

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Instituto de Física

Curso de Licenciatura em Física

**Um modelo físico simples para a
descrição do funcionamento das pregas vocais**

Raquel da Luz Gottardo de Lima

Orientador:

Vitorvani Soares

Rio de Janeiro
Agosto de 2016

L6286m Lima, Raquel da Luz Gottardo de
Um modelo físico simples para a descrição do funcionamento das pregas vocais / Raquel da Luz Gottardo de Lima. – Rio de Janeiro: UFRJ/IF, 2016.
vii, 17 f. : il. ; 30 cm.
Orientador: Vitorvani Soares.
Trabalho de final de Curso – UFRJ / Instituto de Física / Licenciatura em Física, 2016.
Referências Bibliográficas: f. 24.
1. Ensino de Física. 2. Acústica. 3. Oscilação. I. Soares, Vitorvani. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Licenciatura em Física. III. Título.

Dedico este trabalho ao meu avô Luis Manuel Alvarez Gonzalez, por quem fui criada sem nunca medir esforços para me proporcionar amor, carinho e cuidado. Sua curiosidade e interesse pela ciência sem dúvida me divertiram, conquistaram e influenciaram a trilhar as escolhas que fiz. Tenho muito orgulho de ser neta, mesmo sem laços de sangue, de alguém tão trabalhador e empenhado.

Agradecimentos

Agradeço a Deus que sempre esteve comigo, mesmo quando percebi o quanto podia ser difícil ter fé. Sua força e seu cuidado nunca me desampararam, então insisto o prossigo em conhecer a Ele; À minha mãe Nair que me apoia e me ajuda em todos os momentos; À minha irmã Luciene e ao meu cunhado Márcio, com quem em vários momentos, pude conversar, aprender, trocar ideias, ir a museus e ambientes de pesquisa; Ao meu professor Vitorvani, com quem pude aprender conceitos de física ondulatória e foi responsável pela orientação deste trabalho. Ao meu esposo Mauro com quem posso conversar e aprender, a ele que me apoia e me motiva.

O conhecimento exige uma presença curiosa do sujeito em face do mundo. Requer uma ação transformadora sobre a realidade. Demanda uma busca constante. Implica em invenção e em reinvenção.

PAULO FREIRE

Resumo

As cordas vocais são uma estrutura de suma importância para o homem. Através de sua atividade a comunicação humana pode se estabelecer de forma precisa e inteligível, uma vez que sua performance versátil é fundamental na produção da fala. As aplicações que envolvem o estudo dessa estrutura são variadas devido à sua importância. No presente trabalho descrevemos e analisamos o funcionamento das cordas vocais em um contexto interdisciplinar, em acordo com as sugestões dos Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio. Apresentamos um modelo para descrever o movimento realizado por cada prega vocal explorando somente as noções de base aprendidas nas aulas de introdução à física ondulatória.

Sumário

1	Introdução	8
2	A produção de som pelas pregas vocais	10
3	Aplicações do estudo das cordas vocais	12
4	Modelo físico para o movimento oscilatório das cordas vocais	13
5	Considerações finais	17
	Referências	18

1 Introdução

A fala e a linguagem verbal tornam o homem um ser visivelmente privilegiado em relação aos demais seres vivos. As cordas vocais são, sem dúvida, uma das estruturas mais importantes para a comunicação entre os seres humanos. Componente do sistema fonador, esse par de músculos também denominados de pregas vocais, pela falta de semelhança com as cordas de um instrumento musical, são responsáveis pela produção do som. O estudo dessa estrutura pela Física mostra-se natural, entretanto, não se pode ignorar o aspecto interdisciplinar dessa pesquisa, uma vez que ela se refere ao corpo humano.

Como mencionado nos Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio, as disciplinas não se diluem para um estudo, mas sim se reúnem a fim de compreender as causas diversas de um fenômeno, sendo respeitada a individualidade de cada uma. Cada disciplina, então deve utilizar uma linguagem adequada para a formação de conhecimentos relevantes para um assunto. Ao pesquisarmos, na literatura destinada aos alunos do ensino médio, livros didáticos de física que tratam do tema, com o intuito de sabermos quais informações esses estudantes tem acesso através desse tipo de material, encontramos dois livros que apresentam o assunto de forma conceitual e motivadora para o estudo de sons. No livro de Máximo e Alvarenga (2011) encontramos o seguinte texto com o título “A fala humana”:

A voz emitida pelo ser humano tem sua origem nas vibrações de duas membranas, denominadas pregas vocais (figura V-a), que estão dispostas na posição mostrada na figura V-b.

