

ANÁLISE COMPUTACIONAL DA PRECISÃO DE TIRO DE ARMAMENTO LEVE SOB INFLUÊNCIA DE VIBRAÇÃO

Dante Ricardo Ambrosio

Domingos Alves Rade

Instituto Tecnológico de Aeronáutica-ITA. Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias, São José dos Campos, São Paulo, 12228-900.

ambrosio.dante@eb.mil.br, rade@ita.br

Resumo. Em diversas situações envolvendo ações de defesa ou de segurança pública, atiradores devem operar armamento estando embarcados em aeronaves, sujeitos a vibrações mecânicas. Este é o caso, por exemplo, de operações realizadas a partir de helicópteros com fuzis de precisão. Essas armas executam um tiro por vez de modo a não ter um regime de rajada de tiro. Nestas condições, a precisão de tiro tende a ser comprometida pelas vibrações transmitidas da aeronave ao armamento através do corpo do atirador e/ou de dispositivos de suporte. Neste contexto, o presente estudo trata do desenvolvimento de um procedimento de modelagem dinâmica de um sistema composto por armamento leve, do tipo fuzil de repetição, apoiado em um suporte articulado instalado em uma placa retangular. Esta última recebe, em seus apoios, excitações multidirecionais oriundas do movimento vibratório da aeronave, representadas por históricos de deslocamentos impostos. O procedimento envolve duas etapas principais, a saber: a) modelagem dinâmica do sistema mecânico pelo método dos elementos finitos, incluindo a interação entre o armamento e o corpo do atirador. Esta interação é modelada de forma simplificada por um conjunto de molas lineares. O modelo permite obter o histórico de vibração tridimensional da extremidade do cano da arma, em termos de sua posição e velocidade; b) modelagem da balística exterior, considerando um modelo simples de 3 graus de liberdade, que permite determinar a trajetória do projétil a partir das condições iniciais obtidas na etapa a). O estudo inicia-se pela descrição dos procedimentos de modelagem, seguida da definição de um caso de estudo tipicamente encontrado em situações de interesse prático. Na sequência, são apresentados resultados de várias simulações numéricas. Nestas é avaliada a influência de vários parâmetros, tais como frequência e amplitude das vibrações sobre a precisão de tiro. O estudo realizado fornece meios para avaliação futura da eficácia de dispositivos de amortecimento para fins de melhoria da precisão de tiro.

Palavras-Chave: Vibrações de Armamento, dinâmica estrutural, balística exterior.

1. INTRODUÇÃO

O uso de helicópteros em operações militares é uma ferramenta que permite o transporte de tropas e o suporte logístico de forma ágil e com relativa simplicidade, principalmente devido à capacidade de pouso e decolagem verticais. Essa mobilidade aumenta o poder de combate no ambiente de conflito, que tem destaque nas operações de Garantia da Lei e da Ordem (GLO). Nesse tipo de operação, o emprego de helicópteros permite missões de reconhecimento, de inteligência e de apoio aéreo (CARVALHO, 2019).

As missões de reconhecimento e inteligência são realizadas por meio de câmeras de alta resolução atreladas a sistemas de estabilização, que permitem a obtenção de imagens com grande nitidez. Em geral, essas imagens são transmitidas para um centro integrado de comando e controle.

Por último, as missões de apoio aéreo em operações de GLO têm por objetivo fornecer suporte aéreo para tropas de superfície. Neste caso, uma aeronave, estando a uma distância de 500 a 600 metros, consegue ter bom comando da operação e estar segura contra a ação do inimigo (BRASIL, 1998).

Destaca-se que, neste cenário, a aeronave precisa estar afastada do ponto de ação no objetivo para segurança orgânica da tripulação, mas também necessita de precisão no apoio de fogo. Para essa demanda, tem-se como solução a utilização de atiradores de elite embarcados em helicópteros, que podem neutralizar alvos compensadores de forma objetiva e racional sem comprometer a segurança de pessoas alheias ao conflito.

Para esta aplicação, um atirador de elite precisa de uma posição estável, ergonômica e com pouca vibração para realizar um tiro assertivo. A posição estável pode ser obtida com um voo pairado do helicóptero, mas a vibração da aeronave precisa ser reduzida, pois, em geral, uma aeronave em voo pairado possui elevados níveis de vibração. Logo, necessita-se do desenvolvimento de dispositivos destinados a diminuir os níveis de vibração recebidos pelo armamento e, assim, aumentar a precisão de tiro. Como etapa preliminar a este desenvolvimento, é necessário investigar como as vibrações de uma aeronave podem comprometer a precisão do disparo de um tiro de fuzil leve. Esta investigação é reportada no presente trabalho.

Sabe-se que as aeronaves possuem características distintas, tais como número de motores e número de pás nos rotores principal e de cauda. Neste trabalho toma-se como aeronave de estudo o modelo AS365K2, que é o modelo adotado pelo Exército Brasileiro para este tipo de operação. Esta aeronave possui como características principais: dois motores de 1000 HP, rotor principal de 4 pás e rotor de cauda do tipo fenestron com 10 pás (HELICOPTERS).

