



## MODELAGEM FÍSICO-MATEMÁTICA DO BAROTRAUMA AUDITIVO EM VOOS COMERCIAIS

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 transporte aéreo comercial expõe passageiros a variações de pressão que podem comprometer a saúde auditiva, sendo o barotrauma da orelha média uma condição prevalente e clinicamente relevante. Este estudo integrou um bloco clínico prospectivo e transversal, com 199 passageiros brasileiros respondentes de questionário eletrônico estruturado, a um bloco de modelagem físico-matemática baseado na equação barométrica ISA, em modelo de equalização discreta da orelha média e na lei de Hagen-Poiseuille. Clinicamente, 95,5% dos participantes relataram desconforto auditivo, com predomínio de plenitude auricular (88,9%), otalgia (50,8%) e estalos (41,7%), mais prevalentes na aterrissagem (61,3%) do que na decolagem (53,9%). A presença de doença de vias aéreas superiores associou-se significativamente à otalgia. O modelo matemático demonstrou que a assimetria clínica entre as fases não é explicada pela taxa de variação de pressão, simétrica em  $\sim 130$  daPa/min, mas pelo comportamento valvular da tuba auditiva, que resulta em acúmulo de variação de pressão superior a +350 daPa na aterrissagem. A modelagem de Hagen-Poiseuille quantificou o impacto do edema de mucosa por VAS como aumento de 16 vezes na resistência tubária, oferecendo fundamento físico direto para a associação clínica observada.

**Palavras-chave:** Barotrauma auditivo; Tuba auditiva; Fenômenos de transporte; Hagen-Poiseuille; Aviação civil; Fonoaudiologia aeronáutica.

### 1. INTRODUÇÃO

O transporte aéreo comercial consolidou-se como um dos principais meios de deslocamento no século XXI, com mais de 4,5 bilhões de passageiros transportados anualmente em todo o mundo [1]. Apesar de sua relevância socioeconômica, as condições ambientais características das cabines pressurizadas (em especial a redução da pressão atmosférica e as rápidas variações de altitude durante as fases de decolagem e aterrissagem) expõem os passageiros a fenômenos físicos que podem comprometer a saúde auditiva e a qualidade da experiência de viagem [2,3].

Entre os sistemas biológicos mais suscetíveis a essas variações pressóricas destaca-se a orelha média (OM), espaço aéreo fechado situado no interior do osso temporal e comunicado com a nasofaringe pela tuba auditiva (TA). A TA desempenha papel central na homeostase pressórica da OM, atuando como válvula de equalização entre o ambiente externo e a cavidade timpânica. A mobilidade fisiológica normal da membrana timpânica tolera variações entre +50 daPa e -100 daPa. Desequilíbrios além desses limiares são suficientes para desencadear plenitude auricular, otalgia, zumbido, hipoacusia transitória e tontura [4]. Quando o mecanismo de compensação tubário é insuficiente, seja pela magnitude ou pela rapidez das variações de pressão, seja por condições que reduzam a permeabilidade luminal da TA, podem sobrevir quadros de barotite média e, em casos mais graves, barotrauma com risco de perfuração timpânica [5,6].

Do ponto de vista físico, a tuba auditiva funciona como um pequeno canal pelo qual o ar precisa circular para equilibrar a pressão entre a orelha média e a garganta. A lei de Hagen-Poiseuille (uma equação clássica da física de fluidos) descreve o quanto de ar consegue passar por um canal estreito em função da variação de pressão e, principalmente, do seu diâmetro interno [7,8]. O aspecto mais relevante dessa lei é a sua sensibilidade extrema ao diâmetro, como por exemplo, se o canal tiver seu raio interno reduzido à metade, como ocorre quando a mucosa da tuba auditiva incha durante uma inflamação das vias aéreas superiores, a resistência à passagem de ar aumenta 16 vezes. Isso significa que uma inflamação moderada pode tornar a equalização de pressão muito mais difícil.

Para a caracterização do campo de pressão ao qual os passageiros estão submetidos ao longo do voo, a Atmosfera Padrão Internacional (ISA — International Standard Atmosphere), estabelecida pela OACI, fornece a equação barométrica que descreve a variação de pressão com a altitude na troposfera [9]. Em voos comerciais, o sistema de pressurização mantém a cabine em pressão equivalente à de aproximadamente 2.438 m ( $\sim 8.000$  pés) acima do nível do mar, redução de aproximadamente 25% em relação à pressão basal [2,10]. Essa diferença é imposta gradualmente durante

a subida e descida, gerando uma taxa de variação de pressão ( $dP/dt$ ) que constitui o principal estímulo mecânico sobre o sistema tímpano-ossicular.

Do ponto de vista epidemiológico, os sintomas auditivos em passageiros de voos comerciais são frequentes e clinicamente relevantes. Stangerup et al. [11] observaram pressão negativa na OM em 20% dos adultos e 40% das crianças após voos comerciais. Ahmed et al. [3] e Wright [5] descrevem o *airplane ear* como condição amplamente subestimada, porém prevalente e passível de prevenção. A presença de doenças de VAS é apontada como fator de risco consistente para o agravamento dos sintomas [6,12]. Ryan et al. [12], em revisão sistemática, destacaram ausência de consenso quanto à superioridade entre as diferentes manobras de equalização, sinalizando necessidade de fundamentação física mais rigorosa para orientar recomendações clínicas.

Não obstante a relevância do tema, observa-se na literatura lacuna expressiva quanto à integração entre dados epidemiológicos de população civil e modelos físico-matemáticos quantitativos dos fenômenos de transporte envolvidos. Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo desenvolver um modelo físico-matemático simplificado, baseado na equação barométrica ISA, em modelo de equalização discreta da TA e na lei de Hagen-Poiseuille, para descrever quantitativamente a variação de pressão na orelha média durante voos comerciais e correlacionar os parâmetros físicos obtidos com dados clínicos de sintomas auditivos coletados prospectivamente em 199 passageiros brasileiros.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia deste estudo foi estruturada em dois blocos complementares. Um Bloco Clínico, referente à coleta de dados junto a passageiros de voos comerciais, e um Bloco de Modelagem Física, no qual foram desenvolvidos os modelos matemáticos de fenômenos de transporte aplicados ao sistema auditivo.