As pregas vocais entram em vibração quando o ar, proveniente dos pulmões, é forçado a passar pela fenda existente entre elas. Podemos controlar a frequência do som que emitimos, modificando a tensão nas pregas vocais. As vibrações dessas cordas são comunicadas ao ar existente nas diversas cavidades da boca, da garganta e do nariz e aos músculos próximos a elas. A combinação de todas essas vibrações determina o timbre da voz, que é característico de cada pessoa.

No livro de Pietrocola et al. (2010) a abordagem do tema é mais detalhada:

(...) Um sopro é produzido pelos pulmões quando estes se dilatam e se comprimem pela ação do diafragma, impelindo e depois expelindo o ar. Esse ar passa pela traqueia e pela laringe, que são basicamente tubos, e daí segue para as cavidades bucal e nasal. Na laringe, estão alojadas as chamadas pregas vocais, que são pregas (membranas) situadas ao longo de suas paredes laterais.

Se as pregas vocais estão relaxadas, o ar pode passar sem emitirmos nenhum som. Para isso, as pregas vocais são tensionadas e alteradas na espessura, de tal forma que fecham a passagem do ar. O ar pressionado expelido pelo pulmão passa entre as pregas vocais, provocando nelas uma vibração. Os sons agudos são obtidos com as pregas vocais bem tensas e afiladas. Já as pregas vocais pouco tensas e mais espessas produzem sons graves.

As cavidades ressonantes, isto é, faringe, a boca, a cavidade nasal e até a caixa torácica, amplificam e modulam as vibrações e assim produzimos o som. Elas também determinam o timbre final do som emitido. Isso possibilita que as

vozes de diferentes pessoas possam ser caracterizadas e reconhecidas. Particularmente, a influência da ressonância na cavidade nasal pode ser verificada falando-se com o nariz tampado ou quando se está resfriado. (...) Alguns sons, como os sibilantes, os guturais e mesmo alguns cochichos são emitidos sem o uso das cordas vocais. Nesse último caso, evidencia-se bem a função produtora de som das cavidades aéreas superiores.

Nos textos encontrados, percebemos que são utilizados dois termos diferentes para designar a estrutura a qual estamos nos referindo: cordas vocais e pregas vocais. Essa controvérsia nos leva naturalmente a refletir se esse componente do sistema fonador poderia ser comparado a cordas vibrantes. Ao levantar esta questão, nada mais lógico do que utilizar os conceitos aprendidos numa aula de física sobre uma corda vibrante para analisarmos se a estrutura vibrante que utilizamos na produção da fala pode ou não ser comparada a uma corda tensionada.

Neste trabalho, buscamos compreender o funcionamento das cordas vocais e propomos justamente um modelo de corda vibrante, a partir da pesquisa dos parâmetros necessários ao mesmo, para descrever o funcionamento dessa estrutura, a fim de analisarmos essa analogia.

2 A produção de som pelas pregas vocais

Ao inspirarmos, as cordas vocais encontram-se relaxadas e formam uma fenda triangular chamada de glote, dessa forma o ar pode chegar aos pulmões. A voz é produzida quando o diafragma expelle o ar dos pulmões para fora e o cérebro comanda o fechamento da glote forçando o ar sob determinada pressão, a passar pelo estreito espaço entre as cordas vocais, fazendo-as vibrar, isso gera ondas sonoras que passam por um sistema de amplificadores, formados pelos pulmões, laringe, faringe, boca, nariz e por cavidades de ressonância presentes nos ossos da face e nos seios paranasais.



Figura 1. – Localização das cordas vocais (OLIVEIRA, 2013).