Ainda neste contexto, escolheu-se como armamento de estudo o fuzil de precisão modelo Barret M82 de calibre 12,7 mm ou 0,50 polegada. Este fuzil é de dotação de tropas de Forças Especiais do Exército Brasileiro, que realiza este tipo de operação, utilizando um cabo elástico como suporte de apoio para o fuzil na aeronave.

A Figura 1 ilustra o sistema mecânico estudado, cujos elementos principais são: fuzil, apoio destinado a representar a interação do fuzil com o corpo do atirador, mecanismo articulado de suporte do fuzil e piso do veículo (representado por uma placa retangular).



Figura 1. Ilustração do sistema mecânico estudado.

Assim, para este estudo o presente trabalho possui a sessão 2, que trata de vibrações de helicópteros, mostrando suas particularidades. Em sequência a sessão 3 apresenta a metodologia utilizada para no desenvolvimento do problema estudado, detalhando os modelos utilizados, bem como as condições de contorno e os resultados obtidos. Por fim, a sessão 4 apresenta as conclusões sobre o trabalho.

2. VIBRAÇÕES DE HELICÓPTEROS

As aeronaves de asa rotativa apresentam vibrações caracterizadas por amplos espectros de frequência. Isto se deve ao fato de que elas possuem diversos componentes rotativos, como eixos, rolamentos e engrenagens, que operam em diversas rotações (VISWAMURTHY, GANGULI e THAKKAR, 2016).

A Figura 2 ilustra os principais componentes rotativos de um helicóptero modelo AS365 K2 que possui dois motores Ariel 2C2 GC, cada um com 1000HP de potência. Estes motores operam com rotação de 52000 RPM no eixo do compressor, mas a rotação no rotor principal é reduzida a 365 RPM. Nota-se que o helicóptero possui um complexo sistema de redução de rotação e aumento do torque no rotor principal.

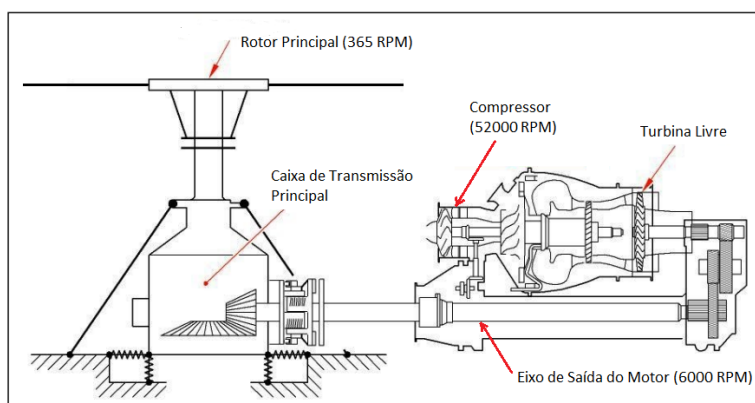


Figura 2. Ilustração do conjunto propulsor de um helicóptero AS365 K2

De acordo com (Duan e Mba, 2016) as vibrações de conjuntos mecânicos estão relacionadas com a frequência de rotação e com a quantidade de roletes ou esferas dos rolamentos presentes nesses eixos. Dempsey, Keller e Wade (2008)

também relacionam vibrações de sistemas mecânicos com as características dos eixos, engrenagens e rolamentos neles existentes.

3. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

3.1 Ensaio de coleta de dados de vibração em um helicóptero modelo AS365 K2.

Como etapa preliminar do presente estudo, realizou-se a coleta de dados de vibração durante um voo de uma aeronave modelo AS365 K2, empregando quatro acelerômetros fixados ao assoalho. A frequência de amostragem foi de 1600 Hz. A Fig. 3 ilustra os acelerômetros e o sistema de aquisição empregados, enquanto as Figs. 4 e 5 ilustram exemplos de sinais adquiridos, no domínio do tempo e da frequência, respectivamente.

Notam-se diferenças de amplitudes segundo a direção da medição efetuada, além do amplo conteúdo espectral das vibrações no helicóptero, com algumas componentes harmônicas claramente destacadas, algumas delas presentes nos sinais referentes a múltiplas direções.