### 2.1 Coleta de Dados com Passageiros

#### 2.1.1 Delineamento e Participantes

Trata-se de um estudo de caráter quantitativo e transversal. Os dados clínicos foram coletados por meio de questionário eletrônico estruturado, desenvolvido na plataforma Google Forms e divulgado em redes sociais entre janeiro e abril de 2025. Foram incluídos indivíduos de ambos os sexos, com idades entre 18 e 60 anos, sem histórico autorreferido de doenças otológicas crônicas ou cirurgia prévia no ouvido. O estudo foi aprovado pelo CEP-UFCSA sob parecer nº 7.328.052. O tamanho amostral foi estimado com base em prevalência de 20% de alteração auditiva pós-voos [11], intervalo de confiança de 95% e margem de erro de 14%, resultando em  $n = 199$  participantes.

#### 2.1.2 Instrumento de Coleta

O questionário abrangeu variáveis sociodemográficas (sexo, faixa etária), frequência de viagens aéreas, presença de doença de VAS no dia do voo, ocorrência e tipo de desconforto auditivo, momento do voo em que os sintomas ocorreram, estratégias de alívio utilizadas e impacto percebido dos sintomas na experiência de viagem, avaliado em escala de 1 a 5.

#### 2.1.3 Análise Estatística

Os dados foram compilados no Microsoft Excel e analisados no IBM SPSS Statistics v25.0. As associações entre variáveis categóricas foram verificadas pelos testes Qui-Quadrado e Exato de Fisher, adotando-se  $\alpha = 0,05$ . Os resultados foram expressos em frequência absoluta e relativa.

## 2.2 Fenômenos de Transporte

O modelo físico foi inteiramente implementado em Python (v3.12), com as bibliotecas NumPy, Pandas e Matplotlib. Optou-se por formulações matemáticas simplificadas, baseadas em cálculos passo a passo sobre intervalos de tempo discretos, o que permitiu representar adequadamente os fenômenos físicos sem recorrer a ferramentas matemáticas mais complexas.

### 2.2.1 Perfil de Pressão de Cabine – Equação Barométrica ISA

A variação de pressão atmosférica com a altitude foi descrita pela equação barométrica ISA [9]. Para a troposfera (0–11.000 m):

$$P(h) = P_0 \left( 1 - \frac{L \cdot h}{T_0} \right)^{\frac{g \cdot M}{R \cdot L}}$$

onde  $P(h)$  representa a pressão atmosférica na altitude  $h$ ,  $P_0$ , a pressão ao nível do mar,  $L$ , o gradiente térmico troposférico,  $T_0$ , a temperatura ao nível do mar,  $g$ , a aceleração da gravidade,  $M$ , a massa molar do ar, e por fim,  $R$ , a constante universal dos gases. Os valores para cada um dos parâmetros adotados estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de pressão calculados pelo modelo ISA

Parâmetro	Valor
Pressão atmosférica na altitude $h$ ( $P(h)$ )	[Pa]
Pressão ao nível do mar ( $P_0$ )	101.325 Pa
Gradiente térmico troposférico ( $L$ )	0,0065 K/m
Temperatura a nível do mar ( $T_0$ )	288,15 K
Aceleração gravitacional ( $g$ )	9,81 m/s <sup>2</sup>
Massa molar do ar ( $M$ )	0,028964 kg/mol
Constante universal dos gases ( $R$ )	8,314 J/(mol . K)
Altitude equivalente da cabine	2.438 m (~8.000 pés)

Em termos práticos, à medida que a aeronave sobe, a pressão do ar diminui. Embora a aeronave atinja altitudes de cruzeiro entre 9.000 e 12.000 metros, o sistema de pressurização mantém a cabine em uma pressão equivalente à altitude de aproximadamente 2.438 m (~8.000 pés), redução de 25,7% em relação ao nível do mar, correspondendo a uma queda de 2.607 daPa. É essa diferença que o organismo precisa compensar ao longo do voo.

O perfil temporal da cabine foi modelado em três fases lineares sobre uma janela de 120 minutos (voo doméstico típico):

- **Decolagem (0–20 min):** pressão de cabine decresce linearmente até o nível de cruzeiro;
- **Cruzeiro (20–100 min):** pressão de cabine constante (~7.526 daPa);
- **Aterrissagem (100–120 min):** pressão de cabine cresce linearmente até o nível do solo.

### 2.2.2 Taxa de Variação de Pressão ( $dP/dt$ )

A taxa de variação de pressão de cabine ao longo do tempo (grandeza central do estudo, pois é ela que força ou não a abertura da tuba auditiva) foi calculada numericamente comparando os valores de pressão em instantes consecutivos de tempo, uma abordagem simples que estima a velocidade de mudança da pressão sem necessidade de ferramentas matemáticas avançadas:

$$\left. \frac{dP}{dt} \right|_i \approx \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{2 \cdot \Delta t}$$

onde  $P_i$  é a pressão de cabine no instante  $i$  e  $\Delta t=0,5$  minuto é o passo de tempo adotado. O resultado é expresso em daPa/min, unidade conveniente para comparação com os limiares fisiológicos da membrana timpânica. Em outras palavras, a taxa de variação de pressão ( $|dP/dt|$ ) mede a velocidade com que a pressão muda dentro da cabine. Quanto maior esse valor, menor o tempo disponível para que a tuba auditiva equalize a pressão da orelha média, aumentando o risco de sintomas.

### 2.2.3 Modelo de Equalização Discreta da Orelha Média

A pressão na orelha média ( $P_{OM}$ ) foi modelada por atualização discreta, reproduzindo a abertura intermitente da tuba auditiva por deglutição (frequência: 1 vez/min para indivíduos acordados [4,5]):

$$P_{OM}^{(i)} = P_{OM}^{(i-1)} + \eta \cdot [P_{cab}^{(i)} - P_{OM}^{(i-1)}]$$

$$\eta \begin{cases} 1,00 & \text{se } P_{cab} < P_{OM} \text{ (decolagem - pressão positiva)} \\ 0,30 & \text{se } P_{cab} > P_{OM} \text{ (aterrissagem - pressão negativa)} \end{cases}$$

Essa assimetria reproduz o comportamento fisiológico da TA como válvula unidirecional preferencial [5,6], explicando por que, apesar da taxa de variação de pressão ( $|dP/dt|$ ) ser semelhante nas duas fases (129 e 131 daPa/min, respectivamente), a aterrissagem gera maior acúmulo de diferencial de pressão na orelha média e, conseqüentemente, mais sintomas (61,3% vs. 53,9%).

