

Identificação do calibre de munições por meio da assinatura acústica dos estojos ejetados

Luiz Vinícius G. L. Larrain^{1,2}, João Paulo C. L. da Costa¹, Tadeu Junior Gross²

(1) Laboratório de Processamento de Sinais em Arranjos

Departamento de Engenharia Elétrica

Universidade de Brasília (UNB)

URL: <http://www.redes.unb.br/lasp>

(2) Gerência de Perícias em Áudio e Vídeo

Perícia Oficial e Identificação Técnica do Estado de Mato Grosso - POLITEC

URL: <http://www.politec.mt.gov.br>

Resumo □ Gravações de disparos de armas de fogo podem ser cruciais para investigações forenses apesar de apresentarem vários desafios técnicos aos peritos. Propõe-se neste artigo uma abordagem com perspectiva diferente das tradicionais nesta área, focando o estudo nas assinaturas acústicas geradas pelas ações mecânicas intrínsecas ao funcionamento de armas de fogo, em específico da queda do estojo ejetado após o disparo. É proposta a modelagem do comportamento acústico do estojo como um tubo fechado, ou seja, com a presença de frequências ressonantes. O modelo é validado para quatro calibres de pistolas, verificando o seu potencial para a determinação de calibres a partir da assinatura acústica gerada pelo contato dos estojos ejetados, ao atingir superfícies rígidas.

Palavras-Chave □ *Acústica Forense, Balística Forense, Gravações de Tiros, Identificação de armas de fogo.*

Abstract— Audio gunshot recordings can be very helpful for crime scene investigation but also have many challenges for the forensic experts. In this article we proposed an untraditional perspective to solve this problems. Our focus is not in the muzzle blast or shock wave but in a specific mechanical action of the firearms: the ejection of spent cartridges. We propose an acoustical model to the casing inspired in closed tubes in physics acoustical. After we validated this model to four pistols caliber's and tested if the acoustical signature generated when the casing touch any rigid surface can be used to identify the ammunition caliber's in terms of audio forensics.

Keywords □ *Audio Forensics, Forensic Ballistics, Gunshot Recordings, Firearm identification.*

I. INTRODUÇÃO

A difusão dos dispositivos portáteis de gravação, tais como os celulares *smartphones*, e suas integrações com as diversas redes sociais existentes, geram um volume exacerbado de registros audiovisuais contendo, em diversas ocasiões, eventos relacionados a prática de ações delituosas, incluindo o uso de armas de fogo.

A análise forense acústica demonstra-se uma importante e promissora área das ciências forenses para a investigação de crimes com emprego de armas de fogo. Isto porque as gravações desta natureza possuem informações preciosas com potencial para elucidar questionamentos, tais como: o reconhecimento do estrondo como um tiro real de arma de

fogo, a identificação do calibre da arma de fogo empregada, a quantidade de armas envolvidas e a ordem dos autores dos disparos.

Em meio às abordagens para estes problemas encontram-se a modelagem e a caracterização acústica de disparos de armas de fogo [1-3], a detecção de tiros em ambientes ruidosos [4], a influência do ângulo e direção na gravação de tiros [5], a identificação do calibre da arma através das gravações de tiros [6], localização de atirador *sniper* [7,8] e a identificação de armas de fogo através de imagens rotacionadas do cartucho [9].

Para efetuar as análises o Perito deve compreender as distintas componentes emissoras de sons, possíveis de serem encontradas em gravações contendo disparos de armas de fogo. Dentre estas componentes encontram-se os sons oriundos da explosão provocada para a expulsão do projétil através do cano da arma; das ações mecânicas intrínsecas ao funcionamento desta, como o acionamento do gatilho e cão, a expulsão de estojos e recarregamentos de munição; da onda de choque provocada por projéteis supersônicos; e os sinais decorrentes dos efeitos de vibração em superfícies sólidas além do próprio solo [2].

Todas as abordagens supracitadas focam na abordagem acústica do tiro e seus efeitos na propagação. Este trabalho possui uma perspectiva diferenciada, focada no estudo de eventos acústicos das ações mecânicas, em específico para a queda do estojo ejetado. Apesar de uma ampla pesquisa bibliográfica na literatura relacionada, não foi identificada abordagem similar para o tratamento deste problema.

