

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**IDENTIFICAÇÃO DO CALIBRE DE MUNIÇÕES POR MEIO
DA ASSINATURA ACÚSTICA DOS ESTOJOS EJETADOS**

LUIZ VINÍCIUS GONTIJO LABORDA LARRAIN

ORIENTADOR: JOÃO PAULO CARVALHO LUSTOSA DA COSTA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO INFORMÁTICA FORENSE E
SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO**

PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM - 645/2016

BRASÍLIA / DF: 07/2016

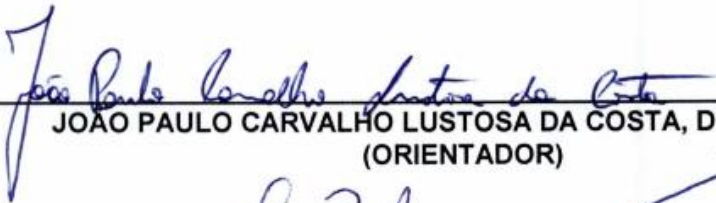
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**IDENTIFICAÇÃO DO CALIBRE DE MUNIÇÕES POR MEIO
DA ASSINATURA ACÚSTICA DOS ESTOJOS EJETADOS**


LUIZ VINÍCIUS GONTIJO LABORDA LARRAIN

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE PROFISSIONAL EM INFORMÁTICA FORENSE E SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO.


APROVADA POR:



JOÃO PAULO CARVALHO LUSTOSA DA COSTA, Dr., ENE/UNB
(ORIENTADOR)



RICARDO ZELENOVSKY, Dr., ENE/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)



EDUARDO LUIZ ORTIZ BATISTA, Dr., UFSC
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 07 DE JULHO DE 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

LARRAIN, LUIZ VINÍCIUS GONTIJO LABORDA

Identificação do calibre de armas de fogo por meio da assinatura acústica dos estojos ejetados [Distrito Federal] 2016.

xvi, 73p., 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2016).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Acústica forense
2. Balística forense
3. Gravações de disparos de armas de fogo
4. Identificação do calibre de armas de fogo

I. ENE/FT/UnB. II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LARRAIN, LUIZ VINÍCIUS GONTIJO LABORDA. (2016). Identificação do calibre de munições por meio da assinatura acústica dos estojos ejetados. Dissertação de Mestrado, Publicação PPGENE.DM - 645/2016, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 73p.


CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: LUIZ VINÍCIUS GONTIJO LABORDA LARRAIN

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Identificação do calibre de munições por meio da assinatura dos estojos ejetados.

GRAU/ANO: Mestre/2016.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Dissertação de Mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Do mesmo modo, a Universidade de Brasília tem permissão para divulgar este documento em biblioteca virtual, em formato que permita o acesso via redes de comunicação e a reprodução de cópias, desde que protegida a integridade do conteúdo dessas cópias e proibido o acesso a partes isoladas desse conteúdo. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste documento pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.


Luiz Vinícius Gontijo Laborda Larrain
Rua 02, Qd. 16, Lt. 01, Bairro Anchieta
CEP 78600-000 – Barra do Garças – MT - Brasil

À minha querida esposa Priscila e aos
nossos filhos Luiz Arthur e Ana Luiza.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente, a Deus pela dádiva da vida e as inúmeras graças alcançadas no decorrer desta.

A minha mãe Marizeth, mulher guerreira, pela educação e valores proporcionados.

A minha querida esposa Priscila, pelo companheirismo, paciência e significativa colaboração principalmente nos momentos de imersão desta jornada acadêmica. Aos meus filhos Luiz Arthur e Ana Luiza que me inspiram diariamente a ser uma pessoa melhor.

Agradeço ainda ao meu professor e orientador, Dr. João Paulo Carvalho Lustosa da Costa, pelos conhecimentos e experiências agregadas nesta jornada acadêmica, pela paciência, desafios e incentivos proporcionados, além da assertiva colaboração no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço ainda ao Ricardo Kehrlé Miranda pela colaboração a este trabalho.

Aos Peritos da Perícia Oficial e Identificação Técnica do Estado de Mato Grosso (POLITEC), em especial a todos os colegas da Gerência de Perícias em Áudio e Vídeo e Gerência de Perícias em Balística que contribuíram para a concretização deste trabalho.

RESUMO

IDENTIFICAÇÃO DO CALIBRE DE MUNIÇÕES POR MEIO DA ASSINATURA ACÚSTICA DOS ESTOJOS EJETADOS

Autor: Luiz Vinicius Gontijo Laborda Larrain

Orientador: João Paulo Carvalho Lustosa da Costa

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, Julho de 2016

As gravações de áudios contendo disparos de armas de fogo podem ser cruciais para as investigações forenses apesar de apresentarem vários desafios técnicos aos peritos. Propõe-se neste trabalho uma nova abordagem, com perspectiva diferente das tradicionais nesta área, com foco no estudo nas assinaturas acústicas geradas pelas ações mecânicas intrínsecas ao funcionamento de armas de fogo, em específico da colisão do estojo ejetado logo após a munição ser deflagrada com uma superfície rígida. Esta pesquisa propõe um modelo acústico, inspirado pelos conceitos físico-acústicos para todos os formatos de estojos presentes na literatura. Foram considerados neste trabalho dez calibres sendo quatro calibres do formato cônico ou cilíndrico e seis calibres de estojos do tipo garrafa. É estimada a assinatura acústica para cada um dos calibres delimitados e o método proposto é então validado a partir de dados controlados e não controlados. São realizados ainda testes para avaliar quantitativamente a robustez da assinatura acústica para fatores de degradação como compressão, ruídos e distância em relação ao gravador.

ABSTRACT

IDENTIFICATION OF AMMUNITION CALIBERS VIA ACOUSTICAL SIGNATURE OF EJECTED CARTRIDGE CASE

Author: Luiz Vinícius Gontijo Laborda Larrain

Supervisor: João Paulo Carvalho Lustosa da Costa

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, July of 2016

Audio gunshot recordings can be very helpful for crime scene investigation although there are several technical challenges for the forensic experts to extract useful information. In this work, a new approach is proposed with focus on specific mechanical action of the firearms, which is the collision of the ejected cartridge case with a rigid surface after the gunshot. This research proposes an acoustical model inspired by acoustical physics concepts to all shapes of cartridge cases present in literature. The performed study considers ten calibers, being four straight and tapered, and six bottle-necked cartridge cases. It estimates the acoustical signature for each caliber and the method was validated using controlled and uncontrolled measurements. In addition, robustness tests of the method were performed to measure the degradation caused by lossy compression, noise and distance.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	DEFINIÇÃO E JUSTIFICATIVA DO PROBLEMA.....	1
1.2.	OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO.....	3
1.3.	HIPÓTESES E JUSTIFICATIVA DAS HIPÓTESES	3
1.4.	METODOLOGIA	4
1.5.	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
2.	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA DO ESTADO DA ARTE	6
2.1.	ASPECTOS HISTÓRICOS	6
2.2.	MODELAGEM E CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DOS DISPAROS DE ARMA DE FOGO.....	7
2.3.	DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE DISPAROS E LOCALIZAÇÃO DO ATIRADOR.....	9
2.4.	IDENTIFICAÇÃO DE ARMAS DE FOGO POR MEIO DOS COEFICIENTES DA SÉRIE DE FOURIER DE COSSENOS.....	10
2.5.	MODELAGENS A PARTIR DE TUBOS SONOROS E AS APLICAÇÕES NAS CIÊNCIAS FORENSES	10
2.6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	11
3.	MODELAGEM FÍSICA DO PROBLEMA	12
3.1.	MECANISMOS DE EXPULSÃO DOS ESTOJOS.....	12
3.2.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS ESTOJOS	17
3.3.	FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA EM TUBOS SONOROS	19

4.	ENSAIOS REALIZADOS	23
4.1.	EXPERIMENTOS CONTROLADOS	23
4.1.1.	Detalhes dos Experimentos	23
4.1.2.	Análise Espectral dos Resultados obtidos.....	25
4.1.3.	Validação a partir dos experimentos controlados	37
4.2.	TESTES DE ROBUSTEZ PARA FATORES DE DEGRADAÇÃO.....	40
4.2.1.	Compressão com Perdas	40
4.2.2.	Ruídos	43
4.2.3.	Distância em relação ao microfone.....	53
4.3.	VALIDAÇÃO A PARTIR DE DADOS NÃO CONTROLADOS	57
5.	CONCLUSÕES.....	62
5.1.	TRABALHOS FUTUROS.....	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
	A – DIMENSÕES DOS CALIBRES DELIMITADOS NO ESTUDO	69

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1: CALIBRES E DIMENSÕES DOS ESTOJOS DELIMITADOS (AECC, 2015)	19
TABELA 3.2: FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA DOS ESTOJOS CILÍNDRICOS E CÔNICOS DELIMITADOS	21
TABELA 3.3: FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA DO TUBO FECHADO DOS ESTOJOS GARRAFA	22
TABELA 3.4: FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA DO TUBO ABERTO DOS ESTOJOS GARRAFA.....	22
TABELA 4.1: VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO A PARTIR DOS DADOS CONTROLADOS.....	40
TABELA 4.2: NÍVEL PRESSÃO SONORA PARA CADA INTENSIDADE DOS DISTINTOS PERFIS DE RUÍDOS GERADOS	44
TABELA 4.3: IDENTIFICAÇÃO DAS ASSINATURAS ACÚSTICAS NOS VÍDEOS.....	58

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: MODELAGEM PROPOSTA PARA PROJÉTEIS SUPERSÔNICOS (ADAPTADO DE MAHER, 2005)	7
FIGURA 2.2: GRAVAÇÃO DE UM DISPARO DE ARMA DE FOGO E A IDENTIFICAÇÃO DE SUAS COMPONENTES (ADAPTADO DE MAHER, 2007)	8
FIGURA 2.3: ASSOCIAÇÃO DE MICROFONES UTILIZADAS PARA O PROBLEMA DO SNIPER (ADAPTADO DE FREIRE & APOLINÁRIO JR., 2011)	9
FIGURA 2.4: TUBO UNIFORME FECHADO NA GLOTE E ABERTO NOS LÁBIOS COMO MODELO DE PRODUÇÃO DE VOGAIS NEUTRAS (BARBOSA & MADUREIRA, 2015).....	11
FIGURA 2.5: TUBO UNIFORME FECHADO NA GLOTE E ABERTO NOS LÁBIOS, COM CONSTRIÇÃO ENTRE LÍNGUA E PALATO, NA PRODUÇÃO DE VOGAL NÃO-ARREDONDADA E NÃO ALTA (BARBOSA & MADUREIRA, 2015).	11
FIGURA 3.1: CLASSIFICAÇÃO GERAL DAS ARMAS DE FOGO POR (ERALDO RABELLO, 1966)	12
FIGURA 3.2: ARMA DE REPETIÇÃO NÃO AUTOMÁTICA – REVÓLVER (ADAPTADO DE TAURUS, 2016).....	14
FIGURA 3.3: ARMA DE REPETIÇÃO SEMIAUTOMÁTICA – PISTOLA (ADAPTADO DE TAURUS, 2016).....	15
FIGURA 3.4: ARMA DE REPETIÇÃO AUTOMÁTICA – FUZIL (ADAPTADO DE COLT, 2005)	15
FIGURA 3.5: ILUSTRAÇÃO DO CICLO DE RECARREGAMENTO DE UMA PISTOLA. O PERCUTOR ATINGE A ESPOLETA DO CARTUCHO QUE SE ENCONTRA NA CÂMARA (A), O PROJÉTEL É EXPELIDO ATRAVÉS DO CANO (B), O FERROLHO RECUA E O ESTOJO DEFLAGRADO É EJETADO PARA FORA DA CÂMARA (C) SEGUIDO DO RETORNO DO FERROLHO E ENTRADA DE UMA NOVA MUNIÇÃO NA CÂMARA (D) (ADAPTADO DE KNAP, 2002).	16
FIGURA 3.6: ILUSTRAÇÃO DOS COMPONENTES PRESENTES EM UM CARTUCHO DE PERCUSSÃO CENTRAL	17

FIGURA 3.7: FORMATOS DE ESTOJOS: CILÍNDRICOS, CÔNICOS E GARRAFA (ADAPTADO DE ZANOTTA, 1992)	17
FIGURA 3.8: ONDAS ESTACIONÁRIAS EM TUBOS ABERTOS.....	20
FIGURA 3.9: ONDAS ESTACIONÁRIAS EM TUBOS FECHADOS	20
FIGURA 4.1: CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO REALIZADO PARA COLETA DOS ÁUDIOS	24
FIGURA 4.2: QUANTIDADE DE ESTOJOS DO TIPO CILÍNDRICOS E CÔNICOS UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS	24
FIGURA 4.3: QUANTIDADE DE ESTOJOS DO TIPO GARRAFA UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS.....	24
FIGURA 4.4: FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA DE MAIOR POTÊNCIA PARA ESTOJO #1 DO CALIBRE .380 AUTO.....	25
FIGURA 4.5: DIAGRAMA DO PROCESSAMENTO POR MEIO DA VARREDURA DE L JANELAS AO LONGO DO SINAL, A SUPERPOSIÇÃO ENTRE ESTAS E A FUNÇÃO DE JANELAMENTO (ADAPTADO DE PAUL, 2006).....	26
FIGURA 4.6: LTAS DOS ESTOJOS CALIBRE 9 MM LUGER	27
FIGURA 4.7: PICOS DE FREQUÊNCIAS DOS ESTOJOS CALIBRE 9 MM LUGER	28
FIGURA 4.8: LTAS DOS ESTOJOS CALIBRE .40 S&W	28
FIGURA 4.9: PICOS DE FREQUÊNCIAS DOS ESTOJOS CALIBRE .40 S&W	29
FIGURA 4.10: LTAS DOS ESTOJOS CALIBRE .32 AUTO	29
FIGURA 4.11: PICOS DE FREQUÊNCIAS DOS ESTOJOS CALIBRE .32 AUTO	30
FIGURA 4.12: LTAS DOS ESTOJOS CALIBRE .380 AUTO	30
FIGURA 4.13: PICOS DE FREQUÊNCIAS DOS ESTOJOS CALIBRE .380 AUTO	31
FIGURA 4.14: LTAS DOS ESTOJOS CALIBRE 7x57 MM.....	31

FIGURA 4.15: PICOS DE FREQUÊNCIAS DOS ESTOJOS CALIBRE 7X57 MM	32
FIGURA 4.16: LTAS DOS ESTOJOS CALIBRE 7,62X63 MM	32
FIGURA 4.17: PICOS DE FREQUÊNCIAS DOS ESTOJOS CALIBRE 7,62X63 MM	33
FIGURA 4.18: LTAS DOS ESTOJOS CALIBRE 7,62X51 MM	33
FIGURA 4.19: PICOS DE FREQUÊNCIAS DOS ESTOJOS CALIBRE 7,62X51 MM	34
FIGURA 4.20: LTAS DOS ESTOJOS CALIBRE 7,62X39 MM	34
FIGURA 4.21: PICOS DE FREQUÊNCIAS DOS ESTOJOS CALIBRE 7,62X39 MM	35
FIGURA 4.22: LTAS DOS ESTOJOS CALIBRE 5,56X45 MM	35
FIGURA 4.23: PICOS DE FREQUÊNCIAS DOS ESTOJOS CALIBRE 5,56X45 MM	36
FIGURA 4.24: LTAS DOS ESTOJOS CALIBRE 12,70X99 MM	36
FIGURA 4.25: PICOS DE FREQUÊNCIAS DOS ESTOJOS CALIBRE 12,70X99 MM	37
FIGURA 4.26: SOBREPOSIÇÃO DAS MÉDIAS DOS LTAS DOS CALIBRES DE PISTOLA TESTADOS ...	38
FIGURA 4.27: SOBREPOSIÇÃO DAS MÉDIAS DOS LTAS DOS CALIBRES DE PISTOLA TESTADOS ...	39
FIGURA 4.28: ASSINATURA ACÚSTICA DO CALIBRE 9 MM LUGER PARA DIFERENTES TAXAS DE COMPRESSÃO	41
FIGURA 4.29: ASSINATURA ACÚSTICA DO CALIBRE .40 S&W PARA DIFERENTES TAXAS DE COMPRESSÃO	41
FIGURA 4.30: ASSINATURA ACÚSTICA DO CALIBRE .32 AUTO PARA DIFERENTES TAXAS DE COMPRESSÃO	42
FIGURA 4.31: ASSINATURA ACÚSTICA DO CALIBRE .380 AUTO PARA DIFERENTES TAXAS DE COMPRESSÃO	42

FIGURA 4.32: EVIDENCIA AS DIVERGÊNCIAS DE NATUREZA ESPECTRAL DE RUÍDOS BRANCO, ROSA E MARROM PARA UMA MESMA INTENSIDADE ATRAVÉS DO ESPECTROGRAMA (A) E DE SUA REPRESENTAÇÃO EM FREQUENCIA (B). IMAGENS GERADAS ATRAVÉS DO SOFTWARE ADOBE AUDITION [®] .	44
FIGURA 4.33: OSCILOGRAMA DE TRECHO DO ÁUDIO ORIGINAL DO ESTOJO #1 9 MM LUGER (A), DEGRADADO POR RUÍDO MARROM SNR25 (B), SNR20 (C) E SNR10 (D).....	46
FIGURA 4.34: ASSINATURA DO CALIBRE 9 MM LUGER PARA DIFERENTES INTENSIDADES DE RUÍDO MARROM.....	47
FIGURA 4.35: ASSINATURA DO CALIBRE 9 MM LUGER PARA DIFERENTES INTENSIDADES DE RUÍDO ROSA.....	48
FIGURA 4.36: ASSINATURA DO CALIBRE 9 MM LUGER PARA DIFERENTES INTENSIDADES DE RUÍDO BRANCO.....	48
FIGURA 4.37: ASSINATURA DO CALIBRE .40 S&W PARA DIFERENTES INTENSIDADES DE RUÍDO MARROM	49
FIGURA 4.38: ASSINATURA DO CALIBRE .40 S&W PARA DIFERENTES INTENSIDADES DE RUÍDO ROSA	49
FIGURA 4.39: ASSINATURA DO CALIBRE .40 S&W PARA DIFERENTES INTENSIDADES DE RUÍDO BRANCO.....	50
FIGURA 4.40: ASSINATURA DO CALIBRE .32 AUTO PARA DIFERENTES INTENSIDADES DE RUÍDO MARROM	50
FIGURA 4.41: ASSINATURA DO CALIBRE .32 AUTO PARA DIFERENTES INTENSIDADES DE RUÍDO ROSA	51
FIGURA 4.42: ASSINATURA DO CALIBRE .32 AUTO PARA DIFERENTES INTENSIDADES DE RUÍDO BRANCO.....	51
FIGURA 4.43: ASSINATURA DO CALIBRE .380 AUTO PARA DIFERENTES INTENSIDADES DE RUÍDO MARROM	52

FIGURA 4.44: ASSINATURA DO CALIBRE .380 AUTO PARA DIFERENTES INTENSIDADES DE RUÍDO ROSA	52
FIGURA 4.45: ASSINATURA DO CALIBRE .380 AUTO PARA DIFERENTES INTENSIDADES DE RUÍDO BRANCO.....	53
FIGURA 4.46: EXPERIMENTOS REALIZADOS PARA TESTAR A ROBUSTEZ DA ASSINATURA ACÚSTICA A DISTÂNCIA.	54
FIGURA 4.47: ASSINATURA DO 9 MM LUGER PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS EM RELAÇÃO AO MICROFONE	55
FIGURA 4.48: ASSINATURA DO .40 S&W PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS EM RELAÇÃO AO MICROFONE	55
FIGURA 4.49: ASSINATURA DO .32 AUTO PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS EM RELAÇÃO AO MICROFONE	56
FIGURA 4.50: ASSINATURA DO .380 AUTO PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS EM RELAÇÃO AO MICROFONE	56
FIGURA 4.51: DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS NAS GRAVAÇÕES DO CALIBRE 9 MM LUGER	59
FIGURA 4.52: DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS NAS GRAVAÇÕES DO CALIBRE .40 S&W.....	59
FIGURA 4.53: DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS NAS GRAVAÇÕES DO CALIBRE .32 AUTO	60
FIGURA 4.54: DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS NAS GRAVAÇÕES DO CALIBRE .380 AUTO	60

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

AECC – ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE COLECCIONISTAS DE CARTUCHERÍA

CPP – CÓDIGO DE PROCESSO PENAL

DFT – DISCRETE FOURIER TRANSFORM

DoA – DIRECTION OF ARRIVAL

DPF – DEPARTAMENTO DE POLÍCIA FEDERAL

FCC – FOURIER COSINE COEFFICIENTS

FBI – FEDERAL BUREAU INVESTIGATION

FFT – FAST FOURIER TRANSFORM

LTAS – LONG-TERM AVERAGE SPECTRUM

MP3 – MPEG-2 LAYER 3

POLITEC – PERÍCIA OFICIAL E IDENTIFICAÇÃO TÉCNICA DE MATO GROSSO

1. INTRODUÇÃO

A elevada difusão de dispositivos portáteis de gravação, tais como os celulares *smartphones* e suas integrações com as diversas redes sociais existentes, assim como a proliferação de sistemas de vigilância, produzem diariamente um volume exacerbado de registros audiovisuais. Segundo estudos recentes, o tráfego total da internet superará pela primeira vez a marca de um *zettabyte* até o final do ano de 2016, ou seja, no ano de 2016 o volume de dados transmitidos na rede será superior a 10^{21} bytes. Deste volume total, os principais responsáveis são os vídeos que superaram a marca de 70 % do tráfego total da Internet no ano de 2015 e projeta-se que atingirão 82 % até 2020 (Cisco[®], 2016).

O tráfego de vídeos oriundos de sistemas de segurança na rede quase dobrou no ano de 2015 em relação ao ano anterior, passando de 272 petabytes por mês no final de 2014 para aproximadamente 516 petabytes por mês no ano de 2015. Em uma análise global os vídeos oriundos de sistemas de segurança devem alcançar 3,9 % do tráfego total de vídeos na Internet até o ano de 2020 (Cisco[®], 2016). Desta forma, as gravações audiovisuais cada vez mais onipresentes em nossa sociedade podem, não em raras ocasiões, capturar eventos relacionados a prática de ações delituosas, incluindo as relacionadas ao emprego de armas de fogo, sendo portanto registros perenes e importantes vestígios para as investigações forenses.

Este capítulo encontra-se subdividido em cinco seções. Na Seção 1.1 apresenta-se a definição e justificativa do problema a ser tratado nesta pesquisa. Na Seção 1.2 são descritos os objetivos desta dissertação enquanto as hipóteses e justificativas das hipóteses são apresentadas na Seção 1.3. Na Seção 1.4 é abordada a metodologia empregada neste trabalho. Por último, na Seção 1.5 é descrito a forma em que se encontra estruturada esta dissertação.

1.1. DEFINIÇÃO E JUSTIFICATIVA DO PROBLEMA

No Brasil, mais de 70 % dos homicídios cometidos são através do emprego de armas de fogo. O nosso país desprovido de conflitos religiosos ou étnicos, sem disputas territoriais ou de fronteiras, sem guerra civil ou enfrentamentos políticos levados ao plano das armas, vitima mais cidadãos por meio de armas de fogo do que inúmeros conflitos contemporâneos como a guerra da Chechênia, do Golfo, as várias Intifadas, as guerrilhas colombianas ou a guerra de liberação de Angola e Moçambique (Waiselfiz, 2015).

No cenário mundial, as armas de fogo também têm significativa relevância para as investigações forenses. Recentemente, dados do Departamento de Justiça e do Conselho de Relações Exteriores dos Estados Unidos mostraram que o número de vítimas em incidentes relacionados a armas de fogo, como o massacre ocorrido em uma universidade no Estado de Oregon em 2015, é cerca de quarenta vezes superior ao número de mortos em ataques terroristas. Nesta pesquisa foi analisado o período de 2001 a 2011, incluindo as vítimas dos atentados ocorridos no dia 11 de setembro de 2001 (BBC Brasil, 2015).

Logo as armas de fogo, em decorrência de seu elevado potencial lesivo e de intimidação, são instrumentos comumente associados à prática de crimes contra a vida, crimes contra o patrimônio, atividades terroristas e narcotráfico, guerras e conflitos, apresentando portanto singular interesse para as ciências forenses.

No Brasil, além dos crimes correlacionados as armas de fogo contidos no Código de Processo Penal (CPP), como: homicídio, latrocínio, tentativa de homicídio, roubo, entre outros, a legislação vigente, em específico a lei nº 10.826 de 22 de dezembro de 2003 que ficou amplamente conhecida como estatuto do desarmamento, definiu ainda como sendo crimes a posse irregular ou porte ilegal de armas de fogo, o disparo destas em lugares habitados ou em suas adjacências, além do comércio ilegal ou tráfico internacional com penas que variam entre detenção, reclusão e incidência de multas.

Desta forma, além das elevadas estatísticas de crimes praticados com uso de armas de fogo no país, com o advento do próprio estatuto do desarmamento, a demanda por perícias de variadas naturezas, como: balística forense, laboratório forense, perícias em registros audiovisuais, entre outras, cresceram substancialmente a partir de 2004, no intento de subsidiar as investigações dos delitos associados a armas de fogo.

Neste contexto, a análise forense acústica surge como uma importante e promissora área das ciências forenses para a investigação de crimes com emprego de armas de fogo. Isto se deve porque as gravações desta natureza possuem informações perenes de uma realidade passada, com potencial para elucidar inúmeros questionamentos, tais como: o reconhecimento do estrondo como um tiro real, a identificação do calibre da arma de fogo empregada, a quantidade de armas envolvidas, a ordem dos autores dos disparos e a localização do atirador.

Considerando que essas evidências frequentemente são produzidas sob condições não controladas, muitas vezes desconhecidas, e aliadas a possível presença de fatores de degradação qualitativos torna-se um desafio técnico para os peritos a extração de informações

e a criação de inferências a partir destes registros. Delimita-se neste trabalho um problema específico a ser tratado: a identificação do calibre de munições e consequentemente de forma indireta da arma de fogo utilizada, a partir do registro de áudios questionados contendo disparos de armas de fogo.

1.2. OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

O objetivo desta dissertação é propor uma abordagem para análise acústica com foco nos sons intrínsecos ao funcionamento e ações mecânicas de armas de fogo, em específico a queda do estojo ejetado após a munição ser deflagrada, viabilizando ainda a identificação do calibre das munições utilizadas. Demonstrando-se aos peritos e pesquisadores que atuam nesta área uma abordagem adicional e complementar aos métodos e técnicas já existentes.

1.3. HIPÓTESES E JUSTIFICATIVA DAS HIPÓTESES

Para o problema de pesquisa delimitado, levantam-se as seguintes hipóteses e suas respectivas justificativas conforme descrito abaixo:

- Os estojos apresentam comportamento acústico similar a tubos sonoros;
 - Justificativa: A confirmação dessa hipótese implica na ocorrência de frequências de ressonância e possivelmente no estabelecimento de padrões e aspectos discriminatórios entre distintos calibres.
- Caso se confirme a presença de frequências de ressonância, há intravariabilidade destas considerando estojos distintos de um mesmo calibre;
 - Justificativa: A confirmação desta hipótese possibilitaria a identificação inequívoca dos estojos ainda que de um mesmo calibre a partir das assinaturas acústicas estimadas. Cabe ressaltar que temos aqui uma solução de compromisso, uma vez que caso ocorra uma intravariabilidade elevada dos dados esta pode prejudicar a viabilidade do estabelecimento de padrões (assinaturas acústicas) para os calibres.
- Caso se confirme a presença de frequências de ressonância, há intervariabilidade destas considerando estojos de calibres distintos;
 - Justificativa: A confirmação dessa hipótese possibilitaria a identificação e a diferenciação dos calibres por meio das assinaturas acústicas.

1.4. METODOLOGIA

Para efetuar as referidas análises o perito deve compreender as distintas componentes emissoras de sons, possíveis de serem encontradas em gravações contendo disparos de armas de fogo. Segundo (Maher, 2007) dentre estas componentes encontram-se os sons oriundos da explosão provocada para a expulsão do projétil através do cano da arma, os sons oriundos das ações mecânicas intrínsecas ao funcionamento desta, a onda de choque provocada por emprego de projéteis supersônicos e os sinais decorrentes dos efeitos da vibração em superfícies sólidas além do próprio solo.

As abordagens presentes na literatura focam predominantemente os sinais oriundos da explosão provocada para a expulsão do projétil através do cano da arma e da onda de choque provocada pelos projéteis supersônicos. Apresenta-se nesta pesquisa uma perspectiva diferenciada, voltada para o estudo de eventos acústicos oriundos das ações mecânicas, em específico para a queda do estojo ejetado logo após a munição ser deflagrada.

A abordagem proposta apresenta estudo acerca da natureza acústica do som produzido pelo contato dos estojos ejetados ao atingir o solo ou superfícies rígidas, logo após a ocorrência do tiro, e o potencial destes eventos acústicos específicos para a identificação do calibre de armas de fogo. Estes eventos acústicos específicos serão doravante referenciados como assinaturas acústicas. Apesar de uma ampla pesquisa bibliográfica na literatura relacionada, não foi identificada abordagem similar para o tratamento deste problema.

Inicialmente, foram definidos modelos acústicos teóricos para o problema, inspirado nos conceitos de física acústica. Na sequência os referidos modelos foram validados em condições experimentais controladas e não controladas, utilizando nesta última, dados obtidos através de vídeos extraídos do YouTube. Posteriormente foram realizados testes com o intuito de quantificar e avaliar de forma objetiva a robustez das assinaturas acústicas para fatores de degradação frequentemente encontrados na casuística forense como: ruído, compressão e distância em relação ao equipamento gravador.

Nesta pesquisa foram considerados quatro calibres de pistolas: **9 mm Luger**, **.40 S&W**, **.380 Auto** e **.32 Auto**, além de seis calibres de estojos do tipo garrafa: **7 x 57 mm**, **7.62 x 63 mm**, **7.62 x 51 mm**, **7.62 x 39 mm** e **5.56 x 39 mm**. Os estojos do tipo garrafa são utilizados por armas que disparam, de modo geral, com maior quantidade de energia, tais como fuzis, carabinas e rifles. Estes calibres foram definidos no intuito de contemplar as munições mais frequentes na casuística forense nacional, sendo esta definição subsidiada pelas estatísticas da

Gerência de Perícias em Balística da Perícia Oficial e Identificação Técnica do Estado de Mato Grosso (POLITEC).

1.5. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se organizada em seis capítulos incluindo esta introdução.

No Capítulo 2 apresenta-se a pesquisa bibliográfica e o estado da arte na análise forense acústica para processamento acústico de gravações de disparos de armas de fogo.

A fundamentação teórica com ênfase nos principais conceitos de balística forense e física acústica que subsidiam a modelagem realizada para o problema proposto é abordada no Capítulo 3.

Descrevem-se no Capítulo 4 os experimentos realizados. Na Seção 4.1 apresentam-se os resultados e validação dos dados obtidos nos experimentos controlados com foco na assinatura acústica de cada calibre delimitado no estudo. Os resultados dos testes de robustez da assinatura acústica para ruído, compressão com perdas e a distância em relação ao microfone são apresentados na Seção 4.2. Por último a validação dos modelos dos calibres dos formatos cilíndricos e cônicos por meio de experimentos não controlados, a partir dos vídeos extraídos da Internet, são apresentados na Seção 4.3.

