

## II.2. ANATOMO-FISIOLOGIA DELL'APPARATO PNEUMO-FONATORIO

G. Bergamini\*, R. Füstös\*\*, D. Casolino\*\*\*

Durante la fonazione le corde vocali agiscono come trasduttori che convertono le forze aerodinamiche generate dal mantice polmonare in energia acustica<sup>19</sup>.

L'**apparato respiratorio**<sup>5 25 29 23</sup> è un insieme di organi deputati innanzitutto agli scambi gassosi fra l'aria atmosferica ed il sangue e, secondariamente, a produrre un flusso aereo necessario all'espletamento di numerose funzioni quali: la fonazione, la tosse e l'espettorazione, il raschio, lo starnuto, il soffio, il fischio.

Le parti che compongono questo apparato sono: la **gabbia toracica**, costituita da una porzione scheletrica e da una muscolare, le **vie aerefore** ed il **polmone**.

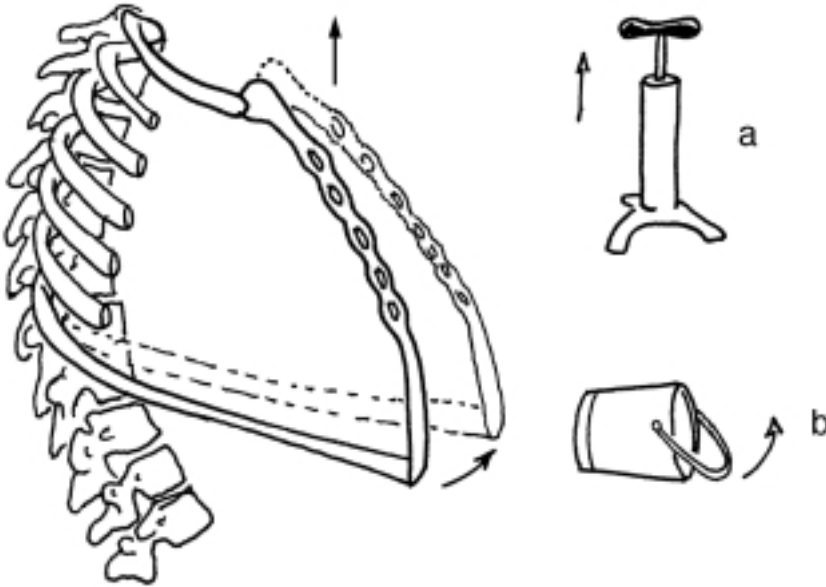
Lo *scheletro toracico* è formato posteriormente dalle 12 vertebre dorsali, anteriormente dallo sterno, lateralmente dalle coste. Esse si uniscono al rachide mediante le due faccette articolari vertebrali che prendono rapporto con le superfici articolari di due vertebre adiacenti e mediante la faccetta della tuberosità che si articola con la faccia articolare costale dell'apofisi trasversa. Anteriormente le prime sette coste (coste vere), con l'interposizione di un segmento cartilagineo, si uniscono individualmente allo sterno; l'VIII, la IX e la X (false coste) confluiscono su una parte cartilaginea comune che a sua volta si articola con lo sterno; le ultime due (coste fluttuanti) si prolungano anteriormente con una cartilagine che resta libera. Le coste sono inclinate dall'alto al basso sia da dietro in avanti sia dall'interno all'esterno. Lo sterno, appiattito in senso antero-posteriore, è costituito da tre parti: il manubrio che presenta lateralmente le faccette articolari per le clavicole, il corpo con le superfici articolari per le coste, l'appendice xifoide cartilaginea, all'estremità inferiore, che in certi casi, specie nelle femmine, può essere assente. Il manubrio ed il corpo formano un angolo aperto posteriormente (angolo di Louis) che può modificarsi nel corso dei movimenti respiratori. Il torace nel suo insieme ha una forma troncoconica con un'apertura craniale ellittica rivolta in alto e in avanti ed una caudale la cui parte anteriore è ad angolo acuto con apice sul processo xifoideo e i lati costituiti dalla VII, VIII, IX e X cartilagine costale. Sono possibili due modalità di movimento toracico che possono talvolta essere congiunte. L'elevazione-abbassamento, che è in genere più pronunciato nella parte alta del torace, corrisponde ad un movimento costale cosiddetto «a leva di pompa» (Fig. 1a) che si verifica a livello

---

\* Servizio di Clinica ORL, Dipartimento di patologia neuro-psico-sensoriale, Università di Modena

\*\* U.O. di ORL, Ospedale Generale Regionale, Bolzano

\*\*\* U.O. di ORL, Ospedale «M. Bufalini», Cesena

**Fig. 1.**

Schema che dimostra gli spostamenti delle coste e dello sterno nell'inspirazione. In a, movimento a «leva di pompa» della parte alta del torace (che si innalza). In b, movimento a «manico di secchio» della parte bassa del torace (che si dilata).

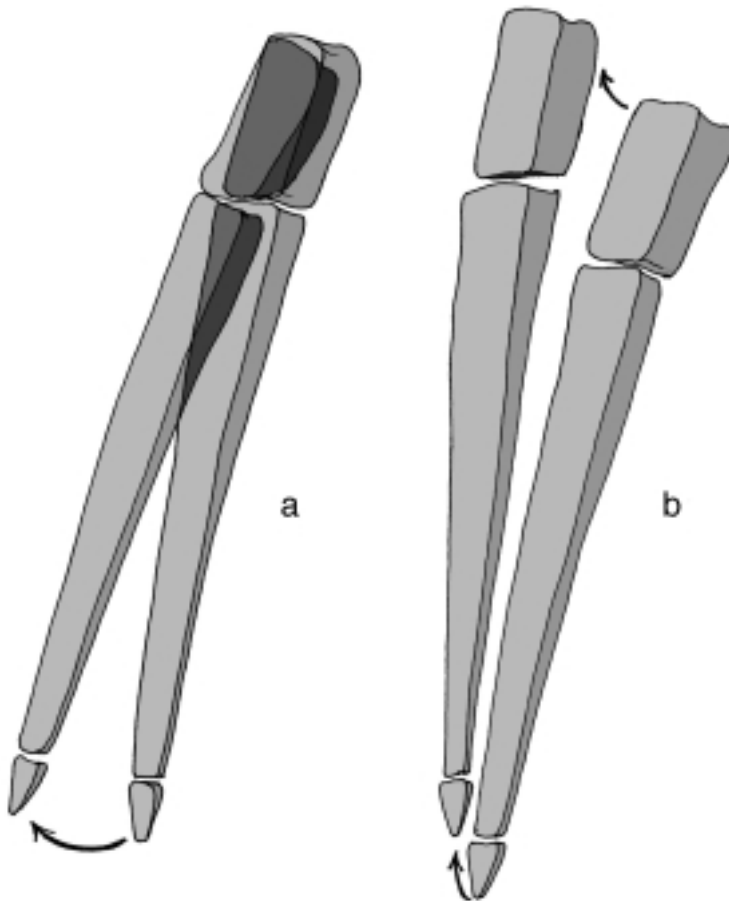
delle articolazioni costo-vertebrali e costo-trasversarie secondo un asse orizzontale trasversale; la dilatazione-restringimento, tipico della parte bassa del torace, si realizza prevalentemente per il movimento costale «a manico di secchio» (Fig. 1b) lungo un asse orizzontale antero-posteriore passante per i punti articolatori anteriori e posteriori.

