

## **AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO IMPACTO SONORO DE ARMAS DE FOGO: IMPLICAÇÕES PARA A SAÚDE AUDITIVA E A PRÁTICA FONOAUDIOLÓGICA À LUZ DA NR-15 ANEXO II**

**Raphael de Freitas Espíndola** <sup>[1]</sup>

**Giulia Nitzke Minuzzi** <sup>[2]</sup>

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Porto Alegre – RS <sup>[1]</sup>

Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre (UFCSPA) – Porto Alegre – RS <sup>[2]</sup>

raphael.f.espindola@gmail.com

giulia.minuzzi@ufcspa.edu.br

**Resumo.** O ruído impulsivo gerado por disparos de armas de fogo representa um importante fator de risco para trauma acústico e Perda Auditiva Induzida por Ruído (PAIR), especialmente em populações expostas de forma ocupacional ou recreativa. Este estudo teve como objetivo avaliar, por meio de modelagem computacional, o impacto sonoro de diferentes calibres de armas de fogo, considerando a distância da fonte sonora, o uso de supressores de ruído e a aplicação de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) auditivos, à luz dos limites estabelecidos pela NR-15 Anexo II. Foi desenvolvida uma ferramenta em Python baseada na Lei do Inverso do Quadrado da Distância, simulando 252 cenários a partir de sete calibres, três distâncias, três condições de supressor e quatro condições de proteção auditiva. Os resultados demonstraram que a maioria dos calibres avaliados ultrapassa os limites normativos na posição do atirador, mesmo com medidas de atenuação. O uso combinado de plug e concha apresentou a maior eficiência protetiva, porém não eliminou completamente o risco em calibres de maior intensidade. Conclui-se que a exposição ao ruído de armas de fogo configura risco auditivo significativo, reforçando a importância da atuação fonoaudiológica na prevenção, orientação, monitoramento audiológico e promoção da saúde auditiva em populações expostas.

**Palavras-chave:** Perda Auditiva Induzida por Ruído; Trauma Acústico; Saúde Auditiva Ocupacional; Armas de Fogo.

### **1. INTRODUÇÃO**

A audição é um dos sentidos mais sensíveis do corpo humano e, ao mesmo tempo, um dos mais vulneráveis aos efeitos deletérios da exposição ao ruído. Segundo o World Report on Hearing (2021), publicado pela Organização Mundial da Saúde (OMS), aproximadamente 430 milhões de pessoas no mundo apresentam perda auditiva incapacitante, número que poderá alcançar 2,5 bilhões de pessoas com algum grau de perda auditiva até 2050 [1]. O documento destaca, ainda, que cerca de 60% desses casos podem ser prevenidos por meio de medidas de saúde pública, sendo o ruído ocupacional e recreativo um dos principais fatores etiológicos modificáveis dessa morbidade [2].

Dentre as causas evitáveis de perda auditiva, destacam-se duas condições clínicas distintas, mas inter-relacionadas. A Perda Auditiva Induzida por Ruído (PAIR), de instalação progressiva e decorrente da exposição prolongada a sons acima de 80 dB; e o Trauma Acústico, caracterizado por perda auditiva súbita após exposição única a um som de altíssima intensidade, como explosões e disparos de armas de fogo [3, 4]. Ambas as condições, quando estabelecidas, são, em geral, irreversíveis, pois envolvem dano direto às células ciliadas da cóclea, estruturas que não possuem capacidade de regeneração no ser humano [5].

O ruído gerado por disparo de arma de fogo é denominado como um ruído de impacto (ou impulsivo), com pico extremamente elevado de pressão sonora e duração inferior a um segundo. Estudos clássicos da literatura demonstram que os Níveis de Pressão Sonora (NPS) de pico gerados por armas de fogo variam, em média, entre 130 e 175 dB de pico, sendo que a maioria dos calibres de uso recreativo e militar, menos calibres pequenos como .22 [6, 7]. Calibre é o nome usado para identificar um tipo/padrão de munição compatível com determinada arma. Esses níveis excedem amplamente o limiar de dano imediato à cóclea, fixado pela literatura internacional em 140 dB de pico [8, 9].

No Brasil, a regulamentação da exposição ocupacional ao ruído é estabelecida pela Norma Regulamentadora NR-15, em seus Anexos I (ruído contínuo ou intermitente) e II (ruído de impacto). De acordo com o Anexo II, o limite de tolerância para ruído de impacto é de 130 dB lineares, sendo que exposições sem proteção adequada acima de 140 dB (linear) ou 130 dB(C) configuram risco grave e iminente à saúde do trabalhador [10, 11]. Complementarmente, a NR-9 (Programa de Prevenção de Riscos Ambientais — PPRa, atualmente integrada ao Programa de Gerenciamento de Riscos

— PGR) estabelece a obrigatoriedade da avaliação quantitativa do agente ruído e da implementação de medidas de controle sempre que houver risco de exposição acima dos limites permitidos.