Finalmente, as conclusões e sugestões de trabalhos futuros são descritas no Capítulo 5.

2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA DO ESTADO DA ARTE

Este capítulo está subdividido em cinco seções. Na Seção 2.1 apresentam-se os aspectos históricos relacionados à origem da análise forense acústica. As referências relacionadas à modelagem e caracterização dos disparos de arma de fogo são abordadas na Seção 2.2. Na Seção 2.3 apresentam-se as referências relacionadas a detecção automática de tiros e localização do atirador. As referências de identificação de armas de fogo por meio dos coeficientes da série de Fourier de cosseno são descritas na Seção 2.4. São relacionados na Seção 2.5 outros problemas de aplicações forenses que apresentam modelagem similar à proposta nesta abordagem. Por último, na Seção 2.6 são consignadas as considerações finais.

2.1. ASPECTOS HISTÓRICOS

O início da análise forense acústica remonta a meados da década de 1950 com o advento dos sistemas de gravações ao vivo em ambientes externos aos estúdios de gravações. Nos Estados Unidos, a Polícia Federal Norte Americana, do inglês *Federal Bureau of Investigation* (FBI), formulou as primeiras metodologias para análises forense de áudio ainda no início da década de 1960 com foco na melhoria da inteligibilidade das gravações e na autenticação destas, possuindo entretanto na ocasião uma demanda muito incipiente (Koenig, 1990).

Apenas em 1973 a perícia em registros de áudio atingiu grande notoriedade, em específico com o caso *Watergate*, considerado na literatura um importante marco para a análise forense de registros de áudio. Na ocasião, um trecho de duração total de 18 minutos e meio de uma fita magnética com gravações de conversas entre o então presidente norte americano Richard Nixon e seu chefe de gabinete H. R. Haldeman foi apagada. Os estudos sobre a originalidade e possíveis edições na referida fita foram conduzidos por seis peritos nomeados pelo então Juiz Sirica, cujo laudo foi concluído e amplamente divulgado pela imprensa em 1974, que culminaram na renúncia do então presidente Nixon neste mesmo ano após forte pressão política.

As diversas técnicas e metodologias desenvolvidas pelos peritos do caso *Watergate* formaram a base e influenciaram significativamente os exames de verificação de edição, ou autenticidade como era chamado à época, em registros analógicos de áudio em todo o mundo sendo, portanto, um divisor de águas para análise forense acústica.

2.2. MODELAGEM E CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DOS DISPAROS DE ARMA DE FOGO

Em relação aos estudos de gravações de áudio contendo disparos de armas de fogo, (Maher, 2005) apresentou proposta para a modelagem do sinal acústico do tiro e as gravações iniciais de disparos sob condições experimentais controladas. Apresenta-se na Figura 2.1 a modelagem proposta para a onda de choque causada pelo emprego de projéteis supersônicos, isto é, que se propagam em velocidade superior a velocidade do som. A onda de choque propaga-se como um cone ao longo da trajetória desenvolvida pelo projétil, sendo o ângulo interno (θ_M) deste cone estimado pelo arco seno do inverso da velocidade *Mach* (M), esta última uma medida adimensional de velocidade, definida através da razão da velocidade do projétil (V) pela velocidade do som (c). Dessa forma, ainda segundo (Maher, 2005) através de um arranjo de microfones, conhecendo-se a velocidade desempenhada pelo projétil torna-se possível estimar dados como a trajetória de deslocamento, distância e elevação da onda de choque.

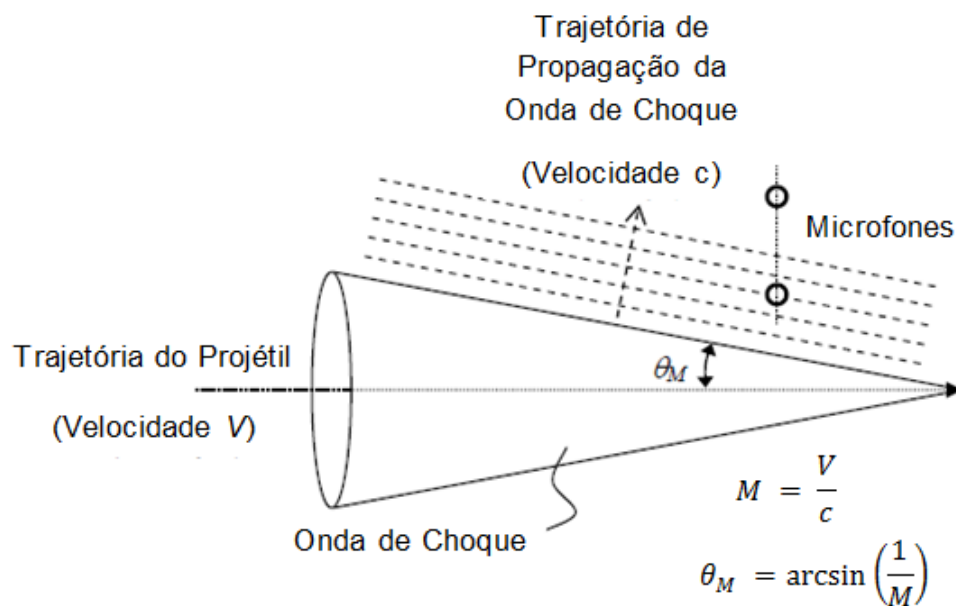


Figura 2.1: Modelagem proposta para projéteis supersônicos (Adaptado de Maher,2005)

Posteriormente, ainda segundo (Maher, 2007), foram identificadas as quatro distintas componentes emissoras de sons que podem compor uma gravação de disparo de arma de fogo, classificadas em inglês como: *muzzle blast*, *mechanical actions*, *shock wave* e *surface vibration*. A explosão dos gases pelo cano, do inglês *muzzle blast*, são os sons oriundos da

explosão provocada para a expulsão do projétil através do cano da arma, enquanto as ações mecânicas, do inglês *mechanical actions*, são os sons intrínsecos ao funcionamento desta, como o acionamento do gatilho e cão, a expulsão de estojos e recarregamentos de munição. A onda de choque, do inglês *shock wave*, é gerada através do emprego de projéteis supersônicos e a vibração de superfície, do inglês *surface vibration*, são os sons decorrentes da vibração de superfícies como o solo ou outras superfícies sólidas. Também foram efetuadas as análises acerca da influência de diversos parâmetros ambientais como: vento, umidade, variações de temperatura na atmosfera e disposições do ambiente na propagação do referido sinal. Apresenta-se na Figura 2.2 o exemplo de uma gravação estéreo de disparo de arma de fogo contendo a identificação dos sinais oriundos da onda de choque, do inglês *shock wave*, e da explosão dos gases, do inglês *muzzle blast*.

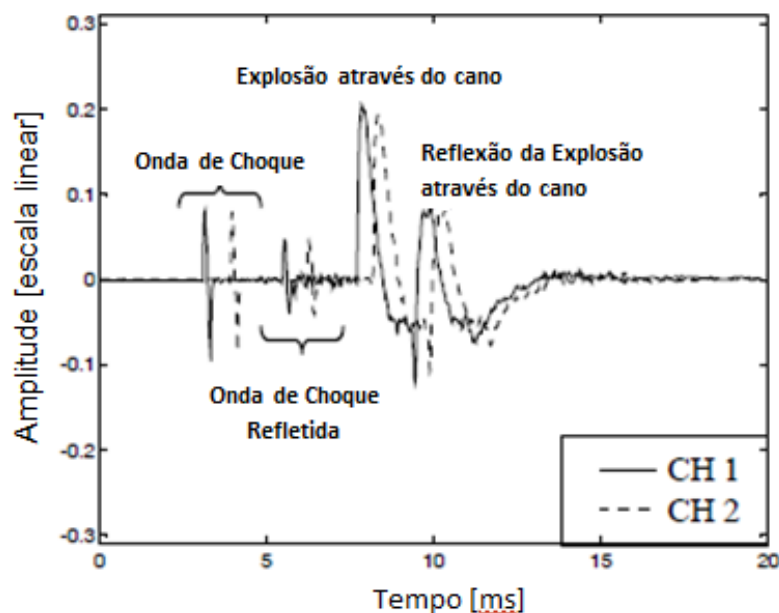


Figura 2.2: Gravação de um disparo de arma de fogo e a identificação de suas componentes (Adaptado de Maher, 2007)

Na sequência, (Maher & Shaw, 2008) realizaram diversos experimentos em condições controladas, realizando tiros de rifles em distâncias variadas, a partir de 10 m até aproximadamente 800 m de distância em relação ao microfone, observando as variações dos sinais contidos nessas gravações. Nesta pesquisa consigna-se o alerta para a importância do perito em cercar-se de informações e dados experimentais suficientes antes de tecer inferências prematuramente diante de uma gravação de disparo de arma de fogo.

(Maher & Shaw, 2010) procederam ainda gravações com dez armas de fogo distintas, no intuito de analisar a influência dos aspectos direcionais para diferentes tipos de armas de fogo.

Foi evidenciado nesses experimentos que a variação da orientação do cano da arma em relação a posição do microfone, i.e. azimute, provoca consideráveis alterações nas características do sinal registrado, sendo tais alterações significativamente superiores quando comparadas ao sinal obtido com armas de fogo distintas posicionadas em um mesmo azimute.

2.3. DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE DISPAROS E LOCALIZAÇÃO DO ATIRADOR

A detecção automática de tiros em registros de áudio possui inúmeras aplicações nas áreas de segurança pública, defesa ou análise forense acústica. Esta pode ainda ser empregada previamente no tratamento de outros problemas como a localização do atirador, conhecido na literatura como problema do atirador ou *sniper*, do inglês *sniper problem*, ou direção de chegada, do inglês *Direction of Arrival* – DoA. (Freire & Apolinário Jr., 2010) trataram o problema da detecção de tiros em ambientes ruidosos por meio da correlação do sinal de áudio com modelos predeterminados.

Posteriormente (Freire & Apolinário Jr., 2011) consideraram ainda o problema do *sniper* e apresentaram método para localização do atirador através da associação de microfones, conforme evidenciado na Figura 2.3, e a utilização de algoritmos da família *Generalized Cross-Correlation* (GCC). Verificou-se na ocasião que a abordagem proposta pode ser empregada no caso particular em que há a sobreposição das componentes *muzzle blast* e *shock wave*.

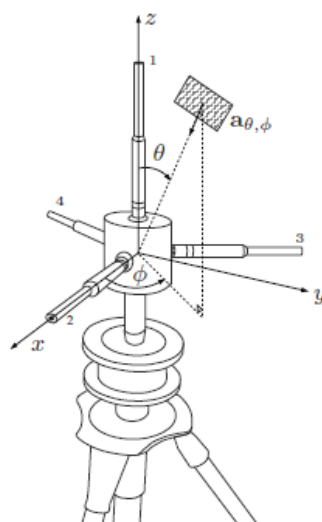


Figura 2.3: Associação de microfones utilizadas para o problema do sniper (Adaptado de Freire & Apolinário Jr., 2011)

(Calderon, Manolo & Apolinário Jr, 2015) também trataram o problema do *sniper* por meio de associação de microfones em uma plataforma elevada, cuja localização do atirador é determinada a partir da localização exata do conjunto de microfones, da informação topográfica da área e da estimativa da direção de chegada calculada a partir da componente *muzzle blast*.

2.4. IDENTIFICAÇÃO DE ARMAS DE FOGO POR MEIO DOS COEFICIENTES DA SÉRIE DE FOURIER DE COSSENOS

Para a identificação de armas de fogo a partir de gravações de áudio contendo tiros (Thumwarin, Matsuura & Yakoompai, 2014) consideraram oitenta áudios contendo oito tipos de armas de fogo diferentes e propuseram um método para identificação de armas de fogo através de funções autocorrelação dos coeficientes da série de Fourier de cossenos, do inglês *Fourier Cosine Coefficients* (FCC), com valores de referências, obtendo resultados satisfatórios para o problema proposto. Entretanto, diversos fatores como a velocidade do vento, temperatura, reflexão e reverberação do som, tipo e qualidade do projétil além dos aspectos direcionais do atirador em relação ao microfone não foram considerados nesse trabalho.

(Thumwarin, Prasit, & Matsuura, 2008) apresentaram abordagem para identificação de arma de fogo a partir da imagem rotacionada do estojo do cartucho. As armas são identificadas a partir da distância do valor absoluto da FCC em relação aos valores do estojo de referência e do estojo a ser identificado.

2.5. MODELAGENS A PARTIR DE TUBOS SONOROS E AS APLICAÇÕES NAS CIÊNCIAS FORENSES

Embora aplicada para tratamento de problemas distintos, a modelagem acústica proposta nesta dissertação, isto é, a partir dos conceitos de física-acústica de tubos sonoros é similar à empregada para a modelagem acústica do trato vocálico, como no processo de formação de vogais do português, conforme demonstrado por (Barbosa & Madureira, 2015). Esta modelagem possui vastas aplicações na fonética forense sendo fundamental para a resolução de problemas relacionados aos exames periciais de comparação de locutor

Apresentam-se nas Figuras 2.4 e 2.5, adaptadas de (Barbosa & Madureira, 2015), os modelos para a formação de vogais neutras e formação de vogais não-arredondada e não-alta, correspondentes a um tubo fechado simples e a uma associação de tubos respectivamente.

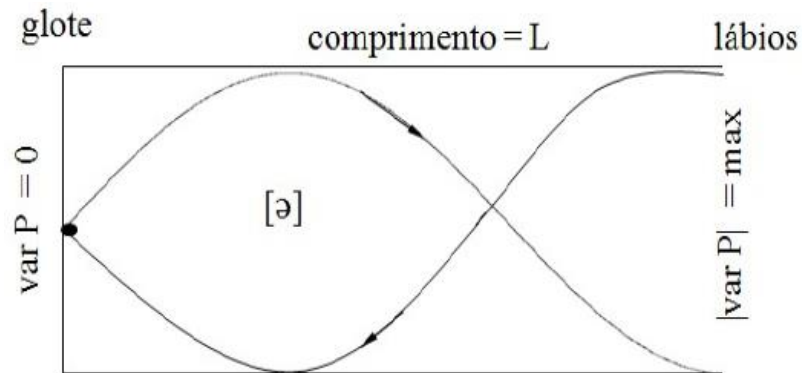


Figura 2.4: Tubo uniforme fechado na glote e aberto nos lábios como modelo de produção de vogais neutras (Barbosa & Madureira, 2015).

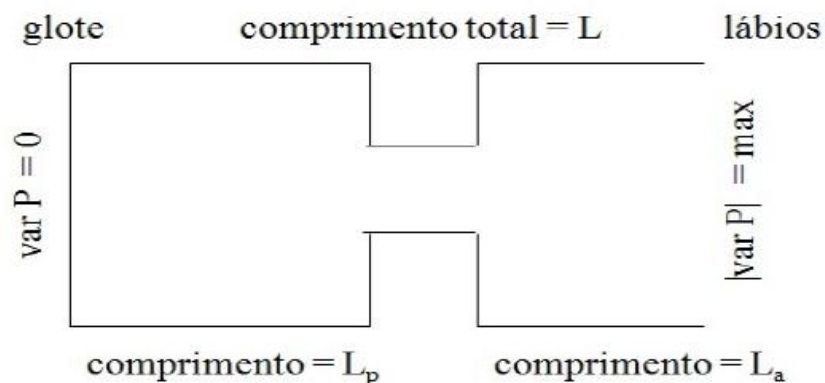


Figura 2.5: Tubo uniforme fechado na glote e aberto nos lábios, com constrição entre língua e palato, na produção de vogal não-arredondada e não alta (Barbosa & Madureira, 2015).

2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar dos esforços realizados, não foram localizados na literatura correlata abordagens similares a que se encontra proposta neste trabalho, ou seja, relacionadas à identificação de municações por meio das assinaturas acústicas geradas na queda do estojo ejetado.

3. MODELAGEM FÍSICA DO PROBLEMA

Neste capítulo é abordada a fundamentação teórica, com ênfase nos principais conceitos de balística forense e física acústica que subsidiam a modelagem realizada para o problema proposto e encontra-se subdividido em três seções. Na Seção 3.1 apresenta-se uma introdução aos mecanismos de expulsão do estojo, enquanto na Seção 3.2 são abordadas as características físicas e as respectivas dimensões dos calibres delimitados neste artigo e, por último, na Seção 3.3 são propostas as modelagens do comportamento acústico dos estojos.

3.1. MECANISMOS DE EXPULSÃO DOS ESTOJOS

Cabe inicialmente ressaltar que existem na literatura distintas formas para classificações de armas de fogo, elaboradas por autores e especialistas que empregam critérios e abordagens diferenciadas para tal classificação.

Há a classificação geral elaborada pelo professor Eraldo Rabello, apresentada na Figura 3.1, que se encontra reproduzida em (Tocchetto, 2013).

Classificação Geral das Armas de Fogo					
Armas de Fogo	Quanto à Alma do Cano	Lisas			
		Raiadas	<ul style="list-style-type: none"> Número de raias par Número de raias ímpar 		
	Quanto ao Sistema de Carregamento	De antecarga			
		De retrocarga	<ul style="list-style-type: none"> Propriamente ditas Com culatra de antecarga 		
	Quanto ao Sistema de Inflamação	Por mechas (absolutas)			
		Por atrito	<ul style="list-style-type: none"> Fecho de roda (<i>wheellock</i>) Fecho de miquele (<i>flintlock</i>) 	Pederneiras (absolutas)	
		Por percussão	Extrínseca	→ Armas de antecarga	
			Intrínseca	<ul style="list-style-type: none"> Pino lateral (absoluta) Central radial 	<ul style="list-style-type: none"> Direta Indireta
		Elétrica			
	Quanto ao Funcionamento	De tiro unitário	<ul style="list-style-type: none"> Simples Múltipla 		
De repetição		<ul style="list-style-type: none"> Não automática Semiautomática Automática 			
Quanto à Mobilidade e ao Uso	Fixas				
	Móveis	<ul style="list-style-type: none"> Tração extrínseca Automotrizes 	Coletivas		
	Semiportáteis				
	Portáteis	<ul style="list-style-type: none"> Longas Curtas 	<ul style="list-style-type: none"> Coletivas Individuais 		

Figura 3.1: Classificação geral das armas de fogo por (Eraldo Rabello, 1966)

Outra classificação utilizada no Brasil é a contida na Cartilha de Armamento e Tiro, elaborada pelo Serviço de Armamento e Tiro da Academia Nacional de Polícia e Serviço Nacional de Armas do Departamento de Polícia Federal (DPF). Nessa classificação, as armas de fogo podem ser classificadas conforme (DPF, 2010):

- Quanto à alma do cano
 - Alma raiada
 - Alma Lisa
 - Choque pleno
 - Choque modificado
 - Choque liso
- Quanto ao tamanho
 - Armas curtas
 - Pistolas
 - Revólveres
 - Armas longas
 - Rifles (alma raiada)
 - Fuzil de assalto (alma raiada)
 - Carabinas (alma raiada)
 - Submetralhadora (alma raiada)
 - Metralhadora (alma raiada)
 - Espingardas (alma lisa)
- Quanto ao sistema de carregamento
 - Antecarga
 - Retrocarga
- Quanto ao sistema de funcionamento
 - Repetição
 - Semiautomático
 - Automático
- Quanto ao sistema de acionamento
 - Ação simples
 - Ação dupla
 - Dupla ação
 - Ação híbrida

Neste trabalho, será considerada e doravante empregada a classificação geral elaborada pelo professor Eraldo Rabello, apresentada previamente na Figura 3.1, a qual é referência na literatura correlata da criminalística nacional.

Nesta classificação, as armas de fogo, quanto ao funcionamento, podem ser classificadas em armas de tiro unitário e armas de repetição. As armas de tiro unitário são aquelas que comportam carga para um único disparo, mesmo que disparando múltiplos projéteis simultaneamente, tendo portanto seu carregamento efetuado de forma manual (Tocchetto, 2013). Como exemplo, pode-se citar as espingardas de um cano, pistolas de tiro unitário e garruchas. Já as armas de repetição comportam carga para dois ou mais tiros e o carregamento ocorre mecanicamente. As armas de repetição podem ser classificadas em não automáticas, semiautomáticas e automáticas.

Ainda segundo (Tocchetto, 2013), as armas de repetição não automáticas são aquelas cujos mecanismos de repetição e disparo dependem exclusivamente da força muscular do atirador, como os revólveres assim como a maioria das carabinas. Apresenta-se um modelo de revólver de fabricação nacional na Figura 3.2.



Figura 3.2: Arma de repetição não automática – Revólver (Adaptado de TAURUS, 2016)

Para as armas de repetição semiautomáticas, o esforço do atirador é necessário apenas para o acionamento do mecanismo de disparo, aproveitando-se a força de expansão dos gases da combustão da substância propelente para o acionamento automático do mecanismo de

repetição (Tocchetto, 2013). São exemplos deste tipo de arma a maioria das pistolas. Apresenta-se na Figura 3.3 um modelo de pistola de fabricação nacional.

Para as armas de repetição automática tanto o mecanismo de disparo quanto o de repetição são acionados pela força expansiva dos gases, sendo possível a produção de tiro não apenas intermitente mas também de forma contínua, em rajada. São exemplos deste tipo de armas as submetralhadoras e fuzis, conforme ilustração deste último na Figura 3.4. (Tocchetto, 2013)



Figura 3.3: Arma de repetição semiautomática – Pistola (Adaptado de TAURUS, 2016)

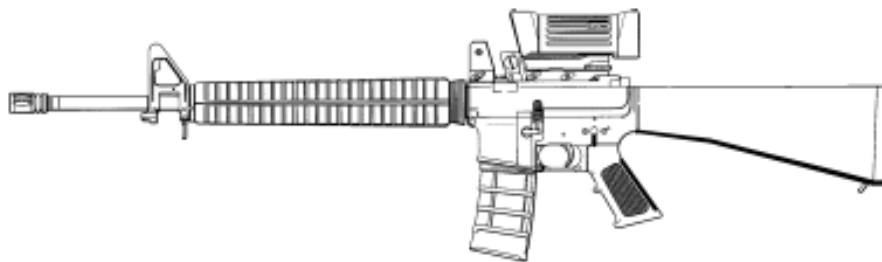


Figura 3.4: Arma de repetição automática – Fuzil (Adaptado de COLT, 2005)

As armas de fogo de funcionamento por repetição semiautomáticas e automáticas, como as pistolas, submetralhadoras e fuzis, por exemplo, apresentam mecanismos automáticos para a expulsão do estojo logo após o respectivo cartucho ser deflagrado, conforme demonstrado para um ciclo do sistema de repetição de uma pistola na Figura 3.5. Esse mecanismo tem como objetivo o recarregamento automático da munição, permitindo que a arma esteja apta para efetuar outro disparo no menor tempo possível.

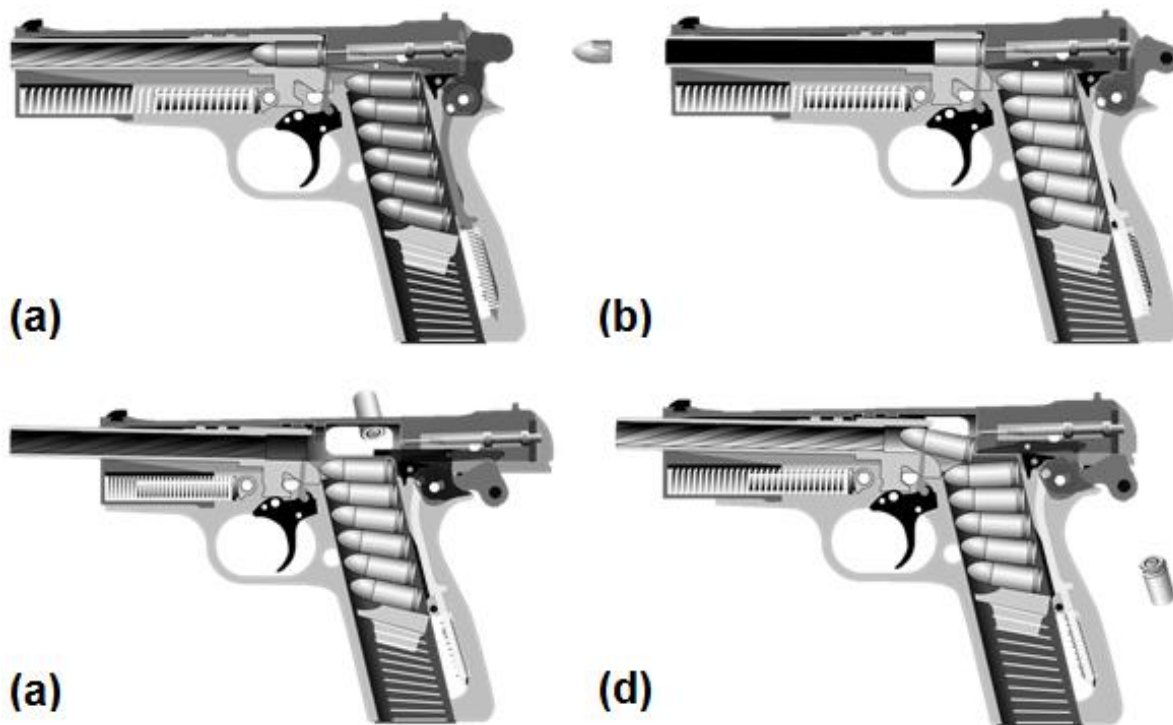


Figura 3.5: Ilustração do ciclo de recarregamento de uma pistola. O percutor atinge a espoleta do cartucho que se encontra na câmara (a), o projétil é expelido através do cano (b), o ferrolho recua e o estojo deflagrado é ejetado para fora da câmara (c) seguido do retorno do ferrolho e entrada de uma nova munição na câmara (d) (Adaptado de KNAP, 2002).

Considerando as classificações das armas quanto aos mecanismos de repetição, apresentados previamente na Figura 3.1, observa-se que a abordagem proposta aplica-se preferencialmente para as armas de repetição semiautomáticas e automáticas. Nesses tipos de armas de fogo o evento acústico perquirido de interesse da abordagem proposta, decorrente da expulsão do estojo deflagrado, independe de qualquer ação voluntária do atirador, estando portanto inerente a ocorrência do disparo.

Por outro lado, esta abordagem ainda demonstra-se válida para determinadas armas de repetição não automática. Porém nestes casos é imprescindível a ação voluntária do atirador para a extração do estojo deflagrado, como no caso, por exemplo, de espingardas com mecanismos de repetição por bomba, do inglês *pump action*, ou ainda na substituição dos cartuchos deflagrados do tambor do revólver.

3.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS ESTOJOS

O cartucho é composto, de maneira geral, por quatro componentes: o projétil, a carga propelente, o estojo e a espoleta, conforme apresentado na Figura 3.6. Para a ocorrência do tiro, a arma deve percutir a espoleta, que provoca a queima da carga propelente, gerando um grande volume de gases responsáveis por expulsar o projétil através do cano da arma. O estojo é o invólucro externo que permite a união mecânica de todos estes componentes, em uma única peça, facilitando o manejo da arma e a redução do intervalo de cada disparo.

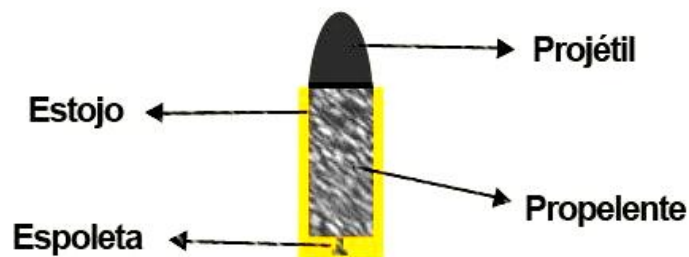


Figura 3.6: Ilustração dos componentes presentes em um cartucho de percussão central

Atualmente a maioria dos estojos são constituídos por metais não ferrosos, principalmente o latão, composto por liga de cobre e zinco (70 % de cobre e 30 % de zinco). Porém, ainda assim, é possível encontrar estojos de diversos tipos de materiais como alumínio, plástico, papelão, entre outros.

A forma e as dimensões do estojo indicam a configuração interna da câmara e conseqüentemente o calibre nominal da arma. Apresenta-se na Figura 3.7 a classificação presente na literatura quanto ao formato dos estojos disponíveis. Cabe ressaltar ainda que, na prática, até para os estojos cilíndricos é possível a ocorrência de um pequeno afunilamento na boca para facilitar o seu processo de extração.



Figura 3.7: Formatos de estojos: cilíndricos, cônicos e garrafa (Adaptado de Zanotta, 1992)

Os estojos do tipo cilíndricos são empregados predominantemente por revólveres, pistolas e submetralhadoras de maneira geral. O estojo do tipo cônico, com exceção do calibre de pistola 9 mm Luger, encontra-se em desuso, sendo mais empregado para alguns rifles antigos como os calibres: 8x72 mm, 9,3x48 mm e 7x72 mm. Os estojos do tipo garrafa apresentam um estrangulamento no intuito de aumentar a quantidade de propelente para projéteis menores, sendo utilizado por carabinas, rifles, fuzis e, ainda, em alguns tipos incomuns de pistolas. Geralmente são empregados em armas que disparam com maior quantidade de energia.

Este trabalho delimitou ao todo dez calibres de munição, sendo quatro calibres de pistolas, do tipo cilíndrico ou cônico, e seis calibres do tipo garrafa. A nomenclatura do calibre nominal decorre do sistema de medidas utilizado, podendo ser expresso em milímetros ou em frações de polegadas e seguido de uma referência indicativa da arma para a qual o cartucho foi originalmente produzido. A nomenclatura pode ainda apresentar variações de acordo com os aspectos históricos e culturais de cada país. Neste trabalho, procurou-se utilizar a nomenclatura mais usual na criminalística nacional, consignando ainda outras denominações equivalentes. Observa-se que a nomenclatura nacional utiliza predominantemente o sistema de medidas em milímetros, mas ainda assim apresenta, para alguns calibres específicos, a nomenclatura em frações de polegadas como nos casos: .40 S&W, .32 Auto e .380 Auto, conforme descrito abaixo:

- 9 mm Luger, também conhecido como 9 mm Parabellum;
- .40 S&W;
- .32 Auto, também conhecido como .32 ACP ou 7,65 mm Browning;
- .380 Auto, também conhecido como .380 ACP ou 9 mm Curto;
- 7x57 mm, também conhecido como 7 mm Mauser;
- 7,62x63 m, também conhecido como .30-06 Springfield.
- 7,62x51 mm, também conhecido como .308 Win;
- 7,62x39 mm, também conhecido como 7,62 AK-47;
- 5,56x45 mm também conhecido como .223 REM;
- 12,70x99mm, também conhecido como .50 BMG.

Apresentam-se na Tabela 3.1 as dimensões físicas padrões de todos os calibres considerados nesta pesquisa. As dimensões utilizadas nesta pesquisa foram extraídas da base de dados da (AECC, 2015) e se encontram disponíveis no Anexo A deste trabalho.

