

Estudo e Desenvolvimento de um Modelo das Transferências Gasosas na Orelha Média Humana

Leonardo Pereira de Paula, Laboratório de Engenharia Térmica e Ambiental, Escola Politécnica, USP
e-mail: leonardo.paula@poli.usp.br

Jurandir Itizo Yanagihara, Laboratório de Engenharia Térmica e Ambiental, Escola Politécnica, USP,
e-mail: jurandir.yanagihara@poli.usp.br

Introdução

No ouvido humano ocorrem transferências gasosas (de massa) que têm importante papel para o seu correto funcionamento, como por exemplo, evitar infecções na orelha média (Sadé, Ar, 1997).

Algumas situações do cotidiano, como viagens de avião, viagens em serras, montanhas, mergulhos em piscinas ou oceanos, que passam por grandes variações de pressão ou altitude em pouco tempo, afetam o processo natural de transferência gasosa no ouvido e em outras partes do corpo. Algumas patologias também afetam as transferências gasosas no ouvido, como sinusite, otite e gripe.

Com o foco na aviação, este trabalho tem o objetivo de desenvolver um modelo matemático das transferências gasosas que ocorrem no ouvido humano para prever se a curva de pressão de um determinado voo causará desconforto ou dor nos ouvidos dos passageiros. Obviamente, as características fisiológicas variam muito entre as pessoas, de forma que é muito difícil obter uma condição de conforto para todos os passageiros de um avião. Entretanto, pode-se garantir conforto para um determinado percentual dos passageiros.

Anatomia e Fisiologia

Para o desenvolvimento do modelo matemático é preciso ter um conhecimento detalhado da anatomia e da fisiologia do ouvido humano. A Figura 1 esquematiza o ouvido humano e deve ser consultada para um melhor entendimento do texto explicativo.

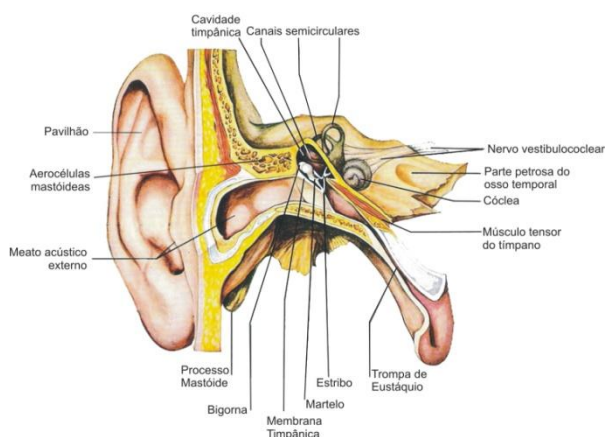


Figura 1: Figura esquemática do ouvido humano

O ouvido humano geralmente é dividido em três partes principais, a orelha externa, a orelha média e a orelha

interna. A orelha externa é simplesmente a parte do ouvido formada pelo pavilhão e pelo meato acústico externo. A membrana timpânica faz a separação entre a orelha externa e a orelha média. Percebe-se então que o contato da membrana timpânica com o ar externo é direto. Assim, nota-se que a pressão do lado externo da membrana timpânica é a mesma à do ambiente que envolve o ser humano. No caso em estudo, trata-se da pressão de cabine do avião.

A orelha média é a principal parte do ouvido que será estudada neste trabalho. Ela pode ser subdividida em duas partes principais. Uma delas é a que contém os ossículos do ouvido (martelo, bigorna e estribo) que são os responsáveis pela transmissão do som desde a membrana timpânica até a janela oval da orelha interna. A outra parte é o complexo de inúmeras células de ar conhecido como sistema de aerocélulas mastóideas. As principais transferências gasosas do ouvido humano ocorrem na orelha média, daí a sua importância. Ela troca gás basicamente de três formas distintas. A primeira delas, a mais importante, é a que ocorre através da trompa de Eustáquio. Como pode ser observada na Figura 1, a trompa de Eustáquio é um órgão tubular que permite que haja fluxo de ar e outros fluidos, entre a orelha média e a nasofaringe. Porém, a parte da Trompa de Eustáquio que é próxima a nasofaringe permanece a maior parte do tempo fechada, pois existem forças musculares na parte externa à trompa que a mantém fechada. Entretanto, a freqüente contração de um músculo, o tensor do véu palatino, faz com que a trompa seja aberta por, aproximadamente, 0,2 segundos. E essa contração ocorre involuntariamente a cada 60 a 120 segundos (Sadé, Ar, 1997). A segunda forma de troca gasosa que ocorre na orelha média é a difusão dos gases através das paredes vasculares que irrigam a superfície da orelha média em sua mucosa. A terceira forma de troca gasosa é também por difusão, porém, na superfície do sistema de aerocélulas mastóideas revestidas pela mucosa. Geralmente, a superfície total deste sistema é muito maior do que a superfície da cavidade timpânica. A orelha interna tem a função de converter os impulsos mecânicos de propagação do som em sinais elétricos que são enviados ao cérebro. Assim, a orelha interna não é importante neste estudo.

Modelo Matemático

Como visto, há três principais formas de transferência gasosa na orelha média. Um modelo mais simplificado foi desenvolvido considerando apenas a transferência gasosa através da Trompa de Eustáquio, ver Figura 2.

Pretende-se dar continuação ao trabalho adicionando ao modelo os outros dois tipos de transferência gasosa.