Dentre as pessoas expostas a ruídos de armas de fogo inclui-se militares das Forças Armadas, policiais civis e militares, agentes penitenciários, caçadores, atiradores esportivos e instrutores de tiro [4, 12]. Estudos internacionais demonstram que esses indivíduos apresentam prevalência aumentada de perda auditiva neurossensorial bilateral e simétrica nas frequências altas (3 a 6 kHz), com pior desempenho no ouvido contralateral à mão dominante, fenômeno conhecido como efeito de sombra de cabeça [8, 6]. Adicionalmente, o zumbido é um sintoma frequentemente associado, comprometendo significativamente a qualidade de vida [7].

Diversas estratégias de mitigação são descritas na literatura, com graus variados de eficácia. Os supressores de ruído (silenciadores), quando acoplados ao cano da arma, reduzem o pico de pressão sonora em torno de 20 a 35 dB, embora não eliminem o crack balístico produzido por projéteis supersônicos [13, 7]. Um supressor de ruído é um acessório que reduz o som do disparo ao desacelerar e dissipar os gases quentes que saem pelo cano da arma. Os Equipamentos de Proteção Individual (EPI) auditivos, como protetores tipo plug (intra-auricular) e tipo concha (circum-auricular), constituem a principal medida de proteção direta. Sua eficácia é aferida pelo Noise Reduction Rating (NRR), padronizado pela norma ANSI S3.19 [18], e pode ser potencializada por uso combinado dos dois tipos, conforme recomendação NIOSH [15, 16, 19].

Apesar da relevância epidemiológica e da existência de normas técnicas, ainda há na literatura nacional uma lacuna no que tange à avaliação computacional integrada do impacto sonoro de diferentes calibres, considerando simultaneamente a distância da fonte, o uso de supressores e a proteção auditiva, com vistas à conformidade normativa brasileira. Como apontam estudos recentes, a maioria das perdas auditivas induzidas por ruído é evitável mediante a adoção correta de EPI, embora exista considerável resistência ao uso de protetores entre os usuários [17].

Diante desse panorama, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma ferramenta computacional, desenvolvida em linguagem Python, capaz de estimar o Nível de Pressão Sonora efetivo no ouvido do indivíduo exposto a disparos de diferentes calibres de armas de fogo, considerando três distâncias da fonte (0 m, 5 m e 10 m), o uso ou não de supressores de ruído e a aplicação de diferentes modalidades de EPI auditivo. Os resultados são confrontados com os limites estabelecidos pela NR-15 Anexo II, com o objetivo de subsidiar a prática fonoaudiológica em saúde auditiva ocupacional.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Tipo de estudo

Trata-se de um estudo descritivo-analítico, de abordagem quantitativa e caráter computacional, baseado em modelagem matemática da propagação sonora e em parâmetros normativos e literatura científica indexada.

### 2.2 Fundamentos físicos do modelo

Quando uma arma de fogo é disparada, o som produzido se propaga pelo ar em todas as direções, formando uma esfera sonora que se expande a partir da fonte. Conforme essa esfera cresce, a mesma quantidade de energia sonora passa a se distribuir em uma área cada vez maior, fazendo com que o som “enfraqueça com a distância”. Esse fenômeno é descrito pela Lei do Inverso do Quadrado da Distância, um princípio bem estabelecido da acústica.

Para um profissional da saúde isso significa que, na medida em que a pessoa se afasta da fonte sonora, o nível de pressão sonora que chega aos ouvidos diminui de forma previsível. Ou seja, a cada vez que a distância dobra, o som perde aproximadamente 6 dB de intensidade. Por exemplo, se a 1 m da arma o ruído é de 160 dB, a 2 m será de aproximadamente 154 dB, a 4 m, de aproximadamente 148 dB, e assim sucessivamente.

Matematicamente, essa relação é expressa por:

$$L(d) = L_{ref} - 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{d}{d_{ref}} \right)$$

onde  $L(d)$  é o nível sonoro estimado a uma distância  $d$  da fonte,  $L_{ref}$  é o nível sonoro medido a uma distância de referência  $d_{ref}$  (geralmente 1 m, conforme padrão NIOSH), e  $\log_{10}$  é a função logaritmo decimal. O programa utilizado calcula esses fatores.