Se questi movimenti sono combinati lo sterno si sposta parallelamente a se stesso nei due sensi durante la respirazione, se prevale il movimento di elevazione-abbassamento la parte inferiore dello sterno funge da centro di basculamento e si sposta esclusivamente la parte superiore (Fig. 2a), in caso contrario il movimento si verifica inferiormente (Fig. 2b). Anche la colonna vertebrale ha una incidenza nella respirazione perché l'estensione separa le costole a ventaglio e facilita l'inspirazione mentre la flessione facilita un'espirazione forzata.

Questa attività dinamica, variamente combinata, dipende dalla contrazione dei muscoli respiratori e dalla elasticità del parenchima polmonare.

I *muscoli respiratori* vengono generalmente suddivisi in tre gruppi: *inspiratori principali* (diaframma e muscoli intercostali esterni), *inspiratori secondari* (scaleni, sternocleidomastoideo, piccolo e grande dentato, piccolo e grande pettorale) ed *espiratori* (intercostali interni, muscoli addominali).

Il *diaframma* è un muscolo piatto cupuliforme che separa la cavità toracica da

**Fig. 2.**

Schema che mostra il movimento dello sterno nella respirazione (da Leuche <sup>23</sup>, modificata).

quella addominale ed è costituito da una porzione muscolare periferica con fasci che convergono verso la parte centrale aponevrotica la quale ha una forma grossolanamente a trifoglio. Ha inserzioni posteriori a livello delle prime vertebre lombari, inserzioni costali sulla faccia mediale ed i margini superiori delle ultime sei coste, una inserzione sternale sulla faccia posteriore dell'appendice xifoidea. Presenta diversi orifizi attraverso i quali passano dal torace all'addome l'esofago, strutture vascolari (aorta, vena cava inferiore, vene azygos ed emiazygos, vasi toracici interni), il dotto toracico e strutture nervose (catene del simpatico, vago, nervi grandi e piccoli splancnici). È il muscolo respiratorio principale che contraendosi durante l'inspirazione si appiattisce vincendo la pressione positiva addominale; si verifica inoltre

una elevazione delle coste inferiori per accorciamento delle fibre muscolari che si inseriscono a questo livello.

I *muscoli intercostali esterni* iniziano posteriormente a livello delle articolazioni costo-trasversarie ed anteriormente arrivano in prossimità del punto di passaggio fra porzione ossea e cartilaginea delle coste con inserzioni sul bordo inferiore della costa soprastante e sul bordo superiore della sottostante. Hanno direzione obliqua dall'alto in basso e dall'indietro in avanti e determinano un innalzamento delle coste.

I *muscoli scaleni* (anteriore, medio, posteriore) si inseriscono sui processi trasversari delle vertebre cervicali ed inferiormente sulla prima e seconda costa con azione di innalzamento inspiratorio esclusivamente con la modalità a leva di pompa.

Lo *sterno-cleido-mastoideo*, con inserzioni in alto sull'apofisi mastoidea ed in basso sullo sterno e sulla clavicola, oltre ad una azione di flessione e rotazione del capo interviene come elevatore del torace nella inspirazione forzata.

Il *piccolo dentato* si inserisce in alto sull'apice dei processi spinosi dell'ultima vertebra cervicale e delle prime tre vertebre toraciche ed in basso sulla faccia esterna della II, III, IV, V costa che vengono quindi innalzate quando si contrae.

Il *grande dentato* che si inserisce sulla faccia esterna delle prime nove-dieci coste e sul margine vertebrale della scapola ha anch'esso un'azione di innalzamento delle coste.

Il *grande pettorale* è un voluminoso muscolo triangolare situato nella parte anteriore del torace dove si inserisce medialmente a varie strutture (due terzi anteriori della clavicola, faccia anteriore dello sterno, faccia anteriore delle prime sei cartilagini costali, aponeurosi del retto addominale) e lateralmente al solco bicipitale dell'omero. Se il punto di inserzione fissa è in questa sede determina un innalzamento delle coste.

Il muscolo *piccolo pettorale*, situato al di sotto del grande pettorale, prende origine sulla faccia esterna della III, IV, V costa e sale per inserirsi sul margine mediale del processo coracoideo della scapola con azione di innalzamento delle coste.

Gli *intercostali interni* con un decorso dall'alto al basso e dall'avanti all'indietro si inseriscono sulla faccia interna e sul bordo inferiore della costa sovrastante e sul margine superiore della sottostante ed hanno un'azione di abbassamento delle coste con meccanismo a «leva di pompa» e quindi sono implicati soprattutto nella fase espiratoria quando la respirazione è di tipo costale superiore.

I *muscoli addominali* (trasverso, piccolo obliquo, grande obliquo) quando si contraggono provocano un restringimento della parete addominale con conseguente pressione sui visceri addominali, che spingono il diaframma verso l'alto, ed abbassamento degli archi costali inferiori; hanno un'azione determinante soprattutto nell'ambito dell'antagonismo addomino-diaframmatico nella voce proiettata e nel canto. Il grande retto, invece, abbassa il torace con meccanismo a «leva di pompa» ed è flessore del tronco: interviene soprattutto nella voce di pericolo e nelle condizioni di sforzo vocale.

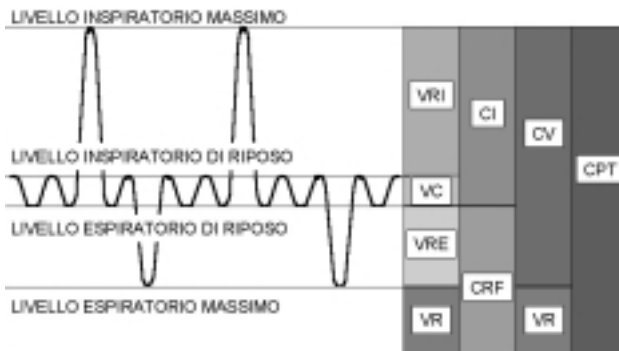
Le **vie aerofore** iniziano con le narici e le labbra e sono costituite dalle cavità nasali ed orali (una inspirazione orale si verifica non raramente mentre parliamo), dal faringe, dalla laringe in atteggiamento respiratorio, dalla trachea e dai bronchi fino alle più piccole diramazioni. Il rivestimento mucoso è costituito da un epitelio

pseudostratificato di cellule cilindriche ciliate con alcune cellule caliciformi ad esclusione del piano glottico dove troviamo epitelio pavimentoso e delle ultime terminazioni bronchiali dove non sono più evidenti le ciglia e l'epitelio diventa cubico. Un'altra caratteristica importante delle vie aeree è lo scheletro cartilagineo che ne consente la pervietà e che scompare solo nelle diramazioni bronchiali più periferiche quando il diametro si riduce ad un millimetro. La resistenza che esse offrono al passaggio dell'aria sono ripartite nei vari segmenti: 10% a livello delle piccole vie aeree, 15% a livello di trachea e bronchi, 25% a livello glottico, 50% a livello del naso o della bocca.