É proposto neste artigo um estudo acerca da natureza acústica do som produzido pelo contato dos estojos ejetados ao atingir o solo ou superfícies rígidas e o potencial destes eventos acústicos para a identificação do calibre de armas de fogo. Apresentam-se ainda os resultados experimentais obtidos para quatro tipos de calibres utilizados por pistolas.

Este artigo possui cinco seções, incluindo esta introdução. Inicialmente na Seção II são apresentados os aspectos teóricos e a modelagem física para o problema proposto. Em seguida, a Seção III aborda os ensaios realizados e os resultados obtidos. Apresentam-se na Seção IV as análises e considerações, comparando o modelo teórico adotado e os resultados

experimentais obtidos e, finalmente, as conclusões são apresentadas na Seção V.

II. MODELAGEM FÍSICA DO PROBLEMA

Na Seção II.A apresenta-se uma introdução aos mecanismos de expulsão do estojo, na Seção II.B são abordadas as características físicas e respectivas dimensões dos calibres delimitados neste artigo e na Seção II.C é proposta uma modelagem do comportamento acústico dos calibres delimitados.

A. Mecanismos de Expulsão do Estojo

As armas de fogo, quanto ao funcionamento, são 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 disparando múltiplos projéteis simultaneamente, tendo portanto seu carregamento manual. Como exemplo, pode-se citar as espingardas de um cano, pistolas de tiro unitário e garruchas. Já as armas de repetição podem ser classificadas em não automáticas, semiautomáticas e automáticas [10].

Ainda de acordo com a literatura correlata [10], as armas de repetição não automáticas são aquelas cujos mecanismos de repetição e disparo dependem exclusivamente da força muscular do atirador, como os revólveres e a maioria das carabinas. Nas armas de repetição semiautomáticas o esforço do atirador é necessário apenas para o acionamento do disparo, aproveitando-se os gases da combustão para o acionamento automático do mecanismo de repetição, sendo exemplo desta categoria a maioria das pistolas. 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 só intermitente mas também contínuo, em rajada, como nas submetralhadoras e fuzis.

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 ilustrado na Figura 1.

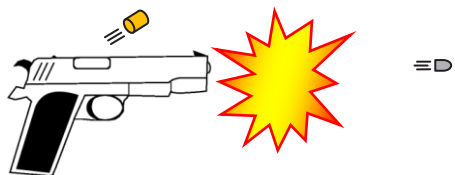


Fig. 1. Ilustração do mecanismo de expulsão do estojo em uma pistola

Tal mecanismo tem como objetivo o recarregamento automático da munição, permitindo que a arma esteja apta para efetuar outro disparo no menor tempo possível.

Desta forma verifica-se o potencial de aplicação da análise acústica da queda dos estojos preferencialmente para as armas de repetição semiautomáticas e automáticas, uma vez que a expulsão do estojo independe da ação voluntária do atirador, estando condicionada portanto exclusivamente ao disparo da arma de fogo. Por outro lado, esta abordagem também demonstra-se válida para determinadas armas de repetição não automática, condicionada à ação voluntária do atirador para a extração do estojo, como no caso de espingardas de repetição *pump action* ou na própria substituição dos cartuchos deflagrados no tambor do revólver.

B. Características Físicas do Estojo

O cartucho é composto, de maneira geral, por quatro componentes: o projétil, a carga propelente, o estojo e a espoleta, conforme apresentado na Figura 2. Para a ocorrência do tiro, a arma percute a espoleta, que provoca a queima da carga propelente, gerando um grande volume de gases que expulsa o projétil através do cano da arma. O estojo é o invólucro 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.

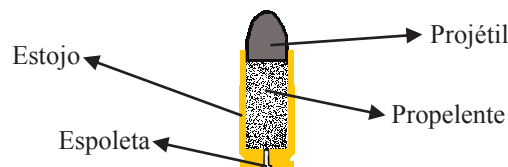


Fig. 2. Componentes presentes em um cartucho de fogo central

Atualmente a maioria dos estojos são construídos em metais não ferrosos, principalmente o latão, composto por liga de cobre e zinco, mas 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 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 para facilitar o processo de extração.

Os estojos do tipo cilíndricos e cônicos são empregados predominantemente por revólveres, pistolas e submetralhadoras de maneira geral. 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 de pistolas, geralmente em armas que disparam com maior quantidade de energia.