### 2.3 Banco de dados de calibres

Foram selecionados sete calibres de armas de fogo de uso comum no Brasil e no mundo, com seus respectivos valores de Nível de Pressão Sonora de pico em dB(C), medidos a 1 m da fonte conforme literatura internacional [6, 9] (Tabela 1).

Tabela 1. Calibres avaliados e seus respectivos níveis sonoros de pico.

Calibre	Categoria	NPS @ 1m [dB(C)]	Munição supersônica
.22 LR	Pistola/Rifle leve	140	Não
9 mm	Pistola	163	Sim
.40 S&W	Pistola	165	Sim
.45 ACP	Pistola	162	Não
5.56 × 45 mm	Rifle (AR-15)	167	Sim
7.62 × 51 mm	Rifle (.308 Win)	170	Sim
12 Gauge	Espingarda	161	Não

## 2.4 Cenários de exposição

Para cada calibre, foram simuladas três distâncias da fonte: 0 m (ouvido do atirador, representado computacionalmente por 0,1 m por limitação da fórmula matemática); 5 m (distância típica de instrutor ou companheiro), e 10 m (distância de espectador ou pessoa em ambiente próximo).

## 2.5 Avaliação de supressores de ruído

Foram considerados três cenários, sendo o primeiro (i) sem supressor (atenuação = 0 dB); (ii) supressor para pistola (atenuação média de 28 dB); e (iii) supressor para rifle (atenuação média de 22 dB). Estes valores correspondem à literatura técnica especializada [13, 7]. Ressalta-se que em munições supersônicas o supressor não atenua o crack balístico (onda de choque produzida pelo projétil ao romper a barreira do som), o que limita sua eficácia real.

## 2.6 Equipamentos de Proteção Individual auditivos (EPI)

Foram avaliadas quatro condições, sendo o primeiro (i) sem EPI; (ii) plug de espuma intra-auricular (NRR = 33 dB); (iii) concha abafadora circum-auricular (NRR = 27 dB); e (iv) uso combinado plug + concha (NRR combinado ≈ 36 dB, calculado conforme ISO 4869-2 [18] como o maior NRR acrescido de 5 dB) [19]. Para fins de cálculo da atenuação real em campo, aplicou-se o fator de segurança recomendado pelo NIOSH, segundo o qual a atenuação efetiva corresponde à metade do NRR nominal:

$$\text{Atenuação efetiva} = \text{NRR} \times 0,5$$

## 2.7 Critério normativo de classificação

Os valores finais de NPS no ouvido foram classificados em três categorias, tendo como referência a NR-15 Anexo II [10]:

- Dentro do limite: NPS < 130 dB(C);
- Zona de atenção: NPS entre 130 e 140 dB(C);
- Acima do limite (risco grave e iminente): NPS ≥ 140 dB(C).

## 2.8 Implementação computacional

A ferramenta foi desenvolvida em linguagem Python (versão 3.x), estruturada em módulos independentes para banco de dados, propagação, supressores, EPI, classificação normativa e geração de relatórios. As bibliotecas utilizadas foram: numpy (cálculo numérico), pandas (manipulação tabular), matplotlib (visualização) e tabulate (formatação de tabelas). O programa gera automaticamente 252 cenários (7 calibres × 3 distâncias × 3 condições de supressor × 4 condições de EPI), exportando-os em formato tabular (CSV) e gráfico (PNG) para subsidiar a interpretação clínica.

## 3. RESULTADO

### 3.1 Decaimento sonoro com a distância

A Figura 1 apresenta as curvas de propagação sonora dos sete calibres avaliados em função da distância. Observa-se claramente o efeito de atenuação natural com o aumento da distância. A 5 m, todos os calibres já apresentam redução de aproximadamente 14 dB em relação ao valor medido a 1 m; a 10 m, a redução chega a 20 dB.

