

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Faculdade de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Vinícius Samuel Pereira Silva

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA IDENTIFICAÇÃO DE IMPACTOS
DE ALTA ENERGIA EM AERONAVES DE ASAS ROTATIVAS PROVENIENTES
DE ARMA DE FOGO.**

Belo Horizonte

2020

Vinícius Samuel Pereira Silva

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA IDENTIFICAÇÃO DE IMPACTOS
DE ALTA ENERGIA EM AERONAVES DE ASAS ROTATIVAS PROVENIENTES
DE ARMA DE FOGO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto e Sistemas

Orientador: Prof. Dr. José Guilherme Coelho Baeta (UFMG)

Co-orientadora: Profa. Dra. Maria Lúcia Machado Duarte (UFMG)

Belo Horizonte

2020

S586d

Silva, Vinícius Samuel Pereira.

Desenvolvimento de um sistema para identificação de impactos de alta energia em aeronaves de asas rotativas, proveniente de arma de fogo [recurso eletrônico] / Vinícius Samuel Pereira Silva. - 2020.
1 recurso online (158 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: José Guilherme Coelho Baêta.

Coorientadora: Maria Lúcia Machado Duarte.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos e apêndices: f. 151-158.

Bibliografia: f. 142-150.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Aeronaves - Teses. 3. Vibração - Teses. 4. Armas de fogo - Teses. I. Baêta, José Guilherme Coelho. II. Duarte, Maria Lúcia Machado. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621 (043)

Ficha catalográfica: Biblioteca Profº Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA
Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG.
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**“DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA IDENTIFICAÇÃO
DE IMPACTOS DE ALTA ENERGIA EM AERONAVES DE ASAS
ROTATIVAS, PROVENIENTES DE ARMA DE FOGO.”**

VINICIUS SAMUEL PEREIRA SILVA

Dissertação apresentada a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “**Mestre em Engenharia Mecânica**”, na área de concentração de “**Projeto e Sistemas**”.

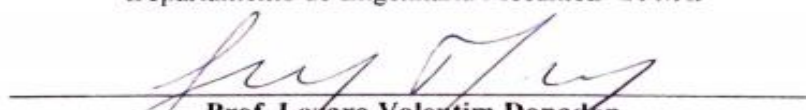
Dissertação aprovada no dia 28 de fevereiro de 2020.

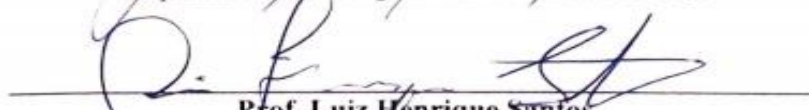
Por:


Prof. Jose Guilherme Coelho Baeta
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG


Profa. Maria Lucia Machado Duarte
Coorientadora - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG


Prof. Helio de Assis Pegado
Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG


Prof. Lazaro Valentim Donadon
Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG


Prof. Luiz Henrique Santos
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais/ PUC-MG

Dedico a todos professores, engenheiros, pilotos, mecânicos e aeronautas que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento da educação tecnológica aeronáutica brasileira. Muitos, abdicaram de tempo, família, lazer e até mesmo suas vidas no decorrer de suas investigações científicas. Dedico também a todos aqueles que lutam em defesa soberania nacional brasileira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao grande engenheiro do universo, e seus espíritos de luz; pelo dom da vida, saúde, sabedoria e por me proporcionar perseverança durante toda a minha vida.

Aos meu pai Dirceu Jose da Silva, minha mãe, Maria Pereira Silva, e meus tios Gonçalo da Silva Pereira e Cleonice Pereira Silva, pelo apoio e incentivo aos estudos e trabalho.

Aos meus irmãos Victor Emmanuel Pereira Silva e Virgílio Thiago Pereira Silva, pela amizade e atenção dedicadas quando sempre precisei.

A minha querida esposa Henryria Marcia Ramos Oliveira, pelo seu amor incondicional, paciência, e por respeitar e compreender minha dedicação aos estudos.

Ao meu orientador, e instrutor de tiro esportivo prof. Dr. José Guilherme Coelho Baêta, companheiro de caminhada ao longo desse curso de pós-graduação *stricto-sensu*. Posso dizer que a minha formação, inclusive pessoal, não teria sido a mesma sem o seu auxílio.

Agradeço também à minha coorientadora, professora Dra. Maria Lucia Machado Duarte e a secretária da Pós-graduação do DEMEC- Marina Cândida de Miranda Costa, e em Especial ao Professor Dr. Lazaro Valentim Donadon, que mesmo não sendo meu orientador, sempre esteve presente me instruindo com total dedicação e paciência, abdicando do seu tempo em favor dos meus estudos, e a toda equipe do Defender Clube de Tiro Defensivo e Caça (*Defender Shooting Sports*), no município de Nova Lima- MG, pelo total apoio.

Aos amigos e colegas de estudo, pelo incentivo e pelo apoio constantes, pelas alegrias, tristezas e dores compartilhadas. Em especial aos meus amigos: Anderson Flamareon dos Santos Cruz, Augusto César Teixeira Malaquias, Bruno Rodrigues Cardoso, Edelize Angélica Gomes, Fagner Vieira Samos, Marina Marques da Silva e Wellington Pereira Silva, que otimizaram meu processo de aprendizagem.

Aos meus amigos e colegas de trabalho do COMAVE- Comando de Aviação do Estado de Minas Gerais-, em especial ao Cel. Frederico, Ten. Cel. Juliano, Ten. Cel. Flavio Barreto, Ten. Cel. Ricardo, Maj. Saulo, Cap. Vitório, Cap. Alexandre Miranda, Ten. Demétrio, Sub. ten. Antônio, Sgt Novais (QPR) e ao Cb Gaspar que tiveram fundamental importância na realização desse projeto.

Por fim, agradeço a todos aqueles que de uma forma ou de outra me ajudaram nessa caminhada.

RESUMO

Consolidado como instrumento versátil e indispensável no combate à criminalidade, no aumento da sensação de segurança e no apoio as distintas modalidades de policiamento, o helicóptero tem comprovado o seu valor devido a sua dinâmica de voo, contudo, devido à restrições operacionais torna-se necessário maximizar seu emprego para perpetrar frente ao ímpeto dos agressores da sociedade. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade do desenvolvimento de um sistema aviônico capaz de identificar impactos de alta energia proveniente de arma de fogo, em aeronaves de asas rotativas. Mais especificamente buscou-se analisar a integridade estrutural de Célula e Grupo Motopropulsor (GMP) da Aeronave; avaliar as fontes de vibrações específicas do Helicóptero *Eurocopter AS350B2* de acordo com os manuais de manutenção dos fabricantes de motor e célula; identificar as vibrações presentes na aeronave; monitorar as vibrações captadas na aeronave em diferentes modalidades de voo; elaborar uma bancada de teste vibracional capaz de simular e distinguir as vibrações originadas da aeronave daquelas originadas pelo impacto de alta energia; simular, identificar e analisar os impactos de alta energia na aeronave, utilizando a técnica de *Teste do Martelo de Impacto* na bancada de teste vibracional; identificar, analisar e diferenciar os impactos de alta energia provenientes de diferentes armas de fogo e seus respectivos calibres na bancada de teste vibracional elaborada; promover a sobreposição do “Índice de Dano” (interferência vibracional produzida no sistema) sobre a “Linha Base” da aeronave, por meio do *software Matlab*. Para tanto, a metodologia foi dividida em cinco etapas. Na primeira etapa foram descritas as revisões sobre as obras acerca do assunto. Na segunda, foram detalhadas as inspeções prévias de GMP e célula na aeronave estudada, na terceira foram detalhados os parâmetros de análise de vibração do motor acompanhado das inspeções específicas do rotor principal, do eixo de transmissão do GMP à caixa de transmissão traseira (CTT) e do rotor de cauda, finalizando com um teste de motor no solo e voo de Checagem de Potência do Motor (PWC). Na quarta etapa foram especificadas as técnicas pretendidas de identificação, processamento e análises de choques mecânicos de alta energia, utilizando técnicas de monitoramento vibracional na aeronave, suas simulações em laboratório e os procedimentos de captação da vibração identificada da aeronave AS350 B2. Por fim, na última etapa foram detalhadas as simulações de choques de alta energia proveniente de arma de fogo na aeronave. Os resultados apontam a viabilidade para o desenvolvimento de um sistema de detecção vibracional contínuo em helicópteros, que devido a suas atribuições promovem voos em ambientes diversos, suscetíveis a serem atingidas por choques mecânicos de alta energia, aves, objetos arremessados nas mesmas, ou até disparos de arma de fogo de alta energia nas aeronaves utilizadas pelas forças policiais brasileiras, desprovidas desta tecnologia de monitoramento.

Palavras-Chave: Aeronaves de Asas Rotativas. Análise de vibração. Choque mecânico. Armas de fogo.

ABSTRACT

Consolidated as a versatile and indispensable instrument in the fight against crime, in the increase of security detection and in the support of different policing threats, the helicopter has proven its value due to its flight, to restrictions of use if it becomes necessary to maximize its employment to carry out perpetrate in the face of society's aggressor. The present work aimed to evaluate the feasibility of developing an avionic system capable of identifying high energy impacts from firearms on rotary wing aircraft. More specifically, it is essential to analyze the structural integrity of Aircraft Cell and GMP; Evaluate the specific vibration sources of the Eurocopter AS350B2 Helicopter according to engine and cell manufacturer maintenance manuals; Identify the vibrations present in the aircraft; monitor the vibrations captured in the aircraft in different flight modalities; Develop a vibration test bench capable of simulating and distinguishing vibrations originating from the aircraft from those caused by high energy impact; Simulate, identify and analyze high energy impacts on the aircraft using the Impact Hammer Test technique on the vibrational test bench; Identify, analyze and differentiate the high energy impacts from different firearms and their respective gauges on the elaborate vibrational test bench; Promote the overlapping of the "Damage Index" (vibrational interference produced in the system) over the aircraft's "Baseline" through Matlab software. To this end, the methodology was divided into five steps. In the first stage, reviews of the works on the subject were described. In the second, the previous GMP and cell inspections were detailed on the aircraft studied, in the third the engine vibration analysis parameters were detailed accompanied by the main rotor specific inspections, from the GMP drive shaft to the rear gearbox (CTT) and the tail rotor. Finally, an engine study test and Engineer Power Check (PWC) flight. In the fourth stage, the intended techniques of identification, processing and analysis of high energy mechanical shocks (SHM) in the aircraft, their laboratory simulations and the vibration identification procedures of AS350 B2 aircraft were specified. And finally, in the last one, the simulations of high energy shocks from firearms in the aircraft were detailed. The results indicate the feasibility for the development of a continuous vibration detection system in helicopters, which due to its attributions promote flights in diverse environments, susceptible to being hit by high energy mechanical shocks, birds, objects thrown on them, or even shots. of high-energy firearms on aircraft used by Brazilian police forces, devoid of this monitoring technology.

Keywords: Rotary Wing Aircraft. Vibration Analysis. Mechanical Shock. Firearms

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - La Hélice..... | 21 |
| Figura 2 - Helicóptero modelo AS 350 B2 – Esquilo, pertencente à frota da Polícia..... | 23 |
| Figura 3 - Embates policiais embarcados em helicópteros..... | 30 |
| Figura 4 - Movimento harmônico simples | 31 |
| Figura 5 - Vibração característica de cada componente da máquina | 32 |
| Figura 6 - Domínio do tempo e da frequência..... | 32 |
| Figura 7 - Exemplo de força harmônica | 33 |
| Figura 8 - Exemplo de força periódica. | 34 |
| Figura 9 - Exemplo de força transitória..... | 34 |
| Figura 10 - Exemplo de força aleatória | 35 |
| Figura 11 - Identificação da primeira frequência natural pelo método dos elementos finitos (freq. natural = 29,24Hz) | 36 |
| Figura 12 - Imagem representativa do teste de impacto | 37 |
| Figura 13 - Classificação geral das armas de fogo segundo Eraldo Rabello (1966)..... | 46 |
| Figura 14 - Arma com cano de alma lisa e arma com cano de alma raiada | 47 |
| Figura 15 - Exemplo de arma de alma lisa (espingarda) | 47 |
| Figura 16 - Exemplo de armas de funcionamento não automático | 51 |
| Figura 17 - Cano de alma lisa e cano de alma raiada | 53 |
| Figura 18 – Munição | 55 |
| Figura 19 - Tipo de percussão | 56 |
| Figura 20 - Fogo central x Fogo radial | 57 |
| Figura 21 - Tipo de perfil e culote | 57 |
| Figura 22 - Base do culote..... | 58 |
| Figura 23 - Base dos culotes..... | 58 |
| Figura 24 - Espoleta..... | 59 |
| Figura 25 - Chamas produzidas por espoletas | 59 |
| Figura 26 - Tipos de espoleta | 60 |
| Figura 27 - Classificação da pólvora | 61 |
| Figura 28 - Taxa de queima de pólvoras regressivas (relação tempo de queima / área do grão | 63 |
| Figura 29 - Taxa de queima de pólvoras neutras (relação tempo de queima / área do grão) .. | 63 |
| Figura 30 - Taxa de queima de pólvoras progressivas (relação tempo de queima / área do grão), a partir de Z1 a pólvora torna-se regressiva | 63 |
| Figura 31 - Geometria do grão da pólvora | 64 |
| Figura 32 - Pólvora, com diversos tipos de grão, apresentando formatos, dimensões e pigmentação diversa. | 65 |
| Figura 33 - Alguns tipos de grânulos de pólvora | 65 |
| Figura 34 - Procedimento de Recarga de Munição | 67 |
| Figura 35 - Projétil..... | 67 |
| Figura 36 - Nomenclatura do projétil | 68 |
| Figura 37 - Projétil em corte transversal, com as três zonas distintas | 69 |
| Figura 38 - Principais classificações quanto ao tipo de pontas | 69 |
| Figura 39 - Principais classificações quanto ao tipo de base..... | 69 |

| | |
|--|-----|
| Figura 40 – Formatos mais comuns de pontas de chumbo..... | 70 |
| Figura 41 - Projéteis expansivos..... | 71 |
| Figura 42 - Expansão de um projétil de acordo com as velocidades de impacto..... | 71 |
| Figura 43 - Exemplo de pontas encamisadas expansivas, com maior poder de deformação, dotadas de rebaixos sem deixar o chumbo aparente..... | 72 |
| Figura 44 - Alguns tipos de pontas para as mais variadas finalidades específicas..... | 72 |
| Figura 45 - Opções de projéteis catálogo CBC..... | 73 |
| Figura 46 - Trajetória de um projétil | 83 |
| Figura 47 - Análise, balística terminal | 86 |
| Figura 48 - Top 5 armas do crime | 87 |
| Figura 49 - Revólver..... | 88 |
| Figura 50 - Conheça sua pistola | 88 |
| Figura 51 - Exemplo de variação da força com o tempo..... | 90 |
| Figura 52 - Sequência de impactos produzida pelas balas de uma metralhadora. | 90 |
| Figura 53 - Colisão perfeitamente elástica. | 91 |
| Figura 54 - Colisão unidimensional elástica com corpo inicialmente em repouso. | 91 |
| Figura 55 - Colisões perfeitamente inelásticas | 92 |
| Figura 56 - Cronograma da metodologia utilizada..... | 101 |
| Figura 57 - Helicóptero AS350B2, em inspeção de 100 horas de motor e célula..... | 105 |
| Figura 58 - Helicóptero AS350B2, em inspeção de 200 horas de motor. | 106 |
| Figura 59 - Inspeção de 750h do motor..... | 107 |
| Figura 60 - Parte frontal do motor | 108 |
| Figura 61 - Parte traseira do motor..... | 108 |
| Figura 62 - Vibrex 2000, instalado no AS350 B2..... | 109 |
| Figura 63 - Inspeção vibracional da célula..... | 110 |
| Figura 64 - Bancada de vibração com para o teste de martelo de impacto. | 112 |
| Figura 65 - Localização dos extensômetros na aeronave. | 112 |
| Figura 66 - Bancada de análise vibracional..... | 113 |
| Figura 67 - Projeção do contato do projétil com a placa de fibra de carbono. | 114 |
| Figura 68 - Estante de tiro esportivo profissional adaptada para simulação e coleta de dados. | 114 |
| Figura 69 - Posição do atirador profissional durante o disparo de teste, protegido por anteparo. | 115 |
| Figura 70 - Sistema USB 2.0-Powered Real-time Analyzer for Sound and Vibration Analysis | 116 |
| Figura 71 - Motor Turbomeca Arriel 1D1..... | 119 |
| Figura 72 - Comportamento das forças de sustentação e cinética dos rotores. | 123 |
| Figura 73 - Cinemática do platô cíclico..... | 130 |
| Figura 74 - Mecanismo antivibracional da cabine..... | 133 |
| Figura 75 - Controle do helicóptero em relação ao eixo de guindada..... | 136 |
| Figura 76 - Atuação das forças de turbulência em projétil calibre 55.6..... | 138 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|-----|
| Gráfico 1 - Torque Marginal | 120 |
| Gráfico 2 - Dados PWC..... | 121 |
| Gráfico 3 - Comparação dos sinais medidos. | 124 |
| Gráfico 4 - Comparação da medição dos sinais | 125 |
| Gráfico 5 - Vibração da aeronave..... | 125 |
| Gráfico 6 - Comparação dos sinais medidos-dado #67-PWC | 126 |
| Gráfico 7 - Comparando valores de unidade de medida RMS | 127 |
| Gráfico 8 - Comparação dos sinais medidos; PWC | 128 |
| Gráfico 9 - Comparação dos sinais medidos-dado#75-voos normal | 129 |
| Gráfico 10 - Comparando valores de unidade de medida RMS | 130 |
| Gráfico 11 - Comparação dos sinais medidos; voos normal..... | 131 |
| Gráfico 12 - Comparando sinais medidos-dado#80- voos operacional | 131 |
| Gráfico 13 – Comparando valores de unidade de medida RMS | 132 |
| Gráfico 14 - Comparação dos sinais medidos; voos operacional | 132 |
| Gráfico 15 - Comparação dos sinais medidos-dado #81- voos operacional | 133 |
| Gráfico 16 - Comparando valores de unidade de medida RMS | 134 |
| Gráfico 17 - Comparação dos sinais medidos; voos operacional | 134 |
| Gráfico 18 - Comparação dos sinais medidos-dado #78- voos operacional | 135 |
| Gráfico 19 - Comparando valores de unidade de medida RMS | 135 |
| Gráfico 20 - Comparação dos sinais medidos-dado #78- voos operacional | 136 |
| Gráfico 21 - Comparação dos sinais - armamentos utilizados | 137 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 - Tabela de equivalência de calibres de arma de fogo | 55 |
| Tabela 2 - Composição da pólvora (compostos orgânicos)..... | 66 |
| Tabela 3 - Características típicas dos projéteis utilizados em testes balísticos. | 75 |
| Tabela 4 - Incerteza do sistema de medição do sistema | 117 |
| Tabela 5 - Vibração do motor..... | 119 |
| Tabela 6 - Nível de vibração permitido pelo fabricante | 120 |
| Tabela 7 - Dados do rotor principal..... | 122 |
| Tabela 8 - Dados do rotor de cauda..... | 123 |
| Tabela 9 - Valor energético | 137 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC – Circular Consultiva
Btl RpAer – Batalhão de Radiopatrulhamento Aéreo
CBA – Companhia Brasileira de Cartuchos
CENIPA – Centro de Prevenção e Investigação de Acidentes Aeronáuticos
COMAVE – Comando de Aviação do Estado
CTA – Centro Técnico Aeroespacial
CTT – Caixa de Transmissão Traseira
CVR – *Cockpit Voice Recorder*- Caixa Preta-
DMAvEx – Diretoria de Material de Aviação do Exército
DPA – Difenilamina
FAA – Federal Aviation Administration- Administração da Aviação Federal-
FAB – Força Aérea Brasileira
FAI – Federação Aeronáutica Internacional
FBI – *Federal Bureau of Investigation*- Departamento Federal de Investigação-
FDM – *Flight Data Monitoring*- Monitoramento de Dados de Voo-
FDR – *Flight Data Recorder*- Gravador de Dados de Voo-
FOQUA – *Flight Operations Quality Assurance*- Garantia da Qualidade de Operações de Voo-
GMP – Grupo Motopropulsor
GPS – Sistema Global de Posicionamento
HUMS – *Health & Usage Monitoring Systems*- Sistema de Monitoramento do Uso e Saúde-
IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IHT – *Impact Hammer Test* -Teste do Martelo de Impacto -
M – Momento
MEDA – *Maintenance Error Decision Aid* - Ajuda à Decisão sobre Erro de Manutenção-
MEMS – *Maintenance Error Management Systems*- Sistemas de Gerenciamento de Erros de Manutenção-
NC – Nitrocelulose
NG – Nitroglicerina
NO – Monóxido de Nitrogênio
NO₂ – Dióxido de Nitrogênio
NOA – Núcleo de Operações Aéreas
OACI – Organização da Aviação Civil Internacional
PMMG – Polícia Militar de Minas Gerais
PRF – Polícia Rodoviária Federal
PWC – *Engine Power Check* - Checagem de Potência do Motor-
RFID – Identificação por Frequência de Rádio
RPM – Rotações por minuto
SEMAD – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SHM – Monitoramento da Saúde Estrutural
THM – Treinamento para Mecânicos
Ty – Empuxo
VMEP – Programa de Aprimoramento do Gerenciamento de Vibrações
VHM – *Vibration Health Monitoring*- Monitoramento da Saúde Estrutural-

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 Justificativa | 18 |
| 1.2 Objetivos | 19 |
| 1.2.1 Objetivo geral | 19 |
| 1.2.2 Objetivos específicos..... | 19 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA | 21 |
| 2.1 Aeronaves de Asas Rotativas..... | 21 |
| 2.1.1 Helicóptero AS350 B2 (características)..... | 23 |
| 2.1.2 Classificação das Aeronaves de Asas Rotativas | 24 |
| 2.1.3 Emprego Operacional dos Helicópteros nas Forças Policiais..... | 25 |
| 2.1.4 Dificuldades Operacionais quanto ao emprego das Aeronaves em conflitos sociais de alta complexidade..... | 28 |
| 2.2 Vibração | 30 |
| 2.2.1 Forças de excitação | 33 |
| 2.2.2 Frequência natural x ressonância | 35 |
| 2.2.3 Importância da Análise de Vibração | 37 |
| 2.2.4 Análise vibro-acústica | 38 |
| 2.2.5 Métodos de Análise de Vibração | 38 |
| 2.2.6 Principais Fontes de vibrações da aeronave AS350B2..... | 39 |
| 2.2.7 Monitoramento vibracional da aeronave AS350B2..... | 41 |
| 2.3 Breve Histórico do Surgimento das Armas de Fogo. | 42 |
| 2.3.1 Armas de fogo | 43 |
| 2.3.2 Classificação das armas de fogo..... | 45 |
| 2.3.2.1 Quanto a alma do cano | 46 |
| 2.3.2.2 Classificação quanto ao sistema de inflamação | 48 |
| 2.3.2.2.1 Armas de percussão extrínseca | 48 |
| 2.3.2.2.1 Armas de percussão intrínseca | 48 |
| 2.3.2.3 Classificação quanto ao sistema de carregamento | 49 |
| 2.3.2.4 Classificação quanto ao sistema de funcionamento | 49 |
| 2.3.2.4.1 Não automático | 50 |
| 2.3.2.4.2 Semiautomático..... | 51 |
| 2.3.2.4.3 Automático | 51 |
| 2.3.2.5 Classificação quanto à mobilidade e uso..... | 51 |
| 2.3.2.6 Quanto a portabilidade: | 52 |
| 2.3.3 Identificação geral das armas de fogo quanto ao calibre | 52 |
| 2.3.4 Munição..... | 55 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| 2.3.4.1 | Estojo, cápsula ou invólucro. | 55 |
| 2.3.4.1.1 | Classificação do estojo | 56 |
| 2.3.4.1.2 | Classificação quanto ao tipo de Percussão | 56 |
| 2.3.4.2 | Espoleta | 59 |
| 2.3.4.3 | Pólvora | 60 |
| 2.3.4.3.1 | Classificação da pólvora..... | 60 |
| 2.3.4.3.1.1 | Pólvora de Base Simples | 61 |
| 2.3.4.3.1.2 | Pólvora de Base Dupla | 61 |
| 2.3.4.3.1.3 | Pólvora de Base Tripla | 62 |
| 2.3.4.3.1.4 | Caracterização da Pólvora..... | 62 |
| 2.3.4.3.1.5 | Caracterização Morfológica | 62 |
| 2.3.4.3.1.6 | Caracterização Química | 66 |
| 2.3.4.3.1.7 | Ação dentro da arma | 67 |
| 2.3.4.4 | Projétil | 67 |
| 2.3.4.4.1 | Classificação dos projéteis | 69 |
| 2.3.4.4.2 | Forma do projétil vs Força de arrasto..... | 73 |
| 2.3.4.5 | Cálculo do impacto de arma de fogo..... | 74 |
| 2.3.4.6 | Classificação das Velocidade de Impacto | 75 |
| 2.3.5 | Cálculo dos elementos da trajetória na atmosfera..... | 76 |
| 2.4 | Balística | 79 |
| 2.4.1 | Balística Interna | 79 |
| 2.4.2 | Balística Intermediária | 82 |
| 2.4.3 | Balística Externa | 84 |
| 2.4.4 | Balística terminal | 85 |
| 2.5 | O emprego do helicóptero no combate à criminalidade | 86 |
| 2.6 | Choques Mecânicos (Colisões)..... | 89 |
| 2.6.1 | Classificação dos Choques Mecânicos | 91 |
| 2.6.2 | Choques mecânicos relacionados as atividades aéreas | 93 |
| 2.6.3 | Segurança de voo relacionada aos choques mecânicos na aviação | 94 |
| 3 | ESTADO DA ARTE..... | 98 |
| 4 | METODOLOGIA | 100 |
| 4.1 | Revisão dos Manuais de Manutenção disponibilizados pelos fabricantes. | 101 |
| 4.2 | Inspeções prévias de GMP e célula na aeronave | 104 |
| 4.3 | Análise de vibração do motor | 107 |
| 4.4 | Técnicas de identificação, processamento e análise de choques mecânicos de alta energia na aeronave AS350 B2. | 110 |
| 4.5 | Simulação de choques de alta energia proveniente arma de fogo na aeronave. | 113 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 4.6 | Erro de incertezas de medições..... | 115 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 118 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 139 |
| 7 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 141 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 142 |
| | ANEXO A | 151 |
| | ANEXO B | 154 |
| | APÊNDICE A | 155 |

1 INTRODUÇÃO

O helicóptero se consolidou como instrumento versátil no combate à criminalidade e consequentemente no aumento da sensação de segurança ao ser utilizado no apoio as distintas modalidades de policiamento.

No entanto, embora possua certas desvantagens, devido à complexidade mecânica de seus rotores, fragilidade de sua estrutura, manutenção mais elevada comparada às aeronaves de asas fixas, velocidade e alturas de operações limitadas devido a sua engenharia ímpar, as aeronaves de asas rotativas, em especial, os helicópteros, se destacam por conterem benefícios excepcionais como se mover lateralmente em qualquer direção em voo ou girar 360°, decolar e aterrissar verticalmente e pairar no ar sem se mover, o que as classifica como uma máquina versátil e essencial a humanidade, comumente utilizadas na área militar (BASTOS, 2004).

O principal componente de sua estrutura é a fuselagem. Esta serve como plataforma dos sistemas do helicóptero, à tripulação e aos passageiros e, ainda, à carga, estrutura esta que objetiva as análises para o presente trabalho.

O formato externo da fuselagem é restrito à missão para que o helicóptero foi desenhado. Durante o voo, a fuselagem é sustentada pelo rotor principal junto as barras de sustentação da caixa de transmissão principal, e quando a aeronave está no chão, é o trem de pouso que a suporta por meio das vigas de fixação. Estas vigas podem ser enrijecidas por travessas e arrebitadas nas vigas laterais da estrutura central e servem de apoio à parte dianteira do trem de pouso (MACHADO; REISDORFER, 2011).

Toda fuselagem deve ter um formato aerodinâmico dimensionado para uma melhor relação sustentação/velocidade, além de ser o mais leve possível. A estrutura, além disso, deve conter acessos facilitados para os reparos, inspeções e manutenção. Contudo, é necessário resistir aos esforços específicos em função do desempenho para qual foi projetada.

Em sua constituição podem ser empregados vários materiais, como: alumínio, aço inoxidável, colmeia de alumínio (honeycomb), fibra de vidro, liga de alumínio – duralumínio, e materiais compósitos como o Makrolon e Kevlar.

Nos helicópteros raramente o projetista sacrifica o fator velocidade, em prol de uma melhor relação entre sustentação/carga. Principalmente nas aeronaves de asa rotativa onde o mais importante é a capacidade de transportar carga para locais de difícil acesso, e não a velocidade de deslocamento (MACHADO; REISDORFER, 2011).

Os materiais empregados na estrutura de um helicóptero devem suportar a diferentes esforços durante sua operação, além de serem leves e resistentes. Os principais tipos de esforços são: tensão, compressão, torção, cisalhamento e suas combinações.

Os componentes estruturais são dimensionados para suportar a determinado tipo de esforço, ou uma associação de esforços estruturais. São comumente conjugados a uma treliça que ampara as cargas finais. Na maioria dos casos é mais sensato os membros estruturais suportarem esforços de tensão ou compressão, ao invés de flexão.

Os membros não estruturais, removíveis, na maioria das vezes são anexados por soldagem a ponto ou rebiteagem. Já as partes removíveis da estrutura são geralmente parafusadas.

Dessa forma, ao associar os fatores estruturas, o emprego operacional da máquina, e sua evolução, atesta-se que atualmente são capazes de elevar diversos pesos, operam em situações adversas graças a sofisticados equipamentos optrônicos e avionicos de controle de navegação e proporcionam uma interação e adaptação na área militar com os modernos e sofisticados armamentos, características essas inimagináveis aos seus primeiros idealizadores. Contudo, nem todas as aeronaves utilizadas pelas forças públicas contem proteção contrachocos de alta energia, blindagem, proveniente de arma de fogo, ou são adaptáveis a tal (MACHADO; REISDORFER, 2011).

1.1 Justificativa

Encontrar formas de otimizar o serviço policial e ampliar as chances de sucesso nas atuações e operações realizadas sempre foram metas almejadas pelas instituições responsáveis pela defesa social em todo o mundo.

Os helicópteros policiais são aeronaves de asas rotativas do tipo civis e públicas, destinadas as realizações de missões peculiares de polícia, de bombeiro militar e de defesa civil (CORRÊA, 2013). Segundo Senisse (1999), os helicópteros destinados às atividades de polícia ostensiva se classificam em quatro classes: helicópteros de instrução; patrulhamento; multimissões e transporte.

Consolidado ultimamente como instrumento indispensável no combate à criminalidade, no aumento da sensação de segurança e no apoio as modalidades distintas de policiamento, o helicóptero tem comprovado o seu indiscutível valor, contudo é indispensável potencializar decididamente esse recurso para perpetrar frente ao ímpeto dos agressores da sociedade (CORRÊA, 2013).

Todavia, a carência de investimentos nos setores tecnológicos para emprego na segurança pública pelo Estado coloca em risco, não somente a máquina, mas toda a tripulação da aeronave, por não conter algum tipo de blindagem. Esta circunstância, motiva uma

necessidade real do desenvolvimento de equipamentos capazes de orientar a tripulação em um confronto armado, para uma resposta tática mais eficiente (SILVA; SILVA, 2017).

O aumento exponencial dos custos em tecnologias aeroespaciais que elevam o preço das aeronaves na ordem de milhões de dólares, muitas vezes não vem acompanhado do verdadeiro propósito de cada aeronave, o que pode inviabilizar em um futuro próximo o número de aeronaves disponíveis para atividades policiais, e até a disposição de engajá-las em combate, conforme o agravamento da desordem social (MINAYO, 2006).

Os avanços diários na microeletrônica somados a realidade da segurança pública em áreas de risco brasileiras, trouxeram dúvidas a respeito da questão das operações ofensivas *versus* defensivas; promovendo uma possível vulnerabilidade das aeronaves às defesas antiaéreas combinados com os altos custos unitários das aeronaves que podem levar a uma reavaliação das prioridades tradicionais para as aeronaves não adaptadas a realidade de seus empenhos (SILVA; SILVA, 2017).

Este problema é comumente relatado pela imprensa nacional ao mencionar casos de incidentes e acidentes envolvendo aeronaves policiais atingidas por disparo de arma de fogo de alta energia, que dependendo do local atingido pode transcorrer em uma falha estrutural grave, perda dos controles e ineficiência dos motores, decorrendo em procedimentos para pouso de emergência ou a interceptação da aeronave em pleno voo (MENEZES, 2004).

O problema poderia ser minimizado com a instalação no painel de instrumentos da aeronave de um equipamento preventivo, que antecipe a identificação de um problema mecânico, estrutural ou elétrico antes que um desses sistemas perca a sua eficiência de voo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade do desenvolvimento de um sistema avionico capaz de identificar impactos de alta energia proveniente de arma de fogo, em aeronaves de asas rotativas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar a integridade estrutural da Célula e Grupo Motopropulsor (GMP) da Aeronave;
- Avaliar as fontes de vibrações específicas do Helicóptero *Eurocopter AS350B2* de acordo com os manuais de manutenção dos fabricantes de motor e célula;

- Identificar as vibrações presentes na aeronave;
- Monitorar as vibrações captadas na aeronave em diferentes modalidades de voo;
- Elaborar uma bancada de teste vibracional capaz de simular e distinguir as vibrações originadas da aeronave daquelas originadas pelo impacto de alta energia;
- Simular, identificar e analisar os impactos de alta energia na aeronave, utilizando a técnica de Teste por Martelo de Impacto na bancada de teste vibracional;
- Identificar, analisar e diferenciar os impactos de alta energia provenientes de diferentes armas de fogo e seus respectivos calibres na bancada de teste vibracional elaborada;
- Promover a sobreposição do “Índice de Dano” (interferência vibracional produzida no sistema) sobre a “Linha Base” da aeronave, por meio do *software Matlab*.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão bibliográfica realizada a seguir compreende o estudo da literatura referente a duas áreas de conhecimentos: armamentos e balística e vibrações mecânicas com objetivo de tornar possível o desenvolvimento de uma metodologia eficaz para detecção de disparos provenientes de arma de fogo em aeronaves de asas rotativas.

2.1 Aeronaves de Asas Rotativas

A primeira noção de helicóptero que se tem conhecimento surgiu há cerca de 400 anos antes de Cristo. Com penas de aves presas a uma haste e realizando movimento rápido das palmas das mãos, os chineses conseguiram que este invento ganhasse sustentação e fosse capaz de pairar no ar (FLEMMIG, 2011).

Conhecido por seus trabalhos artísticos, Leonardo Da Vinci também realizou diversos trabalhos científicos. Em 1483, Da Vinci desenhou o *La Hélice* (Figura 1), um extraordinário engenho que nunca chegou a sair do papel, porém demonstrou os princípios basilares do aparelho que um dia viria a se tornar o helicóptero. A asa em espiral apresentava uma breve semelhança a hélice dos helicópteros atuais (FLEMMIG, 2011).

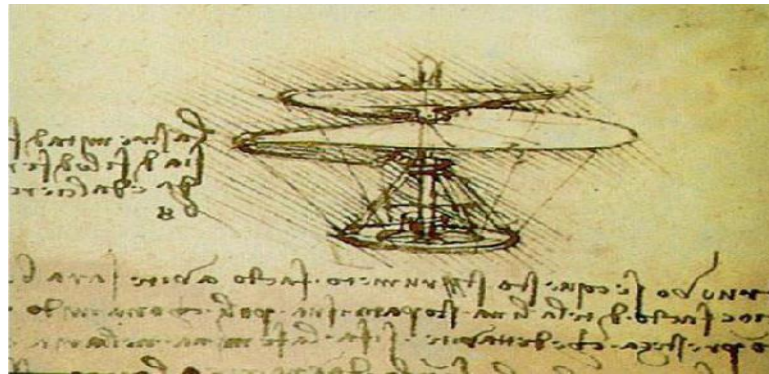


Figura 1 - *La Hélice*

Fonte: Biografia do Leonardo Da Vinci (2011).

No Brasil, Alberto Santos Dumont iniciou a aviação nacional com o lendário 14 Bis, contudo, à medida que os aviões ganhavam velocidade e peso, crescia gradativamente a necessidade de ampliar a velocidade e o espaço de pouso e decolagem. Da necessidade de retomar os experimentos com um aparelho que não exigisse de tanto espaço para decolar e pousar, surgiu o helicóptero. O primeiro voo bem-sucedido e registrado de um helicóptero ocorreu na França em 1907, realizado por Paul Cornu (TAYLOR, 1982).

Paul Cornu tornou-se um membro indiscutível da família de pioneiros de helicóptero em 13 de novembro de 1907, data em que a aeronave levantou o piloto fora da terra por

aproximadamente 20 segundos, e seguidos voos curtos ocorreram (MARCHAND, 2007; CORDEIRO JÚNIOR, 2012).

A aviação apresentou um acelerado crescimento entre a 1ª e a 2ª Guerra Mundial, utilizada predominantemente para fins militares, mas foi após esta que a atividade experimentou sua maior expansão, quando passou a ser utilizada para fins pacíficos, transportando cargas e passageiros por todo mundo.

Com o advento das tecnologias desenvolvidas durante a segunda guerra mundial que as aeronaves de asas rotativas se consolidaram como um importante meio de transporte versátil e indispensável, devido as suas condições de voo. O modelo Sikorsky R-4, projetado por Igor Sikorsky em 1942 foi o primeiro a ser produzido em larga escala, e utilizado pelas Forças Aéreas Militares (BASTOS, 2004).

Com o incentivo à produção de helicópteros no Brasil no final da década de 70, por meio da Aviação Naval Brasileira, o modelo *Eurocopter Ecureuil* ou Esquilo, projetado pela *Aerospatiale*, hoje *Airbus Helicopters*, montado no Brasil pela Helicópteros do Brasil S.A (Helibrás) se tornou um dos modelos mais comumente comercializados na América Latina, convertendo em referência para os helicópteros de sua geração e seus sucessores (MACHADO; REIDORFER, 2011).

Após essas evoluções, os sistemas dos helicópteros passaram a serem classificados em três categorias que são: célula (CEL) a qual envolve todos os componentes de estrutura e fuselagem servindo como plataforma para os demais sistemas dos sistemas; O grupo motopropulsores (GMP) que envolve a parte de motorização da aeronave, e por fim os aviônicos (AVI) que envolve os equipamentos elétricos, sensores, instrumentos de voo e demais componentes envolvidos (MACHADO; REISDORFER, 2011).

Conforme Pratts (2008), a evolução do helicóptero avançou ao longo dos últimos cem anos com o desenvolvimento do motor a combustão interna, que colaborou para o surgimento dos primeiros protótipos dos helicópteros atuais. Todavia, é necessário salientar que o aumento exponencial dos custos em tecnologias aeroespaciais que elevam o preço das aeronaves na ordem de milhões de dólares, muitas vezes não vem acompanhado do verdadeiro propósito de cada aeronave, o que pode inviabilizar em um futuro próximo o número de aeronaves disponíveis, ora pelo aumento de limitação de voo, ora pela inspeção e manutenção de seus equipamentos (SILVA; SILVA, 2017).

2.1.1 Helicóptero AS350 B2 (características)

Trata-se de uma aeronave versátil, com dimensões, potência, capacidade de carga, manobrabilidade, adequada ao emprego nas atividades de polícia ostensiva. A Figura 2 ilustra o helicóptero modelo AS 350 B2, pertencente à frota da PMMG.

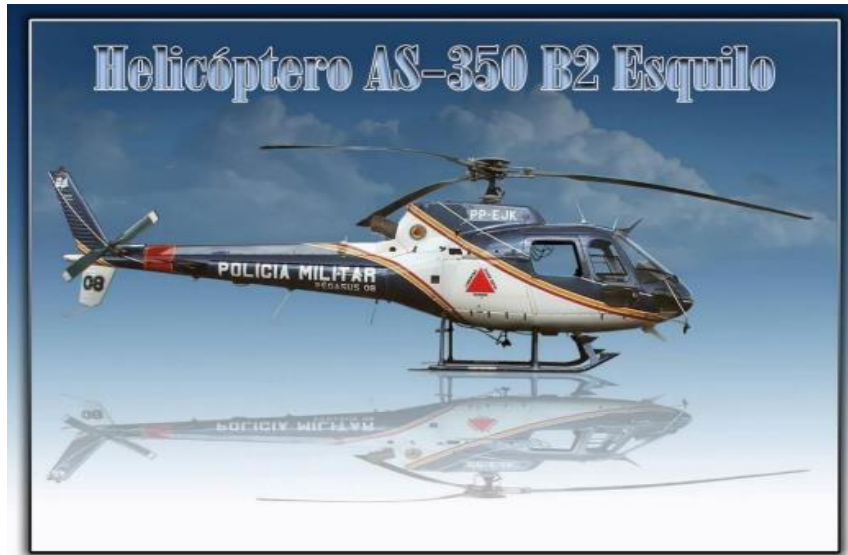


Figura 2 - Helicóptero modelo AS 350 B2 – Esquilo, pertencente à frota da Polícia
Fonte: Polícia Militar de Minas Gerais (PMMG). Batalhão de Radiopatrulhamento Aéreo (Btl RpAer).

O Esquilo – AS 350 B2 é uma aeronave considerada extremamente versátil para as operações aeropoliciais: possui a capacidade para até 04 passageiros e 02 pilotos na configuração policial, e está equipada, além dos acessórios comuns a todas as aeronaves desse tipo, com os opcionais especiais que a capacitam ao melhor apoio operacional (MINAS GERAIS, 2013).

O tipo de aeronave predominante na frota da PMMG é o helicóptero, e o modelo é o AS 350 B2 – Esquilo. A escolha pelo modelo baseou-se não somente em razão das suas características técnicas, adequadas ao emprego na atividade de segurança pública, mas, também, pela adoção de uma estratégia de padronização da frota, que tem por objetivos reduzir os custos operacionais, aumentar a disponibilidade das aeronaves e a segurança de voo, fundamentada na uniformização dos cursos, treinamentos, ferramentais e estoque de peças, o que possibilita a aplicação de insumos aeronáuticos de uma aeronave para outra, a montagem de um estoque básico de peças e uma maior familiarização da tripulação com as aeronaves empregadas (COSTA JÚNIOR, 2003).

2.1.2 Classificação das Aeronaves de Asas Rotativas

A aviação de asa rotativa no Brasil utiliza diferentes tipos de aeronaves. Portanto, faz-se necessário uma análise das aeronaves baseada nos manuais e na utilização empírica da Segurança Pública.

A Federação Aeronáutica Internacional (FAI) estabeleceu uma classificação oficial para os engenhos voadores, incluindo também os satélites artificiais, baseando-se na forma como são obtidas a sustentação e a tração. Desta forma, as aeronaves são classificadas em mais leves, tais como os balões e os dirigíveis, e mais pesadas que o ar, tais como foguetes, aeronaves de asas fixas e aeronaves de asas rotativas. De acordo com a FAI, tem-se os seguintes tipos de aeronaves de asas rotativas (MECÂNICOS DE PLANTÃO, 2019).

Autogiros, Giroplano ou Girocópteros

Nos autogiros o rotor produz apenas a sustentação. Para que o rotor gire, é necessário que a aeronave esteja em translação. A tração é obtida por um outro meio, normalmente uma hélice propulsada por um motor alternativo. O autogiro não possui asas. Desta forma, o escoamento de ar, ao passar pelo rotor, fornece a energia necessária à rotação, produzindo sustentação.

Combinado

O tipo combinado é uma aeronave intermediária entre o helicóptero e um avião. O rotor e a asa geram a sustentação necessária ao voo da aeronave. A tração é obtida por uma hélice, que é propulsada por um motor. O escoamento de ar, ao passar pelo rotor, fornece a energia necessária à rotação, produzindo sustentação.

Helicóptero

Nos helicópteros o rotor (ou rotores) produz(em) ao mesmo tempo a sustentação e a tração. A potência é fornecida ao rotor através de uma caixa de transmissão, gerando uma força aerodinâmica R que é perpendicular ao plano de rotação do disco do rotor. A inclinação desta força R produz duas componentes: a sustentação, que procura equilibrar a força peso, e a tração, que está na direção do vetor velocidade e que impulsiona o helicóptero. O motor, ao fornecer potência ao rotor, gera um torque de reação que deve ser equilibrado pelo rotor de cauda (MACHADO; REISDORFER, 2011).

Convertiplano

No convertiplano os rotores, apesar de possuírem diâmetros menores do que um rotor normal do helicóptero geram a sustentação necessária à decolagem e ao pouso vertical da aeronave. Após a decolagem no modo helicóptero (ângulo de 90°), os rotores, que são fixados à extremidade de uma asa fixa, gradativamente se inclinam (modo conversão) até um ângulo

de 0° para frente, funcionando a partir desta posição como uma hélice de um avião (modo turbohélice), gerando a tração necessária ao deslocamento horizontal. Durante a fase de transição do voo pairado para o translado, a sustentação passa pouco a pouco a ser gerada pela asa, à medida que se ganha velocidade.

2.1.3 Emprego Operacional dos Helicópteros nas Forças Policiais

O pioneiro no uso de aviões no patrulhamento ostensivo, desde 1929, foi o Departamento de Polícia de Nova York. Em 1948 o emprego do helicóptero foi introduzido como uma ferramenta de apoio ao policiamento em geral. Para a comprovação de sua eficiência nas atividades policiais era necessário que se estudasse seu emprego. Registra-se que os primeiros estudos sobre o impacto do uso de helicópteros na atividade policial receberam o nome de “*Sky Knight*” (Cavaleiro do Céu). Uma parceria entre o Departamento do Xerife do Condado de Los Angeles, a *Hughes Helicopter* (Fabricante do helicóptero), o Governo do Estado da Califórnia e a Administração Federal de Assistência aos Organismos de Segurança Pública (os dois últimos como financiadores do projeto). O Instituto para Estudos Policiais do Departamento de Criminologia do *State College em Long Beach* - Califórnia - USA, recebeu a incumbência de proceder à supervisão acadêmica e a emissão de um relatório final (SAMPAIO, 2008).

No Brasil, a utilização de aeronaves para fins policiais remonta à década de 20 e 30. Consta que a primeira polícia a utilizar o helicóptero em missões policiais foi a do Estado do Rio de Janeiro em 1971. O segundo Estado a utilizar helicópteros na atividade policial foi o Estado de Goiás em 1981. Inicialmente, o equipamento foi incorporado ao patrimônio do Corpo de Bombeiros Militar que na época pertencia à Polícia Militar.

O Estado de São Paulo iniciou as atividades aéreas com helicóptero em 1984, sendo a maior força aérea policial da América do Sul, contando com 15 helicópteros e 2 aviões. O governo deste Estado anunciou, em 2009, a aquisição de mais 4 helicópteros para compor a frota e continuar o processo de desconcentração de aeronaves para o interior. No início de suas atividades, segundo dados da própria polícia paulista, as ocorrências de saques e vandalismos bem como assaltos a bancos tiveram quedas acentuadas tendentes a zero.

Na sequência outros Estados implantaram o serviço de radiopatrulhamento aéreo como:

- a) Estado de Santa Catarina (1983);
- b) Estado do Rio Grande do Sul (1985);
- c) Estado de Minas Gerais (1987)

- d) Estado do Espírito Santo (1992);
- e) Estado do Ceará (1995).

Além dos já mencionados há outros que possuem o serviço de radiopatrulhamento aéreo nas instituições policiais. Há também estudos para viabilização da implantação ou consolidação das atividades aéreas nas polícias de outros estados brasileiros que ainda não contam com esse tipo de atividade policial.

Além das operações das polícias militares mencionadas, ainda listamos outros órgãos como o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA), operando aeronaves através do Núcleo de Operações Aéreas (NOA), com sede em Brasília/DF; a Polícia Rodoviária Federal (PRF), através da Divisão de Operações Aéreas, com sede na capital federal e criada em 1999; a Polícia Federal cujas operações se iniciaram em 1996, a Receita Federal com sede no Rio de Janeiro e outras instituições públicas. Não é raro envolver a questão da tecnologia no trabalho policial moderno. A partir do momento que as polícias passaram pelo processo da profissionalização, cada vez mais esse grupo de pessoas, a quem compete garantir a ordem e a paz, recebe investimentos em treinamento, equipamentos e novas tecnologias.

A utilização de helicópteros na atividade policial está relacionada ao emprego de novas tecnologias. Segundo Manning (2003, p. 375) “[...] há muito a polícia vem desejando que a tecnologia possa facilitar os problemas que mais a aborrecem”.

Percebe-se que a questão da tecnologia está diretamente relacionada com a resolução de problemas. As tecnologias existentes permitem que o trabalho policial seja feito com mais qualidade e que atinja mais facilmente seus objetivos.

Uma das atividades especializadas das forças policiais do Brasil que vem ganhando cada vez mais espaço, acompanhando a evolução científica e colocando em prática o referencial teórico mencionado sobre a especialização e profissionalização da polícia, é a atividade aérea.

Na atualidade, a PMMG (Polícia Militar de Minas Gerais) opera seis (6) helicópteros e três (3) aviões próprios, além de dois (2) helicópteros e um (1) avião da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD). Tem a segunda maior frota de aeronaves no contexto das unidades aéreas de segurança pública brasileira, atrás apenas do estado de São Paulo.

Em decorrência da vasta extensão territorial do estado, encontra-se em plena execução o projeto de desconcentração de bases aéreas no interior. Quatro (4) já foram efetivadas, nas cidades de Uberlândia, Montes Claros, Juiz de Fora e Governador Valadares, além da base central, localizada no aeroporto da Pampulha em Belo Horizonte. Com o Decreto Estadual 47 182, de 5 de maio de 2017, que criou o COMAVE – Comando de Aviação de Estado, foi criada

também uma base na cidade de Pouso Alegre, agora no conceito multimissão e de forma integrada a outros órgãos do estado.