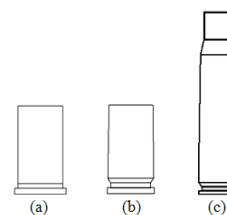


Fig. 3. Formatos de estojos: cilíndricos (a), cônicos (b) e garrafa (c)

Neste trabalho, o estudo foi delimitado para os calibres indicados na Tabela I, todos utilizados por pistolas.

TABELA I. MODELOS E DIMENSÕES DOS ESTOJOS [11]

Marca/Calibre	Tipo	Comprimento Total (mm)	Diâmetro Boca (mm)	Diâmetro Corpo (mm)
CBC 9 MM LUGER	Cônico	19	9,55	9,84
CBC .40 S&W	Cilíndrico	21,56	10,69	10,74
CBC 32 AUTO	Cilíndrico	17,16	8,40	8,50
CBC 380 AUTO	Cilíndrico	17,27	9,45	9,45

C. Frequências de Ressonância em Tubos Fechados

Segundo a teoria física de ondas, quando as ondas sonoras se propagam no interior de um tubo, estas são refletidas nas extremidades, ainda que esta esteja aberta. 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 estes fenômenos acontecem correspondem às frequências de ressonância do tubo.

A Figura 4 exibe algumas ondas sonoras estacionárias para um tubo com uma das extremidades fechadas e a outra aberta. Neste caso haverá um ponto de deslocamento máximo na extremidade aberta e um nó na extremidade fechada.

Para o cálculo com precisão do comprimento de onda da primeira harmônica, a correção final deve ser considerada. Esta correção final pode ser obtida através do produto do diâmetro do tubo por uma constante [12]. Através de pesquisa bibliográfica, foi observado a aplicação de coeficientes de correção final para tubos com uma extremidade fechada na faixa de 0,3 a 0,6. Para a modelagem deste problema em específico, foi adotado um coeficiente de correção final de 0,4.

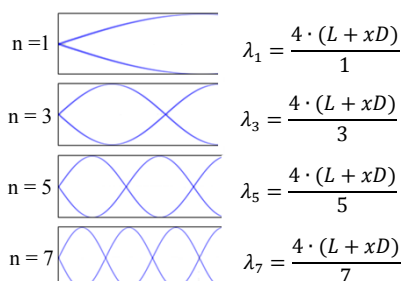


Fig. 4. Ondas estacionárias em tubos com apenas uma extremidade livre

Para a estimativa das frequências de ressonância teóricas, foi considerado o estojo como sendo um tubo cilíndrico ideal, ou seja, perfeitamente cilíndrico e homogêneo, com apenas uma das extremidades fechada. As frequências de ressonância podem ser estimadas por:

$$f_n = \frac{n \cdot v}{4 \cdot (L + 0,4D)} \quad \text{para } n = 1, 3, 5 \dots \quad (1)$$

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

Os resultados obtidos das frequências de ressonância de cada um dos calibres estudados são apresentados na Tabela II.

TABELA II. FREQUÊNCIAS TEÓRICAS DOS ESTOJOS TESTADOS

MARCA/CALIBRE	F_1 (Hz)	F_3 (Hz)	F_5 (Hz)
CBC 9 MM LUGER	3724	11172	18620
CBC .40 S&W	3289	9867	16445
CBC 32 AUTO	4142	12426	20710
CBC 380 AUTO	4038	12114	20190

III. ENSAIOS REALIZADOS

Na Seção III.A é detalhado o método empregado para a realização dos ensaios e na Seção III.B são apresentados os resultados obtidos.

A. Método Utilizado

Analisando as características físicas dos estojos, abordados na Seção II, observa-se semelhança aparente com o modelo de tubos fechados em uma extremidade, o que sugere que estes possam gerar sons em frequências de ressonância específicas.

Para verificação desta hipótese foram realizados ensaios em uma sala fechada de ruído ambiente de baixa intensidade. Os estojos deflagrados, foram soltos individualmente a aproximadamente 1,60 m do piso, de revestimento cerâmico, no interior de um círculo de raio de 1 m com o microfone ao centro, conforme esquematizado na Figura 4.