**I polmoni** sono gli organi nei quali avviene lo scambio gassoso fra l'aria ed il sangue che vi giunge attraverso l'arteria polmonare. Hanno uno stroma connettivale-elastico e sono avvolti nel foglietto viscerale pleurico. Sono costituiti da tre lobi a destra e due a sinistra. Ogni lobo si divide in subunità: segmenti, lobuli, acini, alveoli.

Essi sono soggetti a movimenti di espansione attiva in fase inspiratoria per consentire l'ingresso dell'aria negli alveoli e ciò si verifica soprattutto per azione del diaframma. La successiva riduzione volumetrica, presupposto per l'espulsione dell'aria con il suo contenuto in anidride carbonica, è un movimento prevalentemente passivo che si realizza per azione della retrazione elastica del polmone (dipende dalla presenza di fibre elastiche nell'interstizio e dalla tensione superficiale degli alveoli) e della gabbia toracica. Nella espirazione forzata entrano in attività anche i muscoli intercostali interni ed i muscoli addominali che si contraggono energicamente e bruscamente in quelle situazioni in cui è necessaria una elevata pressione espulsiva.

I volumi di aria mobilizzati variano in rapporto all'entità e al tipo di attivazione muscolare (Fig. 3).



VC: volume corrente (500 cc)  
 VRI: volume di riserva inspiratoria (3000 cc)  
 VRE: volume di riserva espiratoria (1200 cc)  
 VR: volume residuo (1200 cc)

CI: capacità inspiratoria (3500 cc)  
 CRF: capacità residua funzionale (2400 cc)  
 CV: capacità vitale (4700 cc)  
 CPT: capacità polmonare totale

(da Cornut, modificata)

**Fig. 3.**

Nella respirazione tranquilla si utilizzano fra i 400 e i 500 cc di aria (volume corrente) con una azione inspiratoria prevalentemente diaframmatica solo in parte coadiuvata dagli intercostali esterni e con una espirazione esclusivamente passiva dopo la quale rimangono nel polmone circa 2400 cc di aria (capacità residua funzionale). Una attivazione forzata di tutti i muscoli espiratori e la flessione del tronco e delle braccia consentono l'espulsione dal polmone di altri 1200 cc (volume di riserva espiratoria); rimarranno nel polmone altri 1200 cc (volume residuo) non altrimenti mobilizzabili. Se dopo una inspirazione a riposo si esegue una inspirazione forzata, attivando completamente il diaframma, i muscoli intercostali esterni e i muscoli inspiratori secondari, si introducono circa 3000 cc di aria (volume di riserva inspiratoria). L'aria che può essere mobilizzata con una espirazione forzata che conduca ad una inspirazione profonda corrisponde alla somma fra il volume di riserva inspiratoria, il volume corrente ed il volume di riserva espiratoria e viene definita capacità vitale.

Durante la fonazione l'attività respiratoria deve continuare a garantire l'ematosi pur adattandosi alle esigenze della produzione vocale. In una respirazione calma il ritmo respiratorio è regolare perché i vari cicli hanno durata pressoché uguale ed il tempo inspiratorio è di poco più lungo della espirazione. In fonazione, invece, l'inspirazione si accorcia e l'espirazione fonatoria aumenta considerevolmente con eventuali pause corrispondenti alle esitazioni che normalmente si verificano nella parola spontanea. I volumi di aria mobilizzati sono maggiori rispetto ad una respirazione tranquilla e variano in rapporto al tipo di prestazione vocale; le pressioni inspiratorie ma soprattutto espiratorie (la fonazione avviene a glottide chiusa) sono molto aumentate e richiedono sempre una attivazione muscolare; sono, inoltre, necessari dei fini adattamenti muscolari per il mantenimento di pressioni adeguate alle caratteristiche acustiche della emissione vocale. La pressione sottoglottica varia dai 2-5 cm d'acqua nella conversazione ai 10-20 nella voce proiettata, raggiungendo nel canto valori molto più elevati (fino a 50-60 cm).

Il **tipo di respirazione** è molto importante nella produzione vocale. Il respiro toracico superiore che si realizza soprattutto con movimenti costali a «leva di pompa» è facilmente induttore di disfunzionalità nei pazienti che utilizzano spesso la voce direttiva o proiettata perché oltre a mobilizzare quantità limitate di aria non permette una regolazione del flusso espiratorio; esso viene quindi delegato alla laringe che deve assumere il doppio ruolo di rubinetto e di vibratore.

Nella respirazione toraco-addominale il movimento costale a «manico di secchio» e l'abbassamento del diaframma consentono rifornimenti di aria adeguati a qualsiasi esigenza vocale; inoltre mediante l'antagonismo addomino-diaframmatico (gli addominali spingono ed il diaframma mantiene una contrazione tonica) si ottiene un dosaggio preciso del flusso espiratorio e delle pressioni sottoglottiche secondo la necessità della voce. In certi casi può risultare efficace la respirazione vertebrale che si realizza con una brusca flessione del rachide; viene impiegata fisiologicamente nella voce di insistenza o di pericolo ma se utilizzata in modo prolungato innesca un circolo vizioso di sforzo vocale con conseguente disfunzionalità.

Il generatore del suono vocale è **il laringe** <sup>20 22 2 11 24 23 7 29 3 19</sup>.

Il laringe è un organo impari e mediano, localizzato nella regione anteriore del collo ad un livello compreso tra la III e la VI vertebra cervicale nell'adulto. Esso co-

munica superiormente con l'ipo-faringe e caudalmente con la trachea. Gli elementi anatomici costitutivi sono: *le cartilagini, i legamenti e le membrane aponeurotiche, i muscoli, i vasi, i nervi, il rivestimento mucoso.*

Lo scheletro laringeo è costituito da cinque *cartilagini* principali di cui tre impari e mediane (tiroide, cricoide, epiglottide) e due pari e laterali (aritenoidi); inoltre possono essere presenti alcune piccole cartilagini accessorie (corniculate, cuneiformi, sesamoidi).

La tiroide, la cricoide e gran parte delle aritenoidi sono costituite da cartilagine di tipo ialino; l'epiglottide, l'apice ed il processo vocale delle aritenoidi sono invece formate da cartilagine di tipo elastico. Dall'età di 20 anni inizia un processo di calcificazione delle cartilagini ialine, specialmente nell'uomo, che si completa verso i 50-60 anni.

La cartilagine tiroide ha la forma di uno scudo ed è costituita dall'unione di due lamine quadrangolari alle cui estremità postero-superiori e postero-inferiori sono situate due coppie di prominente (dette rispettivamente corna superiori o grandi corni ed inferiori o piccoli corni). L'unione di queste due lamine cartilaginee dà origine superiormente all'incisura tiroidea ed anteriormente ad un angolo diedro di circa 90° la cui prominente anteriore è particolarmente accentuata nell'uomo (pomo di Adamo). Sulla faccia esterna di ciascuna lamina quadrilatera è presente una cresta obliqua che ha direzione infero-anteriore per l'inserzione dei muscoli sterno-tiroideo e tiro-ioideo.

