

## Estudo qualitativo do modelo de vibração das pregas vocais através da análise de sensibilidade da variação dos valores de massa e rigidez

OLIVEIRA, I. S. G. - Departamento de Engenharia de Estruturas UFMG -guerciisa@gmail.com  
MAGALHAES, M.D.C. - Departamento de Engenharia de Estruturas UFMG -max@dees.ufmg.br  
GAMA, A.C.C. -Departamento de Fonoaudiologia UFMG -anaccgama@gmail.com

**Resumo. Objetivo:** Neste artigo será verificado como o modelo apresentado por Titze se comporta com diferentes valores de massas de cobertura e rigidez do tecido que representa a mucosa da prega vocal. Observando as variações de frequência fundamental gerada pela prega vocal poderá ser feito aferições com patologias afim de se conhecer a representatividade dos parâmetros do modelo representando tais alterações de prega vocal. **Metodologia:** Foi implementado o modelo de prega vocal proposto por Titze (1994) no software MATLAB. Para implementação do modelo Corpo cobertura (Titze, 1994) foi criado um script obedecendo às diretrizes e valores paramétricos utilizados por Titze em seu estudo. Utilizando este script o valor das massas de cobertura da prega vocal será alterado de forma progressiva, assumindo valores em uma determinada faixa e assim o valor da frequência fundamental e deslocamento máximo serão calculados. **Conclusão:** Modelos matemáticos podem auxiliar na previsão de situações e interações existentes entre a variação de massa das pregas vocais com a frequência fundamental do indivíduo, como observou-se no caso estudado. A variação dos valores de massa e rigidez do modelo corpo cobertura mostram analogias com mudanças fisiológicas reais, como nos casos de edema de Reinke e sulco de prega vocal, comprovando que a aplicação deste modelo é viável.

**Palavras chave:** Vibração de prega vocal, disфонia, prega vocal, modelos vocais, alteração vocal.

### 1. INTRODUÇÃO

A prega vocal é uma estrutura que possui um papel essencial no processo da fonação, pois ondas mecânicas são formadas em sua superfície. Essas ondas são produzidas pela diferença orgânica e mecânica dos tecidos que compõem a prega vocal e pelo fluxo aéreo pulmonar expiratório. A prega vocal pode ser dividida em três níveis: mucosa, ligamento vocal e músculo vocal. A sua complexa anatomofisiologia permite a camada de mucosa vibrar livremente sobre as estruturas mais rígidas das camadas inferiores. Para melhor entender a dinâmica da vibração das pregas vocais, a produção e propagação do som e o comportamento das pregas vocais normais e alteradas por lesões, uma série de modelos matemáticos foram propostos ao longo do tempo, variando a sua complexidade e facilitando a compreensão do funcionamento das pregas vocais.

Neste trabalho apresenta-se o modelo Corpo-cobertura (Titze, 1994) que será o modelo base para o desenvolvimento deste trabalho. O modelo corpo-cobertura é baseado no conceito corpo-cobertura (Hirano;Kakita 1985). Este modelo possui três massas  $M_u$ ,  $M_l$  e  $M_b$ , e são permitidas a essas massas apenas movimentos perpendiculares ao tubo vocal  $X_u$ ,  $X_l$  e  $X_b$ . As massas  $M_u$  e  $M_l$  são acopladas por uma mola linear  $K_{ce}$  representam a cobertura. As molas não lineares  $K_u$ ,  $K_l$  e  $K_b$  representam a tensão nas pregas vocais. O corpo por sua vez está acoplado a parede laríngea por uma mola e um amortecedor. O modelo de Titze (1994) foi desenvolvido baseado nos valores de medidas laríngeas estudados por Hirano (1977) e Hirano (1981), em estudos com laringes humanas. Os valores paramétricos para montar as equações do modelo corpo cobertura foram retirados destes estudos, nos quais as massas possuem espessura de 0.3cm, comprimento de 1cm e profundidade de 0,23cm. O modelo abrange o estudo de movimento vibratório para uma prega vocal saudável e simétrica.