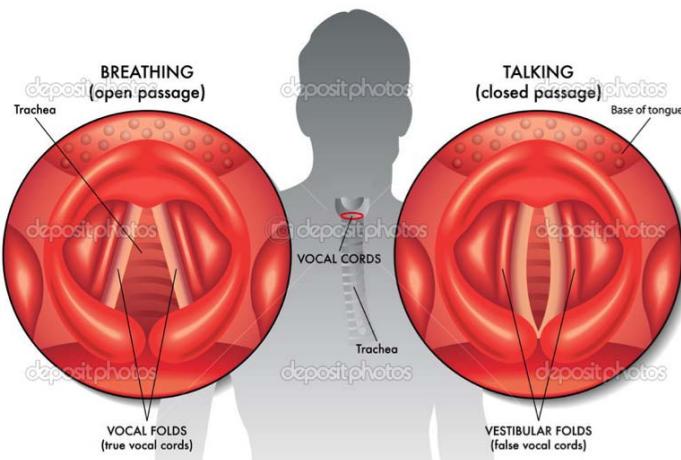


Figura 2. – À esquerda: as cordas vocais durante a respiração, relaxadas e abertas. À direita: as cordas vocais formando uma pequena fenda durante a fala.

O canto é sem dúvida uma habilidade que torna o sistema fonador humano um instrumento impressionante. Nele, as cordas vocais são ajustadas para atingir comprimento e tensão necessários para que determinada frequência seja cantada. Para se obter tons agudos é preciso um aumento de tensão das cordas vocais, as quais ficam mais alongadas. Mas esses sons também podem ser obtidos através da diminuição do diâmetro faríngeo e pela subida da laringe. Já os sons graves são obtidos através do encurtamento das cordas vocais.

Há vários mecanismos envolvidos na modificação da frequência da voz, sendo os principais o comprimento, a massa e a tensão das pregas vocais, durante a vibração. Quanto mais as pregas vocais forem alongadas, mais rápido se realizarão os ciclos glóticos e mais aguda será a frequência produzida. Em contrapartida, quanto maior for a massa das pregas vocais a ser colocada em vibração, menos ciclos glóticos serão realizados, agravando a frequência. Logo, quanto maior for a tensão das pregas vocais, mais rápidos serão os ciclos e mais aguda será a frequência produzida 2,3,34,39 (FINGER; CIELO, 2007).

As cordas vocais abrem e fecham num movimento tão rápido que sua percepção não é possível a olho nu. Elas vibram em frequências diferentes em cada indivíduo. Nas crianças o movimento é de mais de 250 vezes por segundo, nos homens o movimento passa a ser de cerca de 110 vezes por segundo e nas mulheres entre 200 e 300 vezes por segundo. Para que haja vibração das cordas vocais são necessárias forças de abertura e de fecho, a primeira é proveniente da pressão subglótica e as responsáveis pelo fechamento decorrem da elasticidade das cordas vocais e do efeito Bernoulli.

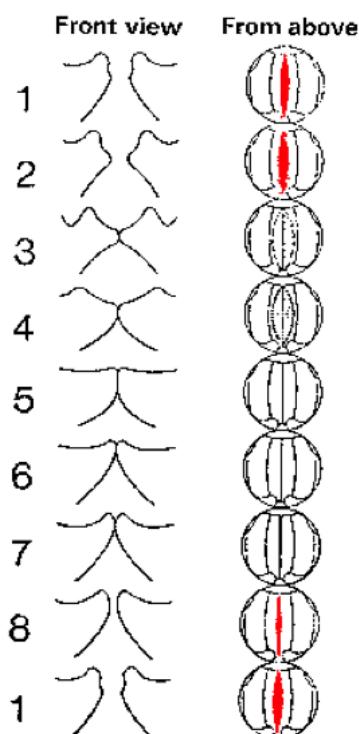


Figura 3. – Abertura e fechamento das cordas vocais.

3 Aplicações do estudo das cordas vocais

A compreensão do funcionamento das cordas vocais torna-se importante devido ao seu grande número de aplicações. Lesões nessa área podem gerar inúmeras patologias, as quais são provocadas principalmente pelo uso inadequado da voz, entre elas, nódulos, úlceras e até mesmo câncer. Elas ocorrem principalmente naqueles indivíduos que necessitam utilizar a voz com mais frequência como cantores, professores e oradores. Segundo Bojorquez et al. (2013), materiais sintéticos estão sendo pesquisados com o intuito de tratar esses tipos de lesões. Além disso, a construção de sistemas produtores de voz artificial oferece significativo aumento na qualidade de vida de pessoas com deficiência na fala. O próprio Dr. Stephen Hopkins utiliza um sistema o qual lê as movimentações de suas bochechas para escolher sentenças preparadas com antecedência. Esse tipo de tecnologia requer um banco de dados gerado. Estudos atuais tentam criar uma laringe artificial que possa ser programada para produzir o som da fala.