La cartilagine cricoide ha la forma di un anello con castone posteriore. Essa forma l'unico anello cartilagineo completo delle vie aeree, costituisce buona parte della regione posteriore ed inferiore del laringe e ne rappresenta la regione di confine inferiore con la trachea. A livello del castone cricoideo si reperta una cresta mediana verticale, che dà inserzione al legamento sospenditore dell'esofago, e che lo divide in due aree concave, punto fisso di origine per i muscoli cricoaritenoidi posteriori. A livello della congiunzione tra il castone e l'anello può essere rinvenuta in circa il 20% dei casi una piccola faccetta articolare per il corno inferiore della cartilagine tiroide (articolazione crico-tiroidea). L'arco anteriore presenta nella sua porzione mediana una piccola sporgenza, il tubercolo cricoideo, ai lati del quale si inseriscono i muscoli crico-tiroidei. A livello della porzione superiore del castone cricoideo è ben evidente bilateralmente la faccetta articolare per la cartilagine aritenoidi (articolazione crico-aritenoidi).

Le cartilagini aritenoidi, che hanno un ruolo fisiologicamente rilevante, contribuiscono a formare il margine posteriore dell'aditus laringeo; esse hanno una forma grosso modo piramidale con una base concava, sulla quale si reperta una faccetta articolare liscia per la cricoide, e tre superfici: mediale, posteriore ed antero-laterale con una depressione inferiore (fossetta emisferica) nella quale si inseriscono le fibre del muscolo tiro-aritenoidi. Essa presenta anteriormente un processo detto processo vocale, su cui si inserisce il legamento vocale, ed uno laterale, detto processo muscolare, che dà inserzione ai mm. crico-aritenoidi posteriore e laterale.

L'epiglottide è una sottile lamina di cartilagine elastica ricoperta da mucosa; essa ha la forma di una foglia, la cui parte inferiore ne rappresenta il «picciuolo», detto petiolo dell'epiglottide. Quest'ultimo si continua con il legamento tiro-epiglottico che rappresenta l'ancoraggio dell'epiglottide all'angolo diedro della cartilagine

tiroidea. L'epiglottide presenta una faccia laringea ed una faccia linguale; il suo margine libero rappresenta il confine anteriore dell'aditus laringeo ed il suo basculamento in senso antero-posteriore concorre a modificarne la pervietà dell'aditus contribuendo alla protezione delle vie aeree durante la deglutizione.

La connessione degli elementi cartilaginei fra di loro e con le strutture viciniori si realizza mediante membrane e legamenti ed attraverso l'apparato muscolare.

La membrana tiro-ioidea è tesa fra il bordo superiore della cartilagine tiroidea e l'osso ioide ed è rinforzata nella zona centrale dal legamento tiro-ioideo mediano ed ai due lati dai legamenti tiro-ioidei laterali che vanno dal corno superiore della cartilagine tiroidea all'estremità del grande corno dell'osso ioide. La membrana crico-tiroidea si inserisce sul bordo inferiore della cartilagine tiroidea e sul bordo superiore dell'anello cricoideo con un rinforzo anteriore (legamento crico-tiroideo mediano). La membrana crico-tracheale unisce il bordo inferiore della cricoide al primo anello tracheale. La membrana elastica della laringe costituisce lo strato profondo del chorion mucoso; presenta tre rinforzi: i legamenti ariteno-epiglottici che dai bordi laterali dell'epiglottide raggiungono il bordo anteriore dell'aritenoido, i legamenti tiro-aritenoidei superiori che si inseriscono anteriormente nell'angolo diedro della tiroide e percorrendo le false corde raggiungono la fossetta emisferica dell'aritenoido, i legamenti vocali che si inseriscono in avanti sotto i precedenti e raggiungono posteriormente l'apofisi vocale dell'aritenoido. La parte inferiore della membrana elastica che è in continuità con il legamento vocale forma il cono elastico che si inserisce sul bordo superiore della cartilagine cricoide. Altri legamenti sono: i glosso-epiglottici ed i faringo-epiglottici, che si trovano all'interno delle pliche omonime; il legamento crico-corniculato che dal bordo superiore del castone cricoideo sale verticalmente fra le due aritenoidi dividendosi per raggiungere le cartilagini corniculate.

I muscoli del laringe si dividono in due gruppi: muscoli intrinseci e muscoli estrinseci.

I muscoli intrinseci sono così definiti perché hanno entrambe le inserzioni sul laringe; la loro azione consente i diversi movimenti alle cartilagini. La muscolatura intrinseca può essere classificata in base al ruolo funzionale, in tre gruppi: dilatatori (crico-aritenoidei posteriori), tensori della corda vocale (crico-tiroidei), costrittori (crico-aritenoidei laterali, inter-aritenoideo, tiro-aritenoidei superiori e inferiori).

Il crico-aritenoideo posteriore (CAP) origina dalla depressione della faccia posteriore della cricoide e le sue fibre si dirigono supero-esternamente convergendo in un tendine il quale si inserisce sulla apofisi muscolare dell'aritenoido. La sua azione è quella di attirare verso il basso e posteriormente le apofisi muscolari determinando lo spostamento verso l'alto e lateralmente delle apofisi vocali e, di conseguenza, l'apertura della glottide.

Il muscolo crico-aritenoideo laterale (CAL) prende origine dalla porzione laterale del bordo superiore dell'arco cricoideo, si dirige in direzione postero-superiore fino a raggiungere la sua inserzione sull'apofisi muscolare dell'aritenoido omolaterale.

La sua azione è antagonista a quella del crico-aritenoideo posteriore perché portando in avanti il processo muscolare fa ruotare medialmente l'apofisi muscolare inducendo quindi la medializzazione della corda vocale che vi prende inserzione.

In realtà l'antagonismo funzionale assoluto di questi due muscoli è puramente teorico. Infatti quando la contrazione del CAL trova una opposizione attiva da parte del CAP si realizza uno scivolamento laterale dell'aritenoidide che non può ruotare sul suo asse: la glottide assume la configurazione di apertura normale, con il processo vocale in asse con il bordo cordale, tipica della respirazione tranquilla (Fig. 4); se la contrazione del CAP è prevalente su quella del CAL lo spostamento laterale si associa alla rotazione dell'aritenoidide sul suo asse verticale e allo spostamento del processo vocale verso l'esterno: la glottide ha una forma pentagonale caratteristica della inspirazione forzata (Fig. 5); l'azione esclusiva del CAL, associata a quella degli interaritenoididei, determina la posizione adduttorica tipica della fonazione (Fig. 6), se permane un certo grado di contrazione del CAP si mantiene in fonazione una piccola insufficienza glottica posteriore (triangolo posteriore) (Fig. 7).



Fig. 4.