O portfólio de serviços prestado pela aviação da PMMG apresenta-se amplo e diversificado e se consubstancia nos campos do rádio patrulhamento aéreo, meio ambiente, saúde e defesa civil. As aeronaves na PMMG executam serviços de rádio patrulhamento no campo da polícia ostensiva e em apoio: ao policiamento ostensivo geral, de meio ambiente, ocorrências de alta complexidade, de trânsito urbano e rodoviário, ao policiamento de eventos artísticos e desportivos, em controle de distúrbios, movimentos sociais e cumprimentos de mandados, à atuação em rebeliões em casas de custódia de detentos, no combate ao crime organizado e às operações de reintegração de posse (MARQUES, 2006).

Mesmo com a descrição generalizada, atividades aero policiais específicas tornam-se significativas nesta narrativa, como: levantamento de informações de segurança pública, identificação de pontos sensíveis e vulneráveis, levantamento de imagens de interesse operacional, transporte de tropa, segurança da força policial militar, transporte e escolta de pessoas e valores, varreduras em matas e terrenos baldios e acompanhamento, interceptação, cerco e bloqueio de pessoas e veículos em fuga (MARQUES, 2006).

Tratam-se de serviços realizados em apoio às viaturas que atuam diuturnamente no serviço de policiamento ou em ocorrências de maior complexidade quando a intervenção da aeronave pode ser direta ou como plataforma de observação e repasse de informações aos policiais militares que atuam em solo. No campo do meio ambiente, os serviços prestados são de monitoramento, fiscalização ambiental e combate a incêndio florestal. No campo da saúde, os serviços são de resgate (após atendimento pré-hospitalar primário); transporte inter-hospitalar, busca e salvamento e transporte de órgãos e tecidos humanos para transplantes (MACHADO; COTA, 2012).

No campo da defesa civil as missões aero policiais desencadeadas são: sobrevoos de reconhecimento e avaliação, levantamento de pontos críticos e pontos seguros, resgates de pessoas, salvamento aquático, transporte de equipamentos, transporte de técnicos, transporte de socorristas, transporte de vítimas, traslado de autoridades, transporte de gêneros alimentícios e medicamentos, monitoramento do trânsito urbano e rodoviário, evacuação de pessoas ilhadas e apoio ao policiamento para prevenção a saques em comércios e invasões de propriedades.

Trata-se de uma ferramenta tecnológica de locomoção que se mostra versátil quanto ao seu emprego e apresenta as seguintes vantagens de acordo com Minas Gerais (2013, p.19):

a) aumenta a velocidade de ação-resposta a delitos que comprometem seriamente a tranquilidade pública;

- b) proporciona maior flexibilidade e mobilidade nas operações aumentando assim a área de influência policial-militar e ação de presença contínua;
- c) facilita a realização de operações policial-militares destinadas a suprir exigências não atendidas pelo policiamento ostensivo normal;
- d) permite, em caráter supletivo, ações psicológicas de saturação e concentração de ações ostensivas para fazer frente a uma inquietante situação temporária;
- e) proporciona maior aplicação no policiamento ostensivo, causando no possível agente do delito um desestímulo para o cometimento de atos antissociais;
- f) debilita o agente delituoso no campo psicológico deixando o mesmo altamente inquieto pela presença da aeronave;
- g) permite à Força Policial Militar vencer distâncias e ultrapassar barreiras que poderiam dificultar ou impedir a ação de forças terrestres na resposta para fazer cessar o ato antissocial ou suas consequências;
- h) possibilita a descoberta, identificação e localização de atividades ou ações que tenham como finalidade a mudança ou perturbação da ordem social;
- i) possibilita condições de se estabelecer um ponto de observação aérea criando assim uma completa e nova dimensão para a obtenção de informações;
- j) representa um elo adicional na coordenação e no controle de frações empenhadas em intervenções policial-militares permitindo, ao escalão de comando, a obtenção de um entendimento mais preciso da situação que lhe possibilitará tomar decisões adequadas e emitir ordens convenientes.

Pelo seu aspecto de multimissão que proporciona uma série de serviços policial-militares, o helicóptero se apresenta, na atual conjuntura, como recurso imprescindível para os serviços de Defesa Social e proteção ao meio ambiente (CORRÊA, 2013).

2.1.4 Dificuldades Operacionais quanto ao emprego das Aeronaves em conflitos sociais de alta complexidade

Por sua versatilidade, os helicópteros são capazes de pousar em áreas restritas permitindo um apoio imediato às frações em solo. Esses procedimentos devem ser feitos com cautela, exigindo elevada proficiência do Comandante da Aeronave e total coordenação da equipe a bordo (MINAS GERAIS, 2013).

O voo visual noturno possui uma série de peculiaridades. Muitas operações são prejudicadas pela falta de luminosidade e acabam não sendo possíveis de se cumprir neste período. As operações de defesa civil (atendimento pré-hospitalar, salvamento em meio

aquático), as extrações verticais e outras que exijam técnicas especiais, são desaconselháveis de se cumprir pelas condições encontradas à noite (MINAS GERAIS, 2013).

A impossibilidade de atendimento é justificada pelo fato de as cidades possuírem, além de obstáculos naturais, uma série de estruturas físicas que ocupam o espaço aéreo (antenas, fios da alta tensão, edifícios, etc.), muitas delas não sinalizadas adequadamente. Visualizar esses obstáculos à noite é uma tarefa complicada e exige atenção redobrada de toda a tripulação (MINAS GERAIS, 2013).

Em linhas gerais, o serviço aéreo policial tem a função de vigilância, agindo em proveito do seu excelente campo de visão e cobertura. É basicamente um serviço de apoio, pois depende de uma interação com os demais recursos policiais em solo para que obtenha um resultado satisfatório (MACHADO; COTA, 2012).

Porém não são raras as vezes em que o helicóptero e sua tripulação são a única presença policial na cena. Diante de certas circunstâncias, é necessária uma intervenção repressiva direta.

E essas situações acontecem com frequência, a ponto de policiais serem feridos ou mortos em voo, tanto nos EUA como no Brasil. O simples fato de buscar um criminoso armado e homiziado em uma região de mata fechada já é o suficiente para considerar que esse agente possa fazer uso de sua arma contra a tripulação (MACHADO; COTA, 2012).

A esse propósito, de forma elucidativa em questão legal de atuação policial, Hipólito e Tasca (2012, p. 113) descrevem:

[...] a missão constitucional das polícias militares é a preservação da ordem pública, devem elas atuar localmente e instrumentalizadas para ações multidisciplinares, considerando um maior número de variáveis vinculadas a problemática da ordem pública local [...].

O risco iminente da vida, atrelado a fatores constitucionais como a legítima defesa, de si e de outros, passa a ter como aliada às questões inerentes a preservação da ordem pública, pois o agente da lei tem o dever de atuar, como atribuição do serviço policial, quando presente em situações onde haja pessoas em conflito com a lei.

Com o intento de ilustrar as situações em que já ocorreram embates de policiais embarcados em helicópteros, onde certamente houve a necessidade de utilização da aeronave como plataforma de tiro, necessário se faz um breve histórico de confrontos, exposto na Figura 3.

| ANO | EVENTO |
|------|---|
| 1983 | Morte de tripulante da Polícia Estadual do Alaska durante busca de homicida na localidade de Manley Hot Springs, alvejado por disparos de fuzil quando embarcado em um helicóptero Bell Jet Ranger. |
| 2003 | Morte de Policial Federal a bordo de helicóptero da corporação em confronto com assaltantes de banco na Bahia. |
| 2004 | Ferimentos em dois tripulantes do helicóptero Fênix da Polícia Militar do Rio de Janeiro, incluindo oficial posicionado no banco dianteiro esquerdo, durante operação policial, causados por disparos de fuzil. |
| 2007 | Morte de tripulante da Polícia Civil do Rio de Janeiro, pertencente à CORE ^o , alvejado a bordo de um Esquilo B2 durante operação policial em resgate a colegas sitiados por traficantes. |
| 2009 | Morte de três tripulantes da Polícia Militar do Rio de Janeiro, quando uma aeronave Esquilo B2 foi abatida por grupo de traficantes durante operação policial. |

Figura 3 - Embates policiais embarcados em helicópteros
Fonte: Machado e Cota, 2012.

As situações acima descritas não foram pormenorizadas. Porém, merecem algumas considerações: O incidente envolvendo a morte do policial americano em 1983 foi um exemplo clássico da necessidade de uma intervenção direta. A guarnição localizou o criminoso e não havia qualquer apoio em solo nas imediações, pois a busca se concentrava em uma reserva florestal muito extensa (MACHADO; COTA, 2012). Neste caso, houve o enfrentamento com a aeronave a baixa altura e o agente foi neutralizado por um segundo policial embarcado, postado no banco dianteiro no lado esquerdo da aeronave. Todo o enfrentamento durou alguns segundos.

As missões demandadas pelas equipes aéreas, como as ocorridas em 2004, 2007 e 2009, tinham muito mais características de missões militares que propriamente policiais. As tripulações foram acionadas para reconhecer terreno, auxiliar patrulhas isoladas sob fogo, fornecer munições, resgatar policiais feridos em área de confronto e fornecer cobertura e resgate de colegas de uma segunda aeronave policial abatida (MACHADO; COTA, 2012).

2.2 Vibração

Existem várias definições para vibração, mas, de acordo com Iida (2005), “vibração é qualquer movimento que o corpo executa em torno de um ponto fixo. Esse movimento pode ser regular, do tipo senoidal ou irregular, quando não segue nenhum movimento determinado, como no sacolejar de um carro andando em uma estrada de terra”.

Especificamente, vibração é uma série de oscilações que possuem velocidade, ação que necessariamente envolve deslocamento e aceleração. Em medicina aeroespacial, a aceleração de uma vibração é expressa em múltiplos da aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) e, dependendo desses valores que muitas vezes são inevitáveis e necessários, pode causar problemas de saúde para aqueles a ela expostos (DEHART, 1985); (BRAGA, 2012).

De acordo com Silva (2009) “Vibração é definida como um movimento periódico, i.e., uma oscilação de uma partícula, um sistema de partículas ou um corpo rígido em torno de uma posição de equilíbrio”.

A vibração consiste no movimento oscilatório em torno de uma posição em repouso. Manifesta-se sempre que ocorra uma força de excitação interna ou externa. A amplitude de vibração é função da intensidade da força de excitação, da massa e rigidez do sistema e do amortecimento do sistema. A vibração ocorre num equipamento rotativo sempre que o centro de massa não coincida com o centro de rotação (PARREIRA, 2009).

O modo mais simples de movimento vibratório é mostrado na Figura 4.

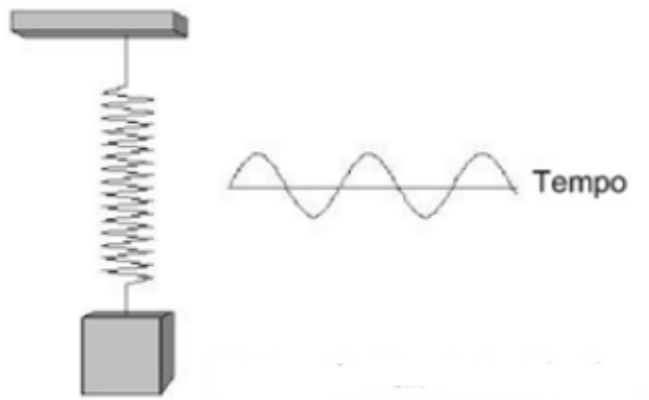


Figura 4 - Movimento harmônico simples
Fonte: Parreira (2009).

Quando a massa é afastada da sua posição de equilíbrio e largada, o seu deslocamento, x , ao longo do tempo, t , com a frequência, f e a amplitude, conforme equação 1.

$$x = A \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

As vibrações podem também ser descritas em termos da velocidade e da aceleração de um ponto do corpo. A velocidade de um ponto da massa num dado instante t é dada conforme observado na equação 2

$$\frac{dx}{dt} = 2\pi A \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

E a aceleração pela equação 3.

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -(2\pi f)^2 A \sin(2\pi ft) \quad (3)$$

Em um sistema mais aproximado da realidade não existe apenas uma frequência característica, mas uma frequência para cada componente rotativo da máquina. Nestas

condições a forma de onda resultante não será uma senoidal e pode ser bem mais complexa conforme Figura 5.

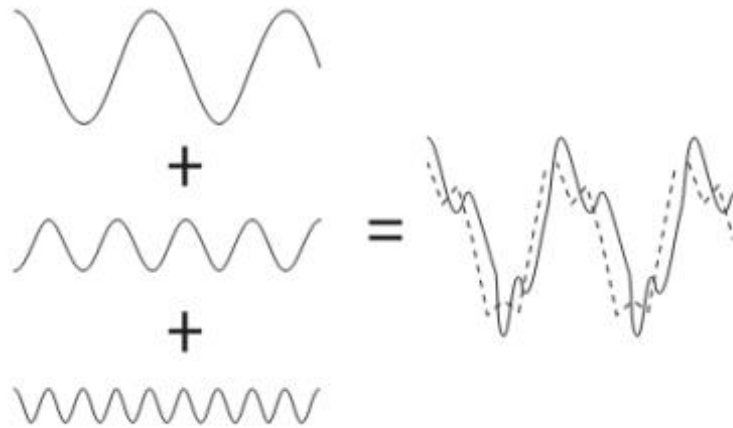


Figura 5 - Vibração característica de cada componente da máquina
Fonte: Parreira (2009).

Esta representação dos fenômenos vibratórios, no domínio do tempo, especialmente quando as fontes de sinal são diversas, torna difícil a interpretação do que está a acontecer.

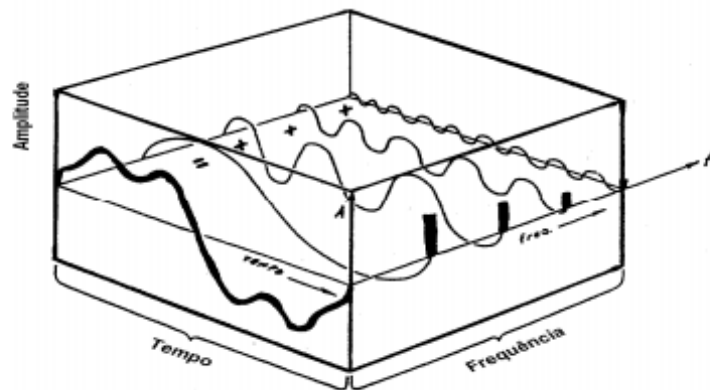


Figura 6 - Domínio do tempo e da frequência
Fonte: Parreira (2009)

Uma forma de facilitar a análise do sinal é passar do domínio do tempo para o domínio da frequência onde a amplitude da frequência característica de cada componente vai aparecer bem discriminada, conforme Figura 6.

As principais causas de vibração em máquinas são desequilíbrios, desalinhamentos, desapertos, defeitos em rolamentos, defeitos em acoplamentos, defeitos em transmissões, desgastes/excentricidades em engrenagens, forças aerodinâmicas e hidrodinâmicas, forças eletromagnéticas, aperto/fixação deficiente, atrito ou ressonância. (HARRIS e ALLAN, 2002; SCHEFFER e GIRDAR, 2004).

2.2.1 Forças de excitação

De acordo com a força de excitação que age em um sistema mecânico as respostas de vibração podem ter características diferentes. A seguir os tipos de excitação mais comuns, conforme Silva (2009):

Força harmônica: forma mais simples de excitação em sistemas mecânicos, descrita pela equação 4.

$$F(t) = F \sin(\omega t) \quad (4)$$

Onde F é a amplitude da excitação e ω a frequência de excitação em rad/s. Também é usual descrever as frequências em Hertz Hz¹. A frequência em Hz é nomeada de f e descrita pela equação 5.

$$f = \frac{1}{T} \quad (5)$$

sendo T o período de oscilações (tempo que o movimento harmônico leva para repetir seu padrão), medidos em s. A relação entre as frequências em Hz e rad/s é dada conforme equação 6.

$$f = \frac{1}{2\pi} \omega \quad (6)$$

Um movimento harmônico é definido completamente a partir do conhecimento das variáveis mencionadas. A Figura 7 mostra um exemplo gráfico de uma força deste tipo.

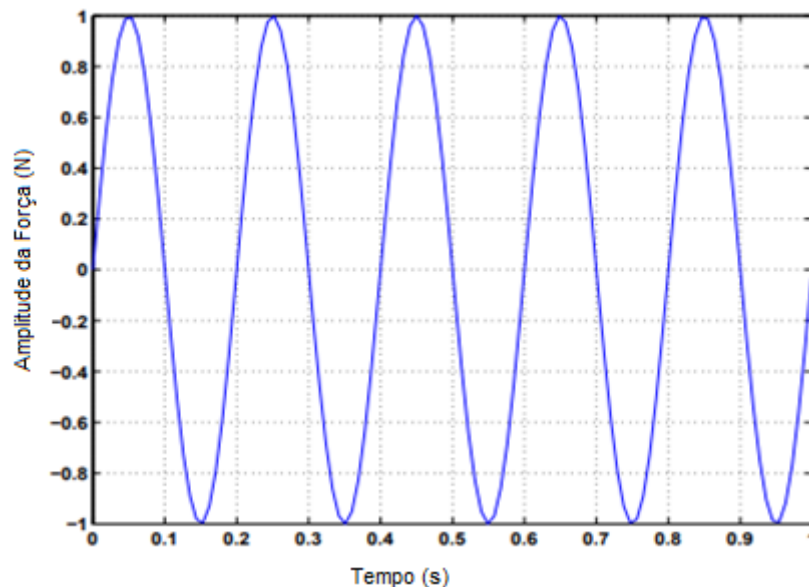


Figura 7 - Exemplo de força harmônica
Fonte: Silva (2009).

¹ Em homenagem ao cientista alemão Hertz, o primeiro a estudar as ondas de rádio, que também são vibrações, porém de origem elétrica.

Um exemplo prático de excitação harmônica aparece em rotores com massa desbalanceada.

Força periódica: Tipo de excitação que se repete após um período, mas não de forma exatamente igual, conforme o exemplo da Figura 8.

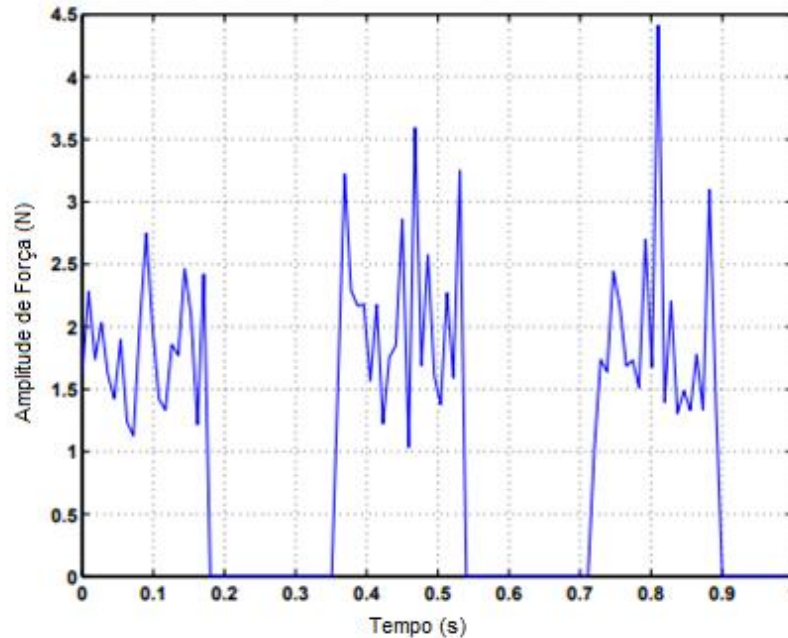


Figura 8 - Exemplo de força periódica.
Fonte: Silva (2009)

Motores de combustão interna são exemplos deste tipo de excitação.

Força transitória: Excitação caracterizada por uma liberação de energia grande em um intervalo curto de tempo. A Figura 9 ilustra graficamente este tipo de excitação.

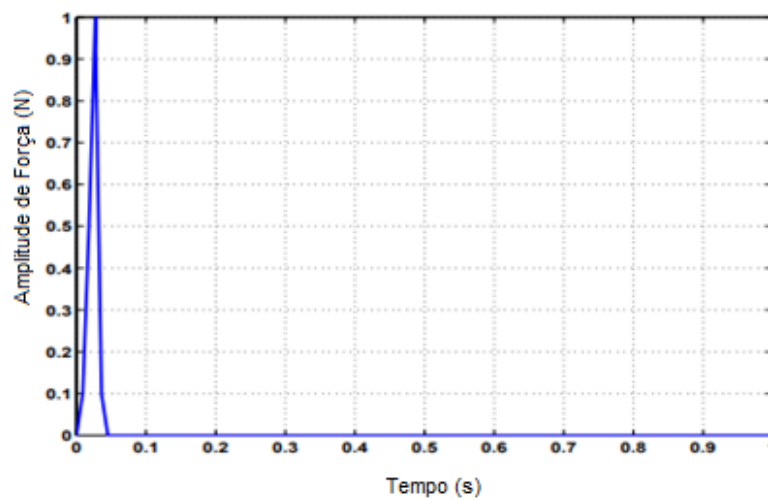


Figura 9 - Exemplo de força transitória
Fonte: Silva (2009)

Inúmeros exemplos descrevem este tipo de força: explosão, impacto, etc.

Força aleatória: São forças de excitação que não descrevem um padrão determinístico que possa ser definido por uma equação. Para tratar sistemas excitados por forças aleatórias é necessário utilizar métodos estatísticos.

A Figura 10 ilustra um sinal típico de excitação aleatória.

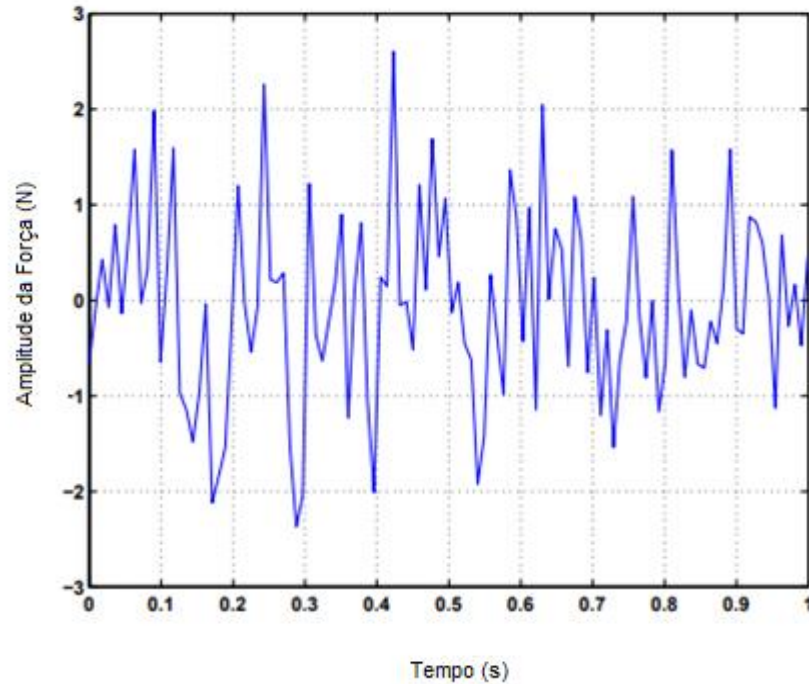


Figura 10 - Exemplo de força aleatória
Fonte: Silva (2009)

Fenômenos aeroelásticos são exemplos de sistemas excitados por forças aleatórias, como forças em asas de aviões, ventos em colunas de pontes, etc.

2.2.2 Frequência natural x ressonância

Todos os materiais possuem uma ou mais frequências naturais de vibração que são intrínsecas ao material e dependem de variáveis tais como: forma, peso, ajuste, constituição física e química (TAVARES, 2000). Isto porque a frequência natural é função da massa e rigidez do sistema. Cada material possui a sua própria frequência de resposta quando submetido a uma excitação. Essa frequência é chamada de frequência natural. Quando um material oscila em certa frequência e transfere energia a outro que passa a vibrar em igual frequência, ocorre o fenômeno chamado ressonância. Portanto, ressonância é a capacidade que um material possui de vibrar igualmente ou multiplicar em si a energia vibratória recebida (BRAGA, 2012).

Existem dois métodos de identificação da frequência natural de um equipamento sendo eles o método matemático e o método experimental.

O método matemático consiste em cálculos analíticos ou modelos matemáticos computacionais como por exemplo o Método dos Elementos Finitos, que são capazes de identificar as frequências naturais de uma estrutura. Nesse caso, a máquina não precisa ser construída para as frequências naturais serem identificadas, ou seja, se tratando de métodos matemáticos, apenas o projeto é suficiente para o cálculo das frequências naturais (GUILHERME, 2016). Na Figura 11 apresenta-se a identificação da primeira frequência natural por elementos finitos.

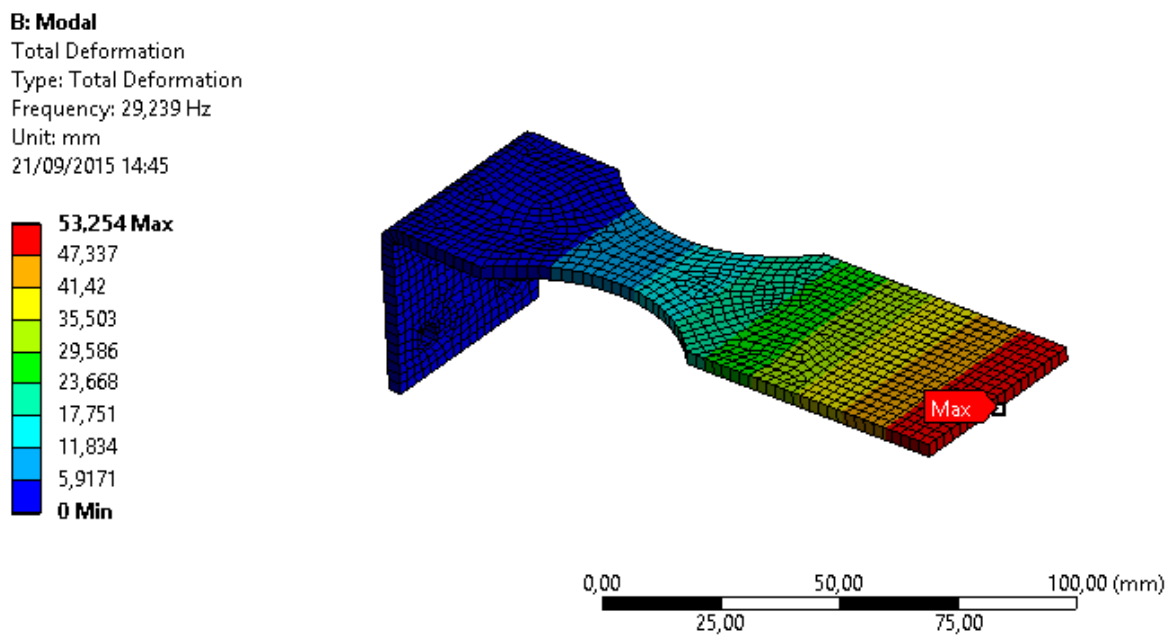


Figura 11 - Identificação da primeira frequência natural pelo método dos elementos finitos (freq. natural = 29,24Hz)
 Fonte: Guilherme (2016)

Os métodos experimentais consistem em identificar as frequências naturais na própria peça física, ou seja, ela já deve estar construída. A ideia desse método é provocar uma vibração para que o sistema analisado entre em ressonância (frequência de operação = frequência natural). Isso pode ser obtido na própria montagem da máquina, caso seja possível variar a frequência de operação até encontrar a frequência natural, como também com a utilização de excitadores ou atuadores hidráulicos que possam excitar o sistema sob análise (GUILHERME, 2016).

Outro método experimental muito interessante é o teste de impacto (*Bump Test*), que consiste na aplicação de uma força externa, exercida por um martelo específico que excita a frequência natural da peça. A Figura 12 apresenta um exemplo da utilização do teste de impacto.

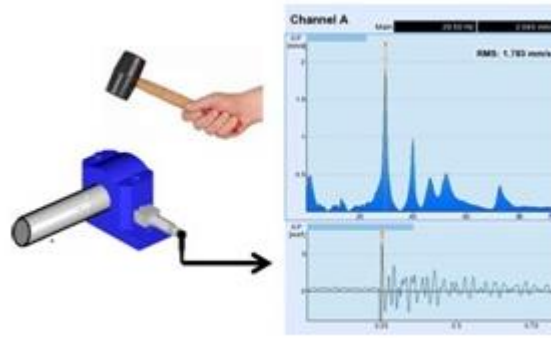


Figura 12 - Imagem representativa do teste de impacto
Fonte: Guilherme (2016).

2.2.3 Importância da Análise de Vibração

Por meio da medição e análise das vibrações existentes numa máquina em operação, é possível detectar com antecipação a presença de falhas que podem comprometer a continuidade do serviço, ou mesmo colocar em risco sua integridade física ou a segurança do pessoal da área. A aplicação do sistema de análise de vibrações permite detectar e acompanhar o desenvolvimento de falhas nos componentes das máquinas.

Por exemplo, pela análise de vibrações constata-se as seguintes falhas: rolamentos deteriorados; engrenagens defeituosas; acoplamentos desalinhados; rotores desbalanceados; vínculos desajustados; eixos deformados; lubrificação deficiente; folgas excessivas em buchas; falta de rigidez; problemas aerodinâmicos ou hidráulicos; cavitação; desbalanceamento de rotores de motores elétricos.

Especificamente na área da aviação destaca-se o acidente com o Boeing 737- 400 da empresa British Midland Airways no ano de 1989, que se tornou o marco da história da vibração na aviação. O Boeing colidiu com a pista e matou 47 pessoas. De acordo com o relatório final de investigação do acidente, o problema inicial foi um nível de vibração anormal ocorrido em um dos motores, bem como a hesitação do copiloto em informar em qual dos motores, direito ou esquerdo, isso estava ocorrendo. De acordo com o mesmo relatório, isso poderia ter sido por uma dificuldade na leitura dos instrumentos, devido à vibração excessiva na cabine (BRAGA, 2012).

Depois disso, começou a preocupação com o controle de vibração na aviação e os fatores humanos. Segundo Smith *et al.* (2007), desde 1971 a aviação naval e a força aérea dos Estados Unidos têm desenvolvido estudos com a preocupação em relação à exposição à vibração em que estão sujeitos seus pilotos, e o conseqüente efeito dessa exposição na saúde física e mental, particularmente para os pilotos de aeronaves de asa fixa (aviões) com motor a

hélice, que podem estar sujeitos a níveis de vibração mais altos e por um período prolongado. Os níveis de vibração devido ao aumento da potência do motor e ao tempo de exposição têm sido associados a diversas queixas de desconforto, irritação, fadiga e mesmo dores nas costas. Tal fato tem motivado uma conduta de estudo a fim de controlar essa vibração (BRAGA, 2012).

2.2.4 Análise vibro-acústica

A análise vibro-acústica apresenta um lugar de destaque no projeto de máquinas, automóveis, aeronaves, etc. Um nível de ruído ou vibração excessivo em sistemas mecânicos pode comprometer o correto funcionamento de sistemas de engenharia, prejudicar o conforto humano e diminuir a vida útil do sistema. Portanto, uma análise sobre os níveis de vibração que um sistema mecânico pode atingir é extremamente necessária e desejada em projetos modernos, seja no momento de síntese ou análise de algum protótipo (SILVA, 2009).

Um exemplo é a vibração de um motor de automóvel. O motor é montado em cima de coxins que são presos a estrutura metálica do automóvel. Assim, se a frequência de rotação do motor coincidir com alguma frequência natural da estrutura do automóvel, como as frequências naturais do capô, pode ocorrer um efeito trágico. Portanto, durante o projeto de um carro, os engenheiros devem conhecer muito bem quais são as frequências naturais do sistema como um todo e de seus componentes, para se evitar ressonância, ou mesmo ruído indesejável em painéis e interior (SILVA, 2009).

Outro exemplo interessante é o fenômeno aero elástico de *flutter* que ocorre principalmente em estruturas aeronáuticas. *Flutter* é uma vibração em voo de estruturas flexíveis causada pela energia de fluxos de ar absorvidas por superfícies de sustentação (ocasionadas sobretudo devido ao despreendimento de vortices). Este efeito conduz a uma instabilidade potencialmente destrutiva resultante de uma interação entre forças elásticas, de inércia e aerodinâmicas. Assim, para uma aeronave ser certificada pelo Centro Técnico Aeroespacial/ Federal Aviation Administration (CTA/FAA) as empresas aeronáuticas devem ter total conhecimento sobre frequências de ressonância em função das velocidades de voo, peso, altitude, pressão, etc. Consequentemente, as exigências básicas para os engenheiros envolvidos neste processo é ter conhecimentos básicos sólidos em vibrações mecânicas (BISPLINGHOFF, ASHLEY, HALFMAN, 1996).

2.2.5 Métodos de Análise de Vibração

Na década de 70, iniciou-se a medição de vibrações com o uso do equipamento

conhecido como “*Vibrex*” da Chadwick-Helmuth. Essa medição era voltada para verificar se as pás estavam corretamente balanceadas, caso não estivessem, eram tomadas medidas para ajuste das pás. Por volta de 1980, com 54 helicópteros para manter, a Guarda Nacional da Carolina do Sul começou a usar o “*Vibrex*” para medir vibração dos componentes rotativos do helicóptero bi-pá Huey. As medidas economizaram muito tempo em diagnósticos e durante mais de 15 anos diversas falhas foram detectadas por intermédio da medição de vibrações. Visando sistematizar e automatizar um programa de controle de vibrações nasceu o *Vibration Management Enhancement Program* (VMEP) - Programa de Aprimoramento do Gerenciamento de Vibrações (PEGADO, 2010).

Muitas empresas e as forças armadas empregam a medição das vibrações apenas para corrigir o balanceamento das pás quando se detecta um aumento do nível vibratório na aeronave. A Diretoria de Material de Aviação do Exército (DMAvEx) está pesquisando um programa de monitoramento de vibrações através do acompanhamento da amplitude de vibração que é observada pelos espectros de frequência (PEGADO, 2010).

Algumas aeronaves possuem sensores espalhados pela aeronave que geram diversos parâmetros e fornece-os para o *Health & Usage Monitoring Systems* (HUMS) – Sistema de Monitoramento do Uso e Saúde, possibilitando acompanhar a situação de diferentes componentes do helicóptero. Por comparação com os parâmetros de componentes em perfeito estado de funcionamento, descobrem-se diferentes panes. Esses dados também podem ser fornecidos para a vulgarmente conhecida Caixa Preta - *Cockpit Voice Recorder/ Flight Data Recorder* (CVR/FDR) - Gravador de voz/Gravador de Dados onde são gravados os parâmetros da aeronave e do motor para serem usados em caso de investigação de acidentes e incidentes (PEGADO, 2010).

2.2.6 Principais Fontes de vibrações da aeronave AS350B2

No âmbito aeronáutico, as principais fontes de vibração são os sistemas de propulsão, os sistemas energizados das aeronaves, os fatores aerodinâmicos e as condições atmosféricas e de pilotagem que podem gerar também vibrações. O sistema de propulsão das aeronaves gera vibrações de grande energia que são transmitidas por toda a estrutura da aeronave e conseqüentemente ao piloto. As vibrações atingem seu auge durante decolagem, porém diminuem quando a altitude de voo é alcançada devido ao ar mais rarefeito e a velocidade de cruzeiro (BRAGA, 2012).

Nos voos de helicóptero, em que na maioria das vezes a altitude de voo é baixa, isso não ocorre, permanecendo a vibração durante todo o voo. No helicóptero, o piloto recebe a

vibração através do assento de pilotagem, do piso da aeronave, dos comandos manuais e dos pedais (BRAGA, 2012).

Para Aquino (2011), todas as máquinas rotativas produzem vibrações, a sua presença é normalmente caracterizada como um problema sério em diversas aplicações. Com isso, um sistema de controle de vibração é aplicado com o intuito de reduzir os danos provenientes de níveis de vibrações mais altos. Tomando-se o helicóptero como foco, é inevitável que as vibrações não existam, contudo podem ser minimizadas no intuito de garantir o maior tempo de vida da máquina e seus componentes e preservar os operadores desse risco físico causador de vários danos orgânicos (SÉRVULO, SABA 2009).

Por ter asas (pás de rotor), e muitas partes rotativas, surgem nos helicópteros inúmeros desbalanceamentos ou reações que podem provocar vibrações surgem nos helicópteros (SÉRVULO, SABA 2009). E se tratando dessa máquina a vibração não é tão aceitável, isso por causa de problemas estruturais e problemas orgânicos que os pilotos, mecânicos e passageiros podem sofrer. É comum dividir as vibrações de helicópteros em três categorias:

(a) alta frequência, onde a frequência de vibração (f) é muito alta em comparação com a frequência de rotação do rotor (fR), ($f \geq 20 fR$) – estas vibrações são principalmente pelo motor ou pela caixa de engrenagens;

(b) frequência moderada ($20 fR > f \geq 5 fR$) – o rotor de cauda;

(c) baixa frequência ($5 fR > f$) que é causada principalmente pelo rotor principal - estas vibrações são as que tem mais efeitos na tolerância humana e fadiga de partes mecânicas ROSEN (1997).

As vibrações no helicóptero podem ser de dois tipos: vertical e lateral (horizontal).

a) vertical – é causada quando a pá está fora de pista (*tracking*), isso faz com que o helicóptero seja sacudido na vertical, conhecido como galope. Este galope é acentuado com o aumento da velocidade, porém permanecendo de baixa frequência. Problemas nas hastes de mudança de passo (*pitch links*), rolamentos de perfilamento (rolamento de mudança de passo) ou TAB (compensador da pá) podem ser os causadores dessa vibração (SÉRVULO, SABA 2009); (MACHADO, REISDORFER 2011).

b) lateral – o desbalanceamento do rotor principal é o causador dessa vibração, ela sacode o helicóptero na horizontal (tanto da frente para trás como de um lado para o outro). A força centrífuga puxa o helicóptero para o lado que está mais pesado do rotor principal. Este tipo de vibração permanece constante em todas as velocidades do helicóptero, pois a rotação por minuto deve permanecer constante. Esta vibração pode ser causada por problemas no centro

de massa da pá, rolamentos do cubo (batimento) ou amortecedores (SÉRVULO, SABA 2009); (MACHADO, REISDORFER 2011).

2.2.7 Monitoramento vibracional da aeronave AS350B2

A vibração é um fator constante para quem opera com helicópteros, pois possui vários componentes rotativos. Com isso, o helicóptero, os pilotos e mecânicos são os que mais sofrem com esse fenômeno físico. Por isso é de suma importância o controle das vibrações nas máquinas rotativas, pois auxilia na prevenção de falhas, diminui o custo de manutenção, prolonga a vida útil de um helicóptero e preserva o bem maior que é o fator humano (BRAGA, 2012).

Na década de 1970 a Westland, fabricante inglesa de aeronaves, inicia as pesquisas na área de monitoramento de vibração em suas aeronaves de asas rotativas, Monitoramento da Saúde Estrutural ou *Vibration Health Monitoring* (VHM) e implementa, na década de 1980, pela primeira vez em helicópteros de emprego civil, a extensão do tempo entre revisões das transmissões de suas aeronaves Westland W30, de operação comercial (FORD, 1997).

Desde então, diversas abordagens são empregadas para o monitoramento e também para o tratamento dos dados adquiridos mostrando a possibilidade da utilização dessas informações para interferir nas ações de manutenção e operação das aeronaves. Em 1999, devido ao volume de solicitações de certificação, o órgão americano denominado *Federal Aviation Administration* (FAA) publica uma Circular Consultiva (AC) específica sobre o assunto para regulamentá-lo, prevendo ainda um desenvolvimento crescente de técnicas aplicadas nesta área. Neste documento é apresentada também uma definição de Sistema de Monitoramento de Uso e Saúde - *Health and Usage Monitoring System* (HUMS): “equipamento, técnicas e/ou procedimentos pelos quais uma falha incipiente ou degradação e/ou aspectos selecionados da história em serviço podem ser determinados” (UNITED STATES, 1999).

Assim, este sistema é composto basicamente por uma variedade de 20 sensores e sistemas de aquisição de dados com a capacidade de processar as informações durante o voo, em solo ou através de uma combinação de ambos, permitindo a intervenção da tripulação de voo ou da equipe de manutenção, quando necessário (BRAGA, 2012).

Ademais, os estudos desenvolvidos ao longo dos anos permitiram a aplicação dos sistemas de monitoramento para análise operacional e de manutenção, destacando-se os sistemas: Garantia da Qualidade de Operações de Voo - *Flight Operations Quality Assurance* (FOQUA), Auditoria de segurança de operações de linha - *Line Operations Safety Audit*

(LOSA), Sistema de Gerenciamento de Erros de Manutenção - *Maintenance Error Management Systems* (MEMS) e Ajuda à Decisão sobre Erro de Manutenção - *Maintenance Error Decision Aid* (MEDA). A implantação do sistema de Monitoramento dos Dados de Voo - *Flight Data Monitoring* (FDM) na aviação civil brasileira ocorre entre os anos de 2005 e 2006, após a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) requerer tal sistema (BRASIL, 2004).

2.3 Breve Histórico do Surgimento das Armas de Fogo.

O desenvolvimento das armas durante a história representa, de certa forma, a procura do homem por inovações e técnicas de defesa mais eficientes que garantam a preservação de sua vida. O avanço no desenvolvimento das habilidades de autopreservação, pode ser visto dentro do direito natural como o livre arbítrio de utilizar as próprias forças ou as que estiverem a seu alcance para defender a vida.

Dessa forma, o manuseio e o aprimoramento dos equipamentos de defesa se tornaram importantes durante toda evolução cronológica da espécie humana, em razão das armas proporcionarem um aumento da eficácia de autodefesa perante as diversas técnicas de agressões físicas existentes. Quem defender sua vida estabelece um artefato do Direito de Natureza, ou *jus naturale*, o qual conforme Hobbes (2004, p. 113) “é o livre-arbítrio que cada ser humano apresenta de empregar seu próprio poder, do modo que quiser para a manutenção de sua própria existência, ou melhor, de sua vida”.

Foi considerando esse aspecto de aprimoramento contínuo das armas, que primeiramente objetivava sua sobrevivência, que o ser humano, idealizou a pólvora, permitindo a evolução das armas de fogo dos mais diferentes tipos e para os mais diferentes fins, haja vista seu alto poder de destruição. O fato é que a pólvora conferiu aos chineses um poder, por meio de uma mistura inicialmente feita de nitrato de potássio, enxofre e carvão vegetal, que mudaria o rumo da história (LUCAS, 2015).

Apesar de rudimentares as primeiras armas de fogo possivelmente foram desenvolvidas na China, no século IX, após a descoberta da pólvora. A mistura de carvão vegetal, salitre e enxofre eram confinados em canos de bambu que deflagravam em contato com o fogo para atirar pedras. Já no século XIII, os árabes aprimoraram o incremento, desenvolvendo canhões a partir de madeiras reforçadas por cintas de ferro. Contudo, somente no século XIV, com a evolução dos canhões de bronze e sua segurança de manejo, que as armas se destacaram amplamente já que os canhões serviram de base para o seguimento dos armamentos pesados e individuais (LUCAS, 2015)

As primeiras armas de fogo portáteis apareceram no século XV. “É uma verdadeira revolução: os soldados ganham outra importância e as táticas de guerra mudam completamente”, afirma João Fábio. A primeira arma individual amplamente usada em batalhas é o mosquete, criado no século XVI. Mas a invenção é lenta e tem péssima pontaria (REDAÇÃO MUNDO ESTRANHO, 2018).

Desta forma, foi no século XV que surgiram as primeiras armas de fogo portáteis mudando completamente as táticas de guerras devido a sua incorporação junto aos soldados, nas fileiras de combate. Já no século XVI surge o mosquete, uma arma lenta de péssima pontaria que foi largamente utilizada sendo suprida no século XVII, pelo famoso fuzil de pederneira, que apesar de serem abastecidas manualmente com pólvora e o projétil, apresentava uma significativa melhora na pontaria embora proporcionavam muitos disparos imperfeitos (REDAÇÃO MUNDO ESTRANHO, 2018).

No século XIX, com a invenção dos cartuchos e dos mecanismos de carregamento através da culatra as armas ficaram mais confiáveis, estimulando rapidamente a tecnologia bélica que teve como ponto crucial a implantação da automação, com o desenvolvimento da metralhadora em 1884, e posteriormente de diversos modelos de submetralhadoras, fuzis de assalto e pistolas automáticas no final do século XX proporcionando mais precisão e poder de destruição (REDAÇÃO MUNDO ESTRANHO, 2018).

2.3.1 Armas de fogo

De acordo com o decreto brasileiro número 3.665, de 20 de novembro de 2000, as armas de fogo são artefatos mecânicos que impulsionam projéteis através da força de expansão dos gases, produzidos a partir da ignificação de um propelente, no interior de um compartimento de prorrogação cilíndrica e formato de cano que tem como objetivo gerar a continuidade do processo de combustão motivado, executando também o direcionamento e a estabilidade ao projétil expelido (BRASIL, 2000).

Já para Tocchetto (2003 *apud* Georg; Kelner; Silvino Júnior, 2011, p.138), esses artefatos mecânicos só poderão ser armas de fogo se somente possuir três características básicas: o mecanismo arremessado, uma carga explosiva e o projétil, dos quais os dois últimos integram geralmente o cartucho.

Nascimento *et al* (2017), em sua obra destaca que apesar de serem usadas com a finalidade de ataque e defesa, elas possuem variados propósitos decorrendo da existência, no mercado, de vários tipos, desde os mais simples até os mais sofisticados quanto ao mecanismo de funcionamento, de diversos calibres e potências, de diferente alcance balístico, armas curtas

e longas; contudo no Brasil a classificação geral das armas de fogo mais aceita é a de Rabello (1967 *apud* Georg; Kelner; Silvino Júnior, 2011, p.140) que analisa cinco aspectos: O sistema de Inflamação, o tipo de carregamento, mecânica de funcionamento, a alma do cano e a mobilidade do uso.

Ainda segundo Rabello (1966 *apud* Arakelian, 2016, p.5) as armas de fogo são similares aos motores de combustão interna uma vez que são também definidas como máquinas térmicas, em virtual da analogia da expansão dos gases resultantes da ignição dos combustíveis usados, originando o movimento retilíneo tanto do pistão dentro do cilindro quanto do projétil no cano da arma. Nos automóveis o movimento retilíneo do pistão de seu motor se transforma em circular no virabrequim, já na arma de fogo ejeta o projétil pelo seu sistema.

No Brasil, de acordo com Polícia Federal, as armas de fogo são mecanismos capazes de arremessar projéteis, através do aproveitamento da força de expansão produzida pelos gases originados da combustão de um propelente confinado em uma câmara, geralmente, está solidária a um cano que tem o emprego de propiciar continuidade a combustão do propelente, além de direção e estabilidade ao projétil (Art. 3º, inciso XIII do Decreto 3.665/00 – R 105).²

A metrologia legal no Brasil utiliza o Sistema Internacional de Unidades (SI) para aferição do diâmetro do calibre e fabricação dos cartuchos, dessa forma ao se referir a um calibre no que tange as medidas do diâmetro, devemos inicialmente verificar em qual sistema de medidas esse equipamento foi inicialmente projetado (INMETRO, 2012).

Em conformidade com o exposto pelo Ministério Público do Estado Brasileiro do Rio Grande do Sul, por meio da procuradoria geral da justiça, estabelece que as armas de fogo, de calibre permitido ao cidadão necessitam ter na saída do cano energia inferior a 1200 libras-pé ou 1620 Joules, tendo como exemplo os calibres: .22LR, .32S&W, .380ACP, .38SPL, 9mm Luger, .357 Magnum, .40 S&W, .45 ACP+P e espingardas de alma lisa que tem os calibres medidos em função do número de esferas que podem ser armazenadas no interior do cartucho, Ex: 12 gauge (significa que este calibre acomoda 12 esferas de chumbo com peso de 1 libra-força no interior do cartucho)³.

Os calibres com energia superiores a 1.620 Joules são restritos a algumas forças de segurança e aos Caçadores, Atiradores e Colecionadores legalmente registrados no Exército Brasileiro. Ex: .44 Magnum, .454 Casull, 500 S&W Magnum, 7,62x51mm OTAN (munição

² CARTILHA DE ARMAMENTO E TIRO. Disponível em : <http://www.pf.gov.br/servicos-pf/armas/cartilha-de-armamento-e-tiro>. Acesso em 20 de out.2019.

³ Disponível em http://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/Criminal/Noticias_CAO_Criminal/tabela_armas_quadro_comparativo.pdf. Acesso em: 30 out.2019.

do fuzil FAL), 7,62x39mm (munição do fuzil AK-47 e variantes), .223 Remington (5,56mm, munição do fuzil AR-15 e variantes), .308 Winchester, .30-06 Springfield (7,62x63mm), 8mm Mauser (7,92x57mm, munição dos fuzis IMBEL Itajubá 954 ‘Mosquetão’ e 968 ‘Mosquefal’.

2.3.2 Classificação das armas de fogo

Existem diversos autores que determinam uma classificação para armas de fogo, contudo existe uma consonância, com determinadas diferenças particulares capazes de serem ressaltadas sem que tragam prejuízos quanto à concepção dos conceitos de distingui-las, todavia cientificamente é necessário promover o reconhecimento de tais características de forma correta, objetivando a identificação de um armamento específico (POLÍCIA FEDERAL, 2017).