O diferencial de pressão resultante na orelha média é então:

$$\Delta P_{OM}(t) = P_{cab}(t) - P_{OM}(t)$$

Os limiares fisiológicos adotados para definição de risco sintomático foram, com base na literatura clínica audiológica [4]:

- $\Delta P_{OM} < -50$  daPa  $\rightarrow$  risco de plenitude auricular e otalgia (decolagem)
- $\Delta P_{OM} > +100$  daPa  $\rightarrow$  risco de otalgia intensa e barotrauma (aterrissagem)

#### 2.2.4 Resistência da Tuba Auditiva – Lei de Hagen-Poiseuille

Para modelar o efeito das doenças de VAS, foi aplicada a lei de Hagen-Poiseuille, que descreve matematicamente como o ar flui através de um tubo estreito (como a tuba auditiva) em função do diferencial de pressão, comprimento e raio interno [7,8]:

$$R_{HP} = \frac{8 \cdot \mu \cdot L_{TA}}{\pi \cdot r^4}$$
$$Q = \frac{\Delta P}{R_{HP}} = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot \mu \cdot L_{TA}}$$

onde  $R_{HP}$  se trata da resistência ao escoamento,  $Q$  representa o fluxo volumétrico de ar necessário para equalizar um dado diferencial de pressão,  $\mu$  representa a viscosidade do ar a 37°C,  $L_{TA}$ , o comprimento médio da tuba auditiva, e por fim,  $r$ , o raio luminal da tuba. O valor adotado para a viscosidade do ar foi de  $1,87 \times 10^{-5}$  Pa·s, já o comprimento médio da tuba auditiva, 35mm. Foram modelados dois cenários, um com a tuba normal ( $r = 2$  mm) e tuba congestionada por VAS ( $r = 1$  mm).

O ponto central desta modelagem reside na dependência de  $R_{HP}$  com a quarta potência do raio. Isso significa que reduzir o raio ao meio (como ocorre com edema de mucosa) não duplica a resistência, ela aumenta  $2^4=16$  vezes. Esse resultado oferece fundamento físico direto para a associação estatística observada nos dados clínicos entre doença de VAS e otalgia ( $p=0,031$ ), com prevalência de 77,8% nos passageiros com VAS contra 48,1% naqueles sem a condição.

Para verificar se a lei de Hagen-Poiseuille era aplicável às condições físicas da tuba auditiva, avaliou-se o regime de escoamento do ar por meio de um parâmetro adimensional denominado número de Reynolds, que é um indicador que distingue escoamentos suaves (laminares) de escoamentos turbulentos (caóticos):

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

onde  $Re$  se trata do número de Reynolds,  $\rho$  representa a massa específica,  $v$ , a velocidade característica do escoamento,  $D$ , o diâmetro característico, e  $\mu$ , a viscosidade dinâmica.

O cálculo mostrou que, nas condições de pressão clinicamente relevantes (diferenciais entre 50 e 400 daPa), o escoamento de ar na tuba opera em regime turbulento nos dois cenários avaliados. Isso significa que a lei de Hagen-Poiseuille é utilizada aqui como uma aproximação para estimar a resistência relativa entre os dois cenários, e não como uma descrição exata do escoamento. Contudo, o resultado central, o aumento de 16 vezes na resistência quando o raio é reduzido à metade, decorre da estrutura matemática da lei ( $R_{HP} \propto r^{-4}$ ) e permanece válido como estimativa, independentemente do tipo de escoamento.

### 3. RESULTADO

#### 3.1 Bloco Clínico – Caracterização da Amostra e Sintomas

##### 3.1.1 Perfil dos Participantes

Os dados coletados a partir do questionário geraram uma amostra composta por 199 participantes, sendo predominante participantes do sexo feminino (85,4%) e na faixa etária entre 18 e 40 anos (84,4%), conforme a Tabela 2. A maioria (63,3%) também relatou viajar menos de cinco vezes ao ano.

Tabela 2. Distribuição dos participantes segundo faixa etária

Faixa etária	n	%
18 – 40 anos	168	84,4%
40 – 60 anos	28	14,1%
60 anos ou mais	3	1,5%
Total	199	100%

Dentre os participantes, 95,5% relataram algum tipo de desconforto auditivo. A plenitude auricular foi o sintoma mais prevalente (88,9%), seguida por otalgia (50,8%), estalos (41,7%), zumbido (30,7%), cefaleia (24,1%), tontura (16,6%) e enjoo (14,6%). Quanto à distribuição temporal dos sintomas ao longo do voo, 53,9% dos participantes relataram desconforto durante a decolagem, 42,9% durante o voo pleno e 61,3% durante a aterrissagem, dados que encontram correspondência direta com os parâmetros físicos obtidos no Bloco de Modelagem Física. A Figura 1 detalha a prevalência dos principais sintomas discriminados por fase do voo.

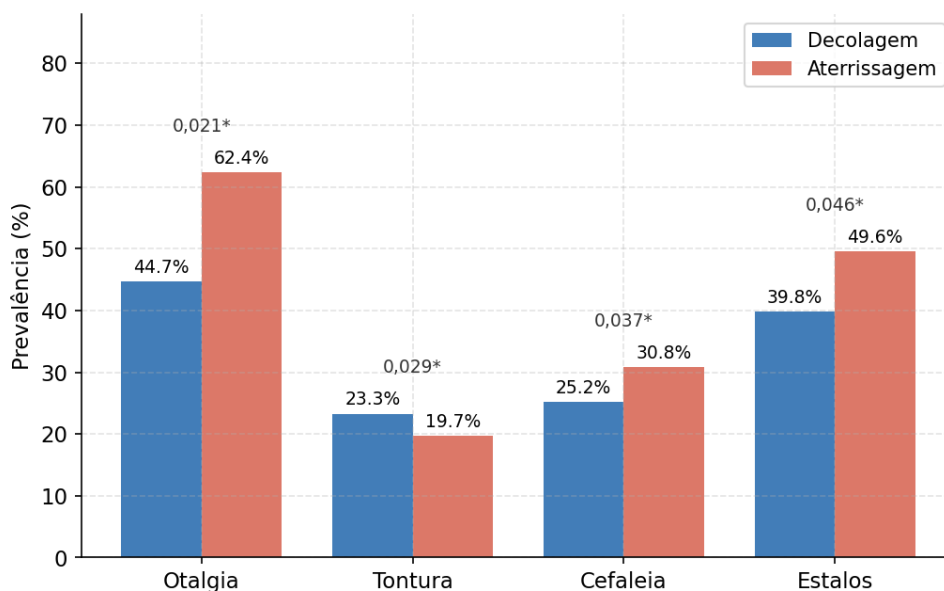


Figura 1. Prevalência dos sintomas auditivos por fase do voo (decolagem vs. aterrissagem).