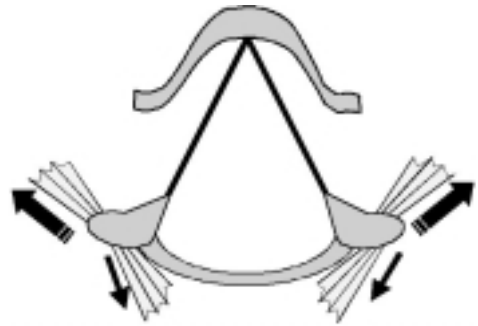


Fig. 5.

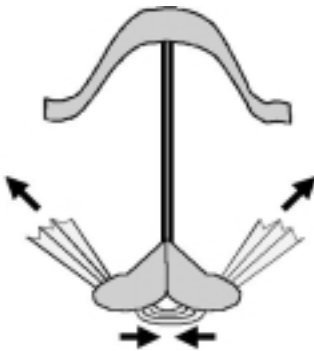


Fig. 6.

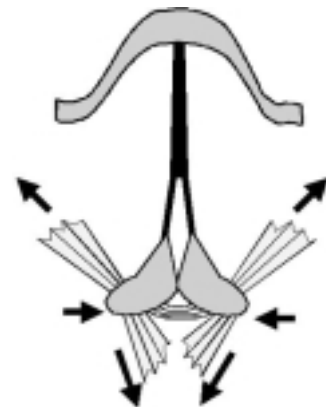


Fig. 7.

Il muscolo inter-aritenoideo (IA) è impari, mediano, simmetrico e riceve conseguentemente un'innervazione ricorrente bilaterale. Esso è formato da due fasci: uno più spesso e profondo (m. IA trasverso), le cui fibre parallele e trasversali decorrono tra i margini mediali delle cartilagini aritenoidi, ed uno più superficiale a decorso obliquo (m. IA obliquo) le cui fibre si portano, dall'apofisi muscolare dell'aritenoido verso l'alto e medialmente fino all'apice dell'aritenoido controlaterale. Alcune di queste fibre si continuano con il m. ari-epiglottico e concorrono ad abbassare l'epiglottide. La principale azione dell'IA è quella di avvicinare le aritenoidi.

Il muscolo crico-tiroideo (CT), situato nella porzione antero-inferiore del laringe, prende origine dalla faccia anteriore della cartilagine cricoide, esternamente al tubercolo cricoideo, ha una forma triangolare ad apice inferiore e le sue fibre si dirigono verso l'alto e lateralmente. Nella sua compagine si distinguono un fascio interno ed uno esterno, di cui alcune fibre si confondono con i fasci del m. costrittore inferiore del faringe continuandosi con esso ed andando così a costituire il m. crico-faringeo. La sua inserzione craniale è situata prevalentemente a livello del bordo inferiore della cartilagine tiroide ed in piccola parte sulla sua faccia anteriore e su quella posteriore. La contrazione di questo muscolo determina un avvicinamento dell'arco cricoideo e della cartilagine tiroidea con un effetto indiretto di spostamento posteriore dell'aritenoido; ciò determina uno stiramento dei muscoli tiro-aritenoidei (Fig. 8).

Il muscolo tiro-aritenoideo (TA) consta di diverse componenti funzionali e possiede, forse per tale ragione, la più fitta rete anastomotica nervosa di tutta la muscolatura intrinseca laringea. Il TA ha origine a livello della superficie interna della cartilagine tiroide, quasi sulla linea mediana, e si dirige posteriormente per inserirsi sull'aritenoido. Una prima componente è il muscolo tiro-aritenoideo superiore che dalla parte superiore dell'angolo diedro tiroideo si dirige in basso ed indietro per prendere inserzione sulla faccia anteriore dell'apofisi muscolare dell'aritenoido. Le sue fibre superiori possono estendersi fino alla plica ari-epiglottica a formare il mu-

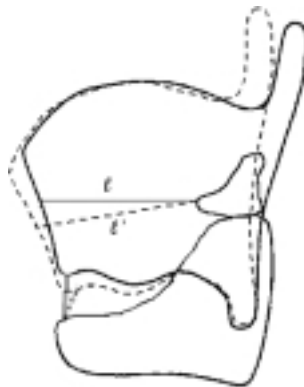


Fig. 8.

scolo tiro-epiglottico ed un variabile contingente di fibre può essere rinvenuto livello della compagine della corda vocale falsa (muscolo ventricolare). Una seconda componente è il muscolo tiro-aritenoideo inferiore che dalla sua inserzione anteriore si dirige posteriormente per dividersi in due strati; le fibre dello strato esterno divergono a ventaglio per terminare dal basso verso l'alto sul bordo esterno dell'aritenoido, nella plica ari-epiglottica, sul bordo laterale dell'epiglottide ed hanno una funzione sfinterica; lo strato interno costituisce il muscolo vocale e le sue fibre, decorrendo parallelamente e lateralmente al ligamento vocale, si inseriscono posteriormente sul versante esterno dell'apofisi vocale e sulla fossetta emisferica della faccia antero-esterna dell'aritenoido. La trazione esercitata dal muscolo assieme al ligamento vocale in direzione posteriore, determina sulla superficie anteriore della cartilagine tiroide, nel corso del suo accrescimento, una piccola depressione, detta punto di Gurr, importante repere anatomico-chirurgico<sup>3</sup>. Ha una funzione prevalentemente fonatoria, pur contribuendo, per la sua azione di trazione anteriore sull'aritenoido, all'azione sfinterica.

I muscoli laringei estrinseci sono i tiro-ioidei e gli sterno-tiroidei che si inseriscono sulla cresta obliqua della cartilagine tiroide e rispettivamente all'osso ioide ed allo sterno consentendo le escursioni verticali della laringe e contribuendo alla sua stabilizzazione insieme agli altri muscoli sottoioidei ed ai muscoli sopraioidei.

L'irrorazione è garantita dalle arterie laringea superiore ed inferiore, rami della tiroidea superiore, branca della carotide esterna, e dall'arteria laringea postero-inferiore, ramo dell'arteria tiroidea inferiore, branca della succlavia. Il sistema venoso, anche per quanto riguarda il decorso, è sovrapponibile al sistema arterioso. Sono presenti due reti linfatiche (sopraglottica e sottoglottica) completamente separate l'una dall'altra, i cui collettori, satelliti del sistema artero-venoso, convergono nei linfonodi perigiugulari e, per quanto riguarda la sottoglottide, periricorrenziali.

Il laringe è innervato da due nervi per ogni lato, entrambi originati dal vago, il laringeo superiore (misto) ed il ricorrente (motorio).