Neste artigo será verificado como o modelo apresentado por Titze se comporta com diferentes valores de massas de cobertura e rigidez do tecido que representa a mucosa da prega vocal. Observando as variações de frequência fundamental gerada pela prega vocal poderá ser feito aferições com patologias, como o edema de Reinke e o sulco de prega vocal, afim de se conhecer a representatividade dos parâmetros do modelo representando alterações de prega vocal.

### 2. METODOLOGIA

Primeiramente foi implementado o modelo de prega vocal proposto por Titze (1994) no software MATLAB. Para implementação do modelo Corpo cobertura (Titze, 1994) foi criado um script obedecendo às diretrizes e valores paramétricos utilizados na literatura (Titze, 1994). No MATLAB foram implementados os seguintes aspectos e equações: Pressão subglótica, comprimento ântero-posterior da prega vocal, profundidade das massas de cobertura  $M_u$  e  $M_l$  e deslocamento das massas  $M_u$  e  $M_l$ . Foram implementados ainda os valores de cada massa, as forças atuantes em cada massa no valor de 0,0012N que é o resultado do comprimento da prega vocal multiplicado por sua profundidade e pela pressão subglótica, os valores das molas e amortecimentos. Desta simulação são retirados como dados de saída informações como amplitude de vibração e frequência fundamental das pregas vocais. Abaixo segue o modelo implementado por Titze (1994) na figura (1).

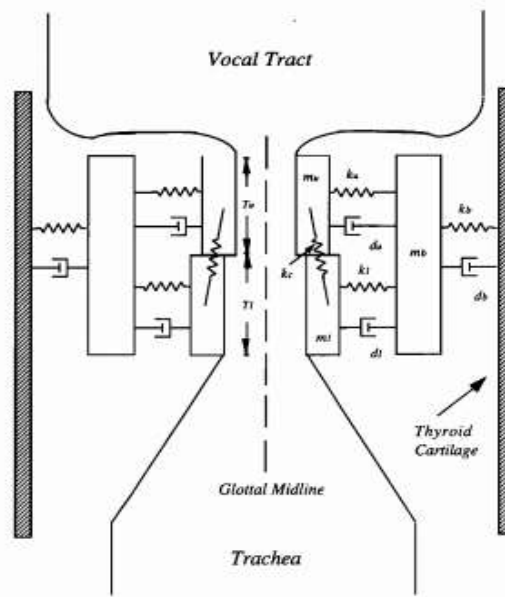


Figura 1: Modelo Corpo-cobertura proposto por Titze (1994).

Utilizando este script o valor das massas de cobertura da prega vocal será alterado de forma progressiva e simultânea, assumindo valores em uma determinada faixa e assim o valor da frequência fundamental e deslocamento máximo serão calculados. O valor da rigidez também será variado simultaneamente para  $K_u$  e  $K_l$ , assim como a frequência fundamental e deslocamento máximos também serão calculados para a variação dessas molas não lineares.

### 3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Variando os valores para as massas de cobertura  $M_u$  e  $M_l$ , aproximadamente de 0g até 0,1g podemos verificar que a frequência fundamental assume valores que vão de 220 Hz até 32 Hz como pode ser visto na Figura (2a).