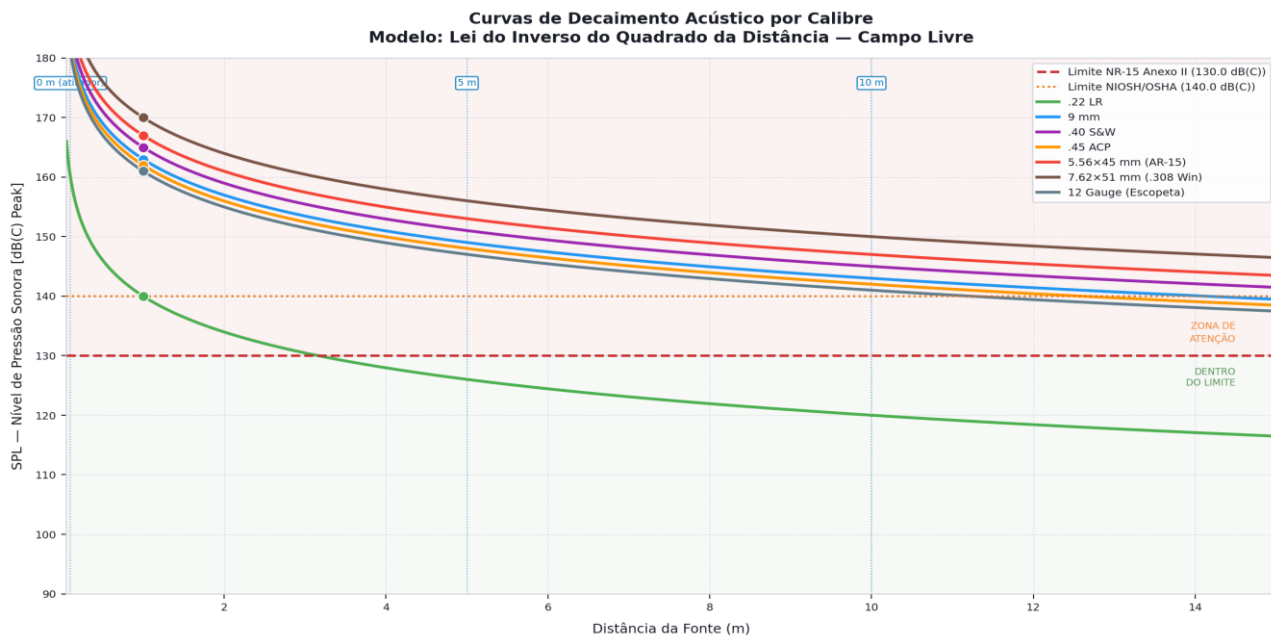


Figura 1. Curvas de decaimento acústico em função da distância para os sete calibres avaliados, em campo livre. As linhas tracejadas vermelha e amarela indicam, respectivamente, os limites da NR-15 Anexo II e do NIOSH.

### 3.2 Impacto sonoro por distância e calibre

A Figura 2 compara o NPS gerado pelos diferentes calibres nas três distâncias avaliadas, sem uso de supressor ou EPI. Mesmo a 10 m da fonte, calibres de rifle (5,56×45 mm e 7,62×51 mm) ainda apresentam valores próximos a 150 dB(C), excedendo significativamente o limite normativo.