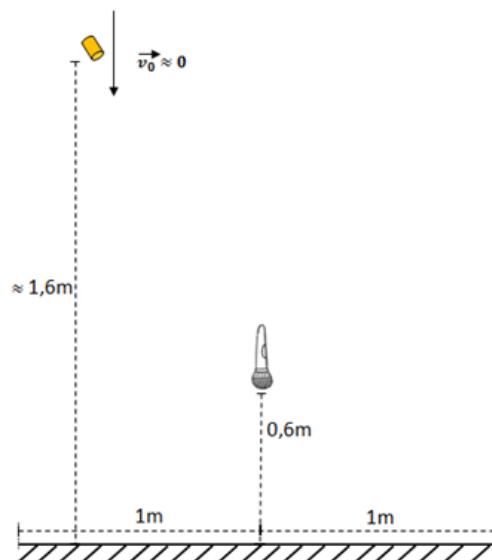


Fig. 5. Experimento realizado para coleta dos áudios

Foram utilizados 5 estojos distintos para cada um dos calibres estudados, com exceção do CBC 9 mm LUGER que foram utilizados apenas 3. A série de lançamento para cada um destes estojos foi reproduzida 50 vezes.

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

B. Resultados Obtidos

Conforme esperado, ao analisar o espectrograma das gravações efetuadas, foi observada a presença de componentes frequenciais específicas em todos os calibres e ocorrência 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 6, para um intervalo da série de lançamento do estojo número 1 CBC 380 AUTO.

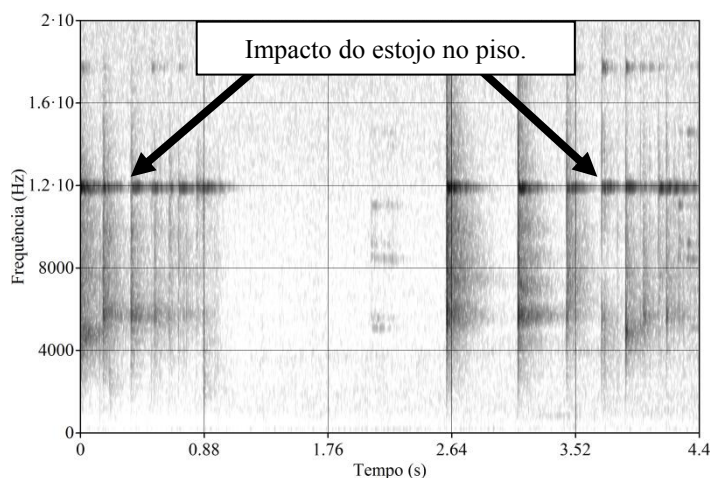


Fig. 6. Frequência de ressonância de maior potência para o estojo número 1 CBC 380 AUTO

Em seguida foi calculado o espectro médio de longo termo, do inglês *long-term average spectrum* (LTA), para cada uma das séries de lançamentos realizadas, e os resultados obtidos foram normalizados e agrupados por calibre.

Os espectros LTA obtidos para cada um dos calibres são apresentados nos gráficos das Figuras 7 a 10 com evidência para as frequências de ressonância de maior potência. Foi verificado no espectro LTA que as frequências de maior potência correspondem a segunda componente do modelo teórico (F_3).

Na Figura 7 têm-se os espectros LTA dos estojos CBC 9 mm LUGER. Verifica-se a ocorrência dos picos de frequências no intervalo de 11150 Hz a 1250 Hz.

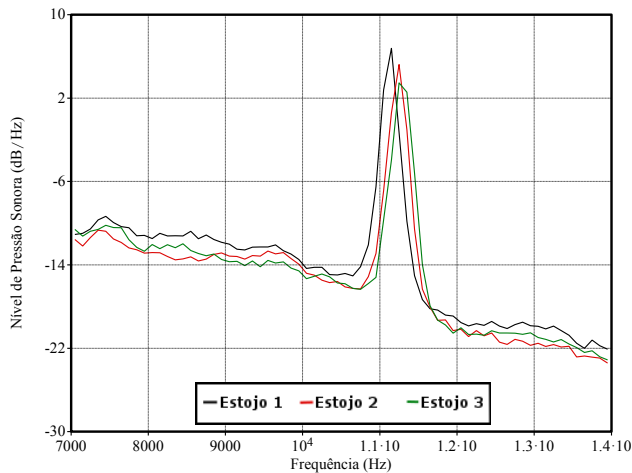


Fig. 7. Espectros LTAs das gravações dos estojos CBC 9 mm LUGER

Na Figura 8 têm-se os espectros LTA dos estojos CBC 32 AUTO. Verifica-se a ocorrência dos picos de frequências no intervalo de 12050 Hz a 12250 Hz.