A análise estatística revelou associações significativas entre a fase de aterrissagem e os sintomas de otalgia ( $p = 0,021$ ), cefaleia ( $p = 0,037$ ) e estalos ( $p = 0,046$ ). Notavelmente, a tontura apresentou maior prevalência na decolagem (23,3%) em relação à aterrissagem (19,7%), com diferença estatisticamente significativa ( $p = 0,029$ ), sugerindo envolvimento vestibular associado às acelerações lineares características da subida. O predomínio de otalgia, cefaleia e estalos na aterrissagem (a fase de maior acúmulo de diferencial de pressão na orelha média, conforme demonstrado no Bloco de Modelagem Física) é coerente com o comportamento fisiológico assimétrico da tuba auditiva como válvula unidirecional.

Em relação ao impacto percebido dos sintomas na experiência de viagem, avaliado em escala de 1 a 5, 28% dos participantes indicaram impacto parcial (nível 3), enquanto 31% reportaram impacto significativo ou total (níveis 4 e 5). Apenas 19% indicaram ausência de impacto (nível 1), evidenciando que os sintomas auditivos, embora transitórios, constituem fator relevante na qualidade da experiência de voo para a maioria dos passageiros (Figura 2).

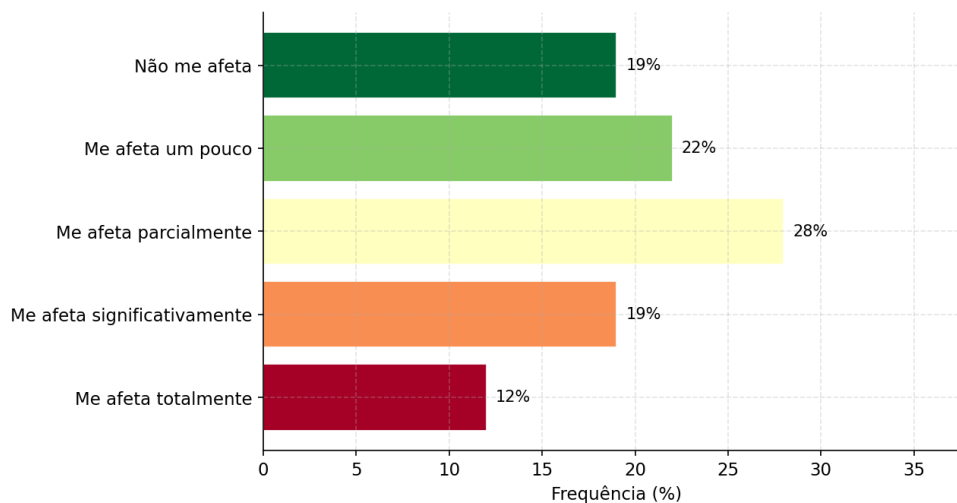


Figura 2. Distribuição do impacto percebido dos sintomas auditivos na experiência de viagem, em escala de 1 (não me afeta) a 5 (me afeta totalmente). n = 199.

Observou-se associação estatisticamente significativa entre a presença de doença de vias aéreas superiores (VAS) no dia do voo e a ocorrência de otalgia ( $p = 0,031$ ). Passageiros com VAS apresentaram prevalência de otalgia de 77,8%, contra 48,1% naqueles sem a condição, conforme sintetizado na Tabela 3. Essa diferença de 29,7 pontos percentuais encontra fundamento físico direto na modelagem de Hagen-Poiseuille apresentada na Seção 3.2, que demonstra um aumento de 16 vezes na resistência ao escoamento de ar pela tuba auditiva em condição de edema de mucosa por VAS. Os demais sintomas (plenitude auricular, zumbido, tontura, enjoo, cefaleia e estalos) não apresentaram associação estatisticamente significativa com a presença de VAS, embora indivíduos com a condição tenham relatado com maior frequência múltiplos sintomas simultâneos.

Tabela 3. Associação entre sintomas auditivos e presença de doença de vias aéreas superiores (VAS) no dia do voo. Teste Qui-Quadrado; \*  $p < 0,05$ .

Sintoma	Com VAS (n=18)	Sem VAS (n=181)	p-valor
Otalgia	77,8%	48,1%	0,031*
Plenitude auricular	77,8%	90,1%	0,120
Zumbido	44,4%	29,3%	0,288
Tontura	22,2%	16,0%	0,508
Cefaleia	27,8%	23,8%	0,773
Estalos	55,6%	40,3%	0,318

Por fim, 99% dos participantes relataram resolução completa dos sintomas após o pouso, e apenas 1,5% afirmaram ter deixado de viajar de avião em razão dos sintomas, embora 10,6% tenham cogitado essa possibilidade. As estratégias de alívio mais relatadas foram mascar chiclete (63,4%), manobra de Valsalva (31,9%) e deglutição ativa (19,4%).

## 3.2 Bloco de Modelagem Física

### 3.2.1 Perfil de Pressão de Cabine e Orelha Média

A aplicação da equação barométrica ISA ao perfil temporal de um voo doméstico típico de 120 minutos gerou o campo de pressão de cabine ilustrado na Figura 3. Durante a decolagem (0–20 min), a pressão decresceu de 10.132 daPa (nível do mar) até o valor de cruzeiro de aproximadamente 7.526 daPa, equivalente à altitude de 2.438 m (~8.000 pés) sendo uma redução de 25,7% (2.607 daPa) em relação à pressão basal. Durante o cruzeiro (20–100 min), a pressão de cabine manteve-se constante. Na aterrissagem (100–120 min), o processo foi invertido, com restabelecimento da pressão ao nível do solo.