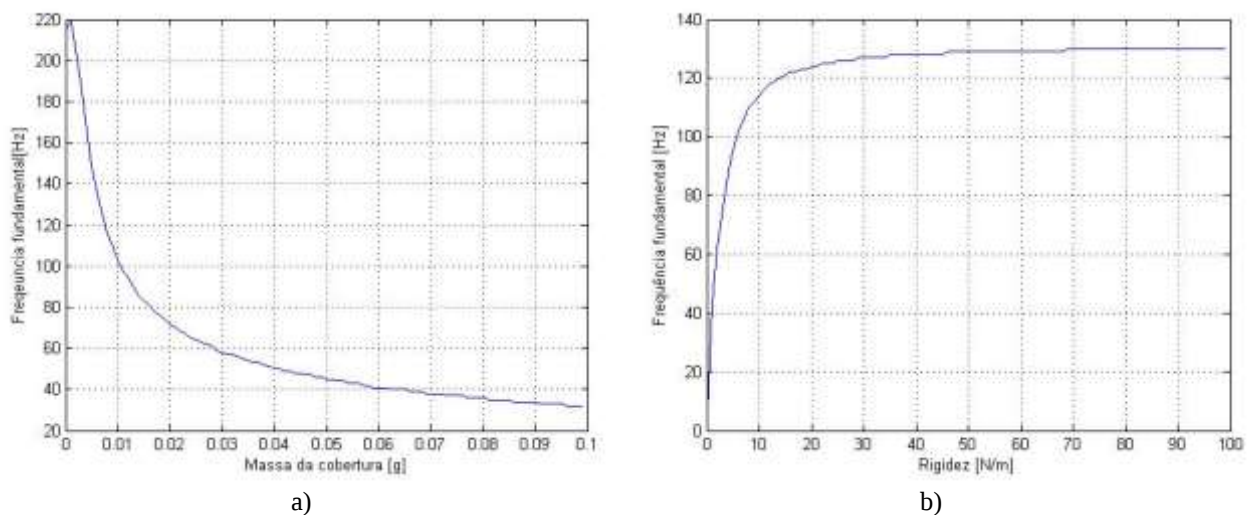


Figura 2: Variação da frequência fundamental do modelo de prega vocal com o valor da massa de cobertura (a) e rigidez da mucosa (b).

Essa variação na frequência fundamental gera uma mudança esperada, pois em um sistema massa mola ao aumentar os valores da massa a frequência fundamental apresenta uma diminuição em seu valor. Destas informações podemos fazer um paralelo com alterações de prega vocal como o edema de Reinke que será discutido posteriormente.

Variando os valores das molas  $K_u$  e  $K_l$  da cobertura da prega vocal, aproximadamente de 0 a 100N/m, ocorre uma variação na frequência fundamental inversa ao caso anterior, resultando na modificação da rigidez das pregas vocais. Variando a rigidez o valor da frequência fundamental aumenta, este resultado era esperado tendo em vista as equações

que regem um sistema massa mola. O comportamento da frequência fundamental variando valores de rigidez pode ser observado na Figura (2b). Neste caso pode-se fazer um paralelo com alterações de prega vocal que causam uma elevação na frequência fundamental da fala, alterações que aumentam a rigidez da prega vocal, como o sulco de prega vocal que será discutido posteriormente. Ao observar estes resultados verifica-se que este modelo pode ser ajustado para representar pregas vocais com alterações estruturais.