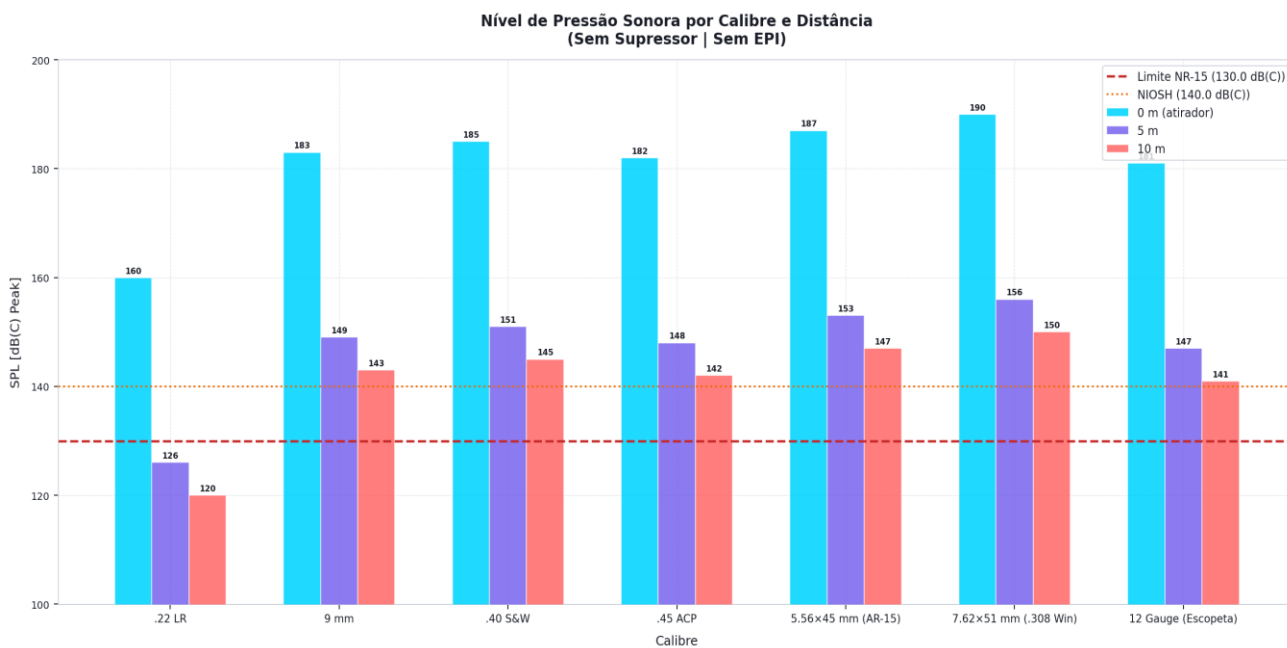


Figura 2. Nível de Pressão Sonora por calibre e distância, sem uso de supressor ou EPI.

### 3.3 Efeito dos supressores de ruído

Conforme demonstrado na Figura 3, o uso de supressores reduz significativamente o NPS de pico, com atenuações médias de 22 a 28 dB. Entretanto, mesmo com o supressor mais eficiente, todos os calibres com exceção do .22 LR ainda permanecem acima do limite NR-15 quando avaliados a 0 m da fonte (posição do atirador).

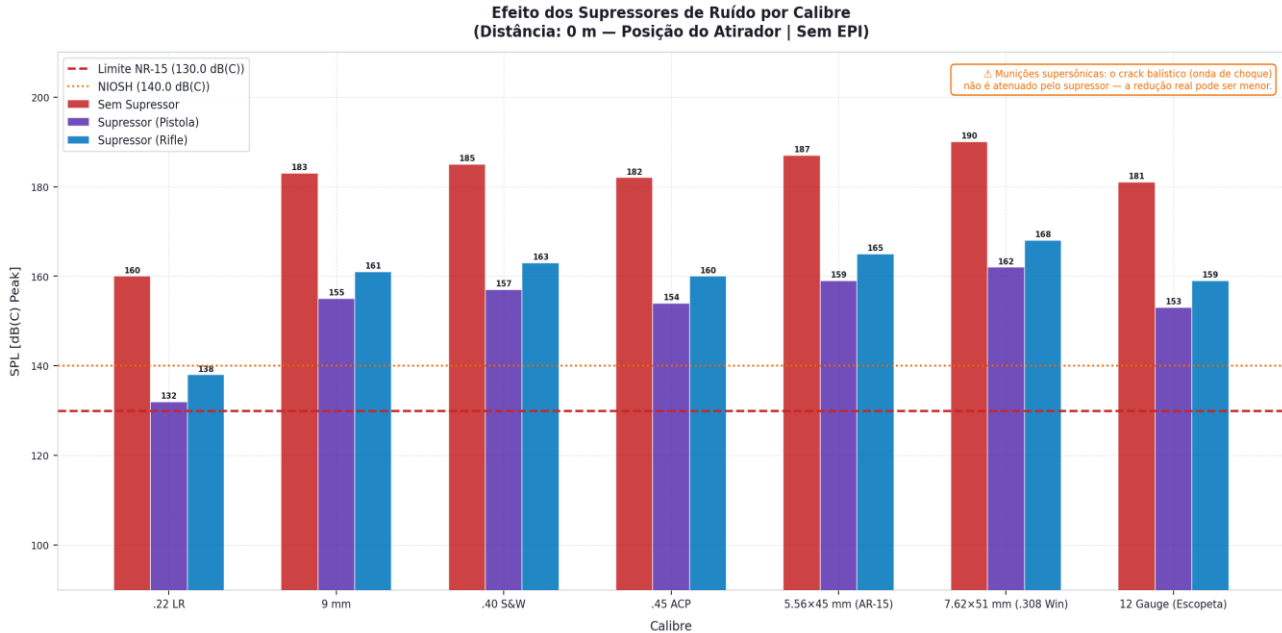


Figura 3. Efeito dos supressores de ruído sobre o NPS de pico no ouvido do atirador (distância: 0 m, sem EPI).

### 3.4 Efeito dos EPIs auditivos

A Figura 4 mostra o impacto da utilização de diferentes modalidades de EPI sobre o NPS efetivo no ouvido do atirador. A combinação plug e concha apresenta a maior atenuação, embora ainda insuficiente para trazer todos os calibres ao patamar normativo na posição do atirador.