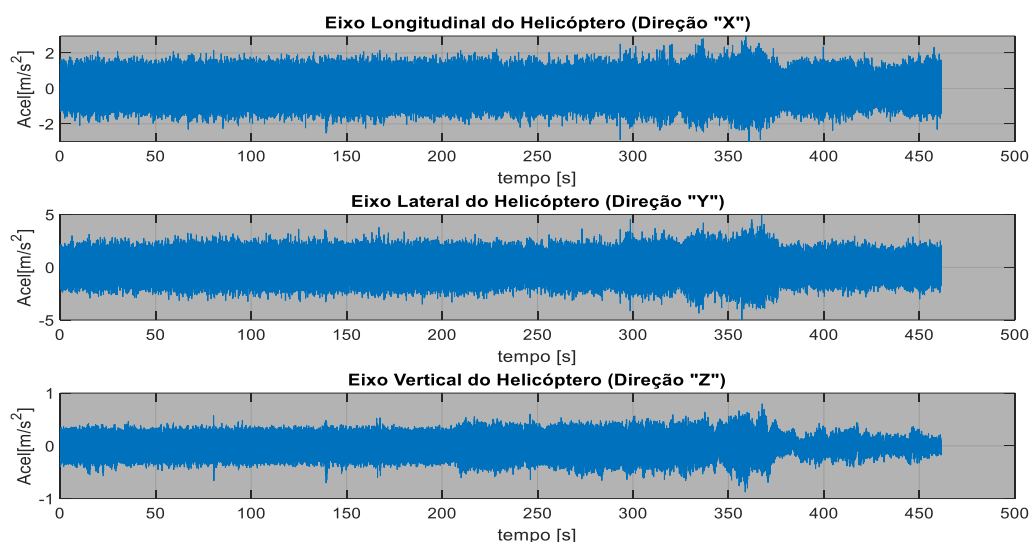


Figura 3. Sinais de vibração no domínio do tempo.

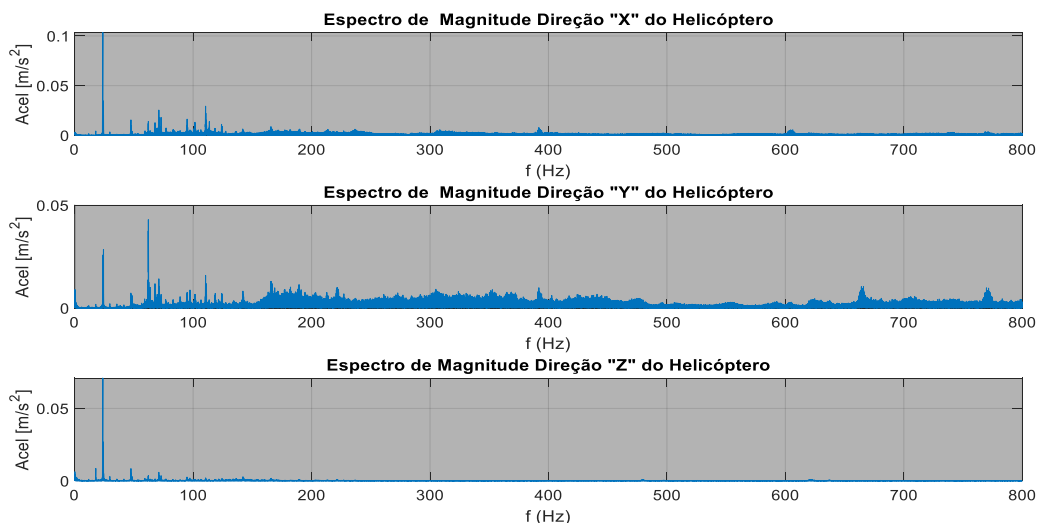


Figura 4. Sinais de vibração no domínio da frequência.

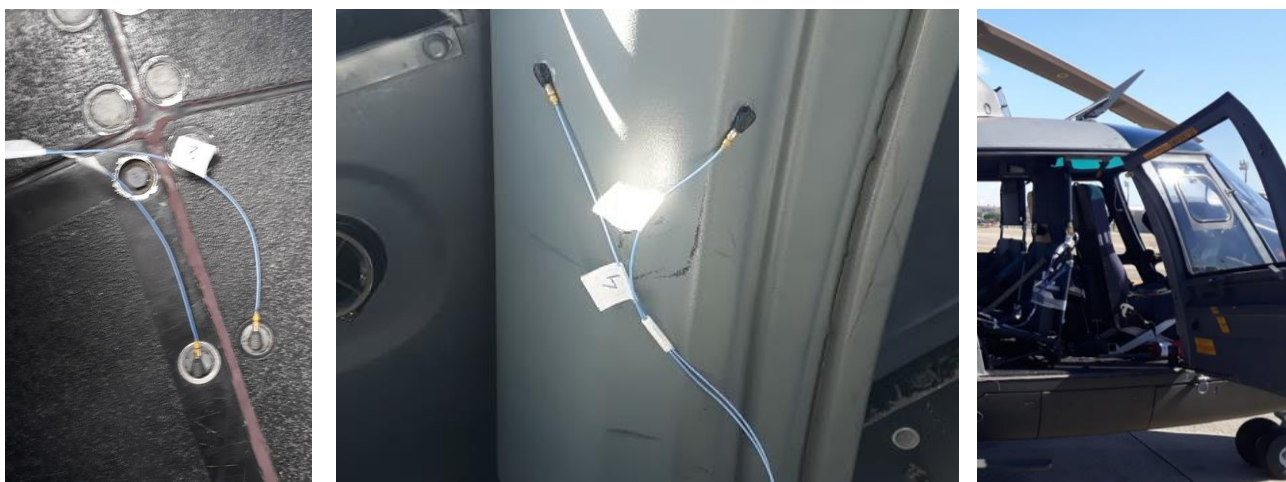


Figura 5. Imagens do ensaio

A frequência mais destacada é de 24,3 Hz, que corresponde ao produto da frequência de rotação do rotor principal pelo número de pás do rotor principal. Este valor é evidenciado em todas as três direções.