Tabela 3.1: Calibres e dimensões dos estojos delimitados (AECC, 2015)

Nome do Calibre	Tipo da Forma	Comprimento Total (mm)	Diâmetro boca (mm)	Diâmetro base (mm)
9 mm Luger	Cônico	19	9,55	9,84
.40 S&W	Cilíndrico	21,56	10,69	10,74
.32 Auto	Cilíndrico	17,16	8,40	8,50
.380 Auto	Cilíndrico	17,27	9,45	9,45
7x57 mm	Garrafa	56,76	7,98	11,80
7,62x63 mm	Garrafa	63,39	8,21	11,85
7,62x51 mm	Garrafa	51,08	8,59	11,88
7,62x39 mm	Garrafa	38,64	8,50	11,25
5,56x45 mm	Garrafa	44,56	6,28	9,49
12,70x99 mm	Garrafa	99,20	14,14	20,30

3.3. FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA EM TUBOS SONOROS

Segundo os conceitos de física acústica, quando as ondas sonoras se propagam no interior de um tubo, estas são refletidas nas extremidades, ainda que esteja aberta. Nas extremidades abertas o som reflete-se em fase ocorrendo o ponto de deslocamento máximo, também denominado na literatura como anti-nó, e nas extremidades fechadas há ocorrência do ponto de amplitude mínima (zero), também denominado na literatura como nó. Para certos comprimentos de onda, a superposição das ondas que se propagam nos tubos em sentidos opostos produz uma onda estacionária. Os comprimentos de ondas para os quais esses fenômenos acontecem correspondem às respectivas frequências de ressonância do tubo.

Um tubo sonoro pode ser classificado como aberto quando apresenta as duas extremidades abertas ou fechado quando apresenta uma extremidade aberta e a outra fechada. Ainda segundo conceitos físico-acústicos um tubo sonoro aberto apresentará a frequência fundamental e todas as suas harmônicas, enquanto um tubo sonoro fechado apresentará a frequência fundamental e suas formantes ímpares, conforme ilustrado nas Figuras 3.8 e 3.9 para os tubos abertos e fechados, respectivamente.

Cabe ressaltar ainda que, na ressonância, temos a amplitude mínima (nó) na extremidade fechada, mas o anti-nó não se encontra exatamente na extremidade aberta, em decorrência da influência do ar localizado imediatamente após a extremidade aberta influenciar no comportamento acústico do tubo (Liljencrants, 2006). Dessa forma, observa-se na prática que o anti-nó está localizado a uma pequena distância além da extremidade aberta. Esta distância extra é denominada na literatura como correção final, do inglês *end correction*. O comprimento do tubo acústico é igual ao seu comprimento físico mais a correção final (Asskill, 2007). Conforme estimado por (Asskill, 2007) a correção final para os tubos abertos e fechados, doravante denominados x_a e x_f respectivamente, foram considerados neste trabalho 0,6 e 0,4.

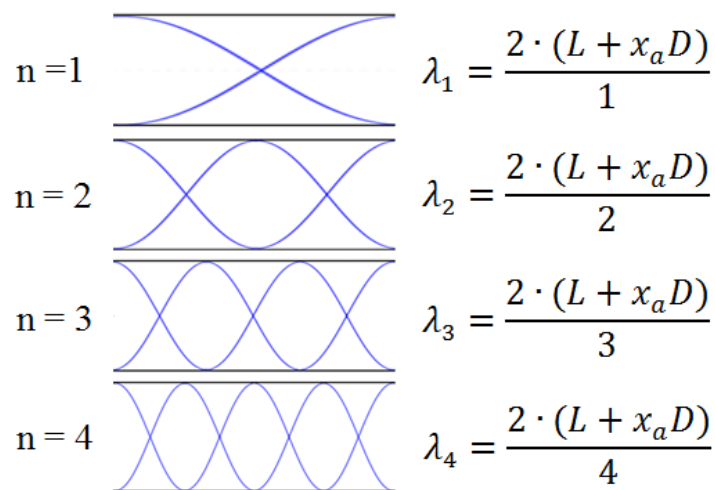


Figura 3.8: Ondas estacionárias em tubos abertos

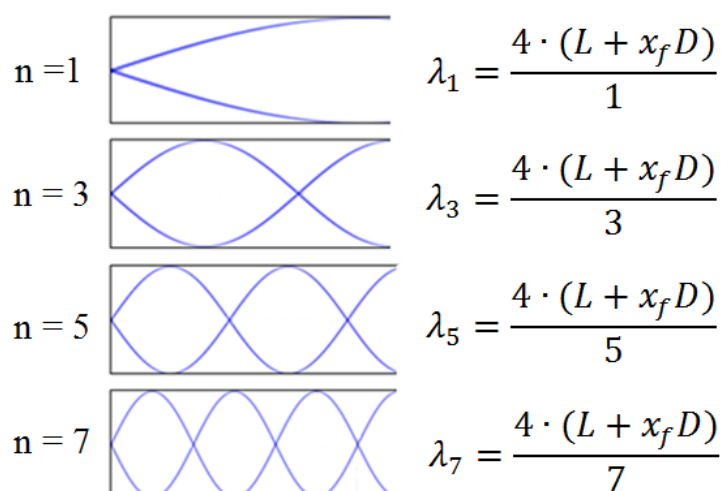


Figura 3.9: Ondas estacionárias em tubos fechados

Para a modelagem do comportamento acústico e o cálculo das frequências de ressonância teórica dos estojos de formatos cilíndrico ou cônico, estes foram considerados como sendo tubos cilíndricos ideais, isto é, perfeitamente cilíndricos e homogêneos. Já para a modelagem dos estojos do formato garrafa estes foram considerados como sendo uma associação de dois tubos cilíndricos, sendo um tubo maior com uma extremidade aberta e a outra fechada conectada a um tubo menor com ambas as extremidades abertas. Desta forma, as frequências de ressonância foram estimadas a partir de (1) para os tubos abertos e a partir de (2) para os tubos fechados:

$$f_{na} = \frac{n \cdot v}{2 \cdot (L + 0.6D)}, \quad \text{para } n = 1, 2, 3, 4... \quad (1)$$

$$f_{nf} = \frac{n \cdot v}{4 \cdot (L + 0.4D)}, \quad \text{para } n = 1, 3, 5, 7... \quad (2)$$

em que v , L e D são a velocidade do som, o comprimento total e o diâmetro interno do tubo, respectivamente.

Considerando que a grande parcela dos equipamentos de gravação de áudio empregam taxa de amostragem de até 48 kHz e o Teorema de Nyquist demonstra que, para essa taxa de amostragem, é possível o registro do conteúdo espectral de até 24 kHz sem prejuízo, serão consideradas as frequências teóricas dos modelos até o atingimento deste limiar.

Os valores teóricos das frequências de ressonância para os estojos de formato cilíndrico e cônico, calculados a partir de (2), são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Frequências de ressonância dos estojos cilíndricos e cônicos delimitados

Calibre	F_1 (Hz)	F_3 (Hz)	F_5 (Hz)	F_7 (Hz)
9 mm Luger	3724	11172	18620	26068
.40 S&W	3289	9867	16445	23023
.32 Auto	4142	12426	20710	28994
.380 Auto	4038	12114	20190	28266

Para os estojos do formato garrafa, os valores teóricos referentes às componentes das frequências de ressonância dos tubos fechados calculados a partir de (2), encontram-se especificados na Tabela 3.3, enquanto as componentes das frequências de ressonância

correspondentes aos tubos abertos calculados a partir de (1), encontram-se especificados na Tabela 3.4.

Observa-se que as componentes frequenciais estimadas para o tubo aberto dos estojos do tipo garrafa já ultrapassam o limite superior de 24 kHz, com exceção do calibre 12,70x99 mm, a partir da segunda componente.

Tabela 3.3: Frequências de ressonância do tubo fechado dos estojos garrafa

Calibre	F_1 (Hz)	F_3 (Hz)	F_5 (Hz)	F_7 (Hz)	F_9 (Hz)	F_{11} (Hz)
7x57 mm	1640	4920	8200	11480	14760	18040
7,62x63 mm	1457	4371	7285	10199	13113	16027
7,62x51 mm	1754	5262	8770	12278	15786	19294
7,62x39 mm	2296	6888	11480	16072	20664	25256
5,56x45 mm	1957	5871	9785	13699	17613	21527
12,70x99 mm	930	2790	4650	6510	8370	10230

Tabela 3.4: Frequências de ressonância do tubo aberto dos estojos garrafa

Calibre	F_1 (Hz)	F_2 (Hz)	F_3 (Hz)
7x57 mm	12067	24134	36201
7,62x63 mm	12247	24495	36743
7,62x51 mm	13760	27251	41282
7,62x39 mm	15813	31267	47441
5,56x45 mm	20075	40151	60226
12,70x99 mm	7242	14485	21728

4. ENSAIOS REALIZADOS

Este capítulo encontra-se subdivido em três seções. Na Seção 4.1 são abordados os experimentos realizados sob condições controladas. Os testes de robustez da assinatura acústica para ruído, compressão com perdas e a distância em relação ao microfone são descritos na Seção 4.2. Por último, na Seção 4.3, são apresentados os resultados dos experimentos realizados a partir de dados não controlados.

4.1. EXPERIMENTOS CONTROLADOS

Esta seção encontra-se subdividida em três subseções. Na Subseção 4.1.1 são descritos os experimentos realizados para gravação dos sons oriundos da colisão dos estojos com o piso sob condições controladas. Na Subseção 4.1.2 é apresentada a análise espectral dos resultados obtidos com foco na assinatura acústica para cada calibre delimitado no estudo. Finalmente, na Subseção 4.1.3 é apresentada a validação dos modelos teóricos propostos a partir dos resultados dos experimentos controlados.

4.1.1. Detalhes dos Experimentos

Analisando as características físicas dos estojos, observa-se semelhança aparente com o modelo de tubos sonoros, conforme abordado no Capítulo 3, o que sugere que estes possam gerar sons em frequências de ressonância específicas. Para a verificação desta hipótese, foram realizados ensaios em uma sala fechada, com ruído ambiente de baixa intensidade. Cabe ressaltar que a sala em que os experimentos foram realizados era desprovida de isolamento acústico, sendo apenas minimizada a presença de fontes emissoras de ruídos na ocasião. Os estojos deflagrados, foram soltos individualmente a aproximadamente 1,60 m do piso, dotado de revestimento cerâmico, no interior de um círculo de raio de 1 m com o microfone ao centro, conforme esquematizado na Figura 4.1.

Conforme evidenciado na Figura 4.2, para os estojos do tipo cilíndrico e cônico foram utilizados cinco estojos de cada calibre, exceto para o calibre 9 mm Luger em que foram utilizados apenas três estojos. Já para os estojos do tipo garrafa foram utilizados cinco estojos para os calibres 7,62x51 mm e 5,56x45 mm e dois estojos distintos para os demais calibres garrafa, conforme exibido na Figura 4.3.

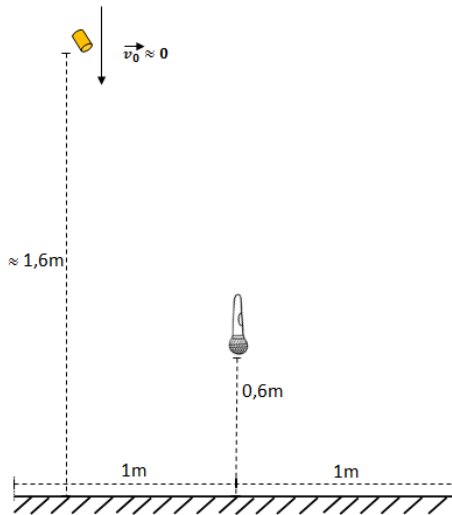


Figura 4.1: Configuração do experimento realizado para coleta dos áudios

A série de lançamento para cada um dos estojos utilizados no experimento foi reproduzida pelo menos cinquenta vezes, no intuito de contemplar a maior variabilidade possível de posições do estorjo, ao colidir com a superfície rígida e conseqüentemente possibilitar a análise a influência deste fator nas assinaturas acústicas dos áudios adquiridos.

Os áudios foram capturados em formato WAV/PCM, sem compressão, com taxa de amostragem 48 kHz, 16 bits e em um único canal (mono).

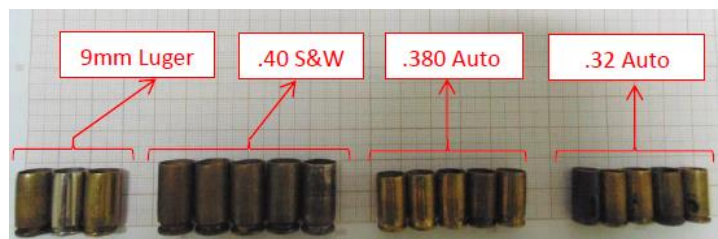


Figura 4.2: Quantidade de estojos do tipo cilíndricos e cônicos utilizados nos experimentos



Figura 4.3: Quantidade de estojos do tipo garrafa utilizados nos experimentos

4.1.2. Análise Espectral dos Resultados obtidos

O espectrograma das gravações efetuadas, conforme configuração descrita na Subseção 4.1.1, revelou a presença de componentes frequenciais específicas para todos os calibres e a ocorrência delas de forma constante ao longo da série de lançamentos. Verificou-se ainda a predominância significativa de uma componente, com maior potência em relação às demais, conforme demonstrado no espectrograma da Figura 4.4, para um intervalo da série de lançamento do primeiro estojo .380 Auto. É possível observar no espectrograma da Figura 4.4, gerado conforme diagrama da Figura 4.5 janela com resolução temporal de 1024 amostras e utilização da função de janelamento *Hamming*, os sons inerentes as colisões geradas por dois arremessos e o intervalo compreendido entre estes lançamentos.

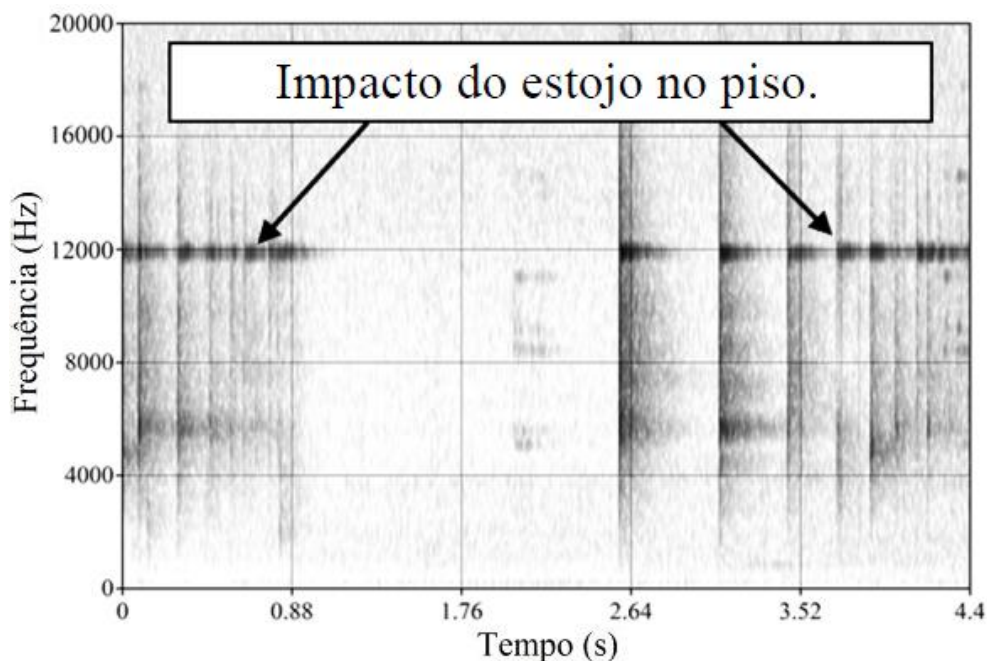


Figura 4.4: Frequência de ressonância de maior potência para estojo #1 do calibre .380 Auto

Considerando a natureza estacionária das frequências de ressonância ao longo das gravações, conforme demonstrado na Figura 4.4, para a estimativa das assinaturas acústicas de cada calibre foi considerado o espectro médio de longo termo, do inglês *long-term average spectrum* (LTAS), que tende a realçar os sinais com característica estacionária em detrimento dos sinais transitórios que tendem a ser atenuados.

O LTAS é obtido através da média aritmética da varredura de janelas adjacentes para determinado trecho de sinal no tempo, conforme esquematizado na Figura 4.5. Para isto,

inicialmente, a densidade espectral de potência $\Psi_i(k)$ de um sinal discreto pode ser calculada através da Transformada Discreta de Fourier (DFT):

$$\Psi_i(k) = \frac{|\sum_{n=0}^{N-1} x_i(n)e^{-\frac{ikn}{N}}|^2}{N(t_2-t_1)}, \quad (3)$$

onde $x_i(n)$ é o sinal de áudio gravado por um microfone, $\Psi_i(k)$ é a DFT de $x_i(n)$, t_1 e t_2 é o intervalo de tempo, começando em t_1 e terminando em t_2 , N é o número de amostras e k a frequência discreta.

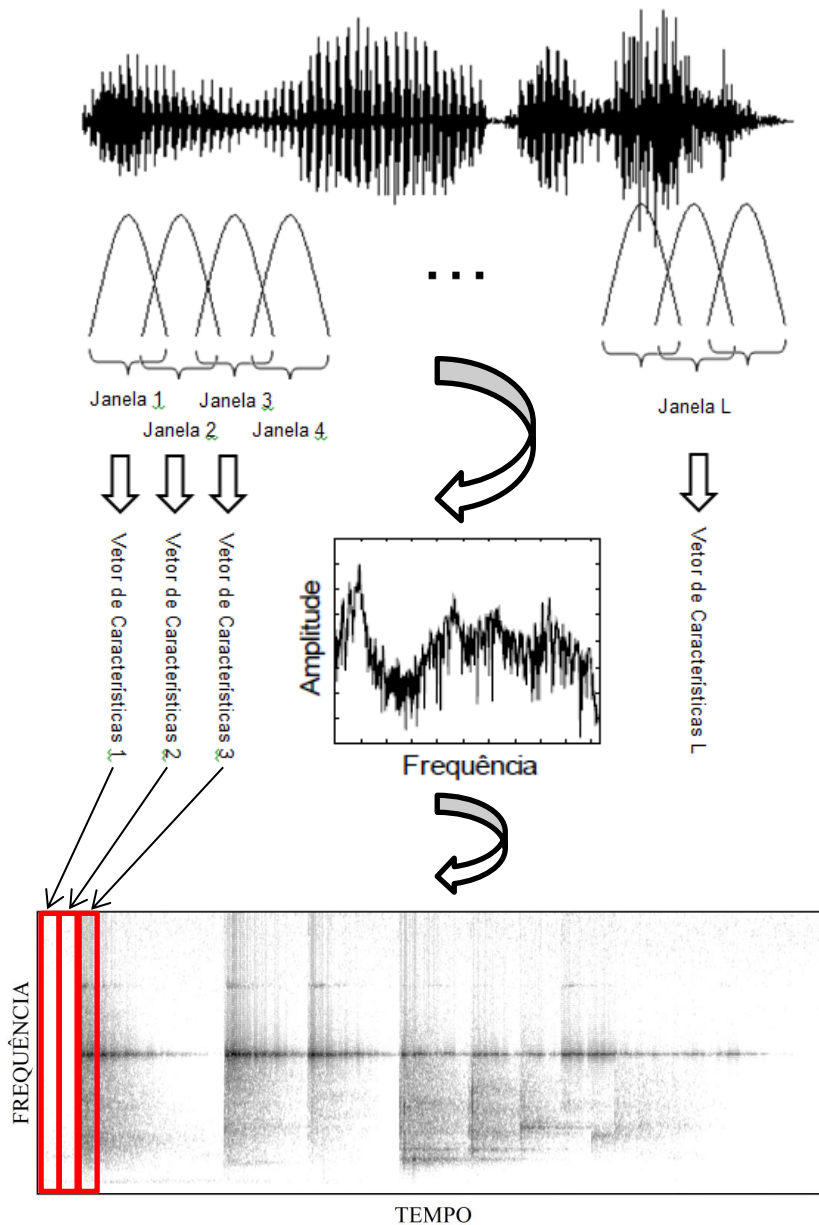


Figura 4.5: Diagrama do processamento por meio da varredura de L janelas ao longo do sinal, a superposição entre estas e a função de janelamento (Adaptado de Paul, 2006)

Desta forma, o LTAS como função da frequência pode ser calculado pela média das L densidades espectrais de potência $\Psi_i(k)$, conforme especificado em (3), a partir de:

$$\bar{\Psi}(k) = \frac{1}{L} \cdot \sum_{i=1}^L \Psi_i(f), \quad (4)$$

onde $\Psi_i(k)$ é a densidade espectral de potência da i -ésima janela do sinal e L é o total de janelas em que o sinal foi dividido. Considerando que a unidade de $\Psi_i(k)$ é Pa^2/s , logo o $\bar{\Psi}(k)$ é expresso na mesma unidade.

Por último, o resultado da LTAS é apresentado como a densidade espectral de potência logarítmica, expressa em dB/Hz , relativo a P_o :

$$\bar{\Psi}_{dB}(k) = 10 \cdot \log_{10}\{[\bar{\Psi}(k)/P_o^2]\}, \quad (5)$$

onde $P_o = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa é considerado o limiar da audição humana para a frequência de 1 kHz (Lindsay, 1977).

O cálculo das curvas LTAS foi realizado através do software PRAAT (Boersma et. al, 2016). Trata-se de um software gratuito e código aberto utilizado em pesquisas e aplicações forenses.

Na Figura 4.6 apresenta-se o LTAS para os três estojos do calibre 9 mm LUGER testados. Verifica-se a ocorrência dos picos de frequências no intervalo de 11150 Hz a 11250 Hz, exibida em detalhe na Figura 4.7, correspondente à segunda componente do modelo teórico (F_3).

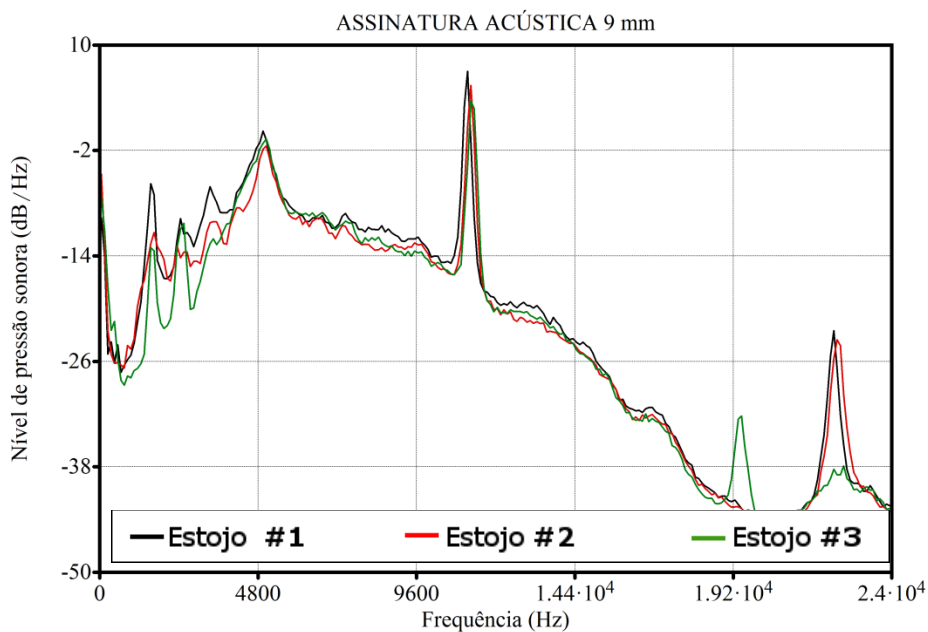


Figura 4.6: LTAS dos estojos calibre 9 mm Luger

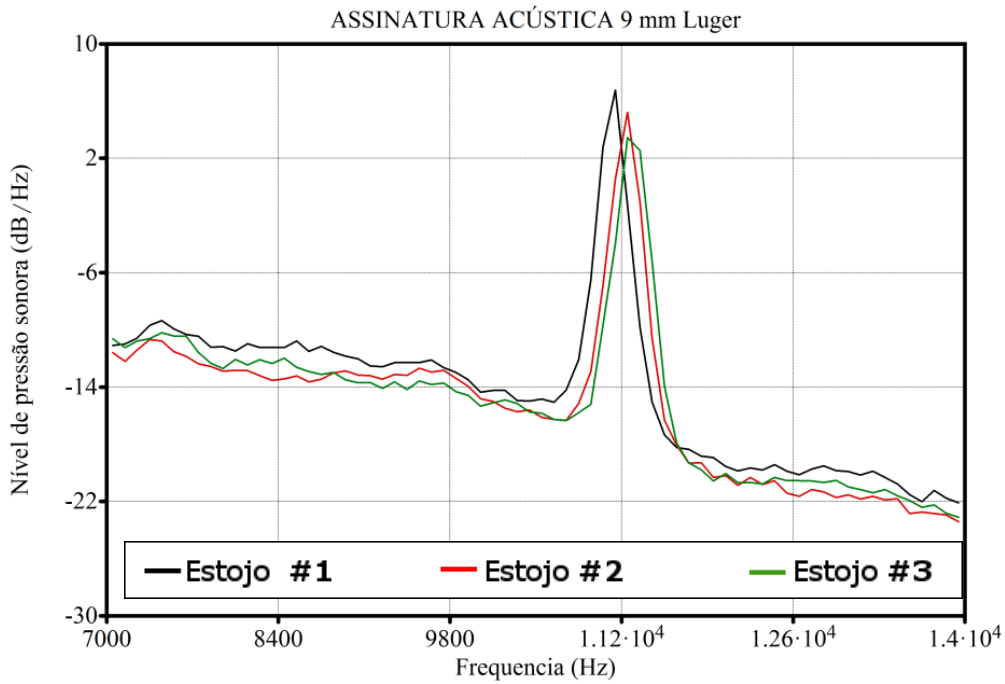


Figura 4.7: Picos de frequências dos estojos calibre 9 mm Luger

Na Figura 4.8 apresenta-se o LTAS para os cinco estojos do calibre .40 S&W testados. Verifica-se a ocorrência dos picos de frequências no intervalo de 8050 Hz a 8450 Hz, exibida em detalhe na Figura 4.9, correspondente à segunda componente do modelo teórico (F_3).

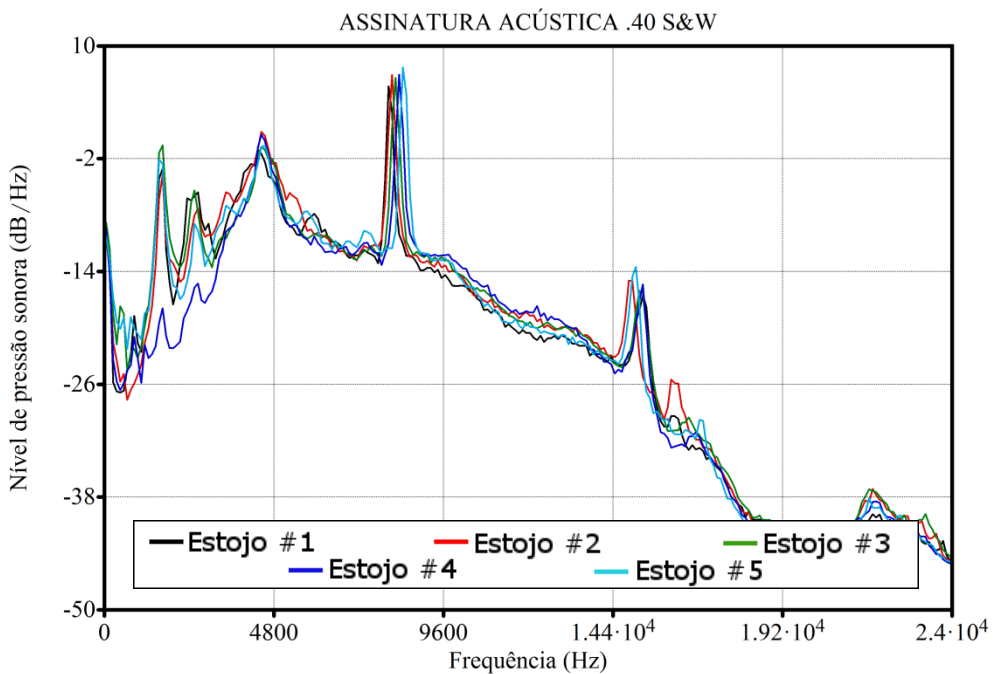


Figura 4.8: LTAS dos estojos calibre .40 S&W

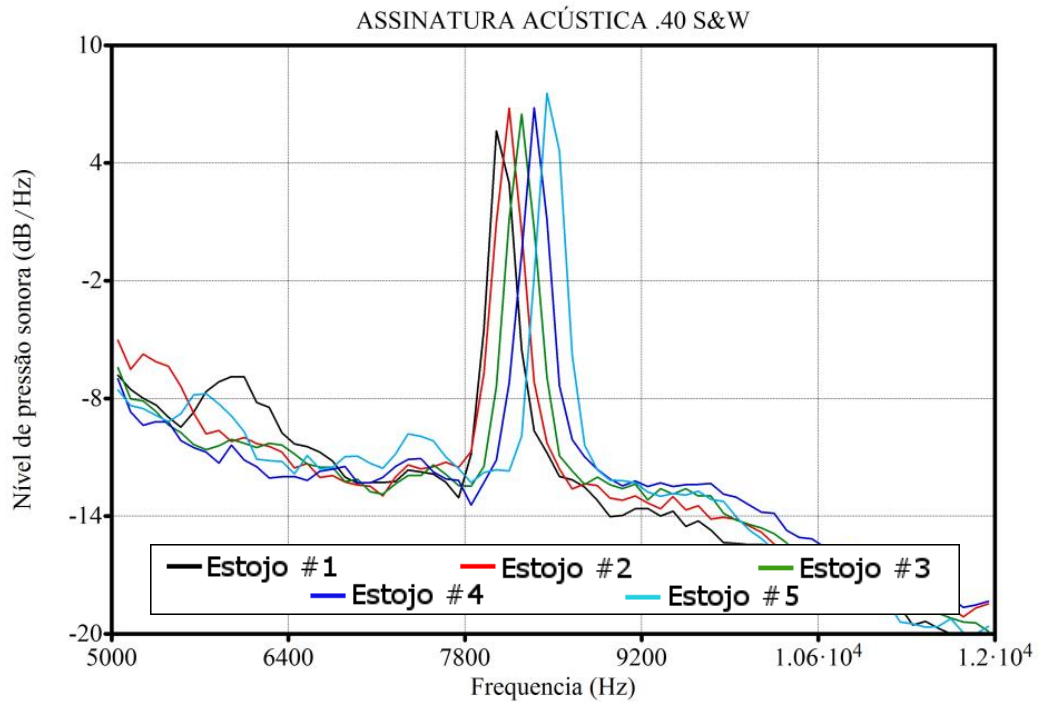


Figura 4.9: Picos de frequências dos estojos calibre .40 S&W

Na Figura 4.10 apresenta-se o LTAS para os cinco estojos do calibre .32 Auto testados. Verifica-se a ocorrência dos picos de frequências no intervalo de 12050 Hz a 12250 Hz, exibida em detalhe na Figura 4.11, correspondente à segunda componente do modelo teórico (F_3).