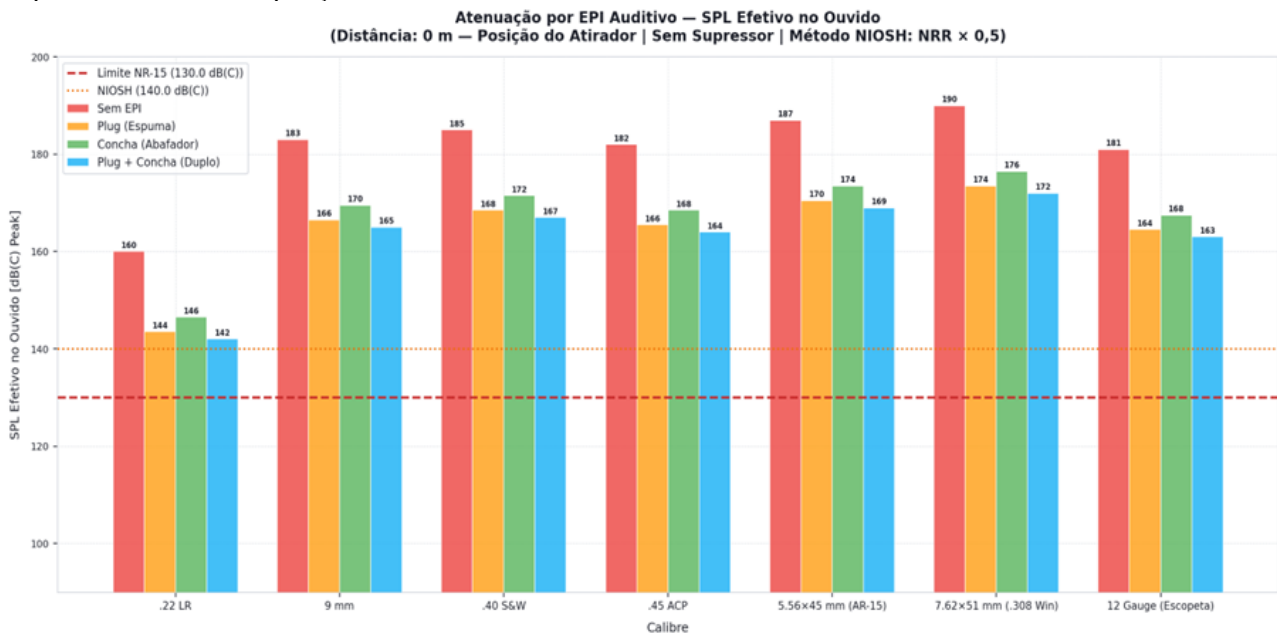


Figura 4. Atenuação por EPI auditivo segundo método NIOSH ( $NRR \times 0,5$ ), na posição do atirador (0 m), sem supressor.

### 3.5 Mapa de conformidade NR-15

A Figura 5 sintetiza, por meio de mapa de calor, a conformidade dos 84 cenários sem supressor com a NR-15 Anexo II. Verifica-se que, na posição do atirador (0 m), nenhuma combinação de EPI isoladamente é suficiente para atenuar adequadamente os calibres de pistola e rifle. À distância de 10 m, a maioria dos cenários com proteção dupla encontra-se dentro do limite normativo.



Figura 5. Mapa de calor de conformidade com a NR-15 Anexo II. Verde: dentro do limite (OK). Laranja: zona de atenção (!). Vermelho: acima do limite — risco grave e iminente (X).

### 3.6 Análise integrada para o calibre 9 mm

Como exemplo de aplicação clínica, a Figura 6 apresenta um painel integrado para o calibre 9 mm, frequentemente utilizado em treinamentos policiais e militares no Brasil. Observa-se que, mesmo a 10 m de distância e com proteção dupla, o NPS efetivo no ouvido permanece em 125 dB(C), próximo ao limite de tolerância.

