

2. Sobre a Anatomia, Fisiologia e Patologia da Laringe

2.1 INTRODUÇÃO

A laringe é um notável órgão do corpo humano que está ativamente envolvida em várias funções biológicas, tais como a respiração, a deglutição e a fonação. O complexo laríngeo está situado entre a faringe (garganta) e a traquéia, podendo ser identificado, particularmente em homens adultos, pelo chamado “Pomo de Adão”. A capacidade de alterar a sua forma com um controle preciso de seus movimentos é uma característica marcante da laringe. Ela é capaz de conciliar funções diferentes (como a expiração e a fonação) e mudar rapidamente de uma função para outra passando, por exemplo, de uma larga abertura inspiratória para um forte fechamento das vias respiratórias para proteger os pulmões. Tendo-se em mente que a cavidade oral é compartilhada pelos sistemas digestivo e respiratório, é enfatizado que a função biológica vital da laringe é atuar como um esfíncter para instintivamente proteger os pulmões contra a entrada de corpos estranhos.

Este capítulo aborda a função fonatória da laringe. A maioria das seções visa introduzir o leitor à anatomia laríngea e à terminologia associada, estabelecendo um contexto para futuras discussões. O capítulo apresenta a estrutura cartilaginosa da laringe, descreve o papel da musculatura laríngea e, simplificada, discute alguns aspectos de sua inervação. Especial atenção é dada às pregas vocais, à sua estrutura de camadas e a nuances de seu movimento vibratório.

2.2 A LARINGE

2.2.1 Estrutura cartilaginosa

A laringe pode ser identificada pela posição da cartilagem *tireóide*. Esta cartilagem, que tem o formato de uma chapa em V, forma a proeminência laríngea (Pomo de Adão) e atua como uma proteção frontal e lateral para as estruturas internas da laringe. A localização da tireóide e sua ligação

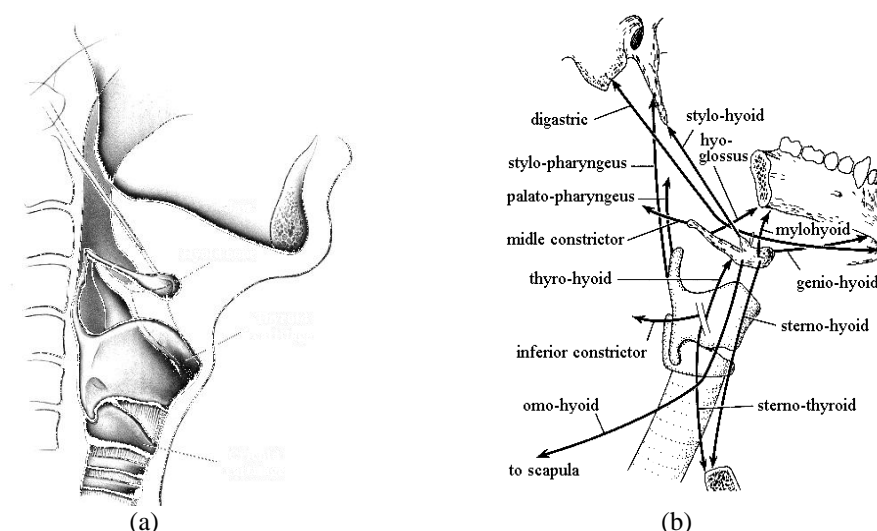


Figura 2.1. Laringe. (a) Vista lateral simplificada mostrando a posição da laringe no pescoço; adaptado de Fink & Demarest (1978, p. 25). (b) Vista esquemática das conexões da laringe com outras partes da boca, pescoço e ombros; de Bunch (1995, p. 92). A figura continua...

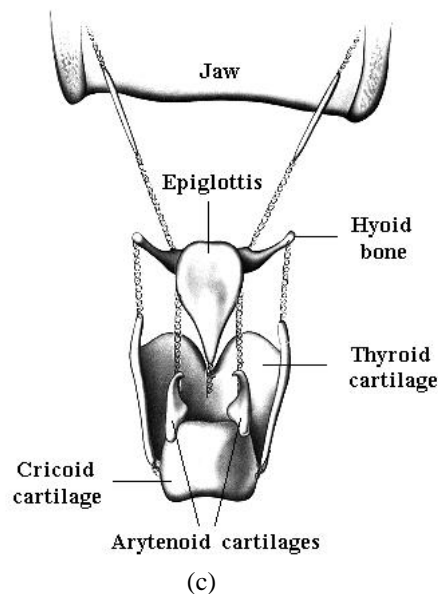


Figura 2.1. (continuação). Vista posterior (de trás) das cartilagens laríngeas durante a inspiração; adaptado de Fink & Demarest (1978, p. 28).

maior que a parte frontal (anterior). A cricóide complementa a tireóide na proteção das estruturas internas da laringe.

A Figura 2.1c mostra ainda a *epiglote* e o par de cartilagens aritenóides. A epiglote é uma cartilagem fina, com a forma de uma folha, que cobre a entrada da traquéia durante a deglutição. As *aritenóides* são semelhantes a pequenas pirâmides triangulares, participando ativamente da abertura e fechamento das vias respiratórias, como será visto com mais detalhes posteriormente.

Embora existam outras cartilagens na laringe, a sua estrutura básica é formada pelas seguintes cartilagens:

1. a cricóide,
2. a tireóide, e
3. o par de aritenóides.

Estas cartilagens combinam leveza, dureza e elasticidade mas, na puberdade, começam a ossificar nos pontos de maior esforço mecânico, particularmente nas juntas cricotireóideas e cricoaritenóideas. A tireóide e a aritenóide se articulam em facetas localizadas na cricóide (figura 2.2). Os movimentos destas

a outras cartilagens, ossos e músculos do pescoço, boca e ombros está indicada esquematicamente na Figura 2.1. O ângulo do “V” é mais agudo em homens ($\approx 90^\circ$) que em mulheres ($\approx 120^\circ$) o que explica, pelo menos em parte, o fato de a proeminência laríngea ser mais acentuada no sexo masculino.

Nas Figuras 2.1 e 2.2 vê-se que a parte superior da cartilagem tireóide está suspensa pelo osso *hióide* (que é o único osso não-articulado do corpo humano). O hióide acopla a laringe aos movimentos da língua e mandíbula. A tireóide, em sua parte inferior, apoia-se na cartilagem *cricóide*, que é a cartilagem superior da traquéia. Ao contrário das outras cartilagens da traquéia, a cricóide é um anel completo, sendo sua parte posterior cerca de três vezes

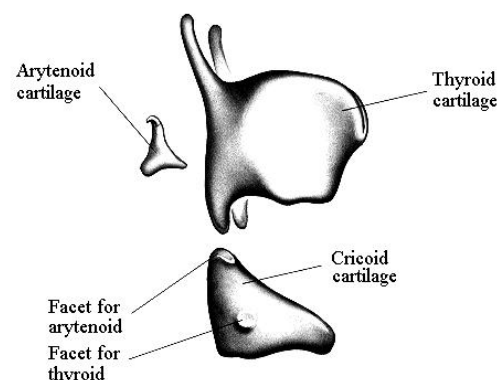


Figura 2.2. Principais cartilagens laríngeas. Observe que a faceta da aritenóide acompanha a inclinação da borda cricóide para cima e para baixo. Este detalhe é importante para compreender os movimentos das aritenóides; adaptado de Fink & Demarest (1978, p. 9).

cartilagens serão discutidos com certo detalhes mas, antes disso, é oportuno apresentar uma melhor descrição das partes da laringe vistas em imagens laringoscópicas.

2.2.2 A visão laringoscópica

Laringoscopia é a inspeção visual da laringe feita por um médico. Na sua forma mais simples, esta inspeção é realizada por meio de um espelho e de uma fonte de luz

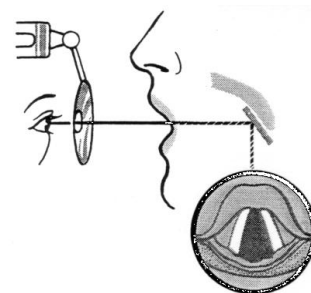
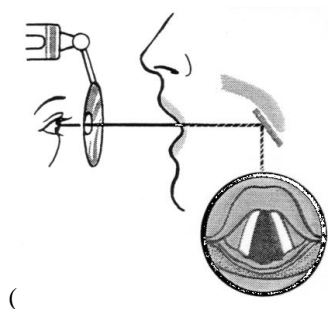


Figura 2.3. Exame com espelho; adap-tado de Becker, Naumann & Pfaltz (1989, p. 394).

Figura 2.3). O médico segura a língua do paciente e coloca um espelho ligeiramente aquecido (para evitar embaçamento) ao nível da úvula, estando a laringe iluminada pela fonte de luz fixada à cabeça do examinador.

Aparatos laringoscópicos mais sofisticados incluem um telescópio oral rígido ou um nasofibrosκόpio flexível acoplado a um equipamento de gravação de vídeo. O telescópio oral é semelhante ao espelho laríngeo, enquanto o nasofibrosκόpio utiliza uma fibra óptica passada através das cavidades nasais. Uma imagem típica obtida com um telescópio oral está indicada na Figura 2.4. Nela podem ser vistos:

1. Uma parte da epiglote. A queda desta cartilagem sobre a laringe, dificultando uma boa visão das pregas vocais, é normalmente evitada pedindo-se ao paciente que prolongue uma vogal /i:/ a fim de trazer a epiglote para uma posição mais vertical.
2. Alguns anéis da traquéia;
3. As pregas vestibulares, ventriculares, ou falsas. Comparadas às pregas¹

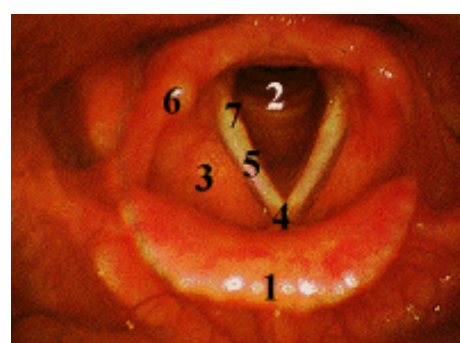


Figura 2.4. Imagem endoscópica. Laringe normal durante a inspiração. Veja texto para a descrição dos números indicados na figura.

constituídas por tecidos bastante diferentes. As falsas pregas são maiores, mais pesadas e

não vibram na produção normal da voz porque necessitariam de uma tensão e esforço expiratório anormais para movimentarem. Entretanto, as pregas ventriculares são importantes para a fonação uma vez que, sendo também constituídas por glândulas secretoras de muco, ajudam a lubrificar as pregas vocais.²

4. *A comissura anterior.* Esta é a região na cartilagem tireóide para onde convergem as pregas vocais e ventriculares. Luchsinger & Arnold (1965, p. 282) afirmam que:

“Quanto mais próximo à comissura anterior estiver localizada uma lesão das pregas vocais, maior será a rouquidão. Há uma relação inversa entre o perigo de vida de uma lesão nas pregas vocais e o efeito que esta lesão causa na voz. Lesões na comissura anterior são as menos perigosas mas são aquelas que causam os mais severos distúrbios vocais”

5. *As bordas superiores das pregas vocais.* As bordas se estendem ao na direção ântero-posterior, sendo normalmente vistas devido a reflexos da luz na mucosa úmida. O comprimento das pregas vocais, que é de aproximadamente 20 mm em adultos, pode ser dividido em duas partes bem diferentes:
 - *A parte membranosa*, que se estende desde a comissura anterior até o processo vocal das aritenóides, representando cerca de 75% do comprimento das pregas vocais de adultos masculinos. Esta é a parte vibrante das pregas vocais; e
 - *A parte cartilaginosa*, localizada ao longo do processo vocal das aritenóides (detalhe 7 da Figura 2.4).
6. Finalmente, vê-se o *ápice das cartilagens aritenóides*. O ápice refere-se, na verdade, a um ponto na membrana que reveste uma pequena cartilagem³ afixada à aritenóide.⁴ O conjunto destas cartilagens se move como um único bloco e o ápice real da aritenóide está ligeiramente abaixo do ponto indicado na figura.

Na seção 2.3.1 será dada uma descrição mais detalhada da estrutura das pregas vocais. Contudo, para evitar confusões devido à imagem em duas dimensões fornecida pela laringoscopia, é conveniente apresentar um corte esquemática da laringe (Figura 2.5) para destacar o perfil das pregas vocais quando vistas num plano coronal.⁵ A Figura 2.5 mostra que a prega vestibulares e a prega vocal

¹ Embora o termo “prega” tenha sido introduzido em 1745 e desde 1985 tenha sido aceito internacionalmente em substituição a “corda”, ainda é comum o uso (indevido) da expressão “cordas vocais” (Fink & Demarest, 1978).”

² Juntamente com sua função digestiva, a saliva realiza um papel de limpeza e defesa imunológica na mucosa da boca e do trato respiratório superior.

³ As pequenas cartilagens *corniculadas* que, ao contrário das cartilagens principais da estrutura laríngea, são compostas de tecido elástico e flexível. Elas atuam como um colchão protegendo as aritenóides durante as colisões que ocorrem no fechamento do espaço entre as pregas vocais (glote).

⁴ Às aritenóides também estão afixadas: a parte posterior das pregas vestibulares e as pregas ariepiglóticas (indicadas por molas na Figura 2.1c). Entretanto, o ponto de conexão está no ápice das aritenóides.

⁵ Um plano *coronal* (frontal) divide o corpo em uma parte anterior (à frente do plano) e numa parte posterior (atrás do plano). De forma semelhante, um plano *sagital* divide o corpo em duas partes que

formam duas constrictões no caminho do fluxo aéreo expiratório. A Figura 2.5 também define três compartimentos da laringe, quais sejam: a subglote, a glote, e a supraglote. A *glote* é o espaço livre entre as pregas vocais, estando situada na região transglótica. Ainda há dois outros espaços representados na Figura 2.5: o seio piriforme e o ventrículo de Morgagni. O ventrículo é o espaços que separa a superfície superior (plana) de cada prega vocal da parte inferior da prega vestibular ipsilateral. O ventrículo é revestido com glândulas produtoras de muco que auxiliam na lubrificação das pregas vocais. Além disso, estes espaços livres permitem certos movimentos das pregas vocais, evitando ou reduzindo um possível amortecimento causado pelo toque com as pregas vestibulares. Os ventrículos também podem ter uma função na acústica da fala, embora haja uma certa controvérsia sobre o papel exato por eles desempenhado (Bunch, 1995, p. 69).