A partir dos sinais apresentados foram extraídos os valores de aceleração, velocidade e deslocamento apresentados na Tab. 1, correspondentes à frequência angular de 365 RPM do rotor principal da aeronave, que foram utilizados como referência para aplicação de excitação por movimento imposto no modelo de elementos finitos descrito a seguir.

Tabela 1. Valores selecionados de aceleração, velocidade e deslocamento extraídos do teste realizado em aeronave AS365 K2

	Aceleração: $a(t)$ [m/s^2]	Velocidade: $v(t) = \frac{a(t)}{w}$ [m/s]	Deslocamento: $d(t) = \frac{a(t)}{w^2}$ [m]
Direção X	1,8	0,047	0,001233
Direção Y	2,0	0,052	0,001371
Direção Z	0,5	0,013	0,000342

3.2 Modelagem por elementos finitos

A partir do modelo CAD ilustrado na Fig. 1, utilizando o programa computacional ANSYS foi construído o modelo de elementos finitos ilustrado na Fig. 6, cujas principais características são:

- Discretização utilizando 65896 elementos sólidos, totalizando 160968 nós.
- Os materiais constituintes do dispositivo são alumínio 7075 T6 para a estrutura, aço AISI 4340 para os elementos de ligação da estrutura, como pinos e tirantes e por fim os parafusos de conexão são de aço inox.
- A placa de apoio do conjunto é constituída de alumínio 7075 T6 e possui dimensão de 700 mm x 700 mm e espessura de 8 mm.

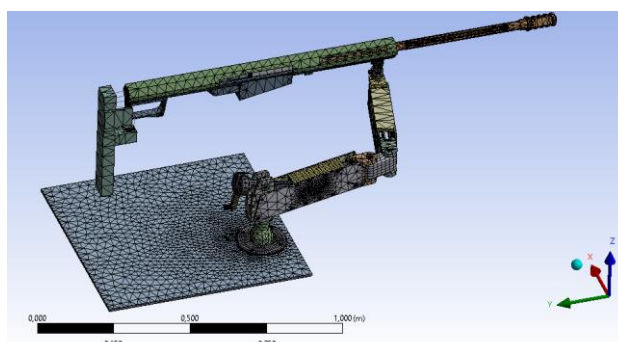


Figura 6. Ilustração do modelo de elementos finitos elaborado para o estudo

Vale observar que o armamento é admitido estar fixado, através do suporte articulado, a uma placa retangular cujos vértices recebem movimentos impostos pelas vibrações oriundas do helicóptero. O objetivo é caracterizar a interação

dinâmica entre o piso do helicóptero e o armamento, em face da dificuldade de se considerar integralmente a estrutura da aeronave no modelo de elementos finitos.

Outro aspecto de grande importância na modelagem é a interação mecânica entre o corpo do atirador e o armamento. Trata-se claramente de um aspecto de difícil modelagem, uma vez que o contato entre a coronha da arma e o ombro do atirador depende de uma série de fatores de difícil caracterização (rigidez de contato, área de contato, por exemplo). Assim, visando a simplificar a modelagem e, ao mesmo tempo, levar em consideração os aspectos físicos mais relevantes, o contato entre o corpo do atirador e o armamento foi introduzido no modelo por meio de molas lineares conectando todos os graus de liberdade dos nós posicionados sobre a superfície posterior da coronha a uma haste suficientemente rígida. Esta, por sua vez, é conectada rigidamente ao piso representado por uma placa metálica, conforme ilustrado na Fig. 7.

Os valores a serem atribuídos às constantes de rigidez das molas necessitam estudos mais aprofundados, possivelmente envolvendo ensaios experimentais. Preliminarmente, foi empregado o valor de 200 N/m para todas as molas, nas simulações descritas mais adiante.

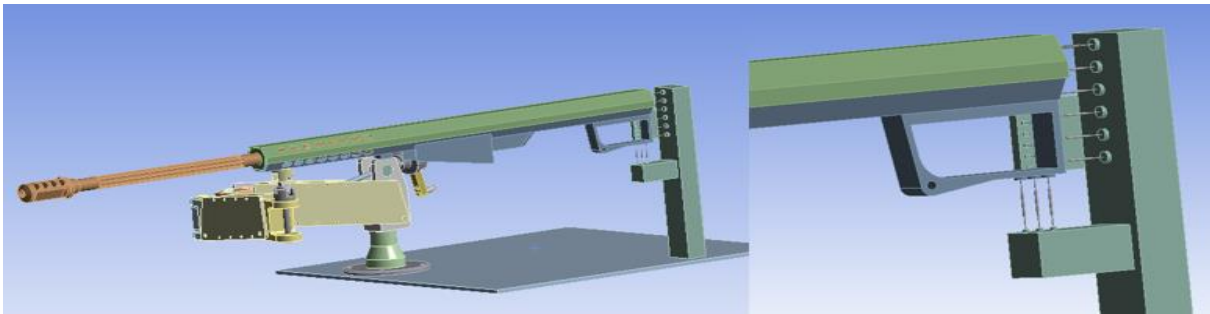


Figura 7. Ilustração das molas empregadas para modelagem da interação entre o fuzil com o ombro do atirador.