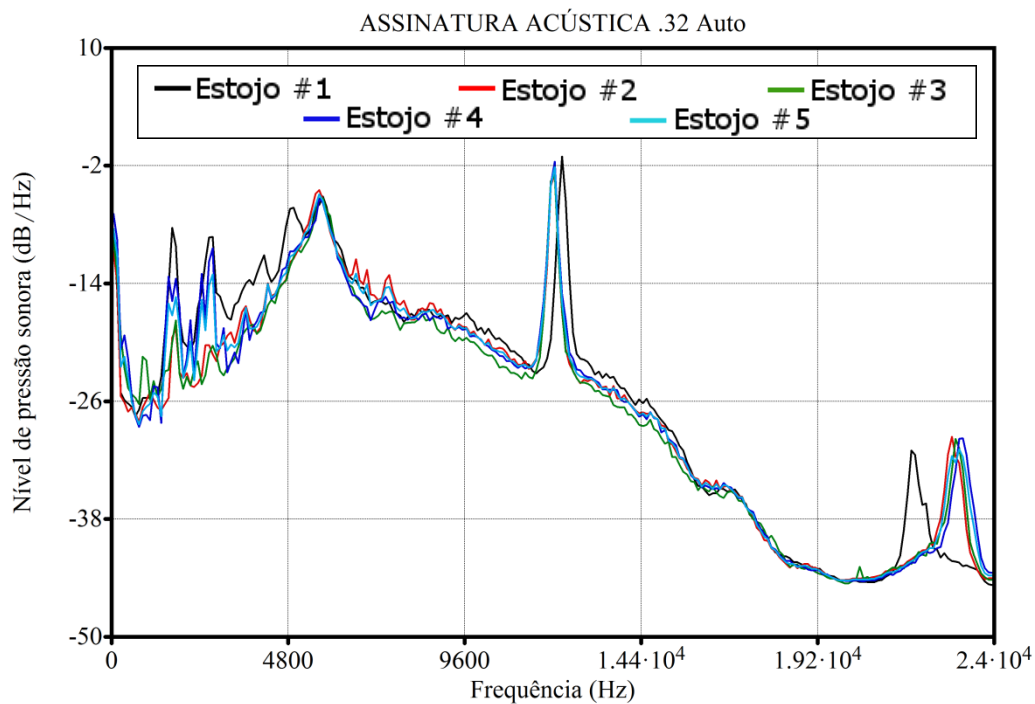


Figura 4.10: LTAS dos estojos calibre .32 Auto

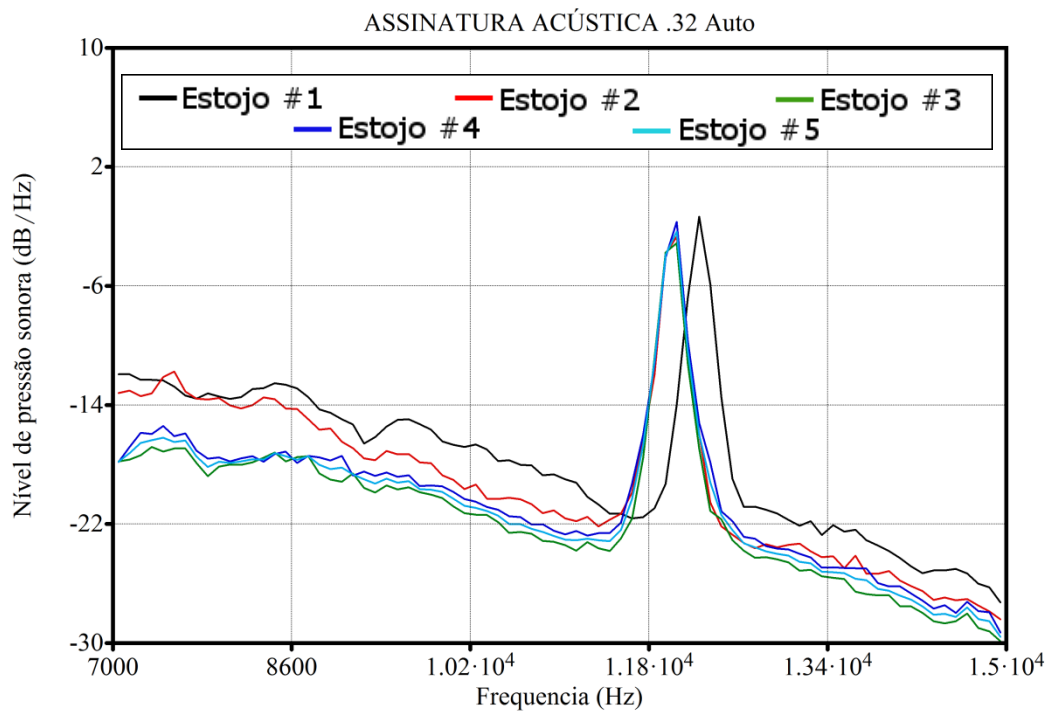


Figura 4.11: Picos de frequências dos estojos calibre .32 Auto

Na Figura 4.12 apresenta-se o LTAS para os cinco estojos do calibre .380 Auto testados. Verifica-se a ocorrência dos picos de frequências no intervalo de 11650 Hz a 11950 Hz, exibida em detalhe na Figura 4.13, correspondente à segunda componente do modelo teórico (F_3).

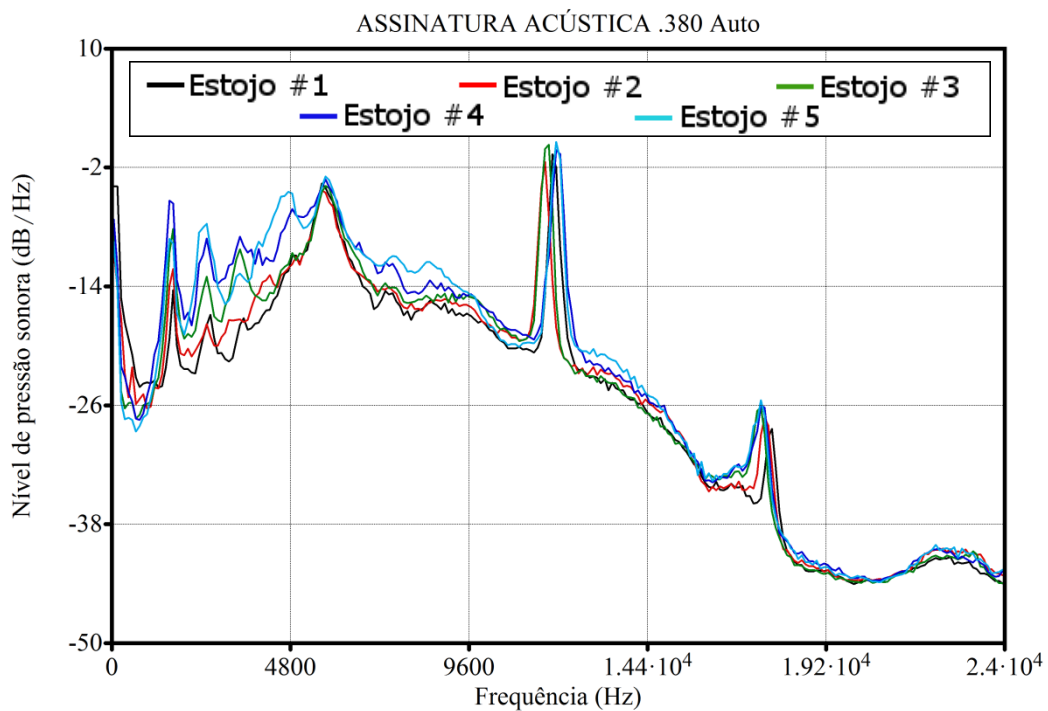


Figura 4.12: LTAS dos estojos calibre .380 Auto

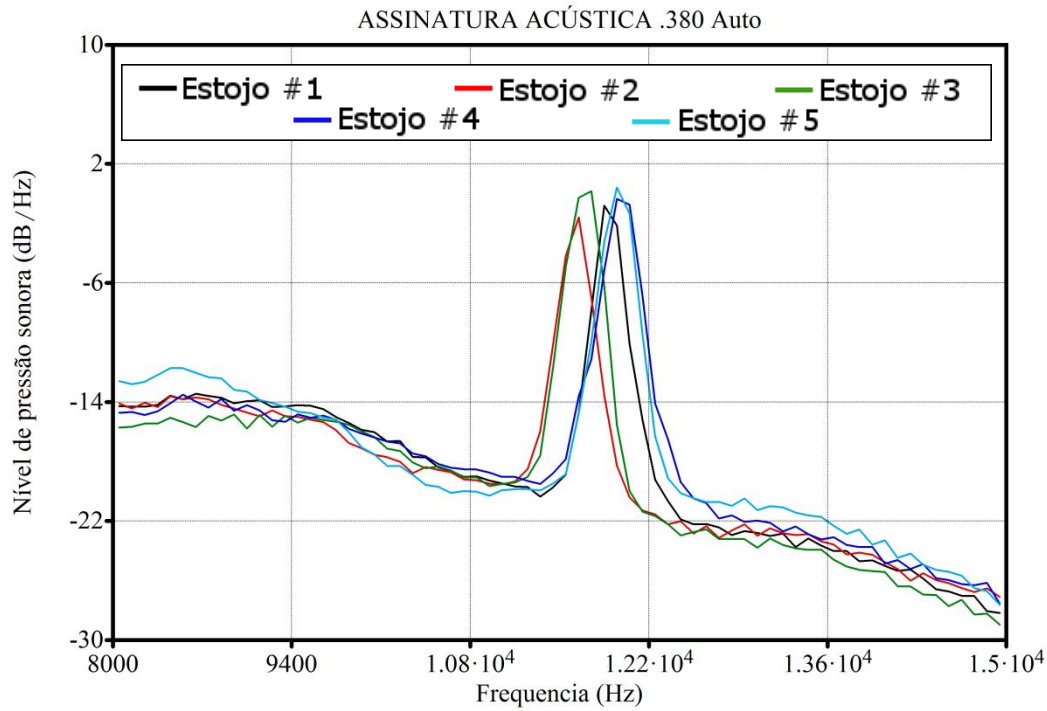


Figura 4.13: Picos de frequências dos estojos calibre .380 Auto

Na Figura 4.14 apresenta-se o LTAS dos dois estojos do calibre 7x57 mm testados. Verifica-se a ocorrência dos picos de maior potência entre 11250 Hz a 11350 Hz, conforme exibida em detalhe na Figura 4.15, correspondente à quarta componente do tubo fechado do modelo teórico (F_7).

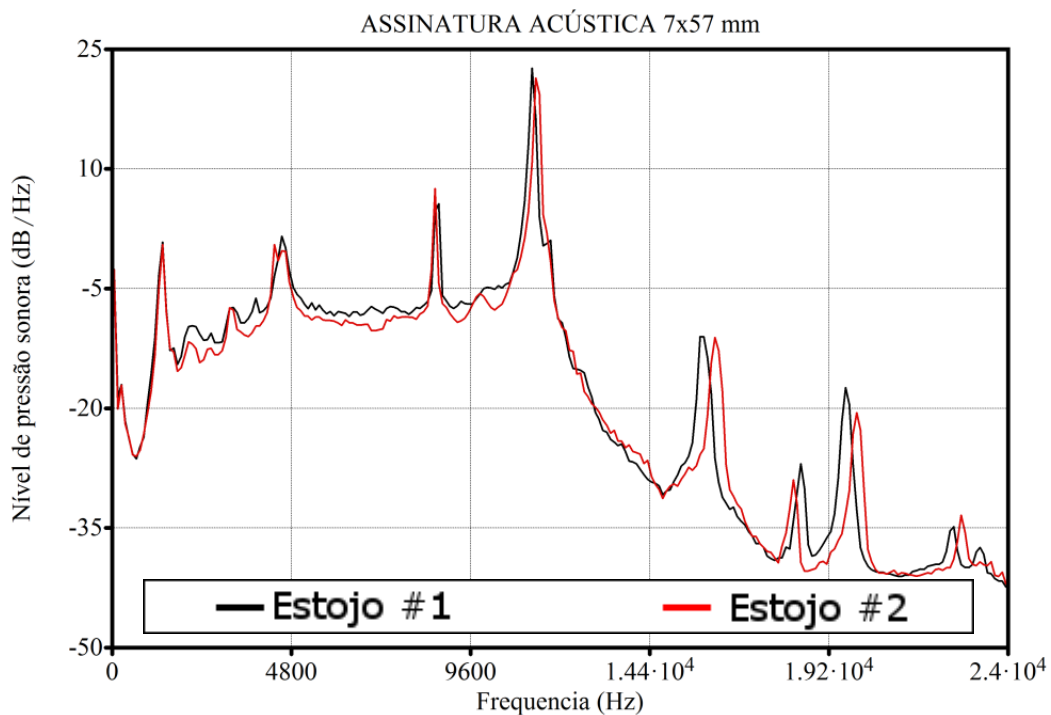


Figura 4.14: LTAS dos estojos calibre 7x57 mm

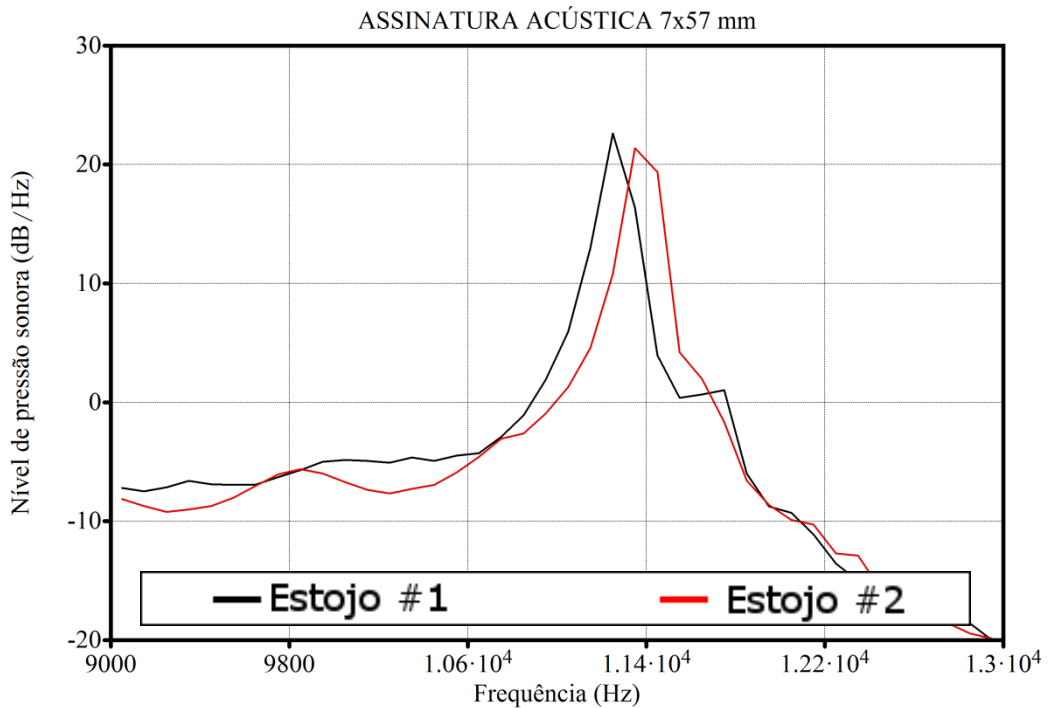


Figura 4.15: Picos de frequências dos estojos calibre 7x57 mm

Na Figura 4.16 apresenta-se o LTAS dos estojos do calibre 7,62x63 mm. Verifica-se a ocorrência dos picos de maior potência entre 9700 Hz a 9850 Hz, conforme exibida em detalhe na Figura 4.17, correspondente à quarta componente do tubo fechado do modelo teórico (F_7).

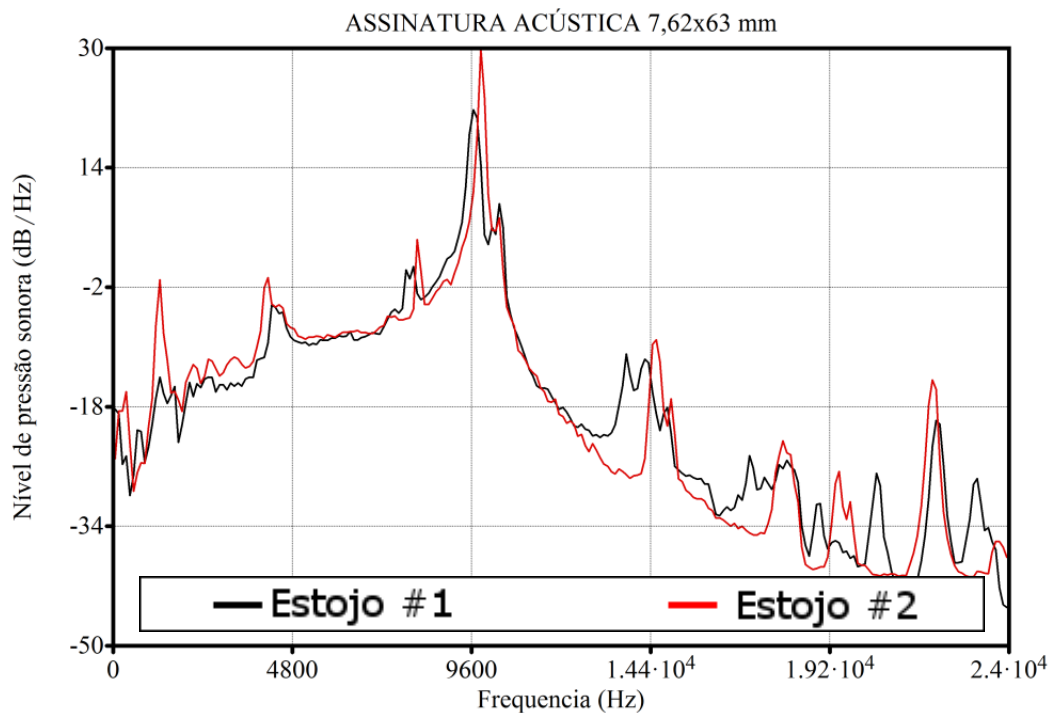


Figura 4.16: LTAS dos estojos calibre 7,62x63 mm

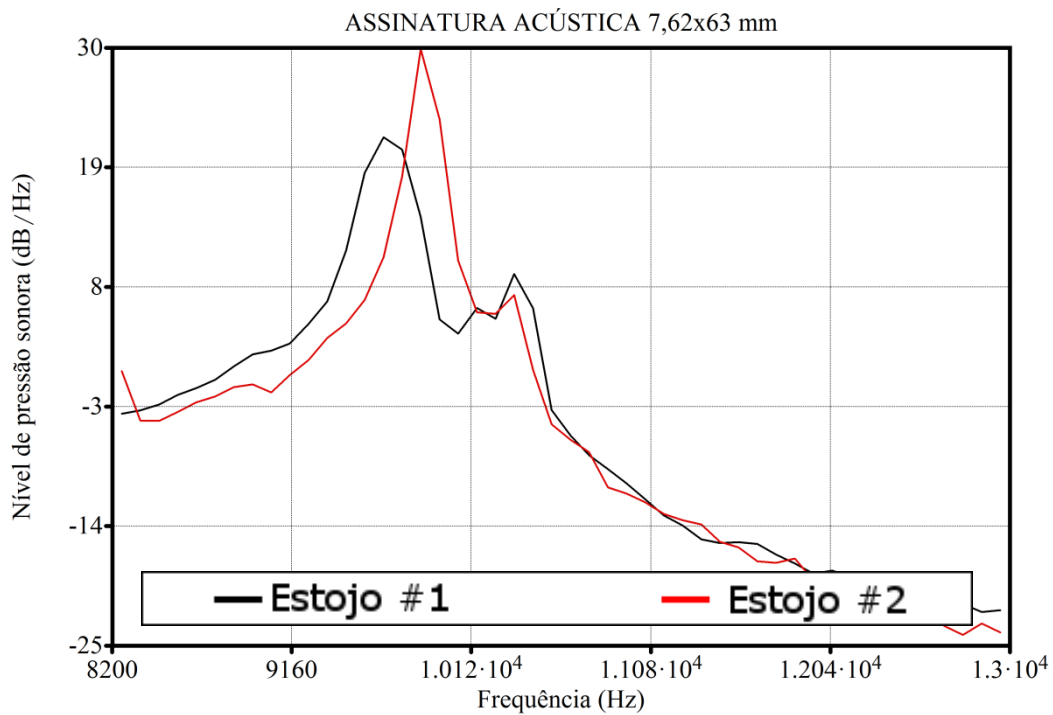


Figura 4.17: Picos de frequências dos estojos calibre 7,62x63 mm

Na Figura 4.18 apresenta-se o LTAS dos cinco estojos do calibre 7,62x51 mm testados. Verifica-se a ocorrência dos picos de maior potência entre 15000 Hz a 15150 Hz, conforme exibida em detalhe na Figura 4.19, correspondente à quinta componente do tubo fechado do modelo teórico (F_9).

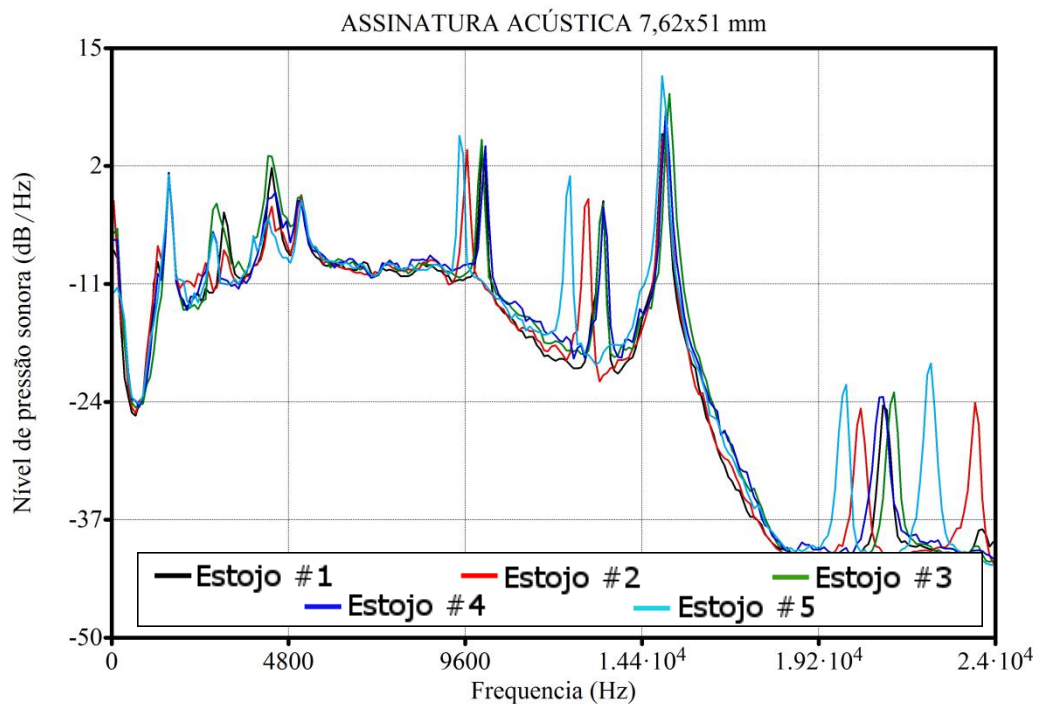


Figura 4.18: LTAS dos estojos calibre 7,62x51 mm

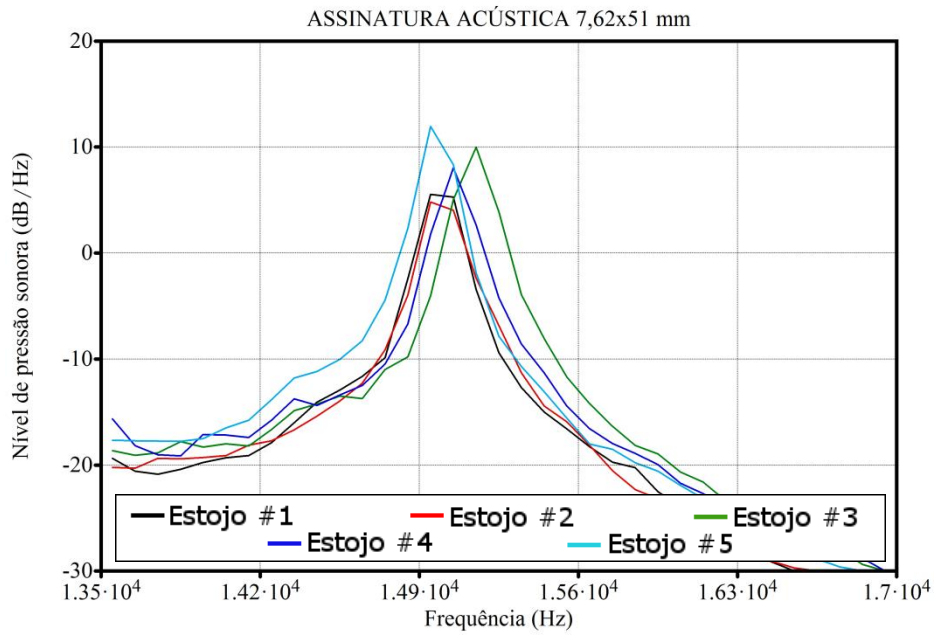


Figura 4.19: Picos de frequências dos estojos calibre 7,62x51 mm

Na Figura 4.20 apresenta-se o LTAS dos dois estojos do calibre 7,62x39 mm testados. Verifica-se a ocorrência dos picos de maior potência entre 8950 Hz a 9000 Hz, conforme exibida em detalhe na Figura 4.21, correspondente à terceira componente do tubo fechado do modelo teórico (F_5). Cabe consignar que o pico do segundo estajo em específico, correspondente a componente frequencial considerada para o calibre, não é o maior pico da gravação, entretanto ainda assim foi considerado em decorrência desta componente possuir a maior amplitude quando analisada a média das gravações dos dois estojos.

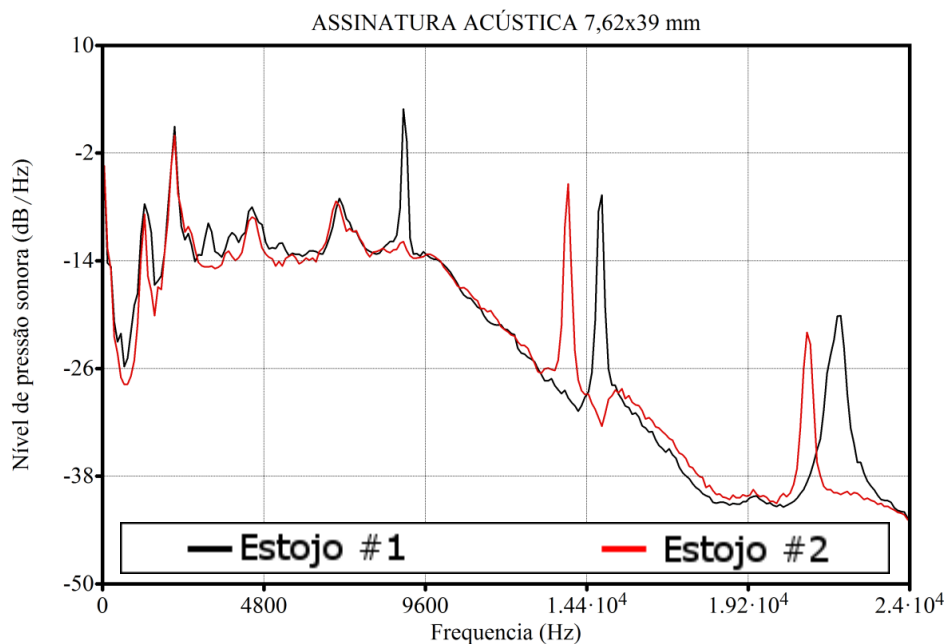


Figura 4.20: LTAS dos estojos calibre 7,62x39 mm

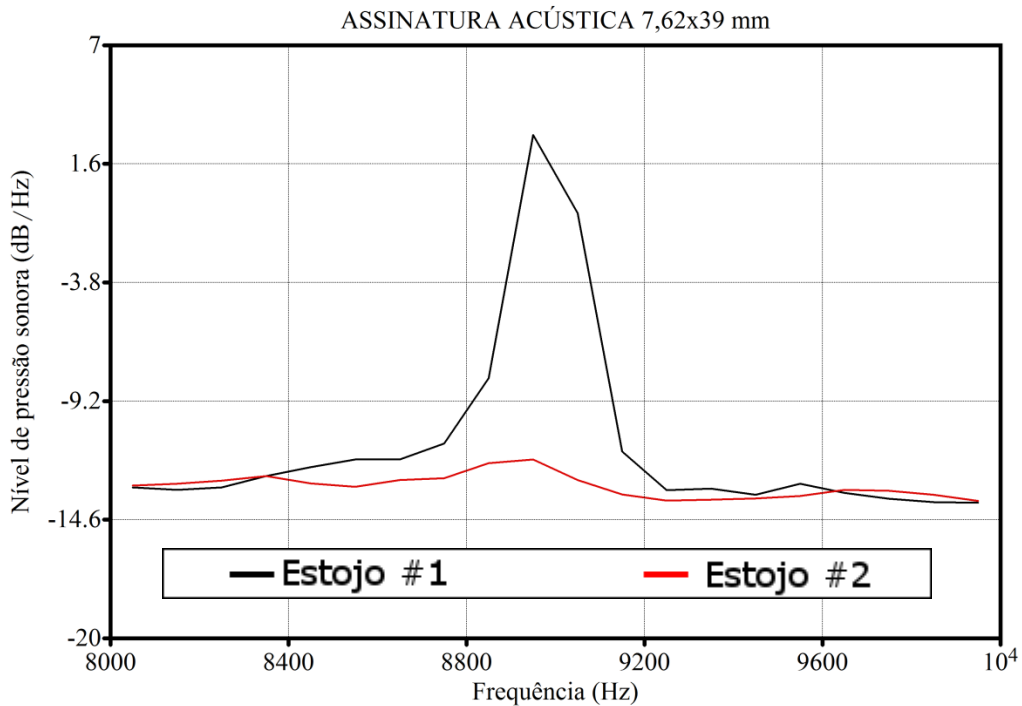


Figura 4.21: Picos de frequências dos estojos calibre 7,62x39 mm

Na Figura 4.22 apresenta-se o LTAS dos cinco estojos do calibre 5,56x45 mm testados. Verifica-se a ocorrência dos picos de maior potência entre 15350 Hz a 15650 Hz, conforme exibida em detalhe na Figura 4.23, correspondente à quarta componente do tubo fechado do modelo teórico (F_7).