A principal classificação brasileira das armas de fogo, comumente aceita nos meios científicos foi instituída pelo perito em Balística Forense, professor Eraldo Rabello, com os seguintes critérios, conforme Figura 13:

- Quanto à Alma do cano
- Quanto ao Sistema de inflamação
- Quanto ao Sistema de carregamento
- Quanto ao Sistema de funcionamento
- Quanto à mobilidade de uso

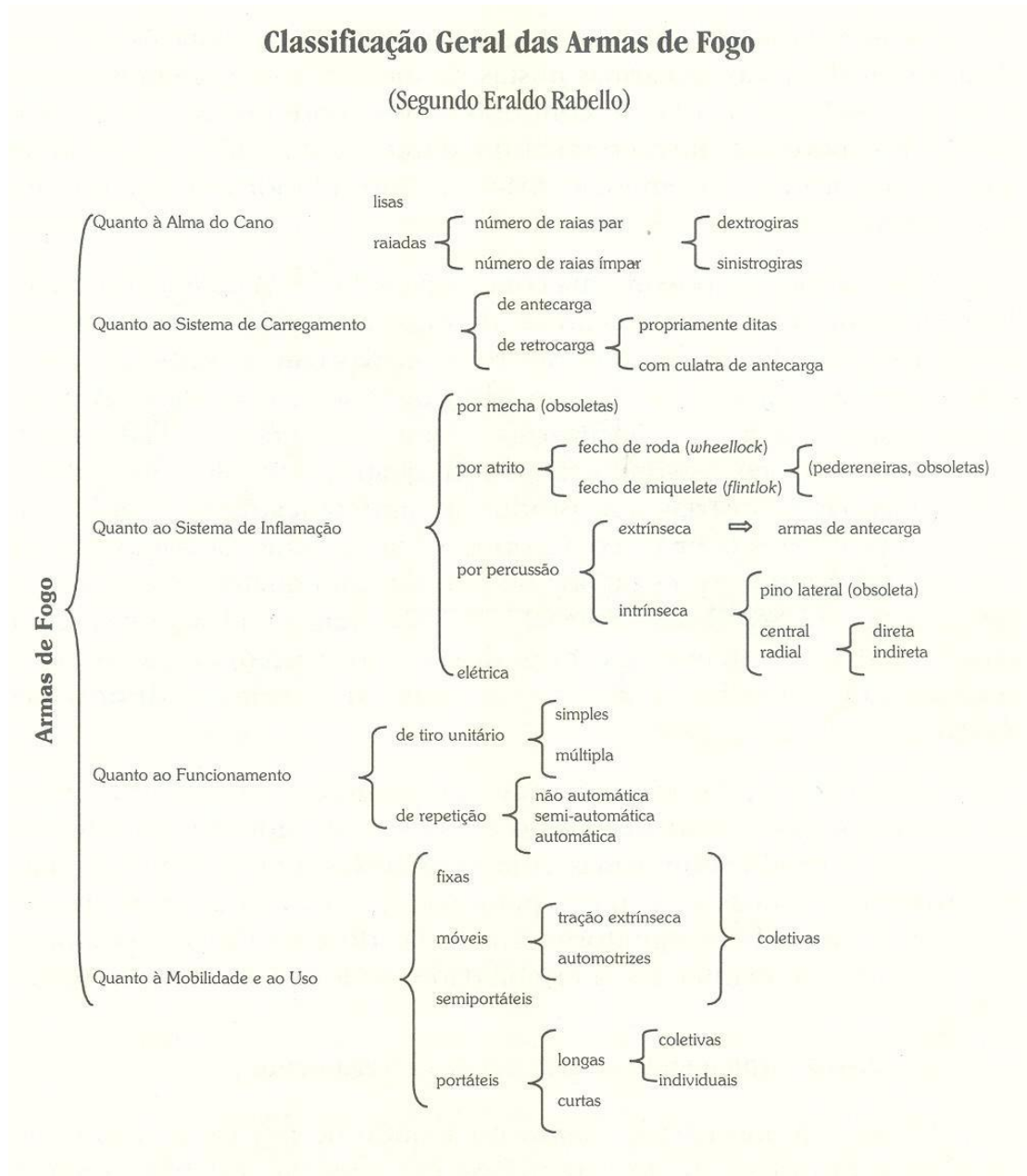


Figura 13 - Classificação geral das armas de fogo segundo Eraldo Rabello (1966)
Fonte: Tocchetto (2003, p.7)

2.3.2.1 Quanto a alma do cano

A alma é a parte vazia interna do cano de uma arma de fogo, atribuída a orientar o projétil e resistir às pressões dos gases formados no processo de combustão do propelente. Em via de regra, a alma vai da câmara de explosão até a boca do cano (GEORG, KELNER, SILVINO JUNIOR, 2011). Definição similar é dada por (POLÍCIA FEDERAL, 2017), onde a alma é a parte oca do interior do cano de uma arma de fogo, que se estende desde a culatra até a boca do cano, atribuída a orientar o projétil e resistir à pressão dos gases originados da combustão da pólvora e outros explosivos.

A alma das armas pode ser classificada como lisa ou raiada, de acordo com o tipo de munição para o qual a arma foi projetada conforme observa-se na Figura 14.

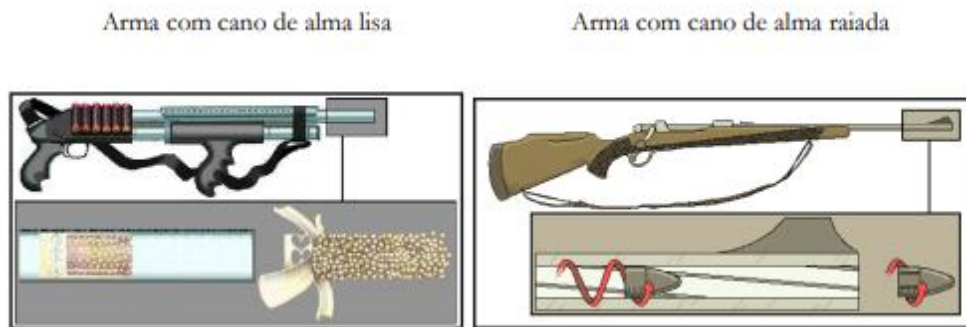


Figura 14 - Arma com cano de alma lisa e arma com cano de alma raiada
Fonte: Araújo júnior; Gerent, (2010)

As armas de fogo com cano de alma lisa, não contêm raiamento, e possuem interior do cano completamente polido, uma vez que não há necessidade da estabilização dos projéteis. Ex. as espingardas e o revólver Taurus RT 410 Cal. 36 GA. Estas armas, são comumente designadas de espingarda, contendo ou não um estrangulamento nas proximidades da boca do cano, chamado de choque. Os canos das armas de “alma lisa” não contêm nenhuma saliência ou relevo no seu interior, exemplificando os primeiros canhões, mosquetões, a grande maioria das armas de ante carga, e as espingardas conforme Figura 15 (GEORG, KELNER, SILVINO JUNIOR, 2011).



Figura 15 - Exemplo de arma de alma lisa (espingarda)
Fonte: Espingarda (2011)

As armas de cano de alma raiada são aquelas que contêm na parte interna do cano sulcos helicoidais dispostos no eixo longitudinal reservados a forçar o projétil e seu movimento de rotação. Exemplo: revólveres, pistolas, submetralhadoras, carabinas e os fuzis são armas normalmente de cano com alma raiada (GEORG, KELNER, SILVINO JUNIOR, 2011).

As raias são desenvolturas encontradas na face interna do cano, que transmitem um movimento de rotação ao projétil, objetivando maior estabilidade de sua trajetória no decorrer do seu percurso. Podem ser subdivididas de acordo com o sentido de rotação das mesmas em destrógiro (sentido horário) ou sinistrógiro (sentido anti-horário). O diâmetro do cano

determina o calibre da arma de fogo, sendo comumente medido em milímetros ou em centésimos ou milésimos de polegadas (GEORG, KELNER, SILVINO JUNIOR, 2011).

2.3.2.2 Classificação quanto ao sistema de inflamação

De acordo com Tocchetto (2003) o aperfeiçoamento do sistema de inflamação foi acompanhado da evolução da pólvora e o advento do cartucho, onde as primeiras armas de fogo utilizavam o sistema de inflamação por mecha/pavio, que com o decorrer dos tempos e devido as suas particularidades de manuseio limitado foram sendo substituídas por armamentos mais desenvolvidos cujo sistema de inflamação era feito por atrito, usando-se o “fecho de roda” ou o “fecho de miquelete”, ambos obsoletos atualmente. Já quanto ao sistema de inflamação por percussão, comumente utilizado na atualidade, podem ser do tipo extrínseca ou intrínseca.

2.3.2.2.1 Armas de percussão extrínseca

Vulgarmente conhecidas como “Pica-Pau”, são exclusivamente armas portáteis de percussão em que a espoleta é depositada externamente à câmara em uma desenvoltura pequena, intitulada popularmente como ouvido, sendo a chama conduzida à carga de propulsão por meio de um orifício ligado ao ouvido. Com o desenvolvimento do sistema de iniciação por percussão intrínseca, muitas armas antigas foram adaptadas ao novo sistema, na época. Hoje, o sistema de percussão extrínseca está bastante restrito, sendo utilizadas por saudosistas e adeptos do tiro esportivo (GEORG, KELNER, SILVINO JUNIOR, 2011).

2.3.2.2.1 Armas de percussão intrínseca

As primeiras armas de percussão intrínseca eram chamadas de armas de percussão por “pino lateral” ou espoleta e empregavam os cartuchos desenvolvidos por Lefauchaux no ano de 1836, com o passar do tempo, foram gradualmente substituídas pelas armas de percussão “radial/lateral” (fogo circular – 1845), que utilizavam cartuchos cuja espoleta era integrada ao corpo do estojo em um anel na sua base. Um outro tipo de cartucho desenvolvido e presentemente utilizado são os cartuchos com a espoleta localizada externamente ao centro do estojo, cujo sistema de percussão é denominado “percussão central” (fogo central).

O sistema de inflamação por percussão, ainda pode ser ativado de forma direta ou indireta. A percussão direta ocorre quando o cartucho contém uma substância química capaz de desencadear o disparo, ou seja, quando o percutor é o próprio cão da arma ou está montado neste, podendo ser fixo ou móvel (flutuante). A percussão indireta é dita quando o percutor é um artefato inerte, retrátil, o qual é ativado pelo impacto do cão durante o ato do disparo. Sendo

as armas de percussão extrínseca, necessariamente, de percussão direta (TOCCHETTO, 2003, p.12), já a inflamação elétrica ocorre por meio de contato elétrico, sendo empregadas principalmente em bazucas e em peças de artilharia raras.

3.2.2.3 Classificação quanto ao sistema de carregamento

As armas de fogo são classificadas de acordo com seus sistemas de municionamento ou carregamento como antecarga ou retrocarga. Enquanto as de antecarga tinham seus remunicionamento feito pela boca do cano da arma as de retrocarga eram feitas na porção anterior da arma, ou seja, no tambor ou no pente. Ex. As armas modernas, pistolas e revólveres (GEORG, KELNER, SILVINO JUNIOR, 2011).

Ainda de acordo com essa classificação o Serviço de Armamento e Tiro - SAT da Academia Nacional de Polícia Federal Brasileira - ANP e pela Comissão Nacional de Credenciamento de Instrutores de Armamento e Tiro – CONAT/DARM complementa que as armas de antecargas estão em desuso, haja vista que este sistema de carregamento se faz referência as primeiras armas projetadas, como as primeiras armas fixas ou portáteis, em que o remunicionamento era feito pela boca do cano do armamento, como nos casos da espingarda e do bacamarte e que as de retrocargas podem ser subdivididas em manual ou automáticas (POLÍCIA FEDERAL, 2017).

Retrocarga manual: são aquelas que por meio da força muscular do atirador é feito o carregamento pela parte posterior do cano.

Retrocarga automática: são aquelas que independem da intervenção humana para o carregamento, sendo feito pela parte posterior do cano, cujo seu princípio de funcionamento está diretamente relacionado ao aproveitamento das energias existentes durante o disparo da munição.

2.3.2.4 Classificação quanto ao sistema de funcionamento

Conforme Tocchetto (2003, p.13), as armas de fogo podem ser divididas em armas de tiro unitário (simples e múltiplo) e armas de repetição (não automático, semiautomático e automático).

Ainda segundo Tocchetto (2003, p.13), quanto às armas de repetição, podem existir ainda três formas de ação: as de ação simples, dupla e “ação segura”.

Para Tocchetto (2003) as armas de ação simples são as que necessitam ser engatilhadas a cada disparo, como os revólveres ou as pistolas semiautomáticas que carecem armar ou puxar o ferrolho antes do primeiro tiro. Exemplo, todas as armas longas, as pistolas, garruchas.

Já de acordo com Georg, Kelner e Silvino Júnior (2011) armas de ação simples possuem mecanismo de engatilhamento manual, promovendo somente o disparo do projétil ao ser acionado o gatilho, pois a ação de armar é previamente efetuada durante o engatilhamento manual. Exemplo: pistola IMBEL GC MD2 .45ACP+P.

Segundo Tocchetto (2003) armas de ação dupla, são armas, geralmente portáteis, capazes de atirar cada vez que o gatilho é puxado, sem que seja necessário manualmente armar o cão ou o percussor entre cada disparo. Exemplo: a maior parte dos revólveres atuais.

Já para Georg, Kelner e Silvino Júnior (2011) a ação dupla é um sistema mecânico de algumas armas de fogo que não permitem o engatilhamento manual do mecanismo de disparo, sendo esse, feito exclusivamente por meio do acionamento do gatilho. Exemplo: revólver Taurus mod. RT 851 Multialloy. 2.5.3.

Georg, Kelner e Silvino Júnior (2011) comentam ainda a existência do sistema de dupla ação, em que determinadas armas possibilitam que sejam operadas em ação simples ou duplas. Na primeira opção o mecanismo de disparo é engatilhado e no acionamento do gatilho ocorre apenas o disparo. Na segunda opção, no acionamento do gatilho ocorre o engatilhamento e a liberação do cão ou sistema de percussão. Exemplo: revólveres Taurus em sua maioria e Pistolas Taurus PT-92 e PT-917 Cal 9mm.

As armas de ação segura englobam algumas armas de características próprias, por possuírem um conjunto de 3 travas automaticamente liberadas perante o acionamento do gatilho, consentindo, de tal modo, o disparo. Exemplo: pistola Glock Bochardt, pistola Taurus G2C. Na maioria das vezes a primeira trava está localizada no próprio gatilho, trata-se de uma lingueta que apenas possibilita o curso do gatilho quando este é comprimido no instante do disparo pelo dedo do atirador. A segunda trava é a do percutor, que só é liberada após a ativação do gatilho, consentindo, dessa forma, o disparo. A terceira trava impede o disparo acidental por queda do armamento.

De acordo com a cartilha elaborada pelo Serviço de Armamento e Tiro da Academia Nacional de Polícia a classificação quanto ao funcionamento pode ser (POLÍCIA FEDERAL, 2017):

2.3.2.4.1 Não automático

São aquelas que dependem única e exclusivamente da força física do atirador, tanto o processo de alimentação da câmara quanto a liberação do percussor. Inclui quase que totalmente os revólveres, as espingardas por ação de bomba, carabinas por ação de alavanca ou ferrolho, dentre outras, conforme observa-se na Figura 16.



Figura 16 - Exemplo de armas de funcionamento não automático
Fonte: Carvalho (2010).

2.3.2.4.2 Semiautomático

São aquelas que somente com um acionamento da tecla do gatilho, o sistema é capaz de fazer a arma atirar e ejetar o cartucho, inserindo outro na câmara e rearmando o mecanismo de disparo novamente, dependendo apenas da liberação e do posterior acionamento do gatilho para um novo disparo.

2.3.2.4.3 Automático

Sistema que mediante o acionamento da tecla do gatilho e enquanto estiver apertado, dispara sucessivamente, ejetando e realimentando a arma até que consuma toda a munição de seu carregador ou interrompa a pressão sobre o gatilho.

2.3.2.5 Classificação quanto à mobilidade e uso

De acordo com Georg, Kelner e Silvino Júnior (2011), a classificação quanto à mobilidade e uso se originou do desenvolvimento das armas de fogo, o qual se processou a partir das armas coletivas para as individuais. As coletivas são exclusivamente militares, possuem comprimentos maiores, são pesadas e por isso são manuseadas por mais de uma pessoa sendo utilizadas a favor de um grupo. Já as armas individuais são aquelas manuseadas por uma única pessoa com intuito da prática de defesa pessoal ou de terceiros, tendo uso geral.

Quanto à mobilidade, podem ser classificadas em, de acordo com Georg, Kelner e Silvino Júnior (2011):

a) Fixas: são aquelas montadas em suportes, proporcionando apenas deslocamentos nos planos vertical e horizontal. Exemplo: canhões e metralhadoras antiaéreas fixados nos navios de guerra.

b) Móveis: são aquelas capazes de serem deslocadas de sua posição para outra, por meio de tração animal, motora ou automotriz.

c) Semi-portáteis: aquelas que quando desmontada em arma e suporte são capazes de serem naturalmente deslocadas por dois homens. Exemplo: morteiro de infantaria e metralhadora pesada.

d) Portáteis: são armas facilmente conduzidas por um único homem. Estas podem ser subdivididas quanto aos seus tamanhos em curtas e longas.

Curtas: armas curtas são aquelas em que sua manipulação é promovida com uma ou ambas as mãos, dispensando o apoio ao ombro, se caracterizando pela sua dimensão e peso reduzido. Exemplo: revólver, garruchas e pistolas.

Longas: armas longas, geralmente são desenvolvidas para serem manuseadas com ambas as mãos e exigem um apoio no ombro para a coronha. Contém dimensão e peso superior as armas curtas. Exemplo: fúsil, metralhadoras e espingardas.

2.3.2.6 Quanto a portabilidade:

As armas de fogo ainda podem ser classificadas de acordo com as leis brasileiras, de acordo com seus meios de transporte, podendo ser (BRASIL, 2000):

De porte: “arma de fogo de dimensões e peso reduzido, que pode ser portada por um indivíduo em um coldre e disparado, comodamente, com somente uma das mãos pelo atirador. Enquadram-se, nesta definição, pistolas, revólveres e garruchas”. (Art. 3º, inciso XIV do Decreto 3.665/00 – R 105). Exemplo: revólver e pistola.

Portátil: “arma cujo peso e cujas dimensões permitem que seja transportada por um único homem, mas não conduzida em um coldre, exigindo, em situações normais, ambas as mãos para a realização eficiente do disparo;” (Art. 3º, inciso XXII do Decreto 3.665/00 – R 105). Exemplo: carabina, fuzil, espingarda, metralhadora, submetralhadora.

Não portátil: “arma que, devido às suas dimensões ou ao seu peso, não pode ser transportada por um único homem;” (Art. 3º, inciso XX do Decreto 3.665/00 – R 105).

2.3.3 Identificação geral das armas de fogo quanto ao calibre

O Calibre significa o diâmetro ou a medida padrão de um determinado projétil, ou seja,

o tamanho da bitola de um projétil, que geralmente, coincide com o diâmetro interno da alma do cano de uma arma de fogo. Contudo, nas armas de cano com alma raiada deve-se fazer distinção entre calibre real, calibre do projétil e calibre nominal.

Calibre real: é a medida do diâmetro da parte interna do cano de uma arma, medido entre os cheios. É expresso em milímetros ou em fração de polegada.

Já de acordo com Georg, Kelner e Silvino Júnior (2011), o calibre real representa o diâmetro interno da alma do cano, sendo uma grandeza solidificada que apresenta sempre uma medida exata, expressa e aferível com exatidão. Nas armas raiadas, o calibre real corresponde a parte não raiada da alma do cano, estabelecida entre dois cheios diametralmente oposto. Em armas que a quantidade de raias for par, em regra, sempre haverá pares cheios em oposição a outro, sendo o calibre real a medida entre eles. Já quanto as armas de raias ímparas, carece de mais atenção quanto a interpretação, pois cada cheio promove oposição a uma raia, em que a medida deve ser promovida entre a superfície de um cheio e a delimitação entre o cheio e a raia em posição oposta, conforme observa-se na Figura 17.

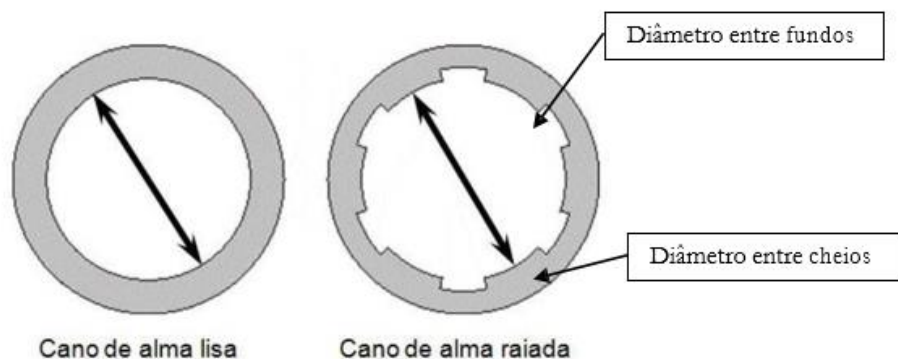


Figura 17 - Cano de alma lisa e cano de alma raiada
Fonte: Silvino Júnior, (2010).

Ainda diante desse contexto, existe ainda as armas de fogo classificadas como mistas, uma vez que contém um cano de alma lisa e outro raiada. Exemplo o modelo Apache, marca Rossi, com dois canos sobrepostos, um superior de calibre .22LR com alma raiada e um inferior de calibre 36 (com alma lisa).

Calibre do projétil: corresponde a medida do diâmetro interno do cano de uma arma raiada, medido entre “fundos” das raias.

Calibre nominal: o Calibre Nominal é o calibre que designa as munições e armas, sendo utilizadas para definir ou caracterizar um determinado tipo de arma, contudo, nem sempre correspondem ao calibre real delas, ou seja, para um mesmo calibre real poderão existir

diferentes calibres nominais. São expressos em milímetros ou frações de polegada (centésimos ou milésimos).

Segundo Silvino Júnior (2010) existem três sistemas de nomenclatura de calibres de arma de fogo válidos atualmente: o sistema métrico, o sistema em polegadas para alma raiada e o sistema de calibre nominal para alma lisa:

Sistema métrico: geralmente são adotados pelos países europeus e expressa a medida do diâmetro do projétil em milímetros. “O nome completo do calibre geralmente é a medida em milímetros do diâmetro do projétil seguido do símbolo “mm” e em seguida a abreviatura do nome do fabricante ou desenvolvedor daquele calibre, como por exemplo os calibres 7.65mmBrowning, 6.35mmBrowning, 7mmMauser, 7.63mmMauser.

Em alguns casos o nome que segue a medida do calibre é uma característica ou peculiaridade da arma: 10mmAuto, se referindo ao calibre destinado ao uso em armas semi-automáticas; 9mmLuger, eternizado pelas famosas pistolas Luger, fabricadas pela empresa alemã Mauser; 7.62mmNATO, calibre referência das Organizações do Tratado do Atlântico Norte - OTAN (do inglês: NATO–North Atlantic Treaty Organization) até ser substituído pelo 5.56mmNATO.”

Uma outra forma técnica de se expressar os calibres na unidade métrica consiste em mencionar o diâmetro do projétil em milímetros acompanhado do comprimento do estojo, também em milímetros, o que facilita a diferenciação dos calibres devido as informações do comprimento da capsula. Exemplo: 7.62x51mm, 5.56x45mm, 9x19mm, 9x17mm.

Sistema em polegadas: é um sistema de nomenclatura bastante popular com predomínio na grande maioria das armas existentes, especialmente aquelas de calibres desenvolvidos nos Estados Unidos, baseado no sistema inglês de medida e tendo como unidade básica a polegada (1 polegada = 25,4 milímetros).

Sua nomenclatura apropriada utiliza inicialmente o diâmetro do projétil em centésimos ou milésimos de polegada e em seguida o nome do fabricante ou desenvolvedor do calibre ou então alguma característica peculiar do calibre, o que constata-se que muitos desses calibres não exprimem com exatidão a medida do diâmetro do projétil, como por exemplo no caso do calibre .38S&W, onde o diâmetro real do projétil gira em torno de 0,357 polegada. Salienta-se ainda que muitos destes calibres podem ser expressos tanto no sistema métrico quanto no sistema em polegada. Exemplos da nomenclatura de sistema de polegadas: .30Luger, .380AUTO, .45ACP+P, .40S&W e .357Magnum.

A Tabela 1 mostra alguns desses exemplos:

Tabela 1 - Tabela de equivalência de calibres de arma de fogo

| Sistema métrico | Sistema em polegadas | Diâmetro real (mm) | Diâmetro real (polegada) |
|-----------------|----------------------|--------------------|--------------------------|
| 6,34 mmBrowning | .25 Auto | 6,38 | .251 |
| 7,65 mmBrowning | .32 Auto | 7,95 | .313 |
| 9mmLuger | Não existe | 9,04 | .356 |
| Não existe | .40 S&W | 10,16 | .400 |
| Não existe | .38SPL | 9,07 | .357 |

Fonte: Georg, Kelner e Silvino Júnior (2011)

Sistema de Calibre Nominal: no sistema de nomenclatura em armas de fogo com canos de alma lisa, é empregado como referência a quantidade de esferas de chumbo puro, com diâmetro semelhante ao do cano da arma, necessárias para obter a massa equivalente a uma libra (1 Lb = 453,6g). Como na maioria das vezes determinadas armas de cano de alma lisa utilizam projéteis múltiplos, com diâmetro inferior ao diâmetro do cano da arma, são chamadas de armas de calibre nominal. Exemplo são armas de calibre 12, 26, 20, 28, 32 e 36.

2.3.4 Munição

A munição é um artefato completo, pronto para carregamento e disparo de uma arma de fogo dividido em: cápsula, espoleta, pólvora e projétil, conforme Figura 18.

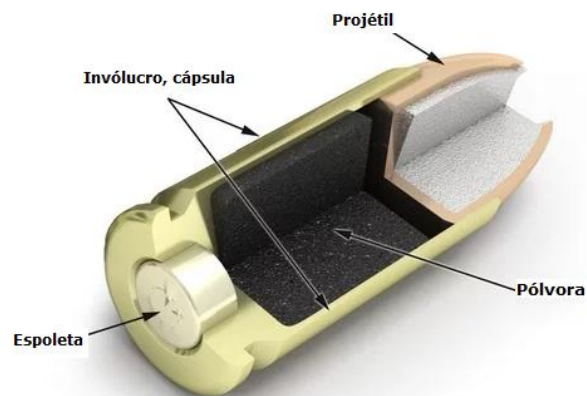


Figura 18 – Munição
Fonte: Polícia Federal (2017)

2.3.4.1 Estojo, cápsula ou invólucro.

O Estojo é uma peça única, elaborada geralmente a partir de sucessivas estiragens e recozimentos de uma copela de latão, metal não-ferroso, mas podendo ser também fabricado

em aço, alumínio ou latão com banho de níquel envolvendo também processos de estiramento sucessivo. Sua função básica é possibilitar que todos os componentes necessários ao disparo fiquem unidos em uma única peça, além de facilitar o manejo da arma e acelerar o processo de carregamento, promover proteção a carga de projeção, obturar a câmara e determinar o calibre nominal (MESTRE, 2015).

O material do estojo necessita de algumas características essenciais para exercer seu papel de forma efetiva e se adaptar as paredes da câmara, dentre as quais: ser inoxidável para assegurar a sua conservação; ser resistente para que não deflagre pela a ação dos gases originados da detonação da pólvora e ser maleável possibilitando retornar as suas dimensões iniciais, de forma a facilitar a extração (MESTRE, 2015).

O invólucro é a parte posterior da munição, em que no seu interior está a carga propulsora, no seu extremo anterior está o projétil e no seu extremo posterior a escorva. Atualmente, distinguem-se quatro partes do invólucro, nomeadamente: o colo, a concordância, o corpo e a base. O colo destina-se a segurar o projétil, ou seja, é a parte anterior do invólucro. A concordância é a parte que liga o colo ao corpo do invólucro. O corpo apresenta uma forma tronco-cônica para facilitar a sua introdução e extração na câmara, este é reforçado na base, onde é mais resistente e mais largo. A base serve de suporte para a realização da extração do invólucro da câmara e no seu centro encontra-se alojada a escorva” (TELO; ÁLVARES, 2004).

2.3.4.1.1 Classificação do estojo

Os estojos podem ser classificados seguindo o princípio de diferenciação de acordo com algumas de suas características principais, como o tipo de percussão, seu perfil e a base do culote.

2.3.4.1.2 Classificação quanto ao tipo de Percussão

A Percussão é um sistema de ignição de armas de fogo, que podem ser divididas em tipos, conforme Figura 19:

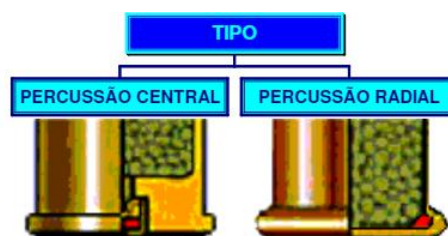


Figura 19 - Tipo de percussão
Fonte: Polícia Federal (2017)

As armas de percussão central: são armas de retrocarga que utilizam cartuchos em que a espoleta se apresenta montada no centro da base.

As armas de percussão radial: são armas de retrocarga em que os cartuchos apresentam a mistura iniciadora depositada por centrifugação na orla do estojo sem a utilização da espoleta propriamente dita.

A Figura 20 apresenta fogo central x fogo radial.

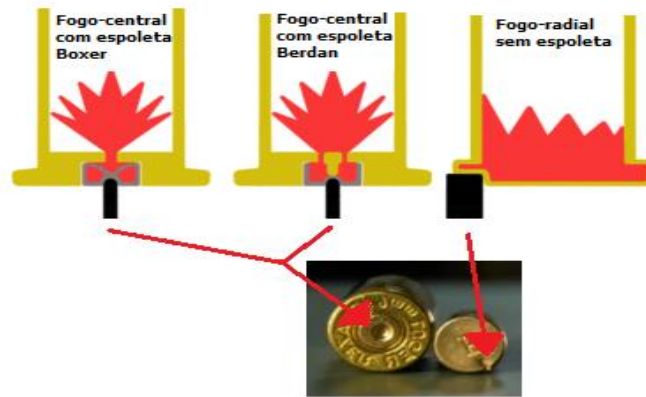


Figura 20 - Fogo central x Fogo radial
Fonte: Polícia Federal (2017)

Os cilindros ainda podem ser classificados de acordo com tipo de perfil existentes e a sua base. A classificação quanto ao tipo de perfil e culote, baseia-se no formato das respectivas partes que são adaptadas de acordo com o projeto e a especificação de cada arma. Os perfis comuns são os cilíndricos, tronco-cônico e tronco-cônico com gargalo cilíndrico. Observa-se na Figura 21 o tipo de perfil e culote.



Figura 21 - Tipo de perfil e culote
Fonte: Polícia Federal (2017)

Cilíndricos: são aqueles cujo diâmetro permanece constante em todo o seu comprimento.

Tronco- Cônicos: são aqueles em que o diâmetro diminui gradativamente ao longo do comprimento.

Tronco- Cônicos com Gargalo cilíndrico ou Garrafa: estojos que apresentam um estrangulamento próximo à boca, dando um formato idêntico ao de uma garrafa.

Os estojos tipo garrafa foram projetados em 1886, quando se ajustou a boca de um estajo 11mm para disparar projéteis de 8mm dando origem ao famoso 8mm Lebel. Então deu origem as munições modernas, servindo de base de forma praticamente unanime entre rifles e metralhadoras, devido ao armazenamento maior de propelente em um comprimento admissível de munição. Caso contrário, se desejasse preencher esta mesma quantidade de propelente em um estajo cilíndrico, ter-se-ia uma munição pouco prática, devido ao seu grande comprimento, inviabilizando sua utilização em diversas armas⁴.

Já as bases do culote comumente utilizadas são as sem saliência, semi-saliente, saliente, cintado e rebatido, (Figura22) e seu emprego segue conforme as orientações dos fabricantes de armamento de fogo, haja vista que cada modelo de arma contém suas particularidades relacionadas aos seus sistemas mecânicos de funcionamento.



Figura 22 - Base do culote
Fonte: Polícia Federal (2017)

É importante lembrar que a base do estajo é fundamental para o processo de carregamento e extração, pois sua forma determina o ponto de apoio do cartucho na câmara ou tambor (*headspace*), além de possibilitar a ação do extrator sobre o estajo. Existem também uma nomenclatura mais popular sobre a base do culote, observa-se na Figura 23



Figura 23 - Base dos culotes
Fonte: Polícia Federal (2017)

Características das principais bases dos culotes utilizados:

Com aro: com ressalto na base (aro ou gola);

⁴ Disponível em: <https://defesa.org/por-que-as-grandes-armas-utilizam-municao-com-estajos-tipo-garrafa/>. Acesso em 28 de dez. 2019.

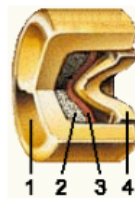
Com semi-aro: com ressalto de pequenas proporções e uma ranhura (virola);

Sem aro: tem apenas a virola;

Rebatido: a base tem diâmetro menor que o corpo do estojo.

2.3.4.2 Espoleta

É um recipiente que contém basicamente uma mistura detonante e uma bigorna. São localizadas na base do estojo, fabricadas geralmente em cobre ou latão e contém uma mistura iniciadora que pode ser formada por: fulminato de mercúrio, azida de chumbo, estifinato de chumbo ou tetraceno, que por meio de uma excitação externa provoca o acendimento de uma chama no momento da percussão. A queima dessa mistura gera calor, que passa para o propelente, por meio de pequenos furos no estojo, chamados eventos. A espoleta é subdividida em corpo, mistura iniciadora, disco de papel e bigorna, conforme Figura 24.



- 1 - **Corpo ou copo** - Recebe os demais elementos.
- 2 - **Mistura iniciadora** - Alto explosivo iniciador.
- 3 - **Disco de papel** - Mantém a mistura no seu local.
- 4 - **Bigorna** - (Somente nas cápsulas tipo Boxer), com o percussor, faz o esmagamento do alto explosivo iniciador.

Figura 24 - Espoleta
Fonte: Polícia Federal (2017)

A Figura 25 mostra exemplos de chamas produzidas por espoletas:



Figura 25 - Chamas produzidas por espoletas
Fonte: Polícia Federal (2017)

Os tipos mais comuns de espoletas são:

Boxer: amplamente utilizada atualmente, contém uma bigorna presa à espoleta e apenas um evento central de chama, o que facilita o desespoletamento do estojo na recarga;

Berdan: utilizada basicamente em armas de uso militar, a bigorna é uma pequena protuberância no centro da base do estojo estando à sua volta dois ou mais eventos;

A Figura 26 apresenta os tipos mais comuns de espoleta.



Figura 26 - Tipos de espoleta
Fonte: Polícia Federal (2017)

2.3.4.3 Pólvora

A Pólvora ou Carga de projeção representa uma das mais importantes substâncias criadas pelo homem relacionadas a armas de fogo. Trata-se de um tipo de propelente que, por ação de uma chama ignitora, causa a expansão instantânea dos gases produzidos em seu processo de oxidação e que, devidamente confinados, podem ser utilizados como elemento propulsor de projéteis de armas de fogo.

Com o aprimoramento das armas de fogo a pólvora também sofreu inúmeras modificações e melhorias ao longo dos tempos, uma vez que se encontra presente em todos os eventos do ciclo do tiro, inclusive nos quais precedem e procedem o disparo das armas de fogo. Por esta razão, o estudo da balística é subdividido em interna, externa e dos efeitos ou terminal.

2.3.4.3.1 Classificação da pólvora

A primeira pólvora a ser utilizada foi a pólvora negra, comumente empregadas em pequenas armas, foguetes ou engenhos pirotécnicos. Tal material proporcionava algumas vantagens, tais como econômica, facilidade de manuseamento sendo presumível calcular a quantidade de energia necessária para utilização. Entretanto, apresentava diversas vulnerabilidades, tais como, a enorme quantidade de fumo que produzia quando deflagrava, baixa energia transferida ao projétil e instabilidade comportamental (BECKSYEADA, *et al.*, 2007). Levando em conta estas limitações, outras pesquisas foram efetivadas proporcionando o desenvolvimento das chamadas pólvoras “sem fumo” ou pólvoras modernas.

As pólvoras “sem fumo” são classificadas levando em conta seus constituintes base. Deste modo, elas são classificadas em três grupos (BECKSYEADA, *et al.*, 2007). Conforme observa-se na Figura 27:

1. Pólvora de Base Simples
2. Pólvora de Base Dupla
3. Pólvora de Base Tripla

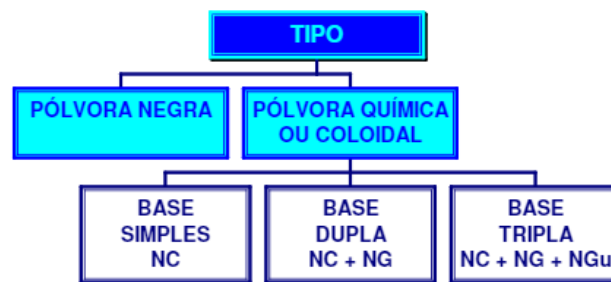


Figura 27 - Classificação da pólvora
 Fonte: Becksyeada, *et al.*, (2007)

2.3.4.3.1.1 Pólvora de Base Simples

A pólvora de base simples é constituída por Nitrocelulose (NC) gelatinizado em álcool etílico ou éter etílico utilizado como solvente, com a finalidade de alcançar um grão de superfície e tamanho mais regular capaz de aumentar a sua caixa de queima e proporcionar maior eficácia (BECKSYEADA, *et al.*, 2007; VILLELA, 2002). Um outro constituinte comumente utilizado e importante é a Difenilamina (DPA) que atua como estabilizador químico da NC e o Nitrato de Potássio que proporciona diminuir a chama e conseqüentemente o fumo. Ainda que primitiva, não produzia “fumaça”.

2.3.4.3.1.2 Pólvora de Base Dupla

A pólvora de base dupla tem como base na NC, gelatinizada por Nitroglicerina (NG), que dependendo da utilização de determinadas cargas propulsoras, pode ser substituída por ésteres de nitratos (BECKSYEADA, *et al.*, 2007). A substância gelatinizante deixa a estrutura da pólvora mais homogênea, uma vez que a NC sólida absorve a NG líquida originando a forma homogenia de um grão que se traduz numa deflagração constante. A NG tem como característica principal um alto poder explosivo proporcionando uma maior energia no momento da deflagração. Já as propriedades físico-químicas das pólvoras de base dupla tais como a energia, a estabilidade química e as propriedades mecânicas dependem da proporção entre a NC, NG, estabilizadores, agentes gelatinizantes e catalisadores (BECKSYEADA, *et al.*, 2007; VILLELA, 2002).

Este aumento de energia oferece determinadas desvantagens, especialmente na decomposição rápida da pólvora; para o atirador noturno, um clarão maior, além de revelar a sua posição e capaz de deixa-lo vulnerável por alguns instantes devido ao aumento da dilatação da sua pupila ocular, que proporciona uma visão desfocada por alguns instantes.

2.3.4.3.1.3 Pólvora de Base Tripla

A pólvora de base tripla é formada por NC, NG e por Nitroguanidina (BECKSYEADA, *et al.*, 2007; VILLELA, 2002). Este terceiro composto foi acrescentado de modo a corrigir determinadas falhas da pólvora de base dupla, tal como o clarão causado no período do disparo. Além disso, existe a diminuição da temperatura de queima devido a sua fórmula molecular conter uma quantidade significativa de átomos de hidrogénio, que produz a redução da massa molecular dos produtos de combustão (BECKSYEADA, *et al.*, 2007; VILLELA, 2002).

A pólvora de base tripla é normalmente aproveitada em artefatos de artilharia, carros de combate, ou seja, é empregada em munições de grande calibre. Assim a forma e a sua obtenção encontram-se vinculada às forças militares.

2.3.4.3.1.4 Caracterização da Pólvora

Devido as diferentes propriedades da pólvora, suas características foram agrupadas em dois grupos distintos, as morfológicas e as químicas. Quanto as morfológicas ressaltam-se o tamanho e a forma do grão, que desempenha um papel fundamental quanto ao tipo de munição que se destina, devido as diferentes velocidades de queima da pólvora, e sua estabilização (BECKSYEADA, *et al.*, 2007). Já as características químicas desempenham um fator decisivo quanto ao tipo de comportamento da pólvora no momento da deflagração, e a resistência a determinadas condições de armazenamento ou utilização.

2.3.4.3.1.5 Caracterização Morfológica

A morfologia da pólvora apresenta uma função essencial no ciclo de tiro, haja vista que a sua taxa de queima influencia diretamente na velocidade de expansão dos gases e, conseqüentemente, a energia sobreposta sobre o projétil (VILLELA, 2002, CARLUCCI; JACOBSON, 2008). As pólvoras são classificadas em três categorias de taxa de queima, também conhecida como velocidade de queima, que contém uma relação direta entre a pressão e a temperatura promovida no seu processo de combustão.

Regressivas, ou degressiva (Figura 28): a superfície de queima reduz continuamente enquanto o grão é consumido, ou seja, na medida em que queima, a área da superfície de queima diminui; (exemplo: grãos em forma de flocos, esféricos e tubulares) (CARLUCCI; JACOBSON, 2008)

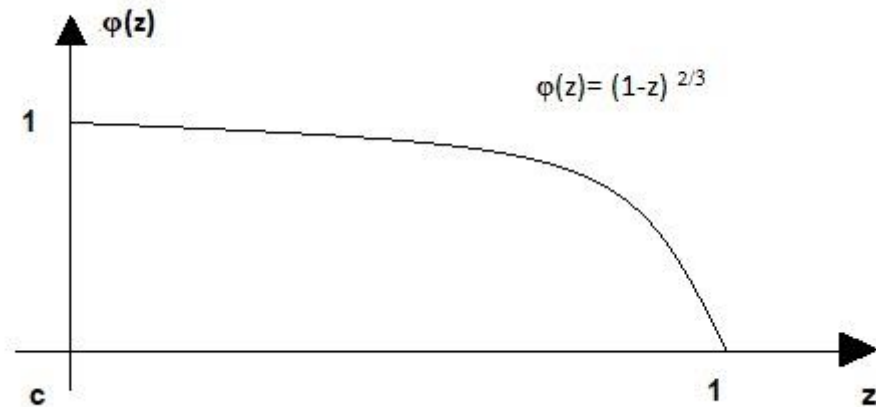


Figura 28 - Taxa de queima de pólvoras regressivas (relação tempo de queima / área do grão)
Fonte: Vermelho, 2012.

Neutras (Figura 29): a área de queima permanece constante durante toda a deflagração (exemplo: grãos tubulares perfurados) (VERMELHO, 2012).

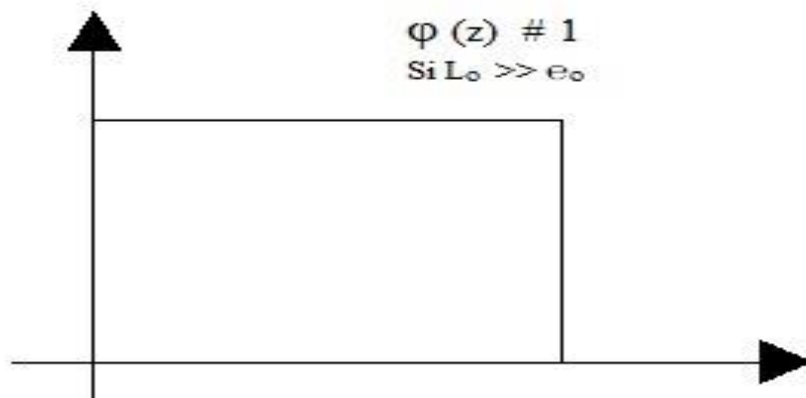


Figura 29 - Taxa de queima de pólvoras neutras (relação tempo de queima / área do grão).
Fonte: Vermelho, 2012

Progressivas (Figura 30): a área de queima aumenta à medida que o grão é consumido (exemplo: grãos tubulares multi-perfurados).

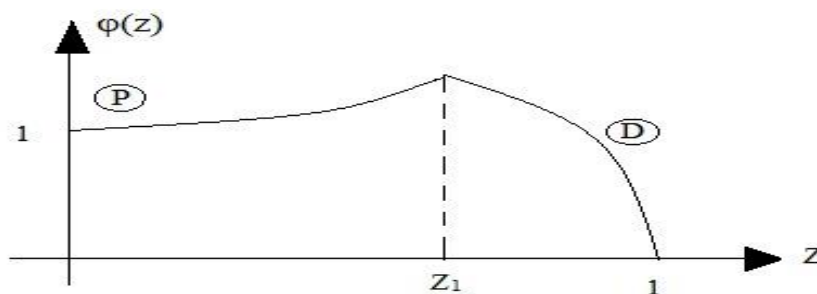


Figura 30 - Taxa de queima de pólvoras progressivas (relação tempo de queima / área do grão), a partir de Z_1 a pólvora torna-se regressiva
Fonte: Vermelho, 2012

Estes parâmetros são apurados pela geometria do grão de pólvora (forma e tamanho, Figura 31) e pelos aditivos químicos existentes na sua composição. Grãos perfurados oferecem uma taxa de queima progressiva, ou seja, à medida que o grão vai sendo consumido a velocidade de queima aumenta, uma vez que a superfície de contato exposta também tende a aumentar (VILLELA, 2002, CARLUCCI; JACOBSON, 2008).

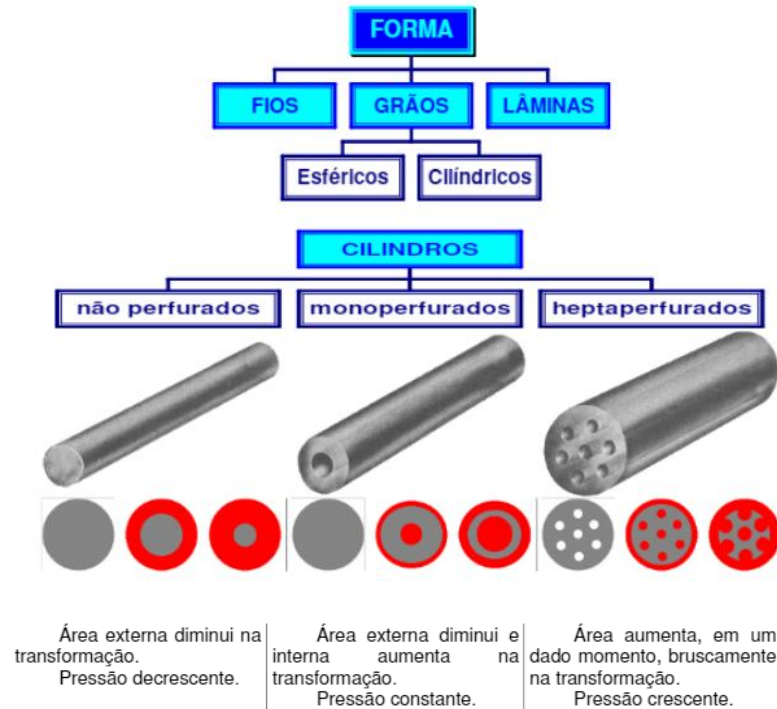


Figura 31 - Geometria do grão da pólvora
Fonte: Vermelho (2012)

A taxa de queima da pólvora é uma característica extremamente importante e está diretamente ligada a fatores de segurança que envolvem a estrutura do armamento, uma vez que se a velocidade de libertação dos gases for superior a taxa de resistência do material projetado pelo fabricante, poderá explodir a câmara ou o cano da arma (VILLELA, 2002, CARLUCCI; JACOBSON, 2008).

Se o propelente queimar muito lento, a propulsão será ineficiente e o projétil sairá do cano com pouca energia. Por essa razão, a geometria e o tamanho dos grânulos de forma individual são essenciais para se controlar a velocidade de combustão (VILLELA, 2002; CARLUCCI, JACOBSON, 2008; VERMELHO, 2012). Desta forma o propelente dificilmente é um pó, apresentando-se, geralmente, em grânulos. A pólvora "sem fumo" apresenta-se de diversas formas e tamanhos, que são designados de grânulos de pólvora, como observa-se na Figura 32.

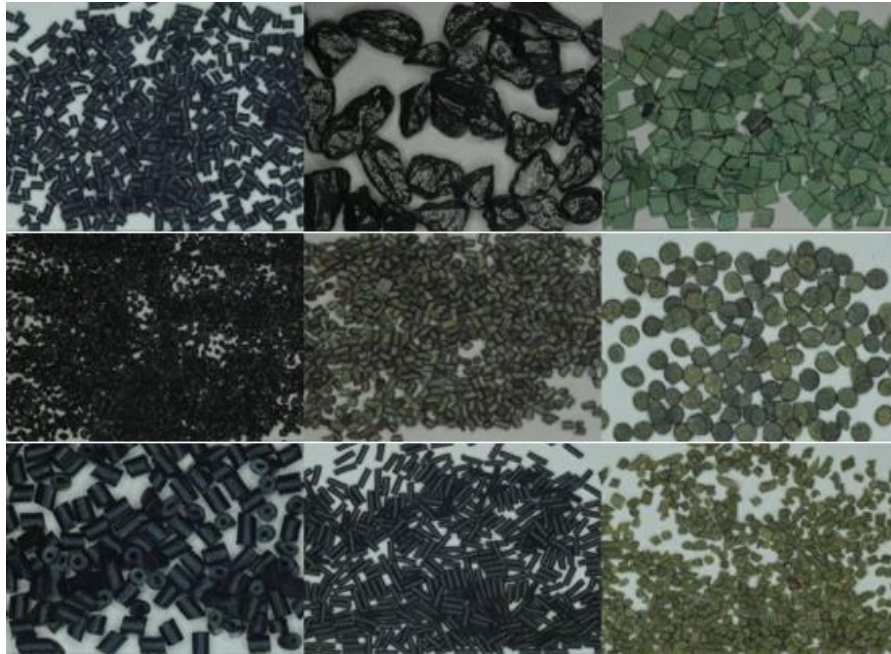


Figura 32 - Pólvora, com diversos tipos de grão, apresentando formatos, dimensões e pigmentação diversa.
Fonte: Vermelho (2012).

A escolha do tamanho dos grânulos utilizados como propelente dependem do comprimento das armas utilizadas, ou seja, para armas de curto alcance, os grânulos são um pouco maiores e em menor quantidade ao se comparar com os cartuchos utilizados na caça de animais. Para armas de longo alcance a carga propulsora é composta por grandes grânulos, que contem queima mais lenta que os mais pequenos, devido quantidade maior da área de superfície de contato que expõe a queima da pólvora "sem fumo" apenas na superfície do grão, ou seja, de fora para dentro, preservando a parte interna do grão (VILLELA, 2002).