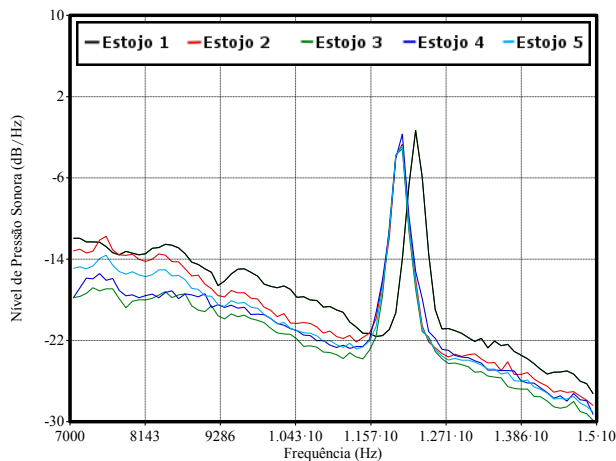


Fig. 8. Espectros LTAs das gravações dos estojos CBC 32 AUTO

Na Figura 9 têm-se os espectros LTA dos estojos CBC .40 S&W. Verifica-se a ocorrência dos picos de frequências no intervalo de 8050 Hz a 8450 Hz.

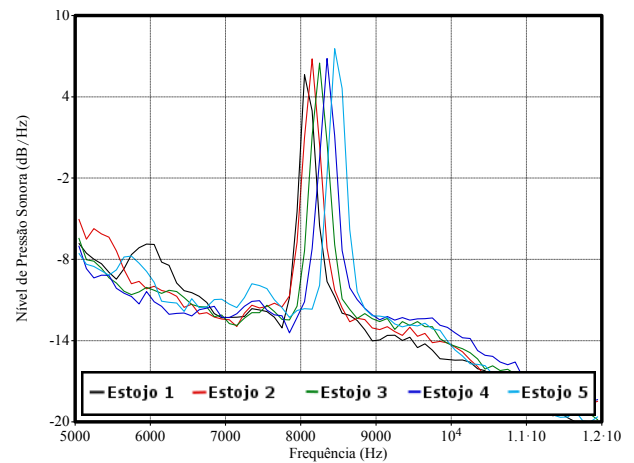


Fig. 9. Espectros LTAs das gravações dos estojos CBC .40 S&W

Na Figura 10 têm-se os espectros LTA dos estojos CBC 380 AUTO. Verifica-se a ocorrência dos picos de frequências no intervalo de 11650 Hz a 11950 Hz.

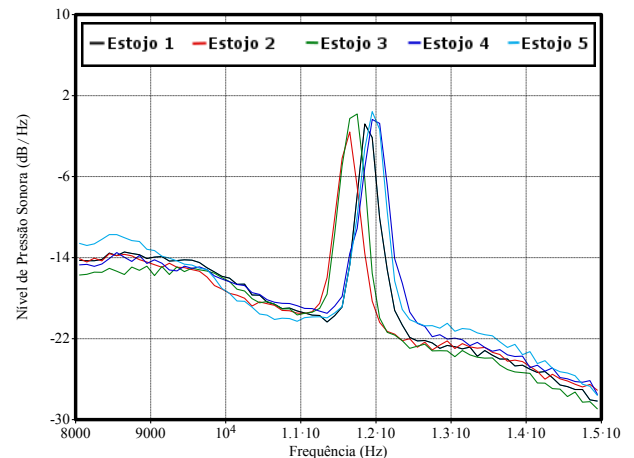


Fig. 10. Espectros LTAs das gravações dos estojos CBC 380 AUTO

IV. VALIDAÇÃO E CONSIDERAÇÕES

Os resultados obtidos através dos ensaios demonstraram a existência de convergência entre os distintos estojos de mesmo material e calibre. Também verificou-se diferenças significativas para alguns calibres distintos, conforme demonstrado na Figura 11, que apresenta a sobreposição normalizada das médias dos LTAs obtidos para os calibres delimitados neste estudo.

