_T = arc\ sin\ \frac{V_i}{2.V_D}$
Cálculo do decaimento da velocidade do fragmento (V_S) imediatamente antes do impacto [8]	$V_S = V_i \cdot e^{-KX}$
	$X = \frac{\ln(\frac{V_i}{V_S})}{K}$
	$K = \frac{\rho S}{2m} \cdot C_D$
Energia Cinética (KE) [8]	$KE = \frac{mV_S^2}{2}$

Os dados relativos à ogiva são relacionados na Tabela II [6].

TABELA II . Dados relativos à ogiva TBBCh-50M [6]

Parâmetro	*Variável / Parâmetro*	*Símbolo*	*TBBCh-50M (Pré-formada)*
Entradas de Massas	Massa da Carga Explosiva	*C*	30,0 kg
	Massa do Metal (Casco + Fragmentos)	M_{metal}	22,4 kg
	Razão Carga-Massa (Gurney)	*C/M*	1,339
Entradas Geométricas	Diâmetro Interno do Corpo	*d*	255 mm
	Espessura do Casco de Aço	*t*	10 mm
Equação de Gurney	Constante de Gurney (Explosivo)	*2E*	2.039 m/s [11]
	Velocidade Inicial de Fragmentos (calculado)	V_i	1.826,72 m/s
Ângulo de Taylor	Velocidade de Detonação	V_D	6.730 m/s (TNT)
	Ângulo de Taylor (calculado)	*T*	7,79º
Decaimento aerodinâmico da velocidade	Densidade do ar no local da detonação	p	1,225 kg/m³ (nível do mar)
	Área do fragmento (calculado)	S	6,36 x 10-5m²
	Coeficiente de arrasto do fragmento esférico	C_D	0,5 [12]
Dados do fragmento	Diâmetro dos fragmentos (esferas)	*2R*	9 mm
	Massa do fragmento (calculado)	*m*	0,003kg (considerado aço 7,85 g/cm³)
	Número de Fragmentos	N_{Frag}	2.306 esferas
Velocidade do drone	Velocidade de cruzeiro do drone	V_{drone}	100 kt (51,44 m/s)

III. PREMISSAS E MODELAGEM

Para o cálculo do envelope cinético de fragmentação, foram adotadas as seguintes premissas:

- expansão radial dos produtos de detonação;
- explosivo considerado: TNT (escassez de informações específicas da ogiva);
- velocidade inicial (V_i) é distribuída no cone de espalhamento delimitado pelo ângulo de Taylor (α_T);
- atmosfera padrão (ISA ao nível do mar);
- coeficiente de arrasto constante (C_D = 0,5) e em regime subsônico (estimativa conservadora) [12];
- aeronaves e pessoas são consideradas 'alvos moles' (*soft targets*) [8];
- os riscos decorrentes da fragmentação abrangem tanto danos à estrutura da aeronave quanto lesões ao pessoal embarcado [8];
- a fim de gerar danos à pele, ainda que superficiais e limitados, os fragmentos devem possuir energia mínima de 0,1 J/mm²) [13].

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para fins de cálculo de letalidade, foram considerados os parâmetros de energia cinética descritos na Tabela III:

TABELA III . Cálculo de energia cinética e distância de fragmentos da ogiva TBBCh-50M

Velocidade do Fragmento	*Energia cinética (KE)*	*Distância da detonação*
1.826,72 m/s(velocidade inicial calculada)	5005,36 J	0 m
800,0 m/s (velocidade crítica para máxima letalidade em projéteis maciços [8]	960 J	127,2 m
457,1 m/s (velocidade crítica para máxima letalidade em projéteis ocos ou macios) [8]	313 J	213,5 m
231,0 m/s (referência conservadora de energia para letalidade) [14]	80 J	318,7 m
65,1 m/s (valor mínimo para causar dano significativo – 0,1 J/mm²) [13]	6,36 J	513,7 m

A avaliação do decaimento da energia cinética permitiu estratificar o risco em faixas de energia cinética, conforme Fig. 4.

A exposição a fragmentos com energia cinética superior ao limiar conservador de letalidade (80 J) [14], ou de penetração dérmica, aproximadamente 6,36 J [13], representa risco de incapacitação de pessoal ou danos à aeronave.

O modelo teórico indicou que, a uma distância de 513,7 m do ponto de detonação, a energia cinética residual dos fragmentos reduz-se a 6,36 J, sendo o limite teórico no qual a probabilidade de danos torna-se residual.

Essa distância é compatível com o engajamento desses alvos a partir de helicópteros armados com metralhadoras (laterais ou frontais) e foguetes de 70 mm, como o SBAT-70.