A pólvora usada nos projéteis de artilharia exhibe, basicamente, o formato de grânulos tubulares (com uma perfuração no seu interior) e grânulos cilíndricos com sete perfurações (uma central rodeada de outras seis formando um círculo) (VILLELA, 2002). Observe Figura 33.

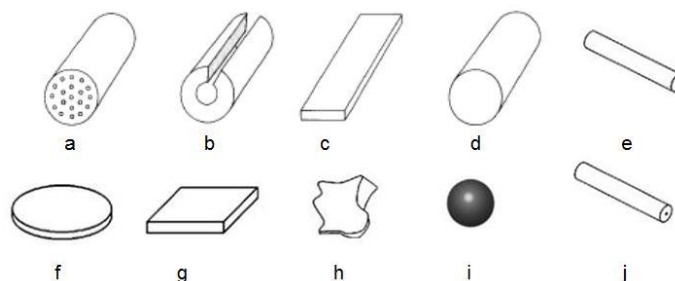


Figura 33 - Alguns tipos de grânulos de pólvora
Legenda: a - Multi-perfurado; b - Tubular Fendido; c - Fita; d - Cilíndrico; e - Corda; f - Disco; g - Lamelar; h - Pólvora Negra; i - Esférico; j - Tubular.

Fonte: Vermelho (2012)

As perfurações são capazes de estabilizarem a taxa de queima, uma vez que

proporcionam uma a queima da pólvora de forma contínua, tanto externamente quanto internamente, ou seja, a queima corre simultaneamente do exterior em direção ao interior, ocorrendo o inverso nos furos (VILLELA, 2002). A pólvora de queima rápida como lâminas ou grânulos esféricos são rotineiramente empregadas nas armas de fogo de forma geral, e regulamente são produzidas por extrusão, proporcionando uma maior área de superfície, e revestida com grafite para evitar ignições indesejadas devido a eletricidade estática, além de coibir ou limitar a predisposição dos grânulos se aglutinarem, tornando mais simples seu carregamento (BECKSYEADA, *et al.*, 2007).

2.3.4.3.1.6 Caracterização Química

As pólvoras são compostos que possuem uma grande variedade de aditivos consideráveis, desde gelatinizantes, estabilizadores, supressores de chama, combustíveis, catalisadores, dentre outros, que diferem quanto aos tipos de pólvoras existentes e suas características. De forma sucinta, nas pólvoras de base simples, o composto principal é a NC, nas de base dupla a Nitrocelulose e a Nitroglicerina, e nas de base tripla, além da NC e da NG encontramos ainda a Nitroguanidina (BECKSYEADA, *et al.*, 2007).

Na tabela 2 encontra-se o material utilizado na composição das pólvoras (compostos orgânicos).

Tabela 2 - Composição da pólvora (compostos orgânicos)

| Função | Composto |
|--|---|
| Oxidante e combustível | NC, TMETN, TEGDN, DNT |
| Combustível | DEP, DBP, TA, PU |
| Estabilizador | EC, 2NDPA, DPA |
| Combustível (explosivo) | GAP, BAMO, AMMO |
| Catalisador de combustão | PbSa, PbSt, Pb2EH, CuSa, CuSt, LiF |
| Catalisador de combustão modificado | C (grafite) |
| Supressor de instabilidade de combustão | Al, Zr, ZrC |
| Opacificante | C (grafite) |
| Supressor de <i>flash</i> | KNO ₃ , K ₂ SO ₄ |

Fonte: Vermelho (2012).

Os compostos químicos presentes nas pólvoras desempenham diferentes papéis tais como: combustível; estabilizador que atua reagindo com os óxidos nitrosos (NO e NO₂), que são radicais livres originados pela decomposição espontânea da NC; a de agente oxidante que auxilia na diminuição da chama na boca da arma; a de catalisador de combustão; a de plastificante que proporciona característica plástica à pólvora, normalmente contribuem como gelatinizantes; a de estabilizador de combustão; a de auxiliares de gelatinização que desfazem a estrutura fibrosa da NC alterando-a para uma estrutura gelatinosa; a de opacificantes, que por

meio do tratamento de refino dos grãos facilita o carregamento e diminui a eletricidade estática existente e até a de supressor de flash (REBOLEIRA, 2013). A percentagem de cada um destes compostos se altera conforme o tipo de pólvora, a função e o fabricante.

2.3.4.3.1.7 Ação dentro da arma

O propelente ignizado cria pressão dentro da câmara da arma que força o projétil através do cano. A pressão máxima de combustão do propelente da câmara e do cano da arma, pode ocorrer de modos distintos, dependendo do tipo de pólvora utilizada e suas taxas de queima, conforme Figura 34.



Figura 34 - Procedimento de Recarga de Munição
Fonte: Adaptado de Krier *et al.*, 1979

Enquanto uma pólvora de taxa degressiva tem um pico de pressão máxima próximo a câmara, resultando em uma melhor utilização para armas de canos menores, a neutra e a progressiva tem um tipo de pressão máximas de forma sequencial, justificando seu emprego principalmente em armas de cano de meio e grande alcance, respectivamente.

2.3.4.4 Projétil

Conhecido também como bala ou ponta, em um contexto amplo, é qualquer corpo sólido passível de ser arremessado (Figura 35). Já ao se referir às munições, constitui a parte do cartucho que será lançada através do cano, tendo como principal objetivo provocar danos, há vista que é o próprio emprego da munição. Na Figura 36 segue uma das principais nomenclaturas utilizadas sobre os projéteis.



Figura 35 - Projétil
Fonte: Abordagem policial (2010)⁵

⁵ Disponível em: <http://abordagempolicial.com/2010/03/especial-armas-de-fogo-%E2%80%93-bala-projetil-municao-cartucho/>. Acesso em: 28 dez. 2019

Assim,

O projétil corresponde ao componente essencial da munição com a função de provocar os efeitos desejados no objetivo, sendo a única parte da munição que passa pelo cano da arma e atinge o alvo. Geralmente, o material do projétil deve apresentar algumas características fundamentais: densidade elevada, para facilmente adquirir uma energia elevada, ser infusível, para não se fundir com o atrito na alma do cano e ser deformável, de acordo com o seu destino, vulnerante⁶ ou derrubante⁷. (MESTRE, 2011).

Na figura 36 observa-se uma das principais nomenclaturas utilizadas sobre os projéteis.

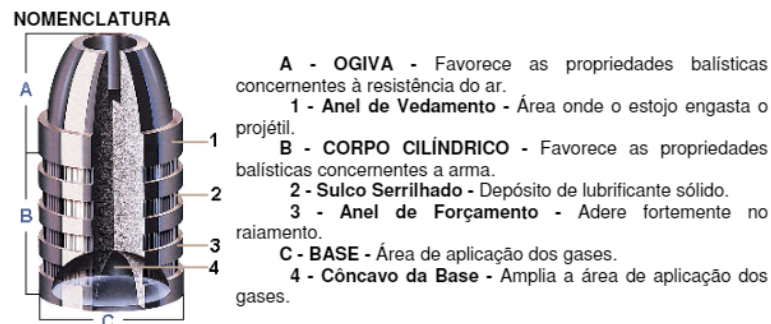


Figura 36 - Nomenclatura do projétil

Fonte; Abordagem policial (2010)⁸

Os projéteis podem ser subdivididos três partes físicas (MESTRE, 2011):

- Ponta: parte superior do projétil, em que fica exposta, fora da cápsula;
- Base: parte inferior do projétil, fica presa a cápsula e está sujeita à ação dos gases resultantes da queima da pólvora.

- Corpo: cilíndrico, normalmente contém canaletas destinadas a receber graxa ou com função de acrescentar maior fixação do projétil ao estojo.

O projétil também pode dividir-se em três regiões com relação à composição química:

- Coifa, em chumbo para auxiliar a penetração do núcleo, exclusivo em munições perfurantes;
- Camisa, suficientemente espessa para impedir a fusão do núcleo e pouco dura para não danificar as estrias das armas;

⁶ Poder vulnerante (que vulnera, fere): capacidade de um projétil para trespassar um corpo aquando do impacto. Quanto maior for a penetração tanto maior será o poder vulnerante.

⁷ Poder Derrubante: o poder derrubante de uma munição é o grau da capacidade que um projétil tem para neutralizar um atacante apesar de não o atingir num órgão vital.

⁸ Disponível em: <http://abordagempolicial.com/2010/03/especial-armas-de-fogo-%E2%80%93-bala-projetil-municao-cartucho/>. Acesso em: 28 dez. 2019

- Núcleo, pode ser formado de chumbo, bronze, ou aço, contudo, muitas vezes é endurecido sendo ligado a estanho ou antimônio, devido a questões econômicas. Na Figura 37 apresenta-se o projétil em corte transversal.

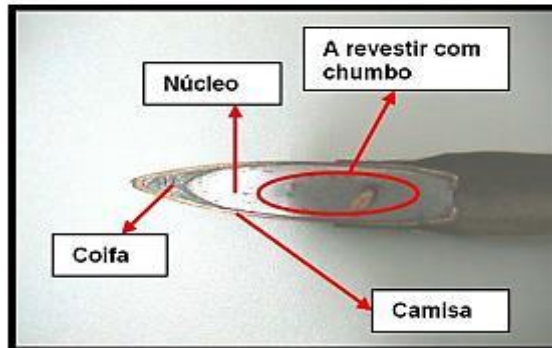


Figura 37 - Projétil em corte transversal, com as três zonas distintas
Fonte: Polícia Federal (2017)

2.3.4.4.1 Classificação dos projéteis

Os projéteis de chumbo, são projéteis construídos exclusivamente com ligas desse metal. Podem ser encontrados diversos tipos de projéteis, destinados aos mais diversos usos, os quais podem ser classificados de acordo com o tipo de ponta ou o tipo de base.

A Figura 38 mostra as principais classificações quanto aos tipos de pontas.



Figura 38 - Principais classificações quanto ao tipo de pontas
Fonte: Polícia Federal (2017)

A Figura 39 apresenta as principais classificações quanto ao tipo de base.



Figura 39 - Principais classificações quanto ao tipo de base
Fonte: Polícia Federal (2017)

Os projéteis de chumbo contêm benefícios de serem fáceis de produzir e baratos, porém apresentam problemas com a velocidade devido a tendência de provocarem chumbamento, resíduos incrustados nas raiais, no cano ao serem impelidos com rapidez. Em determinadas velocidades são capazes de saírem do cano sem acompanhar corretamente as curvas do raiamento. Apesar disso são os mais utilizados em revólveres e em determinadas

carabinas, principalmente nos calibres do tipo não Magnum, como .22LR, .32 S&WL, .38 Special, .44 S&W e .44-40 Winchester.

A produção atual da nacional brasileira CBC - Companhia Brasileira de Cartuchos, contém os formatos mais comuns de pontas de chumbo para uso em revólveres, dos quais se destacam o “wad cutter”, também chamado pelos brasileiros de “canto-vivo”. Esse tipo de ponta é utilizado principalmente por praticantes de tiros esportivos devido a sua precisão, ótima perfuração do alvo permitindo uma melhor visualização dos impactos, além de utilizar uma carga de pólvora reduzida. Seu formato lhe confere uma trajetória mais concisa, especialmente porque o engajamento dele com as raia do cano se dá em toda a sua extensão (Figura 40).

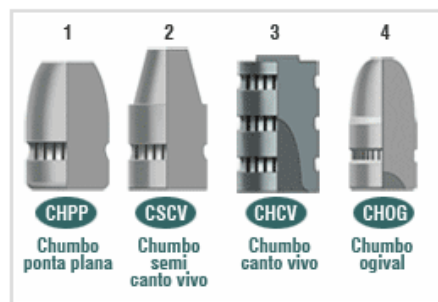


Figura 40 – Formatos mais comuns de pontas de chumbo
Fonte: CBC, 2019

Os projéteis encamisados ou igualmente chamados de jaquetados contém núcleo de chumbo revestido (total ou parcialmente) com uma camisa de percentuais de cobre, zinco, níquel e estanho ou aço, podendo inclusive descartar um destes elementos. O núcleo é composto normalmente por chumbo praticamente puro, atribuindo um peso imprescindível para um bom desempenho balístico.

Os projéteis jaquetados, permitem maiores velocidades iniciais além de não provocarem o chumbeamento nas raia, podem ter sua capa externa aberta na base e fechada na ponta (projéteis sólidos) ou fechada na base e aberta na ponta (projéteis expansivos). Os projéteis sólidos têm destinação militar, para defesa pessoal ou para tiro esportivo e destacam-se por sua maior capacidade de penetração e alcance.

Esse tipo de projétil ainda pode se denominar como encamisados ou semi-encamisados, de acordo com algumas características.

Os encamisados contém eficiência maior de perfuração e transfixação. São os únicos permitidos para uso militar devido a sua principal características de provocarem menor dano interno no corpo humano.

Já os semi-encamisados são capazes de causar maiores lacerações; são projéteis destinados à atividade da caça. Contém ponta composta por chumbo com o corpo restante

coberto por latão, de maneira que o chumbo, em sua deformação natural, acaba por rasgar a camisa de latão do corpo do projétil.

Existem alguns projéteis de produção da CBC, para uso em revólveres, principalmente em calibres .38 Special, .357 Magnum e .44 Magnum. Suas pontas, no que lhe concerne, podem ser planas e maciças, ou podem ser ocas, o que promove uma facilidade em sua deformação, (Figura 41).



Figura 41 - Projéteis expansivos
Fonte: CBC, 2019

Os projéteis expansivos ao atingir o corpo humano se deformam e aumentam seu diâmetro, impetrando maior capacidade lesiva (poder de parada) e se destinam à defesa pessoal. Esses projéteis também podem ser classificados em totalmente encamisados (a camisa recobre todo o corpo do projétil) e semi-encamisados (a camisa recobre parcialmente o corpo, deixando sua parte posterior exposta), contém pontas e tipos de bases análogos as utilizadas pelos projéteis de chumbo.

Os projéteis expansivos são conhecidos também como projéteis "dum-dum", já que existe um mito popular que determina a origem do seu nome como: O 1º "Dum" destinado ao disparo e o 2º "Dum" da expansão do projétil. Entretanto, a origem do nome "DumDum" está associado as primeiras pesquisas e desenvolvimento desse projétil que ocorrerem na cidade de Dum Dum na Índia, pela Inglaterra.

A Figura 42 mostra a expansão de um projétil de acordo com as velocidades de impacto.



Figura 42 - Expansão de um projétil de acordo com as velocidades de impacto.
Fonte: Polícia Federal (2017)

É importante relatar que as três classificações podem ser associadas de acordo com a necessidade do atirador e com o projeto da arma utilizada. Há exemplo de pistolas semiautomáticas que, apesar de poder utilizar de forma restrita as pontas de chumbo, o padrão é o uso de pontas jaquetadas, ou encamisadas em sua totalidade, haja visto que as munições nesse tipo de armamento, necessitam de movimentação dentro da arma, já que no decorrer do processo de alimentação são extraídas do carregador e impulsionadas para dentro do cano com altas velocidades, e as pontas jaquetadas proporcionam menos riscos de engasgues assim como na formação de crostas de chumbo internamente, na região de entrada da câmara. Na Figura 43 se apresenta o exemplo de pontas encamisadas expansivas, com maior poder de deformação, dotadas de rebaiços sem deixar o chumbo aparente



Figura 43 - Exemplo de pontas encamisadas expansivas, com maior poder de deformação, dotadas de rebaiços sem deixar o chumbo aparente
Fonte: Polícia Federal (2017)

Normalmente esses tipos de projéteis, são empregadas nos cartuchos da série +P ou +P+, uma categoria de munição com carga mais poderosa, comparado com a velocidade dos cartuchos equivalentes comuns. A fabricante brasileira CBC fornece alguns tipos de pontas para as mais variadas finalidades específicas (Figura 44).



Figura 44 - Alguns tipos de pontas para as mais variadas finalidades específicas.
Fonte: Polícia Federal (2017)

Na Figura 44, os dois primeiros projéteis, em chumbo maciço, são empregados para treinamento policial, com propósito de reduzir custos e de preservar o máximo possível o raiamento das armas da corporação. O terceiro é um projétil atribuído aos praticantes de tiro

prático esportivo, modalidade que atiradores chegam a disparar centenas de tiros em uma só prova; este projétil incorpora a maciez do chumbo, para preservar o raiamento, com a ponta semi canto vivo, que retalha o alvo de maneira mais precisa.

Os projéteis denominados de frangíveis devido a sua característica de reduzir os efeitos de ricochetes são empregados por forças policiais e militares. Gradualmente a segurança pública exige produtos mais avançados, adaptados a seus propósitos particulares objetivando atender suas necessidades próprias. Objetivando uma melhor qualidade e comercialização de seus produtos, a CBC desenvolveu uma munição tipo balas de cobre (*Copper Bullet*), que utiliza projéteis especiais, fabricados em cobre puro, com ponta oca, e dimensões e formatos especialmente projetados.

Essas pontas estão presentes nas munições utilizadas por diversas forças de segurança públicas, e atendem as rígidas especificações a Federal Bureau of Investigation (FBI), uma vez que oferecem atualmente o melhor que existe em termos de poder de parada (*stopping power*) - mesmo em disparos indiretos. O peso do projétil, velocidade e energia resultante foram determinadas para garantir o melhor resultado.

Através do catálogo do fabricante CBC, é possível identificar diversos cartuchos para revólver com diferentes opções de projéteis tais como os feitos inteiramente de chumbo (ogivais, semi canto-vivo e canto vivo) e as pontas semi-encamisadas (Figura 45).



Figura 45 - Opções de projéteis catálogo CBC
Fonte: CBC (2019)

2.3.4.4.2 Forma do projétil vs Força de arrasto

O coeficiente de arrasto (D) para um projétil é puramente um fator aerodinâmico que descreve o efeito de atrito com a velocidade devido ao arrasto com o ar (Cd), densidade do ar (p), área da seção frontal (A), velocidade (V) e sua massa, conforme Equação 7.

$$D = Cd \frac{\rho V^2}{2} A \quad (7)$$

Utilizado pela balística moderna junto a velocidade, o D objetiva evitar a descontinuidade na velocidade, e quando combinado com um modelo apropriado de força de arrasto proporciona uma exaustão a distancias superiores aos 1000 metros. Um subproduto da pesquisa da balística moderna é que o D . pode aferir com precisão modelos de arrastos específicos para determinados projéteis tomando como base suas dimensões.

A expansão controlada da queima da pólvora gera a pressão desejada através da relação força/área. Em que a área considerada equivalente ao diâmetro da base do projétil. Contudo, a energia transmitida para o projétil dependerá de três parâmetros básicos: massa x forma x tempo da força aplicada, devendo ser respeitados os fatores de resistência estrutural do armamento estabelecido pelo seu fabricante e fundamentado em legislação própria de cada país.

A massa do projétil medida em *grains*, tem como principal atuação os fatores que regem a lei de Newton sobre gravitação universal. O formato do projétil é influenciado pelas leis da aerodinâmica, e o tempo da força aplicada são influenciados pelo tamanho do cano da arma e pelas propriedades físicas e químicas da pólvora utilizada.

Assim, as armas de alta energia como os Rifles, terão mais energia que armas curtas devido ao cano mais longo, conter maior resistência estrutural, podendo suportar entre 40.000 a 70.000 psi e conter uma relação ideal massa x forma. O deslocamento do projétil se dá pelo aumento da aceleração do projétil devido à expansão dos gases formados no durante e após a queima do propelente na câmara da arma utilizada. Logo se o cano é mais longo até um certo ponto, maior será a aceleração.

Durante o tempo em que o projétil percorre o cano de uma arma, algumas deformações pequenas ocorrem, chamadas de deformações “*setback*” ou revés. Isso deriva de pequenas imperfeições ou variações no raiamento ou marcas de ferramentas. O efeito sobre a trajetória do tiro subsequente é geralmente insignificante. (JANDIAL *et al*, 2008).

2.3.4.5 Cálculo do impacto de arma de fogo

Apesar da diversidade de armas de fogo e da respetiva munição, o potencial de ameaça é circunscrito à energia do projétil e, portanto, pela sua massa e velocidade. As características dos projéteis tipicamente utilizados em testes balísticos encontram-se sumariados na tabela 3 (KNEUBUEHL, 2003).

Tabela 3 - Características típicas dos projéteis utilizados em testes balísticos.

| Tipo de arma | Calibre | Peso do projétil (g) | Velocidade do teste (m/s) | Energia (J) | Densidade de energia (J/mm ²) |
|----------------|-----------------|----------------------|---------------------------|-------------|---|
| Armas curtas | 9mm luger | 8,0 | 410 | 670 | 10,5 |
| | 357 Magnum | 10,2 | 430 | 940 | 14,8 |
| | 44 Rem. Mag. | 15,5 | 440 | 1500 | 15,2 |
| Armas longas | 5.56 mm NATO | 4,0 | 935 | 1750 | 72,8 |
| Forças armadas | 7,62 mm NATO | 9,5 | 830 | 3270 | 71,8 |
| | 7,5 mm GP 11 | 11,3 | 780 | 3440 | 76,8 |
| Armas longas | 7mm Rem. Magnum | 10,5 | 960 | 4840 | 125,7 |
| Caça | 8x68S | 12,7 | 920 | 5375 | 106,9 |
| Espingardas | 12/70 | 31,4 | 435 | 2860 | 10,6 |

Fonte: Kneubuehl (2003).

As grandezas determinantes para a caracterização dos níveis de proteção balística são a energia (Equação 8) e a densidade de energia (Equação 9) dos projéteis, sendo determinadas em função da massa e velocidade dos mesmos (CARLUCCI; JACOBSON, 2010).

$$\text{Energia cinética do projétil} = \frac{1}{2} \text{ massa do projétil } \times \text{ velocidade}^2 \quad (8)$$

$$\text{Densidade de energia cinética} = \frac{\text{energia cinética}}{\text{área do projétil}} = \frac{\text{massa do projétil } \times \text{ velocidade}^2}{2 \times \text{área do projétil}} \quad (9)$$

2.3.4.6 Classificação das Velocidade de Impacto

Segundo Zukas (1982) os fenômenos de impacto podem ser divididos de acordo com a velocidade a que ocorrem, atribuindo-se as classificações indicadas:

Impacto a baixa velocidade: $v < 250$ km/s

Impacto a média velocidade: $250 < v < 0.5$ km/s

Impacto a alta velocidade: $0.5 \text{ km/s} < v < 2$ km/s

Impacto a hipervelocidade: $v > 2$ km/s

Aos impactos a baixa velocidade associam-se ações e reações da ordem dos milissegundos e penetrações ou deformações de contacto fundamentalmente determinadas pelo comportamento global da estrutura. Na faixa de velocidades de 0.5 a 2 km/s, a resposta da estrutura, globalmente, tem pouca relevância no estudo do comportamento da região que sofre o impacto. O impacto deve ser então tratado como um fenômeno de propagação de ondas em que os aspetos de velocidade de deformação, geometria escoamento plástico e os modos de rotura têm que ser considerados na modelagem do processo (MESTRE, 2015).

Contudo, apresenta grande relevância para a análise estrutural, mesmo que haja transfixação da estrutura analisada pelo projétil. Já na faixa de velocidades de 2 a 3 km/s, as pressões locais causariam tensões várias vezes maiores do que as resistências dos materiais e encontra-se um comportamento típico de fluidos não sendo também objeto de estudo desse trabalho (MESTRE, 2015).

2.3.5 Cálculo dos elementos da trajetória na atmosfera

Os elementos que determinam a trajetória dos projéteis balísticos na atmosfera são: a) o alcance máximo e a altura que o projétil atinge; b) a velocidade instantânea em qualquer ponto da trajetória; c) energia cinética no momento do impacto.

O alcance máximo é definido como a distância ao longo da horizontal, compreendida entre a boca do cano da arma e o ponto de queda, quando o projétil cruza o plano horizontal do qual foi lançado. O valor do alcance máximo (x) é obtido experimentalmente em testes de tiro em campos de prova e registrado em tabelas; o alcance máximo depende da arma, comprimento do cano, munição utilizada (velocidade inicial e coeficiente balístico⁹ do projétil) e ângulo de tiro¹⁰, sendo que a maior distância atingida é obtida com ângulos que se aproximam de 30° (ALMEIDA JÚNIOR, 2017).

Para o cálculo do alcance máximo do projétil, no vácuo, insere-se os dados na equação formulada por Galileu e faz-se $y=0$. A solução da equação 9 possui duas raízes, $x_0 = 0$ e $x_f = x_{\text{máx}}$, como segue:

Velocidade inicial: $v_0 = 253 \text{ m/s}$

Aceleração da gravidade: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Ângulo que o vetor velocidade faz com a horizontal: $\alpha = 30^\circ$

Tangente: $\tan\alpha = 0,57735$

Cosseno: $\cos\alpha = 0,86603$

Obtém-se um alcance máximo teórico no vácuo¹¹ de 5651 metros. Ocorre que, devido à resistência do ar, a velocidade do projétil não é constante, se altera, instantaneamente, em função da distância percorrida pelo projétil, no tempo. Então, deve-se substituir v e obter um

⁹ O cálculo do coeficiente balístico envolve a forma, massa, densidade do projétil e o diâmetro da seção transversal oposta à resistência do ar. Quanto maior for o coeficiente balístico, melhor será sua aerodinâmica, isto é, cortará com mais facilidade as capas de ar.

¹⁰ Ângulo de tiro é o ângulo que o vetor velocidade faz com a horizontal, no instante que o projétil abandona a boca do cano da arma, é medido a partir da reta tangente ao ponto $P_0(x_0, y_0)$.

¹¹ Observação: no vácuo, a distância teórica máxima atingida seria obtida com ângulo de tiro de 45°, para a mesma arma e projétil; ou seja, 6525 metros.

alcance máximo teórico no vácuo por $v_i = v_0 - r x$ na equação original e obtêm-se conforme equação 10:

$$y = \tan \alpha x - \frac{g}{2} \frac{x^2}{((v_0 - rx) \cos \alpha)^2} \quad (10)$$

que é a equação da trajetória na atmosfera. O fator r , para efeito de cálculo, é considerado uma constante que multiplicada por x representa o retardo, levando-se em consideração os fatores envolvidos.

Para se encontrar o valor do fator de retardo r , algebricamente, substitui-se x por 1521 metros (obtido numericamente) na equação da trajetória na atmosfera, igualando $y=0$. O valor de r também pode ser calculado numericamente, com auxílio do computador, através de aproximações sucessivas, obtendo-se $r=0,08002003$.

Do mesmo modo, para definir a altura atingida pelo projétil, basta substituir os valores de x e v na equação da trajetória na atmosfera, obtêm-se os valores de y em função de x , isso é $y(x)$.

A energia cinética é a capacidade que os objetos, partículas ou corpos possuem para realizar Trabalho, capacidade esta devida ao movimento. A segunda Lei de Newton relaciona a força resultante F_R sobre um corpo de massa m , com aceleração a que ele adquire sob a ação desta força (Equação 11):

$$F_R = m \cdot a \quad (11)$$

A aceleração adquirida pelo corpo é uma medida da variação da sua velocidade. Assim se V_0 for a velocidade inicial, V a velocidade final e ΔS o deslocamento sofrido, a equação de Torricelli relaciona estas grandezas conforme equações 12 e 13:

$$V^2 = V_0^2 + 2 \cdot a \Delta S \quad (12)$$

$$a = \frac{1}{2\Delta S} (V^2 - V_0^2) \quad (13)$$

Substituindo a relação da aceleração que está acima na relação da força resultante obtém-se a equação 14:

$$F_R = m \cdot \frac{1}{2\Delta S} (V^2 - V_0^2) \quad (14)$$

$$F_R \cdot \Delta S = \frac{m}{2} V^2 - \frac{m}{2} V_0^2$$

O trabalho realizado pela força ao longo do deslocamento é dado conforme equação 15:

$$\tau = F \cdot \Delta S$$

Logo:

$$\tau = \frac{m}{2} V^2 - \frac{m}{2} V_0^2 \quad (15)$$

A relação acima é conhecida como Teorema da Energia Cinética, e afirma que “O trabalho da resultante das forças que atuam sobre um corpo é igual a variação da Energia Cinética sofrida pelo corpo”. A relação que envolve a produto do fator (1/2) pela massa e pelo quadrado da velocidade é conhecida como Energia Cinética E_c do corpo, conforme equação 16.

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot V^2 \quad (16)$$

Um projétil de massa m lançado na vertical com velocidade inicial v_i possui uma energia cinética E_c proporcional ao quadrado de sua velocidade instantânea, expressa pela equação 17.

$$E_c = \frac{1}{2} m v_i^2 \quad (17)$$

Na subida, a velocidade do projétil é desacelerada pela força gravitacional, ou seja, a energia cinética do projétil diminui. Pode-se usar a equação $W = F d \cos \emptyset$ para expressar o trabalho realizado durante um deslocamento d . No lugar de F , usamos mg , o módulo de F_g ; assim, o trabalho W_g realizado pela força gravitacional F_g é $W_g = mg d \cos \emptyset$. Durante a subida, a força F_g tem o sentido contrário ao do deslocamento d ; então $\emptyset = 180^\circ$ e a equação 18 fica assim:

$$W_g = mg \cdot d \cdot \cos 180^\circ = mg \cdot d(-1) = -mg \cdot d \quad (18)$$

O sinal negativo indica que durante a subida a força gravitacional absorve energia cinética mgd do projétil; por isso o projétil perde velocidade na subida. Depois que o projétil atinge a altura máxima e começa a descer, o ângulo \emptyset entre a força F_g e o deslocamento d é zero; como $\emptyset = 0^\circ$, a equação 19 fica assim:

$$W_g = mg \cdot d \cdot \cos 0^\circ = mg \cdot d(+1) = mg \cdot d \quad (19)$$

Considerando que F representa a força resultante agindo sobre o projétil na dimensão y ; o trabalho resultante é $W = \int F_y dy$. Uma vez que a velocidade varia com a posição e a posição varia com o tempo, pode-se usar a regra da cadeia para descrever a equação 20

$$\frac{dv_y}{dt} = \left(\frac{dv_y}{dy} \right) \left(\frac{dy}{dt} \right) \quad (20)$$

E a força resultante escrita assim conforme equação 21:

$$F_y = ma_y = m \frac{dv_y}{dt} = m \frac{dv_y}{dy} \frac{dy}{dt} = m \frac{dv_y}{dy} v_y = mv_y \frac{dv_y}{dy} \quad (21)$$

Assim, o trabalho resultante na dimensão y pode ser escrito pela equação 22:

$$W_y = \int F_y dy = \int mv_y \frac{dv_y}{dy} dy = \int mv_y dv_y \quad (22)$$

E a energia cinética total é a integral da quantidade de movimento (mv_i) dada pela equação 23:

$$E_c = \int_0^{v_i} (mv_i) dv_i = \frac{1}{2}mv_i^2 \quad (23)$$

2.4 Balística

A balística é a ciência que estuda as forças atuantes sobre os projéteis bem como os correspondentes movimentos, nos vários meios de interesse, desde a sua posição inicial dentro das armas até à sua penetração dos alvos que é suposto atingirem. O campo da balística pode ser classificado em quatro grandes categorias: a balística interna, a balística intermediária a balística externa e a balística terminal. Em alguns casos uma quarta categoria designada de balística intermédia também é considerada (CARLUCCI; JACOBSON, 2010).

A Balística é uma parte da Física/Química aplicada à criminalística que estuda as armas de fogo, sua munição e os efeitos dos disparos (trajetória, os meios que atravessam) por elas produzidos, sempre que tiverem uma relação direta ou indireta com infrações penais, visando esclarecer e provar sua ocorrência.

2.4.1 Balística Interna

A balística interna estuda exclusivamente o movimento do projétil no interior do cano (armas de fogo), sob a ação dos gases provenientes da deflagração da carga propulsora, ou seja, estuda os fenómenos que ocorrem desde o momento que a munição se encontra em repouso, até ao momento que o projétil abandona a boca do cano, isto é, todo o percurso pela alma do cano (CARLUCCI; JACOBSON, 2010).¹²

Para Maia (2012), a balística interna é a parte que analisa a estrutura, o calibre, os

¹² Alma do cano – parte interior do cano de uma arma de projeção de fogo, de forma cilíndrica e diâmetro.

mecanismos de funcionamento das armas de fogo e a técnica de tiro, tal como os resultados da detonação da espoleta e os processos físicos e químicos que envolvem desde a deflagração da pólvora no interior dos cartuchos, até que o projétil saia pela boca do cano da arma.

Para Miner (2013) a definição formal da balística interna envolve todos os eventos existentes dentro de uma arma de fogo, que abrange desde quando o pino de disparo atinge o espoleta ou inflama o propulsor até o projétil sai do cano. Para iniciar qualquer projeto de um sistema de armas, a balística interior precisa ser bem compreendida e as ações que ocorrem no sistema de armas devem ser caracterizadas.

No passado, muitos projetos de armas foram feitos por tentativa e erro, por falta de um método matemático descrição do processo. A verdadeira descrição matemática do processo não se tornou predominante até meados do século XVIII (BRODE; ENSTROM, 1970)

Atualmente, o processo fundamenta-se na física da balística interna e entender o processo entre conversão da energia potencial química armazenada do propulsor em cinética útil no projétil, visando obter o desempenho ideal da arma de fogo por meio da utilização total da energia potencial contida no propulsor e minimiza todas as outras perdas, como atrito, perda de calor, arraste e recuo de projéteis, dentre outras perdas potenciais (MINER , 2013).

A maneira como o propulsor converte sua energia potencial em energia cinética é por combustão e por transição do estado sólido do propulsor para um estado gasoso que causa um aumento de pressão em um volume contido para trabalhar em um projétil (JOHNSON, 2005)

Em sua obra Miner (2013) ainda propõe a importância da análise termodinâmica com intuito de estabelecer a maioria dos parâmetros do propulsor, muitos desses dados são disponibilizados pelo fabricante do propulsor, tendo como próximo passo definir a geometria da arma de fogo utilizada e geometria do projétil, uma vez que estas variáveis podem ser ajustadas, e modeladas em um modelo matemático computacional, baseado na curva de velocidade do deslocamento da pressão no interior do cano da arma, também conhecido como curva da balística interna.

Para monitorar esses parâmetros, curvas das balísticas internas foram desenvolvidas com essas informações. A mais útil dessas curvas é conhecida como curvas pressão-velocidade de deslocamento (PTV), a qual permite impor restrições de pressão, como a máxima pressão permitida da câmara e do tubo da pistola. A curva permitirá ver quando a

pressão excederá essas restrições de projeto e permitirá que o engenheiro decida se deve usar menor carga de propulsor ou aumentar a culatra. Contudo, a maioria dos armamentos contem restrições neste último aspecto, por questões de segurança (MIURA; MATSUO, 2006).

A parte mais importante da curva PTV, para este trabalho, é a sua área inferior, pois determina a quantidade de trabalho realizado no projétil pelos gases propulsores. Podendo ser caracterizada pela equação (24), em que P é a base pressão atuando no projétil, onde P_B é a pressão base que atua no projétil, A_s é a área da seção transversal do furo e dS é o comprimento do lançador. A equação é expressa como trabalho de volume de pressão como mostrado na equação (24). A equação também pode ser expressada como trabalho de volume de pressão como mostrado na equação (25).

$$W = \int P_B A_s dS \quad (24)$$

$$W = \int P_B dV_c(t) \quad (25)$$

A equação de energia cinética, equação (26), revelará a velocidade do projétil usando a conservação de energia onde m_e é a massa efetiva e V_p é a velocidade do projétil.

$$W = \frac{1}{2} m_e V_p^2 \quad (26)$$

O objetivo desta interpretação é maximizar a área sob a curva PTV sem exceder a resistência dos materiais do sistema de armas. A curva PTV característica de um sistema de armas é mais dependente da geometria da pistola, propulsor, taxa de queima e geometria do grão.

Já para análise balística objetivando avaliar a eficiência de um projeto de arma de fogo, existem dois parâmetros. O primeiro é a eficiência piezométrica encontrada dividindo a pressão média pela pressão máxima da culatra. A pressão média é a pressão exercida sobre o projétil ao longo do comprimento do cano que produzirá a velocidade do projétil na saída. equação (27).

$$e_p = \frac{\frac{1}{2} m_p V_p^2}{A_s S P_{BM}} \quad (27)$$

Onde m_p é a massa do projétil, V_p é a velocidade do projétil, A_s é a área seccional da boca do cano, S é o deslocamento do projétil a qualquer momento $S = x(t)$ e P_{BM} é o pressão máxima da culatra. Quanto maior a eficiência piezométrica, mais lisa a curva PTV se torna. A eficiência balística pode ser definida como a razão entre o trabalho total realizado no projétil e o potencial total de trabalho do propulsor.

O segundo parâmetro é a expressão de eficiência balística pode ser escrita como mostrado na equação (28):

$$e_b = \frac{\frac{1}{2}m_c V_p^2 (\gamma - 1)}{\lambda m_c} \quad (28)$$

Onde m_e é a massa equivalente, γ é a razão específica de calor do propulsor, λ é a constante de força específica e m_c a massa de carga (MINER, 2013).

2.4.2 Balística Intermediária

É a área que estuda os fenômenos que incidem sobre os projéteis durante sua trajetória, logo após a sua saída da boca do cano da arma até ao momento em que deixam de estar sobre a influência dos gases remanescentes à boca da arma (MAIA, 2012).

Segundo Wade (2011) o cálculo das trajetórias dos projéteis é necessário para ajudar cientistas e engenheiros a desenvolver equipamentos utilizados pelos departamentos de defesa, pelas forças de segurança pública e praticantes de tiro desportivos, tanto em alvos de distâncias conhecidas quanto desconhecidas.

Existem muitas peças importantes que levam em consideração a trajetória do projétil: resistência do ar, ângulo, pressão e temperatura do ar, velocidade da boca do cano, forma do projétil e coeficiente de resistência. Todos esses fatores contribuem para a precisão do projétil atingir o alvo desejado. Os dados de balística também são direcionados ao projeto e construção de escopos, telémetros e diferentes tipos de munição.

Wade (2011) descreve uma abordagem matemática como solução de determinar a trajetória de um projétil. Com $x(t)$ e $y(t)$ denotando a trajetória horizontal e vertical do projétil em função do tempo t . Define-se $v_x(t)$ e $v_y(t)$ para velocidade horizontal e vertical do projétil no tempo. Usando $f'(t)$ para denotar a derivação da função $f(t)$ com referência em t , e utilizando a densidade do ar $\rho = 353.02 \frac{P}{T}$ para cálculo do arrasto. Equação (29):

$$D = \frac{1}{2} \rho C A \quad (29)$$

Onde $C = 0.295$ para o coeficiente de arrasto do projétil e A corresponde a área do ponta do projétil em m^2 . Utilizando as equações de movimento para um objeto que se move através de um campo de gravitação temos a equação (30) e (31):

$$v_x'(t) = \frac{D}{M} v \cdot v_x(t) \quad (30)$$

$$v'_y(t) = -g - \frac{D}{M} v \cdot v_y(t) \quad (31)$$

Onde M corresponde a massa do projétil em quilogramas, g a aceleração devido à gravidade e v amplitude do vetor velocidade. Utilizando a velocidade do projétil, podemos determinar as condições iniciais, através das Equações (32), (33), (34) e (35).

$$x'(0) = v_x(0) = V \cos \theta \quad (32)$$

$$y'(0) = v_y(0) = V \sin \theta \quad (33)$$

$$x(0) = 0 \quad (34)$$

$$y(0) = 1 \quad (35)$$

Empregando o método de Euler, equação (36)

$$F(t + \Delta t) \approx F(t) + \Delta t F'(t) \quad (36)$$

Onde F(t) pode assumir as funções de x(t), y(t), $v_x(t)$ ou $v_y(t)$.

Ao fomentar sobre a atuação da resistência do ar durante a aproximação do projétil ao alvo, “Devemos observar a existência de uma diferença dramática entre os métodos que levam em consideração a resistência do ar com métodos que negligenciam o efeito dessa resistência, conforme Figura 46.

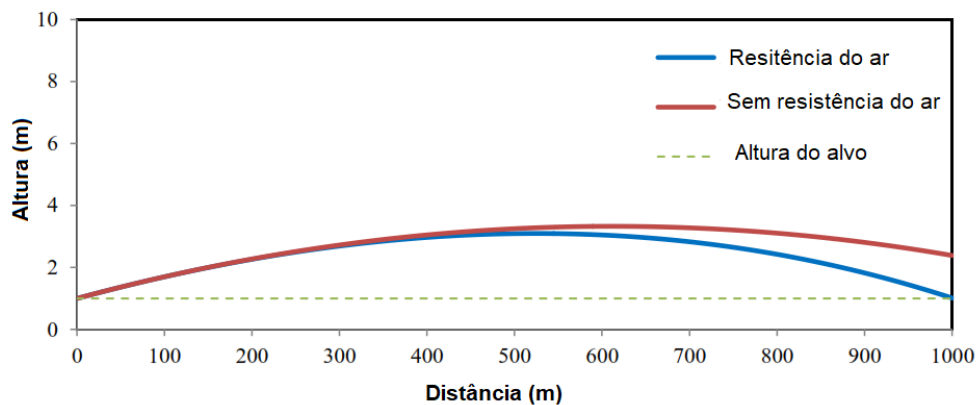


Figura 46 - Trajetória de um projétil
Fonte: Wade (2011)

A Figura 46 demonstra a trajetória de um projétil disparado por um fuzil Remington 30-06 em um ângulo acima do horizontal para atingir um alvo a 1m do chão, a 1000m de distância e necessidade de correção do ângulo de disparo devido a interferência da resistência do ar sobre o projétil.

2.4.3 Balística Externa

Segundo Maia (2012), estudar a trajetória do projétil após a saída da boca do cano da arma até sua parada final. Incluindo a velocidade inicial de projétil, sua superfície e massa, as condições do seu movimento, resistência do ar, ação da gravidade e os movimentos intrínsecos do projétil.

Pinto (2009) reafirma que a balística externa é a área das ciências responsável por examina as forças que agem sobre os projéteis e seus movimentos correspondentes ao longo de sua trajetória na atmosfera, ou seja, do momento que ficaram livres das influências dos gases, até aos prováveis impactos nos alvos. Acrescenta que as duas principais forças que agem sobre os projéteis no decorrer de seu deslocamento na atmosfera são:

- A força da gravidade ou atração terrestre;
- A resistência do ar aos seus movimentos.

Apesar da força de atração terrestre ser muito importante, a força da resistência do ar é predominante, contendo três componentes: “a força de sucção provocada pelo vácuo na base do projétil; uma componente de compressão sobre a ponta do projétil, devida a uma compressão do ar naquela zona; uma componente de fricção do ar sobre as superfícies e protuberâncias laterais do projétil. Para velocidades subsônicas do projétil o componente de resistência mais importante é a de sucção, enquanto para velocidades supersônicas a resistência por compressão é a mais importante” (PINTO, 2009).

A balística externa dos projéteis pode ser resumida a Equação 15, ou seja, corresponde a energia cinética que o projétil deixa o cano, contudo, é o coeficiente balístico (BC) que determina a quantidade dessa energia, que deverá ser entregue ao alvo quando este se deparar com a resistência do ar (Equação 37):

$$\text{Coeficiente balístico (BC)} = \frac{SD}{l} \quad (37)$$

Onde: SD representa a densidade da secção do projétil, e l é o fator de forma para o formato do projétil. A densidade da secção pode ser medida tendo como base a massa do projétil (m) dividido pelo quadrado do seu diâmetro (d), conforme Equação 38.

$$SD = \frac{m}{d^2} \quad (38)$$

O movimento de deslocamento horizontal do projétil, também pode ser influenciado pelo arrasto (D), calculado a partir da equação 39:

$$D = f\left(\frac{v}{a}\right) k \rho d^2 v^2 \quad (39)$$

Onde: $f(v/a)$ representa o coeficiente da razão entre a velocidade do projétil e a velocidade do som, no meio em que o mesmo viaja. K é uma constante referente a forma do

projétil e k é uma constante referente a guinada “yaw” (desvio linear de voo). P é a densidade do meio (densidade do tecido é >800 vezes o do ar), d é o diâmetro do calibre do projétil, e v a velocidade. Portanto, quanto maior a velocidade, maior o calibre, ou quanto mais denso o tecido maior será a força de arrasto.

O grau com o qual o projétil é desacelerado pela força de arrasto é chamado de retardo (r) dado pela equação 40:

$$r = D/ME \quad (40)$$

Sendo o arrasto (D) uma função da velocidade, observa-se que para determinado projétil de uma massa específica (ME), quanto maior a velocidade, maior será o retardo. Estando o arrasto também influenciado pela rotação “spin” do projétil. Quanto maior a rotação, menos o projétil tenderá a guinar “yaw” ou virar de lado ou capotar. Desse modo, por exemplo, ao adicionar uma quantidade de espiral das raia do projétil do rifle de 1 para 7 ocasionará uma maior rotação comparado ao do típico espiral de 1 para 12.

2.4.4 Balística terminal

Se relaciona a balística dos efeitos dos projéteis, também conhecida como balística de ferimento, estuda os efeitos causados pelos projéteis desde o momento de abandono da boca do cano da arma até atingir o alvo, incluindo também alguns fatores decorridos de possíveis ricochetes, impactos, perfurações e lesões internas ou externas nos corpos atingidos (MAIA, 2012).

De acordo com Courtney e Courtney (2012) existem três mecanismos físicos que contribuem para o potencial de um ferimento e a incapacidade de projéteis serem penetrantes, sendo eles: a cavidade permanente, a cavidade temporária e a onda de pressão balística irradiada para fora do projétil. Desde a força empregada entre o projétil e o tecido, todos os três mecanismos se originam devido a força de retardo empregada no tecido (PETERS, 1990).

- A cavidade permanente pode ser descrita como o esmagamento de tecido pela penetração do projétil, contudo é causada por um intenso campo de estresse nas áreas vizinhas de passagem do projétil. Essas ondas de estresse decaem rapidamente com a distância a níveis abaixo do tecido limiares de dano a uma curta distância do caminho da bala através do tecido.
- A cavidade temporária é causada pela força de retardo atuante no projétil, que acelera o tecido para frente e para fora da trajetória do projétil, e após devido a elasticidade dos tecidos tendem a voltar ao seu estado inicial. A cavidade temporária atua na capacidade de promover ferimentos, ao romper o limite elástico dos tecidos e aumentar o tamanho da cavidade de impacto.

- A Onda de pressão balística se propaga para fora do caminho da bala através do tecido e também pode contribuir para a promoção de ferimentos e incapacitação (COURTNEY e COURTNEY, 2007; SUNESON *et al.* 1990; SELMAN *et al.*, 2011).

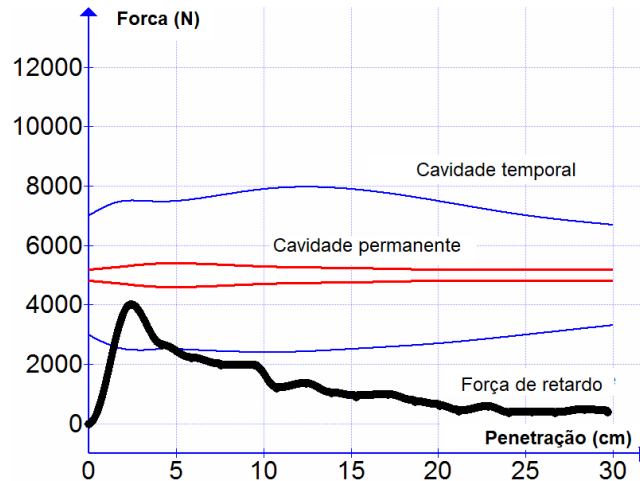


Figura 47 - Análise, balística terminal
Fonte: Courtney e Courtney (2012)

A Figura 47 demonstra através do uso da técnica de gelatina balística uma análise da força de retardo versus profundidade de penetração" para o calibre 9mm com 105 granis de peso do projétil e velocidade de impacto de 373.38 m/s. Sendo possível verificar que as escalas de comprimento vertical e horizontal são iguais e que o valor máximo de pico de força é 4.000 N, com uma penetração de aproximadamente 30 cm (COURTNEY; COURTNEY, 2012)).

2.5 O emprego do helicóptero no combate à criminalidade

O crescimento vertiginoso da criminalidade ocorrida no Brasil a partir do final do século XX associado com a necessidade de combater o crime em áreas de difícil acesso terrestre, tem justificado o emprego de helicópteros em atividades policiais. Estas atividades com a frequência que elas ocorrem expõem a aeronave e seus tripulantes a um elevado risco de serem abatidos em voo, o que torna necessária a utilização de um sistema aviônico de detecção de impacto de projéteis provenientes de arma de fogo na célula da aeronave.

Ao relacionar os índices de violência no Brasil e as políticas públicas ligadas à prática de autoproteção do cidadão de bem, observa-se uma tendência de crescimentos de ações criminosas, dentre as quais, os atentados contra a vida. Em 2004, época em que o Estatuto do Desarmamento entrou em vigor contra a vontade da maioria da população de acordo com o referendo sobre o comércio de armas de fogo e munições em 2005, o Brasil vivenciou um número surpreendente de 48.374 homicídios, de acordo com o Mapa da Violência 2006. Nesse

ano a população brasileira era de 180 milhões de habitantes segundo o IBGE, perfazendo um índice de 26,9 homicídios para cada 100 mil habitantes (WAISELFISZ, 2006)

A Figura 48, apresenta as 5 armas curtas mais utilizadas para ações criminosas em ocorrências policiais.