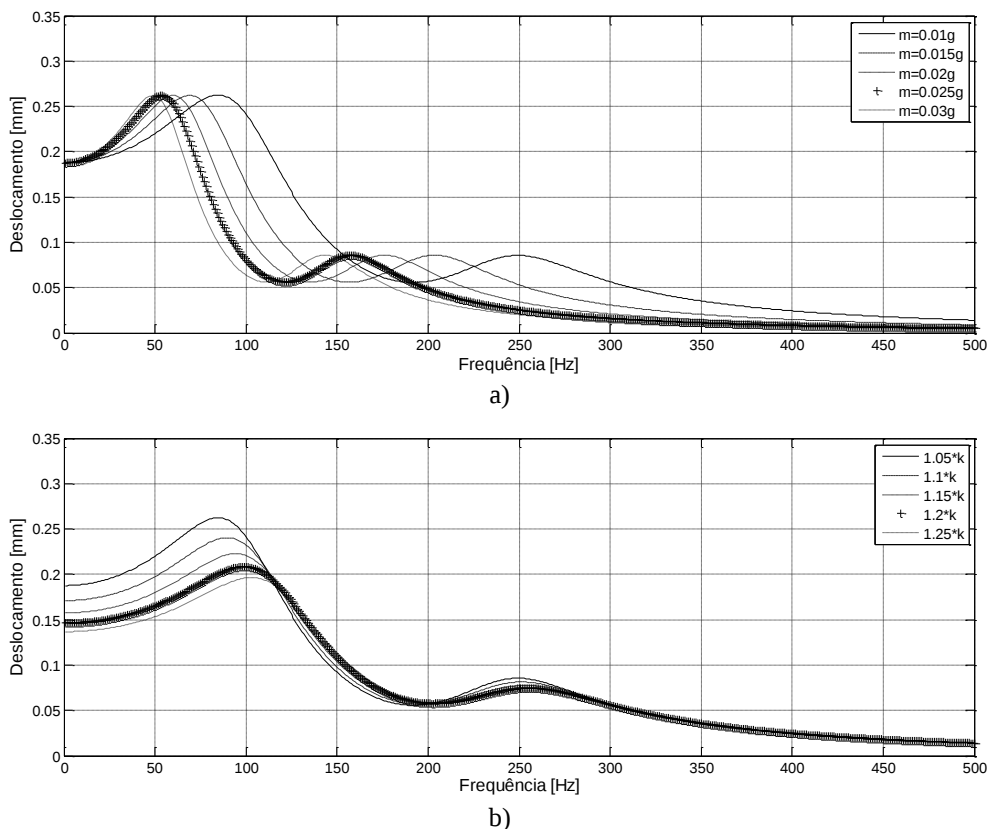


Figura 3: Variação do deslocamento das pregas vocais com a frequência de excitação; a) variação da massa de cobertura; b) variação da rigidez da mucosa (b).

Na figura 3 pode-se observar claramente duas frequências ressonantes para cada curva apresentada. Para o sistema ‘original’, ou seja, sem alteração da massa de cobertura e rigidez da mucosa (massa de aproximadamente 0,01g e rigidez da mucosa igual a 5,25N/m), tem-se as duas primeiras frequências acopladas do sistema igual a 80Hz e 250 Hz (ver esquema do sistema na Figura 1). Na Fig. 3a, é apresentada a variação do deslocamento da mucosa com a massa de cobertura. Como esperado, a medida que a massa aumenta, as frequências ressonantes diminuem. Já na Fig. 3b, é mostrado a variação do deslocamento em função da rigidez da mucosa. Neste caso, a medida que a rigidez aumenta, as frequências ressonantes, também aumentam.

#### 4.DISCUSSÃO

Para bem entendermos as modificações realizadas por este modelo é importante conhecer bem a anatomofisiologia das pregas vocais e entender suas camadas. A mucosa divide-se em epitélio escamoso que possui uma espessura bastante reduzida quando comparada as outras estruturas e camadas histológicas. A lâmina própria é altamente especializada para realizar a sua função vibratória e subdivide-se em três camadas: a superficial, a intermediária e a profunda. Essa divisão se dá pela diferença de fibras existentes denominadas fibras elásticas e colágenas. O epitélio e a camada superficial, denominados também de mucosa da prega vocal, constituem a cobertura da prega vocal.

O corpo é constituído pelas camadas intermediária, profunda e o músculo vocal. A camada intermediária é composta por fibras elásticas em sua maioria e a profunda por fibras colágenas, essas camadas constituem o ligamento vocal. A diferença entre a camada superficial e a intermediária é maior do que entre a camada intermediária e profunda. Quanto mais próximo do músculo vocal maior o número de fibras colágenas e menor a quantidade de fibras elásticas, tornando a porção próxima ao músculo vocal, denominado tireoaritenóideo, mais rígida e densa. A lâmina própria possui suas fibras paralelas em relação à superfície favorecendo o movimento vibratório. O músculo vocal é a camada mais rígida na

estrutura da prega vocal, que como outros músculos esqueléticos, é longo e cilíndrico sendo responsável por definir o volume da prega vocal e sua tensão, comandada de forma neurológica.

No modelo matemático proposto por Titze (1994) ele utiliza o conceito corpo-cobertura proposto por (Hirano; Kakita 1985), este conceito afirma que as pregas vocais podem ser divididas em duas camadas teciduais com diferentes propriedades mecânicas. A cobertura é formada por tecido mucoso, constituído pelo epitélio e camada superficial, que envolve a camada do corpo. O corpo é composto pelas fibras rígidas do músculo tireoaritenóideo e fibras colágenas e elásticas componentes do ligamento vocal. Considerando-se os resultados obtidos na modificação do modelo de Titze pode-se fazer uma analogia com algumas patologias de prega vocal. Para este estudo será utilizado o edema de Reinke devido sua alta prevalência em pacientes com queixas vocais (Melo ECM, Brito LL, Brasil OCO, Behlau M, Melo DM, 2001) e o sulco vocal por ser uma alteração estrutural mínima que compromete a túnica mucosa, causando insuficiência glótica, alteração de origem congênita que pode afetar a qualidade vocal desde a infância (Canto, 2003).