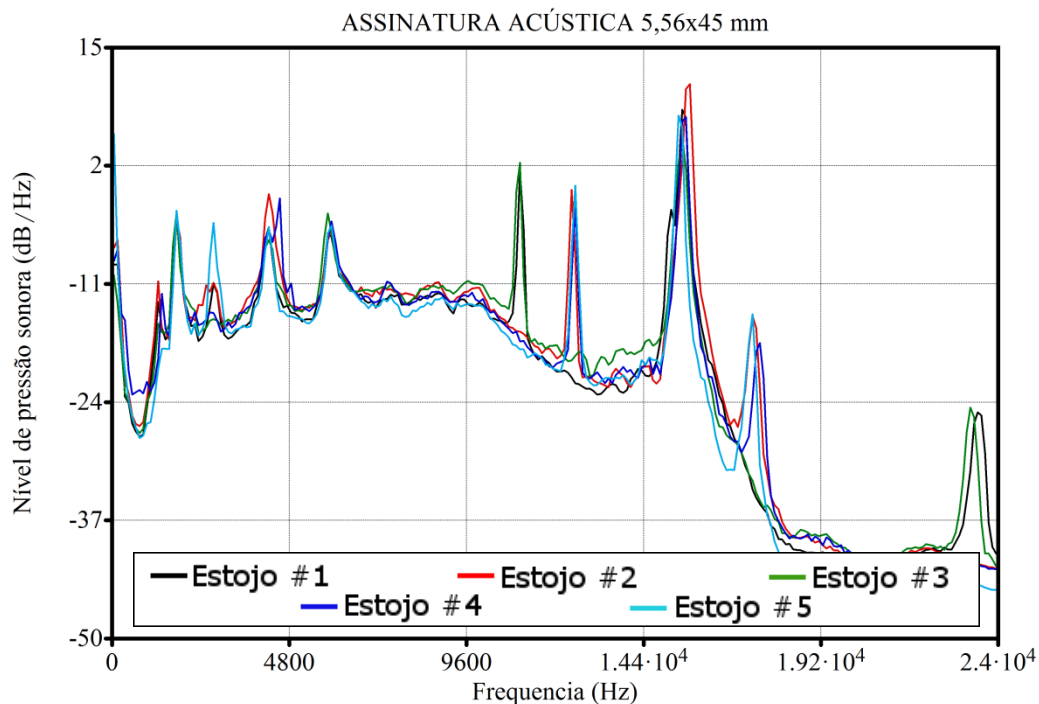


Figura 4.22: LTAS dos estojos calibre 5,56x45 mm

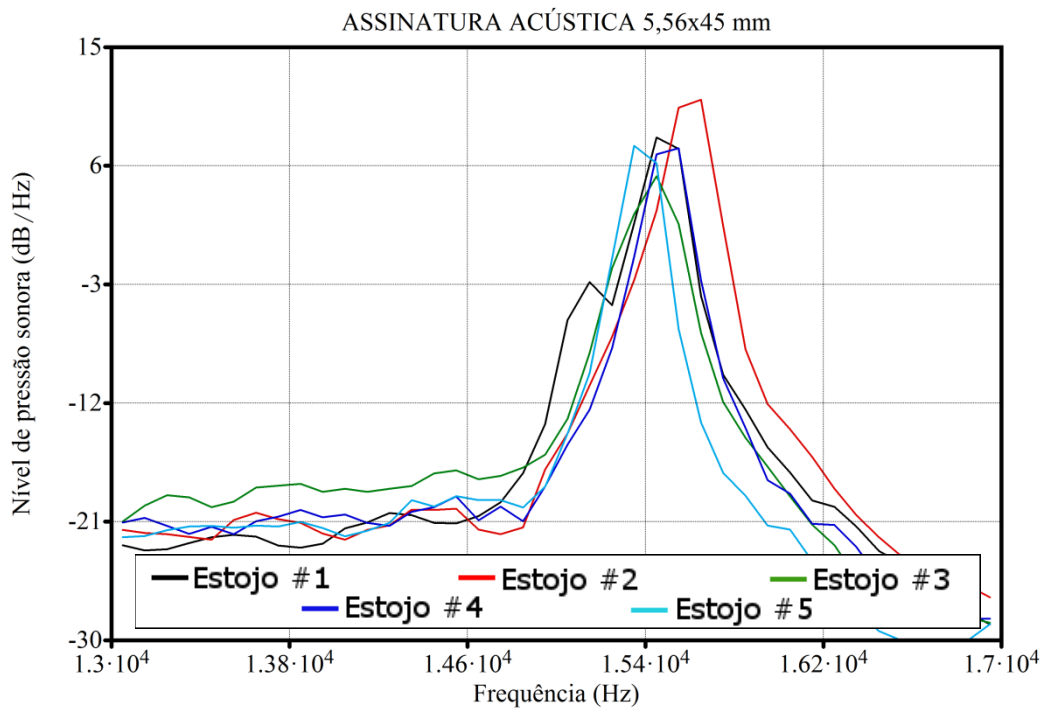


Figura 4.23: Picos de frequências dos estojos calibre 5,56x45 mm

Na Figura 4.24 apresenta-se o LTAS dos dois estojos do calibre 12,70x99 mm testados. Verifica-se a ocorrência dos picos de maior potência entre 6600 Hz a 6650 Hz, conforme exibida em detalhe na Figura 4.25, correspondente à quarta componente do tubo fechado do modelo teórico (F_7).

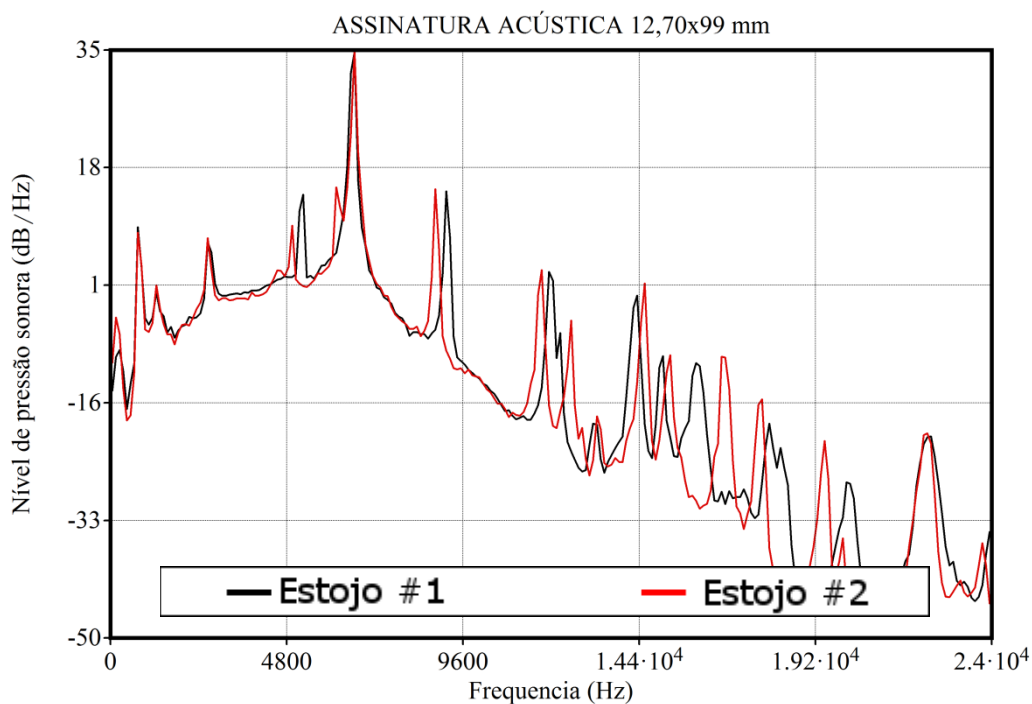


Figura 4.24: LTAS dos estojos calibre 12,70x99 mm

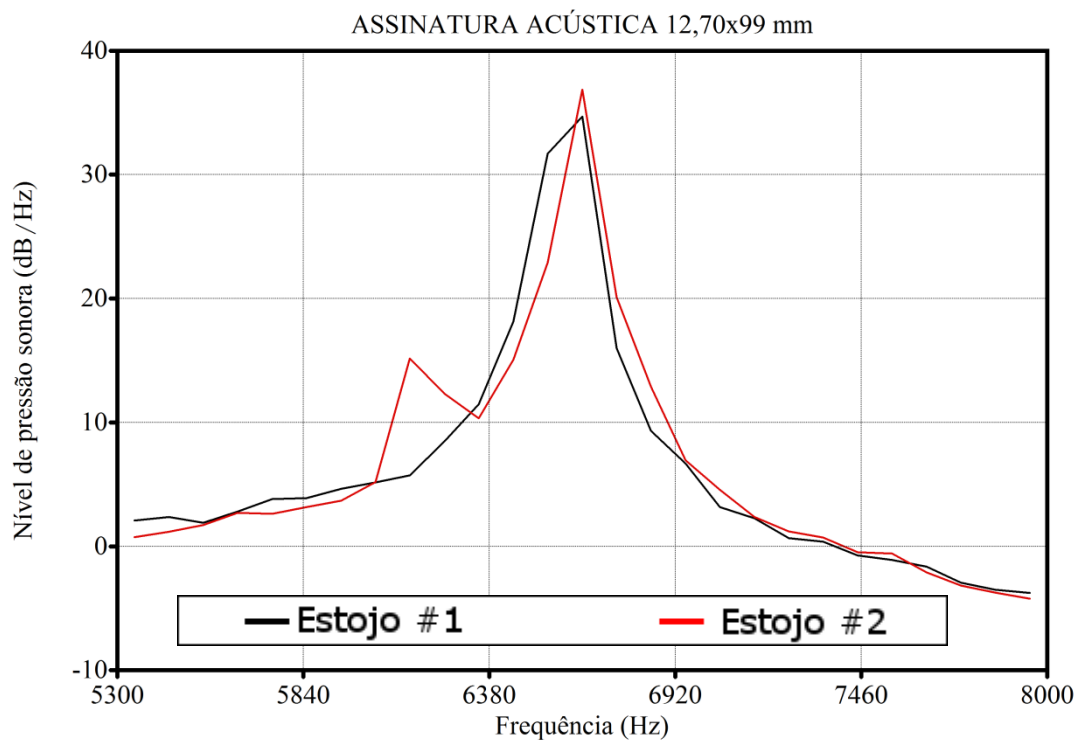


Figura 4.25: Picos de frequências dos estojos calibre 12,70x99 mm

4.1.3. Validação a partir dos experimentos controlados

Os resultados obtidos através dos ensaios controlados demonstraram a existência de convergência entre os distintos estojos de mesmo material e calibre. Também se observou diferenças significativas para alguns calibres distintos.

Apresenta-se na Figura 4.26 a sobreposição normalizada das médias dos LTAS obtidos para os calibres de pistola delimitados neste estudo, com ênfase na faixa do segundo componente (F_3) dos modelos teóricos.

Observa-se que para os calibres delimitados de pistolas houve uma clara sobreposição das médias dos LTAS dos calibres .32 Auto e .380 Auto. A aproximação dos resultados obtidos para os calibres .32 Auto e .380 Auto revela-se justificável em decorrência da semelhança de tamanhos destes estojos conforme pode ser observado na Tabela 3.1.

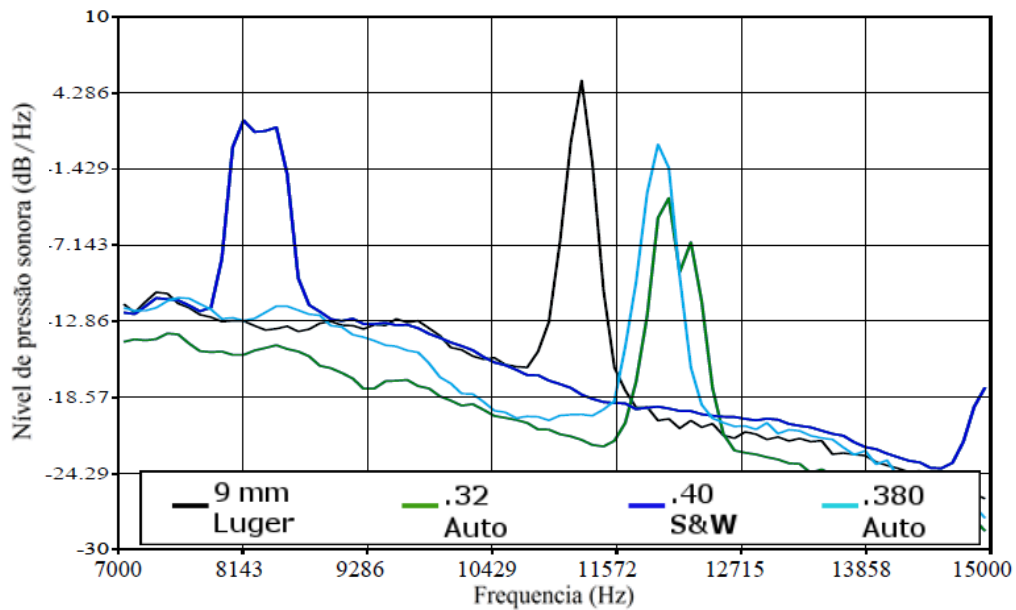


Figura 4.26: Sobreposição das médias dos LTAS dos calibres de pistola testados

A sobreposição normalizada das médias dos LTAS obtidos para os estojos do tipo garrafa delimitados neste estudo, com ênfase na faixa do pico de maior amplitude, é apresentado na Figura 4.27. Para os estojos do tipo garrafa constatou-se a predominância da quarta componente frequencial (F_5), com exceção do calibre 7,62x39 mm e 7,62x51 mm em que houve a predominância das terceira (F_7) e quinta (F_9) componentes respectivamente, todas referentes aos tubos fechados dos modelos teóricos. Em decorrência das elevadas frequências das componentes correspondentes ao tubo aberto do modelo teórico dos estojos garrafa, descritas na Tabela 3.4, e a taxa de amostragem empregada nos experimentos, considera-se este modelo não validado nesta etapa da pesquisa. Cabe ressaltar que considerando os níveis de potência para cada uma das frequência de ressonância constatadas e as taxas de amostragem comumente empregadas por sistemas e equipamentos de gravação, considera-se que as componentes do tubo fechado dos estojos do tipo garrafa apresentam maior potencial de aplicação em casos reais.

Observa-se na Figura 4.27 que a análise espectral das gravações dos estojos do tipo garrafa, com foco nas componentes de maior intensidade, também indica a possibilidade de uma discriminação satisfatória entre estes. A exceção neste caso ocorreu para os calibres 7,62x51 mm e 5,56x45 mm, em que houve uma sobreposição parcial das curvas, o que pode prejudicar a distinção categórica entre estes dois, considerando a análise espectral da componente de maior intensidade de forma isolada.

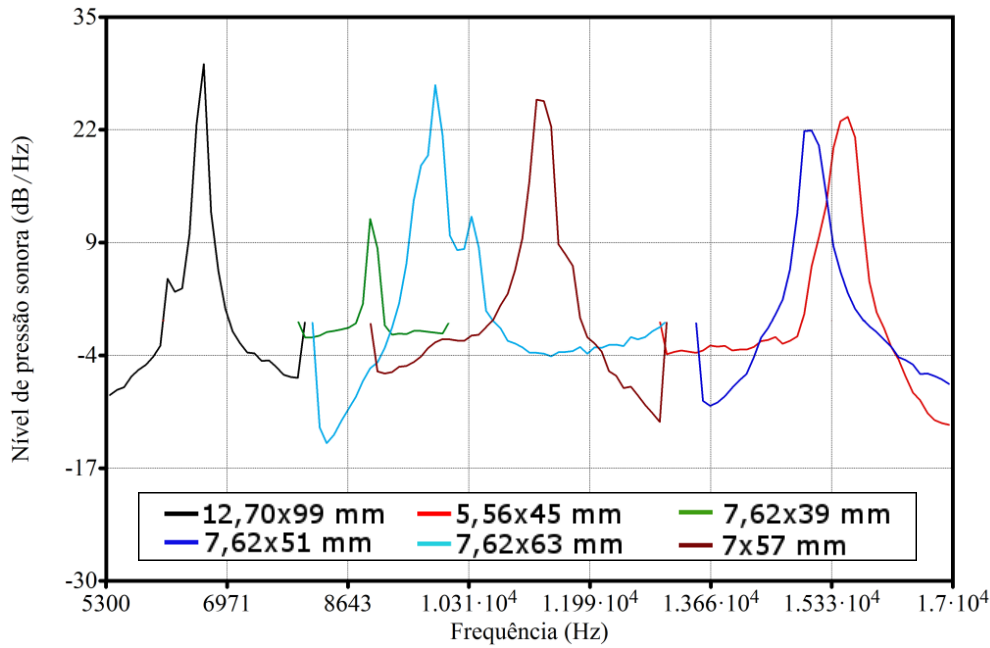


Figura 4.27: Sobreposição das médias dos LTAS dos calibres de pistola testados

Para validação do modelo proposto, foi calculada então a raiz quadrada do erro quadrático médio normalizado, do inglês *normalized root-mean-square error* (NRMSE), definida pela expressão:

$$\text{NRMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_{xi} - \hat{F}_x)^2 \right]^{0,5} \cdot \frac{1}{\bar{F}_x} \quad , \quad (6)$$

onde F_{xi} e \hat{F}_x correspondem aos valores de frequência calculados e teóricos respectivamente e \bar{F}_x é a média das frequências observadas, todas referentes a respectiva componente de maior amplitude. Nesta validação, foram considerados os valores de frequência de ressonância que apresentaram maior potência.

Os resultados práticos obtidos apresentaram razoável aderência ao modelo teórico, proposto no Capítulo 3, conforme evidenciado na Tabela 4.1. A exceção ocorreu predominantemente para os calibres 7,62x39 mm, .40 S&W e 5,56x 45 mm que apresentaram os maiores valores NRMSE em relação ao modelo proposto.

Tabela 4.1: Validação do modelo proposto a partir dos dados controlados

Calibre	Frequências Observadas (Hz)	Frequências Teóricas - $\hat{F}x$	NRMSE
9 mm Luger	11150 a 11250	11172	0,0058
.40 S&W	8050 a 8450	9867	0,1967
.32 Auto	12050 a 12250	12426	0,0286
.380 Auto	11650 a 11950	12114	0,0296
7x57 mm	11250 a 11350	11480	0,01653
7,62x63 mm	9650 a 9850	10199	0,0419
7,62x51 mm	14950 a 15150	15786	0,04989
7,62x39 mm	8950 a 9000	11480	0,2795
5,56x45 mm	15350 a 15650	13699	0,1140
12,70x99 mm	6600 a 6650	6510	0,01835

4.2. TESTES DE ROBUSTEZ PARA FATORES DE DEGRADAÇÃO

Esta seção é subdividida em três Subseções. Na Subseção 4.2.1 apresenta-se a avaliação da robustez da assinatura acústica para gravações realizadas mediante compressões com perdas. Na Subseção 4.2.2 é testada a resistência da assinatura acústica para ruídos. Verifica-se ainda o comportamento da assinatura acústica para maiores distâncias em relação ao microfone a Subseção 4.2.3.

4.2.1. Compressão com Perdas

Em tecnologia da informação a compressão com perdas, do inglês *lossy compression*, refere-se a técnicas de compressão de dados, que empregam o descarte de informações segundo critérios seletivos. Consiste em um processo irreversível para a redução do volume de dados no intuito de proceder, de maneira geral, o armazenamento, processamento ou a transmissão destes dados com maior eficiência. Esta abordagem é frequentemente empregada por diversos tipos de equipamentos e sistemas de gravação. Logo, torna-se importante verificar o comportamento da assinatura acústica mediante este fator de degradação.

O formato de codificação escolhido para proceder esta avaliação foi o MP3. Trata-se de uma codificação de áudio que emprega um modelo psico-acústico para descartar ou reduzir a precisão de componentes menos sensíveis a audição humana (ISO/IEC 13818-3, 1998).

Para avaliar a robustez da assinatura acústica à compressão com perdas, o áudio dos calibres de pistolas gravados sem compressão nos experimentos realizados, conforme abordado no Seção 4.1, foram computacionalmente recodificados empregando distintas taxas de compressão (128 kbit/s; 96 kbit/s; 64 kbit/s e 32 kbit/s) mediante a conservação da taxa de amostragem e a resolução dos registros originais. Na sequência a assinatura acústica foi recalculada para cada uma destas taxas, conforme método abordado na Seção 4.2.

Apresentam-se nas Figuras 4.28 a 4.31 as assinaturas acústicas dos calibres de pistola calculadas a partir do áudio sem compressão e a partir de áudios codificados em distintas taxas de compressão.

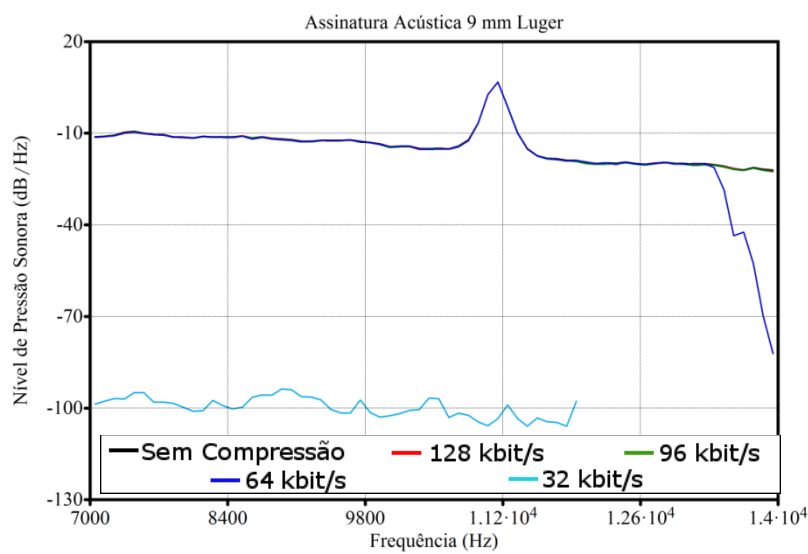


Figura 4.28: Assinatura acústica do calibre 9 mm Luger para diferentes taxas de compressão

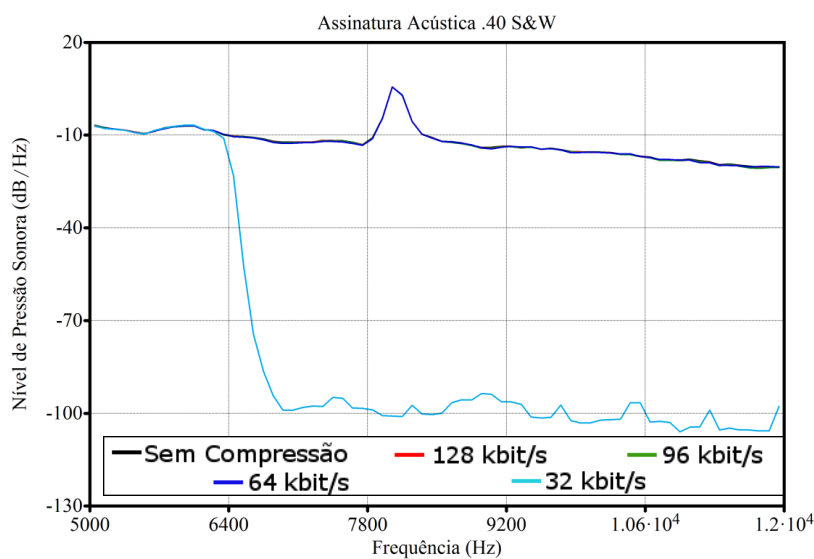


Figura 4.29: Assinatura acústica do calibre .40 S&W para diferentes taxas de compressão

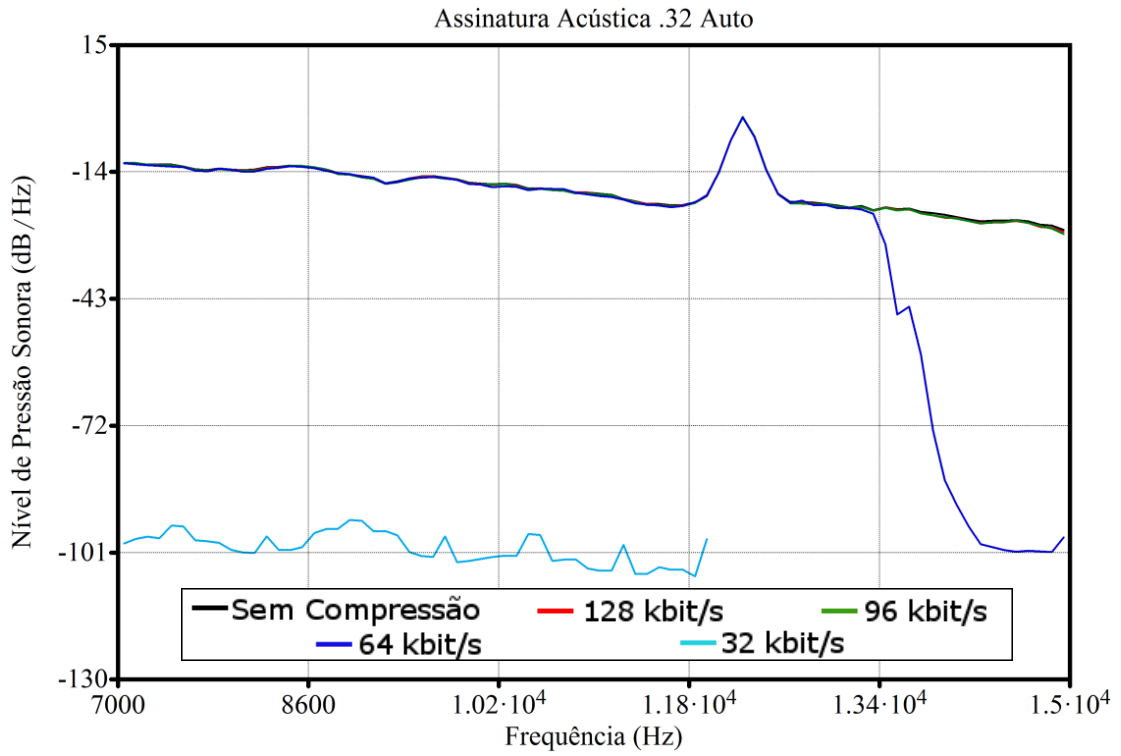


Figura 4.30: Assinatura acústica do calibre .32 Auto para diferentes taxas de compressão

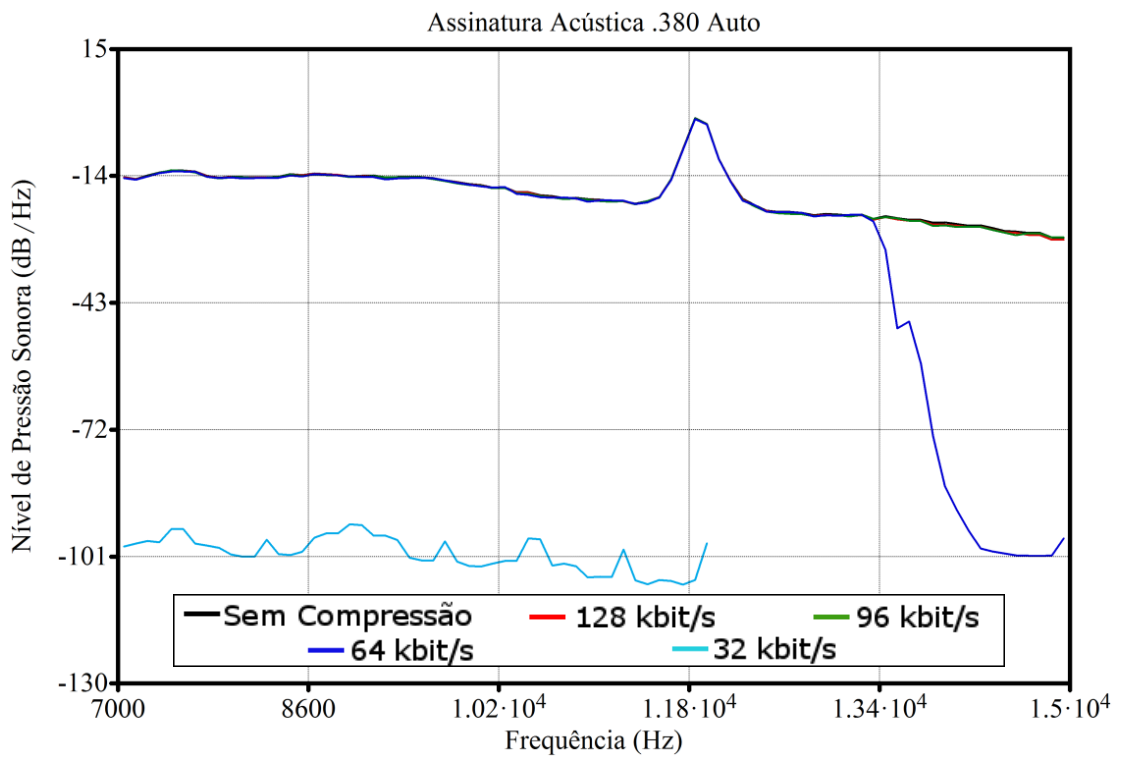


Figura 4.31: Assinatura acústica do calibre .380 Auto para diferentes taxas de compressão

É possível constatar para todos os calibres testados que para taxas de compressão iguais ou superiores a 96 kbit/s não ocorreu prejuízo significativo na estimativa das assinaturas acústicas, evidenciado pela sobreposição das curvas nos gráficos das Figuras 4.28 a 4.31. Observa-se ainda que especificamente para a taxa de 64 kbit/s houve prejuízo no conteúdo espectral superior a 13 kHz, isto é, fora da faixa de frequência em que se encontram as assinaturas acústicas dos calibres delimitados. Desta forma, para a taxa de compressão de 64 kbit/s, a estimativa das assinaturas acústicas dos calibres delimitados demonstrou-se ainda satisfatória. Já para as gravações codificadas a partir de taxa de 32 kbit/s é possível observar que a estimativa das assinaturas acústicas restou prejudicada.

4.2.2. Ruídos

Considerando o cenário forense da aplicação proposta torna-se importante avaliar ainda a influência do ruído nas assinaturas acústicas uma vez que em diversas ocasiões as evidências questionadas são gravadas em condições desfavoráveis, longe das condições ideais.

Variados e distintos fatores podem causar a presença do ruído em uma gravação como, por exemplo, o ruído ambiente gerado pela presença de distintos emissores de sons, o posicionamento desfavorável do microfone ou até mesmo a interferência eletromagnética nos sistemas de gravação.

Para verificar a robustez da assinatura acústica ao ruído foram adicionados computacionalmente por meio do software Adobe Audition[®], três perfis de ruído: branco, rosa e marrom, do inglês *white*, *pink* e *brown* respectivamente. Para o teste em cada um destes tipos de ruído foram considerados ainda três níveis de potência, doravante denominados Intensidade 1, Intensidade 2 e Intensidade 3.

Os níveis de pressão sonora dos ruídos gerados foram estimados segundo a (NBR 10152, 1987):

$$L_p = 20 \cdot \log \left(\frac{P_{ef}}{P_o} \right), \quad (7)$$

onde L_p é o nível da pressão sonora, do inglês *sound pressure level*, P_{ef} é o valor eficaz da pressão sonora em e P_o a pressão sonora de referência, sendo considerado o limiar da audição humana para a frequência de 1 kHz (Lindsay, 1977), em que $P_o = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Os resultados obtidos para cada uma das intensidades dos três perfis de ruídos testados são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Nível pressão sonora para cada intensidade dos distintos perfis de ruídos gerados

Ruído	Intensidade 1	Intensidade 2	Intensidade 3
Marron	45 dB	50 dB	60 dB
Rosa	45 dB	50 dB	60 dB
Branco	45 dB	50 dB	60 dB

Considera-se ruído branco um sinal com característica aleatória e densidade espectral de potência constante. O ruído rosa apresenta densidade espectral de potência inversamente proporcional a frequência do sinal ($1/f$). Em termos de frequência, considerando largura de banda constante, o perfil de ruído rosa atenua a taxa de 3 dB por oitava. Já o ruído marrom apresenta densidade espectral de potência inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal ($1/f^2$). Em termos de frequência, também considerando largura de banda constante, o perfil de ruído marrom atenua a taxa de 6 dB por oitava.