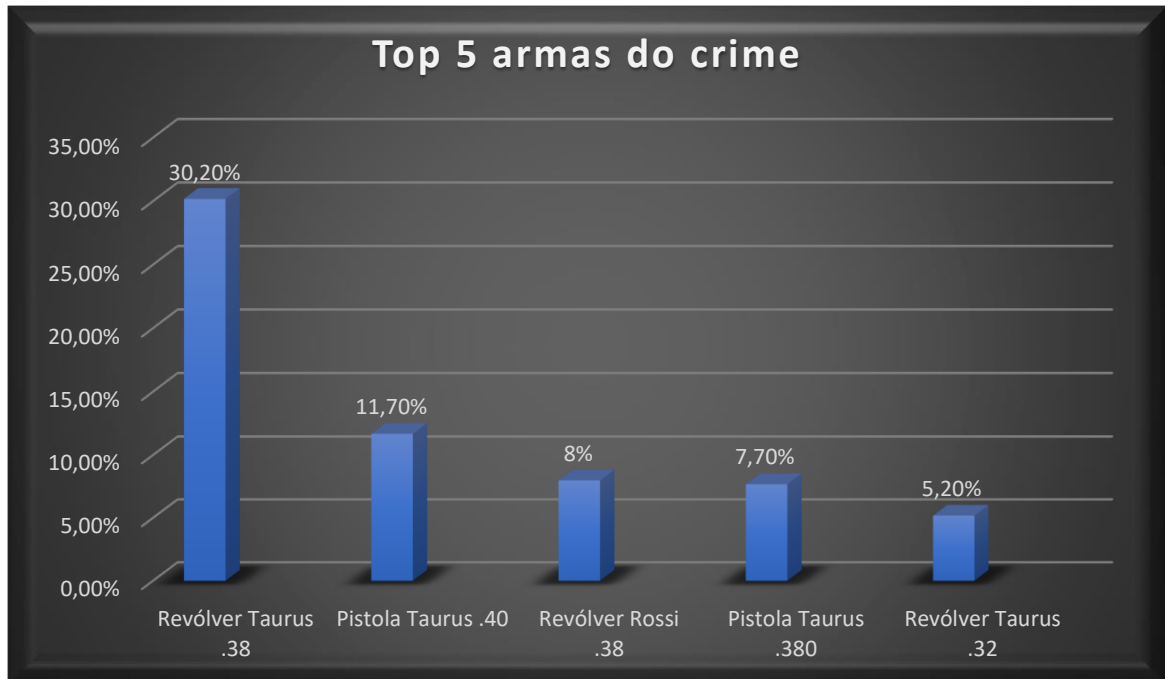


Figura 48 - Top 5 armas do crime
Fonte: DPAT (2015).

De acordo com os dados obtidos, nota-se uma nítida prevalência quanto ao uso do revólver sobre a pistola quanto as armas utilizadas pelo crime, e analisando os índices apresentados é notável que 43,4 % das armas comumente utilizadas no crime são revólveres, enquanto 19,4% são pistolas, e que dentre as 5 armas de fogo mais apreendidas, três são revólveres enquanto duas são pistolas. Nesse cenário torna-se importante saber que apesar de ambos os artefatos serem classificados como armas de porte, o revólver se caracteriza por ser uma arma de repetição, que possui um cilindro giratório localizado posteriormente ao cano, e que serve de carregador, o qual contém perfurações paralelas e equidistantes do seu eixo capazes de armazenar munições, servindo de câmara (DPAT, 2015).

A Figura 49 ilustra as partes de um revólver.



Figura 49 - Revólver
Fonte: Polícia Federal (2017).

Em contrapartida as pistolas, na maioria das vezes são semiautomáticas, contém uma estrutura em que a câmara institui parte da seção do corpo do cano e cujo carregador, quando afixado na mesma, acondiciona os cartuchos em série e os apresenta sequencialmente para o carregamento, após cada disparo. (Art. 3º, inciso LXVII do Decreto 3.665/00 – R 105). Na Figura 50 apresenta-se as partes de uma pistola.

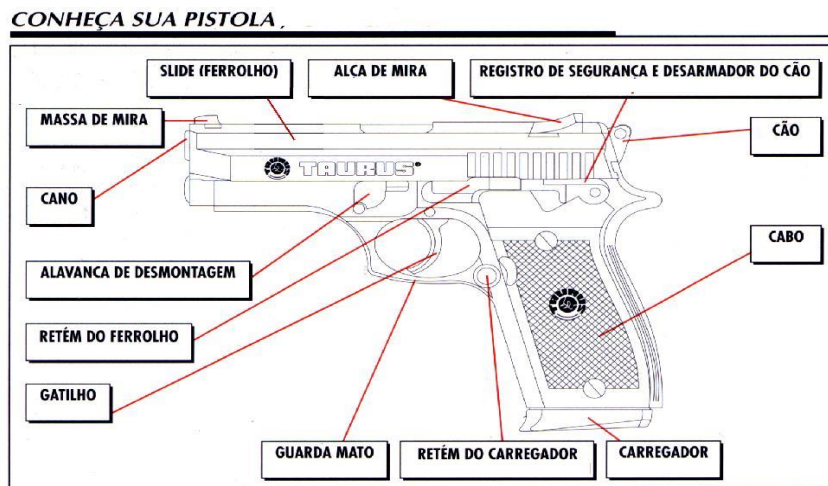


Figura 50 - Conheça sua pistola
Fonte: Polícia Federal (2017).

Assim ao analisar o cenário das principais armas apreendidas no Brasil junto a atuação dos helicópteros utilizados pelas operações policiais se faz necessário uma discussão quanto as principais características dos armamentos apreendidos e seu poder de alcance, o que acomete um estudo básico da balística envolvendo a velocidade de saída do projétil no cano da arma

durante o disparo, a trajetória empregada e a energia do projétil no cano da arma durante o disparo.

2.6 Choques Mecânicos (Colisões)

Choque mecânico também chamado de colisão, pode ser definido como sendo a interação momentânea entre dois corpos. Durante o intervalo de tempo em que ocorre a colisão, as forças entre os corpos alteram-se sensivelmente. As leis de conservação em Física auxiliam consideravelmente o estudo das colisões (ZÍLIO; BAGNATO, 2002).

Considerando a lei de trabalho-energia, uma força F agindo sobre um corpo de massa m ao longo de um pequeno deslocamento Δx realiza um trabalho conforme equação 41:

$$F\Delta x = \frac{1}{2}mv_2^2 - mv_1^2 = \frac{m}{2}(v_2 - v_1)(v_2 + v_1) \quad (41)$$

No caso de o deslocamento ser infinitesimal, $v_1 \approx v_2 = v$ e $v_2 - v_1 = \Delta v$ e assim tem-se a equação 42:

$$F\Delta x = mv\Delta v \quad (42)$$

Assim, dividindo por Δt e tomando o limite por $\Delta t \rightarrow 0$, de acordo com a equação 43.

$$Fv = mv \frac{dv}{dt} \quad (43)$$

Assim, obtemos a 2ª Lei de Newton para massa constante, conforme equação 44.

$$F = m \frac{dv}{dt} = \frac{dp}{dt} \quad (44)$$

Se a força age sobre o corpo durante um intervalo de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$, pode-se integrar a expressão acima e obter a equação 45:

$$\bar{I} = \int_{t_1}^{t_2} \bar{F} dt = \bar{p}_2 - \bar{p}_1 \quad (45)$$

Onde, uma vez já realizada uma generalização para o caso tridimensional. A grandeza I_r é o impulso causado pela força F_r sobre o corpo durante o intervalo de tempo Δt . Dizemos então que o impulso causado pela força F é igual à variação de momentum do corpo. Durante as colisões, as forças existentes em geral agem durante intervalos de tempo bem curtos e a representação gráfica para este tipo de força é mostrada na Fig.51. Do que foi discutido anteriormente, a variação da quantidade de movimento é exatamente a área sob a curva. Muitas vezes é interessante definir a força média que age sobre o corpo (ZÍLIO; BAGNATO, 2002), Equação 46:

$$\vec{F}_m = \vec{I}/\Delta t \quad (46)$$

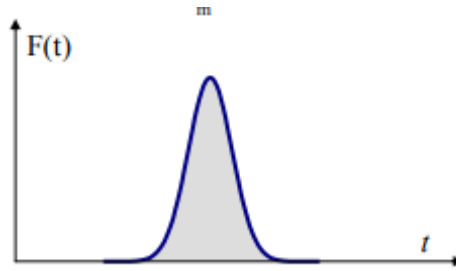


Figura 51 - Exemplo de variação da força com o tempo.
Fonte: Zílio e Zagnato (2002)

Um exemplo disso, é a força média exercida pelas balas disparadas por uma metralhadora contra um alvo. Se a metralhadora dispara R balas por segundo, a força real exercida sobre o alvo é algo do tipo mostrado na Fig. 52 (ZÍLIO; BAGNATO, 2002).

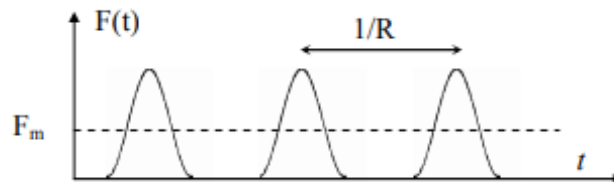


Figura 52 - Sequência de impactos produzida pelas balas de uma metralhadora.
Fonte: Zílio e Zagnato (2002)

Desta forma, durante o tempo $1/R$, um momentum mv é transferido ao alvo, ou seja (Equação 47):

$$F_m \cdot \frac{1}{R} = mv \quad (47)$$

$$F_m = Rmv \quad (48)$$

Para: $R \sim 4/s$, $m = 0,05 \text{ Kg}$ e $v = 100 \text{ m/s}$, temos $F_m = 20 \text{ N}$.

Considerando colisão e conservação de momento, pode-se considerar um sistema de partículas com ausência de forças externas ($\sum \vec{F}_i^{ext} = 0$). Dessa forma, existem apenas forças internas, ($\sum \vec{F}_i^{int} = 0$) em que os pares ação-reação se anulam mutualmente. Portanto, como a força total é nula, o impulso também o é e, conseqüentemente, o momento total do sistema é conservado, considerando o momento linear (\vec{p}) (ZÍLIO; BAGNATO, 2002), conforme Equação 49.

$$\sum_{i=1}^N \vec{p}_{1i} = \sum_{i=1}^N \vec{p}_{2i} \quad (49)$$

Por outro lado, a velocidade é constante, pois a força externa é nula. Com relação à energia cinética do sistema, pode-se separá-la em duas partes distintas conforme equação 50:

$$K = \frac{1}{2} MV_{CM}^2 + K_r \quad (50)$$

onde M é a massa total do sistema. O 1º termo, que permanece constante para qualquer tipo de colisão é a energia cinética do centro de massa. O 2º termo K_r corresponde à energia dos componentes do sistema com relação ao centro de massa.

2.6.1 Classificação dos Choques Mecânicos

De acordo com a variação de K_r definida no tópico 2.6, a colisão pode ser classificada como: colisão perfeitamente elástica - K_r não se altera; e colisão perfeitamente inelástica (plástica) - K_r é completamente dissipada. A maioria das colisões está entre estes dois extremos (ZÍLIO; BAGNATO, 2002):

a) Colisão perfeitamente elástica

Neste tipo de colisão, tanto o momentum como a energia cinética são conservados. Considerando um sistema de dois corpos antes e depois da colisão como mostra a Fig. 53.

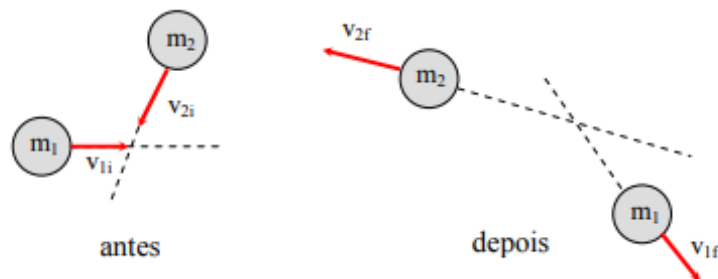


Figura 53 - Colisão perfeitamente elástica.
Fonte: Zílio e Zagnato (2002)

Pelas leis de conservação de momento e energia, as equações para o problema são Eq. 51 e 52:

$$\frac{1}{2}m_1v_{1i}^2 + \frac{1}{2}m_2v_{2i}^2 = \frac{1}{2}m_1v_{1f}^2 + \frac{1}{2}m_2v_{2f}^2 \quad (51)$$

$$m_1\vec{v}_{1i} + m_2\vec{v}_{2i} = m_1\vec{v}_{1f} + m_2\vec{v}_{2f} \quad (52)$$

Que podem ser resolvidas fornecendo os valores de \vec{v}_{1f} e \vec{v}_{2f} . Como exemplo, Zílio e Zagnato (2002) consideraram o caso da colisão de dois corpos em uma dimensão, tendo um deles velocidade inicial nula, conforme indicado na Fig.54.

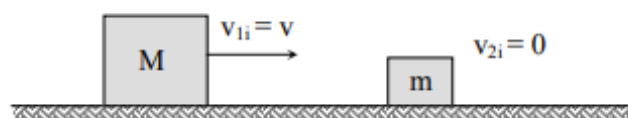


Figura 54 - Colisão unidimensional elástica com corpo inicialmente em repouso.
Fonte: Zílio e Zagnato (2002)

Para encontrar \vec{v}_{1f} e \vec{v}_{2f} após a colisão. Usando as equações 51 e 52 vistas anteriormente, utiliza-se a equação 53.

$$Mv = Mv_{1f} + mv_{2f} \quad (53)$$

Eliminando v_{2f} da equação de conservação de energia e substituindo na de conservação de momento, obtém-se uma equação 54, de 2º grau cuja solução é:

$$V_{1f} = \frac{\frac{M}{m}v \pm v}{1 + \frac{M}{m}} \quad V_{2f} = \frac{M}{m} \frac{v \mp v}{1 + \frac{M}{m}} \quad (54)$$

O sinal + em v_{1f} e - em v_{2f} fornece $v_{1f} = v$ e $v_{2f} = 0$ que é a condição inicial do problema, sempre contida na solução pois satisfaz conservação de momento e energia. A solução que interessa é aquela que ocorre após a colisão, que é dada pelas equações 55 e 56:

$$v_{1f} = \frac{\left(\frac{M}{m}-1\right)}{1+\frac{M}{m}}v \quad (55)$$

$$v_{2f} = \frac{2\frac{M}{m}}{1+\frac{M}{m}}v \quad (56)$$

Observa-se que, “a velocidade relativa de um corpo em relação ao outro é apenas invertida na colisão”, como mostra a equação 57.

$$V_{2f} - V_{1f} = -(v_{2i} - v_{1i}) \quad (57)$$

Este é um resultado sempre válido em colisões elásticas unidimensionais.

b) Colisões perfeitamente inelásticas

No caso de colisões perfeitamente inelásticas a energia cinética não é conservada embora o momentum o seja. Como exemplo, vamos considerar o tipo de colisão onde os corpos ficam unidos após o choque, como mostrado na Fig. 55.



Figura 55 - Colisões perfeitamente inelásticas
Fonte: Zílio e Zagnato (2002)

Usando a conservação de momento, equação 58.

$$M_1v_1 + M_2v_{2i} = (M_1 + M_2)v_f \rightarrow v_f = \frac{M_1v_{1i} + M_2v_{2i}}{M_1 + M_2} \quad (58)$$

que é justamente a velocidade do centro de massa do sistema. A seguir pode-se calcular a quantidade de energia dissipada na colisão. Calculando as energias antes e depois da colisão tem-se as equações do 59 ao 61:

$$K_i = \frac{1}{2}M_1v_{1i}^2 + \frac{1}{2}M_2v_{2i}^2 \quad (59)$$

$$K_f = \frac{1}{2} \frac{(M_1 v_{1i} + M_2 v_{2i})^2}{M_1 + M_2} \quad (60)$$

$$\Delta K = K_f - K_i = -\frac{1}{2} \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} (v_{1i} - v_{2i})^2 \quad (61)$$

que é sempre negativo, mostrando haver perda de energia. Para o caso em que $v_{2i} = 0$ tem-se a equação 62.

$$\frac{\Delta K}{K_i} = -\frac{M_2}{M_1 + M_2} \quad (62)$$

que é um resultado importante para estimar a perda de energia em experimentos com pêndulo balístico.

2.6.2 Choques mecânicos relacionados as atividades aéreas

Bueno (2017) destaca as principais causas dos desastres de aeronaves, que foram analisados em sua pesquisa, como sendo: falha de motor em voo (33,3%), colisão em voo com obstáculo (30,5%), perda de controle em voo (16,7%), perda de controle em solo (5,5%), falha de comando em voo (2,8%), fenômeno meteorológico (2,8%), colisão no solo com obstáculo (2,8%), falha de sistema (2,8%) e desorientação espacial (2,8%).

A importância do fator humano na aviação embora já fosse um conceito conhecido pela indústria ficou patente com o acidente aéreo ocorrido em Tenerife em 1977 em que a colisão de duas aeronaves no solo causou a morte de 583 pessoas e sua análise resultou de uma série de deficiências na adequação de vários aspectos ligados ao fator humano (OACI, 1989).

Diversos trabalhos destacam a colisão entre aeronaves e a fauna, em especial, a colisão de aeronaves com aves que têm se tornado cada vez mais frequentes. Esse aumento no número de ocorrências faz com que as companhias aéreas sofram grandes perdas econômicas todos os anos, devido principalmente aos gastos com reparos e atrasos de voos. Além disso, as colisões podem acabar gerando a morte de passageiros e tripulantes. Isto porque, no caso da colisão com uma aeronave, um único pássaro tem o potencial de causar danos severos (MENDONÇA, 2011).

Além disso, é comum, principalmente na área agrícola a colisão com fios elétricos, devido à altura em que é realizado, o voo agrícola fica exposto a um maior risco de colisão com obstáculos. Redes (fios) de alta e baixa tensão, árvores, cercas e placas figuram entre os objetos mais frequentemente atingidos por aeronaves agrícolas em voo.

Conforme estatística do Robinson *Safety Program* da empresa Robinson Helicopter Company, 30% dos acidentes com helicópteros ocorrem devido à colisão com fios. A própria instrução “Treinamento para Equipe Heliagrícola”, da empresa *Climb Aircraft Division Ltda.*

(área de negócios da Quimigel voltada à prestação de serviços especializados de asas rotativas), preconizava, como medida preventiva, em seu tópico “Colisão contra Fios (*Wire Strike*)”, para não curvar a baixa altura e manter o eixo de decolagem, quando na condição de aplicação heliagrícola¹³.

Já no que se refere a colisão por disparo de arma de fogo destacam-se alguns incidentes envolvendo patrulhamento aéreo, no caso dos incidentes ocorridos no Rio de Janeiro em 2004, 2007 e 2009, citados no tópico 2.1.4 deste trabalho, a maior parte dos ferimentos foi infligida por projéteis de alta velocidade, procedentes de vários disparos contra as aeronaves, direcionados para as cabines, com clara intenção de alvejar a tripulação (MACHADO; COTA, 2012).

2.6.3 Segurança de voo relacionada aos choques mecânicos na aviação

Partindo da premissa que “Os Regulamentos da Aviação são escritos com sangue” pode-se destacar o acidente ocorrido em 31 de agosto de 1986, o voo 498, uma aeronave DC 9 colidiu com uma Piper PA 28 no espaço aéreo da Califórnia. 58 passageiros e 6 membros da tripulação da DC 9 morreram, além do piloto e 2 passageiros da aeronave Piper. Além disso, 15 pessoas que estavam no solo foram mortas em virtude deste acidente (SOMERS, 2017).

O Comitê de Segurança de Transporte Nacional determinou que “a provável causa do acidente foi a limitação do sistema de controle de tráfego em oferecer proteção contra colisões, tanto através de procedimentos de controle de tráfego aéreo quanto em redundância automatizada. Os fatores que contribuíram para o acidente foram (SOMERS, 2017).:

1. a entrada não autorizada e negligente da aeronave PA-28 na área de controle do terminal de Los Angeles;
2. as limitações do princípio “ver e evitar” em assegurar a separação do tráfego em “condições de conflito”.

Posteriormente, a FAA – Federal Aviation Administration exigiu que as aeronaves de pequeno porte que entrarem nas áreas de controle utilizem transponders – dispositivos eletrônicos que transmitem a posição e a altitude aos controladores. Adicionalmente, as companhias aéreas foram obrigadas a instalar sistemas de prevenção à colisão TCAS II que detectam possíveis colisões com outras aeronaves equipadas com transponders e orienta os

¹³ Disponível em : http://sistema.cenipa.aer.mil.br/cenipa/paginas/relatorios/rf/pt/PR_JRL_29_11_2016-ACID..pdf. Acesso em 06 de dez. 2019.

pilotos a subir ou descer em resposta. Desde então, nenhum avião de pequeno porte colidiu com uma aeronave de companhia aérea nos Estados Unidos (SOMERS, 2017).

O regulamento adequado colocado em vigor pela Administração de Aviação Federal referente ao sistema de prevenção à colisão TCAS II pode ser encontrado no Regulamento FAA, Artigo 14, Capítulo 1, Subseção G, Parte 121, subparte K, §121.356 Sistema de Prevenção à Colisão (SOMERS, 2017).

Outro risco que preocupa a aviação é o Risco Aviário é definido na MCA 3-3/2012 como: “é a representação estatística da possibilidade de colisão entre uma aeronave e uma ave, quantificada pela resultante da multiplicação: probabilidade de colisão x exposição ao perigo x gravidade resultante da colisão” (BRASIL, 2012, p. 108).

A finalidade do Risco Aviário é organizar, planejar e executar diversas atividades que facilitem a abordagem do problema, possibilitando que as Bases Aéreas Militares tenham esse perigo mitigado (BEZERRA; SILVA, 2018).

Inicialmente o Comando da Aeronáutica só realizava essa medição e adoção de medidas preventivas nas Bases Aéreas exclusivas da Força Aérea Brasileira (FAB). Com o passar do tempo e o aumento de acidentes ou incidentes com aves em todo território nacional, o CENIPA iniciou uma campanha em todos os aeroportos brasileiros, militares e civis, pertencentes a FAB ou não. Existe dentro do site do CENIPA – Centro de Prevenção e Investigação de Acidentes Aeronáuticos¹⁴ um formulário que qualquer tripulante pode e deverá preencher, caso tenha qualquer tipo de colisão com aves (BEZERRA; SILVA, 2018).

Existem vários tipos de ferramentas empregadas na Prevenção de Acidentes Aeronáuticos, entretanto restringiu-se apenas as informações básicas sobre esse assunto, sobre a atividade de prevenção executada pelos diversos Elos SIPAER militares devido ao foco desse trabalho ser relacionado diretamente à estudo das vibrações mecânicas e os tipos de balísticas existentes (BEZERRA; SILVA, 2018).

De um modo geral, para evitar colisões na aeronáutica, existe o Sistema de Gestão de Segurança, o conceito de Segurança é definido pelo ICAO – International Civil Aviation Organization, em seu Manual de Gestão de Segurança da seguinte forma: “No contexto da aviação, segurança é o estado em que a possibilidade de lesar pessoas ou danificar bens seja reduzido e, mantido em ou abaixo de um nível aceitável através de um processo contínuo de identificação de perigos e gestão de risco à segurança” (ICAO, 2015).

¹⁴ Disponível em: <http://www2.fab.mil.br/cenipa/> Acesso em 20 de out. 2019.

Um Sistema de Gestão de Segurança Regulamentar Aprovado (SMS) é obrigatório aos prestadores de serviços de aviação tradicional e deve estar em vigor antes de dar início às operações comerciais. O SMS tem de conter e tratar os quatro componentes a seguir (SOMERS, 2017):

- Objetivos e Política de Segurança;
- Gestão de Risco de Segurança;
- Garantia de Segurança;

Esses quatro itens englobam doze elementos que devem ser identificados, documentados e implementados. O SMS exige que os processos estejam claros e sejam executáveis. Devem estar demonstrados e conter:

- Um processo para identificar ameaças reais e potenciais à segurança, e avaliar os riscos relacionados;
- Um processo para desenvolver e implementar ações corretivas necessárias para manter um nível de segurança aceitável;
- Proporcionar o monitoramento contínuo e as avaliações regulares da adequação e eficácia das atividades de gestão de segurança.

Ao analisar o risco de colisão aérea entre aeronaves não tripuladas e aeronaves tradicionais tripuladas, fica claro que os operadores de aeronaves tripuladas possuem um nível de proteção de segurança no SMS para mitigar o risco. Em contrapartida, as recém apresentadas aeronaves não tripuladas e seus operadores não tem; e nem poderiam, se analisarmos o estágio de desenvolvimento embrionário em que estão, se comparadas às aeronaves tripuladas (SOMERS, 2017).

Ainda que tomadas medidas de segurança, falhas humanas como distração podem ocorrer e no caso dos pilotos de RPAS – Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas ou helicópteros, distrações podem ser fatais, já que a margem em termos de tempo de reação a qualquer emergência normalmente é medida em segundos. Para a mitigação, considerar um regime de cabine estéril para determinados estágios do voo pode ser um início; especialmente durante a decolagem, pouso, ou durante a inspeção de linhas de alta voltagem por exemplo (SOMERS, 2017).

Em termos tecnológicos, destacam-se os estudos relacionados a delimitação geográfica e detecção por assinatura sonora. O primeiro trata-se de GPS (Sistema Global de Posicionamento) e RFID (Identificação por Frequência de Rádio) em que é realizada uma delimitação virtual, ou seja, os voos fora dos limites laterais e verticais pré-definidos pelo programa ficarão restritos. Se os órgãos reguladores e fabricantes chegarem a um acordo sobre

os termos e limites, certamente, seria alcançado um Nível de Proteção de Segurança em termos de colisões aéreas, fazendo com que os pilotos de aeronaves tripuladas durmam melhor à noite (SOMERS, 2017).

Já a segunda tecnologia, trata-se de microfones extremamente poderosos dos sistemas que podem captar sons a 150m de distância em qualquer direção e compará-los com um banco de dados com sons de drone. O sistema é compatível com o sistema da câmera de segurança total *track* da empresa que é capaz de detectar e seguir automaticamente intrusos em uma determinada área de cobertura. Este tipo de tecnologia poderia elevar o nível de proteção de segurança em busca por opções para eliminar colisões aéreas (SOMERS, 2017).

3 ESTADO DA ARTE

Os acidentes e incidentes aéreos preocupam e assustam a sociedade e, por isso, é crescente a busca de tecnologias capazes de aumentar a segurança do voo, seja ele civil ou militar. Com isso, é crescente o número de pesquisas nesse campo de estudo.

Em estudo realizado por Lemes, Tolentino e Bechepeche (2017), foram analisados erros ocorridos na manutenção aeronáutica, ligados aos fatores humanos, que podem influenciar na segurança de voo. O estudo realizado pelos autores objetivou descrever os fatores humanos que podem impactar a segurança de voo, confrontar os erros humanos com os fatores influenciadores, exemplificar com estudos de casos tirados de relatórios de acidentes aéreos e demonstrar como é feito o treinamento para prevenir erros ligados à ação humana.

Pegado (2010) abordou o monitoramento de vibrações em helicópteros entendidos como convencionais no campo da manutenção preditiva objetivando prevenir acidentes que podem ocorrer durante a operação da aeronave. Através do monitoramento das vibrações é possível acompanhar o desgaste que está ocorrendo em peças e componentes da aeronave e atuar antes de atingir o momento da pane.

Nessa mesma linha, Santos *et al.* (2019) desenvolveram um estudo com o intuito de realizar uma manutenção de balanceamento no helicóptero “Fennec” Airbus AS 550 A2 utilizado pela Aviação do Exército para o emprego de reconhecimento e ataque. Os autores utilizaram o método de análise de vetores a partir do nível de vibração indicado pelo aparelho Aces Model 2020 Probalancer Analyser com os acelerômetros da Aces Systems model 991D-1. Como conclusão destacaram que a análise de vibrações é uma ferramenta poderosa no auxílio à prevenção de falhas, diminuindo o custo de manutenção, prolongando a vida útil de um helicóptero e preservando o bem maior que é o fator humano.

Dong e Kim (2018) em seu estudo, ressaltaram que embora o uso da tecnologia (SHM) usando sensores tenham aumentado drasticamente, sua capacidade deve-se ser avaliada na perspectiva da manutenção. Os autores objetivaram investigar a possibilidade de usar sensores para inspecionar toda a fuselagem durante a pesquisa. Após revisarem vários sensores para sua faixa de detecção, tamanho de dano detectável e peso instalado, o estudo revelou que o sensor de piezoelétrico ativo é o sensor mais promissor para SHM de aeronaves. O estudo realizado na inspeção da fuselagem do Boeing-737NG verificou que a utilização de sensores pode reduzir o tempo de inatividade da manutenção e, portanto, o custo de manutenção. No entanto, mesmo com uma estimativa muito conservadora, o custo vitalício aumentou significativamente devido ao peso dos sistemas de sensores.

Ouadine, Mjahed, Ayadb e Karib (2019) implementaram um sistema de diagnóstico para falhas de vibração que ocorrem na caixa de engrenagens do helicóptero utilizando algoritmos. Os resultados do estudo foram validados efetivamente com dados de teste. Segundo os autores o modelo de diagnóstico pode, portanto, ser implementado em computadores de helicóptero para detectar falhas em voo ou no solo.

Já Machado e Cota (2012) destacaram a necessidade de organização e composição de ações táticas que preparem para um possível confronto armado envolvendo aeronave policial. A evidente evolução das táticas e técnicas policiais é alavancada pelo rigoroso aumento da ousadia e aparato marginal, fazendo-se necessária a utilização aerotransportada como plataforma de tiro, deixando de ser aplicada unicamente como plataforma de observação aérea. Essa necessidade, por sua vez, está amparada pela missão constitucional da Polícia Militar, aliada também ao direito de defesa da própria vida e de outros. O trabalho demonstrou ainda, com exemplos históricos de confrontos armados, a necessidade de treinar e cada vez mais aperfeiçoar técnicas de ação repressiva, sem abandonar a doutrina de observação e o foco na prevenção

Nessa mesma linha, Pereira e Machado (2017) realizaram estudo em que critica a não padronização da frota aérea policial citando como exemplo o estado de São Paulo, o maior operador policial nacional, com 22 helicópteros, sendo 20 HB350/AS50 Esquilos, um EUROCOPTER EC135 e um Schweizer CB 300.

Os autores destacaram que as operações da aviação de segurança pública é usualmente hostil, com vários obstáculos artificiais e naturais e podendo atingir condições operacionais extremas, por exemplo, com carga externa sem seguir o estabelecido legalmente pelo Regulamento Brasileiro de Aviação Civil (RBAC), com pousos em terrenos inadequados e não preparados, e ainda submetendo as tripulações à pressão psicológica. O intuito da abordagem do tema foi coletar e analisar as informações referentes às técnicas operacionais e o uso de itens tecnológicos para servirem como referenciais para atualizações tecnológicas, visando ao aumento qualitativo da segurança de voo (PEREIRA; MACHADO, 2017).

No âmbito da discussão sobre impactos por arma de fogo os autores Georg, Kelner e Silvino Júnior (2011) defenderam a necessidade da atualização dos conhecimentos dos peritos criminais devido a desinformação, o aumento da criminalidade e a utilização de armas de fogo na prática de crimes. No artigo foram apresentados aspectos técnicos sobre armas de fogo, sistema de calibre e nomenclatura específica, com o objetivo de estimular o desenvolvimento de novos trabalhos.

4 METODOLOGIA

A Revisão Bibliográfica que antecedeu a metodologia se mostrou primordial para a definição dos passos a serem tomados nesse trabalho. Devido à complexidade de análise dos fenômenos inerentes ao impacto de projéteis em aeronaves de asas rotativas, os estudos disponíveis na literatura foram divididos em duas vertentes. A primeira foi referente a armamento e balística, que envolve o intervalo de tempo desde o disparo até os instantes que precedem o impacto, e a segunda foi relativa às análises vibracionais produzidas pelo impacto do projétil na fuselagem da aeronave.

A presente Metodologia tem por objetivo permitir o entendimento geral das duas áreas que cerceiam o trabalho de forma conjunta. Para tanto, optou-se por dividi-la em seis etapas, que estão descritas na sequência do texto.

Na seção 4.1 são descritos os procedimentos sobre as obras acerca do assunto e, principalmente, os estudos dos Manuais de Manutenção disponibilizados pelos fabricantes. É importante destacar que a obediência aos métodos disponíveis nos manuais constitui um primeiro passo fundamental para esta Metodologia, que busca repetir os protocolos operacionais regulamentados por normas de manutenção de aeronaves.

Na seção 4.2 foram detalhadas as inspeções prévias de GMP e célula na aeronave estudada, de forma a sanar possíveis desconformidades estruturais previamente existentes que poderiam promover interferências vibracionais indesejáveis.

Na seção 4.3 foram detalhados os parâmetros de análise de vibração do motor, acompanhados das inspeções específicas do rotor principal, do eixo de transmissão do GMP à caixa de transmissão traseira (CTT) e do rotor de cauda. Por fim, para a verificação geral da aeronave, foi feito um teste de motor no solo seguido da Checagem de Potência do Motor - *Engine Power Check (PWC)*.

Na seção 4.4 foram especificadas as técnicas pretendidas de identificação, processamento e análises de choques mecânicos de alta energia na aeronave, suas simulações em laboratório e os procedimentos de captação da identidade vibracional da aeronave AS350 B2.

Na seção 4.5, foram detalhadas as simulações de choques de alta energia provenientes de arma de fogo na fuselagem da aeronave.

Finalmente, não menos importante, foram apresentados na seção 4.6 os erros de incertezas de medições.

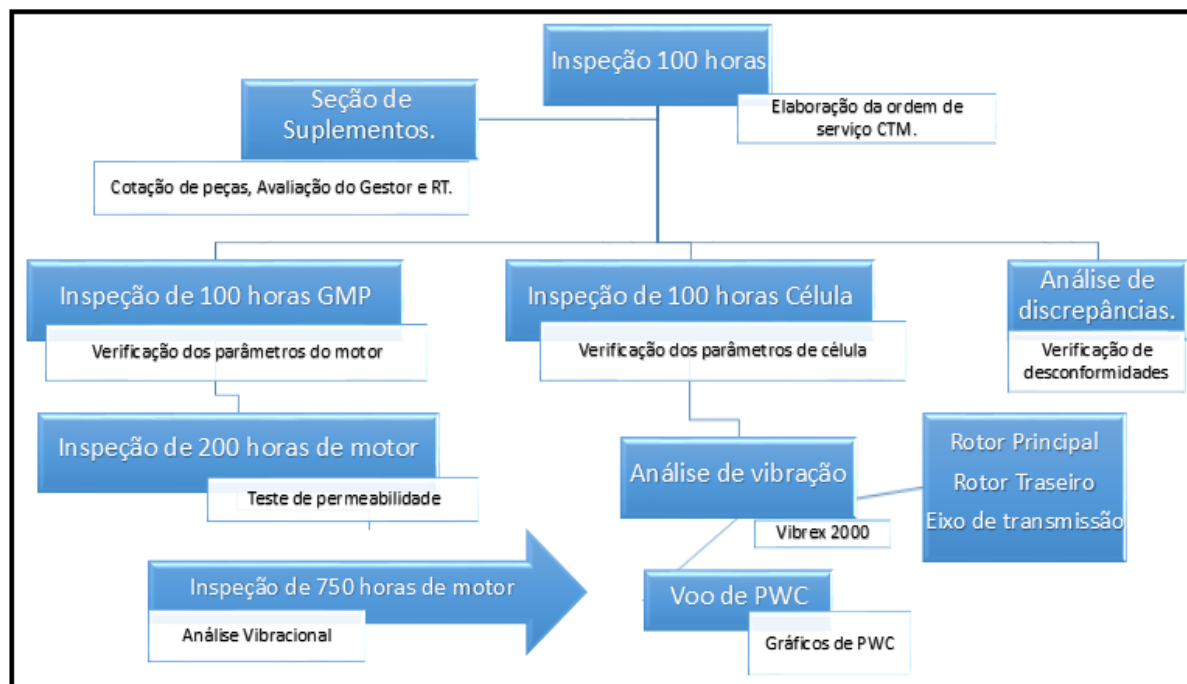


Figura 56 - Cronograma da metodologia utilizada.

A figura 56 demonstra a cronologia das inspeções feitas na aeronave, com intuito de avaliar sua integridade estrutural e do grupo-moto propulsor, antes de analisar e identificar a sua linha base vibracional em diversas modalidades de voo.

4.1 Revisão dos Manuais de Manutenção disponibilizados pelos fabricantes.

De acordo com Silva e Silva (2017), com a modernização dos sistemas mecânicos das aeronaves durante a segunda guerra mundial foram necessários um investimento na capacitação dos mecânicos brasileiros de aeronaves, haja vista a precariedade de suas qualificações técnicas que afetam diretamente a qualidade do serviço das empresas envolvidas.

A incorporação de diversas inovações tecnológicas que muitas vezes são desconhecidas pelos seus operadores, ora devido à falta de instrução, ora devido à restrição de informações técnicas relacionadas aos segredos industriais dos empreendimentos inovadores de cada fabricante que além de deter o conhecimento da tecnologia aplicada resguardam suas patentes comerciais. Com isso os profissionais de manutenção de aeronaves passaram a seguir as orientações técnicas oferecidas pelos manuais de manutenção que fora disponibilizada pelos fabricantes de cada aeronave, como forma de aperfeiçoamento, mesmo que de maneira restrita a tecnologia empregada (SILVA; SILVA, 2017).

Diante desse princípio, primeiramente foi feito um levantamento bibliográfico acerca do tema proposto, envolvendo as áreas de criminalidade nos centros urbanos brasileiros,

emprego dos helicópteros pelas forças públicas, vibrações mecânicas e emprego de balística em conjunto de técnicas de análise vibracional em aeronaves de asas rotativas. Logo após foi promovido uma associação do material encontrado com os recentes manuais de manutenção de motor e célula da aeronave AS350B2, disponibilizados pelos fabricantes, e com as normas de regulamentação da aviação brasileira, com intuito de estabelecer os parâmetros da pesquisa e sua legalidade.

De acordo com o Regulamento Brasileiro Da Aviação Civil (RBAC) nº 43 EMENDA nº 01, aprovada em Resolução nº 265 de 5 de março de 2013, que rege sobre a manutenção, manutenção preventiva, reconstrução e alteração, toda pessoa que realiza a manutenção, manutenção preventiva e alteração em um artigo¹⁵ aeronáutico é obrigada a adotar métodos, técnicas e práticas definidas na última revisão do manual de manutenção do fabricante do equipamento, ou nas instruções para aeronavegabilidade continuada desenvolvidas pelo fabricante ou outros métodos, técnicas e práticas aceitáveis pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), exceto nos casos previstos na seção 43.16. que rege sobre as limitações de aeronavegabilidade de cada aeronave.

Dessa forma os manuais de manutenção utilizados na aviação foram desenvolvidos conforme a especificação da ATA-100 “Associação dos Transportes Aéreos da América”, que incorpora todos os dados técnicos dos fabricantes após a data de 01 de junho de 1956, sendo atualizado em 15 de março de 1968. Estas referências foram desenvolvidas para minimizar os custos e as dificuldades das companhias aéreas, e para promover um melhor entendimento entre o fabricante com os operadores, seu pessoal e suas obrigações. Estas especificações instituem um padrão de acompanhamento empregado pelos fabricantes de aeronaves, motores, componentes e acessórios como uma ferramenta adicional de apoio aos seus produtos.

A importância da consulta do manual de manutenção ainda pode ser justificada de acordo com a Norma regulatória-NR 12- do CONAREM - Conselho Nacional de Retificadores de Motor - as máquinas e equipamentos devem ser submetidos à manutenção preventiva e corretiva, na forma e periodicidade determinada pelo fabricante, conforme as normas técnicas oficiais nacionais vigentes e, na falta destas, as normas técnicas internacionais (BRASIL, 2011).

Já de acordo com a RBAC 145.109 que regi sobre os requisitos de equipamentos, ferramentas, materiais e dados técnicos nas organizações de manutenção de produto

¹⁵ *Artigo* significa uma aeronave, célula, motor, hélice, acessório, componente ou suas partes. Para efeito deste regulamento, artigo tem o mesmo significado de produto aeronáutico. RBAC- 43.1.

aeronáutico brasileiro, é recomendado que os documentos e dados técnicos relativos as manutenções de aeronaves devem ser mantidos atualizados e acessíveis, durante a execução do processo. Sendo eles:

- (1) diretrizes de aeronavegabilidade;
- (2) instruções para aeronavegabilidade continuada;
- (3) manuais de manutenção;
- (4) manuais de revisão geral;
- (5) manuais de práticas padronizadas;
- (6) boletins de serviço;
- (7) recomendações do fabricante ou outros dados técnicos aprovados ou aceitáveis pela ANAC; e
- (8) legislação aeronáutica brasileira aplicável.

Dessa forma para realização das inspeções da aeronave HS350B2, foco desse trabalho, foram utilizados os manuais atualizados e disponibilizados pela Airbus Helicopters: Master Servicing Manual (MSM), AS350 B2 - CAP 5, revisão 17, de 19/01/2019 (TURBOMECA, 2019a), Airworthiness Limitations Section (ALS) AS350 B2 - Cap 4, revisão 11 de 19/01/2019 (TURBOMECA, 2019b), Aircraft Maintenance Manual (AMM), revisão 15 de 19/01/2019 (TURBOMECA, 2019c).

Além do manual de GMP da turbomeca: Maintenance Manual Arriel 1D1, n° X292G24522, revisão 24 de 28/02/2019 (TURBOMECA, 2019d), do manual do equipamento VIBREX™ 2000.Plus (Helicopter and Fixed Wing Versions) Digital Dynamic Balancer/Analyzer Systems 13841, revisão "A" de 07/05/2015 (VIBRATECH INTERNACIONAL, 2015)- Honeywell International, IncAEROSPACE – Torrance, CA USA e das diretrizes de aeronavegabilidades e dos itens existentes no Apêndice do RBAC 43 (Em anexo) que objetiva e detalha os itens a serem incluídos nas inspeções anuais e inspeções de 100 horas (Conforme Aplicável Para Aeronaves Específicas) expedidas pela ANAC.

Essas informações em conjunto com o estudo do MAPA de componentes de célula e motor da aeronave proporcionam a confecção da ordem de serviço contendo as tarefas, a serem realizadas, seguindo as indicações estabelecidas pelos fabricantes e pela agência reguladora brasileira.

É importante descrever que o conceito de tarefa relacionada a ordem de serviço de acordo com a RBAC 43.1 pode abranger uma gama de afazeres pelo mecânico de aeronaves, sempre baseados nas referências dos manuais dos fabricantes, como:

- pesquisa de panes;

- correção de discrepâncias;
 - troca de componentes, o que pode incluir troca de motores e hélices, e teste de rampa;
 - manutenção programada e/ou *checks*, incluindo inspeções visuais que irão detectar:
- condições insatisfatórias/discrepâncias óbvias, desde que não seja necessária uma inspeção detalhada. Pode incluir itens da estrutura interna, sistemas e grupo motopropulsor que são visíveis através de painéis de acesso rápido; e
 - pequenos reparos ou alterações que não requeiram extensas desmontagens e possam ser cumpridas por práticas simples.

E que somente pessoas em conformidade com as exigências da RBAC 43.1 e 43.17 (em anexo) podem executar manutenção e promover alteração ou reconstrução em um artigo ao qual se aplica este regulamento.

A prática da manutenção brasileira, está concentrada na manutenção corretiva, consertar o que está quebrado, devido a carência de recursos necessários à implantação de plano de atividades particularizado de cada projeto. Careceria analisar determinadas questões fundamentais para o sucesso do programa de manutenção, quais sejam: período de vida dos equipamentos, tipos e frequências de uso, horas de funcionamento de máquinas e equipamentos, operacionalidade e perdas de desempenho. (GOMIDE; PUJADAS; NETO, 2006).

Contudo, as práticas de manutenção da aviação brasileira seguem rígidas regras de controle e qualidade, determinadas pela ANAC que recomenda a utilização dos manuais de manutenção cedidos pelos respectivos fabricantes de equipamentos aeronáuticos, que no caso da aeronave HS350B2, determina a utilização de mecanismos de análise vibracional na manutenção preditiva, preventiva e corretiva, conforme ordem de serviço, conforme APÊNDICE A.

A existência de um mecanismo embarcado de análise vibracional contínua na aeronave HS350B2, seria de grande valia para as equipes áreas que atuam em áreas de riscos. Conjugado a técnica de monitoramento estrutural, possibilitaria a identificação e o acompanhamento de possíveis danos estruturais, o objetivo é evitar o colapso, em voo, dos sistemas mecânicos e aerodinâmicos; contribuindo assim com a segurança de voo em ambientes hostis.

4.2 Inspeções prévias de GMP e célula na aeronave

De acordo com a ANAC as inspeções são exames, visuais e manuais, para definir a

condição de um componente ou de uma aeronave. Assim o processo é capaz de se estender de um percurso básico ao redor de uma aeronave até uma vistoria minuciosa, abrangendo uma desmontagem completa, e o emprego de aparatos complexos à inspeção.

Ainda de acordo com a ANAC (2014) um sistema de inspeção deve ser desenvolvido objetivando manter a aeronave na melhor condição possível, empregando de forma adequada um programa de manutenção sério centrado em inspeções gerais e periódicas. Manutenções baseadas em inspeções irregulares ou ocasionais resulta seguramente na deterioração gradual e integral de uma aeronave.

Desta forma, visando estabelecer um padrão de qualidade de pesquisa e amenizar os efeitos adversos capazes de interferir na análise vibracional da aeronave de origem estrutural e/ou mecânica, empregou-se a inspeção de até 100 horas de GMP e célula na aeronave AS350B2 e uma inspeção de 200 horas do motor Ariel 1D1, devidamente fixado na aeronave, seguida em um segundo momento da pesquisa das análises de vibração do rotor principal, do eixo de transmissão da caixa de transmissão traseira (CTT) até o GMP e subsequentemente da análise vibracional do rotor de causa.

Ao final do procedimento, foi realizado um teste de motor no solo e voo *de* Checagem da potência do motor - *Engine Power Check* (PWC). A aeronave utilizada para teste foi um helicóptero modelo AS350 B2 (Figura 56), fabricada em 1997, contendo, 7.589,3 horas de voo de célula, 19347 pousos, equipada com um motor Arriel 1D1 com 7.375 horas de operação, 12.097,15 ciclos de NG e 14.329,0 ciclos de rotação da turbina de força (NTL). Os procedimentos foram realizados conforme ordem de serviço elaborada de acordo o controle de mapa de componentes e das horas de voo da máquina.



Figura 57 - Helicóptero AS350B2, em inspeção de 100 horas de motor e célula.

As inspeções de 100 horas de célula (Figura 57), foram realizadas de acordo com a

Airworthiness Limitations Section (ALS) AS350 B2- Cap 4, revisão 011, de 16/04/2018, Master Servicing Manual (MSM); AS 350 B2 - CAP 5, revisão 17, de 19/01/2019; e no grupo moto propulsor de acordo com Maintenance Manual Arriel 1D1, revisão 24 de 28/02/2019, disponibilizados pelos fabricantes Airbus Helicopters e Turbomeca, respectivamente, não sendo encontrados nenhuma inconformidade com a normalidade dos equipamentos (TURBOMECA, 2019d), e a Figura 58 mostra o helicóptero AS352B em inspeção de 200 h.



Figura 58 - Helicóptero AS350B2, em inspeção de 200 horas de motor.

Para a inspeção de 200 horas que descreve a execução da inspeção de eficiência de lubrificação do rolamento G3 do motor, consultou-se previamente a *Maintenance Manual Arriel 1D1* com execução do cartão 72-43-10-280-801 (TURBOMECA, 2019d). Segundo este, com temperatura do óleo do motor à 67°C, alcançada posteriormente a um teste de motor em solo, e com a aeronave desenergizada deve-se desconectar a tubulação na extremidade da linha do retorno de óleo do rolamento da turbina geradora de gases “G3”, e inserir a ferramenta especial guia até a uma proveta graduada em mililitros fixada no deque da aeronave.

A realização da referida tarefa foi feita em dois momentos: No primeiro momento, com temperatura do óleo ideal, foi realizada uma sequência de ventilação no grupo moto propulsor até que o óleo flua por todo sistema e garantindo sua lubrificação, observando a leitura no instrumento (Delta NG) ΔNG .

Em um segundo momento foi colocado a proveta graduada abaixo da ferramenta especial já conectada na saída do retorno de óleo do rolamento G3. E então uma segunda ventilação do motor foi realizada por 15 segundos, e ao alcançar o valor de ΔNG mínimo de 15%, com queda de tensão não inferior a 15 volts, realizou-se a drenagem do fluxo de óleo de retorno de G3 obtendo o valor de 123 ml, estando acima do valor mínimo de 50 ml de

referência do fabricante. (TURBOMECA, 2019d).

4.3 Análise de vibração do motor

Em um segundo momento da pesquisa, com intuito de averiguar os parâmetros vibracionais do motor da aeronave, foi executada uma inspeção de 750 horas de motor, através do cartão *Maintenance Manual* Arriel 1D1 número 71-02-10-760-801, com emprego da ferramenta especial, *Bruel & Kjaer Integrating Vibration Meter Type 2513*, calibrada em 21/04/2019 pelo fabricante e configurada na disposição de RMS MAX / 1 Segundo por Peak, conectada a um acelerômetro *Bruel & Kjaer* do tipo 8324, desenvolvido para inspeções vibracionais constantes em ambientes quentes e ou úmidos, operando na faixa de frequência 1 Hz – 10.000 H, faixa de temperatura entre - 196 °C a + 480°C, com sinal de saída 1 pC / ms² e classe de proteção IP67 (Figura 59).

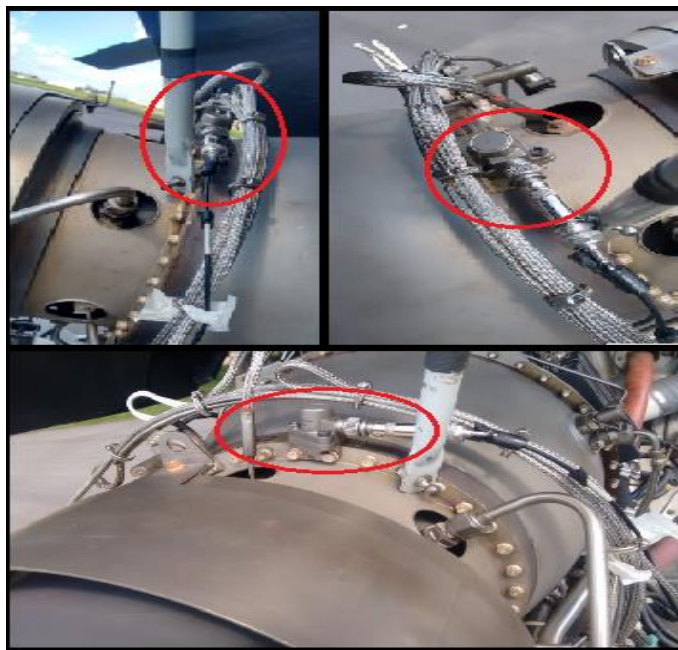


Figura 59 - Inspeção de 750h do motor

A ferramenta é composta por uma central de captação, medição e análise de vibração e um acelerômetro *Piezoelétrico* leve, conectado por um cabo coaxial de aproximadamente 1,2 metros, que para inspeção planejada, previamente foi instalada no ponto de averiguação da parte frontal do motor, especificamente no flange da carcaça da turbina axial do módulo 01 (Figura 60).