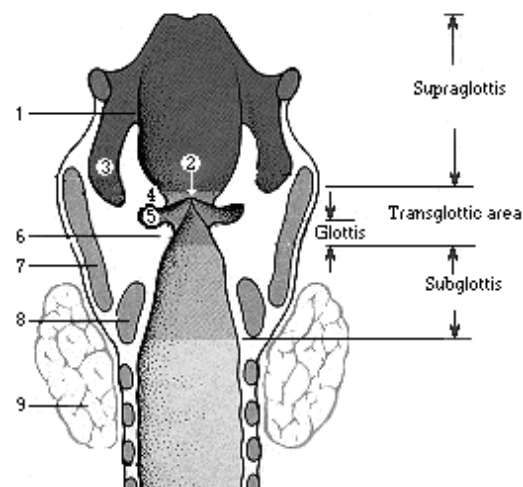


Figura 2.5. Corte coronal da laringe. A laringe é mostrada na direção ântero-posterior. (1) prega ariepiglótica; (2) comissura anterior; (3) seio piriforme; (4) pregas vestibulares; (5) ventrículo (de Morgagni); (6) pregas vocais; (7) cartilagem tireóide; (8) cartilagem cricóide; (9) glândula tireóide. Adaptado de Becker, Naumann & Pfaltz (1989, p. 387).

A Figura 2.5 também mostra a glândula tireóide (detalhe 9). Esta glândula produz hormônios responsáveis pela regulação do metabolismo, consumo de oxigênio, crescimento e desenvolvimento mental. O mal funcionamento desta glândula pode acarretar sérios problemas de saúde, que são evitados com a sua remoção cirúrgica e a com uma reposição controlada de hormônios. Apesar do aprimoramento nas técnicas cirúrgias de extração da tireóide (tireoidectomia), esta cirurgia costuma causar danos à inervação laríngea sendo ainda, provavelmente, a causa mais comum de paralisia nas pregas vocais. As próximas discussões ajudarão a compreender problemas deste tipo.

2.2.3 Musculatura laríngea

A laringe é dotada de vários músculos que realizam os movimentos necessários para as suas diversas adaptações morfológicas. Dependendo dos pontos de inserção, os músculos laríngeos são tradicionalmente classificados em extrínsecos ou intrínsecos

Os *músculos extrínsecos* são aqueles que se conectam à laringe e a outras partes do corpo. Eles são responsáveis pelas principais mudanças na forma da laringe e na sua posição vertical, podendo ser subdivididos em músculos supra-hióides e infra-hióides. Os supra-hióides são os

estão à esquerda e à direita do plano, enquanto um plano *transversal* é um corte em qualquer nível vertical que divida o corpo numa em partes superior (cranial) e inferior (caudal) em relação ao corte.

elevadores do osso hióide e da estrutura laríngea, enquanto os infra-hióides são os abaixadores. Alguns dos músculos extrínsecos foram indicados anteriormente na Figura 2.1b.

Alguns autores (e.g., Shin et al., 1986) definem os músculos extrínsecos de maneira diferente, incluindo neste grupo outros músculos que afetam a laringe sem estarem diretamente ligados a ela, como é o caso dos constritores da faringe. Estes músculos formam camadas circulares em torno da laringe e estão mais relacionados à deglutição. A contração dos constritores estreita a passagem da faringe, o que é desfavorável à produção do canto e da fala.

Os *músculos intrínsecos* são aqueles que têm a origem e a inserção dentro da laringe. Eles são os principais músculos no controle fonatório, merecendo atenção especial. Os músculos intrínsecos são responsáveis pelos movimentos das juntas laríngeas, afetando a posição, tensão e elasticidade das pregas vocais. De acordo com a alteração causada nas pregas vocais, eles podem ser organizados nos seguintes grupos:

1. O único músculo *abductor*: o cricoaritenóideo posterior (CAP). Sua ação causa a separação as pregas vogais, abrindo a glote;

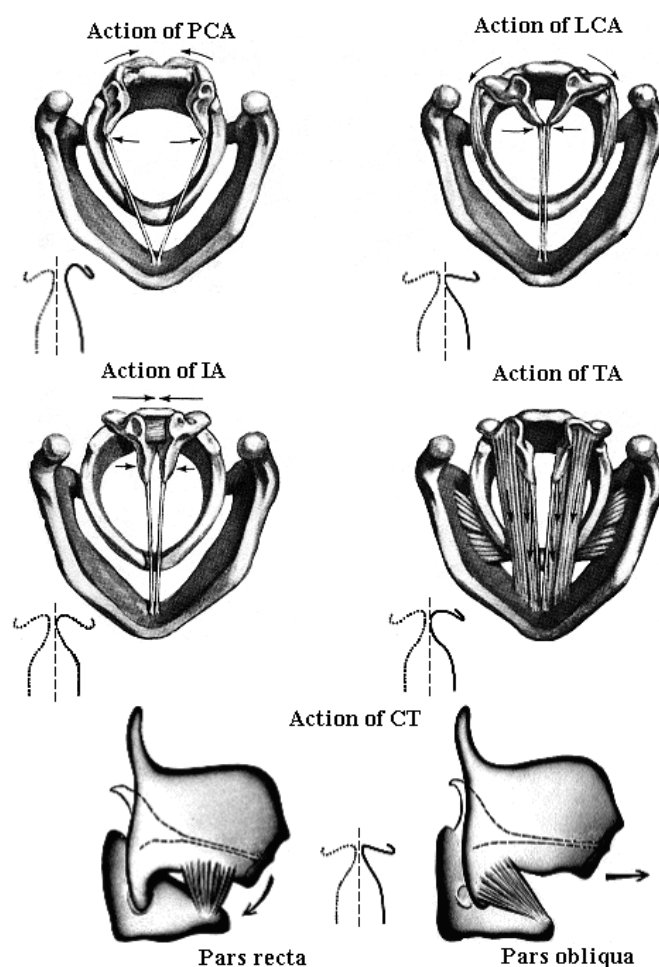


Figura 2.6. Músculos intrínsecos. Efeito da contração isolada de cada músculo sobre a posição, comprimento, tensão e forma da prega vocal. Adaptado de Saunders (1964), Hirano (1981, p. 8), e Fink & Demarest (1978, p. 81).

2. Os músculos adutores (que aproximam as pregas vocais, fechando a glote):
 - i. O cricoaritenóideo lateral (CAL),
 - ii. Os músculos interaritenóideos (IA), que é o nome usualmente dado à combinação do (único) interaritenóideo transversal e o par de interaritenóideos oblíquos; e
 - iii. A parte lateral (distante da linha média) do músculo tiroaritenóideo (TA);
3. Os dois *tensores* das pregas vocais:
 - i. o músculo vocalis, que é o feixe medial (próximo à linha média) do TA, e
 - ii. o músculo cricótireóideo (CT).

Os efeitos da contração *isolada* de cada um dos músculos intrínsecos sobre a posição, forma e tensão das pregas vocais estão indicados na Figura 2.6.

O CAP é o único músculo que abre a glote, estando ativo principalmente durante a inspiração. Ele também é responsável pela abertura glotal na produção de fonemas não-vozeados (ou surdos), isto é, aqueles em que não há vibração das pregas vocais (como /s/ e /f/). Após a contração dos CAPs, as aritenóides se distanciam, cada uma descendo pela respectiva faceta de articulação na

cartilagem cricóide; simultaneamente, as aritenóides tombam para trás. Estes movimentos separam e elevam o processo vocal das aritenóides (Sellars & Keen, 1978, p. 673).

A contração dos músculos interaritenóideos (IA) aproxima as aritenóides através de um limitado deslocamento ao longo da parte superior da faceta de articulação na cricóide. Isto resulta em um fechamento parcial da glote.

O CAL é antagonista ao CAP. A contração do cricoaritenóide lateral, combinada com a contração do IA, aproxima os processos vocais das aritenóides, que *deslizam* para cima na faceta de articulação, aproximando-se; ao mesmo tempo, elas *tombam* para dentro. Também há uma pequena rotação (num eixo vertical) que ajuda a aproximar as aritenóides. Experimentos com laringes estirpadas conduzidos por Baken & Isshiki (1977) sugerem que a trajetória dos processos vocais ocorre em um plano que faz aproximadamente 45° com um plano vertical. Em exames exames laringoscópicos a componente vertical deste movimento pode passar despercebida.

Em síntese, a junta cricoaritenóidea permite três tipos de movimento:

1. Um reduzido deslocamento linear no plano transversal.
2. Movimentos *simultâneos* de tombamento e deslize do processo vocal (i.e., girando

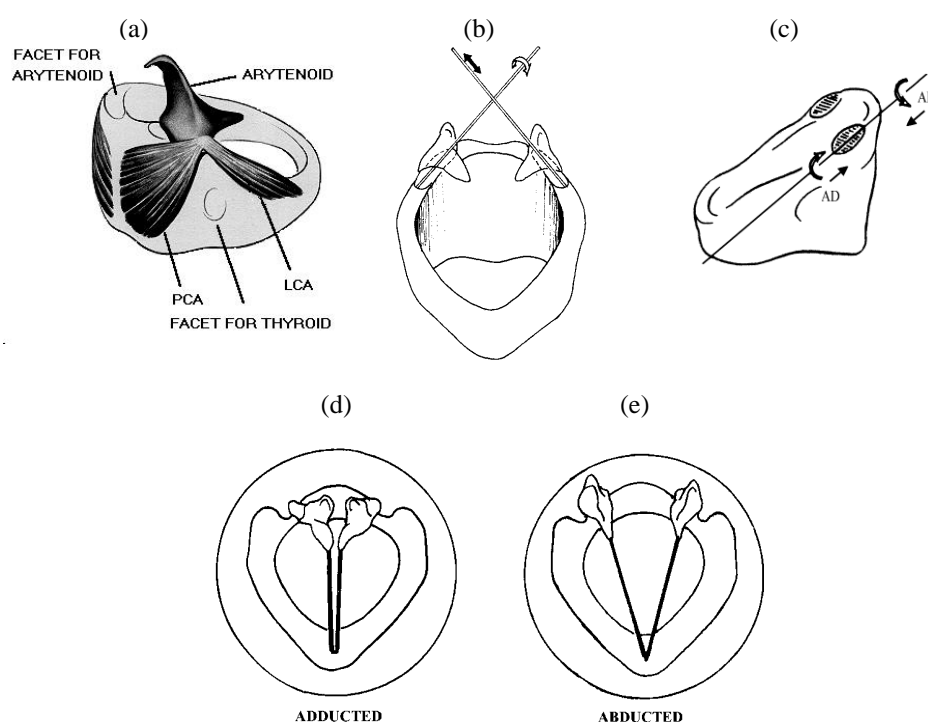


Figura 2.7. Principais movimentos da junta cricoaritenóidea. (a) inserções do CAL e do CAP; adaptado de Fink and Demarest (1978, p. 30). (b, c) eixos de balanço e deslize das aritenóides (AD = adduzidas, AB = abduzidas); (d) posição da aritenóide durante a addução; (e) posição da aritenóide durante a abdução glótica. As figuras b, d, e foram adaptadas de Perkins & Kent (1986, p. 68) e a figura c foi adaptada de Leden & Moore (1961, p. 547).

transversalmente para fora e verticalmente para cima, na abdução; ou girando transversalmente para dentro e verticalmente para baixo, durante a adução). Estes são os principais movimentos da junta.

3. Uma rotação *muito limitada* em torno de um eixo vertical.

O tombamento (ou “balanço”) e deslize desta junta estão representados esquematicamente na Figura 2.7; também é conveniente observar a faceta de articulação na

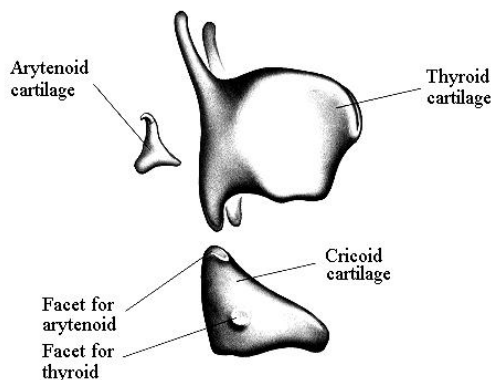


Figura 2.2.

Voltando à discussão do efeito da ação dos músculos intrínsecos, observa-se que a contração da parte *medial* do tiroaritenóideo (TA), ou seja, do músculo vocalis, causa uma pequena rotação medial das aritenóides, contribuindo para o fechamento glótico e para o aumento da tensão longitudinal das pregas vocais. A parte *lateral* do TA é responsável pela maior parte da massa da prega vocal.

O cricotireóideo (CT) é responsável pelos movimentos da outra junta laríngea, a *junta cricotireóidea*. O principal movimento desta junta é a *rotação* da cartilagem tireóide em relação à cricóide. Há uma controvérsia na literatura sobre qual cartilagem moveria, mas a hipótese mais aceita é o movimento da tireóide. O CT possui dois feixes musculares: o reto e o oblíquo. A rotação da tireóide, causada pelo feixe reto do CT, é frequentemente comparada ao movimento do visor de um capacete ou da balsa de uma janela. A ação isolada do feixe oblíquo do CT resulta num deslocamento horizontal da tireóide ao longo de sua faceta de articulação na cricóide. Os movimentos da junta cricotireóidea alongam a prega vocal ipsilateral, aumentando sua tensão longitudinal e afinando sua borda. *O aumento de tensão longitudinal das pregas vocais ocorre quando se quer aumentar a frequência de vibração.* Um aumento excessivo da tensão longitudinal pode tombar as aritenóides para dentro. Em situações onde necessita-se de tensões muito altas na prega vocal, para aumentar a frequência fundamental (no canto de notas agudas, por exemplo), o CAP atuaria como um músculo antagonista do CT, evitando o movimento das aritenóides.

A rotação da junta cricotireóidea pode ser percebida de forma tátil tocando-se levemente o pescoço, no espaço entre a cricóide e a tireóide, ao mesmo tempo que se produz a voz alternando-se sons graves e agudos. O alongamento das pregas vocais devido à rotação da junta CT parece ser a

única estratégia utilizada na voz falada. No canto, pessoas desprovidas de técnica apurada também utilizam, possivelmente, apenas este mecanismo para controle de frequência.. Cantores com técnica mais desenvolvida também podem utilizar o deslocamento horizontal da junta cricótireóidea (veja painel inferior direito da figura 2.6) como um recurso extra para alongar as pregas vocais (Fink & Demarest 1978, p. 81). Este deslocamento acontece sob a ação do feixe reto dos cricótireóideos.

Os principais efeitos da contração dos músculos intrínsecos da laringe estão resumidos na tabela 2.1, adaptada de Hirano (1981, p. 7). Mais detalhes sobre a influência da ação dos músculos intrínsecos da laringe podem ser encontradas, por exemplo, em Perkins e Kent (1986) ou Hirano, Kiyokawa & Kurita (1988).