O edema de Reinke é uma doença crônica da laringe na qual a camada superficial da lâmina própria é expandida por muco espesso conferindo-lhe aspecto gelatinoso, aumentando consequentemente a quantidade de massa das pregas vocais. Relaciona-se ao tabagismo e ao abuso vocal e acomete, preferencialmente mulheres acima dos 45 anos, as quais apresentam a voz mais grave do que o esperado para o gênero, caracterizando muitas vezes uma voz masculinizada. Como características vocais têm-se rouquidão devido a perturbação da amplitude da mucosa e presença de ruído, queda da frequência fundamental e agravamento do *pitch*, definido como a impressão auditiva da frequência fundamental e relaciona-se à idade e sexo do falante.

Ao aumentar os valores de massa para o modelo de Titze (1994) verificou-se que ocorreu uma diminuição da frequência fundamental. Em mulheres brasileiras a frequência fundamental média é de 205Hz (Behlau M, Pontes P, 1995)), e nos casos de mulheres em que há a presença de edema de Reinke, e consequente aumento da massa das pregas vocais em resposta ao extravasamento de líquido para os tecidos resultando em edema e hiperflacidez do tecido, os valores de frequência fundamental descritos na literatura situam-se entre 159,59 a 172,77 Hz (Gama ACC, Behlau M, 2009), comprovando o modelo de Titze (1994), onde o aumento da massa gera um abaixamento da frequência fundamental.

Ao modificar os valores das molas variando de forma a aumentar a rigidez observou-se um aumento da frequência fundamental. Isso ocorre em alterações de prega vocal como o sulco vocal. O sulco vocal é uma alteração estrutural mínima que decorre da invaginação longitudinal paralela as margens da prega vocal, que se estende ao longo da porção membranosa. Essa alteração compromete a túnica mucosa, sendo geralmente bilateral e assimétrica, afastando-se a borda superior da inferior, sendo esta última mais tensa. O sulco vocal provoca rigidez nas pregas vocais, dificultando a vibração das pregas vocais e perturbando sua amplitude. É uma lesão de origem congênita, vinda do curso do desenvolvimento da laringe do quarto e sexto arcos branquiais.

Histopatologicamente o sulco vocal está localizado no espaço de Reinke, camada superficial da lâmina própria, com aumento frequente das fibras colágenas ao redor da lesão. A qualidade vocal depende do padrão de vibração da túnica mucosa e da extensão do sulco. A presença desta alteração pode causar disфонia não apenas pelo fechamento glótico insuficiente, mas também por causar distorção ou até ausência de movimento vibratório das pregas vocais, decorrente da rigidez da túnica mucosa. Em homens brasileiros a frequência fundamental média é de 113Hz (Behlau M, Pontes P, 1995), e nos casos de sulco vocal em laringes masculinas, os valores de frequência fundamental descritos na literatura estão entre 145 a 183Hz (Costa JO, Gama ACC, Oliveira JB, Neto ALO, 2008), comprovando o modelo proposto por Titze (1994), que a frequência fundamental eleva-se nos casos em que há o aumento de rigidez da túnica mucosa, como no sulco de prega vocal.

Diante destes aspectos é importante ressaltar que alguns autores definiram aspectos para a rigidez da prega vocal. Hirano (1975) sugeriu que o corpo é dez vezes mais rígido que a cobertura. Já Titze e Talkin, (1979) sugeriram o corpo é dez vezes mais rígido, o ligamento seria quatro e a cobertura duas vezes mais rígida. É importante observar que apesar de considerar matematicamente o cálculo de elasticidade dos tecidos musculares para tensão-deformação como lineares, eles não são, pois a medida que aumenta a deformação o músculo se torna mais rígido, isso é comumente visível em tecidos musculares humanos (Rosa, 2011).

## 5.CONCLUSÃO

Modelos matemáticos podem auxiliar na previsão de adaptações vocais. Observou-se no caso estudado a interação que existe entre a variação de massa das pregas vocais com a frequência fundamental do indivíduo. Realizando um estudo mais aprofundado utilizando dados de casos reais é possível refinar o modelo de forma que sua representatividade possa mostrar características fisiológicas de forma satisfatória, para isso poderiam ser utilizados dados provenientes de exames laríngeos como análise acústica, fotografia ultra-rápida da laringe e eletroglotografia, e associar seus resultados ao modelo.