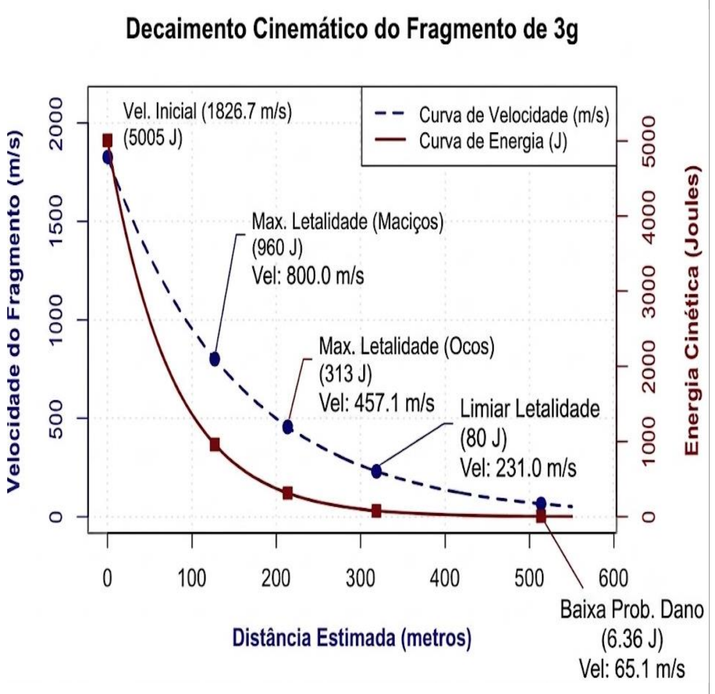


Fig. 4. Gráfico de decaimento cinético dos fragmentos da ogiva TBBCh-50M. Fonte: autor

V. CONCLUSÃO

A partir da modelagem da fragmentação e da avaliação do decaimento da energia cinética, foi possível estabelecer diferentes faixas de risco em função da distância ao ponto de explosão. Os resultados indicaram que a distância de interceptação não deve ser definida apenas com base na prevenção de danos catastróficos à aeronave ou à tripulação, mas também considerando a possibilidade de ocorrência de impactos de menor energia, capazes de provocar danos, ainda que superficiais, que comprometam a disponibilidade operacional da aeronave ou dos aeronavegantes.

REFERÊNCIAS

[1] D. Albright, S. Burkhard, e S. Faragasso, "Alabuga's Shahed 136 (Geran 2) Warheads: A Dangerous Escalation".

[2] O. Sukharevsky, V. Vasilets, S. Nechytailo, A. Reznichenko, e H. Kudriashov, "Radar characteristics study of the model of 'Shahed-136' barraging munition. Science and Technology of the Air Force of Ukraine. 2023. № 2 (51). C. 56-62", Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, n. 2 (51), p. 56–62, ago. 2023, doi: 10.30748/nitps.2023.51.07.

[3] M. Z. Chaari, "Analysis of the power of drones and limitations of the anti-drone solutions on the Russian-Ukrainian battlefield", doi: 10.35467/sdq/208347.

[4] "Ukrainian Mi-8 Crew Shoots Down russian Shahed-136 Drone with Onboard Machine Gun (Video) | Defense Express". Acesso em: 25 de abril de 2026. [Online]. Disponível em: https://en.defence-ua.com/news/ukrainian_mi_8_crew_shoots_down_russian_shahed_136_drone_with_onboard_machine_gun_video-15790.html

[5] "Ukrainian helicopter downs Russian Shahed-136 kamikaze drone". Acesso em: 20 de maio de 2026. [Online]. Disponível em: https://defence-blog.com/ukrainian-helicopter-downs-russian-shahed-136-kamikaze-drone/

[6] "Shahed 136/Geran-2 UAV Warhead Details", Acesso em: 26 de maio de 2026. [Online]. Disponível em: https://pt.scribd.com/document/861159796/Shahed-136

[7] A. • J. Emmett, T. Ball, e N. R. J.-J. 3D M. • A. D. M. D. • Rectangle, "Shahed-131 & -136 UAVs: a visual guide". Acesso em: 26 de maio de 2026. [Online]. Disponível em: https://osmp.ngo/collection/shahed-131-136-uavs-a-visual-guide/

[8] D. E. Carlucci e S. S. Jacobson, Ballistics: theory and design and ammunition, Third edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018.

[9] R. W. Gurney, "The Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shell and Grenades",:, Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, VA, set. 1943. doi: 10.21236/ADA800105.

[10] V. Kuznetsov, "Determination of Gurney Quantities and JWL Equation of State Parameters from the Cylinder Expansion Test". doi: 10.13140/RG.2.2.21292.39044.

[11] B. M. Dobratz e Crawford, P.C., "Properties of chemical explosives and explosive simulants", UCRL--51319, UCRL--51319(REV.1), 4285272, dez. 1972. doi: 10.2172/4285272.

[12] S. F. Hoerner, Fluid-dynamic Drag: Practical Information on Aerodynamic Drag and Hydrodynamic Resistance. Hoerner Fluid Dynamics, 1965.[

13] P. K. Pandey, Y. K. Joshi, e S. G. Ganpule, "Review of Interaction of Bullets and Fragments With Skin-Bone-Muscle Parenchyma", Journal of Engineering and Science in Medical Diagnostics and Therapy, v. 8, n. 4, p. 040801, nov. 2025, doi: 10.1115/1.4067766.

[14] G. Rettinger, "The '80 Joule criterion' reconsidered today", Forensic Science International, v. 276, p. 64–70, jul. 2017, doi: 10.1016/j.forsciint.2017.04.020.