	<i>CT</i>	<i>VOC</i>	<i>TA</i>	<i>CAL</i>	<i>IA</i>	<i>CAP</i>
<i>Abertura Glotal</i>			-	-	-	+
<i>Comprimento da PV</i>	+	-				
<i>Tensão da PV</i>	+	+				
<i>Aguçamento da borda da PV</i>	+	-		+		
<i>Massa vibrante da PV</i>		+	+			
<i>Nível vertical da PV</i>						+

Tabela 2.1. Efeitos da contração isolada dos músculos intrínsecos laríngeos. *CT* = cricótireóideo, *TA* = tiroaritenóideo (feixe lateral), *VOC* = vocalis (feixe medial do *TA*), *CAL* = cricoaritenóideo lateral, *IA* = interaritenóideo, *CAP* = cricoaritenóideo posterior, “-” = diminui, “+” = aumenta, *PV* = prega vocal.

2.2.4 Inervação

A laringe é um sofisticado sistema de controle controlado pelo cérebro. Ela é equipada com delicados “sensores” e vários mecanismos de “atuação” capazes de realizar ajustes rápidos e delicados. O grau de precisão dos movimentos das diversas partes do corpo humano depende do número de fibras musculares excitadas por cada fibra nervosa: quanto menor, melhor. As fibras nervosas da laringe excitam um número de fibras musculares que é, em média, de 10 a 100 vezes menor que o número excitado por fibras nervosas de outras partes do em que não há movimentos refinados (Akazawa & Fujii, 1981).

Há quatro tipos de fibras nervosas: as sensoriais, as autonômicas, as mecanoreceptoras e as motoras. As fibras *sensoriais* alimentam o cérebro com informações sobre a hidratação, irritação ou dor nos tecidos que revestem a laringe. As fibras *autonômicas* controlam o calibre dos vasos sanguíneos, estando também envolvidas no controle das glândulas secretoras de muco que mantêm a umidade adequada na mucosa laríngea. As fibras *mecanoreceptoras* são especializadas em detectar movimento e esforço mecânico na estrutura laríngea. Elas auxiliam na supervisão de aspectos como a posição e a tensão das pregas vocais, a direção dos movimentos das juntas laríngeas e dos níveis de pressão aérea sub e supraglótica. As fibras *motoras* são aquelas que excitam os músculos da laringe. O controle motor dos músculos intrínsecos é realizado pelo X Nervo Cranial (Nervo Vago). Este nervo é, essencialmente, um nervo motor, embora tenha algumas fibras sensoriais. Ele tem dois ramos: o

superior e o recorrente. Observe no painel da esquerda da Figura 2.8 que o nervo laríngeo recorrente (NLR) excita todos os músculos intrínsecos *exceto* o cricotireóideo, que é innervado pelo nervo laríngeo superior (NLS).

Lesões em fibras sensoriais ou motoras podem impedir a realização correta das diversas funções laríngeas. As pregas vocais podem ficar paralisadas se o nervo laríngeo é afetado por tumores, acidentes e/ou cirurgias envolvendo o pescoço e o tórax. Note no painel à direita da Figura 2.8 que o nervo recorrente é mais longo no lado esquerdo que no lado direito (havendo cerca de 10 cm de diferença). Por isso, o lado esquerdo é mais suscetível a lesões, como é comprovado por estatísticas de dados clínicos, que revelam uma maior incidência de paralisias de prega vocal esquerda.

Vários distúrbios na neuroanatomia laríngea que ainda não estão adequadamente esclarecidos podem estar associados a problemas no controle das pregas vocais. Dentre estes distúrbios, pode-se mencionar:

1. A possível existência de cruzamento da inervação entre os lados esquerdo e direito da laringe ou entre os nervos laríngeos superior e superior (Sanders, et al., 1993);
2. Anomalias no processo de reinervação (após lesões no nervo) que podem redirecionar feixes nervosos a músculos inapropriados, causando movimentos paradoxais das cartilagens laríngeas, como o fechamento involuntário da glote durante a inspiração (Crumley, 1989).

Avanços no estudo da inervação laríngea levarão a um melhor entendimento de certos distúrbios fonatórios. Em particular, poderão haver progressos nos tratamentos das paralisias laríngeas e das chamadas disfonias espasmódicas. Nestas últimas, a produção da voz é afetada por contrações involuntárias (e indevidas) de alguns músculos laríngeos causando, por exemplo, a interrupção da

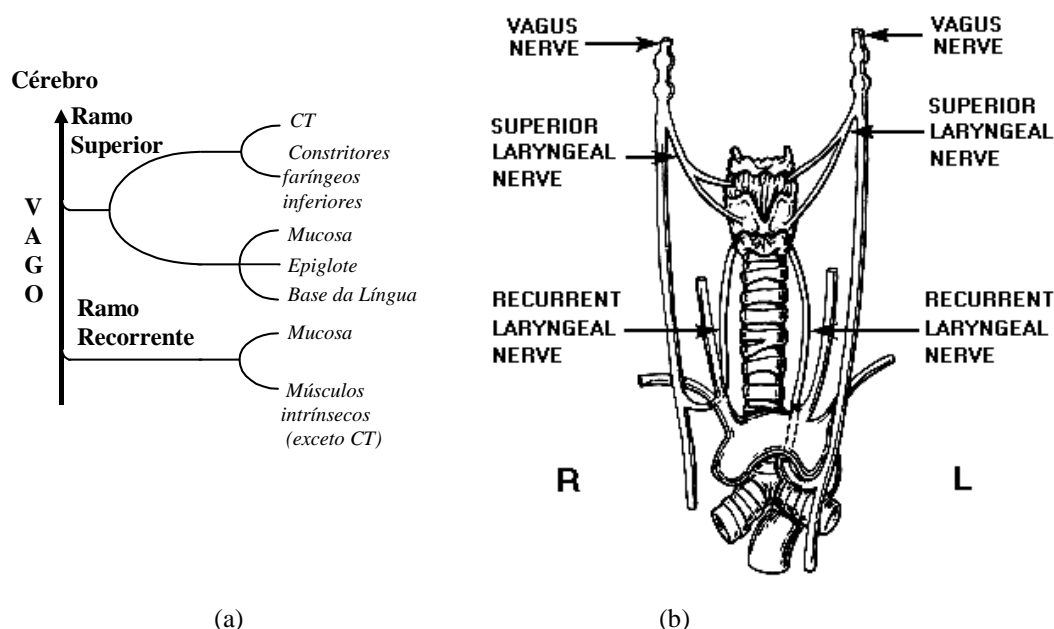


Figura 2.8. Nervo Vago. (a) Representação esquemática das inervações laríngeas; adaptado de Kaplan (1971, p. 234). (b) Trajetória do nervo pelo pescoço. “R” e “L” indicam respectivamente o lado direito (right) e esquerdo (left) do paciente; adaptado de Gerrat, Hanson & Berke (1987, p. 521).

fonação devido à abertura glótica durante a produção de uma vogal.

2.2.5 Funções fisiológicas

A comparação da fisiologia e anatomia laríngea de vários animais vertebrados (e.g., sapos, cobras, crocodilos e macacos) em diferentes estágios evolucionários mostra uma constante progressão da laringe, desde uma simples abertura na base da faringe de alguns peixes até o refinado mecanismo de ajuste do aparato vocal humano. Isto também mostra que a função biológica original da laringe é a proteção das vias respiratórias inferiores.

Na laringe humana, as manobras esfintéricas protetoras se iniciam com a interrupção da inspiração, seguido de um forte fechamento causado pela contração das pregas vocais, vestibulares e ariepiglóticas. A laringe é então elevada em direção à base da língua à medida que ela acompanha a elevação do osso hióide. A obstrução da traquéia é ampliada pela ação da epiglote, que atua como uma cobertura auxiliar projetada sobre a laringe e em direção à abertura do esôfago.⁶

Uma obstrução laríngea total ocorre durante a realização de esforço físico, como no levantamento de pesos, ou em diversas atividades do organismo (e.g., urinar, defecar ou no parto). Um forte fechamento glotal dificulta o escape de ar dos pulmões, dando suporte aos membros superiores e aos músculos abdominais. O fechamento é obtido com a adução das pregas vocais e vestibulares, o que é reforçado pela aproximação entre a cartilagem tireóide e o osso hióide.

Se a ação esfintérica falhar, permitindo que sólidos ou líquidos atinjam a traquéia, ou se houver uma infecção produzindo secreções dentro dos pulmões ou vias aéreas inferiores, a tosse ou *função expectorante* é invocada. Ela inicia com uma respiração profunda, seguida de um fechamento total da glote (para aumentar a pressão subglótica), culminando com uma rápida abertura glotal para

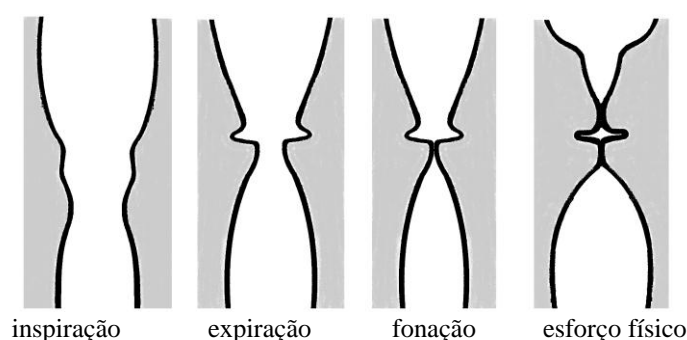


Figura 2.9. Funções laríngeas. Esboço do perfil da laringe (corte coronal) durante vários ajustes. Adaptado de Fink & Demarest (1978, p. 50).

⁶ Todavia, Becker, Naumann, & Pfaltz (1989, p. 392) afirmam que a remoção cirúrgica da epiglote revela seu limitado papel na proteção do trato respiratório inferior. Estes autores ressaltam que uma função sensorial intacta na mucosa laríngea é mais importante pois isto ativa o reflexo de contração muscular.

expelir o ar comprimido e, com ele, aquilo que é indesejado. O mesmo processo ocorre quando as membranas da traquéia estão irritadas, causando a ilusão de haver substâncias estranhas sobre a mucosa.

A respiração é um ato instintivo que consiste de duas fases bem diferentes: a inspiração e a expiração. Durante a *inspiração*, a epiglote é elevada e a glote é mantida completamente aberta, permitindo que o ar seja conduzido aos pulmões. Na *expiração*, o recolhimento elástico de certos músculos e ligamentos do tórax e abdômem, que foram alongados durante o ato inspiratório, força o ar para fora dos pulmões. Durante a expiração, as aritenóides são mantidas relaxadas numa posição de repouso, resultando numa glote ligeiramente aberta, que oferece mínima oposição ao fluxo de saída do ar.

A *fonação* ou vozeamento é a produção da voz, isto é, é o fenômeno associado à vibração das pregas vocais. Ela pode ser vista como uma interferência voluntária no processo expiratório. Durante esta interferência, a glote é mantida fechada e as pregas vocais estão convenientemente ajustadas para permitir a vibração. Estes ajustes serão discutidos com mais detalhes posteriormente.

Em síntese, as funções laríngeas estão de alguma forma relacionadas com a glote, que pode estar (Figura 2.9):

1. Completamente aberta durante a inspiração;
2. Levemente aberta durante a expiração;
3. Levemente fechada durante a fonação;
4. Fortemente fechada, durante esforço físico.

Esta seção apresentou uma visão geral de alguns gestos laríngeos, mostrando como as pregas vocais podem estar envolvidas em algumas atividades do organismo. As discussões seguintes serão dedicadas à morfologia das pregas vocais e ao mecanismo fonatório.

2.3 FONAÇÃO (VOZ MODAL)

2.3.1 A estrutura de camadas as pregas vocais

A fonação é, certamente, a função laríngea mais requintada. A compreensão dos mecanismos da função fonatória sofreu importantes avanços após a caracterização das pregas vocais como uma estrutura composta por camadas de tecidos com propriedades mecânicas diferentes (Hirano, 1974). As descobertas morfológicas de Hirano levaram a uma melhor explicação de várias observações visuais do movimento fonatório, contribuindo notavelmente para avanços tanto em técnicas cirúrgicas como em modelos físico-matemáticos para o estudo da produção da voz.

Os estudos de Hirano (1981) mostraram que as pregas vocais possuem uma estrutura estratificada que pode ser dividida em cinco camadas (Figura 2.10), assim descritas por este pesquisador (p. 5):

- “(1) O *epitélio*, que ... pode ser considerado uma cápsula fina e rígida cujo propósito é manter a forma da prega vocal;
- (1) A *camada superficial* ... que é semelhante a uma massa de gelatina macia;



Figura 2.10. Camadas da prega vocal (corte frontal). Composto com figuras de Saunders (1964) e Hirano (publicada em Broad, 1979, pp. 238-239).

- (2) A *camada intermediária* ... que se assemelha a um feixe de tiras de borracha macia;
- (3) A *camada profunda* ... que consiste de fibras colágenas semelhantes a um feixe de fios de algodão; e
- (4) O *músculo vocalis* que compõe a parte principal do corpo das pregas vocais e se assemelha a um feixe de tiras de borracha bastante rígidas.”

A camada superficial é mais comumente conhecida como *Espaço de Reinke*, enquanto as camadas intermediária e profunda constituem o que é tradicionalmente conhecido como o *ligamento vocal*.

Em um trabalho subsequente, Hirano & Bless (1993, p. 25) afirmaram que um “importante elemento da estrutura de camadas é uma camada adicional fora das pregas vocais – uma camada de muco” enfatizando que “sem esta camada, em outras palavras, se a superfície da prega vocal está completamente seca, a prega vocal não pode vibrar.” Cada camada das pregas vocais possui propriedades mecânicas diferentes, mas a estrutura de camadas não é uniforme ao longo da direção longitudinal. Além disso, a parte central da prega vocal é a região mais flexível, o que se deve não apenas à localização, favorável ao movimento, mas também à composição por um tecido mais macio. O epitélio abaixo das pregas vocais é ciliado. O movimento dos cílios desloca mucos e secreções para cima auxiliando tanto na proteção das vias respiratórias como na hidratação das pregas vocais.

Sob o ponto de vista mecânico, a estrutura das pregas vocais pode ser reduzida a apenas duas partes:

1. A **cobertura**, composta pelo epitélio e pelo espaço de Reinke, que é bastante macia e flexível; e
2. O **corpo**, que inclui o ligamento vocal e o músculo vocalis, sendo mais pesado e menos maleável que a cobertura.

O comportamento vibratório desta estrutura *corpo-cobertura*, como é observado em imagens em alta velocidade de laringes normais e extirpadas na voz “normal” ou “modal”, será descrito em seguida.