A exceção para os calibres estudados ocorreu, exclusivamente, para o CBC 32 AUTO e CBC 380 AUTO, em que houve uma clara sobreposição das médias dos espectros LTAs. A aproximação dos resultados obtidos para os calibres CBC 32 AUTO e CBC 380 AUTO era esperada em decorrência dos tamanhos destes estojos serem praticamente os mesmos conforme apresentado na Tabela I.

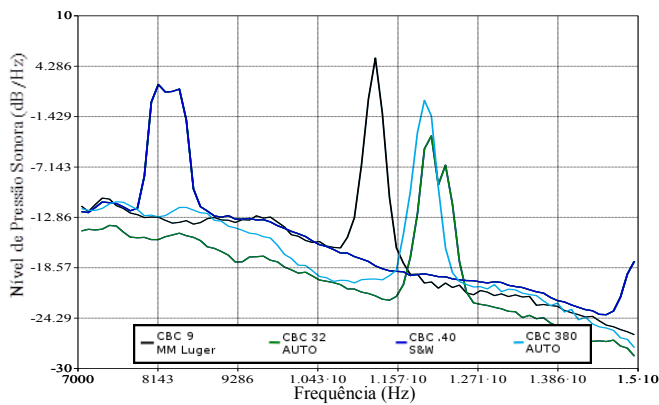


Fig. 11. Sobreposição das médias dos espectros LTAS dos calibres testados

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

$$\text{NRMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_3 - \hat{F}_{3i})^2 \right]^{0,5} \cdot \frac{1}{\bar{F}_3} \quad (2)$$

em que F_3 e \hat{F}_3 são as frequências observadas e teóricas respectivamente e \bar{F}_3 é a média das frequências observadas.

Observa-se que os resultados práticos apresentaram razoável aderência ao modelo teórico proposto, ainda que simplificado, conforme evidenciado na Tabela III. A exceção, neste caso, ocorreu para o calibre CBC .40 S&W, que obteve o maior NRMSE em relação a modelagem física proposta.

TABELA III. VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

MARCA/ CALIBRE	Faixa Frequências Observadas (Hz)	Valor Teórico \hat{F}_3 (Hz)	NRMSE
CBC 9 MM LUGER	11150 a 11250	11172	0,0058
CBC .40 S&W	8050 a 8450	9867	0,1967
CBC 32 AUTO	12050 a 12250	12426	0,0286
CBC 380 AUTO	11650 a 11950	12114	0,0296

Dentre as vantagens da abordagem proposta, encontram-se a dispensabilidade de inúmeras variáveis citadas na literatura para a interpretação e análise satisfatória do tiro a partir de uma gravação, tais como: a disposição de objetos, obstáculos e natureza do próprio ambiente de ocorrência dos disparos, se aberto ou fechado, informações acerca da munição empregada, efeitos do vento e umidade, posição relativa e ângulo de direção do atirador em relação ao equipamento gravador [2,5]. Estes parâmetros em muitas ocasiões são desconhecidos pelo perito.

Como na abordagem proposta as frequências analisadas dependem exclusivamente do material e dimensões físicas do estorjo, a constatação deste evento acústico, ainda que isoladamente, já possibilitaria ao perito estabelecer inferências independentemente de informações do local de crime.

Dentre as desvantagens do método encontra-se a limitação de sua aplicação, sendo predominantemente válido para as armas de fogo que possuam recarregamento automático ou semiautomático, ou seja, que expulsem involuntariamente o estorjo, ou ainda para determinadas armas de repetição não automáticas, mediante a ação voluntária do atirador.

Além disso, ao contrário do tiro que se propaga por longas áreas, para a gravação deste evento acústico é imprescindível a proximidade do microfone em relação ao local dos disparos. Ressalta-se que para os eventos acústicos gravados nos ensaios, foram observados picos superiores a 6 dB/Hz em determinadas frequências, o que torna a viabilidade de aplicação desta abordagem bastante promissora.

Além do requisito de proximidade, considerando as faixas de frequência constatadas nos ensaios, para os calibres delimitados, o equipamento gravador deve suportar banda de no mínimo 12,5 kHz para que a gravação viabilize o emprego desta técnica. Esta limitação não é propriamente um problema muito grave para gravações presenciais de modo geral, uma vez que a grande maioria dos atuais equipamentos portáteis de gravação, incluindo celulares, já suportam bandas superiores a esta.