3.3 Modelo balístico

A balística divide-se em quatro ramos: a) balística interna, a qual estuda desde o momento da deflagração da pólvora até o último contato do projétil com o cano do armamento; b) a balística intermediária, que estuda o movimento epicicloidal do projétil imediatamente após deixar o do cano da arma até sua estabilização aerodinâmica. Esse movimento, segundo Farrar e Leeming (1983) é um efeito adverso da saída dos gases do cano; c) a balística externa, que trata do comportamento do projétil da saída do cano até seu impacto no alvo; d) por fim, a balística terminal, a qual estuda o impacto do projétil no alvo.

Neste trabalho o foco do estudo se restringe à balística externa, considerando um modelo no qual o projétil é um ponto material, sendo desconsiderado o Efeito Magnus e a Força de Coriolis.

Para isso tomou-se o modelo de (KLIMI, 2016), que traz:

$$\frac{dv_x}{dt} = -J^{-1} \cdot c \cdot h(y) \cdot G_D(v) \cdot \frac{v_x}{v} \quad \text{Equação 1}$$

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{g}{v_x} \quad \text{Equação 2}$$

$$\frac{dx}{dt} = v_x \quad \text{Equação 3}$$

$$\frac{dy}{dt} = v_y \quad \text{Equação 4}$$

$$p = \tan(\alpha) = \frac{dy}{dx} \quad \text{Equação 5}$$

$$c = \frac{i \cdot d^2}{m} \quad \text{Equação 6}$$

$$G_D = (3,927 \cdot 10^{-4} \rho) v^2 C_d \left(\frac{v}{\alpha_{0N}} \right) \quad \text{Equação 7}$$

$$h(y) = \left(\frac{\tau_0 - 0,006328y}{\tau_0} \right)^{44} \quad \text{Equação 8}$$

$$J^{-1} = \left(\frac{P_0}{P_{0N}} \sqrt{\frac{\tau_{0N}}{\tau_0}} \right)$$

Equação 9

Onde:

$g = 9,80665 \text{ m/s}^2$;

$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$;

i é o coeficiente de forma;

c é o coeficiente balístico (BC);

d e m são o diâmetro e massa do projétil;

i é o coeficiente de forma;

y é altura do disparo;

α é o ângulo de lançamento.

τ_0, τ_{0N} é a temperatura no local de disparo e na trajetória respectivamente.

P_0, P_{0N} é a pressão no local de disparo e na trajetória respectivamente.

E o desvio lateral foi modelado, considerando a particularidade do tiro tenso. Logo, tem-se o desvio lateral do impacto do tiro no alvo com a expressão:

$$Desvio_{Lateral} = (distância_{Alvo}) \cdot (\tan(\hat{ângulo}_{Lateral}))$$

Equação 10

Entretanto, $\hat{ângulo}_{Lateral}$ possui valor muito baixo, podendo-se realizar a seguinte aproximação:

$$Desvio_{Lateral} = (distância_{Alvo}) \cdot (\hat{ângulo}_{Lateral})$$

Equação 11

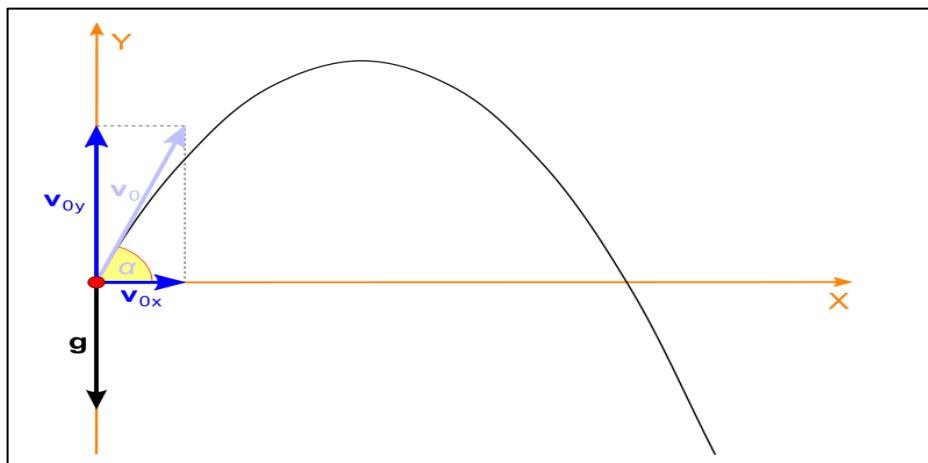


Figura 8. Ilustração do disparo

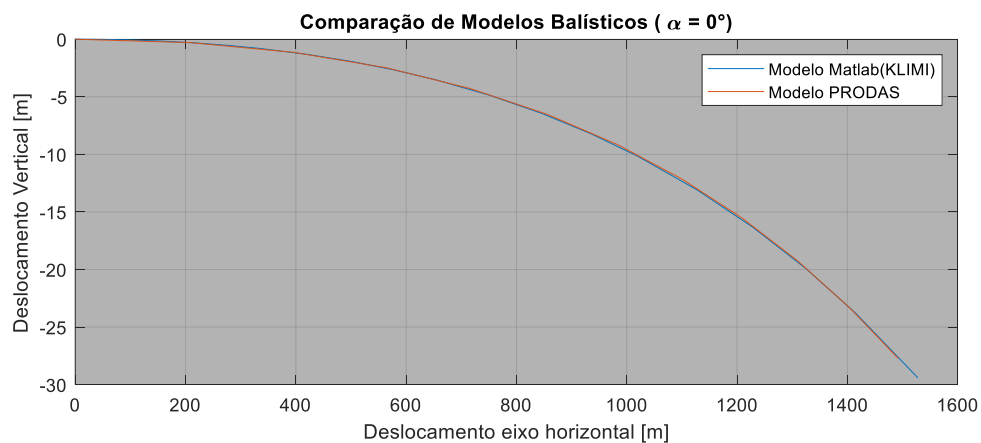


Figura 9. Comparação de modelos balísticos

Buscou-se, também, realizar uma comparação do modelo detalhado por (KLIMI, 2016) com o modelo do *software* PRODAS®, que é um modelo de referência para estudo de balística.

Observou-se que os modelos da Fig. 9 apresentam trajetórias semelhantes, mostrando sua representatividade com o modelo de referência, o que permite o uso do modelo de (KLIMI, 2016) neste trabalho.

3.4 Função de Resposta em Frequência do Braço com o Armamento

Realizou-se a análise do sistema com excitação harmônica com uma força unitária no centro da placa com um ponto localizado na boca do cano. Este ponto foi escolhido pois é o ponto de maior interesse, haja vista que é o último contato do projétil antes de iniciar o voo balístico. Logo, possui a maior influência sobre a trajetória e o impacto no alvo

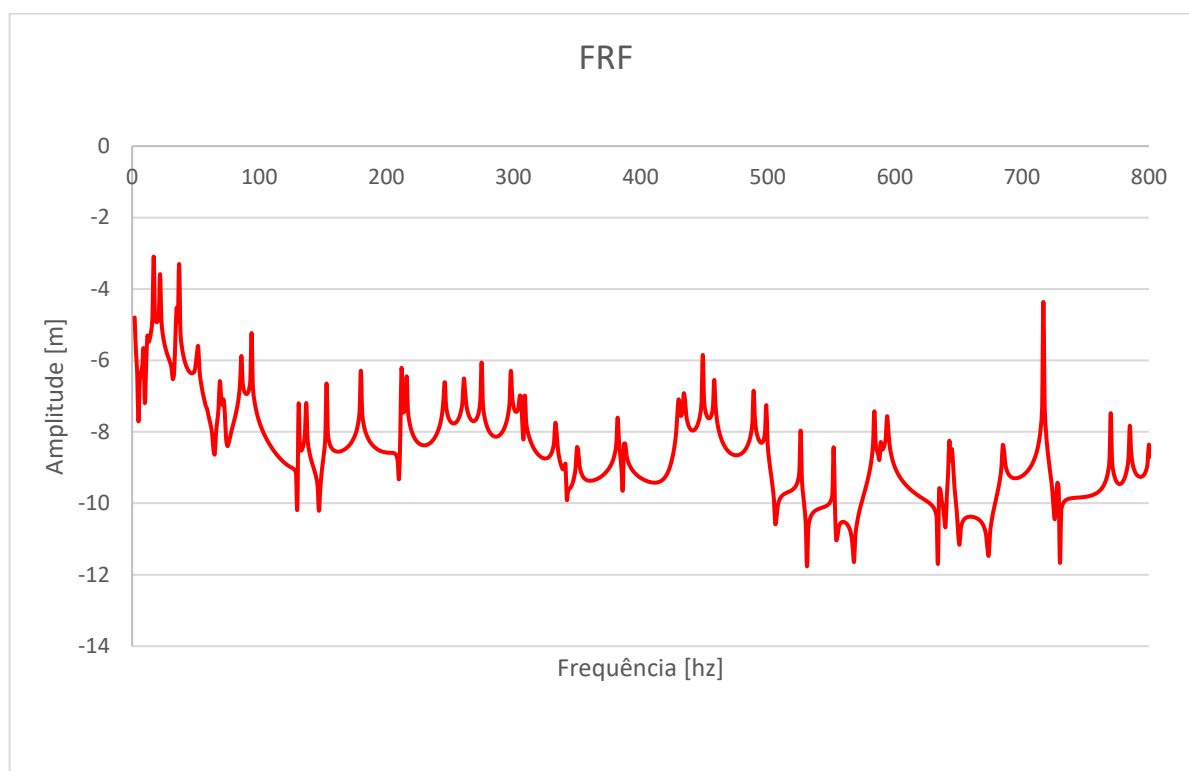


Figura 10. Gráfico da Função da Resposta em Frequência.