2.3.2 Observação visual da vibração normal das pregas vocais

A vibração das pregas vocais causa a modulação do fluxo de ar expiratório através do abrir e fechar da glote. A produção normal da voz requer um refinado equilíbrio entre as forças expiratórias e as forças musculares que determinam a abertura glótica. A forma fonatória da glote é estabelecida por três fatores principais: o grau de aproximação das pregas vocais (adução), a tensão longitudinal das pregas vocais e a compressão medial da parte membranosa, ou vibratória, das pregas vocais (Laver, 1981, p. 108).

Em termos de ajustes musculares:

1. A *adução* é causada principalmente pela contração dos músculos interaritenóideos (IA) com a supressão do CAP. Registros da atividade elétrica nestes músculos (eletromiografia) durante a produção da fala indicam que eles apresentam um padrão oposto de atividades durante a abertura e o fechamento glotal (Hirose and Gay, 1972);
2. A *compressão medial* na parte membranosa das pregas vocais (i.e., sua parte vibratória) resulta principalmente da contração do CAL e do vocalis;
3. A *tensão longitudinal* (i.e., paralela à borda livre das pregas vocais) é o resultado, principalmente, da contração do CT.

Estas condições pré-fonatórias obstruem a saída de ar. O que acontece em seguida será descrito qualitativamente com o auxílio da Figura 2.11. Como sugerido pelos quadros 1-3 da figura, a pressão subglótica abre a glote gradualmente, começando a separar as pregas vocais a partir das bordas inferiores. O alargamento da glote continua, com uma ligeira elevação dos “lábios” superiores, até que eles separam-se completamente (quadros 4 e 5), permitindo que o ar flua através da glote para dentro do trato vocal. Em seguida (quadros 5 e 6) *as bordas inferiores das pregas vocais iniciam o movimento de fechamento enquanto as bordas superiores continuam a separar-se*. A relevância desta defasagem (i.e., oposição no sentido do movimento) entre as bordas superior e inferior será discutida posteriormente.

O fechamento das bordas inferiores inicia provavelmente devido ao recuo elástico dos tecidos que foram comprimidos durante a fase de abertura glotal. O fechamento é *auxiliado* pela queda da pressão intraglótica (efeito Bernoulli), como indicado nos quadros 6-8 da Figura 2.11. A fase de fechamento continua até que o contato entre as pregas vocais seja máximo novamente.

As vibrações se mantêm (repetindo-se quasi-periodicamente numa frequência conhecida por frequência fundamental, F_0) desde que a transferência de energia do fluxo aéreo para o movimento das pregas vocais sempre colabore com o deslocamento dos tecidos, de forma a superar inevitáveis perdas de energia.

A Figura 2.11 também mostra que a parte externa das pregas vocais (a cobertura) apresenta um certo movimento sobre a estrutura rígida do corpo. Este movimento é, de fato, uma onda propagante conhecida por *onda mucosa*, *onda superficial*, ou *movimento muco-ondulatório*. Esta onda, que é o resultado da deformação do espaço de Reinke, inicia-se nas bordas inferiores das pregas, move-se para cima e continua até o espaço livre do ventrículo de Morgagni. A velocidade

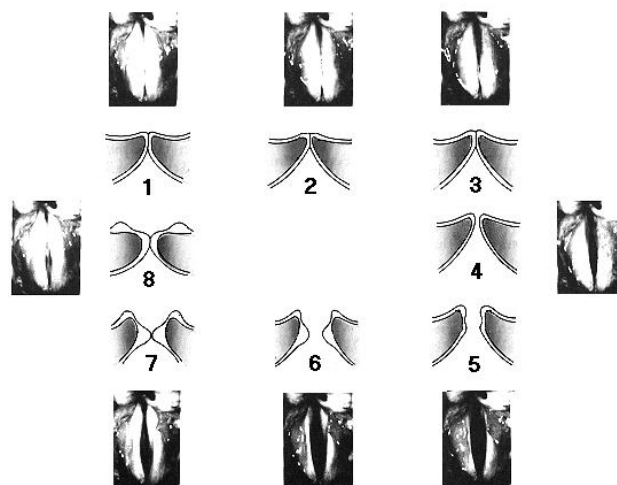


Figura 2.11. O ciclo vibratório. Alguns estágios importantes do ciclo vibratório estão indicados, mas os intervalos de tempo entre os quadros não é necessariamente igual. Adaptado de Schönhärl (1960) e de Baken (1987, p. 222).

desta onde varia de aproximadamente 0,5 a 2,0 m/s, sendo este valor positivamente correlacionado com a frequência fundamental (F_0), isto é, a velocidade da onda mucosa aumenta ou diminui com o aumento ou diminuição de F_0 (Titze, Jiang, & Hsiao, 1993). O movimento muco-ondulatório também pode sofrer a influência da colisão entre as pregas vocais e, possivelmente, de reflexões da onda mucosa ao incidirem nas paredes laterais do ventrículo.

A existência de ondas mucosas em exames vidolaringoestroboscópicos tem importantes implicações clínicas. A ausência de um movimento muco-ondulatório pode, por vezes, ser o único indício da existência de lesões internas nas pregas vocais (como a aderência do revestimento mucoso ao ligamento vocal, ou infiltrações malignas). A falta de uma hidratação adequada, que mantém a cobertura da prega flexível, também pode reduzir a onda mucosa. Há patologias que causam um aumento na onda mucosa mas, em geral, uma onda de grande amplitude numa prega vocal visualmente normal é uma indicação de uma prega saudável que vibra eficientemente. Por “eficiência, entende-se que as vibrações estão criando uma intensa *variação* de pressão sonora a partir de uma pressão subglótica praticamente *constante*.”

A Figura 2.11 mostra que há uma defasagem (atraso) da borda superior em relação à borda inferior de cada prega vocal. Esta *diferença de fase vertical* está relacionada com importantes fenômenos aerodinâmicos que ajudam a manter as vibrações (Ishizaka & Matsudaira, 1972; Ishizaka & Flanagan, 1972; Broad, 1979; Titze, 1988). Verifica-se que o atraso de fase vertical (que é de $60^\circ/\text{mm}$ a $30^\circ/\text{mm}$) varia inversamente com a velocidade de propagação da onda mucosa. Na verdade, o atraso de fase, associado à alternância entre as bordas inferior e superior, e o movimento muco-ondulatório são faces diferentes de um mesmo fenômeno vibratório (Titze, Jiang & Hsiao, 1993).

Em resumo, o padrão vibratório discutido acima possui uma fase de abertura que se inicia com a separação das bordas inferiores das pregas vocais, apresentando ainda (1) uma diferença de fase vertical entre as bordas inferiores e superiores das pregas e (2) uma propagação de energia mecânica (onda mucosa) através da cobertura das pregas. Numa próxima seção, estes aspectos serão discutidos em conjunto com um modelo simples das pregas vocais, o chamado *Modelo a Duas Massas*, que é amplamente utilizado no estudo dos fenômenos físicos da vibração mas, na sequência, é oportuno ter-se mais algumas considerações sobre a interação das forças associadas ao fluxo aéreo e o movimento das pregas vocais.

2.3.3 Sobre a aerodinâmica vibratória

Na fonação, uma pressão subglótica aproximadamente constante é transformada em pulsos de ar em virtude do movimento vibratório das pregas vocais. Contudo, em qualquer sistemas físicos oscilante há uma queda na amplitude das oscilações devido a perdas de energia por alguma forma de atrito. Em muitas situações, como no caso de uma criança sendo empurrada em um balanço, as perdas são compensadas por pequenos empurrões dados numa direção adequada e num momento certo das oscilações.⁷ Algo semelhante ocorre no caso da fonação, como será discutido abaixo.

Na fonação, as deformações sofridas pela cobertura da prega vocal criam dois “lábios”, o inferior e o superior, que se movimentam com um certo antagonismo ou “defasagem vertical”. Em outras palavras, enquanto os lábios inferiores estão se aproximando, os lábios superiores estão se separando, e vice-versa. Se não houvesse alguma forma de fornecimento de energia-extra às vibrações, elas apresentariam uma amplitude decrescente até parar. Porém, as vibrações do conjunto formado pelos pulmões e laringe ocorrem de forma auto-sustentada. Isto ocorre porque há dois mecanismos distintos de compensação de perdas: um atuando sobre as bordas inferiores e outro atuando sobre as bordas superiores.

O mecanismo que age sobre as bordas inferiores é, essencialmente, o efeito Bernoulli, que pode ser demonstrado utilizando-se duas tiras de papel colocadas paralelamente na posição vertical (Figura 2.12). Ao soprar-se entre as tiras, o ar é acelerado, tornando-se rarefeito e levando a uma queda de pressão. Como a pressão entre as folhas fica menor que a pressão externa, elas se aproximam (mas permanecem em contacto, sem oscilar).

Na fonação, o efeito Bernoulli colabora com manutenção do movimento vibratório: quando o fluxo transglótico é acelerado durante a abertura glotal, a região intraglótica torna-se mais rarefeita e perde pressão. Em consequência, a prega vocal ou, mais precisamente, os lábios inferiores das pregas, são sugados, o que ajuda a aproximá-los justamente *num momento em que as bordas inferiores também estão sendo aproximadas* por outras forças (no caso, a recuperação elástica de tecidos

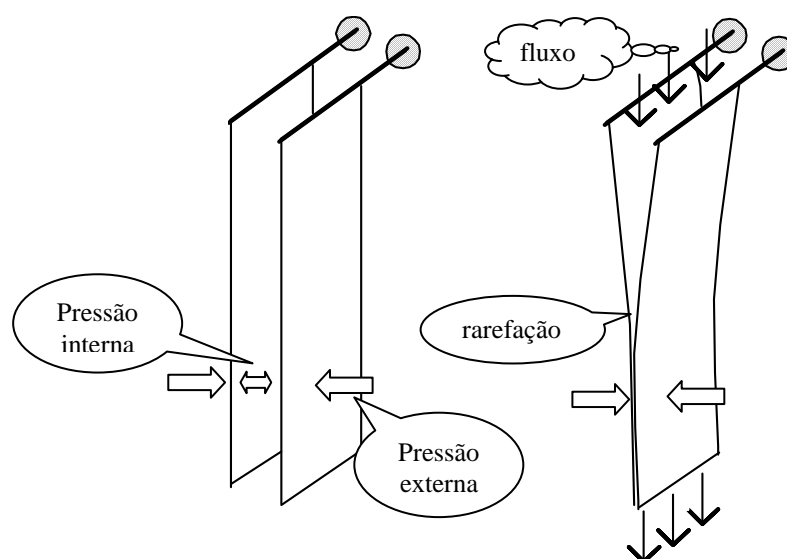


Figura 2.12. O Efeito Bernoulli. No painel da esquerda, não há fluxo entre as folhas de papel; a pressão interna é igual à pressão externa e as folhas estão em repouso verticalmente. No painel da direita, soprando-se entre as folhas, haverá uma rarefação do ar devido ao seu deslocamento, o que leva a uma queda da pressão interna e à aproximação das tiras de papel.

comprimidos na fase de abertura). Estudos físicos detalhados indicam que a força de sucção aumenta com o distanciamento entre as bordas inferior e superior (Broad, 1989; Titze, 1988) antes do momento da abertura. Em outras palavras, quanto maior a diferença de fase vertical maior será a força de sucção exercida pelo efeito Bernoulli sobre os lábios inferiores.

Uma sutileza importante é que o efeito Bernoulli não atua sobre os lábios superiores, ou seja,

o fechamento total da parte inferior da glote não resulta em queda de pressão na região dos lábios superiores. Isto ocorre porque os níveis de pressão na região superior da glote não variam muito, pois são praticamente iguais à pressão atmosférica. Se, hipoteticamente, as bordas superiores fossem sugadas, as pregas perderiam aquela energia extra que foi adquirida pela sucção das bordas inferiores. Portanto, a variação de área na borda superior dispara mecanismos aerodinâmicos de sucção na borda inferior, mas a recíproca não é verdadeira.

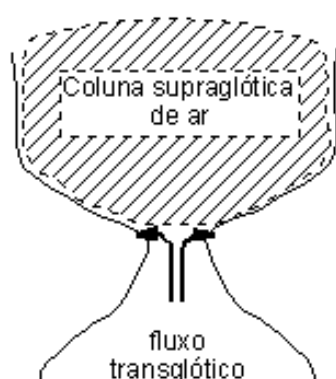
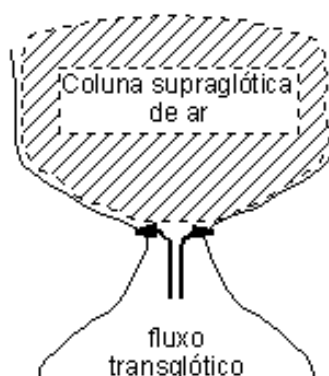


Figura 2.13. Inércia do ar supraglótico. Imediatamente após a abertura glótica, a coluna de ar supraglótica está parada. Isto faz com que o ar transglótico expanda-se lateralmente,

7. Exercício 2. Suponha que um indivíduo esteja balançando numa gangorra. (1) Descreva qualitativamente a variação da força de sucção dada por dois adultos posicionados na posição de máximo deslocamento; (2) Descreva os empurrões de um único adulto, dados na posição vertical do balanço.

Forças atuando sobre os lábios superiores das pregas vocais e que são favoráveis ao movimento lateral das pregas também podem auxiliar na superação de perdas. Imediatamente após a abertura da borda superior o fluxo de ar que tenta escapar pela glote encontra uma coluna de ar em repouso na região supraglótica. Em virtude da inércia desta massa de ar supraglótica, o fluxo translótico não pode fluir imediatamente na direção vertical, sofrendo uma expansão lateral. Esta componente lateral do fluxo está no *mesmo sentido do movimento de separação das bordas superiores* das pregas vocais, dando-lhe um empurrão-extra, que ajuda na superação das perdas de



energia do movimento livre das pregas (

Figura 2.13).