Evidencia-se na Figura 4.32 um comparativo da natureza espectral dos perfis branco, rosa e marrom para uma mesma intensidade, gerados por meio do software Adobe Audition®.

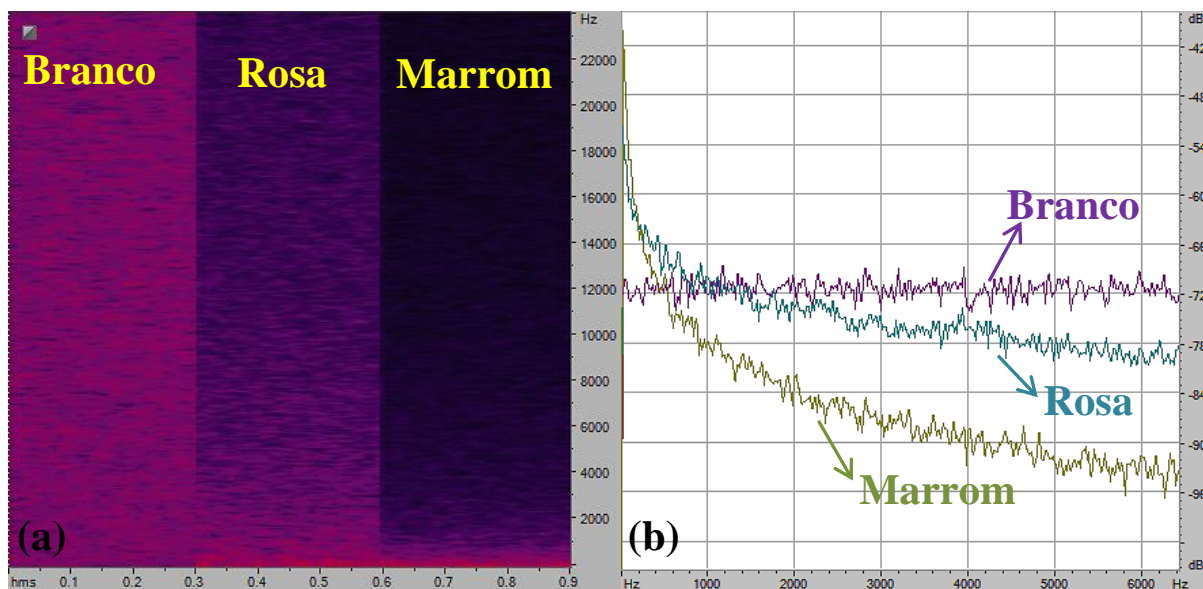


Figura 4.32: Evidencia as divergências de natureza espectral de ruídos branco, rosa e marrom para uma mesma intensidade através do Espectrograma (a) e de sua representação em frequência (b). Imagens geradas através do software Adobe Audition®.

Segundo (Dufaix, 2001) a estimativa da Relação Sinal-Ruído, do inglês *Signal to Noise Ratio* (SNR), para sinais de natureza impulsiva, comportamento similar às assinaturas acústicas em análise neste trabalho, pode ser realizada de distintas maneiras, entretanto este processo apresenta dificuldade intrínseca e apenas aproximações podem ser realizadas. Por exemplo, pode-se considerar a intensidade da maior amostra, mas isto se revela demasiadamente sensível podendo resultar na majoração da SNR. Por outro lado, o cálculo global do sinal pode resultar em uma SNR subestimada.

Neste trabalho, o cálculo preciso da SNR não foi considerado um fator crítico uma vez que esta é utilizada para fins de comparação e não de forma isolada. Para a estimativa do nível de pressão sonora das assinaturas acústicas foi considerada um intervalo de aproximadamente 0,05 s, a partir do pico de maior intensidade das gravações experimentais obtidas dos calibres de pistola, que apresentaram aproximadamente $L_p = 70$ dB. Desta forma, a SNR estimada pela diferença da potência do sinal pelo ruído, ambos em dB, resultaram em $SNR_1 = 25$ dB, $SNR_2 = 20$ dB e $SNR_3 = 10$ dB.

A medida em que se aumenta a intensidade do ruído de fundo gerado, independente do comportamento espectral deste, a SNR é diminuída, conforme evidenciado nos oscilogramas contidos na Figura 4.33 para um trecho do áudio original do estojo #1 do calibre 9 mm Luger degradado pelas três intensidades distintas de ruído de perfil marrom, descritas previamente na Tabela 4.2.

Apresentam-se nas Figuras 4.34 a 4.36 o comportamento da assinatura acústica do calibre 9 mm Luger diante da degradação dos diferentes níveis de ruídos de perfil marrom, rosa e branco respectivamente. Repete-se então as referidas análises para as assinaturas do calibre .40S&W e os resultados são apresentadas nas Figuras 4.37 a 4.39. Os resultados para o calibre .32 Auto são apresentados nas Figuras 4.40 a 4.42 observando as mesmas condições retrodescritas e finalmente os resultados do calibre .380 Auto são apresentados nas Figuras 4.43 a 4.45.

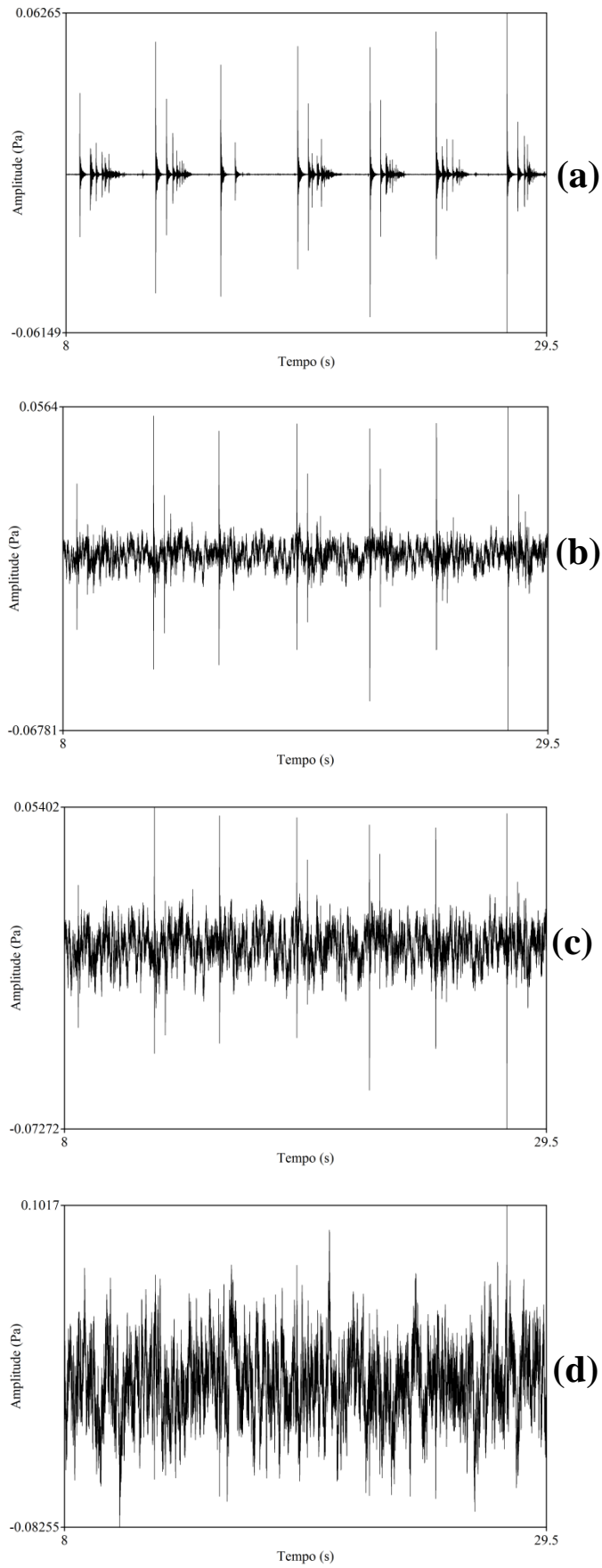


Figura 4.33: Oscilograma de trecho do áudio original do Estojo #1 9 mm Luger (a), degradado por ruído marrom SNR25 (b), SNR20 (c) e SNR10 (d).

Apresenta-se na Figura 4.34 as assinaturas acústicas do calibre 9 mm Luger calculadas a partir do áudio sem ruído adicional e com ruído de perfil marrom gerados em diferentes níveis de intensidade. É possível visualizar que mesmo diante da degradação do ruído de maior intensidade houve uma significativa preservação da assinatura acústica do calibre 9 mm Luger. Isto pode ser justificado em decorrência da natureza espectral do ruído marrom e o seu decaimento significativo até a faixa de frequência em que se encontra a assinatura do calibre 9 mm Luger.

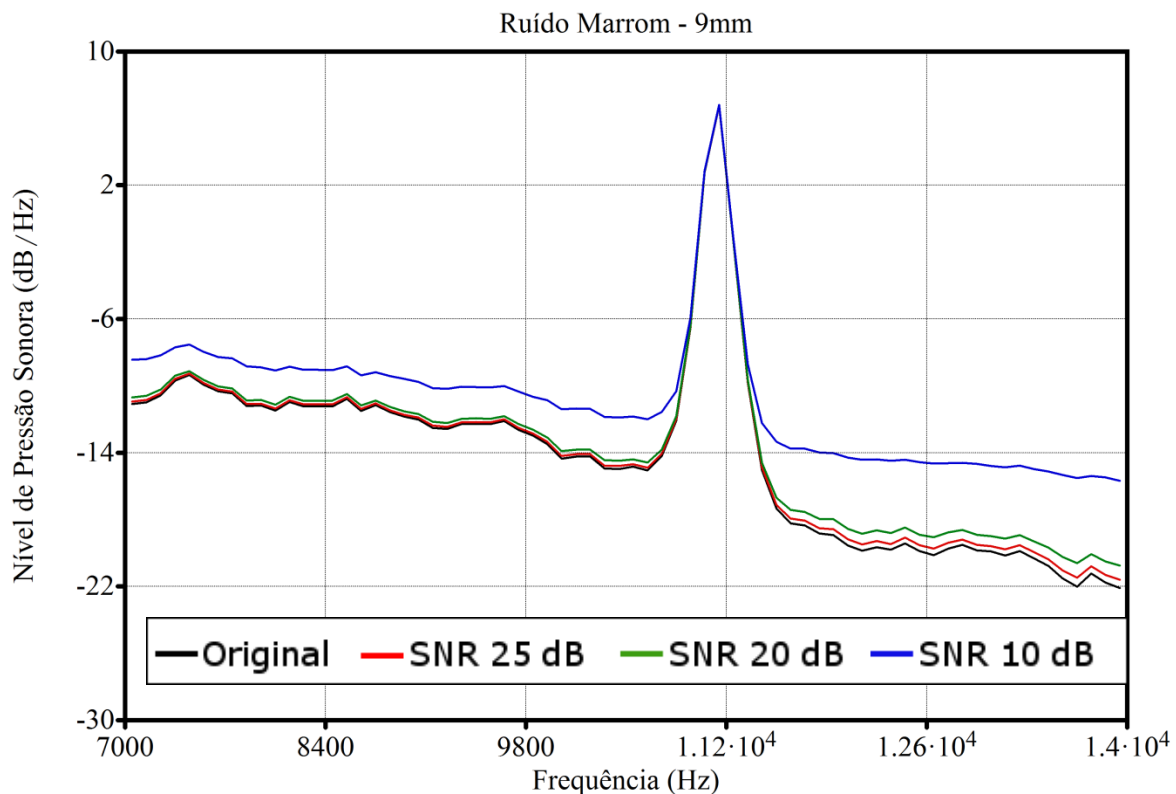


Figura 4.34: Assinatura do calibre 9 mm Luger para diferentes intensidades de ruído marrom

As assinaturas acústicas do calibre 9 mm Luger calculadas a partir do áudio sem ruído adicional e com o ruído de perfil rosa gerados em diferentes níveis de intensidade são apresentados na Figura 4.35. Foi constatado que em virtude do menor decaimento do ruído rosa a SNR das assinaturas acústicas restou mais atenuada quando comparada aos resultados do perfil marrom, mas ainda assim apresentaram satisfatória robustez até para o maior nível de ruído testado.

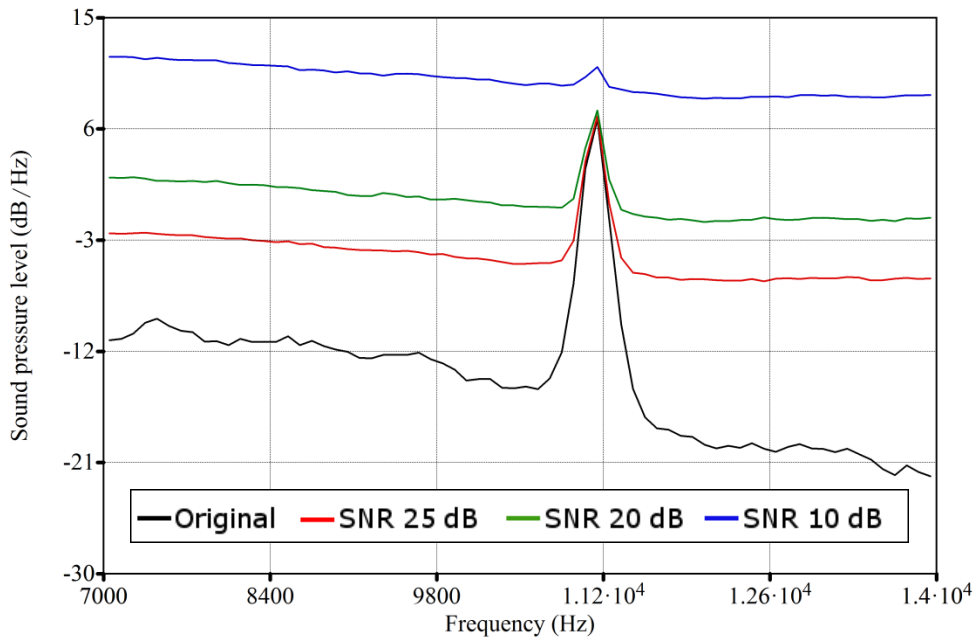


Figura 4.35: Assinatura do calibre 9 mm Luger para diferentes intensidades de ruído rosa

Diante da degradação do ruído branco as assinaturas acústicas do calibre 9 mm Luger calculadas a partir do áudio original apresentaram maior atenuação já para o ruído de menor intensidade, conforme evidenciado na Figura 4.36. Isto pode ser justificado em decorrência da natureza espectral do ruído branco. Com exceção do ruído de maior intensidade testado, SNR 10 dB, ainda assim foi verificada a conservação satisfatória da assinatura nos demais níveis.

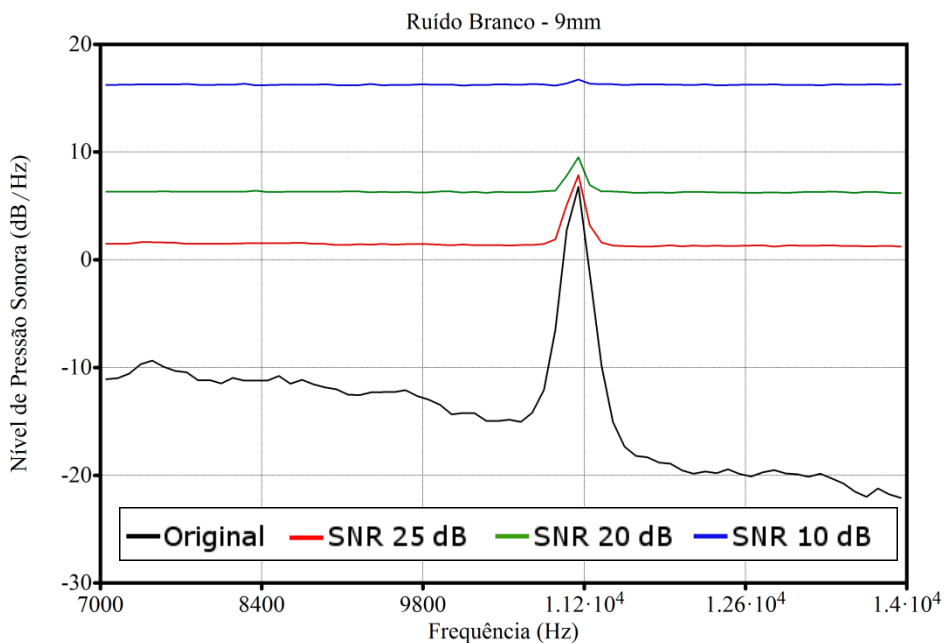


Figura 4.36: Assinatura do calibre 9 mm Luger para diferentes intensidades de ruído branco

Apresenta-se na Figura 4.37 as assinaturas acústicas do calibre .40 S&W calculadas a partir do áudio sem ruído adicional e com ruído de perfil marrom gerados em diferentes níveis de intensidade. Observa-se uma resposta semelhante a verificada na assinatura do 9 mm Luger.

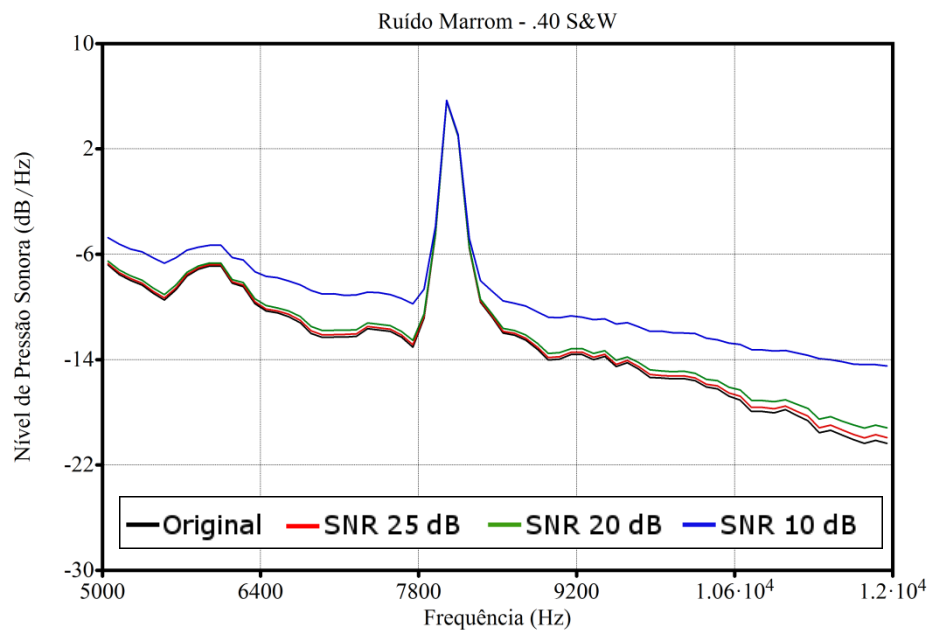


Figura 4.37: Assinatura do calibre .40 S&W para diferentes intensidades de ruído marrom

Apresenta-se na Figura 4.38 as assinaturas acústicas do calibre .40 S&W calculadas a partir do áudio sem ruído adicional e com ruído de perfil rosa gerados em diferentes níveis de intensidade. Observa-se uma resposta semelhante a verificada na assinatura do 9 mm Luger.

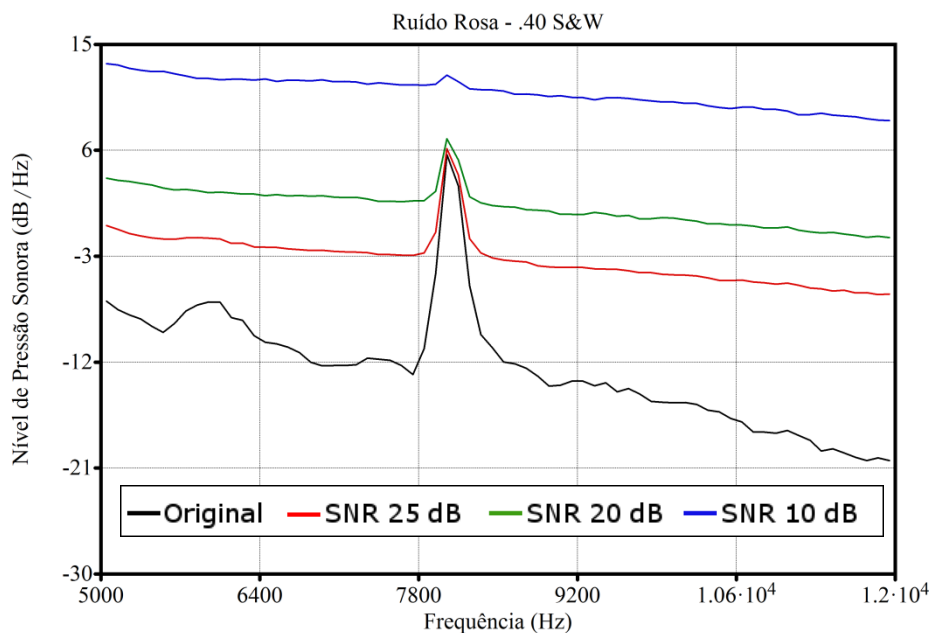


Figura 4.38: Assinatura do calibre .40 S&W para diferentes intensidades de ruído rosa

Apresenta-se na Figura 4.39 as assinaturas acústicas do calibre .40 S&W calculadas a partir do áudio sem ruído adicional e com ruído de perfil branco em diferentes níveis de intensidade. Observa-se uma resposta semelhante a verificada na assinatura do 9 mm Luger.

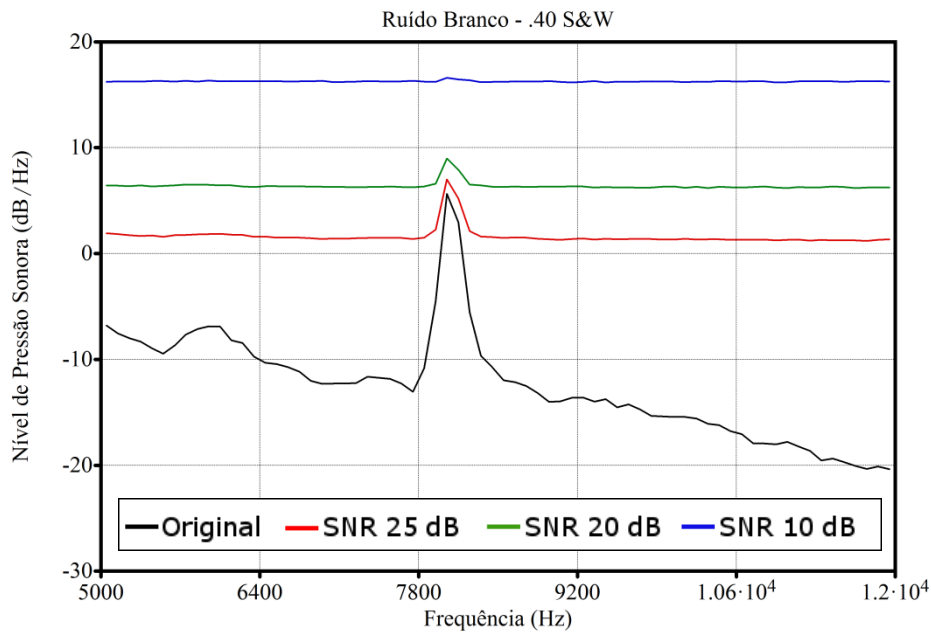


Figura 4.39: Assinatura do calibre .40 S&W para diferentes intensidades de ruído branco

Apresenta-se na Figura 4.40 as assinaturas acústicas do calibre .32 Auto calculadas a partir do áudio sem ruído adicional e com ruído de perfil marrom em diferentes níveis de intensidade. Observa-se uma resposta semelhante a verificada na assinatura do 9 mm Luger.

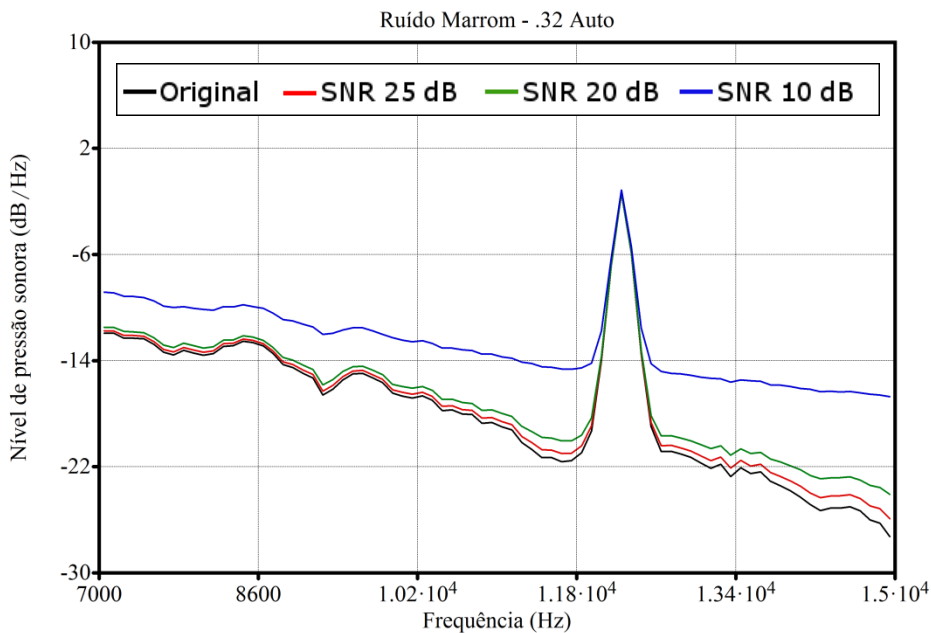


Figura 4.40: Assinatura do calibre .32 Auto para diferentes intensidades de ruído marrom

Apresenta-se na Figura 4.41 as assinaturas acústicas do calibre .32 Auto calculadas a partir do áudio sem ruído adicional e com ruído de perfil rosa em diferentes níveis de intensidade. Observa-se uma resposta semelhante a verificada na assinatura do 9 mm Luger.

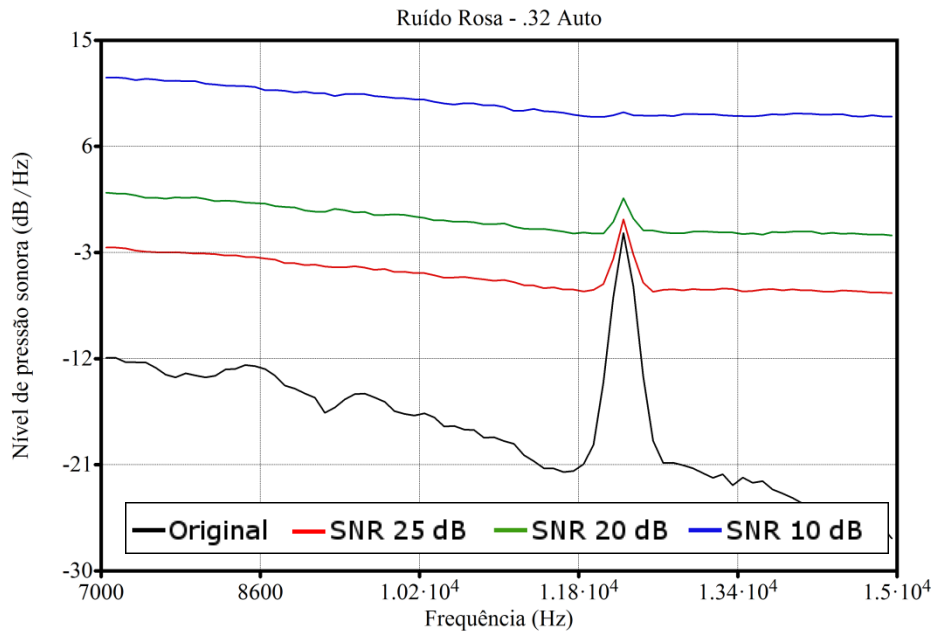


Figura 4.41: Assinatura do calibre .32 Auto para diferentes intensidades de ruído rosa

Apresenta-se na Figura 4.42 as assinaturas acústicas do calibre .32 Auto calculadas a partir do áudio sem ruído adicional e com ruído de perfil branco em diferentes níveis de intensidade. Observa-se uma resposta semelhante a verificada na assinatura do 9 mm Luger.

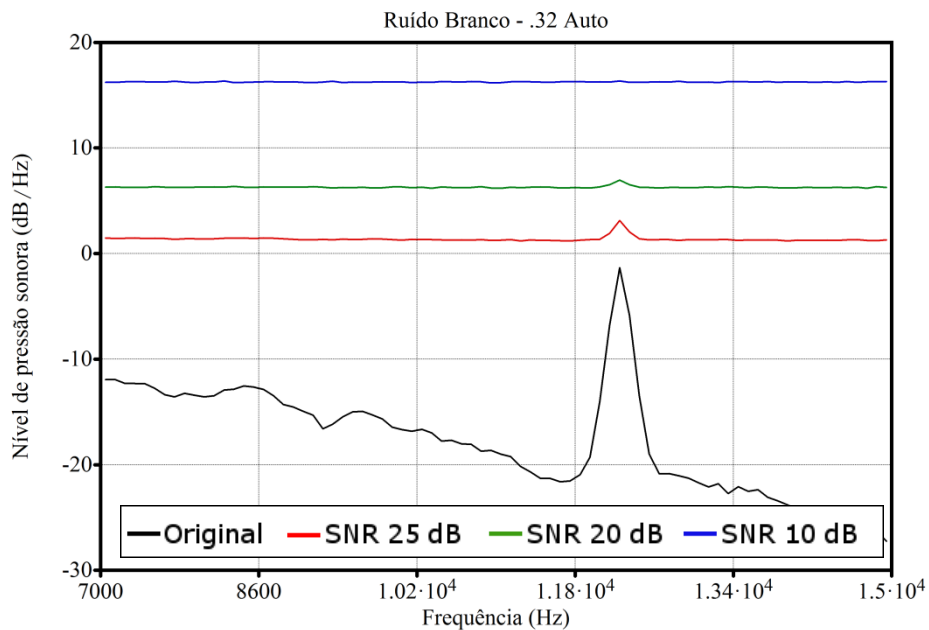


Figura 4.42: Assinatura do calibre .32 Auto para diferentes intensidades de ruído branco

Apresenta-se na Figura 4.43 as assinaturas acústicas do calibre .380 Auto calculadas a partir do áudio sem ruído adicional e com ruído de perfil marrom em diferentes níveis de intensidade.