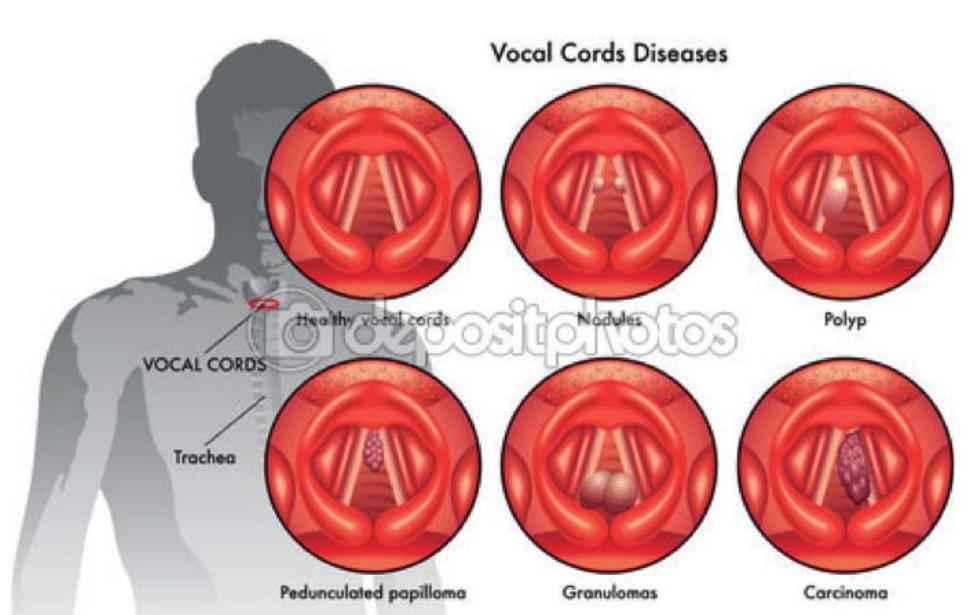


Figura 4. – Doenças nas cordas vocais. Da esquerda para a direita de cima para baixo: cordas vocais saudáveis; nódulos; pólipo; papiloma pedunculado; granulomas; carcinoma (câncer).

Além das aplicações citadas, utilizar a linguagem matemática para descrever fenômenos nos permite aprimorar nossos conhecimentos a cerca do que está em nosso mundo, ao nosso lado, em frente aos nossos olhos. Se o elemento escrita é o marco que separa a Pré-história da História, se tal elemento nos possibilitou estabelecer uma comunicação mais eficiente que a transmissão de ideias entre gerações por meio da fala, não podemos deixar de mencionar como qualquer tipo de código representativo seja ele matemático ou uma língua escrita nos ajuda a compreender e interpretar fenômenos, situações, vivências e acontecimentos. Conhecer nosso corpo e descrevê-lo através de vários tipos de linguagens nos permite acumular saberes que a seu tempo serão úteis.

4 Modelo físico para o movimento oscilatório das cordas vocais

O termo pregas vocais tem sido utilizado, como dissemos anteriormente, pela falta de semelhança desse par de músculos com as cordas de um instrumento musical. Façamos então, um modelo simples de comparação entre as pregas vocais e duas cordas oscilando paralelamente para analisarmos quais comparações podemos fazer.

Ao observarmos as cordas vocais em movimento, vemos estruturas que se assemelham a duas cordas com extremidades fixas oscilando. Quando observamos uma das pregas vemos:

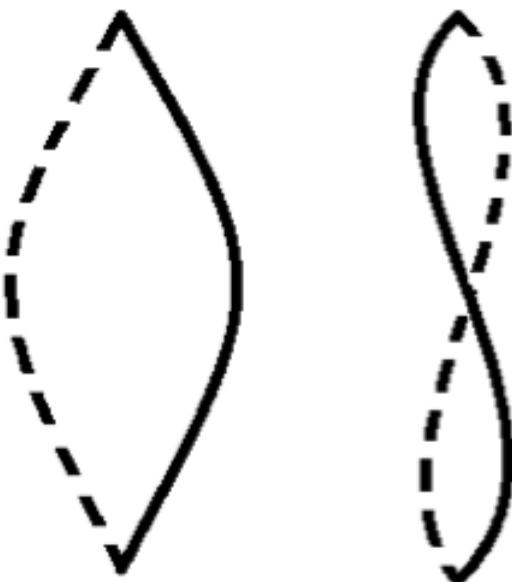


Figura 5. – À esquerda: Movimento descrito por uma prega vocal numa frequência f_1 . À direita: Movimento descrito por uma prega vocal numa frequência $f_2 > f_1$.

Consideremos então cada prega vocal uma corda vibrante de comprimento finito l , presa nas duas extremidades, pontos fixos $x = 0$ e $x = l$, esticada por uma tensão constante T . A densidade linear dessa corda será considerada uniforme, dada por $\mu = dm/dx$.

Como mostrado por Lagrange em 1759, uma corda pode ser considerada como caso limite de N osciladores acoplados, igualmente espaçados pelo comprimento l , de massa $\mu l/N$. Os modos normais, desse modelo de vibração tendem aos das corda, quando $N \rightarrow \infty$. Temos N modos normais de vibração transversal na direção y , para N osciladores acoplados, Se $N \rightarrow \infty$ obtemos infinitos modos normais. A frequência do modo n é dada por:

$$f_n = n \frac{V}{2l} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4.1)$$

ou

$$f_n = n f_1 \quad (n = 2, 3, \dots). \quad (4.2)$$

Como $V = \sqrt{T/\mu}$, temos a freqüência fundamental dada por

$$f_1 = \frac{c}{2l} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T}{\mu}}. \quad (4.3)$$

Sendo $\mu = m/l$, onde μ é a densidade linear da corda, m sua massa em e l o comprimento da corda.

Nessa expressão a frequência fundamental f_1 é: inversamente proporcional ao comprimento da onda; proporcional à raiz quadrada da tensão; inversamente proporcional à raiz quadrada da densidade linear de massa da corda. Leis essas que corroboram experimentalmente com as leis das cordas vibrantes por Mersenne em 1636.

No artigo original, *Correlação entre a altura e as dimensões das pregas vocais* (FILHO et al., 2003), encontramos um estudo de 2001 que nos fornece algumas dimensões das cordas vocais para homens e mulheres, esse estudo foi feito para “avaliar a existência de correlação entre as características dos indivíduos estudados como altura, peso e idade com as dimensões macroscópicas da porção membranosa das pregas vocais”:

Os estudos em cadáveres humanos, desde as detalhadas descrições de Andreas Vesalius na primeira metade do século XIV, têm nos ajudado a melhor compreender o corpo humano. (...). Após o nascimento, ocorrem diversas modificações nas configurações geométricas de todo o trato vocal. O comprimento da porção membranosa das pregas vocais quase duplica no primeiro ano de vida, atingindo, na idade adulta, 11,5 a 16 mm no homem e 8,0 a 11,5 mm na mulher.

(…)

Podemos concluir que houve correlação entre a altura e o comprimento das pregas vocais e não houve correlação da altura com a largura ou com a espessura das pregas vocais. Não encontramos correlação das dimensões das pregas vocais com o peso ou com a idade dos indivíduos. Observamos diferença estatística entre as pregas vocais de homens e mulheres quanto ao comprimento e a largura, o que não foi observado na espessura.

Para montarmos um modelo de corda vibrante precisaríamos saber que forças atuariam sobre ela para produzir a oscilação. Como já vimos, a pressão subglótica é responsável pela abertura das cordas vocais, a partir do seu valor poderíamos encontrar a força exercida por ela. Além disso, seria muito útil sabermos em que frequência ocorre a vibração. No artigo “Análise das medidas aerodinâmicas no português brasileiro por meio do método multiparamétrico de avaliação vocal objetiva assistida (EVA)” (OLIVEIRA et al., 2013), encontramos medidas de aerodinâmica da fala que nos ajudaram a montar esse modelo.