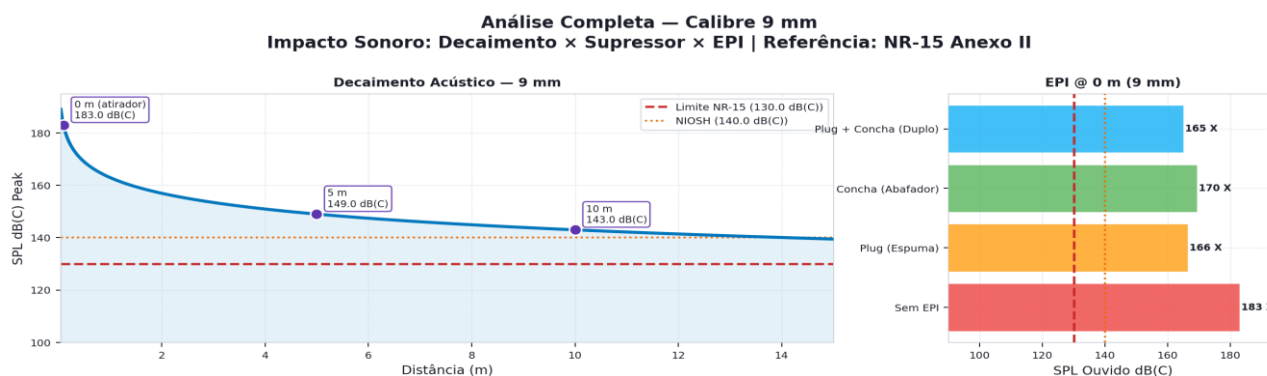


Figura 6. Análise integrada para o calibre 9 mm: decaimento e atenuação por EPI.

### 3.7 Síntese quantitativa

A Tabela 2 apresenta a síntese da conformidade normativa nos 252 cenários simulados.

Tabela 2. Síntese de conformidade com a NR-15 Anexo II (n = 252 cenários).

Condição	Dentro	Atenção	Acima
Sem EPI	28 (44,4%)	6 (9,5%)	29 (46,1%)
Plug de espuma	32 (50,8%)	22 (34,9%)	9 (14,3%)
Concha abafadora	31 (49,2%)	22 (34,9%)	10 (15,9%)
Plug + Concha (uso combinado)	38 (60,3%)	16 (25,4%)	9 (14,3%)

## 4. DISCUSSÃO

Os resultados encontrados neste estudo são consistentes com a literatura internacional, que aponta as armas de fogo como uma das principais fontes de ruído impulsivo causadoras de trauma acústico e PAIR [6, 7, 8]. Mesmo o calibre de menor intensidade avaliado (.22 LR), considerado de uso recreativo e de fácil emprego, gera, na posição do atirador, um NPS estimado de 160 dB(C), valor capaz de produzir lesão coclear imediata em exposição desprotegida.

A análise dos cenários reforça que a distância da fonte é um fator relevante, mas insuficiente isoladamente. Mesmo a 10 m, calibres de rifle ainda configuram risco grave e iminente segundo a NR-15. Esse achado é particularmente importante para os fonoaudiólogos que atuam em clubes de tiro, escolas militares e unidades policiais, pois evidencia que mesmo indivíduos não atiradores (como instrutores, observadores, acompanhantes) estão expostos a níveis perigosos de ruído.

O uso de supressores, embora eficaz na redução do NPS, apresenta limitação intrínseca para munições supersônicas, nas quais o crack balístico permanece como fonte de ruído impulsivo não mitigada (Lobarinas et al., 2022). No Brasil, ressalta-se que o uso de supressores é restrito a determinadas categorias profissionais e segue regulamentação específica. Independentemente disso, a literatura é clara ao reforçar que os supressores devem ser entendidos como medida complementar, e nunca substitutiva, à proteção auditiva por EPI [16].

A respeito dos EPI, o presente estudo confirma a recomendação NIOSH e da NHCA [19] quanto ao uso combinado plug + concha em ambientes de tiro, especialmente para pessoas sujeitas a exposição frequente. Entretanto, mesmo essa medida não garante segurança absoluta na posição do atirador para calibres de alta intensidade. Esse achado dialoga com estudos recentes que apontam que a fixação inadequada do EPI, ou seja, é o principal fator de falha na proteção auditiva real em campo [16].

Implicações para a prática fonoaudiológica. À luz dos achados, recomenda-se que o fonoaudiólogo:

- Realize avaliação audiológica admissional, periódica (anual) e demissional em populações expostas, com audiometria tonal liminar e logoaudiometria, conforme preconizado pelo Conselho Federal de Fonoaudiologia;
- Participe ativamente da elaboração e execução de Programas de Conservação Auditiva (PCA), em conformidade com as diretrizes da NR-9 e do PGR;
- Promova ações educativas continuadas sobre o uso correto, a higienização e a substituição dos EPI auditivos;
- Oriente quanto à importância do uso combinado de proteção em situações de exposição a ruído de impacto;
- Atue na detecção precoce de zumbido, hiperacusia e queixas comunicativas, sintomas frequentemente associados ao trauma acústico.