Na Fig. 10, evidencia-se que o sistema possui diversas frequências modais, as quais fazem o sistema vibrar com maior amplitude. Assim, identifica-se as frequências potenciais para o estudo do comprometimento da precisão do disparo no alvo.

3.5 Simulação com MEF

No estudo do comportamento do braço de armamento, realizou-se a simulação numérica em no *software* Ansys® de elementos finitos.

Para esta simulação, utilizaram-se as condições de contorno mencionadas nos itens anteriores, ou seja, o contorno da placa quadrada como suporte fixo. E o ponto central da placa quadrada foi excitado com um deslocamento harmônico em regime transiente de 5 s iniciais.

Nessas simulações testaram-se diversos valores de frequência de vibração. Com esses resultados, tomou-se a variação angular do cano do armamento. Essa variação angular foi obtida tomando-se dois pontos conhecidos no cano do armamento, sendo um na extremidade próximo ao freio de boca (último contato do projétil com o cano) e o outro ponto na parte central do cano. Sabendo-se que a distância entre esses pontos é fixa calcula-se a variação do ângulo do cano. Por conseguinte, com a variação angular e o modelo balístico, verificou-se a precisão dos impactos no alvo a uma distância de 1000 m.

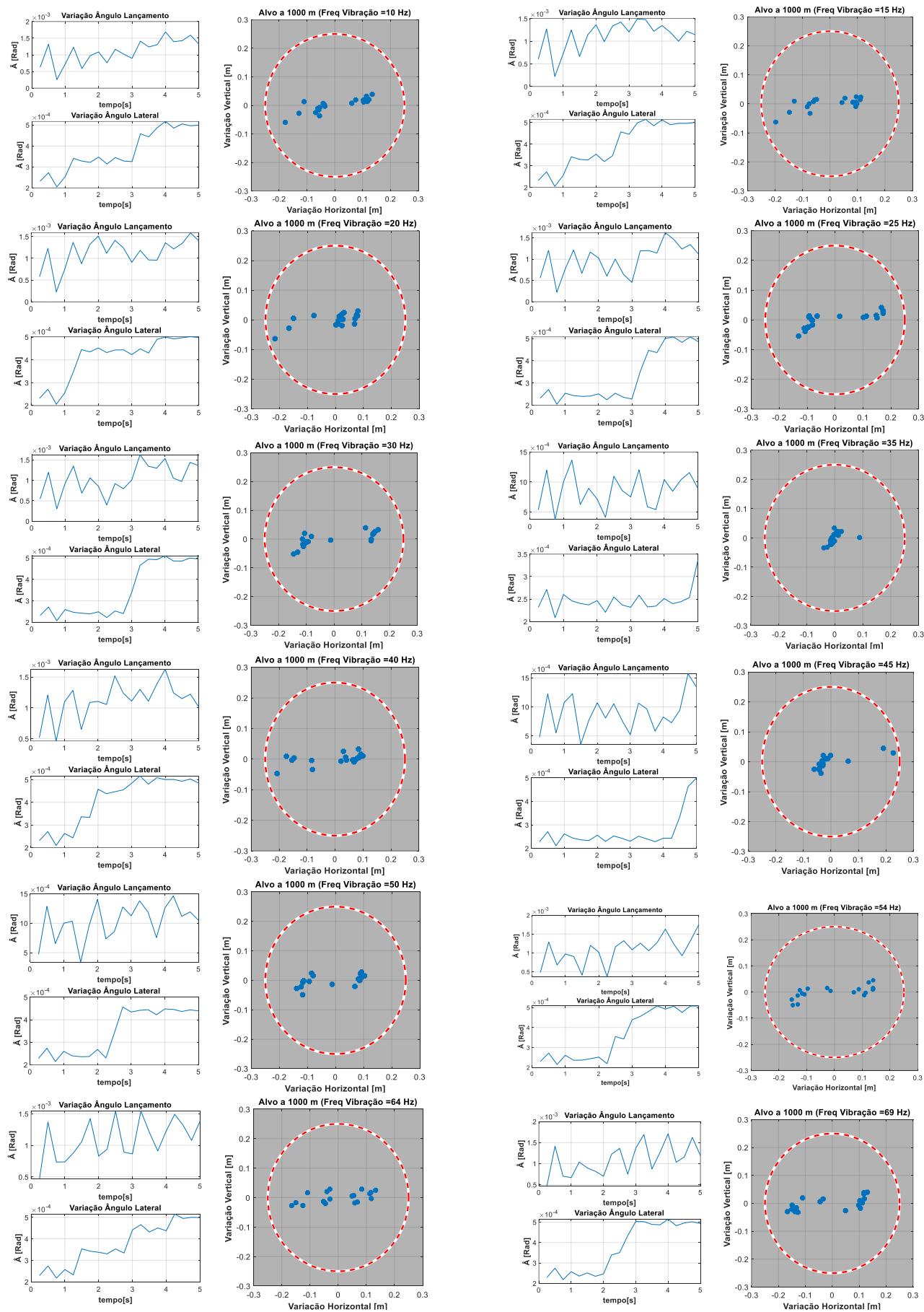


Figura 11. Resultados das simulações

4. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Nas simulações realizadas teve-se a convergência do modelo de EF para todas as situações. Com a análise desses resultados, verificou-se que a vibração do helicóptero afeta a precisão do impacto no alvo, pois o movimento do assoalho da aeronave excita o conjunto do braço de armamento e o armamento. Esse comprometimento dos impactos conteve-se em um círculo de 0,25 m