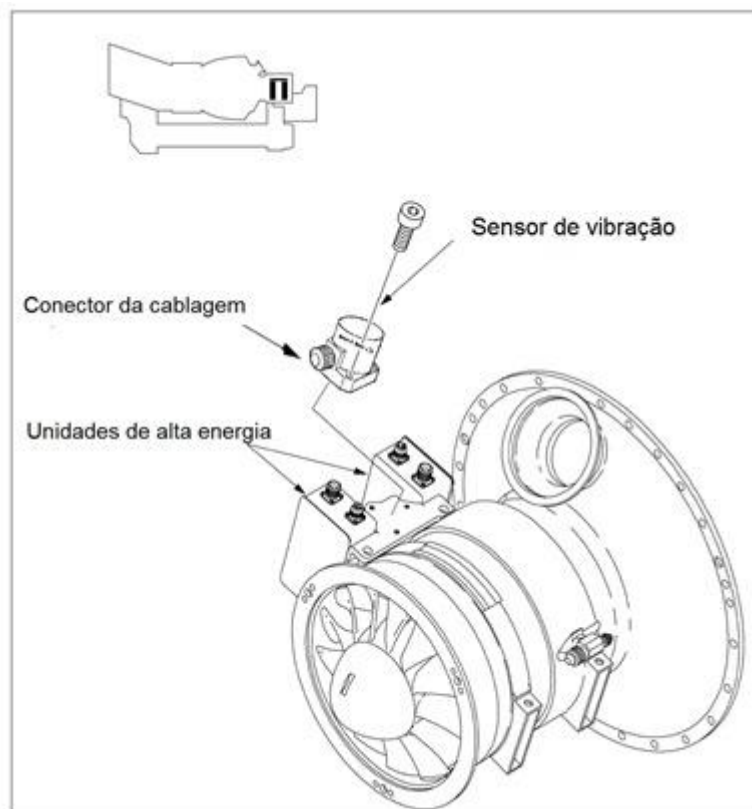


Figura 60 - Parte frontal do motor
 Fonte: Manual de Manutenção Turbomeca (2019a).

Após a análise da parte frontal do motor, foi fixada devidamente no ponto de verificação da parte traseira do motor localizado na base de apoio de fixação da coroa de parafusos do motor, entre os módulos 3 e 4, conforme o manual do fabricante. (TURBOMECA, 2019d). (Figura 61).

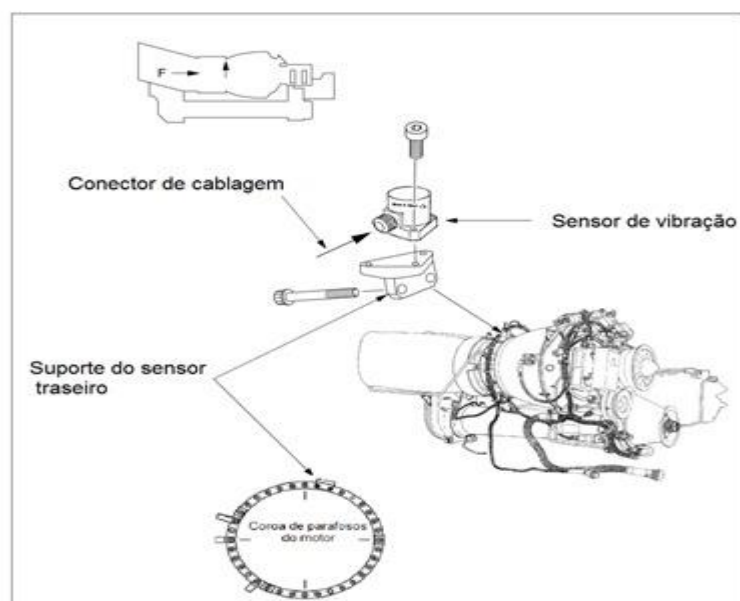


Figura 61 - Parte traseira do motor
 Fonte: Manual de manutenção Turbomeca (2019)

Os referidos dados de vibração foram captados individualmente após cada procedimento de partida da Aeronave AS350 B2, estando o equipamento instalado em cada seção do motor individualmente, com o Helicóptero em funcionamento no solo com a manete de vazão de combustível na posição ponto morto (*Iddle*), e NR (rotação do rotor principal) em 300 rpm.

Para conferência das vibrações da célula do helicóptero, foi feito um voo sobre bairros adjacentes ao aeroporto Carlos Prates na Cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Ao final de todas as inspeções relacionadas na ordem se serviço foi aprovada as aeronaves para retorno ao serviço segundo as normas da RBAC.43. Para análise vibracional foi adotado o método eletrônico com a utilização da ferramenta especial Vibrex 2000 (VIBRATECH INTERNACIONAL, 2015), nome comercial da ferramenta utilizada para identificar e quantificar as acelerações verticais e laterais decorrente do desbalanceamento dos rotores principal, de cauda, das vibrações presentes no eixo de transmissão e a diferença de trajetória das pás da aeronave – *tracking* (Figura 62).

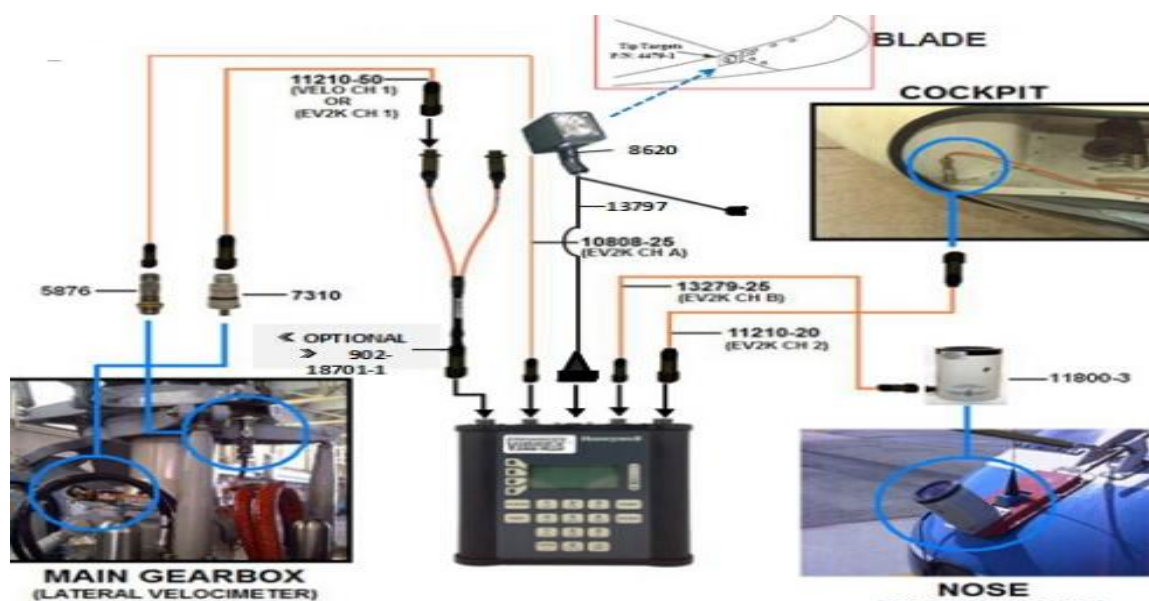


Figura 62 - Vibrex 2000, instalado no AS350 B2.
Fonte: Vibrattech Internacional, 2015.

O presente equipamento é composto por acelerômetros, luz estroboscópica, sensor de fase, cabos e fios e um analisador / processador de sinais. Os acelerômetros foram antecipadamente instalados no mastro do rotor principal, no cone de cauda da aeronave e no assoalho em anexo aos pedais do copiloto (Figura 63). Já para emprego da luz estroboscópica, foram instalados refletores “siblas” na extremidade das três pás da aeronave com a finalidade de conferir o ajustamento do tracking, que consiste de uma projeção de um feixe eletrônico em encontro as “siblas” previamente alojadas na ponta das pás.

A Figura 63 apresenta a inspeção vibracional da célula.

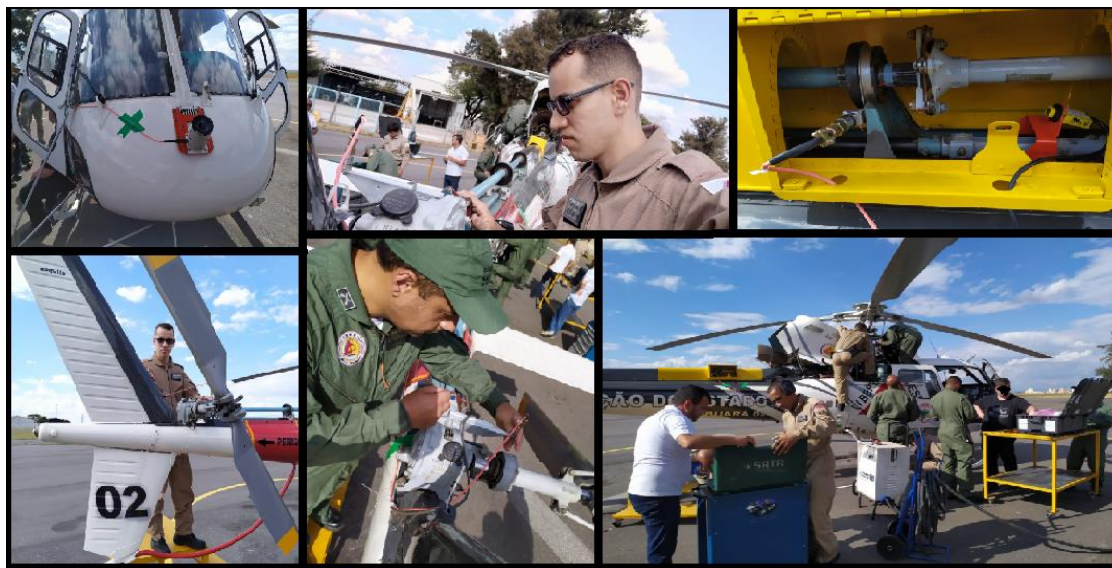


Figura 63 - Inspeção vibracional da célula

Ao final foram feitas checagens entre os valores obtidos e os de referência indicado pelo fabricante e efetuado o PWC (verificação de potência do motor) em voo, objetivando analisar os parâmetros de funcionamento de acordo com as especificações exigidas pelo fabricante (VIBRATECH INTERNACIONAL, 2015).

4.4 Técnicas de identificação, processamento e análise de choques mecânicos de alta energia na aeronave AS350 B2.

Segundo Benvenuto (1991), o monitoramento do comportamento estrutural é uma área antiga da ciência que acompanha as evoluções teóricas na mecânica estrutural desde suas origens, fornecendo informações essenciais sobre fenômenos físicos e ratificações de procedimentos computacionais.

De acordo com Silva, Silva (2017) nem sempre as tecnologias desenvolvidas por uma geração de engenheiros suprem as necessidades encontradas no dinamismo, contemporâneo, das operações aéreas. Para minimizar esta carência é necessário o emprego das tecnologias modernas com o propósito de não atenuar a operacionalidade da vida útil da máquina.

Como exemplo, pode-se fomentar as utilizações de aeronaves civis nas operações aéreas das forças de segurança públicas brasileiras que na sua maioria não utilizam mecanismos de proteção estrutural ou tecnologias de análise de sua integridade, expondo a máquina e a sua tripulação ao perigo iminente de ser alvejado por armas de fogo de alta energia. Neste sentido, buscou-se desenvolver neste trabalho um sistema de segurança passiva que permita ao piloto da aeronave evitar consequências drásticas após esta ser atingida por disparos.

Para minimizar o problema mitigou-se a identificação de impacto de alta energia nos helicópteros utilizados pelas forças públicas. Para isso foi necessário, após estabelecer padrões mínimos de interferência vibracional, realizar a identificação vibracional da principal aeronave utilizada.

Para análise das referências de vibração estrutural foram coletados inicialmente os parâmetros da aviônica da aeronave, por meio do instrumento Δ NG, situado no painel de instrumentação, que assinalava uma PMD (Potência Máxima de Decolagem) do AS350 B2 de 101,6%, com temperatura atmosférica captada pelo termômetro de cabine em 24°C.

Além disso, a medição foi promovida com a manete de vazão de combustível na posição Ponto Morto (*Iddle*) em solo e posteriormente na posição Voo (*Flight*) em voo. Posteriormente, analisou-se os sinais captados durante as simulações em voo, com emprego do monitoramento dos níveis de vibrações padrões de estrutura para posterior interpretação dos resultados obtidos.

Os resultados adquiridos foram associados com os dados previamente extraídos dos monitoramentos vibracionais de GMP e célula, de acordo com seus fabricantes, e em seguida manipuladas através do programa *Matlab*, obtendo os referidos gráficos vibracionais de cada análise, os quais foram relacionados futuramente com os dados de parâmetros encontrado durante o voo de Checagem da Potência do Motor.

Para o monitoramento do comportamento vibracional da estrutura, foram fixados de forma empírica por cianoacrilato, três extensômetros da marca *Single Sensor SMART LayerR* na carenagem inferior intermediária do Helicóptero AS350 B2 em uma distância de 45cm do seu centro de gravidade, conforme tabela 9.

Através de um *hardware* e *software* analisador, gravador e pós-processamento de sinais de vibração da *LDS Dactron modelo Photon II* instalado em um microcomputador foram avaliados os sinais adquiridos em voo em conjunto com a técnica de Teste do Martelo de Impacto - *Impact Hammer Test (IHT)*, que através de simulações de impactos no assoalho da aeronave em voo foram gravados dados e posteriormente manipulados através do *Matlab*, obtendo os gráficos para análise.

O ensaio de IHT consiste em excitar o sistema utilizando-se um martelo ou uma ferramenta especial e analisar a resposta, medida normalmente por um acelerômetro fixo em regiões específicas do conjunto, nos domínios do tempo e da frequência (VARGAS, 2016).



Figura 64 - Bancada de vibração com para o teste de martelo de impacto.

Após feitas as simulações, os dados foram gravados e posteriormente manipulados através do *Matlab* obtendo os gráficos para análise.

Já para o monitoramento vibracional em voo, foram fixados com fita dupla-face, três extensômetros da marca *Single Sensor SMART LayerR* na parte interna da carenagem inferior intermediária do Helicóptero HS350 B2, uma vez que devido a própria dinâmica de voo do helicóptero é o local com maior exposição ao risco de um ataque de alta energia.

Portanto, dois dos três extensores foram instalados a uma distância angular de 30 cm do centro de gravidade e uma distância transversal de 15 cm da borda de fixação da carenagem com o assoalho da célula da aeronave nos lados direito e esquerdo respectivamente, e o terceiro foi instalado a uma distância de 15 cm do centro de gravidade, que por meio de fios devidamente fixados na carenagem transmitiam os sinais captados pelos extensômetros até um microcomputador manipulado por um tripulante sentado no bando traseiro da aeronave.

Observa-se na Figura 65 a localização dos extensômetros na aeronave.

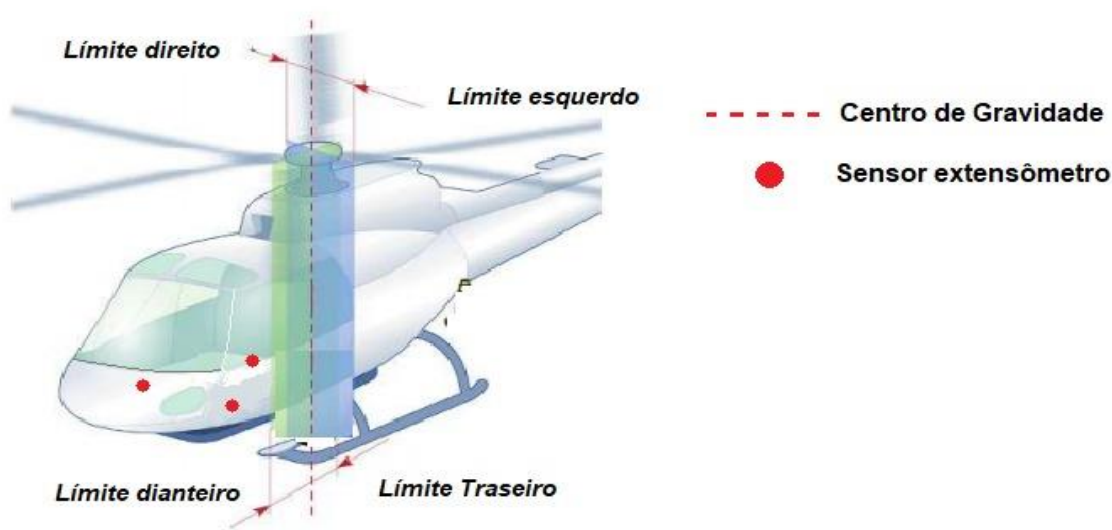


Figura 65 - Localização dos extensômetros na aeronave.

Com ajuda de um *hardware* e *software analisador*, gravador e pós-processamento de sinais de vibração da *LDS Dactron modelo Photon II* previamente instalado no microcomputador, foi possível captar e identificar os sinais de vibração da aeronave em diferentes tipos voos, desde o procedimento de partida, a decolagem, voo de deslocamento ou normal, voo operacional, até o pouso e o desligamento do GMP, e com ajuda da técnica de IHT, realizou-se, pela tripulação, algumas simulações de impactos no assoalho da aeronave em voo através de pisadas no assoalho.

Os dados adquiridos então foram gravados e posteriormente manipulados através do *software Matlab*, obtendo informações essenciais para o desenvolvimento de uma banca de simulação de choques mecânicos de alta energia em aeronaves de asas rotativas e a elaboração de gráficos para análise vibracional.

4.5 Simulação de choques de alta energia proveniente arma de fogo na aeronave.

Para simulação dos impactos de alta energia proveniente de arma de fogo em aeronaves de asas rotativas, foram utilizados os seguintes armamentos: revólver Taurus 617 Inox .357 magnum, pistola Taurus PT-92 Tenox 9mm, pistola Glock G21 4 geração .45ACP+P e o revólver RT 454 Casull Inox .454 Casull, carregados com munições jaquetadas de ponta oca, com exceção da pistola Pt-92 carregada com munição jaqueta de ponta ogival.

Observa-se na Figura 66 a bancada de análise vibracional.

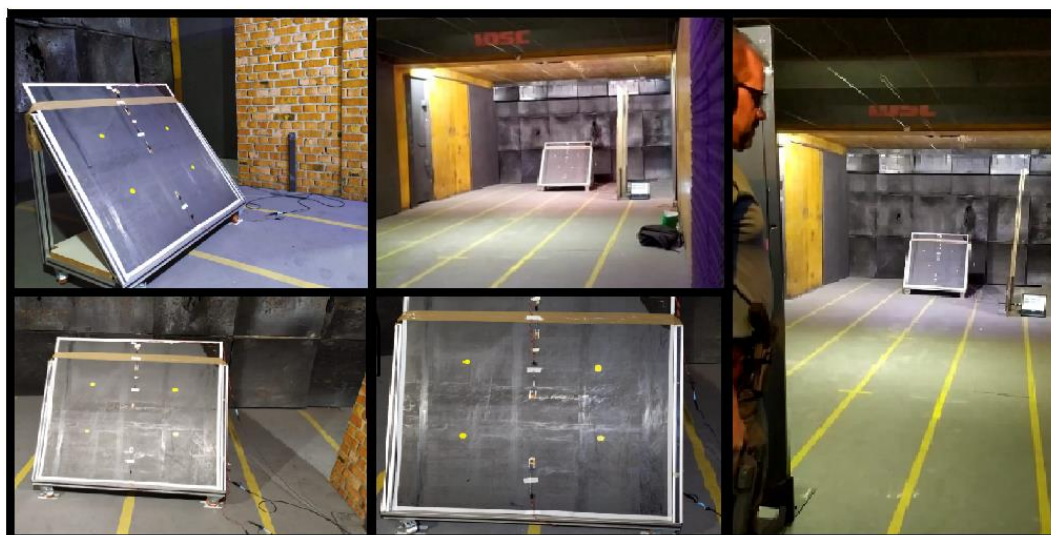


Figura 66 - Bancada de análise vibracional

A bancada de captação das vibrações proveniente do impacto das armas de fogo era composta por uma chapa de carbono de 2 metros de largura por 1,2 metros de altura e espessura de 0,5 cm, fixada de forma rígida em uma estrutura metálica com inclinação 30 graus,

objetivando uma simulação mais realista do contato do projétil com a carenagem intermediária da aeronave que contem formato côncavo, conforme Figura 67.

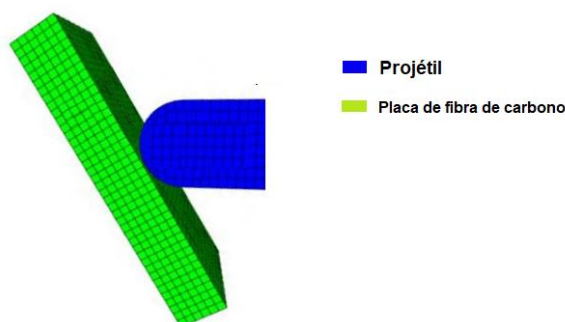


Figura 67 - Projeção do contato do projétil com a placa de fibra de carbono.

Para captação dos sinais na placa foram fixados três extensômetros da marca *Single Sensor SMART LayerR* de forma verticalmente simétrica, ao centro da superfície cujo lado está exposto aos impactos decorrentes da simulação.

Os extensômetros então foram ligados a um microcomputador contendo um hardware e software analisador, gravador e pós-processamento de sinais de vibração da LDS Dactron modelo Photon II, por cabos transmissores de aproximadamente 3 metros. Logo após, levou-se todo o aparato para um estande fechado de tiro esportivo profissional (Figura 68), devidamente regularizada quanto aos órgãos públicos de fiscalização para prática de tiro esportivo brasileiro.

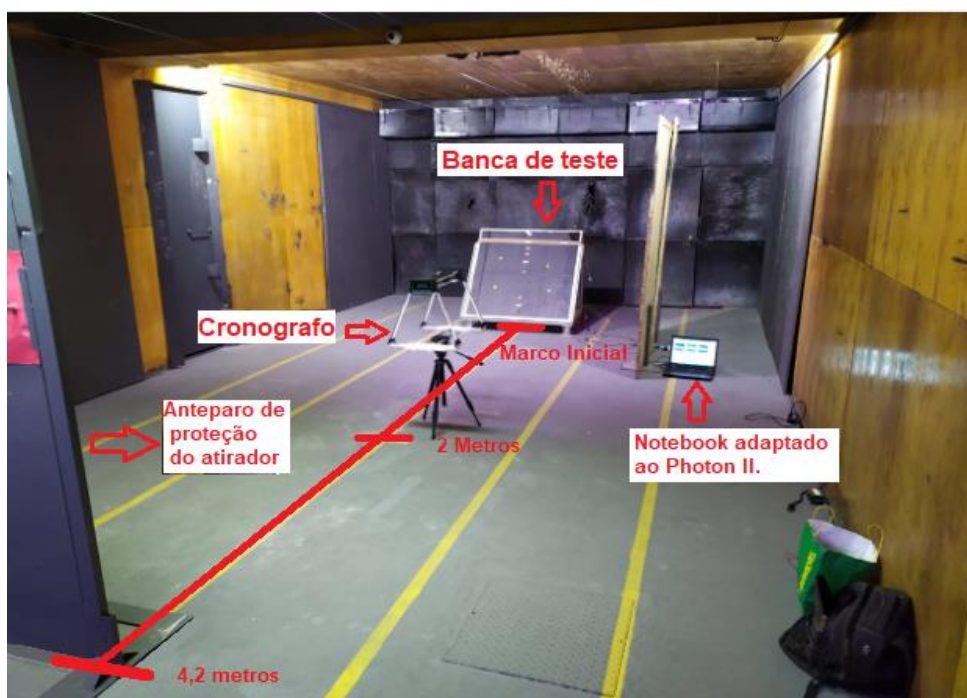


Figura 68 - Estande de tiro esportivo profissional adaptada para simulação e coleta de dados.

Para iniciar a prática da simulação, primeiramente posicionou-se devidamente a bancada de análise de vibração a uma distância de 4,2 metros do local escolhido para a prática

do disparo, acrescentou-se 4 marcações de alvos de forma simétrica na placa, um para cada calibre de arma utilizada e ligou-se devidamente toda a aparelhagem da bancada (microcomputador e o *Photon II*), deixando-os em um local seguro afastado da zona de teste.

Em seguida, posicionou-se um cronógrafo digital na linha de tiro, entre a posição do atirador e a bancada de teste, a uma distância de 2,2 metros do atirador e logo após, seguindo as normas de segurança do local, foram feitas as análises de forma individual com cada arma e seus respectivos calibres, conforme Figura 69.



Figura 69 - Posição do atirador profissional durante o disparo de teste, protegido por anteparo.

Os disparos das armas de fogo foram feitos respeitando uma sequência lógica com empunhadura de mãos livres em silhueta baixa por parte do atirador, sendo que para cada conjunto de disparo era necessário ativar previamente o registro do *Photon II* e posteriormente desligar e salvar os dados captados. Foram feitas duas sequências de disparos para cada arma. Uma primeira apresentando apenas um disparo, e a segunda apresentando três disparos seguidos, com exceção da Pistola Glock G21 .45ACP+P onde se promoveu apenas um disparo unitário no alvo.

4.6 Erro de incertezas de medições.

De acordo com Beckert (1990), para validação numérica de um experimento é necessário o emprego de artifícios que evitem erros de incertezas de medições, e assim poder validar os resultados obtidos durante o experimento.

Desta forma é importante destacar que um sistema de medição pode ser definido como um conjunto de dispositivos de medição, padrões, operações, métodos, dispositivos de fixação, software, pessoal, ambiente e premissas empregados para quantificar a unidade de medição, ou seja, é o processo completo utilizado para concretizar as medições. Tendo como objetivo

apresentar diretrizes para avaliar a qualidade de um sistema de medição através de sua calibração (BECKERT, 1990).

A calibração é um artifício comumente utilizados em experimentos da engenharia sendo uma maneira considerada de estabelecer a exatidão de um sistema de medição, ou seja, o grau de concordância entre o resultado de uma medição e um valor verdadeiro convencional. Na realidade, a calibração é uma técnica que confronta valores de dois ou mais sistemas de medição. O primeiro é o sistema de referência, e o segundo corresponde ao sistema de medição que será aferido, por exemplo (PATRÍCIO, 2016).

Contudo, perante a existência de inúmeras metodologias para emprego dos cálculos das incertezas de medições e para o erro de incerteza, preferiu-se adotar nesse trabalho os dados apresentados no manual do fabricante do sistema PHOTON+ Dynamic Signal Analyzer, modelo LDS DActron Photon II, da empresa Brüel & Kjær. Figura (70).



Figura 70 - Sistema USB 2.0-Powered Real-time Analyzer for Sound and Vibration Analysis
Fonte: Manual Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S

O sistema é formado por:

- Um analisador de sinal dinâmico, capaz de torna qualquer microcomputador em um analisador portátil de sinal dinâmico com qualidade de ruído e vibração multicanal. Alimentado por sua porta USB 2.0, o PHOTON + funciona com uma bateria de laptop para maior mobilidade.
- Analisador de transformada rápida de Fourier –FFT- em tempo real, oferece um desempenho notável em um analisador de FFT com faixa dinâmica de medição de 115 dB e taxa em tempo real de 84 kHz. O software RT Pro fornece um conjunto de ferramentas abrangente de medição de tempo e espectro para monitoramento e análise rápidos em tempo real, mesmo em análise em campo. Também possui programas autoexplicativos, com recursos flexíveis de medição e processamento de sinais.

- Gravador de dados, que promove a gravação de fita tradicional com anotação de voz. A transferência rápida para o pós-processamento também acelera o tempo desde a aquisição de dados até a análise dos resultados. A alternância dinâmica entre vários projetos de medição permite navegar facilmente entre gravação de dados, pós-processamento e análise de dados e análise em tempo real. Com apenas um instrumento, pode- usá-lo como um analisador FFT, analisador de vibração ou analisador de sinais com dados gravados interpretados de várias maneiras, sem gastar tempo traduzindo o formato do arquivo de dados ou alternando entre diferentes programas de software.

Apresentado um erro de medição de calibração, conforme tabela (4)

Tabela 4 - Incerteza do sistema de medição do sistema

| Sistema de medição | Espécie | Incerteza* |
|--|---|-------------------|
| PHOTON+ Dynamic Signal Analyzer, modelo LDS Dactron Photon II, da empresa Brüel & Kjær | Analisador em tempo real alimentado por USB 2.0 para análise de som e vibração. Fabricante: Brüel & Kjær | ± 0.01 V |

*Fornecido pelo manual do sistema.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a realização dos testes experimentais, algumas inspeções relativas à integridade e operacionalidade do motor *Safran Arriel 1D1* foram previamente executadas para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos. Dentre elas, as inspeções de 15 horas/7 dias, 30 horas e 100 horas, que abrangem desde a verificação e limpeza dos *plug's* magnéticos e eletromagnéticos com intuito de observar a existência de limalha no motor, inspeção visual completa, até de uma verificação minuciosa do compressor axial, da roda livre, e do conjunto rotativo para verificar ausência de ruídos atípicos.

Na inspeção de funcionamento da roda livre, situada no MOD 04, ativou-se o freio rotor da aeronave e, em seguida, foram analisadas as pás da turbina livre por meio do duto de escapamento. Estas pás necessitam ter livre giro no sentido anti-horário e realizar o travamento do giro no sentido horário para assegurar o bom funcionamento do motor.

Também, foram feitas dentro dessa inspeção programada, as inspeções visuais do sistema de lubrificação, filtros, sistema elétrico, fixação e nas conexões da unidade de controle de combustível- FCU-. Ao final, a aeronave foi aprovada sem nenhuma discrepância aparente para a inspeção de permeabilidade do motor; assim como relatado na inspeção de 750 horas de GMP, teste com emprego de monitoramento vibracional e voo de monitoramento de EPC.

A inspeção de 200 horas foi fundamentada no cartão do Manual de Manutenção do fabricante descrito como “*Inspection of the rear bearing*” ou inspeção de permeabilidade do retorno de óleo do rolamento G3, cuja finalidade é constatar um indicativo de pré-entupimento do sistema de lubrificação e a integridade do rolamento traseiro. Se a quantidade de óleo emitida pelo sistema for inferior a quantidade encontrada nas inspeções anteriores, deve-se realizar uma contra prova, a fim de garantir os resultados.

Para uma homogeneização do óleo no sistema com uma temperatura superior a 60°C, foi realizada em marcha lenta um “giro” da aeronave no solo, devido às propriedades químicas envolvidas na viscosidade do óleo lubrificante, observando que caso a quantidade da amostra encontrada for inferior aos 50 ml estimulada pelo fabricante, deve-se certificar-se da existência de partículas de carbono nos dutos condutores adjacentes ou no filtro de óleo, antes de uma possível substituição prematura do rolamento G3 de forma equivocada (Figura 71).

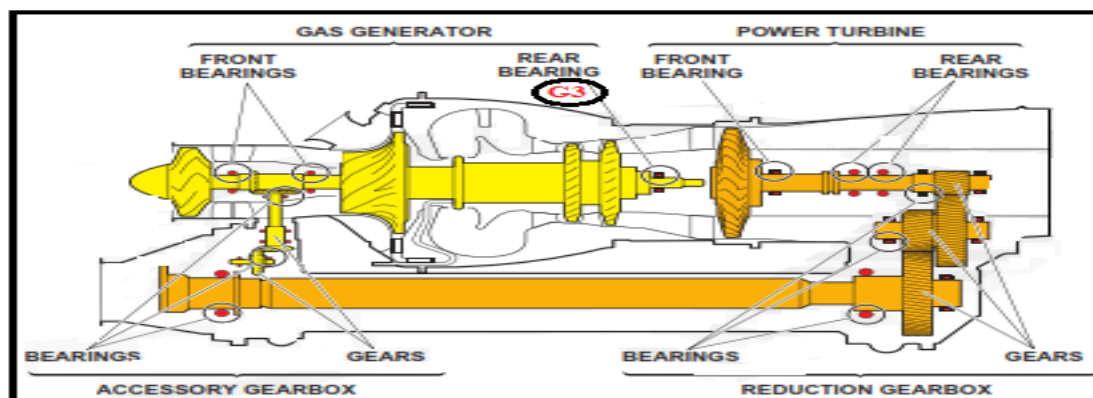


Figura 71 - Motor Turbomeca Arriel 1D1
 Fonte: Manual de Manutenção Turbomeca (2019d)

O rolamento G3 do motor Ariel 1D1, está localizado na saída do MOD03, desempenhando uma importância primordial quanto ao emprego de potência para turbina geradora de gases (NG).

Devido a sua localização, sofre inúmeros esforços físicos e térmicos resultantes das variações de rpm do conjunto da geradora de gases, que para manter a rotação de NR constante, é capaz de atingir 52.000 rpm em 100% de potência de NG, tendo como fator contribuinte a localização após o MOD2, ocasionando uma exposição a grandes variações de temperaturas provenientes da queima dos gases gerados pela câmara de combustão do tipo anular, com exposição, por convecção, dos gases produzidos da parte quente do motor (N1) de aproximadamente 2500°C, tornando-se um ponto crítico que necessita ter sua integridade física e o seu sistema de lubrificação monitorados constantemente e inspecionados periodicamente.

Para captação dos dados de vibração do motor, após a instalação do equipamento na parte anterior e superior ao compressor axial, foi realizada uma partida na aeronave em solo, e estabilizando o regime de rotação do motor em aproximadamente 85% de Δ NG, de acordo com as condições externas de temperatura e pressão (T_0 , P_0), e temperatura do óleo superior a 50°C (122°F), realizou-se então a leitura e registros das vibrações existentes. Decorrido 5 minutos deste procedimento, foi realizado as mesmas etapas para leitura e registros vibracional do ponto posterior do motor. Ao final, os dados foram coletados e organizados para averiguação de alguma inconformidade. (Tabela 5).

Tabela 5 - Vibração do motor

| | |
|----------------------------|-------------------------------|
| Vibração Ponto Dianteiro | 10 mm/s |
| Vibração Ponto Traseiro | 12 mm/s BK2513 |
| Dado do estatismo do motor | 381 RPM; NG: 83,5%; OAT: 20°C |

Confrontado os resultados obtidos durante a inspeção vibracional de GMP (Tabela 5) com os valores de referência e tolerância estabelecidos pelos fabricante (Tabela 6), certifica-se que apesar do motor Arriel 1D1 utilizado na máquina ter 7.375 horas de operação, 12.097,15 ciclos de NG e 14.329,0 ciclos de NTL (parte fria do motor), o mesmo se encontra dentro da normalidade pela Turbomeca, conforme os níveis de vibrações permitidos pelo fabricante (TURBOMECA, 2019a).

Tabela 6 - Nível de vibração permitido pelo fabricante

| | Classificação do gerador de gás | Nível de vibração permitido |
|------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Ponto da frente | 0 rpm-51.800 rpm | <20 mm/s RMS |
| Ponto traseiro | 0 rpm– 44.000 rpm (no solo) | <26 mm/s RMS |
| | 44.000 rpm – 51.800 rpm (voo) | <18 mm/s RMS |

Fonte: Manual de Manutenção Turbomeca (2019a)

De acordo com Hustun e Liu (2011) uma análise de vibrações é uma das ferramentas fundamentais atribuídas à manutenção preditiva. E nesse contexto, objetiva auxiliar na melhora do processo de detecção e diagnóstico de falhas em mancais de rolamentos. Isto porque o motor do ciclo de *Brayton* estudado nesta obra possui uma serie de rolamentos cuja integridade está diretamente associada à sua performance e segurança de voo.

Para avaliar a margem de torque de NG do motor Arriel 1D1 e os seus antecedentes de potência efetiva durante os últimos dois anos, elaborou-se o gráfico de PWC (Gráfico 1), o qual relaciona a potência empregada por N1, durante todos os períodos em que foi realizado a inspeções de 100 horas de motor, com a vitalidade de seu desempenho.

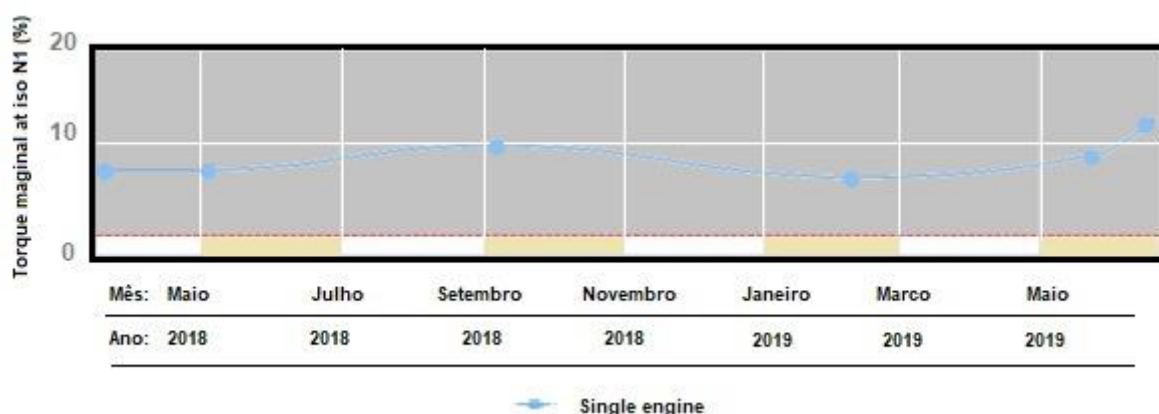


Gráfico 1 - Torque Marginal

O gráfico de torque marginal examina possíveis interferências vibracionais derivadas de seus componentes internos os quais são ou derivados de fixação estrutural.

Os dados indicados do PWC estão representados no Gráfico 2.

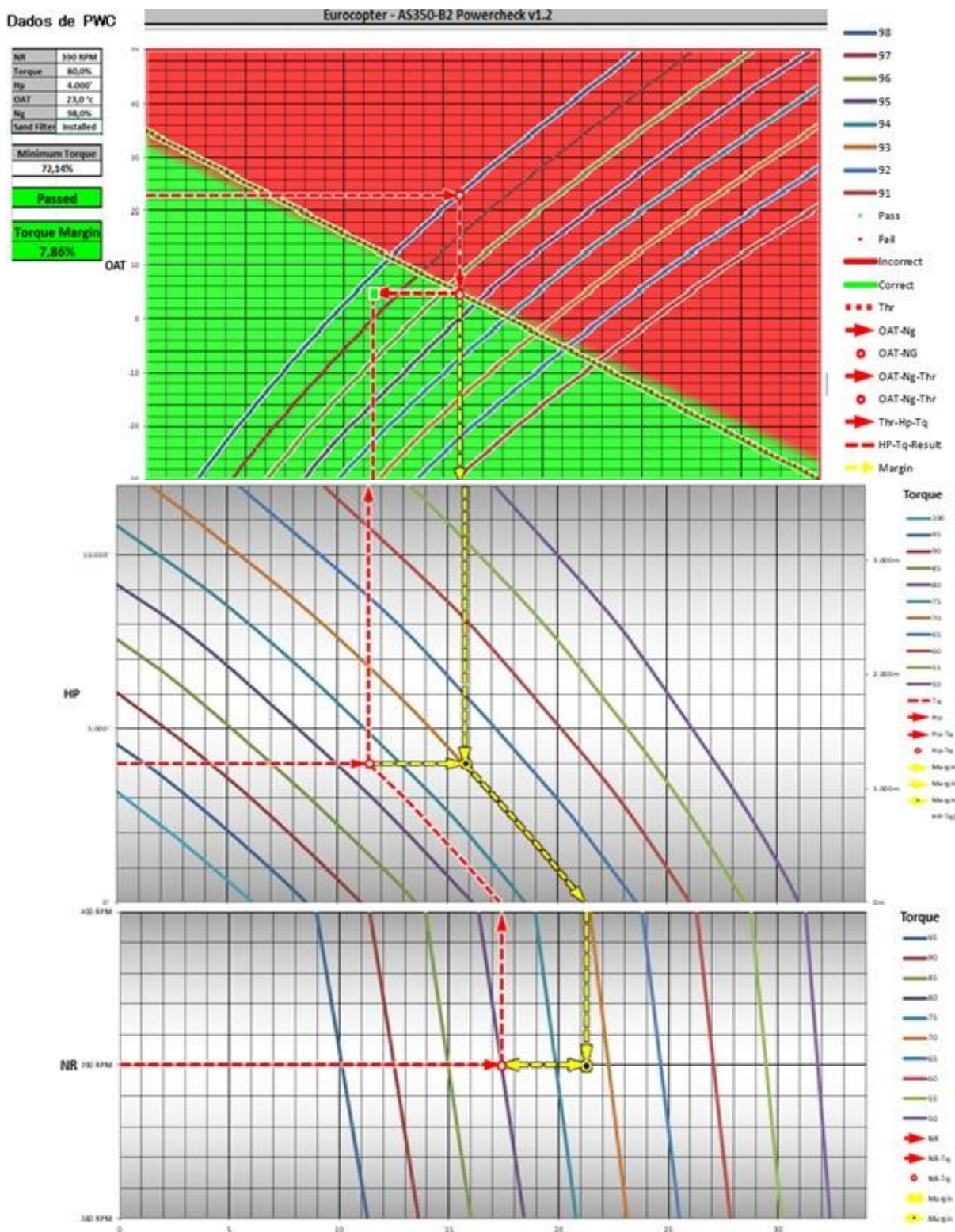


Gráfico 2 - Dados PWC

O monitoramento dos dados de GMP expostos possibilitam rastrear os parâmetros de vida útil do motor e implementar ações de manutenção preditiva para impedir eventos não planejados como a remoção prematura de motores. A realização de tarefas de manutenção de

forma apropriadas, no tempo certo, protege o equipamento e possibilita alcançar o seu potencial máximo de vida útil, possibilitando uma solução eficaz na manutenção preditiva, agindo diretamente de forma positiva na segurança de voo.

A captação das vibrações da célula da aeronave estudada, foi feita baseado nas orientações indicadas pela Airbus Helicopters AS350 B2 sob o AMM 62-00-00, 5- 1, revisão 15 de 19/01/2019, por meio da ferramenta especial Vibrex 2000. Segundo o Manual da Airbus Helicopters, se os valores de vibração da aeronave, em solo, durante giro forem abaixo de 12,7 mm/s (milímetros por segundo), não será necessária nenhuma intervenção na aeronave e as medições em voo poderão ser realizadas. Já durante o voo, a Airbus Helicopters recomenda as análises sejam feitas com a aeronave reta, nivelada, estável a 80 nós de velocidade e altitude de 4.000ft em PMC - Potência Máxima Contínua.

Após verificação, caso os níveis de vibração medidos em voo forem inferiores a 5,08 mm/s, para as diferentes configurações de voo nos eixos Z traseiro e Z do copiloto lateral, o helicóptero estará dentro da tolerância, não sendo necessários medidas corretivas. Entretanto, caso não estiver abaixo de 5,08 mm/s, será necessário aplicar as correções recomendadas pelo sistema *Steady Control* Rotor presente no equipamento utilizado.

Durante a análise de vibração com o equipamento Vibrex 2000, foram encontrados os resultados conforme Tabela 7; que apresenta as vibrações do rotor principal, conforme Airbus Helicopters AS350B2- AMM 62-00-00,5-1.

Tabela 7 -Dados do rotor principal

| Momentos da coleta de informações do rotor principal | Vibração do rotor principal |
|--|-----------------------------|
| Solo lateral | 1,27 mm/s |
| Voo pairado | 2,54 mm/s |
| Voo lateral | 3,81 mm/s |
| Voo vertical | 4,06 mm/s |

Durante a aferição do balanceamento do eixo (eixo de transmissão de potência) foi obtido o valor de 8,89 mm/s.

Durante aferição do balanceamento do rotor de cauda foram obtidos os valores conforme tabela 8.

Tabela 8 - Dados do rotor de cauda

| Velocidade da CTT | Vibração da CTT |
|-----------------------------------|-----------------|
| 270 rpm | 5,08 mm/s |
| Velocidade nominal + ou -2000 rpm | 2,79 mm/s |

Os resultados encontrados nos procedimentos acima ratificaram que os níveis vibracionais da aeronave estudada estão em conformidade com os padrões pré-estabelecidos pelo fabricante, não sendo necessário qualquer intervenção.

Esse procedimento objetiva a constatação geral das vibrações de baixa frequência referentes ao rotor principal, que ocorre quando uma pá desenvolve maior sustentação que a outra, fora de tracking, ou quando ocorre o desbalanceado do conjunto do rotor ou ainda as de alta frequência relacionadas ao rotor de cauda. Já as vibrações de média frequência, são originadas da vibração estrutural da aeronave, sendo fruto de análise dessa pesquisa, devido a inexistência de um equipamento de análise para tal.

Um rotor balanceado se desloca em equilíbrio (Figura 72), com velocidade de rotação e ângulo de passo inalterados, o que origina esforços aerodinâmicos e de inércia iguais em cada pá; assim como a força de sustentação F_n e as forças centrífugas geradas em cada pá, o que na prática é conhecido como *tracking* idêntico das pás. Assim, não existe desbalanceamento se as forças centrífugas F_c das pás forem iguais. Quando as pás de um rotor estão balanceadas, elas contêm os mesmos efeitos aerodinâmicos e de inércia, ou seja, são funcionalmente idênticas.

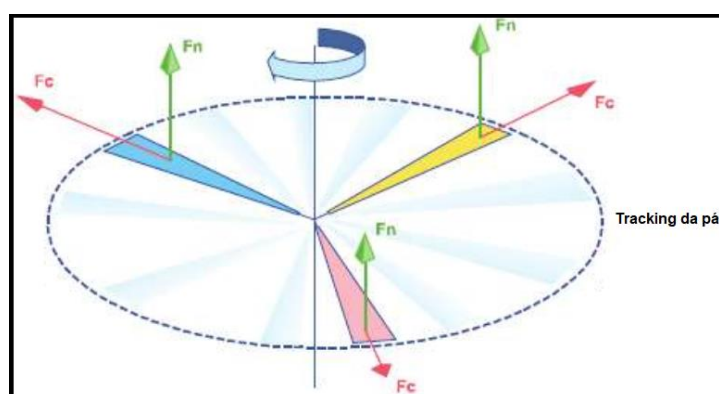


Figura 72 - Comportamento das forças de sustentação e cinética dos rotores.
Fonte: THM 350 B2

Através do emprego da análise de vibração da aeronave, em voo, foi possível identificar as vibrações estruturais de forma geral e prováveis influências como a identificação de choques de alta energia provocado por disparos de arma de fogo na carenagem da aeronave,

que promovem uma força transitória no conjunto, uma vibração irregular devido a um possível problema no GMP da máquina ou até mesmo o colapso do conjunto, originado pelo impacto ou devido as vibrações dissipadas (Gráfico 3).

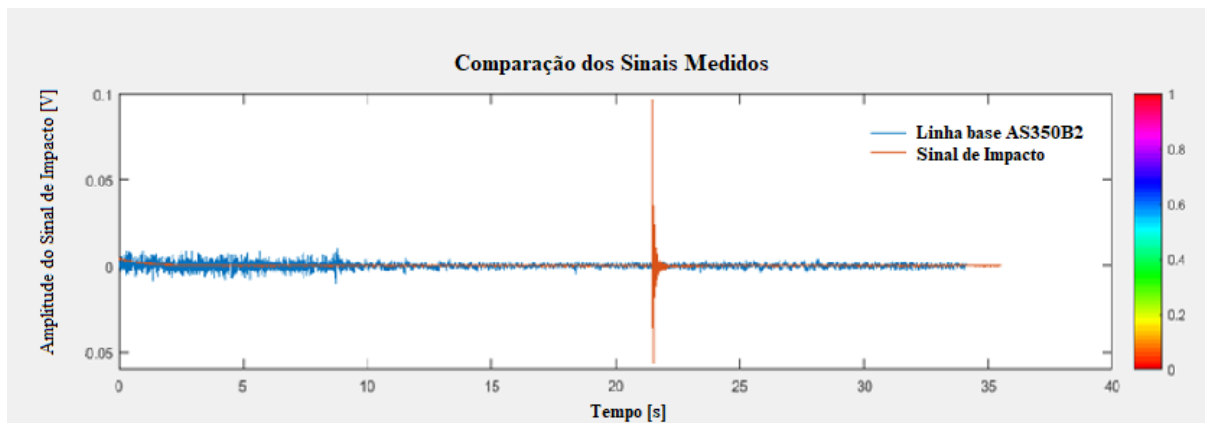


Gráfico 3 - Comparação dos sinais medidos.

O Gráfico 3 foi elaborado durante o procedimento de partida da aeronave, em que de zero a dez segundos, até a decolagem e o voo de PWC de 15 aos 30 segundos e demonstrar a sobreposição simulada de um choque de alta energia externo sobre a linha base (Identidade vibracional da máquina AS350 B2) da aeronave aos 22 segundos aproximadamente. A variação da amplitude vibracional da aeronave durante o procedimento de partida se deve as forças físicas empregadas pelo Gerador de Partida e o dinamismo das partes moveis de NG do motor até que a ignição se complete como um todo.

Ao vencer a inércia do motor, o gerador de partida ocasiona interferências vibratórias devido as variações de temperatura, pressão e rotação ocorridas nas etapas do seu ciclo de partida, durante as etapas de admissão, compressão, combustão, expansão e exaustão dos gases sobre os sistemas de transmissão de força aos rotores principal e traseiro. Incidindo também neste processo as variáveis atuações originadas das forças aerodinâmicas durante o deslocamento de avanço das pás até a estabilização da rpm dos rotores, finalização do procedimento de partida e posteriormente a decolagem da aeronave.