L'area corticale per i muscoli laringei corrisponde alla parte più bassa e laterale della corteccia motoria mentre i motoneuroni periferici hanno origine dal nucleo ambiguo e dal nucleo retrofacciale. Il nucleo ambiguo, di forma allungata, è localizzato nella parte laterale della sostanza reticolare del tronco cerebrale e ospita nella sua porzione dorsale i neuroni per la muscolatura adduttoria più grandi rispetto a quelli della porzione ventrale, che sono destinati al CAP. Il rapporto numerico tra queste due popolazioni neuronali è di circa 4/1. Il nucleo retrofacciale contiene perifericamente i neuroni destinati al CT e centralmente quelli per il CAP. Pertanto il CT ed il CAP sono innervati da entrambi i nuclei mentre la muscolatura adduttoria ha esclusiva innervazione a partire dal nucleo ambiguo; inoltre l'innervazione motoria laringea è esclusivamente ipsilaterale infatti non vi è alcuna via crociata a partenza da tali nuclei<sup>10</sup>. Le fibre motrici si congiungono e rimangono raggruppate in seno al nervo vago che emerge a livello del solco laterale del bulbo; esse occupano una posizione anteriore nella parte superiore del nervo e raggiungono una posizione mediale procedendo caudalmente. Le fibre adduttorie e quelle abduatorie sarebbero disperse in modo casuale a livello della porzione motoria del nervo vago e successivamente del ricorrente; studi nel gatto suggerirebbero che tali fibre si separano soltanto qualche centimetro prima della penetrazione nel laringe<sup>9</sup>. Alla sua emer-

genza dalla faccia antero-laterale del bulbo, il vago si dirige verso il forame giugulare (foro lacero posteriore), in cui decorre accostato al IX e all'XI nervo cranico ed alla vena giugulare interna; fuoriuscito dalla base cranica esso si espande in due gangli esclusivamente sensitivi: uno superiore di circa 4 mm di diametro, detto ganglio giugulare, ed uno inferiore, di forma allungata (circa 25 mm di lunghezza) chiamato ganglio plessiforme dal quale emerge il nervo laringeo superiore. Esso raggiunge il muscolo costrittore del faringe e a livello dell'osso ioide si divide in una branca interna sensitiva, la quale perfora la membrana tiro-ioidea e penetra nel laringe, ed una branca esterna con fibre miste. Quest'ultima decorre verso il basso sulla faccia esterna del fascio tiroideo del m. costrittore inferiore, innervando i due capi del m. CT, per poi perforare la membrana cricotiroidea, penetrando il laringe e fornendo innervazione sensitiva alla zona anteriore della regione sottoglottica<sup>13</sup>.

Dopo l'emergenza del laringeo superiore a sinistra il vago prosegue in basso, posteriormente all'arteria carotide comune, fino ad incrociare la faccia anteriore dell'aorta; a questo livello emerge il nervo laringeo inferiore o ricorrente, il quale va a circondare inferiormente quest'ultima arteria procedendo postero-medialmente per poi decorrere verso l'alto nel solco tracheo-esofageo. Nel suo decorso verticale verso l'alto passa dietro al lobo sinistro della ghiandola tiroide, sotto il bordo del muscolo costrittore inferiore, posteriormente all'articolazione crico-tiroidea per poi penetrare nel laringe tra l'ala della cartilagine tiroide ed il castone cricoideo e distribuirsi ai muscoli intrinseci ad eccezione del CT. Prima di penetrare nella laringe un piccolo ramo lascia il ricorrente per anastomizzarsi con il ramo interno del laringeo superiore dando origine all'ansa di Galeno. A destra il n. vago decorre lungo il margine postero-laterale della carotide comune fino ad incrociare la superficie anteriore della arteria succlavia destra dopo la sua emergenza dal tronco brachio-cefalico; a questo livello nasce il ricorrente di destra che subito si ripiega verso l'alto circondando inferiormente l'arteria succlavia e con una direzione da laterale a mediale e dall'avanti all'indietro risale fino a raggiungere il solco tracheo-esofageo di destra; esso passa dietro al lobo destro della ghiandola tiroide con un decorso più obliquo in direzione mediale rispetto al n. ricorrente di sinistra. La successiva penetrazione e distribuzione intralaringea del nervo è analoga al suo omologo controlaterale<sup>13</sup>. Non è infrequente (dal 35 all'80% dei casi) che il nervo subisca una suddivisione a livello extralaringeo, emettendo da due fino ad otto branche<sup>30 26</sup>. In alcuni casi (0,5-1% a destra e 0,04% a sinistra) il nervo laringeo inferiore non è ricorrente ed emerge a livello cervicale: si stacca dal vago all'altezza della parte media del lobo tiroideo sulla cui faccia profonda decorre per raggiungere la laringe<sup>28</sup>.

La mucosa della laringe è costituita da due tipi di epitelio: un epitelio cilindrico cigliato pseudostratificato con interposte cellule calciformi di tipo respiratorio ed un epitelio pavimentoso stratificato non cheratinizzato che ricopre le zone sottoposte a maggiori stimolazioni fisiche (il bordo libero e le parti attigue sulla faccia superiore e sulla faccia inferiore delle corde vocali; la faccia linguale, il bordo libero e la parte inferiore della faccia laringea dell'epiglottide; i bordi delle pliche ari-epiglottiche. L'epitelio appoggia su una membrana basale e presenta al di sotto un chorion con ghiandole sierose e mucose. A livello della corda vocale il chorion (lamina propria) presenta uno strato superficiale costituito da pochi fibroblasti, fibre lasse soprattutto di tipo elastico ed abbondante sostanza fondamentale (spazio di Reinke),

uno strato intermedio costituito principalmente di fibre elastiche che presenta due ispessimenti (macula flava anteriore e macula flava posteriore) in prossimità della commessura e dell'apofisi vocale, uno strato profondo con molte fibre collagene e numerosi fibroblasti. Hirano<sup>15 16</sup> classifica da un punto di vista meccanico gli elementi strutturali di una corda vocale in tre parti: il «*cover*» costituito dall'epitelio e dallo strato superficiale della lamina propria che per la sua lassità e viscosità è facilmente sollevabile in pliche e consente l'ondulazione della mucosa, il «*transition*» costituito dallo strato intermedio e profondo della lamina propria che rappresenta lo strato di scorrimento, il «*body*» rappresentato dal muscolo vocale che è la struttura rigida in grado di modificare le sue caratteristiche biomeccaniche con la contrazione.

La laringe può essere divisa in tre livelli: sopraglottico, glottico, sottoglottico. La sopraglottide comunica con il faringe attraverso l'adito laringeo, orientato in senso postero-superiore, che ha forma grossolanamente ovale con i margini costituiti dal bordo libero dell'epiglottide, dalle pliche ari-epiglottiche, dal cappuccio aritenoidico e dall'incisura interaritenoidica. La faccia anteriore è costituita dall'epiglottide, le pareti laterali presentano due rilievi (false corde) e due concavità (ventricoli di Morgagni), la faccia posteriore corrisponde alla faccia laringea delle aritenoidi ed al solco interaritenoidico. Il piano glottico è costituito da uno spazio triangolare ad apice anteriore (commessura anteriore), che in fonazione diventa virtuale, delimitato dalle corde vocali vere. La sottoglottide, a forma ad imbuto rovesciato, si allarga progressivamente in senso cranio-caudale per continuarsi con la trachea.

La laringe svolge tre ruoli fondamentali: la respirazione, la protezione delle vie aeree e la fonazione. L'attività sfinterica è sicuramente la principale perché da essa sono derivate, oltre alle funzioni inerenti alla protezione delle vie aeree, alcuni riflessi come lo starnuto, la tosse il singhiozzo, il pianto, il riso ed alcuni atti fisiologici (defecazione, minzione, sollevamento di pesi) che richiedono un aumento della pressione intratoracica; la fonazione è anch'essa correlata alla funzione sfinterica rappresentandone la evoluzione filogeneticamente più recente.