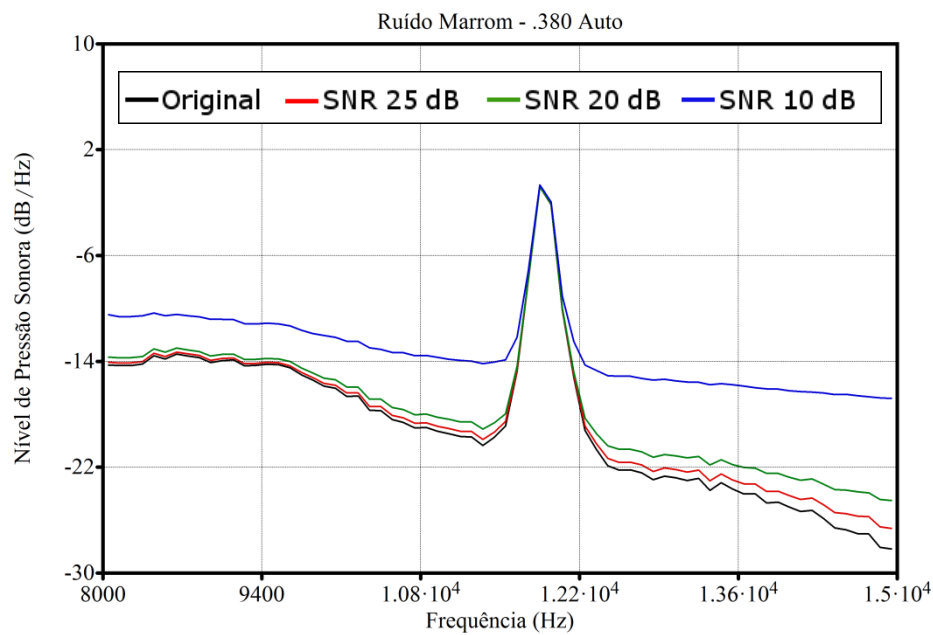


Figura 4.43: Assinatura do calibre .380 Auto para diferentes intensidades de ruído marrom

Apresenta-se na Figura 4.44 as assinaturas acústicas do calibre .380 Auto calculadas a partir do áudio sem ruído adicional e com ruído de perfil rosa em diferentes níveis de intensidade.

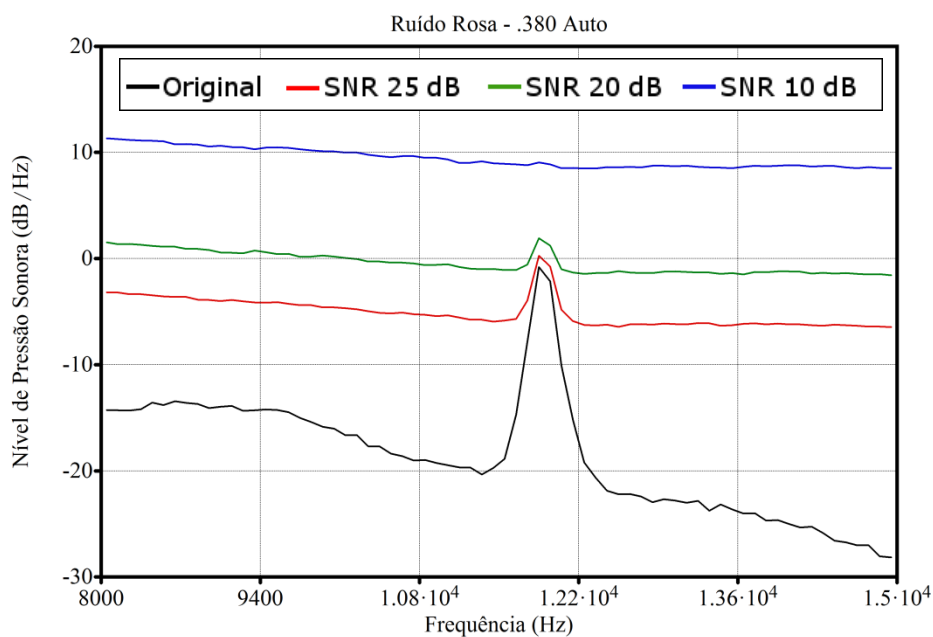


Figura 4.44: Assinatura do calibre .380 Auto para diferentes intensidades de ruído rosa

Apresenta-se na Figura 4.45 as assinaturas acústicas do calibre .380 Auto calculadas a partir do áudio sem ruído adicional e com ruído de perfil branco em diferentes níveis de intensidade.

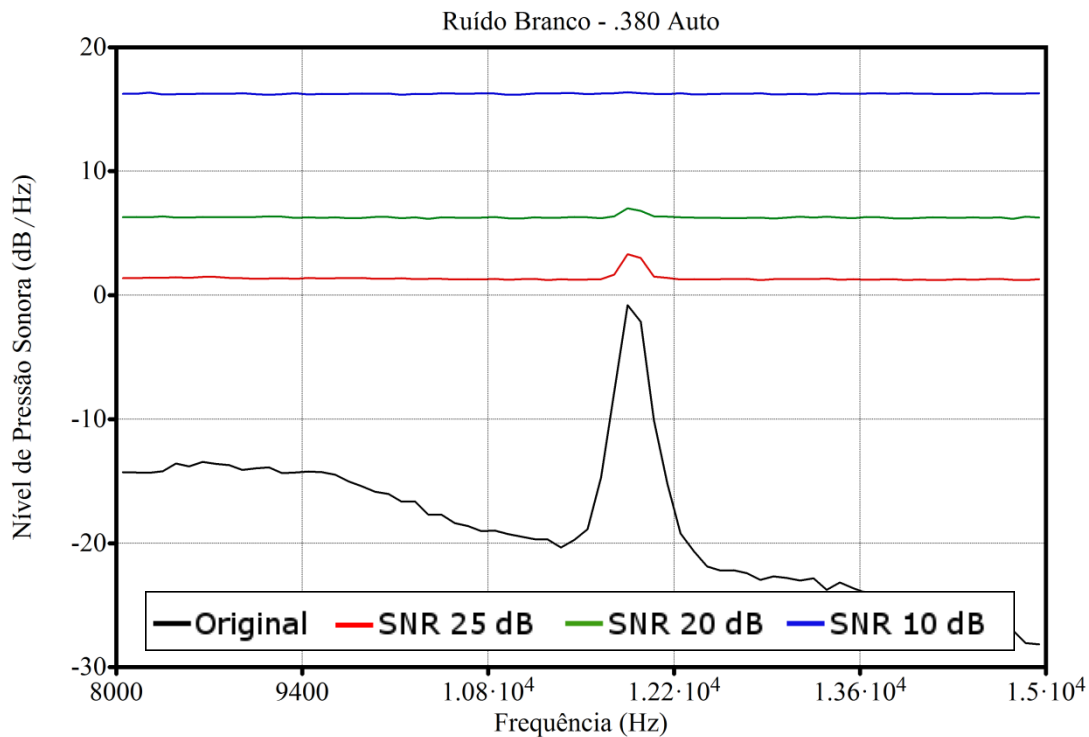


Figura 4.45: Assinatura do calibre .380 Auto para diferentes intensidades de ruído branco

Diante dos resultados apresentados verifica-se que a resistência da assinatura acústica depende não apenas da intensidade do ruído mas também de seu comportamento espectral. Constatou-se que as assinaturas acústicas são significativamente mais frágeis para ruídos de perfil branco do que para ruídos de perfil marrom.

Os testes revelaram que a assinatura acústica conservou satisfatória robustez com relação as intensidades de ruídos dos perfis marrom e rosa testados, exceto para a maior intensidade do ruído rosa nos calibres .32 Auto e .380 Auto. No caso do ruído branco, até as menores intensidades geradas foram suficientes para atenuar consideravelmente as assinaturas acústicas. Considerando ainda as maiores intensidades testadas do ruído branco verificou-se que a assinatura acústica restou severamente prejudicada para praticamente todos os calibres.

4.2.3. Distância em relação ao microfone

A distância revela-se outro importante fator a ser analisado na tentativa de mensurar a viabilidade da captura da assinatura acústica proposta em maiores distâncias do equipamento

gravador. À medida em que a assinatura acústica pode ser capturada a maiores distâncias, aumenta-se consideravelmente também o potencial de aplicação da abordagem proposta.

Para testar a robustez da assinatura acústica quanto à distância, foi conduzido um novo experimento, realizado em cômodo fechado desprovido de isolamento acústico, mas apresentando ruído ambiente de baixa intensidade na ocasião, conforme Figura 4.46.



Figura 4.46: Experimentos realizados para testar a robustez da assinatura acústica a distância.

Os estojos deflagrados foram soltos individualmente a aproximadamente 1,60 m do piso, tal como realizado na Seção 4.1.1, mas neste caso a série de arremessos começou logo abaixo do sistema de gravação e foi afastando-se gradativamente, de dois em dois metros, até atingir a distância máxima de 24 m em relação ao microfone.

Os áudios foram gravados no formato WAV/PCM, sem compressão, com taxa de amostragem de 48 kHz, resolução de 16 bits e um canal (mono). Apresentam-se nas Figuras 4.47 a 4.50 o comportamento da assinatura acústica dos calibres de pistola para diferentes distâncias em relação ao microfone.

Apresenta-se na Figura 6.20 o comportamento da assinatura acústica do calibre 9 mm Luger para diferentes distâncias em relação ao microfone.

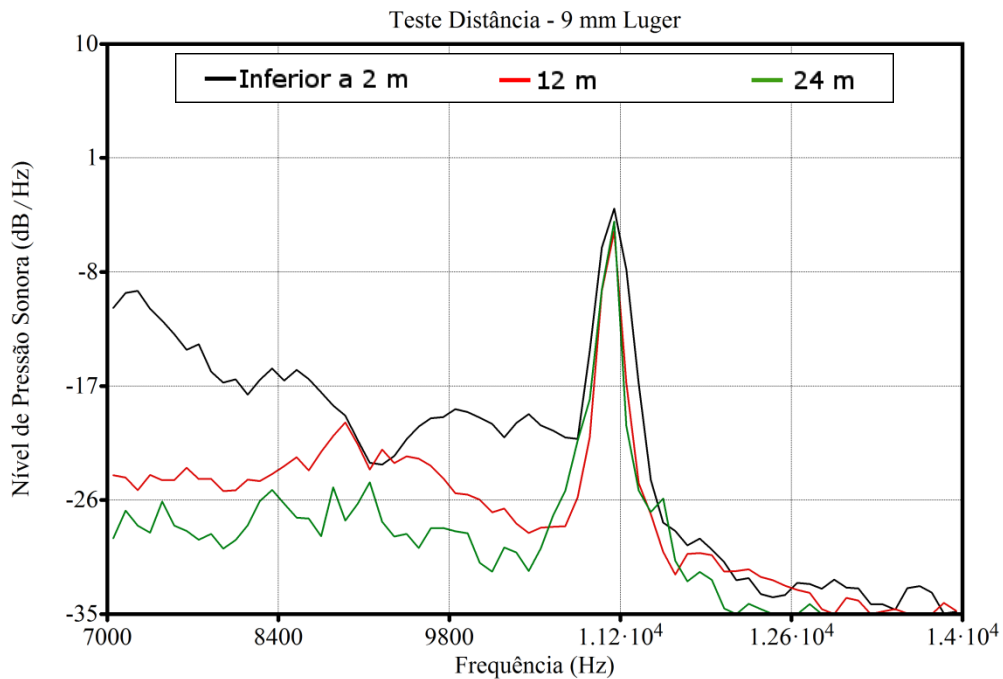


Figura 4.47: Assinatura do 9 mm Luger para diferentes distâncias em relação ao microfone

Apresenta-se na Figura 6.21 o comportamento da assinatura acústica do calibre .40 S&W para diferentes distâncias em relação ao microfone.

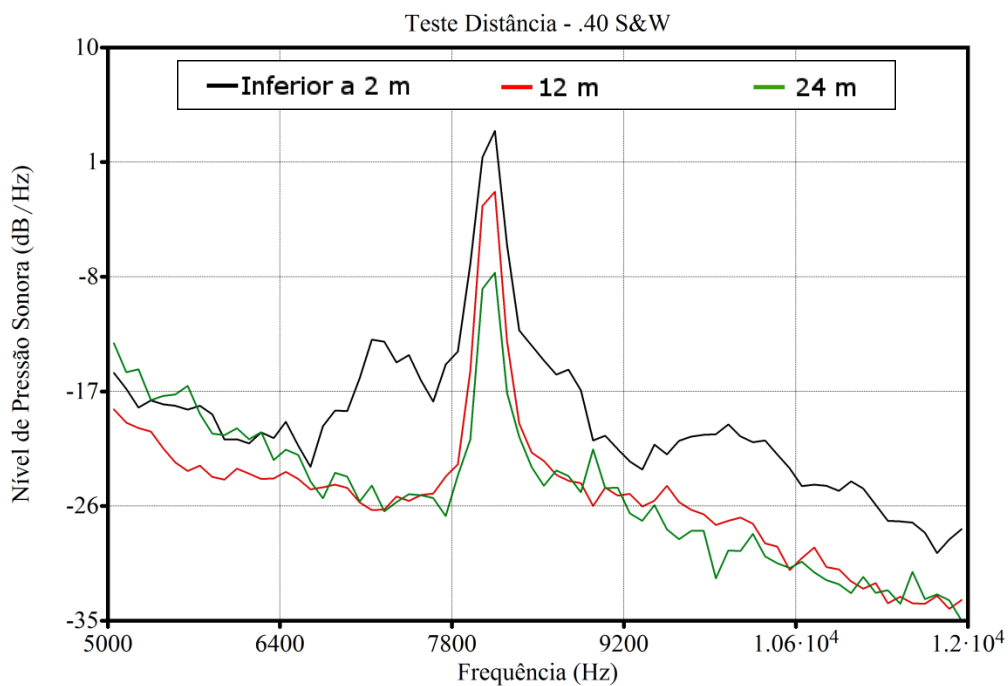


Figura 4.48: Assinatura do .40 S&W para diferentes distâncias em relação ao microfone

Apresenta-se na Figura 6.22 o comportamento da assinatura acústica do calibre .32 Auto para diferentes distâncias em relação ao microfone.

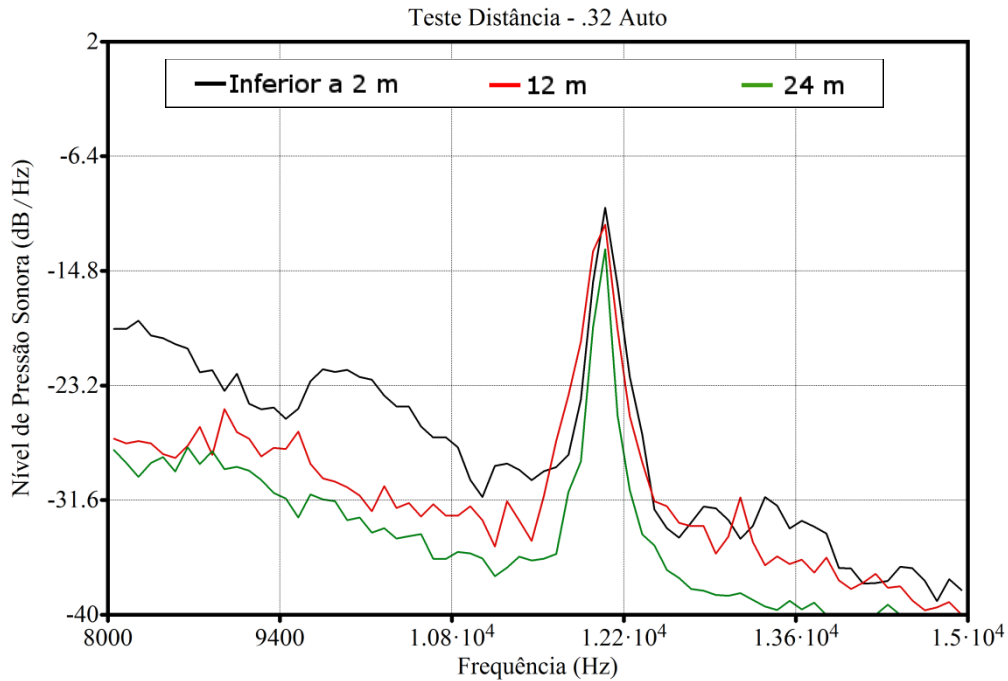


Figura 4.49: Assinatura do .32 Auto para diferentes distâncias em relação ao microfone

Apresenta-se na Figura 6.23 o comportamento da assinatura acústica do calibre .380 Auto para diferentes distâncias em relação ao microfone.

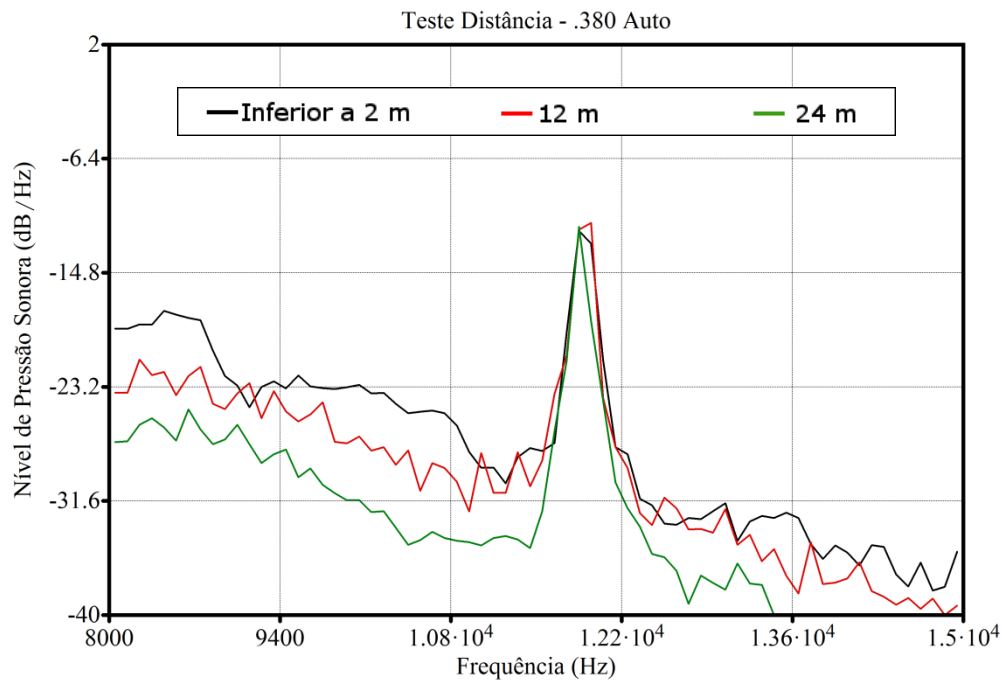


Figura 4.50: Assinatura do .380 Auto para diferentes distâncias em relação ao microfone

Considerando as condições ambientais presentes nos experimentos realizados é possível concluir que a assinatura acústica revelou resistência satisfatória para distâncias bem maiores em relação ao microfone do que as empregadas nos experimentos iniciais, realizados sob condições controladas que foram descritos na Seção 4.1.

Até para as maiores distâncias testadas na ocasião, de aproximadamente 24 m em relação ao microfone, verificou-se uma manutenção satisfatória da SNR. Os resultados obtidos indicam que para condições ambientais similares, isto é, ambientes fechados com ruído ambiente de baixa intensidade e sem obstáculos significativos entre o local da queda do estojo e o microfone, as assinaturas acústicas possam ser capturadas satisfatoriamente a distâncias superiores a vinte e quatro metros.

4.3. VALIDAÇÃO A PARTIR DE DADOS NÃO CONTROLADOS

Uma terceira etapa dos experimentos considerou ainda dados obtidos de forma não controlada, a partir de vídeos extraídos do YouTube contendo gravações de tiros disparados por pistolas identificadas¹.

O objetivo da utilização de dados não controlados é a validação da metodologia utilizando áudios contendo disparos de armas de fogo com características mais semelhantes às encontradas em evidências forense. Dentre estas possíveis características podem-se destacar:

- O desconhecimento acerca da especificação dos dispositivos de gravação empregados;
- O desconhecimento acerca das características físicas do ambiente em que ocorrera a gravação;
- Desconhecimento acerca do material do estojo;
- Registros obtidos mediante restrições qualitativas na origem (baixa qualidade);
- Registros possivelmente já recodificados de seu formato original;
- Possibilidade de fatores de degradação: interferências eletromagnéticas, compressões, ruídos, distância em relação ao microfone.

¹Base de dados disponível em:

http://www.redes.unb.br/lasp/files/research/gunshots_videos/

Foram consideradas gravações contendo 339 tiros, todos disparados por pistolas, mediante condições variáveis e dotados de diferentes qualidades. Em todos os vídeos considerados, o calibre das pistolas foram identificados pelo título do vídeo, verbalmente pelo atirador ou ainda pelas informações contidas nas legendas deste. As informações declaradas do calibre da arma de fogo utilizada, presentes nos vídeos, foram consideradas como sendo corretas e verdadeiras.

Dos áudios presentes nos vídeos, foi possível identificar a assinatura acústica em aproximadamente 75 % dos casos conforme abordado na Tabela 4.3. Esta identificação foi realizada manualmente de forma assistida, através de análises físico-acústicas, através de espectrogramas, LTAS ou ainda pela Transformada rápida de Fourier, do inglês *Fast Fourier Transform* (FFT), sendo essa última calculada através de janela única de tamanho de 2048 amostras, função de janelamento *Hamming*, para cada um dos eventos acústicos detectados através de análise perceptiva e contextual.

Cabe ressaltar que o sucesso na identificação da assinatura acústica encontra-se mais condicionado às características ambientais e qualitativas da gravação questionada do que ao calibre em si especificamente. Por exemplo, a existência de superfícies que amortecem a colisão do estojo após a queda é um fator que prejudica o registro da assinatura acústica no áudio.

Tabela 4.3: Identificação das assinaturas acústicas nos vídeos

Calibre	Total de Tiros	Identificação da assinatura acústica	Acurácia (%)
9 mm Luger	89	87	97,75%
.40 S&W	97	78	80,41%
.32 Auto	104	54	51,92%
.380 Auto	49	34	69,38%
Total	339	253	74,63%

Apresenta-se na Figura 4.51 o histograma contendo a distribuição das assinaturas acústicas identificadas nos vídeos questionados, contendo disparos de pistolas previamente identificadas nestes como sendo de calibre 9 mm Luger. Observa-se na Figura 4.51 que as assinaturas acústicas identificadas para o calibre 9 mm concentraram-se predominantemente na faixa de 10854 Hz.

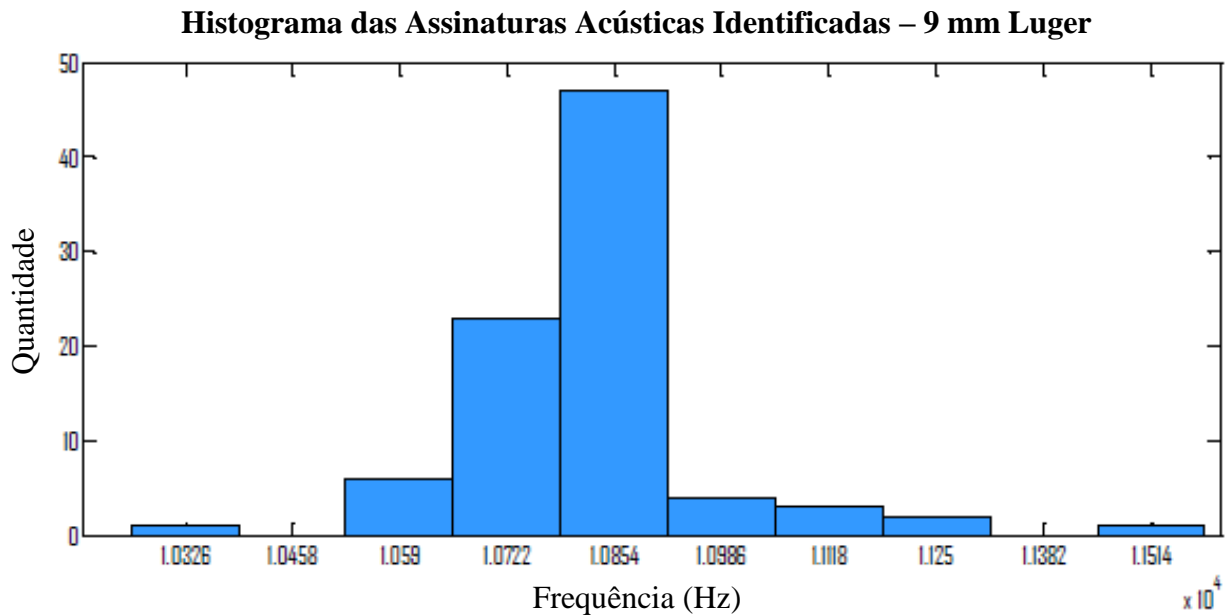


Figura 4.51: Distribuição de frequências nas gravações do calibre 9 mm Luger

Apresenta-se na Figura 4.52 o histograma contendo a distribuição das assinaturas acústicas identificadas nos vídeos questionados, contendo disparos de pistolas previamente identificadas nestes como sendo de calibre .40 S&W. A mediana das assinaturas acústicas identificadas do calibre .40 S&W foi estimada em 7924 Hz.

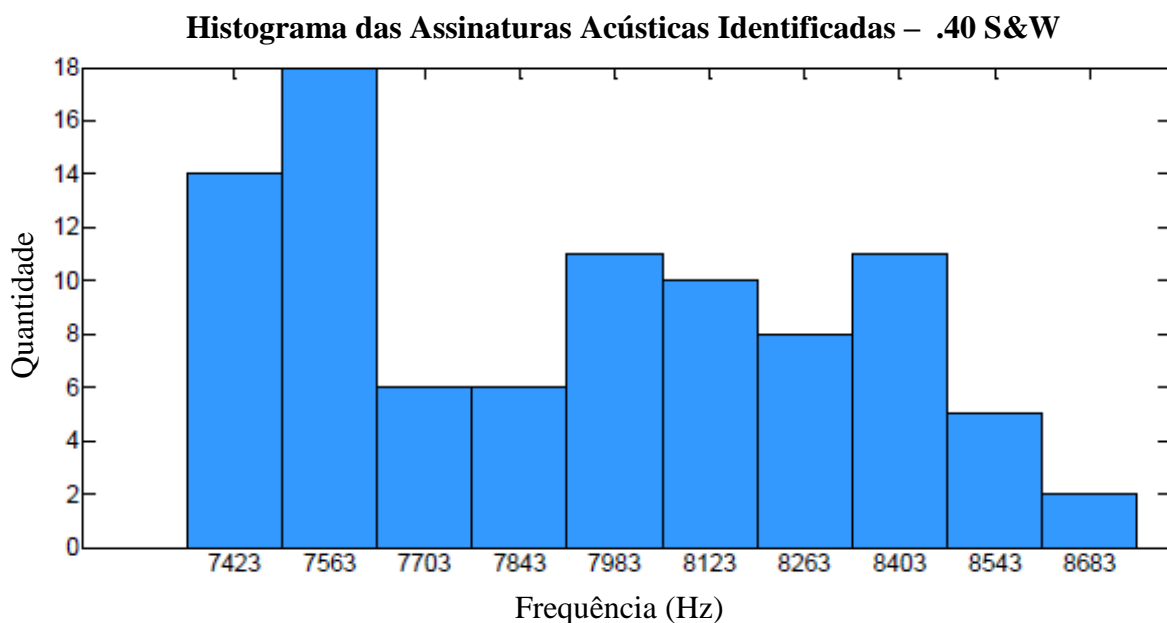


Figura 4.52: Distribuição de frequências nas gravações do calibre .40 S&W

Apresenta-se na Figura 4.53 o histograma contendo a distribuição das assinaturas acústicas identificadas nos vídeos questionados, contendo disparos de pistolas previamente identificadas nestes como sendo de calibre .32 Auto. A mediana das assinaturas acústicas identificadas do calibre .32 Auto foi estimada em 12040 Hz.

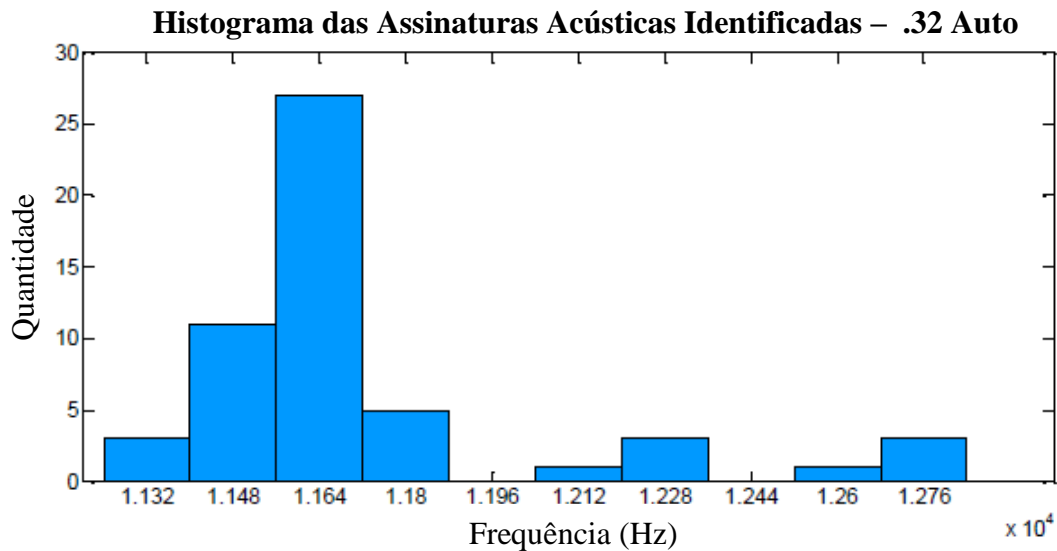


Figura 4.53: Distribuição de frequências nas gravações do calibre .32 Auto

Apresenta-se na Figura 4.54 o histograma contendo a distribuição das assinaturas acústicas identificadas nos vídeos questionados, contendo disparos de pistolas previamente identificadas nestes como sendo de calibre .380 Auto. A mediana das assinaturas acústicas identificadas do calibre .380 Auto foi estimada em 11890 Hz.