O modelo de equalização discreta da orelha média (OM), com eficiência  $\eta = 1,00$  na decolagem e  $\eta = 0,30$  na aterrissagem, reproduziu o comportamento fisiológico assimétrico da tuba auditiva. Durante a decolagem, a abertura passiva da tuba (favorecida pela pressão positiva na OM em relação à nasofaringe) permite equalização eficiente, mantendo o diferencial de pressão ( $\Delta P_{OM}$ ) dentro do limiar de segurança (-50 daPa). Durante a aterrissagem, entretanto, a resistência da porção cartilaginosa da tuba à passagem de ar no sentido nasofaringe à OM resulta em acúmulo progressivo de diferencial positivo, ultrapassando o limiar clínico de +100 daPa e atingindo valores superiores a +350 daPa no modelo, com padrão oscilatório característico das deglutições discretas. Esse resultado modela quantitativamente a maior prevalência clínica de otalgia, cefaleia e estalos na aterrissagem (61,3%) em comparação à decolagem (53,9%).

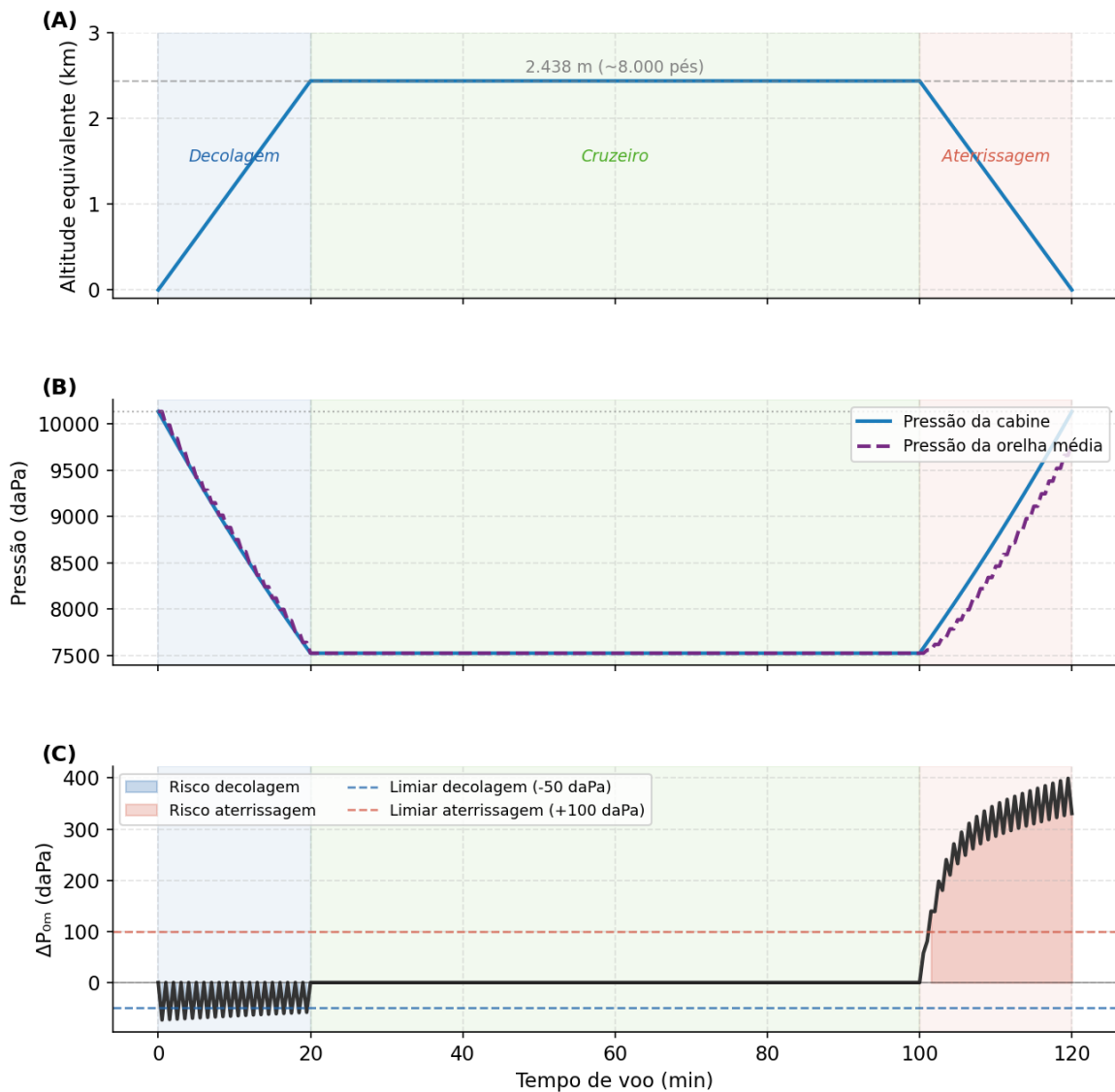


Figura 3. Perfil de pressão durante voo doméstico típico de 120 minutos. (A) Altitude equivalente de cabine. (B) Pressão de cabine (linha sólida) e pressão modelada na orelha média (linha tracejada). (C) Diferencial de pressão na orelha média ( $\Delta P_{OM}$ ), com limiares fisiológicos de risco para decolagem (-50 daPa, linha azul) e aterrissagem (+100 daPa, linha vermelha). Zonas sombreadas indicam períodos de risco sintomático.

### 3.2.2 Taxa de Variação de Pressão (dP/dt)

O cálculo numérico da taxa de variação de pressão de cabine pelo método das diferenças finitas centradas revelou o perfil ilustrado na Figura 4. Durante a decolagem, a taxa de variação de pressão  $|dP/dt|$  atingiu valores entre -115 e -150 daPa/min, com média absoluta de 128,9 daPa/min. Durante o cruzeiro, a taxa foi praticamente nula (média de 0,4 daPa/min). Na aterrissagem, a taxa de variação de pressão  $|dP/dt|$  médio foi de 130,7 daPa/min, ligeiramente superior ao da decolagem.