La respirazione consta di due fasi nel corso delle quali le corde vocali sono più o meno addotte per l'azione del muscolo cricoaritenoidico posteriore. L'attività di tale muscolo è strettamente legata a quella diaframmatica, infatti esso si attiva ad ogni inspirazione, da 40 a 100 msec prima rispetto all'attivazione inspiratoria del diaframma<sup>8</sup>. Vi è talvolta una sinergia funzionale con altri muscoli intrinseci ed in particolare con il crico-aritenoidico laterale che concorre a modificare la morfologia della glottide intercartilaginea ed il crico-tiroideo che attivandosi durante l'inspirazione contribuisce ad aumentare lo spazio respiratorio. Nel corso della fase espiratoria, la posizione delle corde vocali può variare secondo le esigenze della respirazione; una posizione relativamente addotta provoca un aumento della pressione alveolare polmonare, con un conseguente miglioramento degli scambi gassosi. Un particolare atto respiratorio la cui fisiologia non è ancora completamente nota è lo sbadiglio caratterizzato da una inspirazione lenta e profonda a bocca aperta che si realizza a corde vocali completamente addotte.

La protezione delle vie aeree può realizzarsi con un laringospasmo riflesso evocato dalla improvvisa stimolazione della mucosa del vestibolo laringeo da parte di corpi estranei o vapori irritanti, alimenti accidentalmente inalati, materiale da re-

flusso gastro-esofageo o nel corso della deglutizione attraverso una coordinata sequenza motoria caratterizzata da uno spostamento della laringe verso l'alto e verso l'avanti e da una contrazione sequenziale dal basso verso l'alto delle corde vocali, delle bande ventricolari, delle aritenoidi e delle pliche ari-epiglottiche. Oltre ad una chiusura sfinterica ciò determina per l'abbassamento dell'epiglottide e l'ampliamento dei seni piriformi una facilitazione della progressione del bolo verso la bocca dell'esofago.

La *tosse*<sup>4 35</sup> è un importante meccanismo riflesso finalizzato a rimuovere dall'albero tracheo-bronchiale secrezioni patologiche o materiali accidentalmente inalati. È caratterizzato da tre fasi: inspiratoria, compressiva, ed espulsiva. Il volume di aria inspirata è notevole nelle tossi di origine bronchiale perché una iperdistensione polmonare comporta un'apertura di tutte le unità bronco-alveolari, un migliore ritorno elastico del polmone, una attivazione della muscolatura espiratoria; in seguito a stimolazione meccanica laringea i volumi espiratori sono bassi o addirittura manca la fase inspiratoria per prevenire o limitare la inalazione di materiale estraneo. La fase compressiva si realizza per la chiusura della glottide che consente per il ritorno elastico del polmone e/o la energica e rapida contrazione dei muscoli espiratori un notevole aumento della pressione intratoracica. La chiusura della glottide può non essere completa ed in ogni caso non è essenziale ai fini di una tosse efficace come dimostra il fatto che questa è possibile anche nei laringectomizzati nei quali l'aumento della pressione intratoracica si realizza esclusivamente attraverso le modificazioni della dinamica espiratoria. La fase espulsiva si verifica per una rapida abduzione attiva delle corde vocali che ha luogo dopo circa 2 decimi di secondo dalla sua chiusura. e che determina la fuoriuscita dell'aria in modo esplosivo a forte velocità.

Lo *starnuto* è un meccanismo analogo nel quale il riflesso è innescato da una stimolazione trigeminale e la fase espulsiva si verifica attraverso le fosse nasali.

Il *singhiozzo* è invece caratterizzato da una contrazione spasmodica ripetitiva dei muscoli inspiratori ed in particolar modo del diaframma a cui si associa una brusca parziale chiusura della glottide per cui l'aria passando attraverso una brusca fessura dà luogo ad un rumore caratteristico.

Il *riso* ed il *pianto* sono anch'essi dei singolari comportamenti respiratori inseriti nell'ambito di atti motorialmente complessi in cui la espirazione e la inspirazione sono intercese da contrazioni glottiche che interrompono bruscamente e momentaneamente il flusso aereo e si associano a particolari emissioni sonore.

Numerose teorie hanno tentato di spiegare il modo con cui la vibrazione cordale si realizza ed i meccanismi attraverso i quali può essere controllata e modificata (Fig. 9).

Sommessa dalle critiche, soprattutto perché incompatibile con certi principi di neurofisiologia, la teoria di Husson<sup>18</sup> che, basandosi sulle concezioni di anatomia microscopica del muscolo vocale di Goertler, identificava la vibrazione cordale come un fenomeno attivo, le attuali teorie scaturiscono dagli studi di cinematografia ultrarapida e di elettromiografia secondo i quali la ritmica apertura della rima glottica è un fenomeno eminentemente passivo. Gli attuali punti di vista<sup>19</sup> convergono su una teoria mioelastica-aerodinamica che è andata completandosi nel corso degli anni dopo l'ipotesi iniziale del 1898 di Ewald con il contributo di Gremy<sup>12</sup>, Van Den

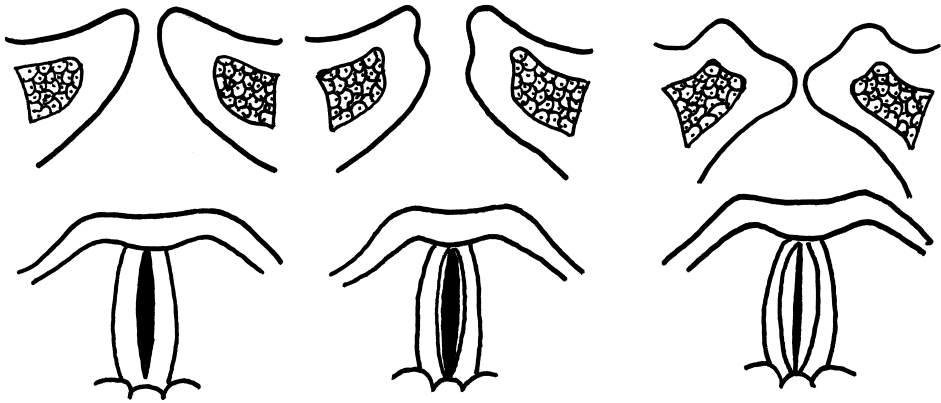


Fig. 9.