Os valores médios referentes à normalidade das medidas aerodinâmicas da pressão subglótica, em falantes do português brasileiro, sem queixas vocais, encontrados no presente estudo para vozes femininas foram: Pressão subglótica = 5,84 hPa, média da intensidade = 79,21 dB, média do fluxo oral= 0,09 dm^3/s , eficiência glótica= 13,87 dB/hPa, eficiência laríngea = 188,08 dB/(hPa. dm^3/s), resistência laríngea = 96,26 hPa/(dm^3/s), média da frequência fundamental= 208,28 Hz e pico da pressão do fluxo oral = 0,093. Os valores

encontrados para o sexo masculino foram: Pressão subglótica = 6,7 hPa, média da intensidade = 81,7 dB, média do fluxo oral = $0,16 \text{ dm}^3/\text{s}$, eficiência glótica = 12,78 dB/hPa, eficiência laríngea = 97,11 dB/(hPa. dm^3/s), resistência laríngea = 52,64 hPa/(dm^3/s), média da frequência fundamental = 136,56 Hz e pico da pressão do fluxo oral = 0,098.

Consideremos agora o comprimento da porção membranosa das pregas vocais de um homem $l = 11,5 \text{ mm}$ e a massa de uma das pregas $m = 0,16 \text{ g}$. A frequência fundamental de oscilação das pregas vocais desse indivíduo num dado momento é de 136,56 Hz.

Aplicando aos parâmetros de uma prega vocal a última equação encontramos uma tensão exercida na corda igual a $T = 0,137 \text{ N}$.

A pressão subglótica é responsável pela abertura das pregas vocais e a elasticidade das pregas juntamente com o efeito Bernoulli são responsáveis por seu fechamento.

Consideremos uma pressão subglótica P_{SG} é de 670 Pa atuando numa área S de $0,5 \text{ cm}^2$. Encontramos, assim, uma força de abertura das pregas vocais. igual a

$$F = P_{SG}S = 0,0335 \text{ N.} \quad (4.4)$$

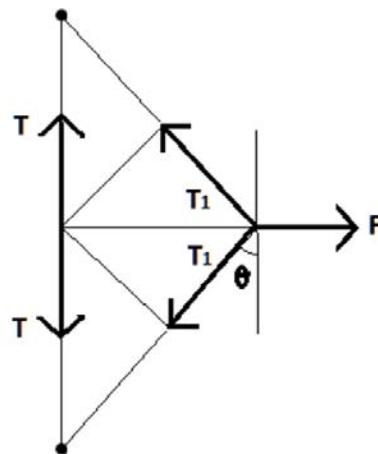


Figura 6. – Composição de forças sobre a prega vocal direita.

Como no equilíbrio a tensão T sobre cada extremidade da prega é dada por

$$T = T_1 \cos \theta, \quad (4.5)$$

temos então que a força resultante correspondente sobre a prega é igual a

$$F = 2T_1 \sin \theta \quad (4.6)$$

e o ângulo θ de deformação da prega é dado por

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{F}{2T} \right) = \frac{\pi}{26}. \quad (4.7)$$

Este cálculo revela que, de fato, este é um ângulo muito pequeno.

Agora, calculemos o valor x , referente à metade da abertura das cordas vocais para o modelo proposto.