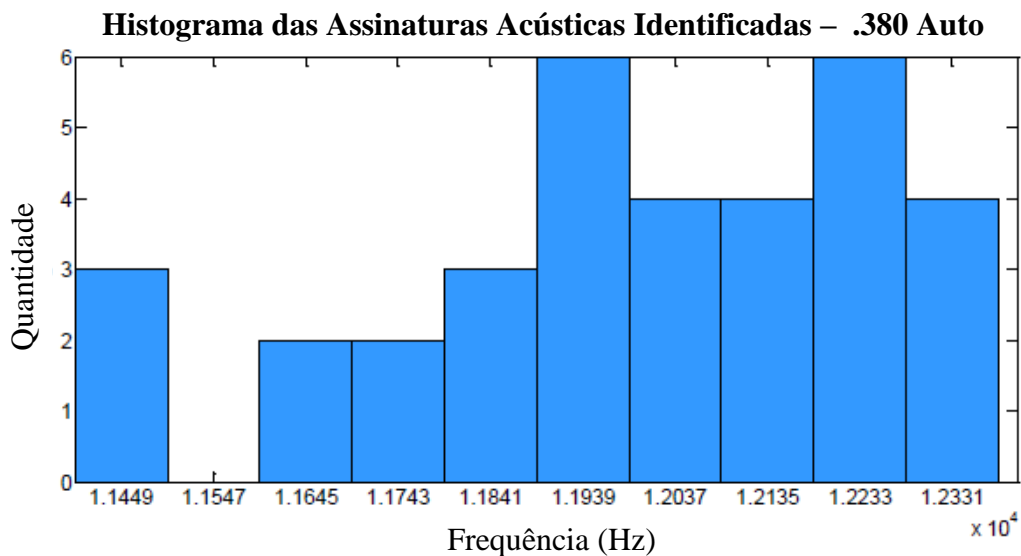


Figura 4.54: Distribuição de frequências nas gravações do calibre .380 Auto

É possível constatar ainda que as assinaturas acústicas constatadas a partir dos vídeos questionados apresentaram elevada coerência com os resultados experimentais realizados mediante condições controladas, que se encontram consolidados na Figura 4.26.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho confirmou a hipótese da ocorrência de frequências de ressonância para todos os estojos dos calibres testados, após estes colidirem com uma superfície rígida como o piso.

Foi constatada a variabilidade das frequências de ressonância para estojos distintos de um mesmo calibre, entretanto isto não comprometeu a definição de valores médios de referência, possibilitando ainda a estimativa de assinaturas acústicas para os calibres testados. As assinaturas acústicas calculadas, obtidas a partir das frequências de ressonância de maior intensidade para cada um dos calibres testados, indicam a possibilidade de identificação da munição deflagrada e conseqüentemente a identificação indireta do calibre da arma de fogo empregada a partir de gravações contendo disparos de armas de fogo.

As assinaturas acústicas obtidas e validadas nesta pesquisa proporcionam aos peritos dados confiáveis para uma análise forense acústica assistida, diante de exames que possibilitem a aplicação desta abordagem. A análise da abordagem proposta em conjunto com as demais abordagens pré-existentes para identificação de armas de fogo, proporciona ainda a possibilidade da formação de inferências mais conclusivas nos laudos periciais.

Os resultados dos testes de resistência das assinaturas acústicas para fatores de degradação comuns à casuística forense, como: ruído, compressão com perdas e distância em relação ao microfone, evidenciam o caráter promissor da abordagem proposta e a viabilidade de aplicação em casos reais.

Dentre as vantagens da abordagem proposta neste trabalho de pesquisa, destacam-se ainda a dispensabilidade de algumas variáveis citadas na literatura como imprescindíveis para uma interpretação satisfatória das análises acústica forense dos disparos de armas de fogo, tais como: características físico-acústicas do ambiente, informação acerca da munição utilizada, informações acerca do vento e umidade, disposição espacial e direcional entre a arma de fogo e o microfone (Maher, 2008 e Maher, 2010). Estes parâmetros em muitas ocasiões são desconhecidos pelo perito.

Dentre as contribuições deste trabalho destaca-se ainda o caráter inovador da abordagem proposta e o seu potencial promissor para a análise forense acústica, sendo um recurso adicional para os peritos na identificação de armas de fogo a partir de registros de áudios questionados.

Com base neste trabalho, dois artigos científicos foram publicados e apresentados nos eventos descritos abaixo:

1. Larrain, L. V. G. L., da Costa, J. P. C. L. e Gross, T. J. “Identificação do calibre de pistolas por meio da assinatura acústica dos estojos ejetados,” em: Anais do *International Conference on Forensic Computer Science (ICoFCS’15)*, Brasília, Brasil, best paper award, 2015.
2. Larrain, L. V. G. L., da Costa, J. P. C. L. e Gross, T. J. “Identification of Firearm Calibers via Acoustical Signature of the Ejected Cartridge Case,” em: Anais do *IEEE 9th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS’15)*, Cairns, Australia, 2015.

O resultado consolidado deste trabalho também gerou um artigo que foi submetido para o periódico *IEEE Transactions on Information Forensics & Security*.

Apresentam-se na Seção 5.1 as possibilidades de desenvolvimento de trabalhos futuros vislumbrados pelo autor.

5.1. TRABALHOS FUTUROS

Dentre as possibilidades de trabalhos futuros para a continuidade desta pesquisa sugere-se a validação das componentes do tubo aberto integrante do modelo acústico dos estojos do tipo garrafa assim como a validação a partir de dados não controlados para os calibres dos estojos garrafa, tal como fora realizado para os calibres de pistola.

Também se sugere o desenvolvimento de soluções para detecção e classificação automática das assinaturas acústicas, por meio de técnicas de processamento digital de sinais e reconhecimento de padrões.

A criação de uma plataforma (*framework*) de análise forense acústica para disparos de armas de fogo, integrando as distintas abordagens existentes para a identificação de armas de fogo entre outros problemas correlatos de interesse forense, a partir dos registros de áudio questionados, também se mostra uma oportunidade de relevância significativa para as ciências forenses.

Por fim, sugere-se ainda a exploração de outros sons oriundas das ações mecânicas de armas de fogo, como os sons gerados pelos sistemas de carregamento e repetição além da

movimentação da arma pelo atirador, no intuito de identificar outros eventos acústicos potenciais para a solução de problemas de interesse das ciências forenses.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Askill, J. “*Physics of musical sounds*”. 2nd ed., Chapter 7. Disponível em: “<http://fiziks.net/Music%20Sample%20Chapter%20Seven/musicsamplechapter7.htm>”, 2007. [Acessado em: Maio 2015].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “*NBR 10152: Níveis de ruído para conforto acústico*,” Rio de Janeiro, 1987.

Barbosa, P. A. e Madureira S. “Manual de Fonética Acústica Experimental. Aplicações a dados do Português”, 1ª Ed., Capítulo 3, Editora Cortez, São Paulo, pp 25-64, 2015.

BBC Brasil. “*Em 10 anos, EUA têm mais mortos em massacres do que em ataques terroristas*,” Disponível em: “http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/10/151002_eua_massacres_mortes_cc” [Acessado em: Fevereiro 2016].

BRASIL. Lei nº 10.826, de 22 de dezembro de 2003. Presidência da República. Brasília, 2003.

Calderon, P., Manolo, D. e Apolinario Jr., J. A. “Shooter Localization based on DoA Estimation of Gunshot Signals and Digital Map Information,” em: *IEEE (Magazine IEEE Latin America) Latin America Transactions*, 13.2: 441-447, 2015.

Cisco® Visual Networking Index (VNI). “*Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2015–2020*,” Junho 2016. Disponível em: “<http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.html>” [Acessado em: Junho 2016].

Cisco® Visual Networking Index (VNI). “*The Zettabyte Era-Trends and Analysis*,” Junho 2016. Disponível em: “<http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>” [Acessado em: Junho 2016].

COLT. “*Operator’s manual - C7 Family of Combat Weapons*,” Canada, 2005.

Departamento de Polícia Federal. “*Cartilha de Armamento e Tiro*,” Disponível em: “<http://www.pf.gov.br/servicos/armas/Cartilha%20de%20Armamento%20e%20Tiro.doc>” [Acessado em: Junho 2016].

Dufaux, A. “*Detection and Recognition of Impulsive Sound Signals*,” Tese Doutorado - Institute of Microtechnology. University of Neuchâtel, Neuchâtel, Switzerland, pp. 16-18, 2001.

Freire, I. L. e Apolinario Jr., J. A. “GCC-based DoA estimation of overlapping muzzleblast and shockwave components of gunshot signals,” em: *Anais do IEEE Second Latin American Symposium on Circuits and Systems (LASCAS)*, Bogota, Colombia, pp. 1-4, 2011.

Freire, I. L. e Apolinario Jr., J. A. “Gunshot detection in noisy environments,” em: *Anais do 7th International Telecommunications Symposium*, Manaus, Brasil, 2010.

Heard, B. J. “*Handbook of Firearms and Ballistics: examining and interpreting forensic evidence*,” 2nd ed., Wiley-Blackwell, 2008.

ISO/IEC 13818-3:1998. “*Information technology — Generic coding of moving pictures and associated audio information - Part 3: Audio*,” 2nd ed., 1998.

Koenig, B.E.: “Authentication of forensic audio recordings,” em: *Anais do J. Audio Eng. Soc.* 38, 3–33, 1990.

Knap, M. Proteção de Tela: “*A complete animation of the FN High Power. See the cutaway of the FN High Power pistol actually shooting!*”, Disponível em: “<http://www.manthei-mess-systeme.com>” [Acessado em: Maio de 2016].

Liljencrants, J. “*End Correction at a Flue Pipe Mouth*”. Disponível em: “<http://www.fonema.se/mouthcorr/mouthcorr.htm>”, 2006 [Acessado em: Maio de 2016].

Lindsay, P. and Norman, P. “*Human Information Processing: an Introduction to Psychology*,” 2nd ed., Academic Press Inc, 1977.

Maher, R.C. “Modeling and signal processing of acoustic gunshot recordings,” em: *Anais do IEEE Signal Processing Society 12th Digital Signal Processing Workshop*, Jackson Lake, WY, pp. 257-261, 2006.

Maher, R.C. “Acoustical characterization of gunshots,” em: *Anais do IEEE SAFE 2007: Workshop on Signal Processing Applications for Public Security and Forensics*, Washington, DC, pp. 109-113, 2007.

Maher, R.C. “Audio forensic examination: authenticity, enhancement, and interpretation,” em: *Anais do IEEE Sig. Proc. Mag.* 26, 84–94, 2009

Maher, R.C. e Shaw, S.R. “Deciphering gunshot recordings,” em: *Anais do AES 33rd Conference Audio Forensics - Theory and Practice*, Denver, CO, 2008.

Maher, R. C. e Shaw, S. R. “Directional aspects of forensic gunshot recording,” em: *Anais do AES 39th International Conference Audio Forensics - Practices and Challenges*, Hillerod, Dinamarca, 2010.

Boersma, P. e Weenink, D. “*Praat: doing phonetics by computer [Computer program]*”. Version 6.0.19. Disponível em: “<http://www.praat.org>” [Acessado em: Junho 2016].

Sítio “La Asociación Española de Coleccionistas de Cartuchería (AECC)”:
”<http://www.municion.org/>” [Acessado em: Abril 2015].

TAURUS. “Catálogo Pistolas & Revólveres 2016”, São Leopoldo, 2016.

Thumwarin, P., Matsuura, T. e Yakoompai, K. “Audio forensics from gunshot for firearm identification,” em: *Anais do IEEE 4th Joint International Conference on Information and Communication Technology, Electronic and Electrical Engineering*, Tailândia, pp. 1-4, 2014.

Thumwarin, P., Prasit, C., e Matsuura, T. “Firearm identification based on rotation invariant feature of cartridge case,” em: *Anais do IEEE SICE Annual Conference*, Tokyo, Japão, pp. 45-49, 2008.

Tocchetto, D. “*Balística Forense Aspectos Técnicos e Jurídicos*,” 7 ed., Campinas: Millenium Editora, 2013.

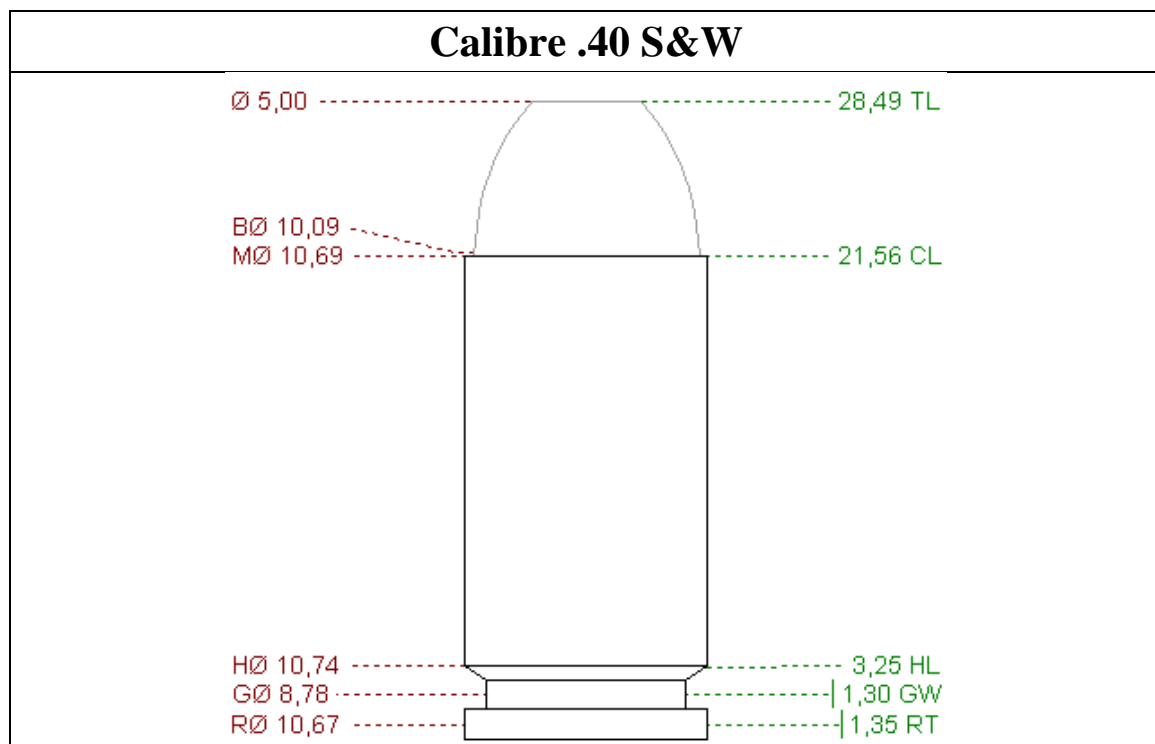
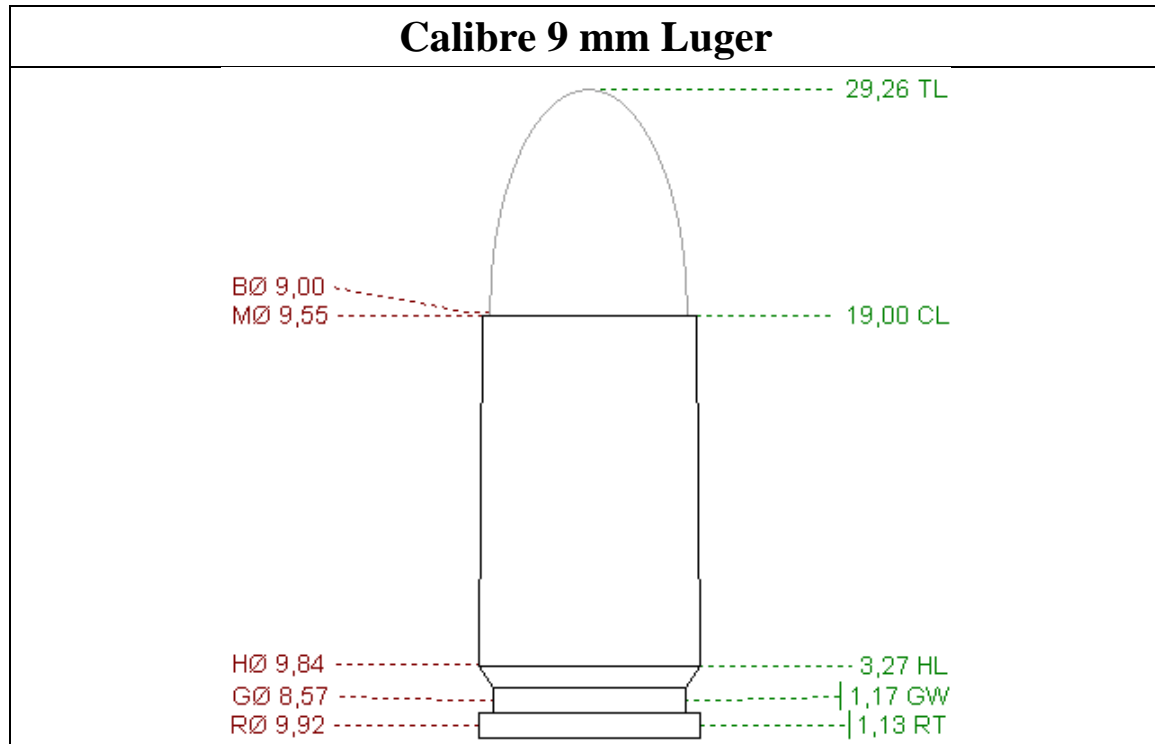
Waiselfisz, J. J. “*Mapa da Violência 2015: Mortes Matadas por Arma de Fogo*,” Brasília, 2015. Disponível em: <http://www.mapadaviolencia.org.br/pdf2015/mapaViolencia2015.pdf> [Acessado em: Janeiro 2016].

ZANOTTA, C. M. “*Identificação de munições*,” Volume 1. São Paulo: Ed. Magnum, 1992.

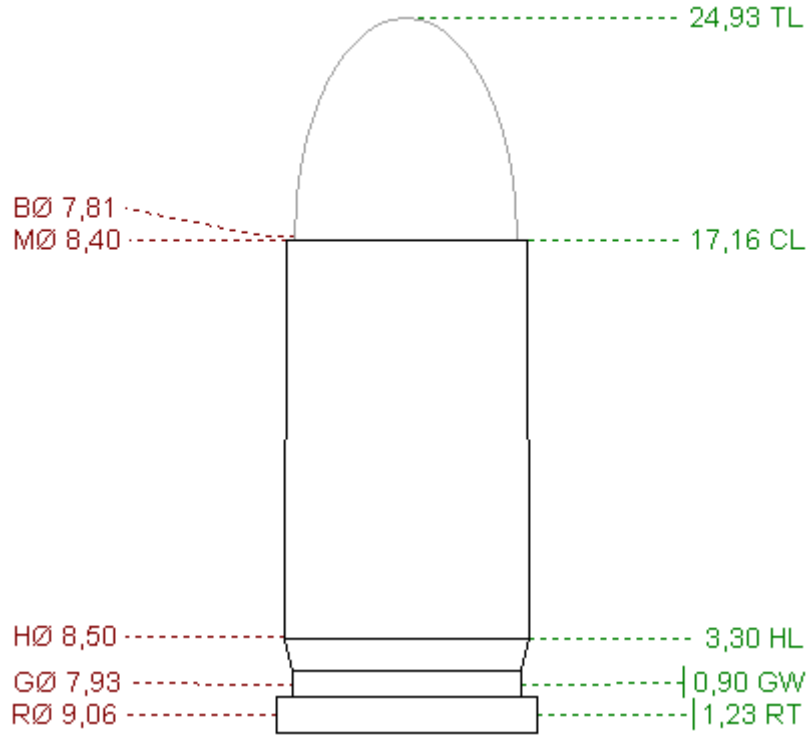
ANEXOS

A – DIMENSÕES DOS CALIBRES DELIMITADOS NO ESTUDO

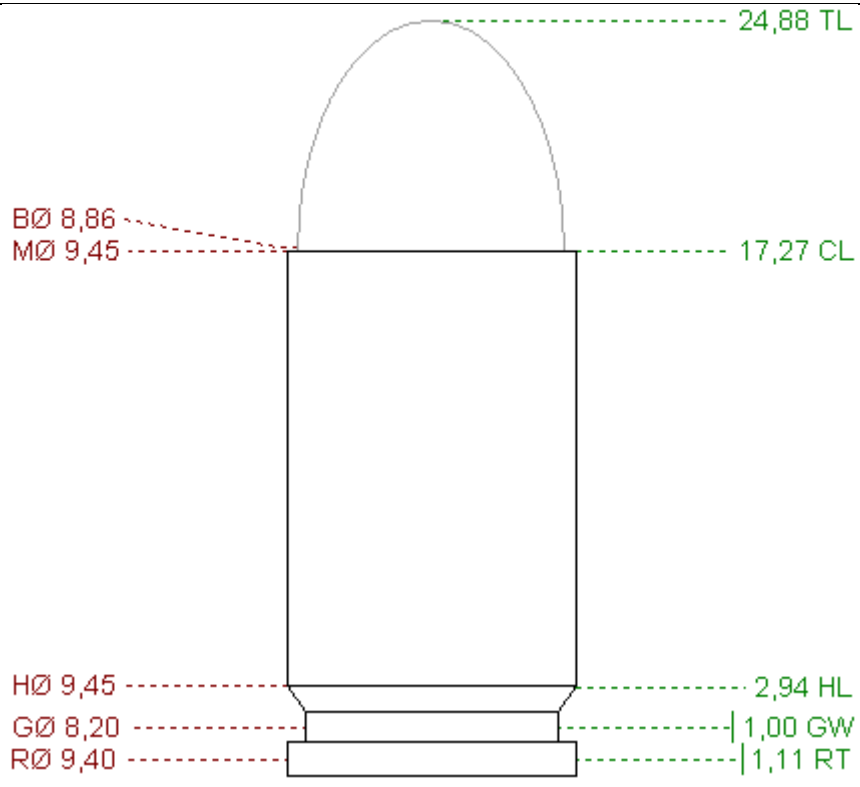
(Dados adaptados da base de dados da AECC contida em: www.municion.org)



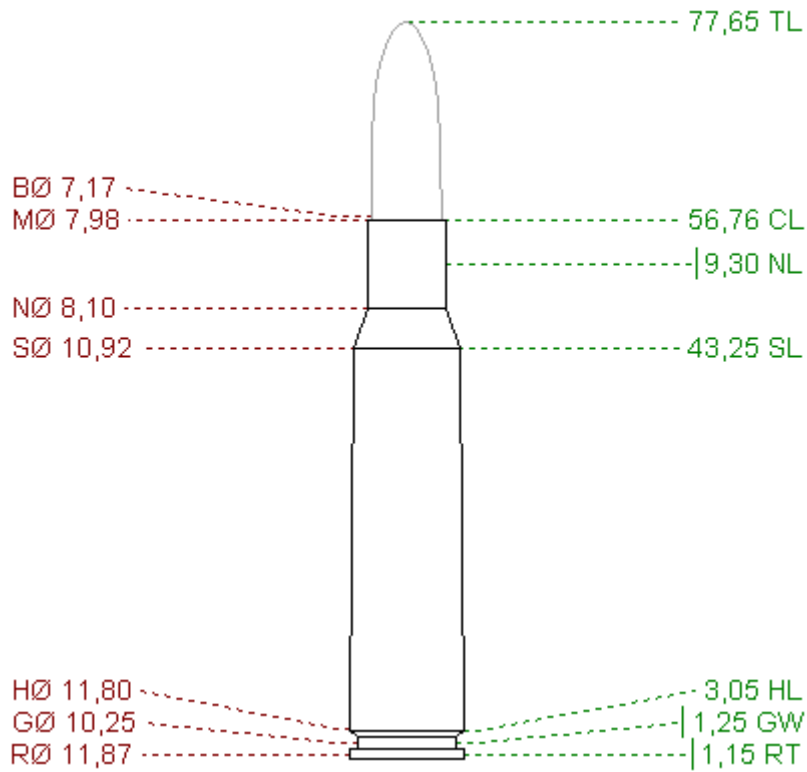
Calibre .32 Auto



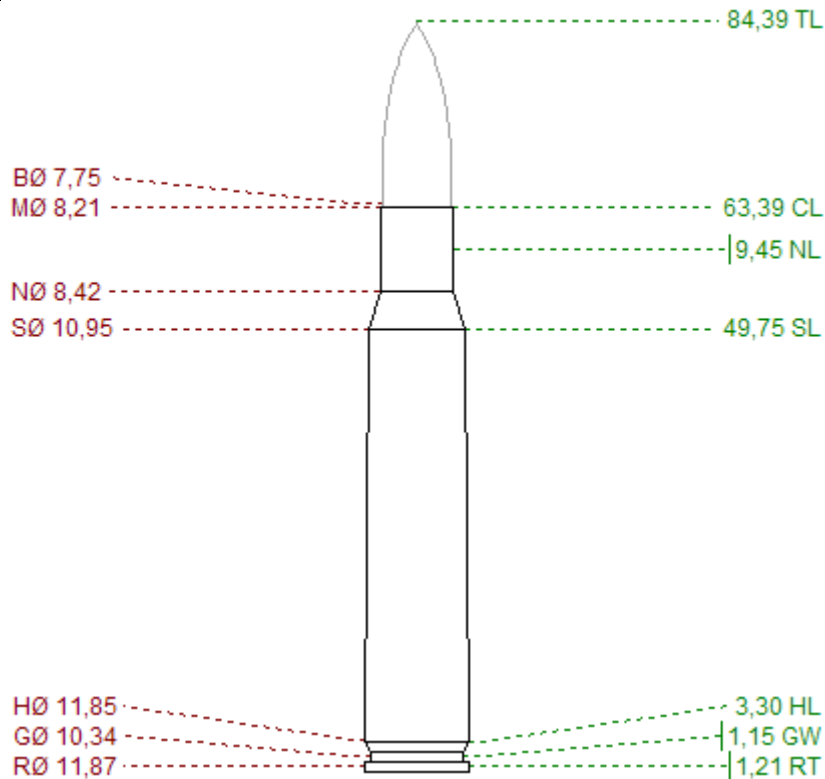
Calibre .380 Auto



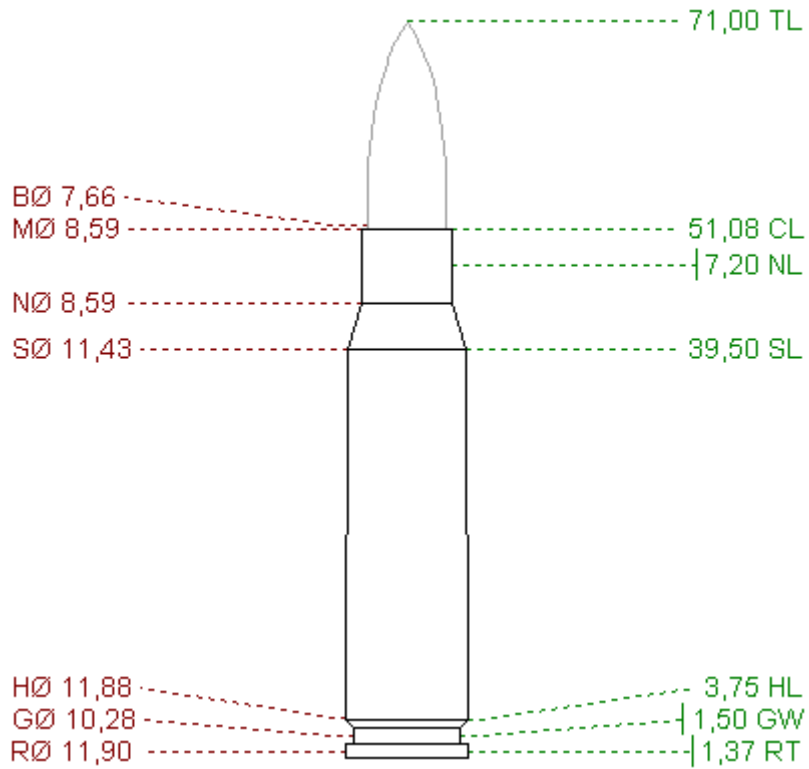
Calibre 7x57 mm



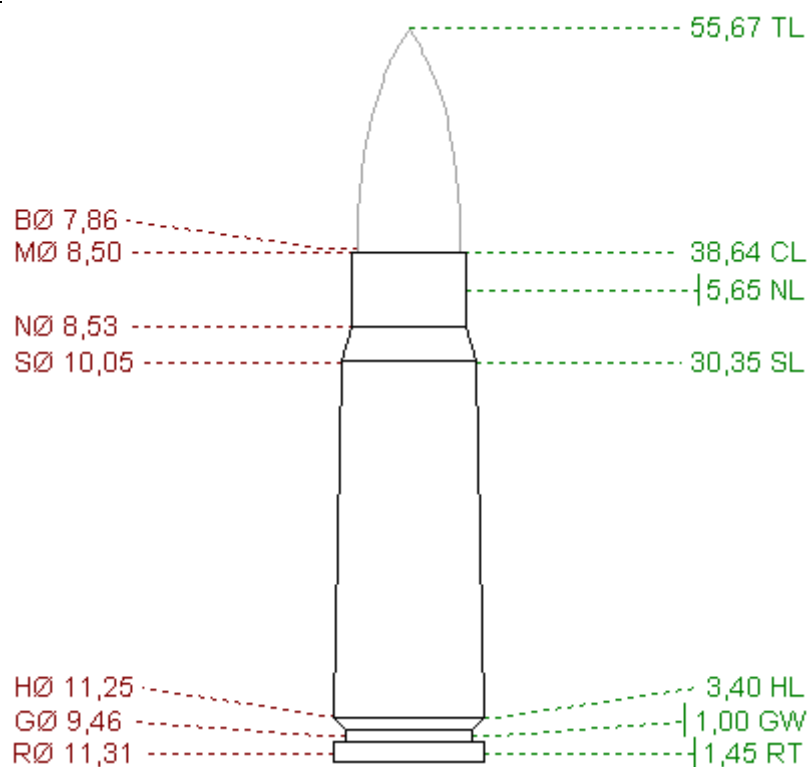
Calibre 7,62x63 mm



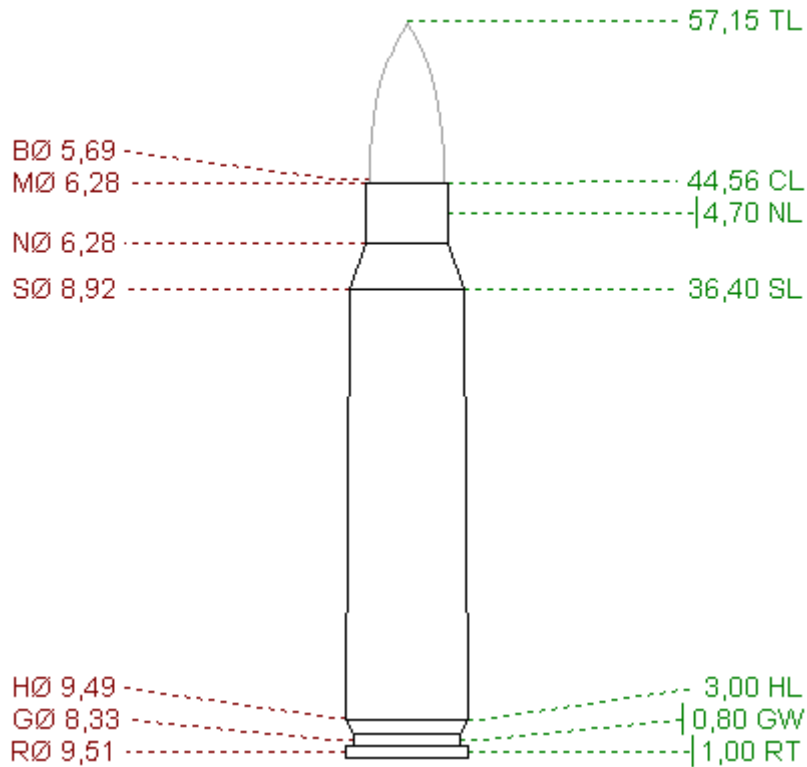
Calibre 7,62x51 mm



Calibre 7,62x39 mm



Calibre 5,56x45 mm



Calibre 12,70x99 mm