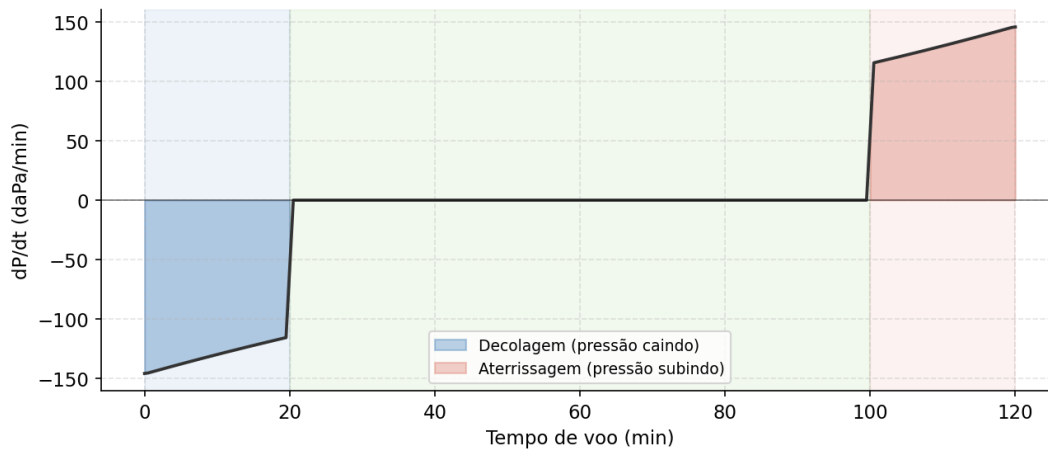


Figura 4. Taxa de variação de pressão de cabine ( $dP/dt$ ) ao longo do tempo de voo, calculada pelo método das diferenças finitas centradas ( $\Delta t = 0,5$  min). Valores negativos indicam queda de pressão (decolagem); valores positivos indicam elevação (aterrissagem).

A Figura 5 correlaciona a taxa de variação de pressão  $|dP/dt|$  médio por fase com a prevalência clínica de sintomas auditivos observada no Bloco Clínico. A correspondência entre as magnitudes da taxa de variação de pressão  $|dP/dt|$  nas fases de decolagem e aterrissagem ( $\sim 129$  e  $\sim 131$  daPa/min, respectivamente) e as prevalências clínicas de 53,9% e 61,3% não pode ser explicada apenas pela taxa de variação de pressão, uma vez que os valores são praticamente simétricos. O diferencial de prevalência entre as duas fases (7,4 p.p.) é atribuído, pelo modelo, à assimetria fisiológica da tuba auditiva ( $\eta = 1,00$  na decolagem vs.  $\eta = 0,30$  na aterrissagem), que resulta em maior acúmulo de  $\Delta P_{OM}$  durante a descida mesmo sob estímulo pressórico equivalente. O voo pleno, com  $|dP/dt| \approx 0,4$  daPa/min, apresentou a menor prevalência de sintomas (42,9%), consistente com a ausência de estímulo pressórico dinâmico significativo nessa fase.

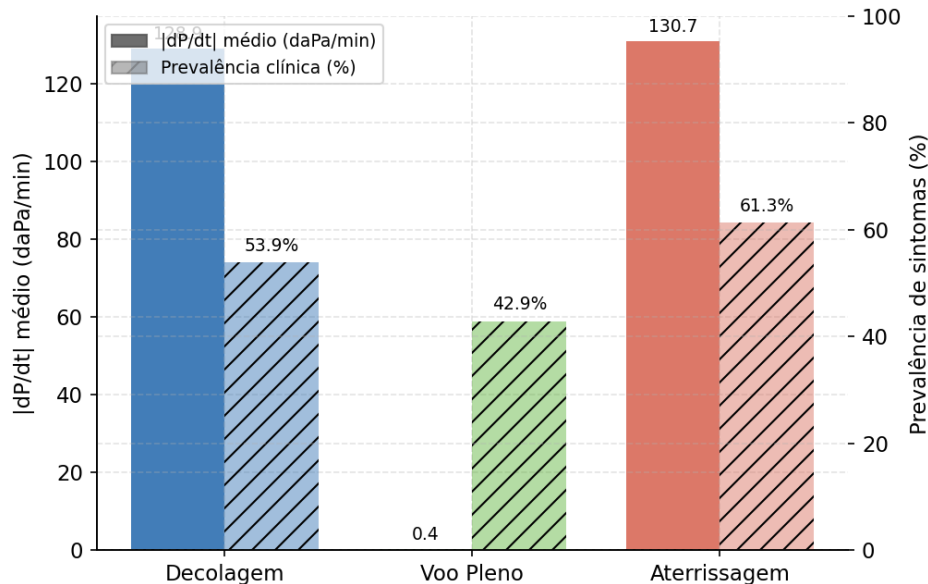


Figura 5. Comparação entre a taxa de variação de pressão  $|dP/dt|$  médio por fase de voo (barras sólidas, eixo esquerdo) e a prevalência clínica de sintomas auditivos observada (barras hachuradas, eixo direito). A assimetria entre decolagem e aterrissagem nas prevalências, não refletida na simetria do  $|dP/dt|$ , é explicada pelo comportamento valvular da tuba auditiva.

### 3.2.3 Modelagem de Hagen-Poiseuille da Tuba Auditiva

A aplicação da lei de Hagen-Poiseuille à tuba auditiva, modelada como tubo cilíndrico de comprimento  $L_{TA} = 35$  mm e viscosidade dinâmica do ar  $\mu = 1,87 \times 10^{-5}$  Pa·s, gerou os resultados apresentados nas Figuras 6 e 7. Para a tuba normal ( $r = 2$  mm), a resistência ao escoamento calculada foi  $R_{HP} = 1,04 \times 10^5$  Pa·s/m<sup>3</sup>. Para a tuba congestionada por VAS ( $r = 1$  mm), a resistência elevou-se para  $R_{HP} = 1,67 \times 10^6$  Pa·s/m<sup>3</sup>, correspondendo a um fator de aumento de 16 vezes, conforme previsto pela relação  $R_{HP} \propto r^{-4}$  (redução do raio ao meio eleva a resistência por um fator de  $2^4 = 16$ ).