As influências do efeito Bernoulli e da inércia do ar supraglótico ocorrem em momentos diferentes do ciclo vibratório e é necessário que transcorra algum tempo para que cada uma destes fenômenos tenha efeito. Este tempo é dado pela diferença de fase vertical. Por um lado, quanto maior a separação entre as bordas inferiores *antes da abertura da borda superior*, maior será a força de sucção pelo efeito Bernoulli. Por outro lado, quanto maior o deslocamento lateral dos lábios superiores após a abertura (e antes do fechamento das bordas inferiores), maior a energia-extra ganha na expansão lateral do fluxo translótico. Por isso, uma maior a diferença de fase vertical facilita a manutenção das

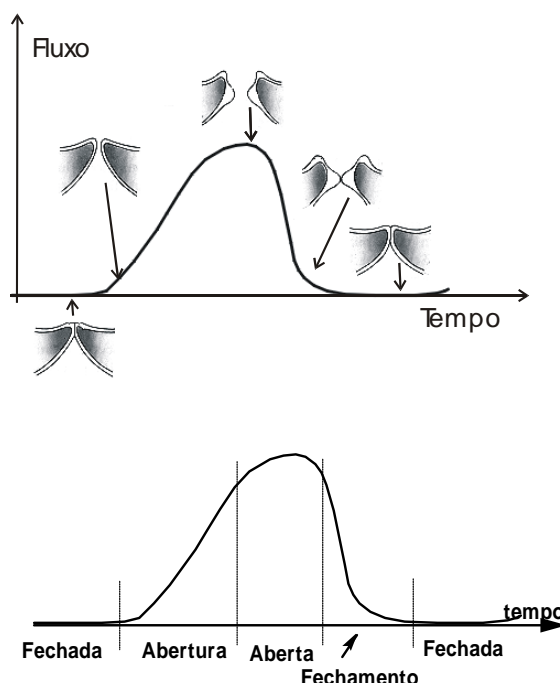


Figura 2.14. O pulso glotal. Representação do aumento do fluxo com o aumento da abertura glotal. O painel inferior mostra as diversas fase de um ciclo fonatório. Note que a fase de fechamento é mais rápida que a fase de abertura.

oscilações. Verifica-se que diferenças de fases elevadas ocorrem quando há ondas mucosas de baixa velocidade (Titze, 1988) o que, em termos anátomo-funcionais, implica em numa cobertura macia, flácida e sem obstáculos (como um cisto) que impeçam o movimento muco-ondulatório.

2.3.4 Algumas características do pulso glotal

O movimento vibratório das pregas vocais determina a forma dos pulsos de ar que fluem pela glote. Esta sequência de pulsos é, efetivamente, a “fonte” ou excitação acústica das cavidades do trato vocal. Utilizando-se transdutores adequados ou processamentos computacionais sobre o sinal acústico captado por um microfone, é possível registrar-se graficamente o comportamento do fluxo aéreo ao longo do tempo. Estudando-se estes gráficos, muitas características da fisiologia do movimento vibratório e da acústica dos sinais de voz podem ser avaliadas, como discutido abaixo.

O formato do pulso e o as vibrações das pregas vocais. Uma representação esquemática da formação do pulso glotal ao longo do ciclo vibratório é apresentada na Figura 2.14. Note que o fluxo aumenta após a abertura dos lábios superiores, adquire um valor máximo quando a abertura glótica é máxima e começa a decrescer no momento em que as bordas inferiores começam a se aproximar. Após o toque das bordas inferiores, o fluxo cai a zero, permanecendo assim até o início da abertura do próximo ciclo vibratório.

No estudo da fonação é usual definir-se as seguintes fases do ciclo vibratório :

1. Fechada,
2. Abertura,
3. Aberta,
4. Fechamento.

Como está sugerido no painel inferior da Figura 2.14, a abertura é mais lenta que a o fechamento. Isto está ligado aos dois mecanismos de superação das perdas de energia mencionados anteriormente, ou seja: durante a fase de abertura, a inércia da coluna de ar supraglótica faz uma oposição ao fluxo, causando um atraso no seu aumento ao longo do tempo; por outro lado, na fase de fechamento, o efeito Bernoulli acelera a velocidade de aproximação das bordas inferiores. A combinação destes efeitos causa uma *assimetria* no pulso glótico tal que o pulso é *inclinado para direita*. Quanto maior esta inclinação, maior a velocidade do fechamento.

A repetição dos pulsos ocorre quasi-periodicamente. O intervalo de tempo (em segundos) entre dois pulsos é chamado de *período fundamental*, T_0 , sendo a frequência fundamental (em hertz) dada pelo seu inverso, isto é:

$$F_0 = 1/T_0.$$

Uma pessoa com voz grave possui um valor relativamente baixo de F_0 ou, de forma inversa, uma longa duração entre ciclos consecutivos; o oposto ocorre na voz aguda. Como exemplo, o som associada aos pulsos do painel superior da Figura 2.15 soaria mais agudo que o som dos pulsos do painel central da figura.

Durante a fase fechada não há, obviamente, escape de ar. Se, de alguma forma, a duração da fase fechada for aumentada, é possível manter-se a fonação por um tempo maior com menos escape de ar. Este recurso é usado com maestria pelos cantores líricos. Por outro lado, diversas patologias levam a um fechamento incompleto durante o que deveria ser a fase fechada do ciclo. Isto resulta em escape excessivo de ar e na produção de ruído de alta frequência devido a um fluxo turbulento por “fendas” glóticas. Situação semelhante ocorre na fala sussurrada.

A discussões anteriores indicam que uma fase de fechamento rápida é uma indicação de um “bom” movimento muco-ondulatório e, portanto, de uma camada de cobertura saudável. Isto também trás implicações importantes em termos acústicos, como discutido abaixo.

Implicações acústicas da forma do pulso glotal. A forma do fluxo varia proporcionalmente com a área da abertura glotal. A amplitude do pulso (e a intensidade da voz), por sua vez, aumentam com a pressão subglótica. Estudos experimentais e teóricos mostram que a dependência entre o fluxo glotal $Q(t)$ e a área glotal, $A(t)$, pode ser aproximado por:

$$Q(t) = A(t) \sqrt{2 \cdot P_{sg} / \rho},$$

onde $A(t)$ representa a variação temporal da área glótica, P_{sg} é a pressão subglótica e ρ é a densidade do ar. A amplitude do fluxo aumenta com a pressão subglótica e, se P_{sg} e ρ forem constantes, a forma do fluxo será determinado somente pela variação da área glotal. O comportamento da área glotal e o fluxo glotal correspondente está exemplificado na Figura 2.16.

Note ainda na Figura 2.16 que a máxima abertura glótica na fonação é $\approx 18 \text{ mm}^2$. Como o comprimento das pregas vocais é da ordem de 20 mm, pode-se concluir que a abertura

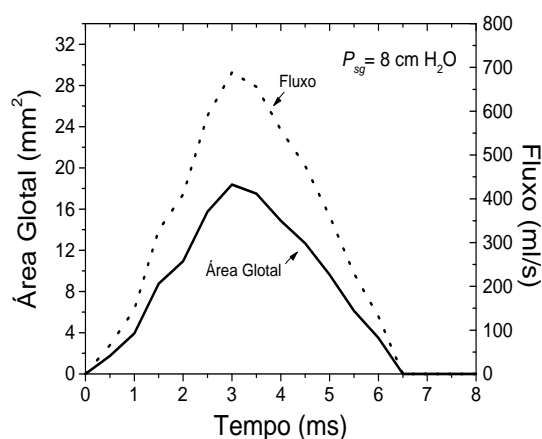


Figura 2.16. Variação temporal da área glotal. Comportamento da área glotal $A(t)$ obtida por imagens endoscópicas. O fluxo de ar $Q(t)$ foi calculado para $P_{sg} = 8 \text{ cm H}_2\text{O}$. Baseado em Flanagan (1972).

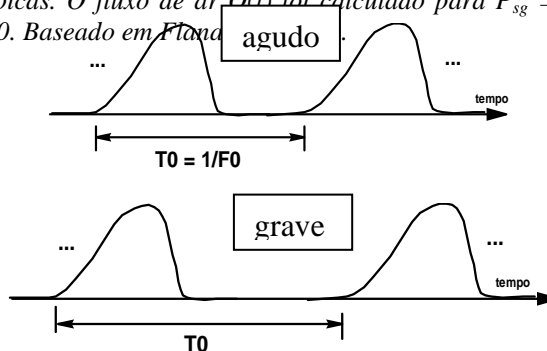


Figura 2.15. A fonte glótica. Cada painel mostra apenas dois pulsos glotais mas supõe-se que eles se repitam indefinidamente. O período fundamental (T_0) é menor nas vibrações representadas no painel superior. Quanto menor o valor de T_0 , maior a frequência fundamental ($F_0 = 1/T_0$) e mais agudo é o som.

glotal máxima durante a fonação é inferior a 1 mm.

A sequência de pulsos glóticos é quasi-periódica mas as oscilações não são movimentos harmônicos simples. Porém, elas podem ser representadas pela superposição de um conjunto de oscilações harmônicas simples. As frequência destas oscilações harmônicas serão múltiplas da frequência fundamental e a amplitude de cada harmônico diminui com o aumento da frequência. Isto está ilustrado na Figura 2.17. Estude-a atentamente.

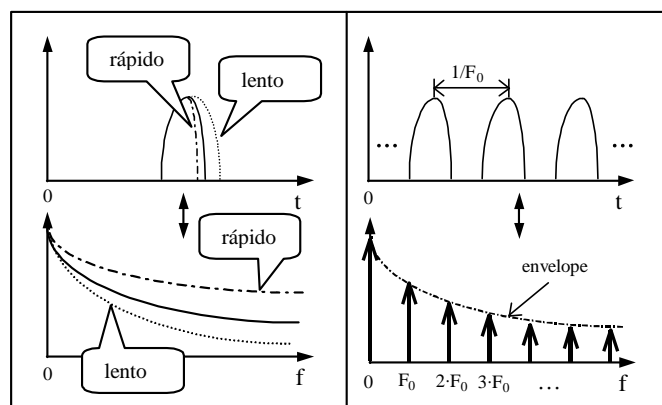


Figura 2.17. Espectro laríngeo. Esquerda: um pulso isolado tem energia em todas as frequências, mas a intensidade desta energia depende da velocidade de fechamento. Quanto mais rápido o fechamento, menor a inclinação do envelope espectral, isto é, maiores as intensidades em altas frequências. Direita: A repetição de pulsos na frequência F_0 resulta num espectro que tem energia apenas nas frequências múltiplas de F_0 . Porém, a intensidade dos harmônicos é determinada pelo “envelope” espectral associado ao pulso isolado.

Um aspecto acústico relevante associado à assimetria do pulso glotal está indicado nos painéis à esquerda da figura Figura 2.17: *quanto mais rápida a velocidade de fechamento, mais intensos são os harmônicos de alta frequência*. Na natureza, em geral, quanto mais rápidas forem as variações temporais de um fenômeno, mais intensas serão as componentes de alta frequência geradas. Perceptivamente, o fechamento mais rápido resulta numa voz mais “forte” devido à amplificação dos componentes de alta frequência.

Uma analogia que pode auxiliar o entendimento da importância da velocidade de fechamento consiste em imaginar um pequeno escritório, tendo vários papéis sobre uma mesa e a sua porta aberta. Se fecharmos a porta lentamente, os papéis não serão afetados por este movimento. Contudo, um rápido fechamento causará uma agitação dentro do ambiente, espalhando todos os papéis.

O movimento vibratório causa perturbações no ar contido no trato vocal (faringe, boca). Durante a fase de abertura do ciclo glotal a coluna de ar supraglótica é comprimida mas, na fase de fechamento, a coluna de ar recém comprimida pode expandir-se. Durante a fase fechada há, na verdade, várias expansões e compressões da coluna de ar. Isto constitui um movimento vibratório complexo determinado pela forma do trato vocal, que depende, por sua vez, da posição dos articuladores (língua, mandíbula, lábios, véu palatino), como ilustrado na Figura 2.18. As características das vibrações do ar contido no trato vocal têm atributos lingüísticos, como o tipo de vogal (/a/, /e/, /i/, etc.), e paralingüísticos, ligados a peculiaridades do timbre da voz. Alguns destes aspectos serão estudados em outro capítulo.

A resistência glotal. A glote comporta-se como uma obstrução ao fluxo aéreo. Costuma-se definir a chamada resistência glotal, R_g , como:

$$Rg = P_{sg} / Q_{med}$$

onde Q_{med} é o valor médio do fluxo. Valores típicos (voz modal) são $P_{sg} = 5-10$ cm H₂O e $Q_{med} = 100-200$ ml/s. Esta definição tem alguma utilidade clínica. Note, por exemplo, que um baixo valor de Rg pode ser causado por um alto valor de fluxo que, por sua vez, pode estar associado a uma fenda glótica durante a fonação; estas fendas, como será visto posteriormente, podem ser causadas por diversas patologias que afetam as pregas vocais. Baixos valores da resistência glótica também podem ser causados por problemas respiratórios que reduzem o valor da pressão subglótica. A combinação dos dois problemas é comum nos chamados quadros hipofuncionais. Por outro lado, altos valores de Rg sugerem um quadro hiperfuncional, com a ressalva que cantores líricos tendem a ter pouquíssimo escape de ar na voz cantada.

Através de máscaras especiais é possível medir-se o valor médio do fluxo fonatório. Porém, a medição direta da pressão subglótica não é simples. Na prática, utilizam-se sensores de pressão intra-orais (supraglóticos) e mede-se a pressão oral imediatamente após a explosão de consoantes oclusivas surdas na repetição de sílabas como “pá pá pá”. O valor da pressão intra-oral é uma boa estimativa da pressão subglótica (Löfqvist, Carlborg & Kitzing, 1982).

2.3.5 O modelo a duas massas

A modelagem físico-matemática da vibração glotal permite que se façam ensaios numéricos para *simular* o comportamento real das pregas vocais. Isto justifica-se pois nem sempre é possível montar-se experimentos utilizando-se seres humanos ou mesmo laringes extirpadas. Numa visão futurística,

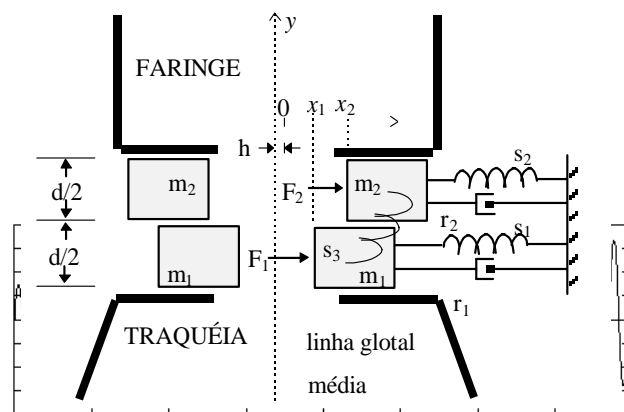


Figura 2.19- Oscilações das duas massas a) supraglóticas e b) hipófaríngeas de alguns preséus anglo-italais, as respectivas roscas glóticas (energia) e da pressão (no caso b) em despesa da duração e o comprimento da oscilação (durante o inflexão). Embora a oscilação seja de fato a das duas, este é o início da principal vibração impulsionada pela glote e pelo anticonsonante. O deslocamento das massas em relação à posição de repouso é x_1 e x_2 . Baseado em Broad (1979, p. 219).

simulações computadorizadas poderão vir a ter alguma contribuição no processo de decisão médica permitindo prever, por exemplo, possíveis efeitos de uma fonocirurgia sobre a voz de um paciente.