Logo, tem-se um valor de referência de quanto um impacto pode ser prejudicado em função da vibração do helicóptero. Tem-se grande valor no conhecimento deste valor para nortear uma operação de Garantia da Lei e da Ordem onde esta técnica seja empregada.

Verificou-se, ainda, que a direção horizontal foi mais prejudicada com a vibração de excitação, representando a natureza da aeronave. Pois na maioria das simulações os disparos mostraram-se com maior dispersão nesta direção. Esta maior dispersão na direção horizontal pode estar relacionada ao fato de não haver um elemento de mola para restringir o movimento nesta direção. Este aspecto tende à necessidade de uma futura implementação no dispositivo para o amortecimento na direção horizontal.

5. REFERÊNCIAS

BANKOFF, A. D. P.; BEKEDORE, R. Bases neurofisiológicas do equilíbrio corporal. FEF, Campinas, 2007.

BRASIL. **IP 21-2 - O Caçador**. Brasília: [s.n.], 1998.

CARVALHO, G. D. R. D. **O Emprego Do Caçador Nas Operações Arcanjo, São Francisco E Intervenção Federal Na Segurança Pública Do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS, 2019.

DEMPSEY, P. J.; KELLER, J. A.; WADE, D. R. **Signal Detection Theory Applied to**. Cleveland: [s.n.], 2008. 23 p. ISBN NASA/TM—2008-215262.

DUAN, F.; MBA, D. **Helicopter Main Gearbox Bearing Defect Identification**. London: [s.n.], 2016. 7 p. ISBN 10.1007/978-3-319-48725-0_18.

FARRAR, C. L.; LEEMING, D. W. **Militar Ballistics, A Basic Manual**. Shrivenham: Royal Military College of Science, 1983.

HELICOPTERS, A.-. **THM- AS 365 K2**. [S.l.]: [s.n.].

KLIMI, G. **Elements of Exterior Ballistics Long Range Shooting**. 1. ed. [S.l.]: [s.n.], 2016.

PERKINS, M. S. **Predicted effect of projectile dispersion on target hit probabilities and dispersion-zone sizes for the 25-mm gun of the Bradley fighting vehicle**. Alexandria: [s.n.], 1988. 18 p. ISBN ARI Research Note 88-31.

VISWAMURTHY, S. R.; GANGULI, R.; THAKKAR, D. **Smart Helicopter Rotors - Optimization and Piezoelectric Vibration**. [S.l.]: Springer, 2016.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF THE SHOOTING ACCURACY OF LIGHT WEAPONS UNDER THE INFLUENCE OF VIBRATION

Dante Ricardo Ambrosio

Domingos Alves Rade

Instituto Tecnológico de Aeronáutica-ITA. Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias, São José dos Campos, São Paulo, 12228-900.

ambrosio.dante@eb.mil.br, rade@ita.br

Abstract. In several situations involving defense or public safety actions, shooters must operate weapons while on board helicopter, subject to mechanical vibrations. This is the case, for example, of operations carried out from helicopters with sniper rifles. These weapons take one shot at a time so as not to have a burst regime. Under these conditions, shooting accuracy tends to be compromised by vibrations transmitted from the aircraft to the weapon through the shooter's body or support devices. In this context, the present study deals with the development of a dynamic modeling procedure for a system composed of light weapons, of the repeating rifle type, supported on an articulated support installed on a rectangular plate. The latter receives, in its supports, multidirectional excitations arising from the vibrating movement of the aircraft, represented by histories of imposed displacements. The procedure involves two main steps, namely: a) dynamic modeling of the mechanical system by the finite element method, including the interaction between the weapon and the shooter's body. This interaction is modeled in a simplified way by a set of linear springs. The model allows to obtain the history of three-dimensional vibration of the end of the barrel of the weapon, in terms of its position and velocity; b) external ballistics modeling, considering a simple 3-degrees-of-freedom model, which allows determining the trajectory of the projectile from the initial conditions obtained in step a). The study begins with the description of the modeling procedures, followed by the definition of a case study typically found in situations of practical interest. Next, results of several numerical simulations are presented. In these, the influence of several parameters, such as frequency and amplitude of vibrations on shooting accuracy, is evaluated. The study carried out provides means for future evaluation of the effectiveness of damping devices for the purpose of improving shooting accuracy.

Keywords: Weaponry Vibrations, structural dynamics, exterior ballistics.