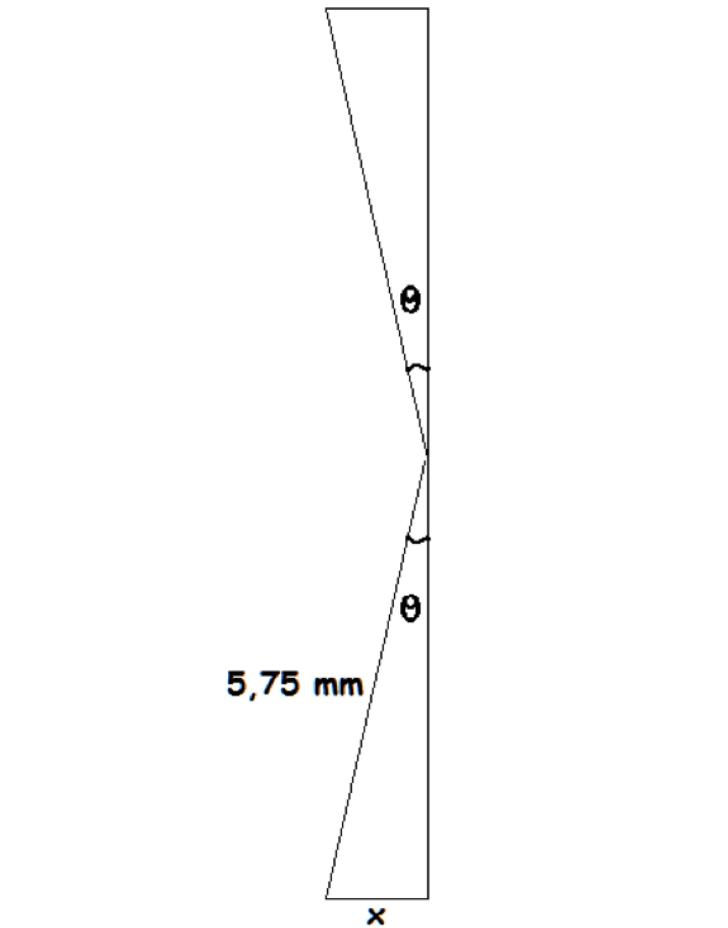


Figura 7. – Representação da deformação de uma das pregas vocais.

Da figura 7, observamos que o parâmetro x pode ser obtido a partir da relação

$$\frac{x}{5,75} = \sin \theta \approx \theta = \frac{\pi}{26}. \quad (4.8)$$

Substituindo o valor de θ determinado anteriormente, percebemos então que o espaçamento das pregas vocais é da ordem do milímetro:

$$x \approx 0,7 \text{ mm.} \quad (4.9)$$

Concluímos assim que as oscilações das pregas vocais e, por consequência, as diferentes emissões de voz, podem ser modeladas em primeira aproximação por um oscilador harmônico forçado (QURESHI; SYED, 2011).

5 Considerações finais

O modelo proposto no presente trabalho considerou cada prega vocal uma corda vibrante de comprimento l oscilando numa frequência fundamental f_1 . A estrutura das cordas vocais apresentada é simplista e desconsidera inúmeros fatores como a elasticidade do tecido, a ação do sistema nervoso, as colisões entre as pregas, a força da gravidade, entre outros parâmetros. Entretanto, o modelo nos fornece uma medida de abertura entre as pregas de aproximadamente 1,4 mm, um valor interessante dado que esse espaço realmente precisa ser dessa ordem. Além disso, o modelo de aproximação para uma corda vibrante mostra-se de certa forma intuitivo, uma vez que percebemos como as vozes das crianças e das mulheres, que possuem cordas vocais menores que a dos homens, atingem frequências mais elevadas em relação à frequência produzida por eles.



Referências

- BOJORQUEZ, A. L. et al. 1-dimensional model for vocal fold vibration analysis beng 221 problem solving session. *Group*, v. 10, p. 4, 2013.
- FILHO, J. A. X. et al. Correlação entre a altura e as dimensões das pregas vocais. *Rev. Bras. Otorrinolaringol.*, v. 69, n. 3, p. 371–374, 2003.
- FINGER, L. S.; CIELO, C. A. Aspectos fisiológicos e clínicos da técnica fonoterapêutica de fonação reversa. *Revista Brasileira de Otorrinolaringologia*, v. 73, p. 271–277, Abril 2007.
- MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. *Curso de Física*. 1. ed. São Paulo: Editora Scipione, 2011.
- OLIVEIRA, J. V. A importância da saúde vocal para profissionais. *Espaço Aberto*, n. 152, Agosto 2013. Disponível em: <<http://www.usp.br/espacoaberto/?materia=a-importancia-da-saude-vocal-para-profissionais>>. Acesso em: 29 de julho de 2016.
- OLIVEIRA, K. V. de et al. Análise das medidas aerodinâmicas no português brasileiro por meio do método multiparamétrico de avaliação vocal objetiva assistida (eva). *Revista CEFAC*, v. 15, n. 1, 2013.
- PIETROCOLA, M. et al. *Física em contextos*. 1. ed. São Paulo: Editora FTD, 2010.
- QURESHI, T.; SYED, K. A one-mass physical model of the vocal folds with seesaw-like oscillations. *Archives of Acoustics*, v. 36, n. 1, p. 15–27, 2011.