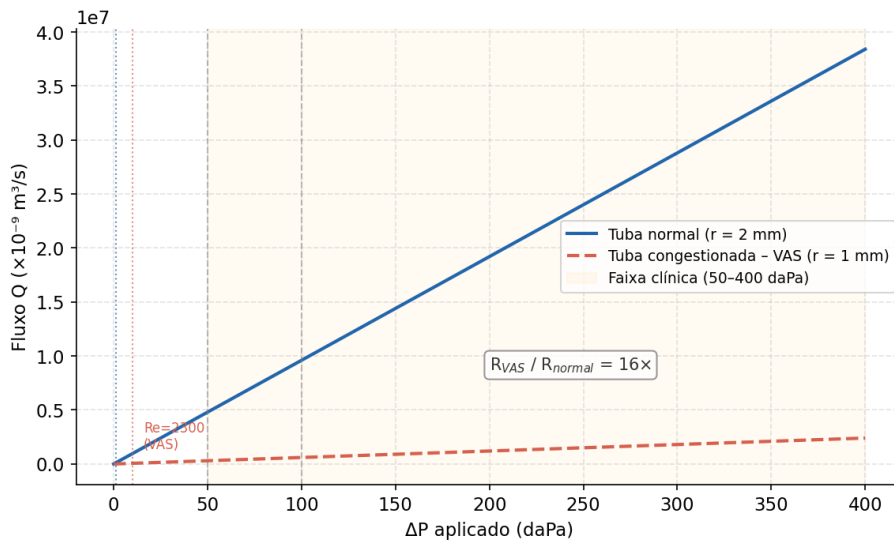


Figura 6. Fluxo volumétrico  $Q$  em função do diferencial de pressão aplicado  $\Delta P$ , conforme a lei de Hagen-Poiseuille, para tuba normal ( $r = 2$  mm, linha sólida azul) e tuba congestionada por VAS ( $r = 1$  mm, linha tracejada vermelha). A faixa clínica de diferenciais de pressão de interesse (50–400 daPa) está sombreada. A linha pontilhada vertical vermelha indica o limiar de transição para regime turbulento ( $Re = 2.300$ ) no cenário VAS.

A Figura 6 evidencia que, para um mesmo diferencial de pressão aplicado, a tuba congestionada conduz um fluxo aproximadamente 16 vezes menor do que a tuba normal, demandando diferenciais de pressão proporcionalmente maiores para manter a equalização. Em termos práticos, nas condições de pressão clinicamente relevantes para o barotrauma auditivo, a tuba normal ainda consegue manter fluxo de ar suficiente para equalizar a pressão, enquanto a tuba congestionada apresenta capacidade de escoamento drasticamente reduzida. A lei de Hagen-Poiseuille é empregada aqui como uma estimativa da resistência relativa entre os dois cenários, e o resultado central, o aumento de 16 vezes na resistência quando o diâmetro da tuba é reduzido à metade, permanece válido como referência mecanicista (decorrente de  $R_{HP} \propto r^{-4}$ ), independentemente das características exatas do escoamento.

A Figura 7 correlaciona as resistências calculadas com os dados clínicos de prevalência de otalgia segundo presença ou ausência de VAS. O aumento de 16 vezes na resistência tubária associado ao edema de mucosa por VAS corresponde, nos dados clínicos, a uma diferença de 29,7 pontos percentuais na prevalência de otalgia (77,8% com VAS vs. 48,1% sem VAS,  $p = 0,031$ ). A congruência entre a previsão do modelo físico (maior resistência implica maior dificuldade de equalização e, portanto, maior  $\Delta P_{OM}$  residual) e o achado clínico estatisticamente significativo confere suporte quantitativo à recomendação de evitar voos durante episódios de VAS aguda.

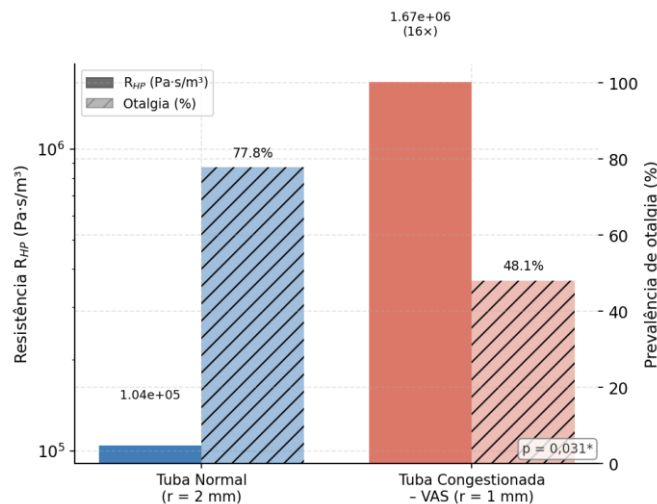


Figura 7. Resistência de Hagen-Poiseuille ( $R_{HP}$ , barras sólidas, eixo esquerdo em escala logarítmica) e prevalência clínica de otalgia (barras hachuradas, eixo direito) para os cenários de tuba normal ( $r = 2$  mm) e tuba congestionada por VAS ( $r = 1$  mm). O aumento de 16 $\times$  na resistência corresponde à associação clínica significativa entre VAS e otalgia ( $p = 0,031$ ).

Os parâmetros centrais do modelo físico estão consolidados na Tabela 4 para referência.

Tabela 4. Parâmetros do modelo de Hagen-Poiseuille e correspondentes dados clínicos de otalgia por condição tubária.  
 \*  $p < 0,05$ .

Parâmetro	Tuba Normal ( $r = 2 \text{ mm}$ )	Tuba VAS ( $r = 1 \text{ mm}$ )	Razão
Resistência $R_{HP}$ ( $\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ )	$1,04 \times 10^5$	$1,67 \times 10^6$	$16\times$
Re crítico ( $\Delta P$ limiar turbulência)	$\Delta P \approx 1,25 \text{ daPa}$	$\Delta P \approx 9,96 \text{ daPa}$	—
Prevalência clínica de otalgia	48,1%	77,8%	+29,7 p.p.
Significância estatística (p)	—	—	0,031*

Em conjunto, os resultados dos dois blocos demonstram que os parâmetros físicos derivados do modelo, com taxa de variação de pressão ( $|dP/dt|$ ), diferencial de pressão residual na orelha média ( $\Delta P_{OM}$ ) e resistência tubária ( $R_{HP}$ ), são quantitativamente consistentes com as associações clínicas observadas na amostra de 199 passageiros, fornecendo fundamentação mecanicista para a maior prevalência de sintomas na aterrissagem e para o papel agravante das doenças de VAS sobre a otalgia em voos comerciais.