Os modelos atuais, contudo, ainda não permitem simulações tão sofisticadas, sendo utilizados apenas para revelar fenômenos básicos de interação entre as forças aerodinâmicas e o deslocamento das pregas vocais. Além disso, e apesar dos elaborados cálculos inseridos nos modelos, a maior parte dos resultados só pode ser interpretada qualitativamente. As dificuldades em modelar-se matematicamente a fonação incluem: a complicada geometria tridimensional, as propriedades não-lineares dos tecidos laríngeos e as dificuldades de realizar-se medições de propriedades dos tecidos *in vivo*. Avanços na técnica de ressonância magnética certamente levarão a imagens mais detalhadas da laringe em movimento, refinando os atuais modelos.

Uma das contribuições mais importantes para a compreensão dos fenômenos aerodinâmicos intraglóicos foi dada por Ishizaka & Matsudaira (1972). As idéias destes pesquisadores estão baseadas em fenômenos ligados à separação do fluxo na borda superior da glote e à diferença de fase vertical entre as bordas inferior e superior de cada prega. Estes princípios foram demonstrados experimentalmente utilizando-se modelos físico-computacionais simples, conhecidos como modelos a duas massas (Ishizaka & Matsudaira, 1972; Ishizaka & Flanagan, 1972), que foram confirmados posteriormente por Titze (1988) utilizando um modelo corpo-cobertura mais elaborado.

O modelo a duas massas é mostrado resumidamente na Figura 2.19. Não há uma interpretação clara para o significado de cada massa, mas elas representam, de certa forma (1) a alternância das bordas inferiores e superiores das pregas vocais e (2) a cobertura e o corpo das pregas. Na maioria das simulações, a massa superior é menor que a massa inferior, podendo-se associar a massa inferior ao corpo e a massa superior à cobertura das pregas. As molas (s) representam as forças elásticas dos músculos e ligamentos, enquanto os amortecedores (r) representam diversos mecanismos de perda de energia. A mola s_3 representa o acoplamento mecânico entre as partes inferior e superior da prega, fornecendo a força mecânica que tende a puxar as massas para a posição de equilíbrio quando há um deslocamento relativo entre elas. A força F_1 está associada à pressão subglótica, enquanto a força F_2 (associada à pressão supraglótica, que é aproximadamente igual à pressão atmosférica de referência, ou zero) é praticamente nula no modelo.

Embora isto não esteja indicado na Figura 2.19, o fluxo aéreo cria uma “mola aerodinâmica” que se opõe a s_3 e só atua quando há deslocamento relativo entre as duas massas. Esta mola aerodinâmica pode ser expressa matematicamente por (Broad, 1979):

$$\Phi = P_{SG} \cdot l \cdot d / h$$

onde P_{SG} é a pressão subglótica, l é o comprimento da prega vocal, d é a sua espessura e h é a metade do espaçamento entre as pregas no repouso. Pode ser demonstrado que para haver oscilações, a mola aerodinâmica deve ter um valor “moderado”, tal que Φ seja maior que o acoplamento mecânico s_3 entre as bordas inferior e superior, mas menor que as forças restauradoras atuando sobre m_1 (isto é,

$s_3 < \Phi < s_1 + s_3$). Verifica-se (Titze, 1988), que a condição $s_3 < \Phi$ também pode ser interpretada como a velocidade da *onda mucosa* tendo um valor menor que um certo limite pois, caso contrário, o tempo de atraso entre o movimento das bordas inferior e superior seria insuficiente para permitir que haja transferência de energia aerodinâmica para as massas, vencendo a rigidez do acoplamento entre elas.

Pequenos valores da mola aerodinâmica Φ parecem estar associados a ajustes fonatórios hipofuncionais, isto é, uma combinação de uma baixa pressão subglotal (P_{sg}), reduzida superfície de contato lateral entre as pregas vocais (d) e elevada fenda fonatória (h). Por outro lado, elevados valores de Φ parecem estar associados a ajustes fonatórios hipertensos, isto é, uma combinação de alta pressão suglotal, elevada força de adução (reduzindo h) e um aumento na compressão medial (aumentando d). Em termos clínicos, este quadro hipertenso pode estar relacionado, por exemplo, a uma compensação muscular devido a uma mucosa seca ou rígida, ou a uma lesão (como um cisto) que obstrui a onda mucosa; no modelo, isto seria traduzido em um alto valor para s_3 . Note ainda que valores muito elevados de s_3 tendem a unir as duas massas, que passariam a comportar-se como uma única massa, não havendo diferença de fase vertical e onda mucosa. O modelo de prega vocal com apenas uma massa necessita de uma grande pressão supraglótica para vibrar.

Refinamentos no modelo a duas massas (como a inclusão de propriedades não-lineares dos tecidos, forças restauradores devido à colisão entre as pregas vocais e o efeito do trato vocal supra e sub-laríngeo) foram adotados em estudos conduzidos por Ishizaka & Flanagan (1972). As simulações computadorizadas destes autores levaram a diversos resultados bem semelhantes aos observados na fonação de seres humanos, como (1) uma diferença de fase vertical de 55° ; (2) uma relação entre a duração da fase aberta e do período total de cada período (i.e, coeficiente de abertura) de 60%; e (3) uma dependência entre a frequência fundamental e a pressão subglótica de 2,5 Hz/cm H₂O.⁸

Modificações no modelo a duas massas e outros modelos da vibração larínge também foram utilizadas para estudar outros aspectos da fonação, como (1) os efeitos vibratórios de assimetrias contralaterais na tensão longitudinal das pregas vocais (Ishizaka & Isshiki, 1976; Isshiki et al., 1977); (2) a influência de alterações na rigidez e massa das pregas vocais no sinal acústico (Wong et al., 1991); e (4) a possível massa e volume de patologias orgânicas (pólipos) em pregas vocais (Koizumi, Taniguchi & Itakura, 1993); (5) o efeito da hidratação da mucosa laríngea na fonação (Ticona, 1999).

Esta seção discutiu a relevância da diferença de dois aspectos inter-relacionados da vibração fonatória: a diferença de fase vertical entre as bordas superiores e inferiores e a onda mucosa na chamada *voz modal*. Outros modos de vibração laríngea serão discutidos em seguida.

⁸ O aumento da frequência fundamental com o aumento da pressão subglótica (P_{sg}) ocorre porque uma maior valor de P_{sg} causa um maior deslocamento da pregas o que, por sua vez, alonga e aumenta a tensão longitudinal *média* durante o ciclo vibratório. Consequentemente, a frequência fundamental aumenta (Titze, 1989).

2.4 AJUSTES LARÍNGEOS E QUALIDADE DE VOZ

As discussões sobre a fonação e a produção de sons na laringe foram limitadas, até o momento, ao padrão vibratório ilustrado na Figura 2.11, que corresponde à chamada “voz modal”. As pregas vocais são capazes de propiciar a produção de sons com outras características acústicas e perceptivas, incluindo ruídos sibilantes, dependendo de certos ajustes musculares e da pressão subglótica.

Na linguagem comum e especializada encontra-se um enorme número de adjetivos para descrever as sensações que a voz pode despertar em um ouvinte (Laver, 1974). O leigo nas questões de produção de voz utiliza termos impressionísticos que são, em geral, metafóricos (i.e., despertam associações táteis, visuais, etc.) e holísticos (i.e., descrevem a característica principal da voz); como exemplo temos: voz sibilante, limpa, rouca, de lata, de taquara rachada, doce, aveludada, afeminada, etc. O estudioso da produção da voz, por outro lado, deve utilizar adjetivos mais específicos e que estejam relacionados a aspectos particulares da anatomia e/ou fisiologia laríngea. Isto nos leva ao conceito de “registro vocal”.

O termo *registro* origina da música (de certos controles dos órgãos de tubos) e foi absorvido pela ciência da fala através de descrições impressionísticas da voz cantada. Uma definição amplamente utilizada para registro vocal é aquela dada por Hollien (1974, p. 125), que afirma que:

- o registro é um evento de natureza laríngea;
- os registros possuem correlatos fisiológicos, aerodinâmicos, acústicos e perceptivos;
- cada registro é caracterizado por uma faixa de frequências fundamentais da voz, cada faixa tendo correlatos aproximadamente iguais;
- há pouca sobreposição entre a frequência fundamental de registros adjacentes.

A literatura da produção da voz relata um grande número de registros diferentes, nomes diferentes para um mesmo registro, bem como controvérsias sobre a existência de certos registros (Mörner, Fransson & Fant, 1964; Bunch, 1995, pp. 77-78). Evitando entrar nesta polêmica, este texto utilizará os conceitos de “ajustes laríngenos” introduzidos por Laver (1981). Estes conceitos estão em harmonia com (e estendem) a definição de registro dada por Hollien, tendo também um forte embasamento anátomo-fisiológico. Ocasionalmente, alguns termos mais comuns do jargão dos registros serão mencionados.

Os ajustes laríngenos dependem de certos ajustes na tensão da musculatura laríngea intrínseca que definem a forma da glote, assim como da pressão subglótica. A forma da glote é determinada, principalmente, pela força de adução (músculos IA), de compressão medial (músculo CAL) e de tensão longitudinal (músculo CT). Dependendo dos ajustes na musculatura laríngea intrínseca, são necessárias adequações nos níveis de pressão subglótica para vencer o obstáculo representado por certas forças musculares. Diversos ajustes laríngenos são possíveis, mas há quatro tipos que levam a características perceptivas marcantes: a voz modal, o falsete, a crepitação e o sussuro (Figura 2.20).

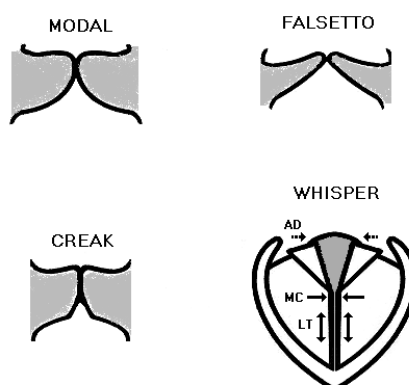


Figura 2.20. Ajustes fonatórios. Cortes esquemáticos nos planos coronal (painéis: modal, falsete, crepitante/creak e áspero/harsh) e visão endoscópica (painel: whisper/sussurro). No quadro do sussuro são mostradas as principais forças que definem a forma glótica: Compressão medial (MC), tensão longitudinal (LT) e força de adução (AD). Esta última foi mostrada por linhas tracejadas indicando seu reduzido valor no sussuro. Baseado em Beck (1988, Fig. 2.1-2.5).

Segundo Laver (1981), as diversas variações na qualidade de voz podem ser produzidas com a combinação adequada de alguns poucos ajustes laríngeos especiais. Na sua discussão sobre ajustes laríngeos, ele argumenta que o som, incluindo a vibração fonatória quasi-periódica e o ruído turbulento, podem ser gerados na laringe sobrepondo-se quatro ajustes elementares:

1. *modal*,
2. *falsete*,
3. *crepitante*, e
4. *sussurro*.

O sussuro pode não possuir um termo correspondente no repertório dos registros porque registros parecem estar associados somente à vibração de pregas vocais. Por motivos que ficarão aparentes abaixo, os ajustes modal e falsete são mutuamente exclusivos. Além dos quatro ajustes elementares mencionados, Laver também definiu uma condição extra, a *aspereza* que é um ajuste modificador dos quatro modos básicos.⁹ Embora seja fisiologicamente possível a produção de ajustes como o “falsete crepitante”, a existência destas situações atípicas pode sugerir que haja uma anormalidade laríngea subjacente. Alguns atributos dos quatro ajustes laríngeos elementares e da condição de aspereza serão discutidos na sequência.

⁹ Ele também definiu a *soprosidade* como um ajuste que é fisiologicamente diferente do sussurro e que ocorreria juntamente com a voz modal. Perceptivamente, háveria um certo contínuo desde a soprosidade até o sussurro. Entretanto, a soprosidade por ele definida não é mais utilizada em protocolos para a avaliação clínica da qualidade de voz baseados em suas idéias. De acordo com Beck (1988, pp 171-172) a soprosidade está associada a situações íntimas, sendo rara na fala utilizada publicamente.

2.4.1 A voz modal

O ajuste modal é o ajuste “neutro” utilizado na fala habitual da maioria das pessoas. A forma laríngea e o comportamento vibratório das pregas vocais neste ajuste foram discutidos anteriormente nas seções 2.3.2 e 2.3.3. Como foi visto, há uma alternância entre as bordas inferior e superior de cada prega, e a existência de uma onda mucosa que se propaga pela cobertura. Outro aspecto relevante é a maior velocidade da fase de fechamento de cada ciclo glotal; consequentemente, o pulso aéreo é assimétrico e inclinado para a direita. As vibrações puramente modais são bastante regulares (quasi-periódicas) e não são produzidos níveis significativos de fluxo aéreo turbulento.

As principais características do espectro dos pulsos laríngeos modais são:

- Frequência fundamental (F_0) nas faixas de 94-287 Hz (homens adultos) e 144-538 Hz (mulheres adultas), aproximadamente, com valores médios de aproximadamente 117 Hz (homens adultos) e 217 Hz (mulheres adultas), conforme Baken (1987, pp. 154-157).
- Queda na envoltória espectral a uma taxa de cerca de -12 dB/oitava;
- Coeficiente de fechamento (i.e., razão entre a duração da fase de abertura e a duração do ciclo glotal) de cerca de 50%.

Cantores, em particular, parecem se denominar as frequências graves ...

As características fisiológicas, acústicas e perceptivas da voz modal serão tomadas como referência para a comparação com outros ajustes fonatórios. (voz basal, de peito e de cabeça: faixas de frequência da voz modal)

2.4.2 Falsete

A principal característica acústica do falsete é a elevada frequência fundamental, que está na faixa de aproximadamente 275-634 Hz (homens adultos) e 495-1131 Hz (mulheres adultas), conforme Childers and Lee (1991, p. 2395). Fisiologicamente, há um grande aumento na ação dos músculos cricotireóideos (CT), levando a um aumento da tensão longitudinal e a um afinamento das pregas vocais, reduzindo a massa vibrante da cobertura (figura 2.13). Além disso, pode haver uma pequena fenda glótica longitudinal e uma pequena diminuição na pressão subglótica.

Fisicamente, o aumento em F_0 pode ser explicado por meio de uma expressão bastante conhecida para a frequência fundamental de uma corda de comprimento L , densidade linear de massa μ (kg/m), fixa nas duas extremidades e submetida a uma força tensora τ (N), isto é:

$$F_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\tau / \mu}.$$

Embora cada prega se alongue sobre a ação do CT (o que diminuiria F_0), o aumento de tensão e a diminuição da massa vibrante são mais significativos, o que efetivamente eleva a frequência fundamental.