V. CONCLUSÕES

Este artigo confirmou a hipótese da presença de frequências de ressonância quando os estojos ejetados, após a ocorrência de um disparo de arma de fogo, atingem uma superfície rígida. Verificou-se ainda que ao menos uma frequência, para todos os calibres estudados, apresenta valores mais significativos de potência, ou seja, mais resistente ao distanciamento do microfone em relação ao atirador.

A modelagem física do problema, ainda que os estojos notoriamente não se tratem de cilindros ideais apresentou resultados bastante aderente aos obtidos nos ensaios práticos para todos os calibres testados.

Desta forma, a abordagem proposta foi validada satisfatoriamente para os quatro tipos de calibres de pistola, demonstrando-se portanto uma alternativa promissora para a atribuição de calibres de arma de fogo, a partir da assinatura acústica gerada pelo contato do estorjo ejetado com superfícies rígidas. Ademais esta proposta mostra-se complementar as abordagens tradicionais já existentes sendo, portanto, mais um recurso de análise disponível ao perito.

Para trabalhos futuros torna-se necessário expandir os estudos e ensaios, abordando os demais calibres não contemplados neste artigo, inclusive de outros tipos de armas, especialmente os estojos do tipo garrafa. Recomenda-se ainda a verificação das máximas distâncias possíveis entre o transdutor e o atirador, que ainda assim permitam o registro da assinatura acústica do estorjo e conseqüente aplicação do método, além de maiores estudos quanto à robustez desta técnica para artefatos de compressão, ambientes ruidosos, dentre outros fatores de degradação frequentes à casuística forense.

Outra sugestão para trabalhos futuros é o estudo acerca de outros sons intrínsecos as ações mecânicas das armas de fogo, como por exemplo: os sons gerados pelos sistemas de alimentação e repetição e da movimentação da arma pelo atirador.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às Agências brasileiras de pesquisa e inovação CAPES (Projeto FORTE, Edital CAPES Ciências Forenses 25/2014) e FINEP (Convênio RENASIC/PROTO 01.12.0555.00), pelo suporte a este trabalho.

Agradecem ainda a Diretoria Geral da Perícia Oficial e Identificação Técnica (POLITEC) do Estado de Mato Grosso, pelo apoio para a qualificação dos peritos deste órgão.

REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Maher, R.C., Shaw, S.R. "Deciphering gunshot recordings", em: Anais do AES 33rd Conference Audio Forensics - Theory and Practice, Denver, CO, 2008.
- [4] Freire, I. L. e Apolinario Jr., J. A. "Gunshot detection in noisy environments", em: Anais do 7th International Telecommunications Symposium, Manaus, Brasil, 2010.
- [5] Maher, R. C. e Shaw, Steven R. "Directional aspects of forensic gunshot recording", em: Anais do AES 39th International Conference Audio Forensics - Practices and Challenges, Hillerod, Dinamarca, 2010.
- [6] Thumwarin, P., Matsuura, T., Yakoopai, 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, Tailandia, pp. 1-4, 2014.
- [7] Freire, I. L., e Apolinario, 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, pp. 1-4, 2011.
- [8] Calderon P., Manolo D., e Apolinario J. A. "Shooter Localization based on DoA Estimation of Gunshot Signals and Digital Map Information", em: IEEE (Revista IEEE America Latina) Latin America Transactions, 13.2: 441-447, 2015.
- [9] Thumwarin, P.; Prasit, C.; e Matsuura, T. "Firearm identification based on rotation invariant feature of cartridge case", em: Anais do IEEE SICE Annual Conference, Tóquio, Japão, pp. 45-49, 2008.
- [10] Tocchetto, D. "Balística Forense Aspectos Técnicos e Jurídicos", 7 ed. Campinas: Millenium Editora, 2013, p. 30-32.
- [11] Sítio: "<http://www.municion.org/>". Acessado em 30 de abril de 2015.
- [12] Boelkes, T. e Hoffmann, I. "Pipe Diameter and End Correction of a Resonant Standing Wave", International Scholastic Journal of Science Journal of Physics, Vol. 5, Iss. 1, 2011.