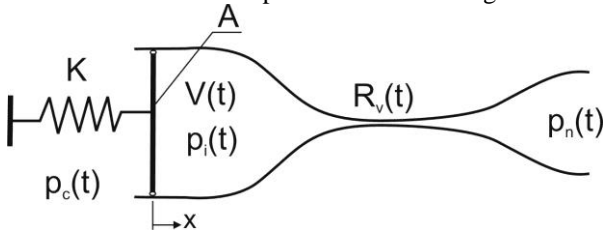


Figura 2: Modelo de troca gasosa da orelha média através da trompa de Eustáquio.

Este modelo considera a cavidade timpânica como uma cavidade de ar tendo de um lado a membrana timpânica e, do outro lado, a trompa de Eustáquio. A membrana timpânica foi modelada por uma placa rígida circular de área constante, conectada a uma mola de constante elástica K . A trompa de Eustáquio foi modelada como uma válvula que, enquanto fechada não permite o fluxo de ar entre a cavidade timpânica e a nasofaringe. A nasofaringe é modelada como sendo simplesmente o meio externo ao ouvido humano, pois, a pressão na nasofaringe é muito próxima da pressão externa, ou seja, da pressão de cabine.

O equacionamento do modelo foi realizado com o objetivo de obter uma equação que relaciona a deformação da membrana timpânica com a variação da pressão de cabine e parâmetros fisiológicos do ouvido. Através das equações de balanço de massa, de força e de estado do ar, chegou-se à seguinte equação diferencial ordinária temporal:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{K}{A \cdot R_v(t)} \cdot \left(\frac{A \cdot p_c(t)}{K} - (x(t) - x_0) \right) \cdot (x(t) - x_0) - (V_0 - A \cdot (x(t) - x_0)) \cdot \frac{dp_c(t)}{dt} - \frac{V_0 \cdot K}{A} \cdot 2 \cdot K \cdot (x(t) - x_0) - A \cdot p_c(t) - \frac{V_0 \cdot K}{A}$$

onde x é o deslocamento da membrana timpânica, K é a constante elástica, R_v é a resistência ao escoamento da trompa de Eustáquio, p_c é a pressão de cabine e V_0 é o volume inicial da cavidade timpânica.

Resultados

A equação acima foi resolvida numericamente através do método de Runge-Kutta de 4ª ordem. Para empregar este método desenvolveu-se um programa em linguagem C++.

Os parâmetros necessários para a solução da equação foram encontrados na literatura (Cheng et al., 2007; Fay et al., 2005; Kanick, Doyle, 2005; Sadé, Ar, 1997). Porém, alguns dos principais parâmetros não estão bem definidos na literatura. Dessa forma, utilizou-se de análise paramétrica para a solução do modelo. A Tabela 1 contém os valores dos parâmetros que foram utilizados nas simulações.

Tabela 1: Valores médios dos parâmetros

Parâmetro	Valor	Unidades
V_0	8,75	ml
A	0,6	cm ²
K	500	N/m
R_v fechada	10^{10}	Pa*s/m ³
R_v aberta	10^3	Pa*s/m ³

Para comparação de resultados, foram utilizadas duas curvas reais de pressão de cabine. A Figura 3 mostra a primeira curva e a Figura 4 mostra a segunda curva.

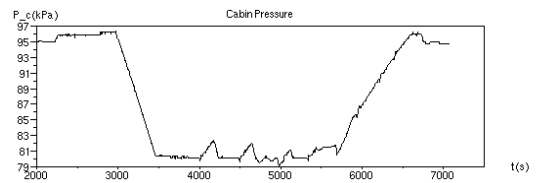


Figura 3: Curva de pressão de cabine 1.

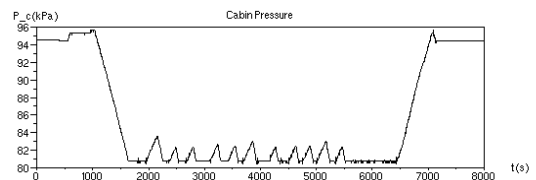


Figura 4: Curva de pressão de cabine 2.

O gráfico da Figura 5 mostra a deformação da membrana timpânica para essas duas curvas de pressão.

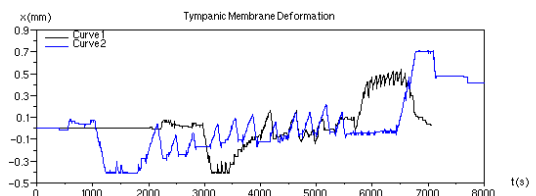


Figura 5: Deformação da membrana timpânica para as curvas de pressão de cabine.

Conclusões

A Figura 5 mostra que a deformação da membrana timpânica é maior nos estágios de subida e de descida da aeronave. Além disso, nota-se que no estágio de descida da segunda curva de pressão a deformação da membrana timpânica é maior do que na primeira curva. Isso ocorre porque a taxa de variação de altitude (ou de pressão) no estágio de descida da segunda curva é maior do que na primeira curva. Assim, conclui-se que quanto maior a taxa de variação de pressão na cabine maior será a deformação da membrana timpânica e, maior o desconforto.

Referências Bibliográficas

- Cheng, T., Dai, C., Gan, R. Z., 2007, "Viscoelastic properties of human tympanic membrane", *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 35, No. 2, pp. 305-314.
- Fay, J., Puria, S., Decraemer, W. F., Steele, C., 2005, "Three approaches for estimating the elastic modulus of the tympanic membrane", *J. Biomech.* 38(9):1807-1815.
- Kanick, S. C., Doyle, W. J., 2005, "Barotrauma during air travel: predictions of a mathematical model", *J. Appl. Physiol.*, vol. 98, pp. 1592-1602.
- Sadé, J., Ar, A., 1997, "Middle ear and auditory tube: middle ear clearance, gas exchange, and pressure regulation", *Otolaryngol Head and Neck Surg*, vol. 116, pp. 499-524.