O modelo de propagação utilizado considera campo livre e não contempla efeitos de reverberação característicos de ambientes fechados (stands de tiro indoor), que podem incrementar significativamente o NPS efetivo. Além disso, valores de NRR e atenuação de supressores correspondem a médias da literatura, podendo variar conforme modelo, estado de conservação e adequação do uso. Estudos futuros podem incluir modelagem de campo semi-reverberante e medições de campo in loco.

## 5. CONCLUSÃO

A avaliação computacional do impacto sonoro de armas de fogo, integrada aos limites da NR-15 Anexo II, demonstrou que a exposição ao ruído de disparo configura risco auditivo significativo em praticamente todos os cenários avaliados na posição do atirador, independentemente do calibre. A combinação de supressores de ruído com EPI auditivos do tipo combinado (plug + concha) constitui a melhor estratégia disponível para mitigação, porém não elimina completamente o risco de trauma acústico, especialmente para calibres de rifle.

Esses resultados reforçam a centralidade do fonoaudiólogo na proteção da saúde auditiva de populações expostas a ruído impulsivo, atuando de forma preventiva, educativa e clínica. A integração entre o conhecimento técnico da acústica, da fisiologia auditiva e da legislação trabalhista constitui-se em ferramenta essencial para a redução da prevalência da PAIR e do trauma acústico no Brasil.

A ferramenta computacional desenvolvida mostrou-se útil como recurso didático e de apoio à decisão clínica, podendo ser ampliada e adaptada para diferentes contextos ocupacionais.

## 6. REFERENCES

- [1] CHADHA, S.; KAMENOV, K.; CIEZA, A. The world report on hearing, 2021. Bulletin of the World Health Organization, v. 99, n. 4, p. 242–242A, 2021. DOI: 10.2471/BLT.21.285643.
- [2] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Prevention of noise-induced hearing loss. Strategies for prevention of deafness and hearing impairment. Geneva: WHO, 1997.
- [3] AUDIOCLEAN SOLUÇÕES AUDITIVAS. Perda Auditiva Induzida por Ruído. 2013.

- [4] PAPER, I. Armas de fogo são um perigo também para a audição. Folha Vitória, 2024.
- [5] POLICLÍNICA NEUROCOR. Guia completo da perda auditiva neurossensorial: causas, sintomas e tratamentos. 2026.
- [6] MEINKE, D. K. et al. Prevention of noise-induced hearing loss from recreational firearms. *Seminars in Hearing*, v. 38, n. 4, p. 267–281, 2017. DOI: 10.1055/s-0037-1606323.
- [7] LOBARINAS, E. et al. Auditory changes following firearm noise exposure: a review. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 151, n. 3, p. 1769–1791, 2022.
- [8] AMERICAN SPEECH-LANGUAGE-HEARING ASSOCIATION (ASHA). *Recreational Firearm Noise Exposure*.
- [9] BECK, D. L.; KILLION, M. C. *Firearms and Hearing Protection*. *The Hearing Review*, 2007.
- [10] BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora NR-15 — Atividades e Operações Insalubres, Anexo II — Limites de Tolerância para Ruídos de Impacto. Brasília, 1978 (atualizações posteriores).
- [11] SISTEMA ESO. *Limites de Tolerância para Ruído Ocupacional*. 2023.
- [12] DIÁRIO DO AÇO. Armas de fogo são um perigo também para a audição.
- [13] AMERICAN SUPPRESSOR ASSOCIATION. *Hearing Protection*. 2017.
- [14] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI). ANSI S3.19-1974 — Method for the Measurement of Real-Ear Protection of Hearing Protectors and Physical Attenuation of Earmuffs. Nova York, 1974.
- [15] NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH (NIOSH). *Criteria for a Recommended Standard: Occupational Noise Exposure — Revised Criteria*. DHHS (NIOSH) Publication n. 98-126. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, 1998.
- [16] MURPHY, W. J.; MEINKE, D. K. 20Q: A Shot of Prevention — Hearing Loss from Recreational Firearm Noise. *AudiologyOnline*, Article 19626, 2016.
- [17] AUTORES DIVERSOS. Danos auditivos gerados após disparo de arma de fogo. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 11, n. 4, p. 01–16, 2025.
- [18] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 4869-2: Acoustics — Hearing protectors — Part 2: Estimation of effective A-weighted sound pressure levels when hearing protectors are worn. Genebra, 2018.
- [19] NATIONAL HEARING CONSERVATION ASSOCIATION (NHCA). *Position Statement on Recreational Firearm Noise*. 16 de março de 2017.