A variação dos valores de massa e rigidez do modelo corpo cobertura mostram analogias com mudanças fisiológicas reais, sugerindo que a aplicação deste modelo é viável.

## 6. REFERÊNCIAS

- BEHLAU, M. - O melhor que Vi e Ouvi – Atualização em Laringe e Voz. Rio de Janeiro: Reventir. 1998 51-63p.
- BEHLAU, M., PONTES, P. – Avaliação e Tratamento das Disfonias. São Paulo: Ed. Lovise, 1995. 164p..
- CANTO, M.G.M. Sulco vocal: Considerações gerais sobre o tratamento. Revista CEFAC. 2003, 5:81-88.
- COSTA JO, GAMA ACC, OLIVEIRA JB, REZENDE NETO AL. Avaliação acústica e perceptivo-auditiva da voz nos momentos pré e pós-operatório da cirurgia de implante de pré-fáscia do músculo temporal. Revista CEFAC. 2008, 10 (1): 76-83 .
- GAMA ACC, BEHLAU MS. Estudo da constância de medidas acústicas de vogais prolongadas e consecutivas em mulheres sem queixa de voz e em mulheres com disfonia. Rev Soc Bras Fonoaudiol. 2009;14(1):8-14.
- HIRANO, M. Morphological structure of the vocal cords as vibrator and its variations. Folia Phoniatica, v. 26, p.89-94, 1974
- HIRANO, M.; KAKITA, Y. Cover-bory theory of vocal cord vibration. In: Speech Science San Diego: 1985. P.1-46.
- KAKITA, Y.; HIRANO, M., OHMARU, K. Physical properties of vocal fold tissue: measurements on excised larynges. In: Stevens, K.N., Hirano, M. Vocal fold Physiology. University of Tokyo Press, Tokyo, 1981.
- MELO, E. C. M., BRITO, L. L., BRASIL, O. C. M., BEHLAU, M. MELO, D. M. Incidência de lesões laríngeas não neoplásicas em pacientes com queixas vocais. RevBras Otorrinolaringol. V.67, n.6, 788-94, nov./dez. 2001
- MARTINS, R.H.G.; SILVA, R.; FERREIRA, D.M.; DIAS, N.H. Sulco vocal: provável etiologia genética. Relato de quatro casos em familiares. Revista Brasileira de Otorrinolaringologia. Vol.73, no.4 São Paulo. Julio/Agosto 2007
- ROSA, M O. Modelagem da laringe: Da biologia ao computador. Rev. de Letras - Vol. 30 - 1/4 – São Paulo. jan. 2010/dez. 2011
- STORY, B.H.; TITZE, I.R. Voice simulation with a body-cover model of the vocal folds. Journal Acoustical Society of America, v.97, n.2, p. 1249-1260, 1995.
- TITZE, I.R.; TALKIN, D.T. A theoretical study of effects of various laryngeal configurations on the acoustics of phonation. Journal Acoustical Society of America, v. 66, n. 1, p. 60-74, jul.1979.

## 7. ABSTRACT

**Objective:** This article will be checked as the model presented by Titze behaves with different values of coverage of mass and stiffness of the tissue that is the mucosa of the vocal fold. Noting the fundamental frequency variations generated by the vocal folds can be done with comparisons pathologies in order to know the representation of the model parameters in order to represent such vocal fold changes. **Methodology:** We have implemented the vocal fold model proposed by Titze (1994) in MATLAB software. To implement the cover body model (Titze, 1994) was created a script complying with the directives and parameter values used by Titze in their study. Using this script the value of vocal fold coverage masses will change gradually, taking values in a certain range and thus the value of the fundamental frequency and maximum displacement will be calculated. **Conclusion:** Mathematical models can help predict situations as in the case studied the interaction that exists between the weight variation of the vocal folds with the fundamental frequency of the individual. The variation of mass values and rigidity of the body cover model show with real physiological, as in cases of Reinke's edema and vocal fold groove, changes analogies which shows that the application of this model is viable in specific.