#### 4. CONCLUSÃO

O presente estudo integrou, de forma inédita para a população civil brasileira, um bloco clínico prospectivo com 199 passageiros e um bloco de modelagem físico-matemática baseado na equação barométrica ISA, no modelo de equalização discreta da orelha média e na lei de Hagen-Poiseuille, permitindo correlacionar quantitativamente os parâmetros físicos do ambiente de cabine com os sintomas auditivos observados.

Do ponto de vista clínico, os achados confirmam que os sintomas auditivos durante voos comerciais são altamente prevalentes (95,5%), predominantemente autolimitados e concentrados nas fases de decolagem e aterrissagem. A aterrissagem revelou-se a fase mais sintomática, com maior prevalência de otalgia, cefaleia e estalos, e associação estatisticamente significativa para todos esses sintomas. A presença de doença de vias aéreas superiores no dia do voo foi o único fator clínico associado significativamente à otalgia ( $p = 0,031$ ), com prevalência de 77,8% nos passageiros afetados contra 48,1% nos demais, diferença de 29,7 pontos percentuais com relevância prática direta para orientação preventiva.

Do ponto de vista da modelagem física, o modelo demonstrou que a taxa de variação de pressão  $|dP/dt|$  médio é praticamente simétrico entre decolagem e aterrissagem ( $\sim 129$  e  $\sim 131$  daPa/min, respectivamente), de modo que a taxa de variação de pressão isoladamente não explica a assimetria clínica observada entre as duas fases. Essa assimetria é adequadamente reproduzida pelo modelo de equalização discreta com eficiência tubária diferenciada ( $\eta = 1,00$  na decolagem vs.  $\eta = 0,30$  na aterrissagem), que simula o comportamento fisiológico valvular da tuba auditiva e resulta em acúmulo de  $\Delta P_{OM}$  significativamente maior durante a descida, ultrapassando o limiar clínico de +100 daPa e atingindo valores superiores a +350 daPa no modelo. A aplicação da lei de Hagen-Poiseuille quantificou o impacto do edema de mucosa por VAS como aumento de 16 vezes na resistência ao escoamento tubário (decorrente de  $R_{HP} \propto r^{-4}$ ), oferecendo fundamento físico rigoroso e algebricamente independente do regime de escoamento para a associação clínica observada entre VAS e otalgia.

A convergência entre as previsões do modelo e os dados clínicos coletados prospectivamente constitui a principal contribuição do estudo, sendo ela que, os três parâmetros físicos centrais ( $|dP/dt|$ ,  $\Delta P_{OM}$  e  $R_{HP}$ ) são quantitativamente consistentes com as associações estatísticas observadas, validando a abordagem de fenômenos de transporte como ferramenta interpretativa para sintomas auditivos em aviação civil. Esse tipo de fundamentação mecanicista é relevante não apenas para a fonoaudiologia aeronáutica, mas também para subsidiar com maior rigor as recomendações sobre manobras de equalização e restrições de voo em pacientes com doenças obstrutivas das vias aéreas superiores, área em que, conforme apontado por Ryan et al. [12], ainda persiste ausência de consenso na literatura.

Como limitações do estudo, destacam-se o delineamento transversal e a coleta por conveniência via redes sociais, que resultaram em amostra predominantemente feminina e jovem, potencialmente não representativa de todos os perfis de passageiros. O modelo físico, por sua vez, adota uma geometria simplificada da tuba auditiva e parâmetros médios fixos, sem capturar a variabilidade anatômica individual nem os efeitos dinâmicos de um escoamento real. A lei de Hagen-Poiseuille foi aplicada como uma aproximação qualitativa, válida para estimar a proporção de aumento de resistência entre os dois cenários, sendo reconhecida como simplificação do comportamento real do escoamento nesse contexto.

Estudos futuros poderão aprimorar o modelo incorporando geometria tubária real obtida por imageamento, simulações de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) e variabilidade individual dos parâmetros de equalização, além de ampliar a coleta clínica para amostras probabilísticas e estratificadas por sexo, faixa etária e condição de saúde. A integração entre modelagem físico-matemática e dados clínicos prospectivos, na linha do que foi proposto neste trabalho, representa caminho promissor para o desenvolvimento de diretrizes baseadas em evidências para a fonoaudiologia e a medicina aeronáutica.

## 5. ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been partially funded by the Brazilian agencies CAPES and CNPq.

## 6. REFERENCES

- [1] International Air Transport Association (IATA). IATA Annual Review 2023. Montreal: IATA; 2023. Disponível em: <https://www.iata.org/en/publications/annual-review>
- [2] Pisano A. Physics for Anesthesiologists: From Daily Life to the Operating Room. Cham: Springer; 2017.
- [3] Ahmed RM, Elbadawy A, Aly NM. Airplane ear: a neglected yet preventable problem. Egypt J Otolaryngol. 2019;35:343–8.
- [4] Barbiani R, et al. Tratado de Audiologia. 3ª ed. São Paulo: Manole; 2022. v.1, p.50–60.
- [5] Wright T. Middle-ear pain and trauma during air travel. BMJ Clin Evid. 2015:0501.
- [6] O'Neill JO, Brett K, Frank AJ. Ear barotrauma. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK499851/>
- [7] Bird RB, Stewart WE, Lightfoot EN. Transport Phenomena. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 2007.
- [8] White FM. Fluid Mechanics. 8th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2016.
- [9] International Civil Aviation Organization (ICAO). Manual of the ICAO Standard Atmosphere. Doc 7488/3. 3rd ed. Montreal: ICAO; 1993.
- [10] Krebs JM, Sgarabotto AR, Castro JC. Barotrauma otológico na aviação. Acta Med (Porto Alegre). 2013;34:13–7.
- [11] Stangerup SE, Tos M, Arnbjerg J, Vinten G, Caye-Thomsen P, Charabi S. Point prevalence of barotitis in children and adults after flight. J Laryngol Otol. 1998;112(4):323–9.
- [12] Ryan P, Treble A, Patel N, Jufas N. Prevention of otic barotrauma in aviation: a systematic review. Otol Neurotol. 2018;39(5):539–49.
- [13] Russo ICP, Santos TM. A Prática da Audiologia Clínica. 4ª ed. São Paulo: Cortez; 2001.
- [14] Helfenstein JE. Medicina Aeronáutica. 3ª ed. São Paulo: ASA; 2012.
- [15] Al-Qahtani AS, et al. Assessment of knowledge regarding airplane ear preventive measures among air travelers in Saudi Arabia. Cureus. 2024;16(4):e59431.