Por fim, e necessário lembrar que as aeronaves de asas rotativas atuam com uma rpm constante sobre seus rotores, se movimentando em voo a partir do arrasto angular da pista de deslocamento das pás, ou pela variação do ângulo de ataque das mesmas sobre seu eixo, causado maior ou menor sustentação da aeronave.

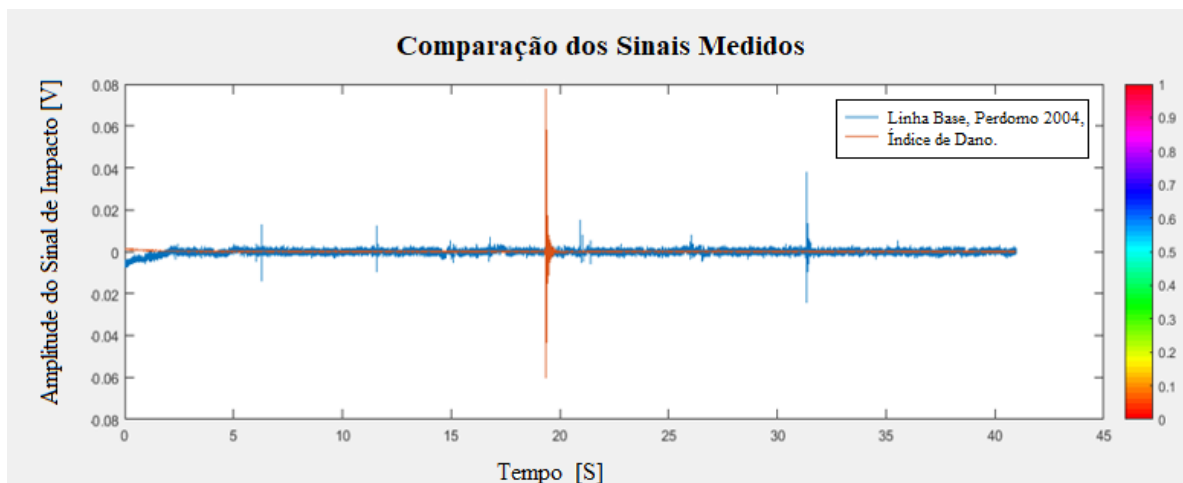


Gráfico 4 - Comparação da medição dos sinais

O Gráfico 4 demonstra a sobreposição do “Índice de Dano” (interferência vibracional produzida no sistema) aos 19 segundos sobre a “linha base” encontrada de acordo com os dados adquiridos na obra de (PERDOMO, 2004) em uma aeronave bi-pá; associada a simulações de choques mecânicos internos no assoalho da aeronave provindos de sua tripulação nos intervalos aproximados 6, 12, 21, 26 e 31 segundos. Embora as interferências internas motivadas serem identificadas na “Linha Base”, nos intervalos mencionados, observa-se que a amplitude da onda gerada foi desprezível, inferior a 0,02V, ao ser confrontada com a simulação do impacto de alta energia externo, empregada pelo “Índice de Dano” aos 19 segundos que alcançou um valor aproximado de 0,08V.

A identificação e o acompanhamento vibracional da estrutura das aeronaves asas rotativas são tão importantes quanto às promovidas durante as inspeções periódicas e as planejadas orientadas pelo fabricante que visam a identificação de desconformidades vibracionais do motor, eixo de transmissão, rotor principal e rotor traseiro. Já em conjunto, os padrões de vibrações, quando analisados são capazes de identificar a “Linha Base” da aeronave e através de seu monitoramento, possibilita diferenciá-la do “Índice de Dano” inserido, contribuindo assim para um aumento efetivo das manutenções preditiva, preventiva ou corretiva e redução de custos de manutenção.

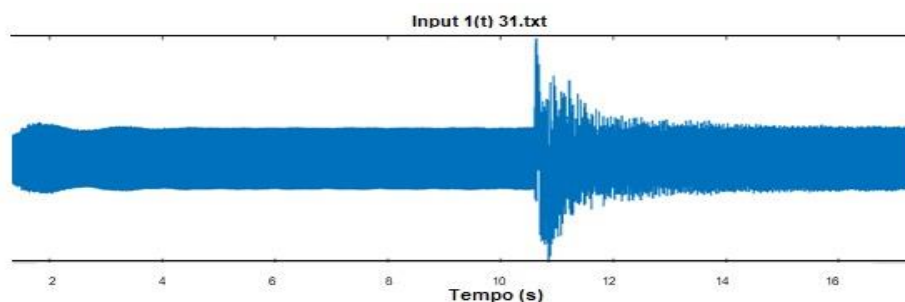


Gráfico 5 - Vibração da aeronave

Por meio da linha base de uma máquina é presumível que se possa analisar diferentes variáveis. O Gráfico 5, obtido pelo *Software Matlab* demonstra uma excitação caracterizada por uma liberação de grande energia em um curto intervalo de tempo sobre um sistema previamente excitado; características de alguns eventos físicos como: explosões, impactos e colapso estrutural total de um sistema mecânico.

Durante os 4,3 segundos do início da simulação, observamos uma vibração não determinística caracterizando a linha base da placa de bancada de simulação, originado do acionamento do excitador de vibração, em um sistema em repouso, simulando assim a atuação do disparador do GMP da aeronave durante a partida do motor.

Logo em seguida, o sistema entra em equilíbrio, dito linha base e emprega um movimento harmônico, simulando um voo em situação de PWC, que aproximadamente aos 10,4 segundos sofre interferência devido à inserção da força periódica derivada do Teste de Martelo do Impacto (*Impact Hammer Test*), simulando um impacto de alta energia na fuselagem inferior da aeronave, e posteriormente a atuação dessa interferência no sistema devido as forças de reflexão, difração e difusão das ondas vibracionais originadas de uma estrutura de fixação rígida, até que após os 16 segundos o sistema entra em um novo movimento harmônico.

Já ao associar a *linha base* da aeronave em diferentes regimes de voo, com os Índices de Dano (“*damage index*”) obtidas durante os diversos choques mecânicos promovidos pelos diferentes projéteis utilizados nas armas de fogo utilizadas nesse trabalho, podemos observar nos gráficos, elaborados a partir do *software Matlab*, a existência de 4 sinais distintos. Destes sinais, três descrevem as características vibracionais existentes na carenagem intermediária inferior do helicóptero AS350B2, nos três pontos diferentes estudados: Lado direito L.D, lado esquerdo L.E, e centro de gravidade CG e o último descreve o sinal do impacto real de cada projétil utilizado na placa de carbono pesquisada (Gráfico 6).

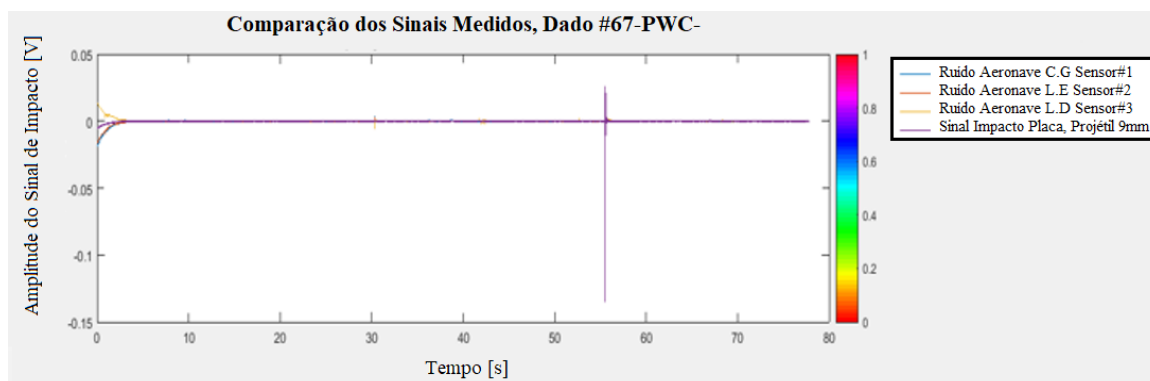


Gráfico 6 - Comparação dos sinais medidos-dado #67-PWC

O Gráfico 7 apresenta uma aeronave em voo reto e nivelado- Verificação da Potência do Motor (*Engine Power Check*) - ou seja, um voo de verificação de parâmetros do seu grupo motopropulsor. É importante recordar que os dados de voo foram realizados a uma velocidade de 41,16 m/s, e altitude de 1219,2 metros em PMC- Potência Máxima Contínua, Nr =390 rpm, 80% de torque e temperatura ambiente de 23,0 °C, Ng=98,0 %, obtendo uma margem de torque de 7,86%, e que os procedimentos de pilotagem de voo foram feitos de acordo com orientações existentes no manual de voo da aeronave AS350B2.

Ao analisar os dados apresentados no Gráfico 7, podemos verificar que durante o voo de PWC, a aeronave apresentou uma amplitude vibracional de sua “linha base” praticamente idêntica pelos sensores instalados nas três posições diferentes.

Nos intervalos de tempo entre 0 a 3 segundos aproximadamente, percebe-se um agrupamento dos 3 sinais captados pelo extensômetro, que corresponde ao processo de “calibração” do captador de vibração, observando em seguida o emprego de um movimento harmônico com amplitude tendendo a zero até o final da análise, e a sobreposição da linha base pela “*índice de dano*” aos 57 segundos aproximadamente de análise, devido a energia dissipada na chapa de carbono ao ser atingida por um projétil de 9mm, disparado pela pistola Taurus PT-92 Tenox.

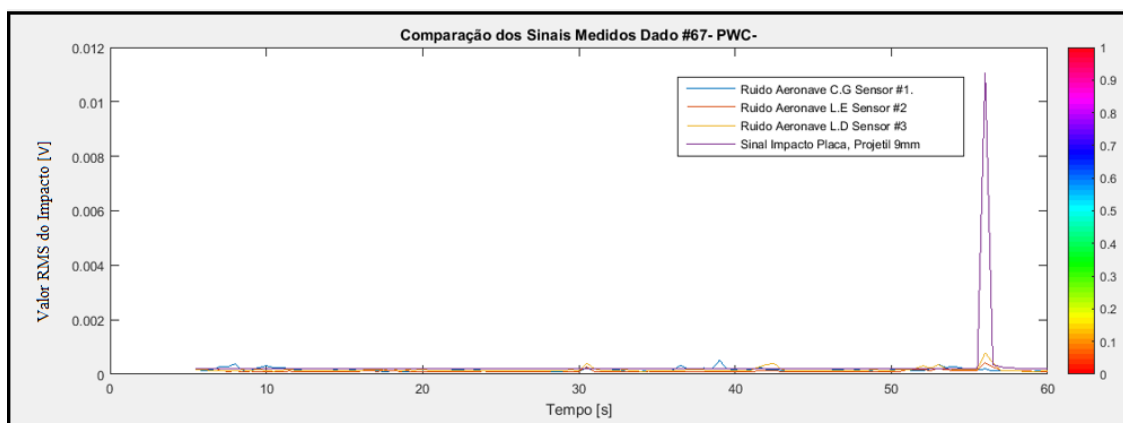


Gráfico 7 - Comparando valores de unidade de medida RMS

Apesar das frequências vibracionais dos três sensores possuírem um valor de amplitude tendendo a zero, ao se analisar os valores vibracionais em RMS por Tempo em segundo no respectivo voo de PWC apresentados no Gráfico 8, observa-se uma pequena variação quanto aos seus valores apresentados e a extrapolação do padrão de frequência RMS medido dos três sensores, pelo índice de dano durante o impacto simulado do projétil calibre 9mm, aproximadamente aos 57 segundos. As diferenciações dos três sinais captados se devem as diferentes localizações e suas respectivas interferências, quer sejam pelas distâncias do ponto vibracional ou pelos fatores estruturais existentes.

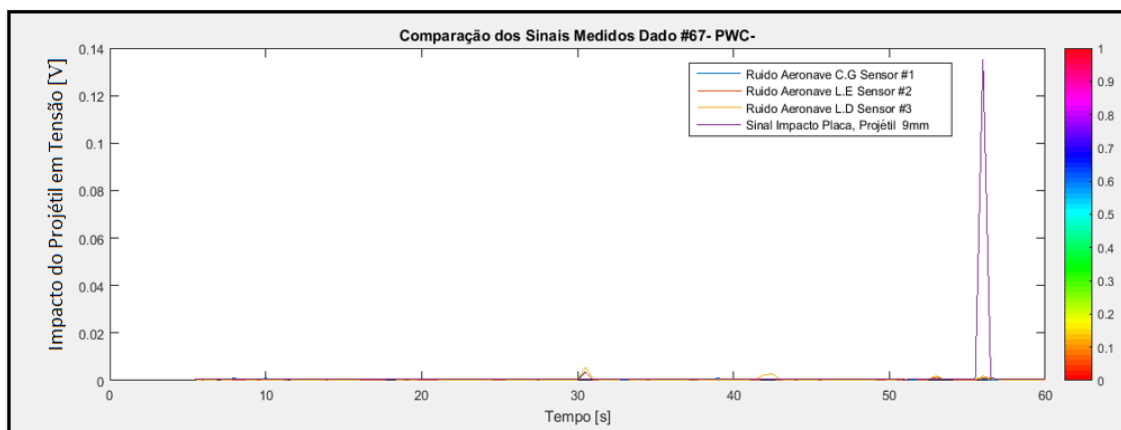


Gráfico 8 - Comparação dos sinais medidos; PWC

Quando se observa os valores de pico de ruído x tempo, pode-se observar que mesmo com uma filtragem dos sinais de maior amplitude pelo gráfico, são identificados algumas variações que interferem no movimento harmônico do conjunto. Contudo, tais interferências possuem um valor de pico de tensão abaixo de 0,02 V enquanto o índice de dano do calibre 9mm possui um valor de pico de tensão aproximado de 0,14 V.

É importante relacionar estes dados captados com a dinâmica do voo de PWC empregada nesta análise, uma vez que, alturas maiores de voo tendem a apresentar menores interferências atmosféricas, conseqüentemente, menores turbulências, contudo existe uma altura máxima de voo estipulada para cada aeronave, que deve ser respeitadas pelos seus operadores de voo, haja vista que estes valores são fundamentados para a resistência estrutural de cada aeronave, os limites operacionais de seus motores e sua margem de segurança de voo.

Diante disso, é necessário saber que é inevitável que as vibrações não existam, sendo necessário minimizar seus efeitos com intuito de garantir o maior tempo de vida útil da máquina e seus componentes e preservar os operadores dos riscos físicos provocados pela exposição as fontes geradoras de vibração. (SÉRVULO, SABA 2009).

Já ao se analisar um voo normal, ou voo de deslocamento, devemos levar em consideração os fatores de turbulência e as correções necessárias feitas pelo piloto, objetivando manter a estabilização da aeronave. Estes fatores interferem diretamente na caracterização da “Linha Base” da máquina, haja vista que geralmente esses voos são feitos com altura mínima de 500 ft acima do terreno, de acordo com o regulamento de tráfego aéreo brasileiro para helicópteros.

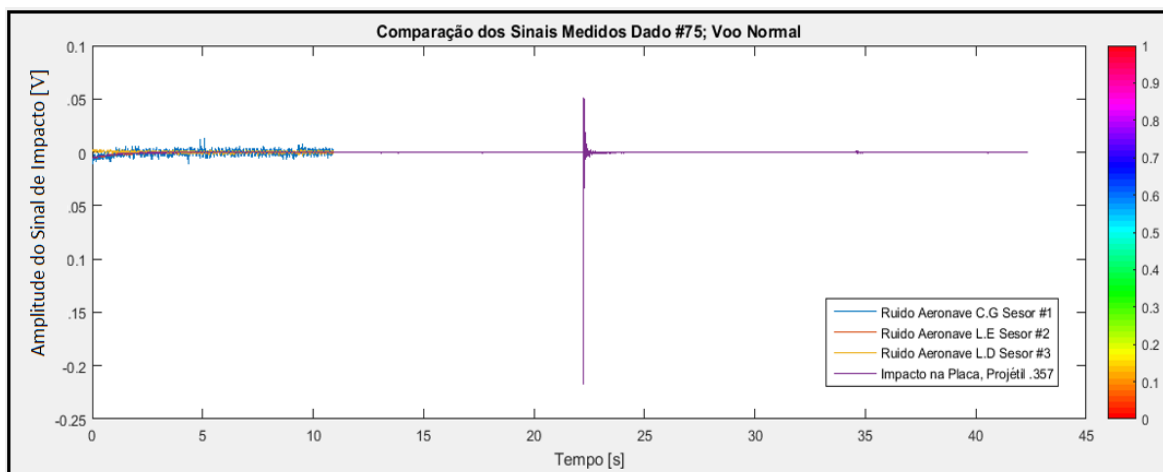


Gráfico 9 - Comparação dos sinais medidos-dado#75-voos normal

O Gráfico 9 apresenta uma aeronave em voo normal de deslocamento, atingindo um altura de 304,8 metros do terreno, haja vista que de acordo com as regras de tráfego aéreo o voo VFR (*Visual flight rules*) para Helicópteros que pretendem voar em regiões dentro do espaço aéreo controlado devem observar simultaneamente condições de visibilidade de voo que devem ser iguais ou superior a 3000 metros, e permanecer no mínimo a 1.500 metros horizontalmente e 152,4 metros verticalmente de nuvens ou qualquer outra formação meteorológica com solo ou água, de maneira que as formações meteorológicas, abaixo do nível de voo, não bloqueiem mais de 50% da área de visão do piloto.

Levando em consideração os fatores aerodinâmicos promovidos pelo regime de voo empregado nesta análise, observa-se um movimento harmônico nos três sinais captados da aeronave, com uma observação quanto aos dados captados pelo sensor localizado próximo a região do centro de gravidade da aeronave que identificou pequenas variações de amplitude no seu movimento harmônico. Ainda, aos 22 segundos de análise, é possível a identificação do *índice de dano* promovido pelo impacto do projétil calibre .357 Magnum, disparado através do revólver Taurus 617 Inox, com amplitude nitidamente maior que as “linhas bases” captadas da aeronave.

Ao observar os valores de ruídos na unidade de medida de RMS, (Gráfico 10), além de identificar uma possível sobreposição do índice de dano, promovido pelo calibre .357 Magnum, sobre as “*linhas bases*” identificadas, é possível comparar entre os valores dos ruídos encontrados em diferentes pontos da aeronave.

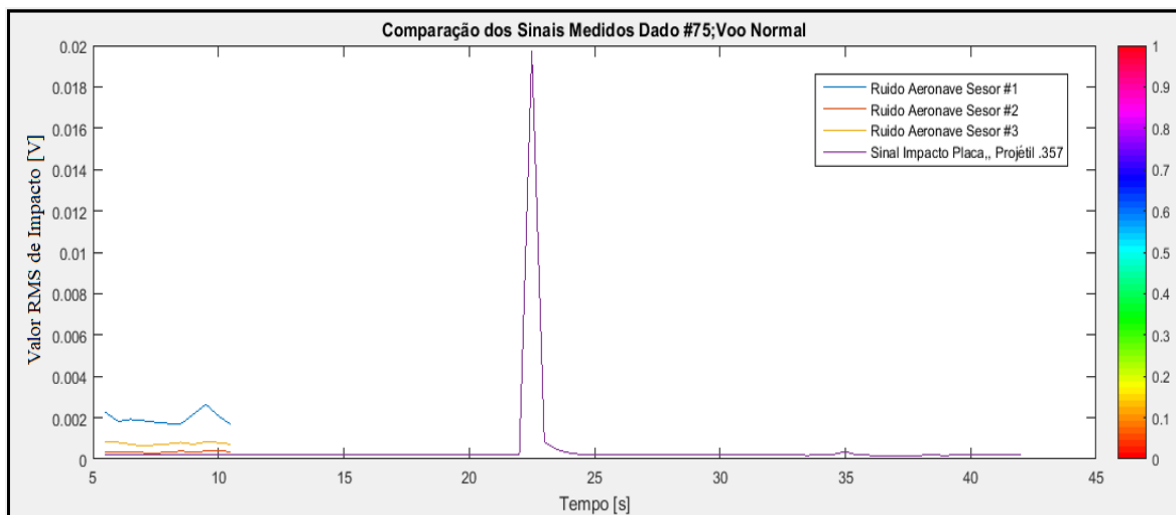


Gráfico 10 - Comparando valores de unidade de medida RMS

Apesar dos três extensômetros estarem localizados na mesma aeronave, é necessário salientar que foram fixados em diferentes regiões, e consequentemente, podem identificar valores distintos para uma mesma fonte de vibração. Fato este levando-se em consideração que para promover um voo mais estável, devido aos fatores adversos de origem climáticas e ambientais, o piloto atua constantemente nos comandos de voo, promovendo, muitas vezes, mudanças bruscas quanto ao ângulo de inclinação das pás do rotor principal ou rotor traseiro de forma conjunto ou individual.

Estas mudanças, promovem um desequilíbrio proposital das forças aerodinâmicas atuantes nos rotores da aeronave, promovendo vibrações que são transmitidas para a estrutura da célula até que sejam minimizadas por mecanismos antirressonância existentes.

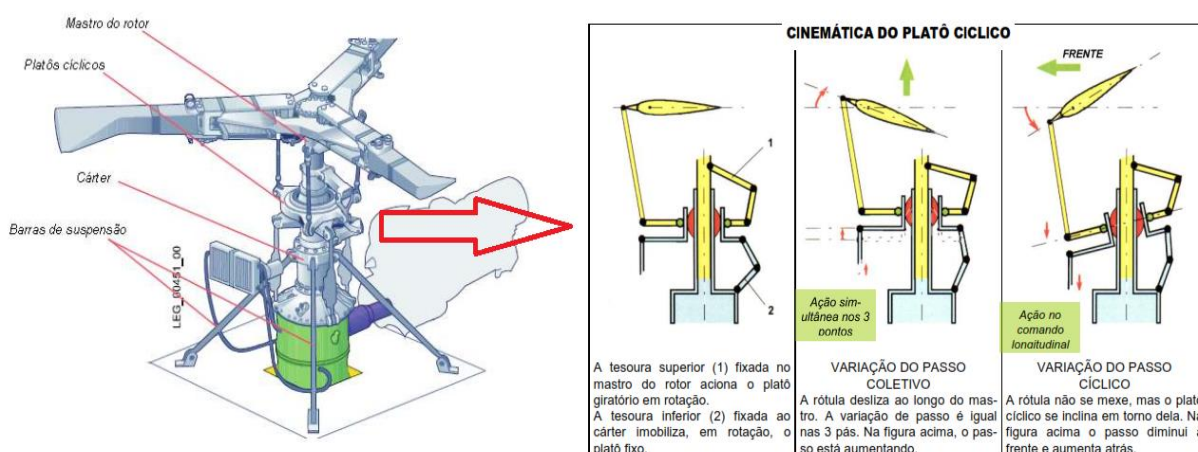


Figura 73 - Cinemática do platô cíclico

A Figura 73, demonstra a variação dos ângulos das pás do rotor principal, durante a intervenção do piloto nos comandos de voo, coletivo e no cíclico, derivando em maior ou menor

arrasto pela(s) pá(s) da aeronave que ao final resulta em uma interferência vibracional no conjunto do rotor como todo.

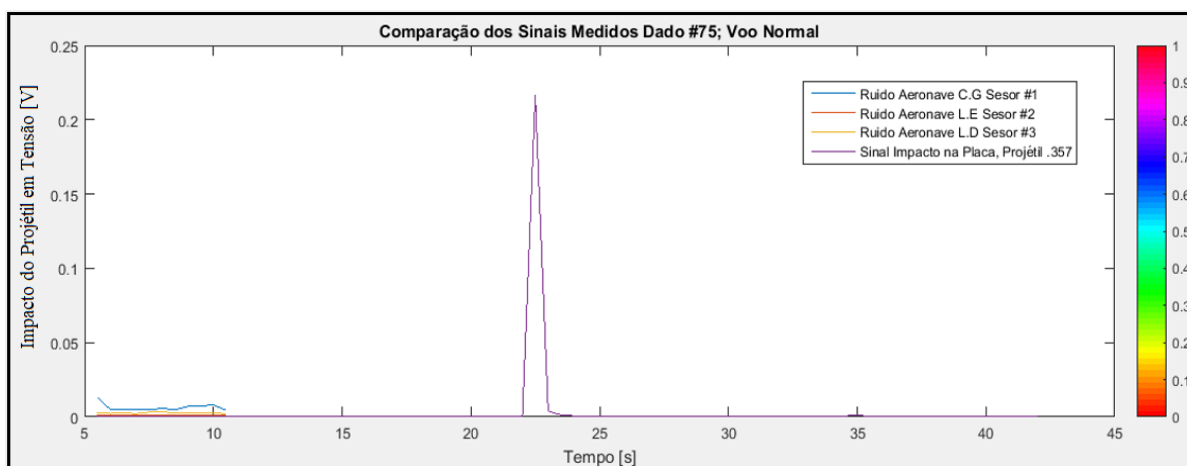


Gráfico 11 - Comparação dos sinais medidos; voo normal

Ao analisar os dados gerados pelos sinais do impacto do projétil no corpo de prova (Gráfico 11), observa-se também de forma nítida, uma possível sobreposição do sinal de impacto na placa, sobre os sinais identificados na aeronave. Seguindo a interpretação de quanto maior as atitudes e interferências nos comandos de voo, pelo piloto, maior será a amplitude das frequências identificadas na aeronave, em um voo operacional policial, a aeronave sofre constantemente com os fatores de turbulência e com as variações das forças de sustentação, cinética dos rotores, e dos grupo moto propulsor, já que o piloto promove um voo engajado, que muitas vezes expõe a aeronave aos seus limites operacionais de voo.

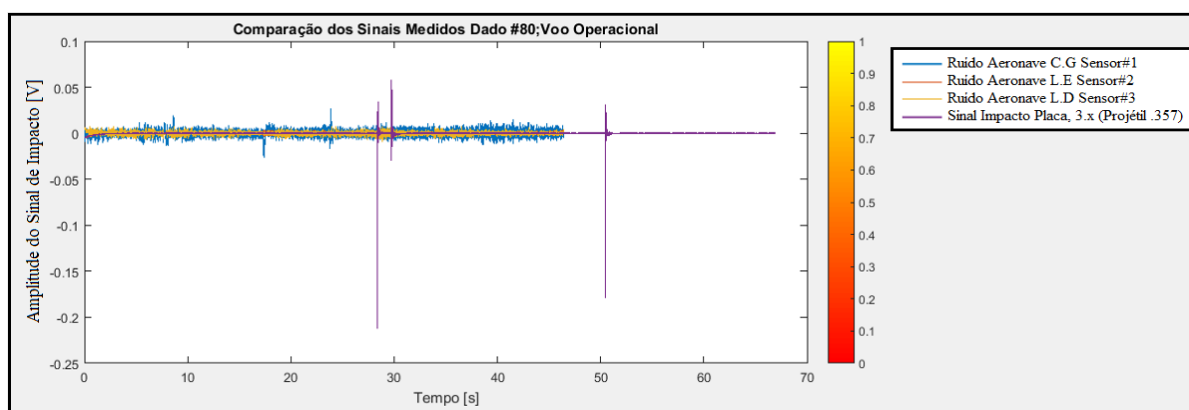


Gráfico 12 - Comparando sinais medidos-dado#80- voo operacional

O Gráfico 12 apresenta a linha base da aeronave em três pontos distintos, sobreposta ao índice de dano, originada por uma sequência de três disparos de projétil calibre .357 Magnum, disparado pelo revólver Taurus 617 Inox, em um voo operacional policial de aproximadamente 91,44 metros. Embora a aeronave apresente um voo mais arrojado, nesta análise, suas vibrações não foram capazes de sobrepor as amplitudes vibracionais ocasionadas

pelos choques mecânicos de alta energia provocados pelo projétil .357 Magnum na placa de carbono.

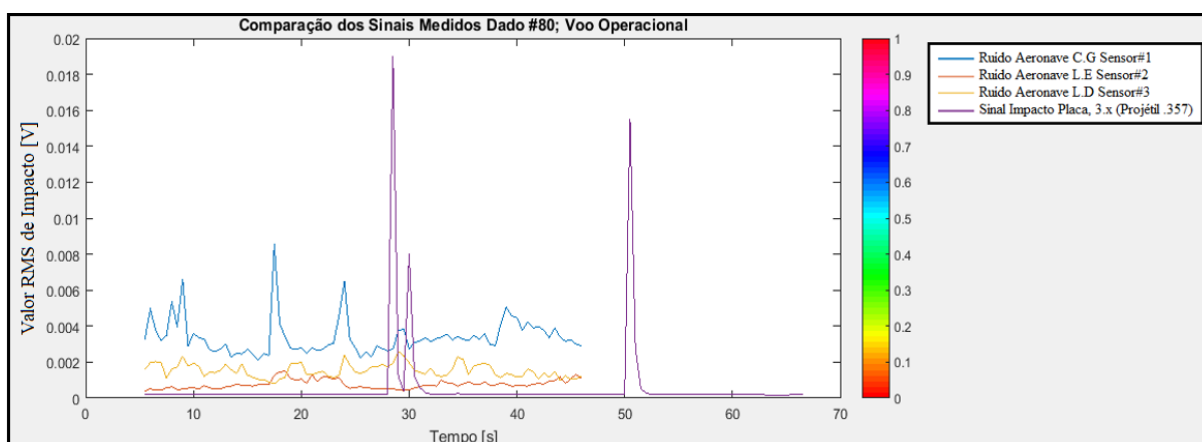


Gráfico 13 – Comparando valores de unidade de medida RMS

No Gráfico 13 pode-se verificar claramente as variações de amplitude das frequências dos ruídos captada por cada extensômetro fixado na aeronave e identificar alguns aspectos importantes relacionados a sua posição. O sensor #1, está localizado mais próximo ao centro de gravidade da aeronave, estando assim mais exposto que os demais sobre as vibrações transmitidas pelo rotor principal. Já os sensores #2 e #3, por estarem ambos a uma distância angular de 30 cm do C.G, apresentam valores inferiores ao sensor #1 devido a distância da fonte geradora de vibração. Por estarem mais próximos aos componentes mecânicos antivibracionais da cabine apresentam uma mesma margem de amplitude. Contudo, se distinguem quanto as suas amplitudes, haja vista que o sensor #3 está localizado no mesmo lado do rotor traseiro.

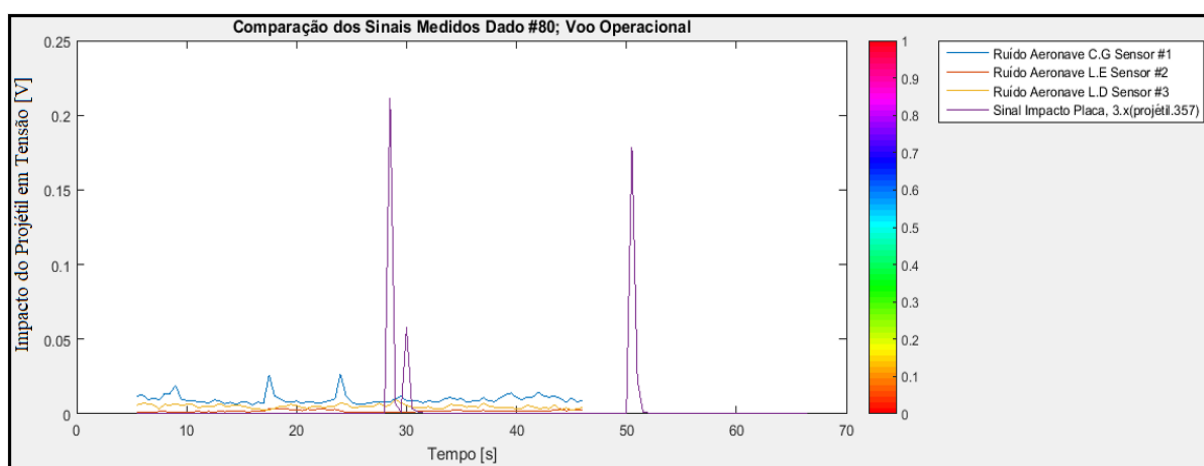


Gráfico 14 - Comparação dos sinais medidos; voo operacional

A variação da margem de amplitudes entre os sinais do sensor #1 com os sensores #2 e #3, podem ser confirmadas no gráfico 14, estando esta característica diretamente relacionada

a engenharia vibracional da aeronave e a localização do rotor traseiro no lado direito do estabilizador vertical.

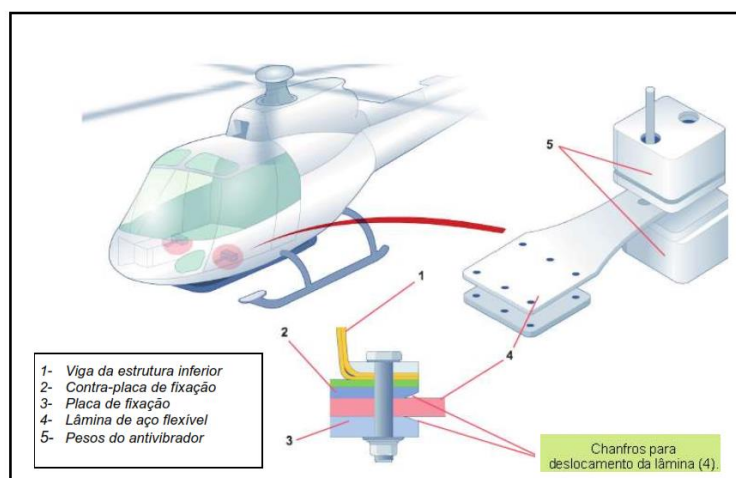


Figura 74 - Mecanismo antivibracional da cabine

Fonte: THM350B2

Todas as máquinas rotativas produzem vibrações, e sua presença é habitualmente tratada como um sério problema na aviação, e devido a isso, inúmeros sistemas de controle de vibrações são empregados nos seus projetos mecânicos com a finalidade de minimizar os danos causados por altos níveis vibracionais (AQUINO, 2011).

Ainda de acordo com Manual de manutenção da Helibras (2010), o nível vibratório da aeronave pode ser aperfeiçoado pelo deslocamento dos pesos dos antivibradores nas lâminas de aço, que na aeronave AS350B2, estão localizados entre o beque a carenagem inferior da cabine, próximos à região inferior do banco dos pilotos, conforme Figura 74.

Em uma segunda análise de voo operacional, com altura de 91,44 metros do solo, pode-se verificar que apesar da dinâmica de voo ser um pouco mais agressiva, ainda se pode diferenciar a amplitude do sinal da linha base inferior do índice de dano produzido pelo choque mecânico.

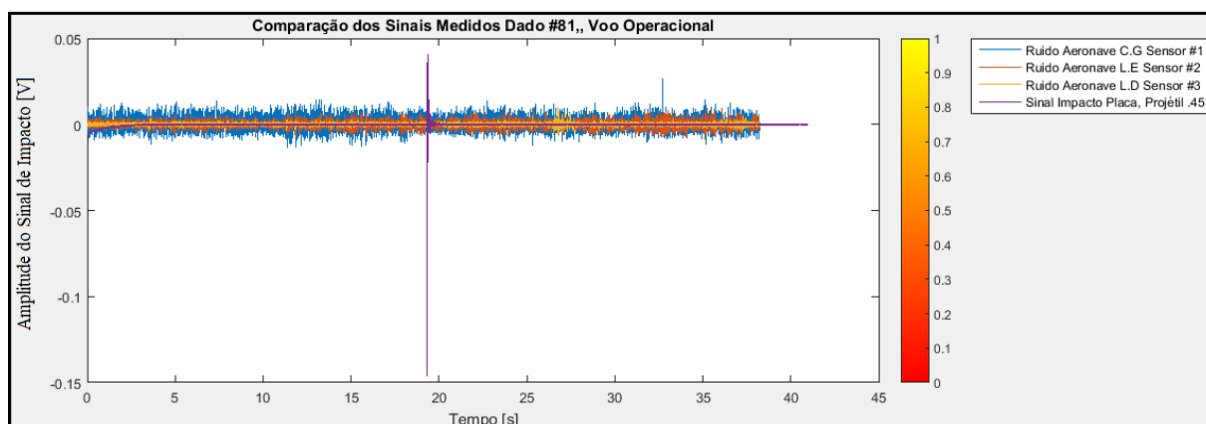


Gráfico 15 - Comparação dos sinais medidos-dado #81- voo operacional

O Gráfico 15, em conjunto com os Gráficos 16 e 17, na sequência, demonstram a *linha base* da aeronave captada nos três diferentes pontos estudados, estando sobreposta pelo índice de dano gerado por um choque mecânico de alta energia proveniente de um projétil calibre .45 ACP+P, disparado por uma pistola Glock G21 4ª geração. Embora a aeronave apresente um voo mais arrojado que os anteriores, suas vibrações não conseguiram sobrepor as vibrações provenientes do projétil utilizado.

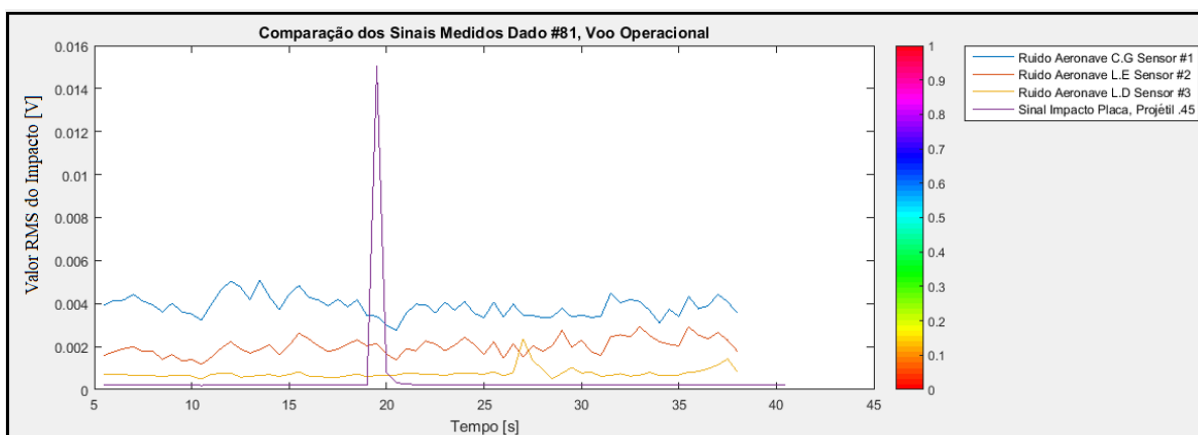


Gráfico 16 - Comparando valores de unidade de medida RMS

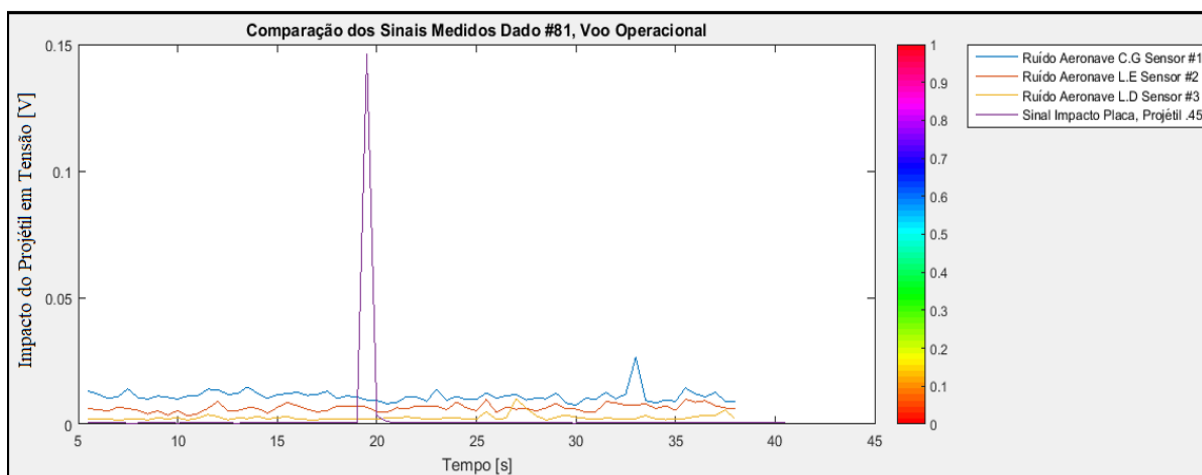


Gráfico 17 - Comparação dos sinais medidos; voo operacional

Ainda que, as manobras de voo feitas pelos pilotos, sejam feitas próximo aos limites aerodinâmicos estabelecidos pelo fabricante, é necessário salientar as evidências de diferenciação dos choques mecânicos por meio de seus valores de picos, conforme o Gráfico 17. Mesmo possuindo dimensões, velocidades, e energia diferentes os impactos mecânicos de alta energia possuem a mesma característica vibracional, ou seja, apresentam uma grande quantidade de energia em um pequeno espaço de tempo.

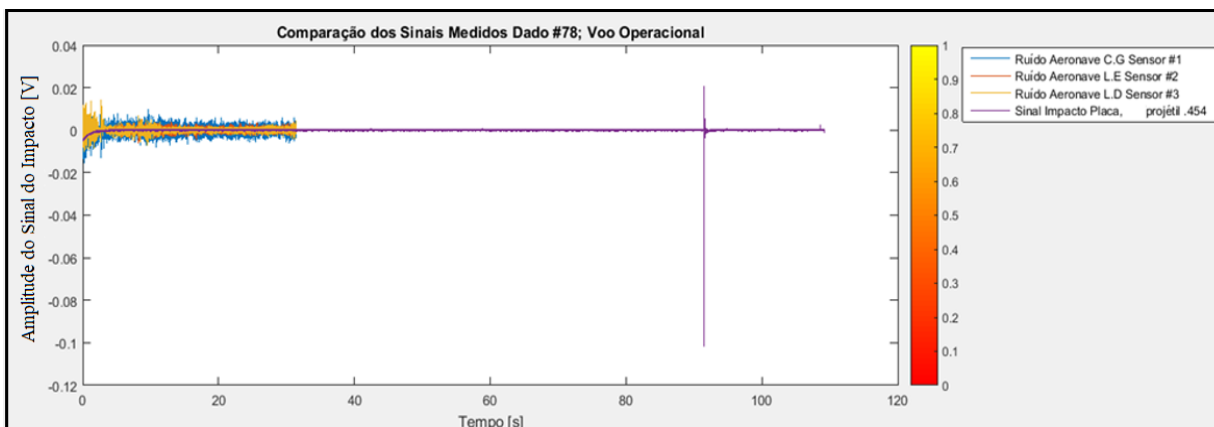


Gráfico 18 - Comparação dos sinais medidos-dado #78- voo operacional

Os Gráficos 18, 19, e 20 associam as vibrações da aeronave em um voo operacional, típico de uma ocorrência policial de alta complexidade, com o índice de impacto produzido por projétil .454 Casull, que contém um poder energético similar ao de um fuzil de assalto calibre 5,56 x 45mm, sobrepondo a linha base da aeronave em um voo de aproximadamente 91,44 metros de altura e velocidade de 25,72 m/s.

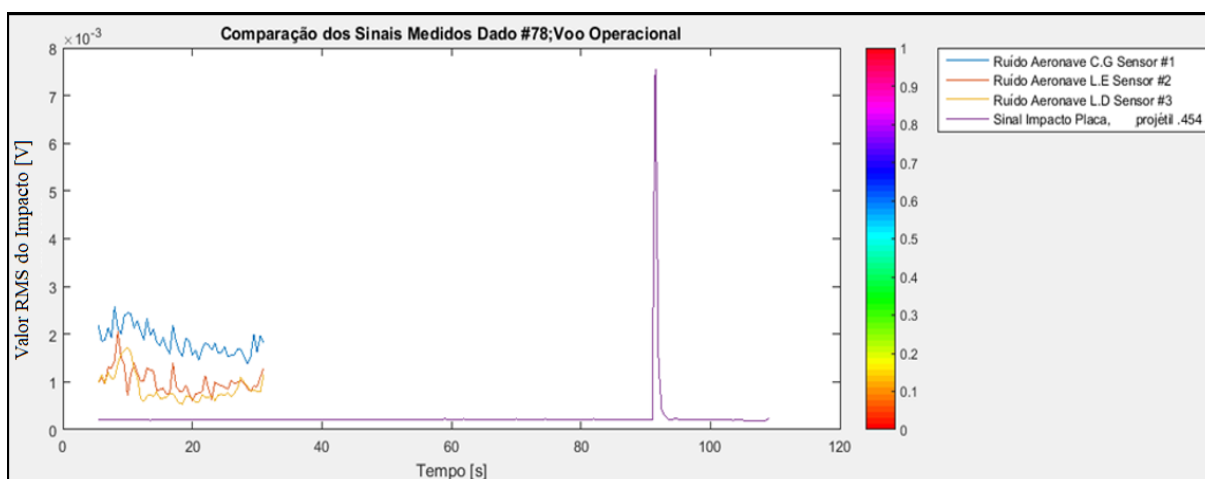


Gráfico 19 - Comparando valores de unidade de medida RMS

Através do gráfico 19 pode-se verificar, que as vibrações captadas pelos sensores #1, #2 e #3, apresentam um maior valor rms do impacto do projétil em volts comparado com os demais voos apresentados na pesquisa. Este fato pode estar associado as variações repentinas dos movimentos de batimento, arrasto, variação do passo dos seus rotores, sendo que o Sensor #1 devido a sua localização sofre uma maior influência das vibrações do rotor principal, enquanto os sensores #2 e #3, podem ser diferenciados entre si pela influência vibracional do rotor de cauda, localizado no lado direito do estabilizador vertical, assim como os efeitos aerodinâmicos de turbilhonamentos gerados no rotor traseiro, durante guinadas para esquerda em velocidade reduzida, que diminuem sua eficiência em voo.

O rotor de cauda possibilita o controle do helicóptero em relação ao eixo de guinada, estando envolvidos nesse cenário as forças de torque de reação do rotor principal (Cr) e o empuxo (Ty) do rotor de cauda com o momento: $M = L.Ty$ sobre o centro de gravidade, que conforme seja inserido uma mudança de direção de voo na máquina, estas forças tendem a sofrer variações, ocasionando maior vibração de seus componentes devido a atuação dos efeitos aerodinâmicos envolvidos (Figura 75).

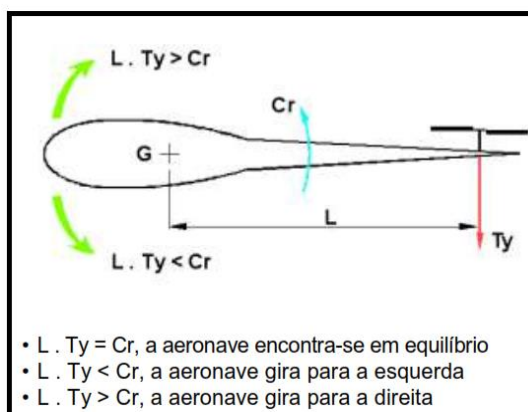


Figura 75 - Controle do helicóptero em relação ao eixo de guinada
Fonte: THM HS350B2

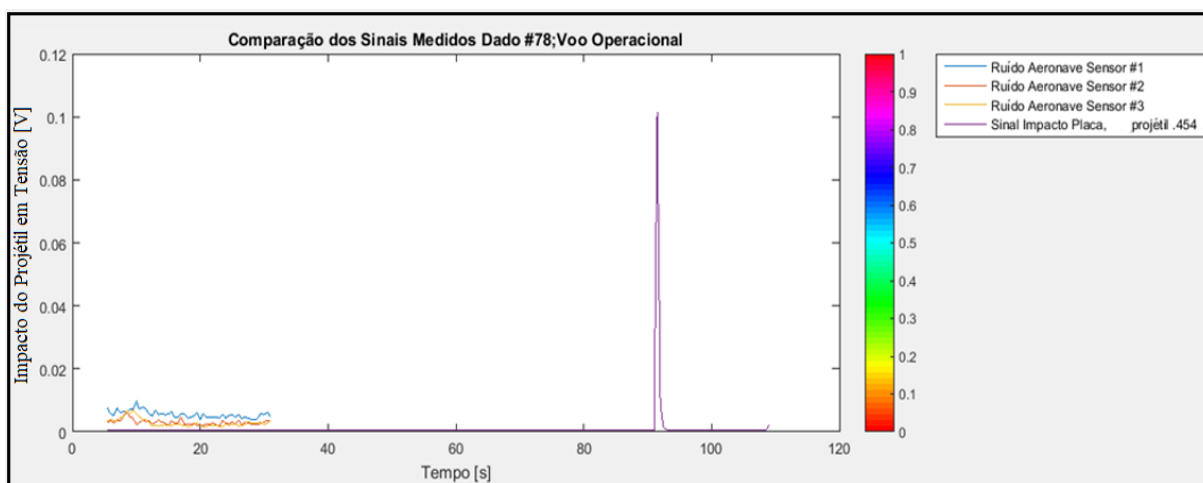


Gráfico 20 - Comparação dos sinais medidos-dado #78- voo operacional

O Gráfico 20, simula a identificação do choque do projétil em uma ocorrência policial de alta complexidade. A superioridade do sinal de impacto do projétil em Volts de uma munição .454 Casull, que contém poder energético similar ao de um fuzil de assalto 5,56x45mm, amplamente utilizado pelas ações criminosas em ocorrências de alta complexidade, é nitidamente superior as linhas base, encontradas em um voo operacional policial.