Não há relatos de ondas mucosas observadas em imagens em alta-velocidade do falsete (Zemlin, 1964, p. 155). Em outras palavras, não haveria alternância entre a borda inferior e superior de cada prega. Na verdade, a prega parece comportar-se como uma única e pequena massa.

Os pulsos de ar produzidos em falsete são mais simétricos (não havendo a forte inclinação para a direita dos pulsos modais associada à maior velocidade de fechamento). Esta simetria está relacionada com a falta de alternância entre as bordas superior e inferior, já que a prega se comporta como uma única massa. Além disso, uma possível fenda glótica propicia um elevado escape de ar, acrescentando uma componente contínua de fluxo durante a fase fechada. Esta combinação de fatores resulta em pulsos laríngeos com formato mais semelhante a uma senóide.

A consequência espectral disso é que o espectro dos pulsos de ar em falsete apresenta um valor muito mais acentuado próximo à frequência fundamental, com uma queda de -18 dB/oitava (abaixo de 2 kHz) que é maior que os -12 dB/oitava da voz modal. Acima de 2 kHz, observa-se um espectro mais plano e com indícios de ruído glótico. Devido à queda espectral mais acentuada, os harmônicos de alta frequência têm amplitude menor. Perceptivamente, o falsete é um som mais fraco, havendo ainda uma possível componente de ruído de fricção, devido à turbulência por uma fenda glótica.

O falsete é um recurso empregado por cantores para alcançar notas agudas e por ventrílocos. Ele não é um ajuste habitual, pelo menos nas línguas ocidentais e, quando utilizado regularmente na fala de uma pessoa, pode ser indício de alguma anormalidade laríngea.

2.4.3 Crepitação

A crepitação¹⁰ é caracterizada acusticamente por frequências fundamentais abaixo de cerca de 70 Hz. Consequentemente, percebe-se de pulsos distintos em baixa frequência, donde vem a denominação “registro de pulso” encontrada na literatura. Além disso, a crepitação parece ser percebida quando a queda de intensidade do sinal acústico entre ciclos adjacentes é maior que cerca de 50%. Isto gera subharmônicos ($F_0/2$, $F_0/3$, $F_0/4$, etc) e um alto nível de aspereza (Titze, 1994). Este mecanismo de produção de crepitação pode ocorrer em altos valores de F_0 , desde que os subharmônicos sejam menores que 70 Hz, aproximadamente.

No tocante às características vibratórias, o principal aspecto é produção de pulsos curtos (10-25% do período glotal) seguidos de uma longa fase de fechamento. O estreitamento do pulso glotal pode ser explicado pelo altos elevados valores de diferença de fase vertical que ocorrem neste ajuste, uma vez que cobertura da prega é maior e mais macia, resultando em maior diferença de fase vertical e em fechamentos mais rápidos das bordas inferiores. A abertura *glotal curta e rápida* resulta em um

¹⁰ Em geral, denominada *creak* na literatura britânica *fry* na literatura dos EUA.

espectro laríngeo com queda menor (-6 dB/oitava), isto é, harmônicos de alta frequência mais intensos.

O estudo de filmagens em alta velocidade revela que podem ocorrer, na verdade, duas ou três seqüências de abertura em cada ciclo glotal, embora este fato não seja pré-requisito para a percepção de crepitação (Whitehead, Metz & Whitehead, 1984). Aberturas múltiplas dentro de um mesmo ciclo também foram previstos em simulações

com modelos teóricos da vibração de tecidos laríngeos (Titze & Strong, 1975) ou com o uso de eletroglotógrafos, que são instrumentos sensíveis à área de contato entre as pregas vocais. A vibração crepitante também foi simulada introduzindo-se assimetrias contralaterais no modelo a duas massas (Ishizaka & Isshiki, 1976).



Figura 2.21. Modos longitudinais de ordem superior. Imagem de uma seqüência videolaringoestroboscópica mostrando a existência de vibrações de 2ª ordem (“bimodal”) na prega vocal direita (i.e., aquela à esquerda do leitor). A prega vocal esquerda parece vibrar apenas no modo fundamental.

As características acústicas e vibratórias da crepitação podem ser explicadas pelos seguintes fatores:

1. Altos valores de forças adutivas e de compressão medial, aumentando a superfície de contato lateral das pregas vocais (figura 2.13);
2. Baixa tensão longitudinal, resultante de um afrouxamento da parte ligamental (vibrante) das pregas vocais;
3. Baixa pressão subglótica.

Com ajuda do modelo a duas massas (ressaltando-se que este modelo não é ideal para simular todas as principais características da crepitação) vê-se que estes três fatores implicam em:

- um aumento da massa da cobertura;
- uma redução na rigidez do acoplamento (s_3) entre as bordas inferior e superior de cada prega, uma vez que a cobertura fica mais maleável;
- uma diminuição no espaçamento (h) entre as pregas e a um aumento na superfície de contato lateral (d), devido ao aumento na força de adução; e, consequentemente, em
- menores níveis de pressão subglótica para atingir valores de Φ adequados para produzir vibrações (lembre que $\Phi = P_{SG} \cdot l \cdot d / h$)

O aumento de massa da mucosa e a redução na pressão subglótica explicam a queda na frequência fundamental, pois a frequência fundamental, F_0 , varia proporcionalmente com a pressão subglótica, P_{SG} , mantendo-se outros fatores constantes (Titze, 1989). É por isso que quando se fala com uma voz mais intensa a frequência fundamental tende a aumentar.

A queda na pressão subglótica poderia acarretar uma queda nos níveis perceptivos de volume da crepitação, pois a intensidade acústica aumenta com a pressão subglótica.¹¹ Contudo, o fato de os harmônicos de alta frequência serem relativamente mais intensos parece contribuir para uma percepção de aumento no volume sonoro.

Imagens detalhadas da produção da crepitação ainda são raras, porque equipamento para filmagem em altas velocidades (acima de 2000 quadros por segundo) ainda são um luxo de poucos laboratórios. Além disso, devido à elevada compressão medial, a visão das pregas vocais pode ser obstruída pela adução das pregas vestibulares. Para dificultar, as imagens em (pseudo) câmera lenta obtidas com a videoestroboscopia são afetadas por artefatos associados à grande irregularidade ciclo-a-ciclo das vibrações crepitantes.¹² Apesar destas restrições, imagens paradas obtidas de sequências vídeo-estroboscópicas sugerem que o padrão vibratório pode apresentar modos de vibração longitudinal de ordem superior. Veja na Figura 2.21, por exemplo, que a prega vocal direita está vibrando no 2º modo normal (algumas vezes descrito como vibração “bimodal”). A dessincronização, isto é, a falta de harmonia entre modos de vibração de ordem superior de cada lado, certamente é um fator importante na produção de irregularidades fonatórias.

Em síntese, as principais características da crepitação são:

- Elevados níveis de compressão medial e de adução;
- Reduzida tensão longitudinal (i.e., pregas vocais frouxas longitudinalmente);
- Reduzida pressão subglotal;
- Baixíssimas frequências fundamentais;
- Queda significativa na energia acústica entre pulsos glotais adjacentes.

2.4.4 Sussurro

Há um certo consenso (Laver, 1981, pp. 120-122) que a característica distintiva do sussurro é um forte ruído audível resultado de um fluxo aéreo turbulento através de uma abertura na parte cartilaginosa da glote. Quando vista de cima, a forma da glote é usualmente descrita como um “Y” (figura 2.13), que é consequência de uma reduzida força de adução (não aproximando as aritenóides) e de uma compressão medial de moderada a elevada. O fluxo de ar turbulento ocorre na fenda posterior devido aos elevados níveis de pressão subglótica. Note que *não há vibração glotal* no sussurro puro. Todavia, o sussurro pode existir simultaneamente com os outros ajustes laríngeos que apresentam vibração.

Há diferenças fisiológicas entre o sussurro e a soprosidade definida por Laver (1981), mas estes termos serão utilizados indiscriminadamente daqui para a frente com uma conotação perceptiva, abandonando-se a descrição anátomo-fisiológica precisa. Isto é justificado pelo fato de, em patologias laríngeas, o ruído poder ser produzido por inúmeras configurações glóticas causadas por *patologias*

¹¹ Empiricamente, verifica-se que a intensidade vocal, I , é proporcional a uma potência da pressão subglótica, isto é, $I \propto (P_{SG})^2$. Os valores medidos medidos para “r” estão na faixa de $\sqrt{2}$ a 3,3 (Broad, 1968, p. 52; Titze, 1989).

funcionais (isto é, ajustes musculares anormais) ou *orgânicas* (pólipos, nódulos, cistos, sulcus, cicatrizes, etc.) nas pregas vocais.

Os distúrbios funcionais mais comuns estão representados na figura 2.22. Aqueles com fenda glótica são causas típicos de vozes com características de “soprosidade”.

A forma glótica da fenda posterior (figura 2.22a) é semelhante à conformação do sussurro, mas ela parece ser causada por uma contração

indevida do músculo abdutor, o cricoaritenóideo posterior (CAP). Experimentos mostram que, estando a glote está fechada mesmo sob uma forte ação adutora (IA) e de compressão medial (CAL), basta uma *pequena* força abductora (CAP) para criar uma fenda glótica posterior (Morrison & Rammage, 1993). Fendas posteriores são relativamente comuns em mulheres, possivelmente devido à maior distância (quando comparado à laringe humana) das aritenóides, já que o ângulo da tireóide é maior. Uma certa soprosidade na voz feminina também está associada com a sensualidade.

A condição de pregas arqueadas (figura 2.22d) está associada à fadiga da musculatura laríngea, o que resulta em perda de tonicidade muscular do vocalis. Visualmente, o arqueamento glótico é semelhante ao observado na presbifonia (i.e., atrofia muscular devido ao envelhecimento) e em reações miopáticas a inalantes orais com esteróides. Em todos estes casos é possível que haja deficiências no suporte respiratório que, combinado com a fenda glótica e a baixa tensão longitudinal, levam a uma voz fraca e soprosa.

Na fenda longitudinal em toda a extensão (figura 2.22e), há hipoadução das pregas vocais durante a fonação, embora a laringe desempenhe normalmente suas outras funções. Muitos outras conformações e variações dos distúrbios funcionais mencionados acima estão descritos com detalhes na literatura. Frequentemente, os desbalanços musculares são causados por distúrbios de natureza emocional que causam tensão muscular excessiva nos ombros, pescoço ou mandíbula, levando a fadigas

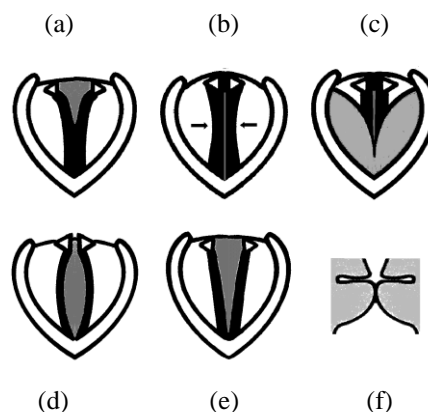


Figura 2.22. Distúrbios laríngeos funcionais. (a) Fenda glótica posterior; (b) Compressão medial glótica; (c,f) Coaptação de banda ventricular (as falsas pregas estão indicadas por áreas em cinza sobrepostas às pregas vocais); (d) Pregas vocais arqueadas; (e) Fenda glótica longitudinal em toda a extensão da glote. Os distúrbios a, d, e originam ruído (e soprosidade) na voz. Os ajustes b, c, f serão discutidos posteriormente.

¹² Lembre-se que a visualização em câmera lenta de um movimento vibratório pressupõe que este movimento seja periódico.

musculares, a ajustes anormais devido a compensações na musculatura laríngea intrínseca e até a lesões nodulares. A conduta clínica nestes problemas requer a tarefa delicada e importante de identificar e tratar os componentes emocionais subjacentes (Butcher, Elias & Raven, 1993).

As figura 2.22b,c são exemplos de configurações laríngeas hiperfuncionais, isto é, em que há um excesso de forças de fechamento glótico. Estas situações conduzem a uma menor periodicidade das vibrações, que tornam-se irregulares e, perceptivamente, costumam ser descritas como ásperas. Aspreza vocal, segundo a definição de Laver (1981), é o assunto da discussão seguinte.

2.4.5 Aspreza

A aspreza está relacionada com distúrbios na característica quasi-periódica da fonação, podendo ser causados por irregularidades na *frequência fundamental*, na *amplitude* dos pulsos glotais e/ou na *forma* dos pulsos. A instabilidade em F_0 é chamada, de forma geral, de *jitter* (“flutuação”). Variações na amplitude dos sinal acústico da voz são denominados *shimmer* (“cintilação”), podendo ser causadas tanto por variações na amplitude dos pulsos glotais quanto na velocidade de fechamento das pregas vocais. As diversas perturbações mencionadas acima não são independentes. Verifica-se que *jitter* e *shimmer* estão correlacionados e que estas perturbações ocorrem, e em geral, simultaneamente no sinal acústico. Em outras palavras, o aumento nos níveis de *jitter* é acompanhado por aumentos nos níveis de *shimmer* e vice-versa.

Em laringes normais é possível causar-se vibrações irregulares com qualidade perceptiva áspera através quadro de ajuste muscular *hiperfuncional* (Laver, 1981). Contudo, os mecanismos exatos que levam à aspreza são complexos, podendo haver padrões vibratórios irregulares causados pela *diminuição* da tensão longitudinal (Linville, 1992; Wong et al., 1991).

Um aspecto que parece ser relevante para produzir vibrações irregulares é a existência de *assimetrias contralaterais nas pregas vocais*. Pequenas diferenças podem tornar-se relevantes com o aumento ou diminuição da tensão da musculatura laríngea. Assimetrias podem ocorrer, por exemplo:

- nos níveis de ação muscular (adução, compressão medial ou tensão longitudinal);
- na liberdade de movimento das juntas (cricoaritenóidea ou cricotireóidea); ou
- na morfologia de cada prega vocal (tamanho, comprimento e massa de cada camada).

Assimetrias podem surgir com o envelhecimento devido a alterações nas superfícies das juntas, atrofia muscular, mudanças no número de terminações nervosas, traumas mecânicos nos tecidos que revestem as pregas vocais, espessamentos, edemas, etc.

Além dos distúrbios funcionais, as chamadas patologias orgânicas das pregas vocais também são causas comuns de assimetrias entre as pregas vocais. Nestes casos, a existência de lesões na estrutura das pregas vocais pode levar a vibrações onde há, simultaneamente, padrões irregulares (causando aspreza vocal) e fendas glóticas (causando soprosidade); esta combinação de aspreza e irregularidade é chamada, por Laver, de rouquidão. O estudo destas patologias está além dos objetivos

deste texto mas alguns exemplos e seus efeitos na vibração laríngea serão apresentados na próxima seção.

2.5 SOBRE AS PATOLOGIAS ORGÂNICAS DAS PREGAS VOCAIS

Entende-se como patologias orgânicas aqueles distúrbios que causam alterações na forma, movimento e/ou propriedades mecânicas das cartilagens, músculos, nervos e demais tecidos da laringe. Há vários tipos de patologias orgânicas, com seus fatores predisponentes, precipitadores e agravantes que podem ser associados a (Moore, 1963):

1. *Mal uso e/ou abuso vocal*, gerando colisões mais intensas entre as pregas vocais, o que leva ao espessamento revestimento epitelial das pregas e a edemas subepiteliais;
2. *Irritantes químicos ou mecânicos* (tabaco, gases, poeira, etc.), que produzem reações inflamatórias ou ressecamento da mucosa. O ato de tossir (abuso vocal) também pode ser estimulado, criando-se um ciclo vicioso. Note que distúrbios funcionais podem ser causas de alterações orgânicas, como ocorre na formação de nódulos vocais;
3. *Condições que levam a um excesso de secreção e irrigação sanguínea* (e.g., alcoolismo, alergias e certos medicamentos, como aspirina), alterando a massa e as propriedades elásticas das pregas vocais;
4. *Traumas e cirurgias* envolvendo a cabeça, pescoço ou peito, afetando os nervos e/ou músculos laríngeos, resultando em alterações na mobilidade e/ou morfologia das pregas vocais.
5. *Lesões*, isto é, crescimentos anormais (malignos ou benignos) de tecidos.

Sob o ponto de vista anátomo-funcional das pregas vocais, as diversas patologias laríngeas podem:

- Alterar a *tensão longitudinal* das pregas vocais, como nas paralisias do nervo laríngeo superior;
- Interferir com a *adução e compressão medial* das pregas vocais, com nos casos de paralisias, paresias, ou lesões na glote cartilaginosa (e.g., granulomas e úlceras de contato);
- Introduzir *massas e deformações* na forma da glote ligamentosa, como nos casos de pólipos, nódulos, cistos, papilomas, carcinomas, Edemas de Reike, sulcus vocalis, cicatrizes, etc.

Algumas das patologias ditas orgânicas serão brevemente descritas abaixo, procurando-se destacar aqueles aspectos que concernem ao movimento vibratório.

Nódulos (Fig 2.23). Uma das patologias vocais mais comuns, os nódulos são pequenas massas arredondadas situadas na borda livre das pregas vocais, ao meio da glote ligamentosa,¹³ que é o ponto de máximo deslocamento vibratório. Os nódulos são usualmente bilaterais e originam do atrito excessivo entre as pregas vocais devido a abuso vocal e

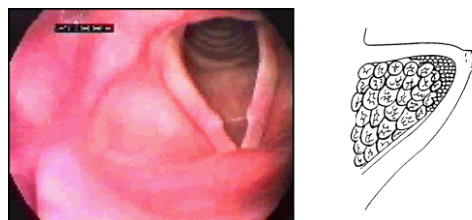


Figura. 2.23. Nódulos. Desenhos de Hirano & Bless (1993)

¹³ Isto é, o “terço médio”, lembrando-se que a parte cartilaginosa representa cerca de um terço do comprimento da prega.

falta de hidratação da mucosa. São mais frequentes em mulheres e crianças, o que pode estar associado ao fato de maiores valores de frequência fundamental resultarem em um maior número de colisões (Titze, 1989a). Cantores e pessoas com estilos de vida com demanda excessiva da voz (cantores, professores, operadores de telemarketing, etc.) também apresentam uma maior incidência de nódulos.

Os nódulos impedem o fechamento completo da glote mas, como não infiltram nas camadas internas das pregas vocais, interferem pouco com a propagação da onda mucosa. No início de sua formação, quando ainda estão “macios”, eles podem ser tratados com fonoterapia para estabelecer hábitos vocais saudáveis; se “duros”, a retirada cirúrgica, seguida de fonoterapia, é recomendada (Bouchayer & Cornut, 1992). Um fato muitas vezes despercebido, que pode ser a causa subjacente dos nódulos, é a existência de microdiafragmas congênitos na comissura anterior, como observado em cerca de 1/5 dos casos de nódulos (Bouchayer & Cornut, 1992).

Pólipos (fig. 2.24). Estas lesões ocorrem na parte membranosa e não aderem ao ligamento vocal. São lesões benignas com etiologia desconhecida, mas parecendo estar associado a abuso vocal, havendo uma maior incidência em adultos na faixa de 30-50 anos. Dependendo de sua localização, podem

impedir o fechamento glótico completo. Pólipos são usualmente maiores e mais macios que nódulos, apresentando variações em tamanho e forma, dependendo de quando são examinados ao longo de sua formação. Sendo superficiais e macios, não interferem na onda mucosa. Normalmente são retirados cirurgicamente (Bouchayer & Cornut, 1992).

Edemas de Reinke (figura 2.24). Também descritos como degeneração polipoidal, especialmente por pesquisadores japoneses, estes edemas se espalham largamente em ambas as pregas, levando a uma voz tipicamente grave e áspera. Esta patologia é mais comum em mulheres fumantes com idade acima de cerca de 40 anos, o que sugere que alterações hormonais sejam relevantes. O tratamento atualmente recomendado consiste na aspiração cirúrgica do edema, sendo inportante que o paciente páre de fumar para evitar a recidiva (Bouchayer & Cornut, 1992).



Figura 2.24. Pólipo. Desenhos de Hirano & Bless (1993)

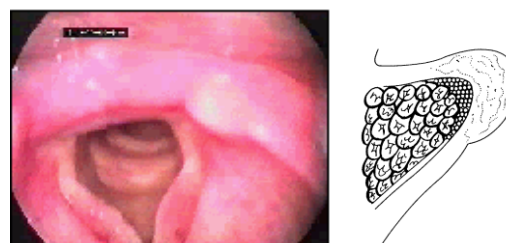


Figura 2.24. Edema de Reinke Desenho de Hirano & Bless (1993)

Cistos (figura 2.25). Estas lesões foram (e ainda costumam) ser diagnosticadas incorretamente como nódulos pois, visualmente, um cisto é semelhante a um nódul (embora o primeiro seja ligeiramente mais largo). Contudo, estruturalmente e funcionalmente eles são bastante diferentes, uma vez que os cistos são massas mais densas usualmente afixadas ao ligamento vocal, o que causa uma redução significativa na onda mucosa (Shohet et al., 1996). Um cisto, *que também pode causar uma lesão nodular contralateral*, requer uma cuidadosa remoção cirúrgica seguida de fonoterapia adequada para evitar a aderência do epitélio ao ligamento vocal e/ou formação de cicatrizes na mucosa.

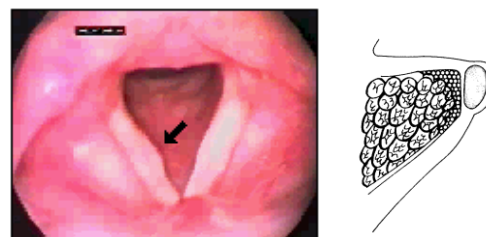


Figura 2.25. Cisto. Desenho de Hirano & Bless (1993)

Sulco Vocal (Figura 2.26. Um sulco pode ser descrito como uma invaginação do epitélio, produzindo uma reentrância na cobertura das pregas vocais. A voz é normalmente áspera. Essas lesões são facilmente despercebidas em exames laringoscópicos podendo, às vezes, ser detectados apenas por pequenas linhas longitudinais. A estroboscopia, contudo, permite detectar a interrupção da onda mucosa e/ou a existência de porções não-vibrantes nas pregas vocais. O tratamento é feito com fonocirurgias relativamente difíceis (Bouchayer & Cornut, 1992; Pontes & Behlau, 2010).

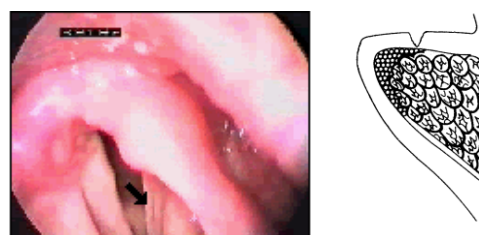


Figura 2.26. Sulco. Desenho adaptado de Hirano & Bless (1993)

Tumores. São lesões irregulares que podem ocorrer em qualquer lugar da laringe. Muitas delas são *benignas*, como os papilomas (HPV, Human Papilloma Virus). Papilomas (figura 2.27) são patologias virais que podem se espalhar por toda a laringe, levando até mesmo à perda total da voz ou à obstrução das vias respiratórias. Não há cura conhecida, embora tente-se eliminar as lesões vaporizando-as com aplicações de laser. Contudo, o índice de reincidência é elevado e a patologia pode durar décadas. Papilomas laríngeos podem estar relacionados às variedades do HPV que são sexualmente transmissíveis, mas esta ligação não foi comprovada; possíveis mecanismos de contágio seriam a passagem do feto pelo canal

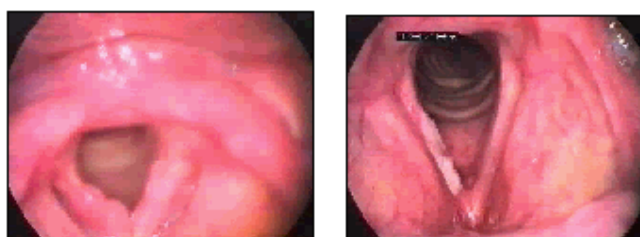


Figura 2.27. Tumores. Papilomas (esquerda), leucoplasia (direita)

vaginal e o sexo oral (Abramson, Steinberg, & Winkler, 1987; Derkay, 1995).

Praticamente todos os tumores *malignos* da laringe estão associados ao tabagismo, sendo a incidência cerca de 10 vezes mais freqüente em homens acima de 45 anos (Becker, Naumann & Pfaltz, 1989, p. 421). A indicação de radioterapia ou da remoção cirúrgica dos tecidos afetados depende do estágio de evolução e tamanho do tumor. A cirurgia é altamente destrutiva e pode chegar até mesmo à retirada total da laringe (laringectomia). Nestes casos extremos, o pescoço é adaptado cirurgicamente para a respiração e a deglutição. A voz é perdida mas alguns pacientes aprendem a utilizar o esfíncter esofágico como uma pseudoglote, produzindo uma voz extremamente grave. Vibradores eletromecânicos colocados em contato com o pescoço e controlados pelo paciente também podem ser utilizados para auxiliar na produção da voz.

Paralisias. As diversas formas de paralisia ocorrem quando o nervo Vago é afetado em sua trajetória entre o cérebro e a laringe. Paralisias podem ser causadas por cirurgias no pescoço, particularmente as tireoidectomias. Outras causas incluem cirurgias ou acidentes

no peito e neuropatias devido a infecções virais (e.g., influenza). A falta de uma causa aparente, particularmente nas paralisias menos freqüentes do lado direito, pode ser uma indicação da existência de alguma lesão maligna na cabeça ou pescoço afetando o nervo Vago.

Os efeitos de uma paralisia sobre a fonação e sobre outras funções laríngeas vão depender da parte afetada do nervo Vago, se a paralisia é uni ou bilateral, se há atrofia da prega paralisada e se a prega não afetada é capaz de realizar movimentos articulatórios compensadores, deslocando-se além da linha glotal média. A *paralisia unilateral do nervo recorrente* é mais freqüente no lado esquerdo, porque o nervo é mais longo neste lado. Paralisias podem levar a um fechamento glótico incompleto e, conseqüentemente, a uma qualidade vocal “soprosa”. No caso de *paralisias bilaterais* do nervo recorrente, pode haver perda total da voz devido à total falta de contato entre as pregas. A falta de controle sobre o fechamento da glote também pode levar à aspiração de alimentos e saliva. Além disso, a abertura glótica residual pode ser pequena, quando comparada à abertura inspiratória normal, o que pode resultar em falta de ar ou na produção de ruído (estridor) durante a inspiração. O tratamento de paralisias pode ser feito com fonoterapia (buscando movimentos compensatórios do lado não-afetado) e/ou fonocirurgias (como a injeção de substâncias na prega vocal paralisadas para aumentar seu volume, ou o deslocamento mecânico da prega paralisada).

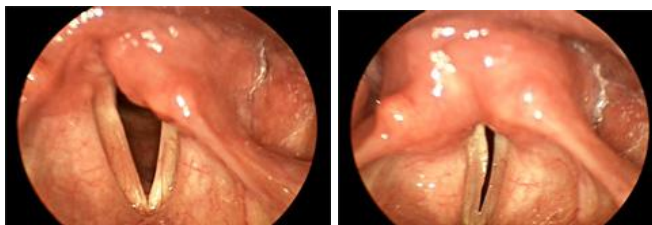


Figura 2.27. Paralisia unilateral (PV esquerda). Note a compensação da PV direita além d linha média
<http://www.voicemedicine.com/unilateral.htm#aaaa>

A *paralisia do nervo superior* (Fig. 2.28) afeta os músculos cricotireóideos, reduzindo as possibilidades de tensionamento das pregas vocais. Estas paralisias podem passar despercebidas em exames laringoscópicos porque praticamente nenhuma anormalidade é vista nas imagens. Contudo, o paciente geralmente apresenta dificuldades para cantar e pode apresentar uma voz monotônica (i.e., sem variação acentuada de F_0) ou reclamar de cansaço (talvez por usar variações de pressão subglótica para conseguir variações de intonação).



Figura 2.28. Paralisia unilateral do laríngeo superior. Note a pequena rotação das aritenóides e o desnível das pregas vocais

2. SOBRE A ANATOMIA, FISIOLOGIA E PATOLOGIA DA LARINGE	1
2.1 INTRODUÇÃO	1
2.2 A LARINGE	1
2.2.1 Estrutura cartilaginosa	1
2.2.2 A visão laringoscópica.....	3
2.2.3 Musculatura laríngea.....	5
2.2.4 Inervação	9
2.2.5 Funções fisiológicas.....	
2.3 FONAÇÃO (VOZ MODAL)	12
2.3.1 A estrutura de camadas as pregas vocais	12
2.3.2 Observação visual da vibração normal das pregas vocais.....	13
2.3.3 Sobre a aerodinâmica das vibrações	16
2.3.4 Características acústicas dos pulsos glotais.....	16
2.3.5 O modelo a duas massas	18
2.4 AJUSTES LARÍNGEOS E QUALIDADE PERCEPTIVA DA VOZ	25
2.4.1 A voz modal.....	27
2.4.2 Falsete.....	27
2.4.3 Crepitação.....	28
2.4.4 Sussurro (e outras fendas laríngeas).....	30
2.4.5 Asperidade	32
2.4.6 Sobre as patologias orgânicas das pregas vocais	33
2.4.7 Clinical assessment of voice disorders.....	Erro! Indicador não definido.
2.5 CONCLUSION	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.