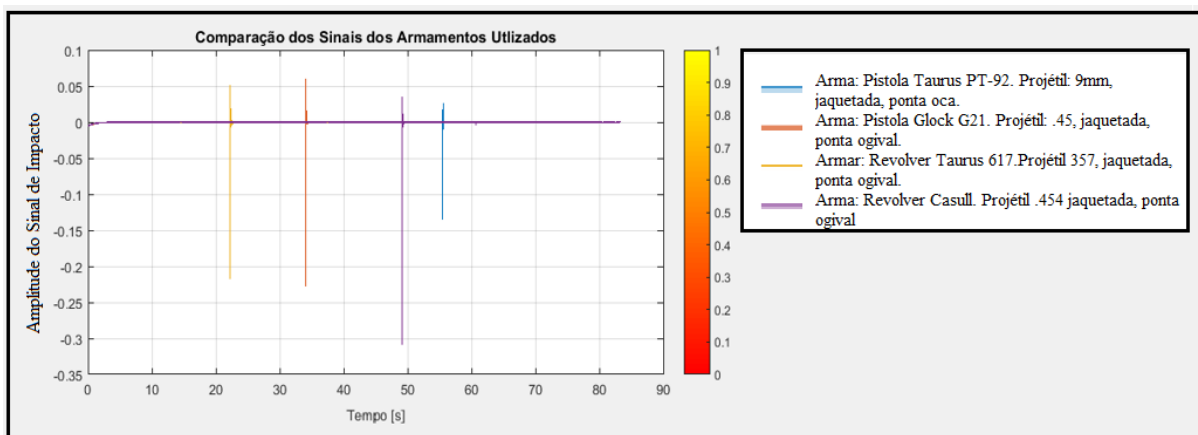


Gráfico 21 - Comparação dos sinais - armamentos utilizados

O Gráfico 21 nos proporciona uma análise comparativa dos valores de amplitude vibracionais de cada calibre utilizado. Em uma ordem crescente, o projétil de calibre 9 mm Luger obteve o menor valor de todos 0.18 V, seguido pelos calibres .45 ACP+P com 0.27 V, calibre .357 Magnum e .454 Casull com 0.29 V e 0.35 V respectivamente. Ao confrontar estes dados com os valores energéticos medidos na boca do cano de suas respectivas armas, observamos uma proporção direta, conforme os dados da tabela 9.

Tabela 9 - Valor energético

| Calibre do Projétil | Velocidade medida no cronógrafo da bancada de testes (m/s) | Valor energético medido na boca do cano da arma (Joules)* | Amplitude do Sinal (V), relacionada ao impacto do projétil |
|---------------------|--|---|--|
| 9mm | 410 | 670 | 0.18 |
| .45 | 345 | 712 | 0.27 |
| 357 | 335 | 940 | 0,29 |
| .454 | 615 | 2531 | 0,35 |

*Baseado na tabela de valor energético da Taurus.

De acordo com os dados relacionados na tabela 9, conclui-se que os valores de amplitude do sinal, proveniente do impacto do projétil em um determinado alvo, são diretamente proporcionais aos valores energético medido na boca do cano com os diâmetros dos calibres estudados, porém nem sempre, existe uma relação de proporcionalidade direta entre os valores energéticos medidos na boca do cano da arma com a velocidade medida dos projéteis medidas no cronógrafo da bancada de testes de disparo.

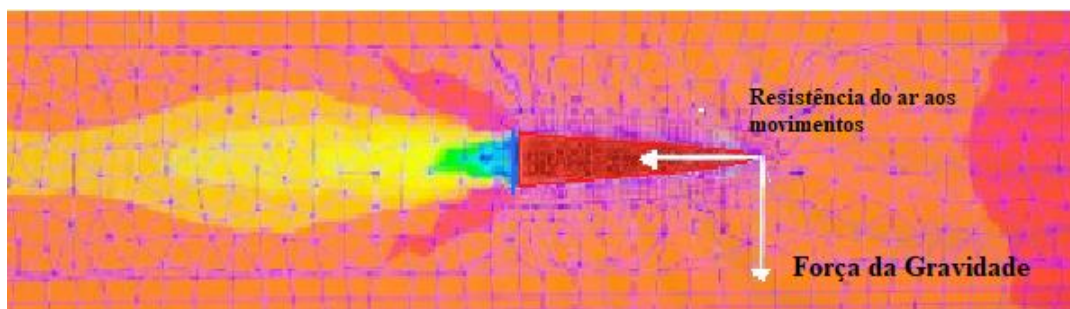


Figura 76 - Atuação das forças de turbulência em projétil calibre 55.6
 Fonte: Aerothermal Solutions. (2019)

A Figura 75 foi elaborada em conjunto com a empresa Aerothermal Solutions e seu software Ennova Mesh Generator Metacomp's CFD++ Tecplot 360 EX, durante demonstração de apresentação do seu produto no III CAB – III Congresso Aeronáutico Brasileiro- que demonstra as forças de turbulência existentes em um projétil calibre 5,56x45mm, a ação da força gravitacional e as forças de resistência do ar inserida no projétil.

Devido a fatores balísticos relacionados ao peso, tipo e quantidade de pólvora e formato do projétil, podem ocorrer variações na velocidade de propulsão do projétil devido a interferências das forças de compressão sobre a ponta do projétil; componente de fricção do ar sobre as superfícies laterais do projétil; e força de sucção na retaguarda do projétil (PINTO, 2009).

De acordo com análise dos resultados obtidos fica claro a capacidade da detecção do impacto de projéteis proveniente de arma de fogo na referida aeronave através da metodologia proposta, uma vez que, o valor de pico da amplitude do sinal de impacto gerado é muito superior aos valores de linha base encontrados no sistema de medição acoplado na aeronave. Todavia, a especificação do calibre do armamento que realizou o disparo requer informações adicionais, tais como, a altitude da aeronave ao solo e a posição do atirador infrator. Essas informações permitem o cálculo da balística intermediária e a comparação da energia de impacto na fuselagem com a energia na boca do cano do armamento, possibilitando assim a possível detecção do calibre utilizado.

Além disso é importante deixar claro que através do sistema proposto é possível desenvolver um instrumento, que por exemplo, utilizando um painel mostrador de leds com cores diferentes possibilite informar à tripulação que o disparo que atingiu a aeronave possui baixa ou alta energia de impacto. Desta forma o comandante da aeronave tomará as devidas providências.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho possibilitou a detecção de impactos de alta energia pela análise vibracional das estruturas das aeronaves de asas rotativas através da captação das vibrações existentes na fuselagem. A onda vibracional gerada, chamada neste trabalho de “*índice de dano*”, pode sobrepor a “*linha base*” dessas aeronaves permitindo assim a interpretação do impacto e ou dano mecânico-estrutural.

A revisão de literatura, junto com o estudo da documentação da aeronave que engloba toda a parte de estudo realizada pelo Controle Técnico de Manutenção-CTM- demonstrou a importância de uma análise previa sobre as reais condições de operacionalidade da aeronave, possibilitando a elaboração de um planejamento de ordem de serviço (APÊNDICE A) cujo foco foi verificar os parâmetros vibracionais da aeronave, suas margens de tolerância estabelecidos pelo fabricante, e promover uma inspeção geral de célula e GMP observando a existência de pontos críticos capazes de influenciar a “*linha base*” da aeronave estudada.

O emprego prévio da técnica de monitoramento vibracional junto ao teste de simulação em banca, possibilitou a adaptação e calibração dos aparelhos a serem utilizados, a elaboração de mecanismo de simulação vibracional de voo e a viabilidade para o estudo real de monitoramento vibracional com emprego de armas de fogo.

As diversas análises em distintos voos, possibilitaram apontar, individualmente, as interferências vibracionais ocasionadas proveniente da interação dos sistemas mecânicos de comando de voo com os seus efeitos aerodinâmicos, a “*linha base*” existente em determinados regimes de voo e suas variações de amplitudes vibracionais.

A utilização da técnica de análise vibracional, durante os experimentos de choques de alta energia, proveniente de arma de fogo na aeronave, possibilitaram além da identificação e diferenciação da onda vibracional gerada através do que foi denominado “*Índice de dano*” de cada projétil utilizado e suas sobreposições as diferentes “*linha base*” existentes em cada regime de voo, identificar que os níveis energéticos de cada projétil são diretamente relacionados aos seus níveis vibracionais de dano.

Esses fatos apontam a viabilidade para o desenvolvimento de um sistema de detecção vibracional contínuo em helicópteros, que devido a suas atribuições promovem voos em ambientes diversos, suscetíveis a serem atingidas por choques mecânicos de alta energia, como disparos de arma de fogo nas aeronaves utilizadas pelas forças policiais brasileiras, desprovidas desta tecnologia de monitoramento.

Por fim, é importante ressaltar que o presente trabalho permitiu a detecção dos impactos realizados por arma de fogo, mas a detecção dos calibres das mesmas depende da continuação do presente estudo devido à complexidade envolvida nas etapas subsequentes.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade as atividades dessa linha de pesquisas, alguns temas são sugeridos:

- Análise numérica de vibrações existente no conjunto eixo-árvore de transmissão, considerando-se como fonte de excitação os diferentes esforços existentes nos flectores, nos mancais, no eixo de potência, e no anel cardan do eixo de potência do motor a CTP, assim como as vibrações existentes nos eixos de acionamento dianteiro e traseiro da CTT.
- Estudo da influência dos efeitos aerodinâmicos sobre a mudança de passo das pás do rotor principal, do rotor traseiro e das vibrações presentes sobre os eixos da geradora de gases e do eixo da turbina livre, relacionando a rpm de N1 (parte fria) e N2 (parte quente) do GMP quanto a “*linha base*” existente em cada regime de voo.
- Análise comparativa dos efeitos giroscópio com as variações da integridade física dos semi-mancais laminados dos rotores de cauda, dos terminais rotulados das hastes de comando de passo, e do mancal cônico laminado que contém a finalidade de amortecer o batimento das pás rotor de cauda, sobre a “*linha base*” das aeronaves de asas rotativas.
- Análise de impacto de alta energia na fuselagem de aeronaves de asas rotativas em distâncias variadas com diferentes geometrias de projétil para cada calibre para possibilitar a detecção real do calibre da arma de fogo que realizou o disparo.
- Modelar uma função de transferência que permita a correlação entre o impacto do projétil na fuselagem da aeronave medido em volts com a energia do impacto em joules.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEROTHERMAL SOLUTIONS AND SOFTWARE DISTRIBUTOR. Mini-curso: Simulação Numérica de Fluidos para a Indústria Aeronáutica e Astronáutica- III Congresso Aeronáutico Brasileiro, 2019. UFSM- Universidade federal de Santa Maria. Disponível em: https://www.ufsm.br/unidades-universitarias/ct/wpcontent/uploads/sites/375/2019/02/Grade-da-Programa%C3%A7%C3%A3o_V4.pdf, Acesso em 31 jan.2020.

ALMEIDA JÚNIOR, O. de Um estudo sobre o movimento dos projéteis balísticos e sua trajetória [livro eletrônico], São Paulo: Blucher, 2017. 70 p.; PDF; il. Color. Disponível em: <https://openaccess.blucher.com.br/download-pdf/349>. Acesso em: 20 nov. 2019.

AQUINO, A. S. Controle de Vibração de Um Sistema sob Desbalanceamento Rotativo Utilizando Atuador de Liga com Memória de Forma.2011.135f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.

ARAÚJO JÚNIOR, R.; GERENT, F. C., 2011. Apostila Armas de Fogo, 2010.

ARAKELIAN, M. B. Bancada De Testes De Arma De Fogo Por Acionamento Remoto. 2016. 78 p. Disponível em: http://bdm.unb.br/bitstream/10483/16651/1/2016_MarcosBarkevArakelian_tcc.pdf Acesso em 17 de nov. de 2019.

BASTOS, E. C. S. Evolução do helicóptero para fins militares das origens a guerra do Vietnã. Centro de Pesquisas Estratégicas Paulino Soares de Souza, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, 2004. Disponível em: < <http://www.ecsbdefesa.com.br> >. Acesso em: 25 mar 2019.

BECKSYEADA, M.W., PUDUPPAKKAMA, K., THAKREB, . P., YANGB, V. “Modeling of combustion and ignition of solid-propellant ingredients,” Progress in Energy of Combustion Science, vol. 33, pp. 497–551, 2007.

BECKERT, S.F. Análise dos sistemas de medição – MSA – 4. EDIÇÃO. Disponível em <https://extensaometrologia.paginas.ufsc.br/files/2016/02/01-msa-apresentacao.pdf>. Acesso em 14 fev. 2020.

BENVENUTO, E. An introduction to the history of structural mechanics: part II - vaulted structures and elastic systems. Edição: New York: Springer-Verlag, c1991.

BEZERRA, S.R.S; SILVA, G. Qualificação Dos Recursos Humanos Em Segurança De Voo Na Aviação Do Exército Brasileiro. 22p, 2018. Disponível em: <https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/3185/1/SILVIO%20RICARDO.pdf>. Acesso em 22 de nov.2019.

BIBLIOGRAFIA, LEONARDO DA VINCI. O helicóptero, por Leonardo da Vinci. 2011. Disponível em: https://www.ebiografia.com/leonardo_vinci/ . Acesso em 18 de nov. 2019.

BISPLINGHOFF, R. L. ASHLEY H., and HALFMAN. R. L. Aeroelasticity. Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1996.

BRAGA, G.W. Estudo da Vibração de Corpo Inteiro em Pilotos de Helicóptero Esquilo AS 350 L1. 2012. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

BRASIL. Agência Nacional De Aviação Civil – ANAC (2014). Regulamento Brasileiro da Aviação Civil RBAC nº 145 Emenda nº 01. Organizações de Manutenção de Produto Aeronáutico. Brasília, DF: ANAC. Brasília, DF, Brasil, 2014.

BRASIL, DAC - Departamento de Aviação Civil, Programa de Acompanhamento e Análise de Dados de Voo, IAC 119-1005, Brasília, DF, Brasil, 2004.

BRASIL. Decreto nº 3.655, 20 de novembro de 2000. Regulamento para a Fiscalização de Produtos controlados (R-105). Brasília, DF, Brasil, 2000.

BRASIL. Força Aérea Brasileira. Chefe do Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Portaria no 1/DAM, de 03 de dezembro de 2012. Aprova a edição do MCA 3 -3 que dispõe sobre o Manual da Prevenção. Brasília, DF, 2012.

BRASIL. Lei nº 3.689 de 3 de outubro de 1941. Código de Processo Penal. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Decreto-Lei/Del3689.htm>. Acesso em: 10 jun. 2010.

BRASIL. Ministério da Defesa. Portaria Normativa no 3.005/MD, de 14 de novembro de 2012. Aprova a Diretriz de Prevenção e Investigação de Acidentes Aeronáuticos na Aviação Militar Brasileira. Brasília, DF, 2012.

BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora 12: Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos. Manual de Legislação Atlas, 65º Edição. São Paulo: Atlas, 2011.

BRODE, H. L; ENSTROM, J. E. A Numerical Method for Calculating Interior Ballistics. New York, New York, United States of America, 1970.

BRÜEL, KJÆR. Sound & Vibration Measurement A/S.

BUENO, Y. C. A importância do conhecimento sistêmico do engenheiro na criação e manutenção de aeronaves. 2017. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica). Centro Universitário Anhanguera de Pirassununga, Pirassununga- São Paulo, 2017.

CBC. Companhia Brasileira de Cartuchos. Disponível em: <https://www.cbc.com.br/produtos/categoria/municoes-para-armas-curtas/>. Acesso em 30 nov.2019.

CARLUCCI, D. E., JACOBSON, S. S. Ballistics theory and design of guns and ammunition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008

CARLUCCI, D.E.; JACOBSON, S.S., Ballistics: theory and design of guns and ammunition.

CRC Press, 2010.

CARVALHO, F. R. da R. Apostila Balística Forense: Provas Criminais, 2010.

CORDEIRO JÚNIOR, J.L. Estudo comparativo entre as aeronaves monoturbinas de asa rotativa para utilização no serviço bombeiro militar. 2012. 71f. Monografia (Curso de Formação de Oficiais do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina), Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, Diretoria de Ensino Centro de Ensino Bombeiro Militar Academia Bombeiro Militar, Florianópolis – SC.

CORRÊA, S. V. A responsabilidade penal do comandante de aeronave de asas rotativas da polícia militar de Minas Gerais em face das missões de defesa social. Revista Piloto Policial, 2013. Disponível em: <https://www.pilotopolicial.com.br/wp-content/uploads/2017/06/MONOGRRAFIA-FINAL-9-revisada.pdf>. Acesso em 18/03/2019.

COSTA JÚNIOR, D. Desconcentração do radiopatrulhamento aéreo: a experiência da Polícia Militar de Minas Gerais na Macrorregião de Policiamento Ostensivo do Triângulo Mineiro. 2003. Monografia (Curso de Especialização em Segurança Pública) – Academia de Polícia Militar de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

COURTNEY, A.C, COURTNEY, M.W. Links between traumatic brain injury and ballistic pressure waves originating in the thoracic cavity and extremities. *brain Inj.* 2007; 21:657-662.

COURTNEY, A.C, COURTNEY, M.W. Physical Mechanisms of Soft Tissue Injury from Penetrating Ballistic Impact. 2012. United States Department of Defense.

DEHART, R., Fundamentals of Aerospace Medicine. Lea & Febiger. Philadelphia, 1985.

DONG, T.; KIM, N.H. Cost-Effectiveness of Structural Health Monitoring in Fuselage Maintenance of the Civil Aviation Industry †. *Aerospace*2018, 5, 87.

DPAT. Divisão de Repressão aos Crimes contra o Patrimônio e ao Tráfico de Armas. Enfrentamento ao Tráfico de Armas, Brasília-DF, Brasil. 2015. Disponível em : https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cspcco/conheca-a-comissao/subcomissoes/copy_of_Apresentao201015PF.pdf. Acesso em: 25 de nov.2019.

ESPINGARDA. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Espingarda>>. Acesso em: 7 jan. 2019.

FBSP. Fórum Brasileiro de Segurança Pública. Anuário Brasileiro de Segurança Pública - 2018. São Paulo- SP, Brasil, 90 p. - ano 12, fev. 2019.

FLEMMIG, R. História do Helicóptero. Associação Brasileira de Pilotos de Helicóptero. 2011. Disponível em: <https://www.abraphe.org.br/>. acesso em 18 de out. 2019.

FORD, Terry, Vibrations in Helicopters – reduction and monitoring, Aircraft Engineering and Aerospace Technology. Volume 69, Number 2, MCV University Press, 1997, pp119-125.

GEORG, N.J.; KELNER, L; SILVINO JÚNIOR, J.B. Armas De Fogo: Aspectos Técnicos

Periciais. Revista Jurídica – CCJ, v. 15, nº. 30, p. 137 - 156, ago./dez. 2011.

GLOCK. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Glock>>. Acesso em: 27 set. 2019.

GOMIDE, Tito L. F., PUJADAS, Flávia Z. A., NETO, Jerônimo C. P. F. Técnicas de inspeção e manutenção predial: vistorias técnicas, check-up predial, normas comentadas, manutenção x valorização patrimonial, análise de risco. São Paulo, Editora PINI, 2006.

GUILHERME, J. Análise de Vibração Estrutural: conceitos básicos. 2016. Disponível em: <http://ensus.com.br/análise-de-vibração-estrutural-conceitos-basicos-2/> Acesso em : 5 dez, 2019.

HARRIS, C. M., ALLAN G. Piersol Harris´ Shock and Vibration Handbook, McGrawHill, 2002.

HELIBRAS. THM AS350B2: Manual de treinamento para Mecânicos. Brasil/ Alemanha, 2010.

HIPÓLITO, M. M; TASCA, J. E. Superando o mito do espantalho: uma polícia orientada para a resolução dos problemas de segurança pública. 1. ed. Florianópolis: Insular, 2012.

HOBBS, T. Diálogo entre um filósofo e um jurista. Tradução de Maria C. Guimarães Cuprino. São Paulo: Lady, 2004.

HUSTON, E.; LIU, D. Principles of Vibration Analysis with Applications in Automotive. Engineering **Hardcover**. SAE International, 562p, 2011.

ICAO, Doc 9859 – Safety Management Manual, 3d Edition, 2015.

IIDA, I. Ergonomia: projeto e produção. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

INMETRO. Metrologia Científica e Industrial. 2012. Disponível em: Acesso em 28 de set. de 2019.

JANDIAL R, REICHWAGE B, LEVY M, DUENAS V, STURDIVAN L. Ballistics for the neurosurgeon. *Neurosurgery*. 2008;62(2):472–480.

JOHNSON, I. A. The Nobel-Abel Equation of State: Thermodynamic Derivations for Ballistics Modeling. Australian Government, Department of Defense. Sidney: Defense Science and Technology, 2005.

KNEUBUEHL, B.P., Ballistic Protection, Switzerland, 2003.

KRIER, H., ADAMS, M. J., BAER, P. G., GOLDSTEIN, S., CELMINS, A. K., SERAO, P. Interior Ballistics of Guns (Vol. 66). (H. Krier, & M. Summerfield, Eds.) New York, United States of America: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1979.

LEMES, D. A. F. ; TOLENTINO, K. C. ; BECHEPECHE, A. P.A. Segurança De Voo A Partir Da Manutenção E Os Riscos Gerados Pelos Fatores Humanos. Anais do Curso de Engenharia Mecânica da UniEVANGÉLICA 27 de nov. a 02 de dez. de 2017 v.01, n. 01, 2017. Disponível

em: <http://anais.unievangelica.edu.br/>. Acesso em 02 dez.2019.

LUCAS, R.M.O.F. Acesso legal às armas de fogo de uso permitido no Brasil: Aspectos históricos, jurídicos e o argumento do direito individual de defesa.2015. 58f. Monografia (Graduação em Direito), Centro De Ensino Superior Do Ceará, Faculdade Cearense, Fortaleza-CE.

MAIA, F.S. Criminalística Geral. Fortaleza - CE 2012 Disponível em: http://tmp.mpce.mp.br/esmp/apresentacoes/I_Curso_de_Investigacao_Criminal_Homic%C3%ADdio/02_Criminalistica_Geral_29_11_2012.pdf. Acesso em 03 dez.2019.

MACHADO, A. J, COTA I. I. Confrontos armados envolvendo helicópteros policiais. Santa Catarina, Revista Ordem Pública, v 5 n. 2, Semestre II, 2012. Disponível em:< www.acors.org.br>. Acesso em: 27 ago. 2019.

MACHADO, A. J., REISDORFER, M, L. 2011. *Conhecimento geral dos helicópteros*: livro didático. Palhoça, Unisul Virtual, 1ª Edição.

MANNING, P.K. As tecnologias de informação e a polícia. In: CARDIA, Nancy (Coord) Policiamento Moderno. Ford Foundation. NEV – Núcleo de estudos da violência – São Paulo: Universidade de São Paulo, 2003. (Série polícia e sociedade, 7). p. 375-426

MARCHAND, A. Retrato Paul Cornu. 2007. Disponível em: < http://www.eurocopter.com/100years/FO/scripts/myFO_contenu.php?lang=EN&noeu_id=123&page_id=94> acesso em 08 out. 2019.

MARQUES, O. de S. O Emprego de helicópteros da PMMG em ocorrências policiais de alta complexidade: uma avaliação crítica sobre a sua utilização no interior do Estado. 2006. 108 f. Monografia (Curso de Especialização em Segurança Pública) - Polícia Militar de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

MECÂNICOS DE PLANTÃO. Tipos de aeronaves de asas rotativas. Disponível em: <http://mecanicosdeplantaio.com.br/site/tipos-de-aeronaves-de-asas-rotativas/> Acesso em 19 de out. 2019.

MENDONÇA, F. A. C. A ficha CENIPA 15 e as atividades de prevenção do risco aviário. Revista Conexão SIPAER, 2(3), 9- 55, 2011.

MENEZES, L. N. O Poder Aéreo e Seus Teoristas. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em:<http://www.reservaer.com.br/biblioteca/e-books/poderaereo>. Acesso em 16 de mar.2019.

MESTRE, J.C.C. Análise Numérico-Experimental de Blindagens Balísticas. 2015. 111f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica), Academia Militar, Técnico Lisboa, Lisboa, Portugal.

MINAS GERAIS. Polícia Militar. Comando-Geral. MANUAL TÉCNICO-PROFISSIONAL Nº 3.04.07/2013-CG: Regula a Prática Policial Militar Especial de Emprego de Aeronaves na Polícia Militar de Minas Gerais. Belo Horizonte: PMMG – Comando-Geral, 2013.

MINAYO M.C.S. Violência, um problema social que afeta a saúde pública. Divulg. Saúde

Debate. 2006;(35):23-35.

MINER, R. Computational interior ballistics modeling. 2013.111f. Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science. The University of New Mexico.

MIURA, H; MATSUO, A. Numerical Simulation of Solid Propellant Combustion in a Gun Chamber. 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Sacramento: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.

NASCIMENTO, E.C.V; FIGUEIREDO, G.V; VELOSO, H.S; SANTOS, J.A; AUGUSTO, V. Trabalho Acadêmico Integrador: Revólver calibre 38 e seus mecanismos de disparo. 2017. 31f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica), Instituto Federal de Minas Gerais, Arcos-MG.

NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD, Aircraft Accident Report – Midair collision of Aeronaves De Mexico, S.A., McDonnell Douglas DC-9-32, XA-JED and Piper PA-28-181, N4891F, Cerritos, California, August 31, 1986.

OACI. Fundamental Human Factors Concepts. Human Factors Digest n°1. Montreal, 1989.

OLIVEIRA, H. R. B.; SILVA, J. P.; SANTOS, L. C. B; NOVAES, W. G. Colisões com fauna significativas registradas no Brasil até dezembro 2016. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. 2017.

OUADINE, A. Y., MJAHEDE, M. AYAD, H; .KARI, A.E.(2019) Helicopter gearbox vibration fault classification using order tracking method and genetic algorithm, *Automatika*, 60:1, 68-78, 2019. DOI: [10.1080/00051144.2019.1578553](https://doi.org/10.1080/00051144.2019.1578553).

PARREIRA, R. M. R. Análise de Dados de Vibração. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa, Instituto Superior de Estatística e Gestão da Informação. Lisboa, Portugal. 2009.

PEGADO, H.A. Monitoramento De Vibrações: Uma Ferramenta Eficiente Na Prevenção De Acidentes Com Helicópteros. R. Conex. SIPAER, v. 1, n. 3, jul. 2010.

PERDOMO, R.E. Análise de Vibração em uma aeronave Bell 206 e correção das mesmas usando a ferramenta Vibrex 2000. 2004. 82f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Manutenção de Aeronaves), Universidade Tuiuti do Paraná, Curitiba, Brasil.

PEREIRA, L. A. F.. *Balística forense aplicada à defesa penal: teoria, prática, legislação*. São Paulo: LED, 1995.

PEREIRA, LR, MACHADO, MC. (2017) Atualização Tecnológica em Helicópteros de Segurança Pública. *Revista Conexão Sipaer*, Vol. 8, No. 1, pp. 33-40.

PETERS, C.E. A mathematical-physical model of wound ballistics. *J Trauma (China)* 2(6, Supp):303318, 1990

PINTO, J.M.G.T., Avaliação do Comportamento Mecânico de Blindagens Balísticas, Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

POLÍCIA FEDERAL. Cartilha de armamento e tiro. 2017 Disponível em: <<http://www.dpf.gov.br/servicos/armas/Cartilha%20de%20Armamento%20e%20Tiro.doc>>. Acesso em: 10 mar. 2019.

PRATTS, A. L. H. Análise de Viabilidade de Utilização de Helicópteros no Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina. 2008. 132f. Monografia (Curso de Formação de Oficial) – Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

RABELLO, E. *Curso de criminalística*. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1966.

RABELLO, E. *Introdução à Balística Forense*. Porto Alegre: [n/d], 1967.

RAO, S. S. Mechanical vibrations. 5th ed. Pearson – Prentice Hall, 2011.

REBOLEIRA, N.G.I. Caracterização Química e Resíduos de Pólvora na Identificação de Munições. 2013. 104f. Dissertação (Mestrado em Química), Faculdade de Ciências, Departamento de Química e Bioquímica, Universidade de Lisboa, Portugal.

REDAÇÃO MUNDO ESTRANHO Revista (<https://super.abril.com.br/mundo-estranho/qual-e-a-origem-das-armas-de-fogo/>), 2018

RODRIGUES, A. S.C. Femicídio No Brasil: uma reflexão sobre o direito penal como instrumento de combate à violência de gênero (2016) Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Direito) Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2016.

ROSEN, A., BEN-ARI, R., Mathematical Modelling of Helicopter Rotor Track and Balance: Theory. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, 200, pp. 589 – 603.

PATRÍCIO, R.S. Plataforma Computacional Web para Calibração de Sistemas de Medição. 2016. 142 f. Dissertação (Programa de Engenharia Industrial) Universidade Federal da Bahia Escola politécnica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial. Disponível em https://pei.ufba.br/sites/pei.ufba.br/files/ruama_santos_patricio.pdf. Acesso em: 15 fev.2020.

SAMPAIO, D. R. Treinamento de tiro dos tripulantes operacionais de MG. Trabalho de conclusão do curso CESP II/2008, Belo Horizonte, MG, 2008.

SANTOS, I.A; SANTOS, J.G.C; SANTOS, C.A; SANTEJANI, F.H.F; ARAÚJO, E. S.R. Controle de Vibração em Helicópteros: eficiência na segurança de voo. In: Simpósio de Engenharia, Sistema e Gestão. 2 e 3 de mai., 2019, Águas de Lindóia -SP, Brasil.

SCHEFFER, C., GIRDAR, P. *Practical Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance*, Elsevier, 2004.

SELMAN, Y.S; HASHIM, N.G.; NAAIMI, A.S.A.; SAEED, A.S. Medico-legal Study of Shockwave Damage by High Velocity Missiles in Firearm Injuries, *Fac Med Baghdad* 2011; Vol. 53, Nº. 4

SENISSE, K.R.L. 1999. *Crêterios Relevantes na Aquisi o de Helicóptero Multimiss es para a Brigada Militar, Visando o Emprego em A es e Opera es de Polícia Ostensiva e Bombeiros*. Monografia (Curso Avançado de Administra o Pol cial Militar). Academia de Polícia Militar, Brigada Militar do Estado do Rio Grande do Sul.

SÉRVULO, P.; SABA, N. Apostila de helicóptero: Conhecimentos técnicos. São Paulo, 2009.

SILVA, S. Vibra es Mecânicas. 2009. 151f. Notas de Aulas – 2^a Versão. Universidade Estadual do Oeste do Paraná UNIOESTE/Campus de Foz do Igua  Centro de Engenharias e Ciências Exatas – CECE, Foz do Igua , 2009.

SILVA, V.S.P; SILVA, W P.; Abordagem contextualizada da história do ensino tecnológico aeronáutico brasileiro, da funda o até a atualidade. Seminário Educa o e Forma o Humana: desafios do tempo presente. 5.º Seminário Educa o e Forma o Humana: desafios do tempo presente, de 25 a 27 de abril de 2017. Belo Horizonte/MG.

SILVA, H.S.G. Energia, suas formas e transforma es: uma abordagem contextualizada por meio do material não-formal. 2011. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (Gradua o em Física). Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, São Paulo, SP.

SILVINO JUNIOR, J. B.. Sistemas de Nomenclatura de Calibres de Cartuchos de Armas de Fogo. Belo Horizonte, 2010.

SISTEMA ATA 100- Manuten o de aeronaves. Disponível em: <https://aerospacebrasil.webnode.com.br/news/sistema-ata-100/> Acesso em: 10 set. 2019.

SMITH, J. A.; BOWDEN, D. R.; SMITH, S. D.; JURCSISN, J. G.; WALKER, A. Y. Dynamic characteristics and human perception of vibration aboard a military propeller aircraft. Biosciences and Protection Division Biomechanics Branch, 2007.

SOMERS, R. Eliminando Risco De Colisão De Aeronaves Em Voo. 2017. Disponível em: <https://www.sgsgroup.com.br/-/media/local/brazil/documents/white-papers/sgsbeaviation-rpas-whitepaperpra4pt17.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2019.

SUNESON A, HANSSON, H.A; SEEMAN T. Pressure wave injuries to the nervous system caused by high-energy missile extremity impact: part I. Local and distant effects on the peripheral nervous system. A light and Electron microscopic Study on pigs. J Trauma. 1990; 30:281-294.

TAVARES, G. Elementos orgânicos e fundamentais de máquinas e implementos agrícolas. Londrina: UEL. 2000, 247p.

TAYLOR, John W. R. A evolu o da Avia o. Paulo: Melhoramentos, 1982. 160p.

TELO, A. J.; ÁLVARES, M., Armamento do Exército Português, Defesa e Rela es Internacioanais, Vol I –Armanento Ligeiro, Pojecto de Investiga o da Academia Militar, 2004.

TOCCHETTO, D. *Balística Forense*: aspectos técnicos e jurídicos. 3. ed. Campinas:

Millennium, 2003.

TURBOMECA. 2019a. Master Servicing Manual (MSM); AS350 B2 - CAP 5, revisão 17, de 19/01/2019.

TURBOMECA.2019b. Airworthiness Limitations Section (ALS) AS350 B2 - Cap 4, revisão 11 de 19/01/2019.

TURBOMECA. 2019c. Aircraft Maintenance Manual (AMM), revisão 15 de 19/01/2019.

TURBOMECA.2019d. Maintenance Manual Arriel 1D1, n° X292G24522, revisão 24 de 28/02/2019

UNITED STATES GOVERNMENT PUBLISHING OFFICE, Federal Aviation Regulations, Title 14, Chapter 1, Subchapter G, Part 121, Subpart K. 1995.

UNITED STATES, FAA-Federal Aviation Administration, Airworthiness Approval of Rotorcraft Health and Usage Monitoring Systems (HUMS), Advisory Circular, Federal Aviation Administration, Washington DC, USA, July 1999. Disponível em: <http://www.airweb.faa.gov/Regulatory_and_Guidance_Library/rgPolicy.nsf/0/4628377f2ecf58f486256c13005c4663?OpenDocument>. Acesso em 16 de nov.. de 2019

VERMELHO, L.C.R. Caracterização Física e Química da Pólvora. 2012. 63f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Técnico Lisboa, Portugal.

VIBRATECH INTERNACIONAL. 2015. VIBREX™ 2000.Plus (Helicopter and Fixed Wing Versions) Digital Dynamic Balancer/Analyzer Systems 13841, revisão "A" de 07/05/2015 - Honeywell International, IncAEROSPACE – Torrance, CA USA.

VILLELA, T. E. A. Emprego do queimador em T para a pesquisa de instabilidades de combustão em propelentes sólidos, 2002.

WADE, A. Going Ballistic: Bullet Trajectories, Undergraduate Journal of Mathematical Modeling: One + Two: Vol. 4: Iss. 1, Article 5. DOI: <http://dx.doi.org/10.5038/2326-3652.4.1.5> Available at: <https://scholarcommons.usf.edu/ujmm/vol4/iss1/5>, 2011.

WASELFISZ, J.J. Mapa da Violência 2006: os jovens do Brasil. Brasília: OEI, 2006.

ZILIO, S. C.; BAGNATO, V. S. Mecânica, Calor e Ondas., 2002. 265p.

ZUKAS, J. A. et al., Impact Dynamics, J. Wiley & Sons, 1982.

ANEXO A

APÊNDICE C

DO RBAC 43

[RESERVADO]

APÊNDICE D

DO RBAC 43

OBJETIVOS E DETALHES DE ITENS A SEREM INCLUÍDOS NAS INSPEÇÕES ANUAIS E INSPEÇÕES DE 100 HORAS (CONFORME APLICÁVEL PARA AERONAVES ESPECÍFICAS)

D43.1 Objetivos e detalhes de itens a serem incluídos nas inspeções anuais e inspeções de 100 horas (conforme aplicável para aeronaves específicas)

(a) Cada pessoa que for executar uma inspeção anual ou inspeção de 100 horas deve, antes dessa inspeção, remover ou abrir todas as janelas de inspeção necessárias, portas de acesso, carenagens e capotas dos motores. Deve, ainda, limpar toda a aeronave e seus motores.

(b) Cada pessoa que estiver executando uma inspeção anual ou inspeção de 100 horas deve inspecionar (como aplicável) os seguintes componentes do grupo de fuselagem (ou casco):

(1) entelamento e revestimento quanto à deterioração, distorção e outras evidências de falha e quanto a ferragens de ligação e fixações defeituosas ou inseguras;

(2) sistemas e componentes quanto à instalação imprópria, defeitos aparentes e operação insatisfatória; e

(3) invólucro, garrafas de gás, tanques de lastro e partes afins quanto a más condições.

(c) Cada pessoa que estiver executando uma inspeção anual ou inspeção de 100 horas deve inspecionar (como aplicável) os seguintes componentes do grupo compartimento de passageiros e dos pilotos:

(1) apresentação geral quanto à limpeza deficiente e objetos soltos que possam emperrar controles;

(2) cadeiras e cintos de segurança quanto a más condições e defeitos aparentes;

(3) janelas e para-brisas quanto a quebras e deterioração; (Redação dada pela Resolução nº 348, de 2 de dezembro de 2014)

(4) instrumentos quanto as más condições, montagens, marcações e (quando praticável) indicação incorreta;

(5) controles de voo e do motor quanto à instalação e operação imprópria;

(6) baterias quanto à instalação e carga incorreta; e

(7) todos os sistemas quanto à instalação imprópria, más condições, defeitos aparentes ou óbvios e fixações impróprias.

(d) Cada pessoa que estiver executando uma inspeção anual ou inspeção de 100 horas deve inspecionar (como aplicável) os seguintes componentes do grupo motopropulsor e suas naceles:

(1) área do motor quanto a sinais evidentes de excessivo vazamento de óleo, combustível e fluido hidráulico e quanto a origens de tais vazamentos;

- (2) parafusos e porcas quanto a torque de aperto inadequado e defeitos óbvios;
 - (3) motor quanto à compressão dos cilindros e limalhas ou objetos estranhos nos filtros, telas e tampas de dreno. Se houver baixa compressão nos cilindros, inspecionar quanto a condições internas e tolerâncias internas impróprias;
 - (4) berço do motor quanto a trincas, folgas na fixação do berço e folgas na fixação do motor;
 - (5) amortecedores flexíveis de vibração quanto a más condições e deterioração;
 - (6) controles do motor quanto a defeitos, curso incorreto e frenagem imprópria;
 - (7) tubulações, mangueiras e braçadeiras quanto a vazamentos, condições impróprias e folgas;
 - (8) conjuntos de escapamento quanto a trincas, defeitos e fixação imprópria;
 - (9) acessórios quanto a defeitos aparentes e segurança na montagem;
 - (10) todos os sistemas quanto à instalação imprópria, más condições gerais, defeitos e fixações inadequadas; e
 - (11) capota do motor quanto a trincas e defeitos.
- (e) Cada pessoa que estiver executando uma inspeção de 100 horas deve inspecionar (como aplicável) os seguintes componentes do grupo trem de pouso:
- (1) todas as unidades quanto a más condições e inseguranças nas fixações;
 - (2) dispositivos de absorção de choques quanto a nível inadequado de óleo;
 - (3) articulações, montantes e membros estruturais quanto a desgaste indevido ou excessivo e deformações;
 - (4) mecanismos de recolhimento e travamento quanto à operação imprópria;
 - (5) linhas hidráulicas quanto a vazamentos;
 - (6) sistema elétrico quanto a atrito de fios e operação imprópria dos interruptores;
 - (7) rodas quanto a trincas, defeitos e condições dos rolamentos;
 - (8) pneus quanto a desgaste e cortes;
 - (9) freios quanto a ajuste impróprio; e
 - (10) flutuadores e esquis quanto à fixação insegura e defeitos óbvios ou aparentes.
- (f) Cada pessoa que estiver executando uma inspeção anual ou inspeção de 100 horas deve inspecionar (como aplicável) todos os componentes das asas e do conjunto da seção central quanto a más condições gerais, deterioração do entelamento ou revestimento, deformações, evidências de falha e fixações inseguras.
- (g) Cada pessoa que estiver executando uma inspeção anual ou inspeção de 100 horas deve inspecionar (como aplicável) todos os componentes e sistemas que compõem o conjunto completo da empenagem quanto a más condições gerais, deterioração do entelamento ou revestimento, deformações, evidências de falha, instalação e funcionamento impróprios de componentes. (Redação dada pela Resolução nº 348, de 2 de dezembro de 2014)
- (h) Cada pessoa que estiver executando uma inspeção anual ou inspeção de 100 horas deve inspecionar (como aplicável) os seguintes componentes do grupo hélice:

(1) conjunto de hélice quanto a trincas, mossas, emperramentos e vazamentos de óleo;

(2) parafusos quanto a torque de aperto inadequado e falta de freio;

(3) dispositivos anti-gelo quanto a funcionamento impróprio e defeitos óbvios; e

(4) mecanismos de controle quanto à operação imprópria, montagem insegura e restrições de curso.

(i) Cada pessoa que estiver executando uma inspeção anual ou inspeção de 100 horas deve inspecionar (como aplicável) os seguintes componentes do grupo rádio:

(1) equipamento rádio e eletrônico quanto à instalação imprópria e fixação insegura;

(2) fiação e conduítes quanto a posicionamento inadequado, fixações e montagens inseguras;

(3) aterramentos e blindagens quanto a más condições gerais e instalação imprópria; e

(4) antenas, incluindo antenas de arrasto, quanto a más condições, montagem insegura e operação imprópria.

(j) Cada pessoa que estiver executando uma inspeção anual ou inspeção de 100 horas deve inspecionar (como aplicável) cada item de miscelânea instalado na aeronave porventura não citado nesta listagem, quanto à instalação e operação imprópria.

ANEXO B



REGULAMENTO BRASILEIRO DA AVIAÇÃO CIVIL

RBAC nº 43
EMENDA nº 01

Título: MANUTENÇÃO, MANUTENÇÃO PREVENTIVA,
RECONSTRUÇÃO E ALTERAÇÃO
Aprovação: Resolução nº 265 de 5 de março de 2013. **Origem:**
SAR

43.17 Manutenção, manutenção preventiva, reconstrução e alteração executada em artigos aeronáuticos brasileiros por organizações estrangeiras conforme acordos para reconhecimento mútuo das funções de manutenção ou não certificadas pela ANAC.

(a) Uma organização de manutenção instalada em um país com o qual o Brasil possui acordo para reconhecimento mútuo das funções de manutenção deve seguir as disposições do acordo firmado quando aprovar o retorno ao serviço de produto aeronáutico que tenha sido por ela trabalhado. A documentação referente aos trabalhos realizados deve seguir os termos do acordo firmado.

(b)-I Exceto se determinado de outra maneira pela ANAC, uma organização de manutenção estrangeira, não certificada pela ANAC, pode executar manutenção, manutenção preventiva, reconstrução e alteração e aprovar o retorno ao serviço de artigos, que não aeronave, motor e hélice completos, somente sob as seguintes condições:

(1) a ANAC tenha manifestado expressamente a compatibilidade entre os sistemas de regulação das funções de manutenção de produtos aeronáuticos do Brasil e da Autoridade de Aviação Civil local;

(2) a organização de manutenção seja certificada pela Autoridade de Aviação Civil local, em condição regular e com capacidade adequada ao serviço a ser executado;

(3) a aprovação de retorno ao serviço tenha sido registrada em um documento equivalente ao requerido pelo RBAC 43.9(d)-I; e

(4) os dados técnicos, utilizados para a realização de trabalhos considerados como grandes alterações e grandes reparos, conforme o Apêndice A, sejam considerados aprovados pela ANAC.

(c)-I A manutenção realizada por organização de manutenção conforme parágrafo (b)-I desta seção impõe ao responsável pelo controle do aeronavegabilidade da aeronave a obrigação de assegurar o atendimento ao RBAC 43.

(Redação dada pela Resolução nº 348, de 2 de dezembro de 2014)

APÊNDICE A

| | | | | | |
|-------------------------------|---|--|-----------------------------|----------------------|-------------------|
| | | ORDEM DE SERVIÇO | | O.S: 001/2019 | |
| Data de abertura | | 20/05/2019 | Data de encerramento | | 19/06/2019 |
| Responsável pela baixa | | Chefe do CTM / UFMG | | | |
| Célula | | | Motor | | |
| Prefixo | PP-XXX | TSN | 7.589,3 | Modelo | ARRIEL 1D1 |
| Modelo | AS350 B2 | CSN | 19347 | S/N | 7074 |
| S/N | AS3069 | | | | |
| ITENS | Serviços a realizar | Descrição dos serviços executados | | Data | H/H |
| 01 | Inspeção 10 HORAS (MSM e ALS) de Célula. | Realizada a inspeção de 10 HORAS de Célula, conforme solicitado pela Eurocopter AS 350B2 MSM revisão 17 de 19/01/2019 e ALS revisão 11 de 19/01/2019. Nada de anormal detectado | | 20/05/2019 | 2,0 |
| 02 | Inspeção 30 HORAS (MSM e ALS) de Célula. | Realizada a inspeção de 30 HORAS de Célula, conforme solicitado pela Eurocopter AS 350B2 MSM revisão 17 de 19/01/2019 e ALS revisão 11 de 19/01/2019. Nada de anormal detectado | | 20/05/2019 | 2,0 |
| 03 | Inspeção de 7 DIAS (MSM) de Célula. | Realizada a inspeção de 7 DIAS de Célula, conforme solicitado pela Eurocopter AS 350B2 MSM revisão 17 de 19/01/2019. | | 20/05/2018 | 1,0 |
| 04 | Inspeção 50 HORAS (MSM e ALS) de Célula. | Realizada a inspeção de 50 HORAS de Célula, conforme solicitado pela Eurocopter AS 350B2 MSM revisão 17 de 19/01/2019 e ALS revisão 11 de 19/01/2019. Nada de anormal detectado | | 21/05/2019 | 3,0 |

| | | | | |
|----|--|--|-------------------|------------|
| 05 | Inspeção 100 HORAS (MSM e ALS) de Célula. | Realizada a inspeção de 100 HORAS de Célula, conforme solicitado pela Eurocopter AS 350B2 MSM revisão 17 de 19/01/2019 e ALS revisão 11 de 19/01/2019. Nada de anormal detectado | 22/05/2019 | 5,0 |
| 06 | Balanceamento dos rotores AMM 62-00-00, 5-1 | Balanceamento do rotor principal Solo lateral: 0,05 IPS Voo pairado: 0,10 IPS Voo lateral: 0,15 IPS Voo vertical: 0,16 IPS Balanceamento do rotor de cauda Em 270rpm: 0,20 IPS rpmNominal: 0,11 IPS Balanceamento do eixo de potencia Finalizado em 0,35 IPS Realizado ajuste de Tracking Ação conforme AMM, revisão 15 de 19/01/2019. Dentro do permissível. | 04/06/2019 | 2,0 |
| 07 | AD EASA 2012-0257 - Tail Rotor - Laminated Half-Bearings. – Inspection Replacement. | Efetuada inspeção do Laminated Half-Bearings conforme ASB 05.00.71. Nenhuma anomalia detectada. | 23/05/2019 | 1,0 |
| 08 | AD EASA 2010-0006 – Inspection Tail Rotor Pitch-Change Links. | Efetuada inspeção nos “Tail rotor pitch link” conforme Eurocopter ASB 05.00.60. Nenhuma anomalia foi detectada. | 24/05/2019 | 1,0 |

| | | | | |
|----|--|---|-------------------------|-----|
| 09 | Inspeção de 15 HORAS / 7 DIAS de motor. | Realizada a inspeção de 15 HORAS / 7 DIAS de motor conforme solicitado pela Turbomeca Arriel 1D1, MM. Vol.01 Rev.24 de 28/02/2019. Nenhuma anomalia detectada. | 27/06/2019 | 2,0 |
| 10 | Inspeção de 30 Horas de motor. | Realizada a inspeção de 30 horas de motor conforme solicitado pela Turbomeca Arriel 1D1, MM. Vol.01 Rev.24 de 28/02/2019. Nenhuma anomalia detectada. | 27/06/2019 | 2,0 |
| 11 | Inspeção de 100 Horas de motor. | Realizada a inspeção de 100 horas de motor conforme solicitado pela Turbomeca Arriel 1D1, MM. Vol.01 Rev.24 de 28/02/2019. Nenhuma anomalia detectada. | 28/05/2019 a 31/05/2019 | 5,0 |
| 12 | Inspeção de 200 Horas de motor. | Realizada a inspeção de 200 horas de motor (TASK 72-43-10-280-801) conforme solicitado pela Turbomeca Arriel 1D1, MM. Vol.01 Rev.24 de 28/02/2019. Foi coletado 123ml de óleo no retorno do rolamento G3. Encontra-se dentro do permitido pelo Manual de Manutenção. | 05/06/2019 | 1,0 |
| 13 | Análise de vibração do motor TASK 71-02-10-760-801 | Realizada a inspeção de 750 horas de motor conforme solicitado pela Turbomeca Arriel 1D1, MM. Vol.01 Rev.24 de 28/02/2019. Vibração do ponto dianteiro: 10mm/s; Vibração do ponto traseiro: 12mm/s; Estatismo do motor: 381rpm / NG: 83.1% / OAT: 20°C. Ação conforme solicitado pela | 03/06/2019 a 04/06/2019 | 4,0 |

| | | | | |
|---|--------------------------|---|------------------------|------------|
| | | Turbomeca Arriel 1D1, MM. Vol.01 revisão 24 de 28/02/2019. | | |
| 14 | Realizado PWC | Dados do PWC: NR: 380rpm TQ: 80% OAT: 23°C ZP: 4000ft NG: 98% Sand Filter installed Power Check dentro do gráfico conforme Manual de voo da aeronave. | 05/06/20 19 | 1,0 |
| TOTAL DE HORAS TRABALHADAS: 74 HORAS | | | | |
| Obs. Nenhuma observação a ser realizada. | | DECLARAÇÃO DE AERONAVEGABILIDADE | | |
| Mecânico: Vinicius Samuel Pereira Silva CANAC: 281.744 Anderson Flamareon dos S. Cruz CANAC: 272738 “Inspetor”: Prof. Dr. José Guilherme Coelho Baeta CREA: 61455 Controle técnico de manutenção: Anderson Flamareon dos S. Cruz Vinicius Samuel Pereira Silva | | Certifico que a aeronavegabilidade objeto desta OS foi submetida(o) aos serviços acima descritos em conformidade com os respectivos Manuais de Manutenção dos Fabricantes, procedimentos realizados junto ao CTM/UFMG e legislação aeronáutica em vigor, sendo considerada: (x) APROVADO () REJEITADO Data: 26/06/2019 PARA RETORNO AO SERVIÇO Inspetor: Prof. Dr. Jose Guilherme Coelho Ass: Carimbo: | | |