Berg<sup>33 34</sup>, Vallencien<sup>32</sup>, Perello<sup>27</sup>, Lafon e Cornut<sup>21</sup>, Hirano<sup>14</sup>, Dejonckere<sup>6</sup>. La componente mioelastica è l'insieme delle forze di natura muscolare ed elastica, legate alla funzione della muscolatura intrinseca e alle caratteristiche strutturali della corda vocale, che tendono ad addurre le corde vocali e che integrandosi in modo coordinato con la pressione sottoglottica sono alla base del ritmico scostamento del bordo cordale. L'energia aerodinamica è generata dal mantice polmonare che in fase espiratoria a glottide chiusa dà origine nella regione sottoglottica ad una pressione in grado di vincere le forze di adduzione con conseguente apertura della glottide. A causa della fuga d'aria si verifica una rapida diminuzione della pressione sottoglottica con conseguente nuovo prevalere delle forze mioelastiche di adduzione. Il flusso d'aria attraverso la sottile fessura glottica determina, per effetto Bernoulli, una retro-aspirazione che dà origine ad un'onda mucosa che si propaga dalla faccia inferiore della corda vocale fino al ventricolo e contemporaneamente contribuisce alla chiusura della glottide. L'insieme di questi eventi costituisce il ciclo vibratorio che si ripete mediamente 110 volte in un secondo nell'uomo e 200 volte nella donna; la frequenza dei cicli vibratorii è correlata all'altezza tonale del suono emesso che può variare considerevolmente per una complessa interazione di forze.

Numerosi fattori strutturali e funzionali spesso intercorrelati influenzano le caratteristiche acustiche del prodotto vocale: la pressione sottoglottica e sovraglottica, la pressione vibratoria di soglia (la minima pressione in grado di innescare il ciclo vibratorio) e la resistenza glottica; la lunghezza, il volume e la massa vibrante della corda vocale; la pressione, l'entità e la durata dell'accollamento dei bordi cordali; la viscosità dello strato superficiale della lamina propria, il tono e la tensione passiva del muscolo vocale.

I tre principali parametri acustici della voce sono l'*intensità*, l'*altezza tonale* ed il *timbro*.

L'*intensità* è l'ampiezza della variazione di pressione periodica dell'onda sonora. Essa dipende soprattutto dalla pressione sottoglottica che non sia però controbi-

lanciata da una eccessiva contrazione delle strutture glottiche. Secondo Husson <sup>17</sup> questa pressione equivale a 10 cm d'acqua nella conversazione calma (30 dB) ed aumenta progressivamente in rapporto al tipo ed all'intensità della emissione vocale per raggiungere valori di 160 cm di acqua nella voce proiettata ad 80 dB ed addirittura 360 cm nel canto tenorile al massimo della sua potenza (120 dB). Per ottenere un rapporto ottimale fra pressione sottoglottica ed intensità della voce è opportuno un adeguato affrontamento ed una bassa viscosità del «cover» che si traducono in un'ampia escursione del labbro vocale.

L'altezza tonale è la frequenza delle variazioni di pressione dell'onda sonora nell'unità di tempo. Dipende innanzitutto da un fattore strutturale, cioè la lunghezza e la massa delle corde vocali; la voce di un bambino che ha pliche vocali sottili e corte (dai 5 mm alla nascita ai 12 mm in età prepuberale) è più acuta di quella di una donna le cui corde misurano da 14 e i 18 mm mentre la voce di un uomo, le cui pliche misurano da 18 a 25 mm, è più grave. Essa è inoltre in rapporto diretto con la tensione della corda vocale che consegue alla contrazione del muscolo crico-tiroideo e che si traduce, peraltro, in un allungamento e può essere influenzata dalla contrazione del tiro-aritenoideo che determina un accorciamento ed un aumento della massa. Soprattutto alle basse frequenze di fonazione l'incremento della pressione sottoglottica ha spesso un effetto sulla frequenza fondamentale determinando contemporaneamente un aumento di intensità e di frequenza. La voce umana è in grado di esprimersi con un'ampia gamma tonale: nella voce parlata <sup>22</sup> la variazione frequenziale normalmente è compresa fra la1 e re2 nell'uomo, la2 e re3 nelle donne, re3 e la3 nei bambini (Tab. I).

**Tab. I.**Frequenza delle note in Hz nelle varie ottave per la3 = 440 Hz <sup>1</sup>.

Ottave →	1	2	3	4	5
Note ↓					
do	65,41	130,81	261,63	523,25	1046,5
do #	69,30	138,59	277,18	554,36	1108,7
re	73,42	146,83	293,67	587,33	1174,7
re #	77,78	155,56	311,13	622,26	1244,5
mi	82,41	164,81	329,63	559,26	1318,5
fa	87,31	174,61	349,23	698,46	1396,9
fa #	92,50	185	369,99	739,99	1480
sol	98	196	392	783,99	1568
sol #	103,83	207,65	415,30	830,61	1661,2
la	110	220	440	880	1760
la #	116,54	233,08	466,16	932,32	1864,6
si	123,47	246,94	493,88	987,76	1975,5

Viene definita estensione l'insieme delle frequenze che un individuo riesce a produrre (2-3 ottave) e tessitura l'escursione frequenziale della voce cantata i cui limiti variano in rapporto al tipo di registro con cui la voce viene prodotta. Non esiste una chiara ed unanime definizione di «registro»; la più semplice<sup>31</sup> è che il registro è una serie di frequenze che sono percepite come prodotte con la stessa modalità ed hanno quindi la stessa qualità acustica: ogni registro quindi si identifica sulla base di caratteristiche percettive, acustiche e fisiologiche; non vi è, inoltre, identità di vedute sul numero dei registri ed anche la terminologia utilizzata è spesso confusa. La maggioranza degli Autori distingue tre registri (di petto, misto e di testa) con una ulteriore possibile semplificazione che li riduce a due principali: di petto a cui corrisponde un atteggiamento morfo-funzionale laringeo con pliche vocali spesse e di testa in cui le corde vocali sono assottigliate); sono però possibili altri due registri molto poco utilizzati: lo «Stroh bass» registro particolarmente grave, con cui si possono produrre note al di sotto del fa1, usato in certi canti corali dell'est europeo in cui partecipa alla vibrazione anche l'apofisi vocale e il «Whistle register» o registro di fischio con il quale, attraverso un meccanismo comparabile a quello del flauto (in assenza di vibrazione cordale) che si può ottenere con un particolare atteggiamento della glottide posteriore, alcune voci femminili e infantili possono produrre suoni anche al di sopra di mi5.

Sulla base della tessitura considerata nell'insieme dei registri che ciascuna categoria riesce ad utilizzare le voci vengono classificate in sei classi<sup>1</sup>: tre per gli uomini (basso da mi1 a mi3, baritono da la1 a sol#3, tenore da2 a do4) e tre per le donne (contralto da sol#2 a fa4, mezzosoprano da la#2 a la#4, soprano da do3 a do5).

## BIBLIOGRAFIA

- 1 Amy de la Breteque B. *Le Chant: Contraintes & Liberté*. Courlay: J.M. Fuzeau S.A. 1991.
- 2 Basterra J, Dilly PN, Chumbley CC, Pellin A. *Glands in the human vocal cord*. Rev Laryngol 1988;109:477-80.
- 3 Berkowith BKB, Hickey SA, Moxham BJ. *Anatomy of the larynx*. In: Ferlito A, ed. *Diseases of the Larynx*. London: Arnold 2000:25-44.
- 4 Bianco S, Robuschi M. *Meccanica della tosse*. In: Braga PC, Allegra L, eds. *La Tosse*. New York: Raven Press, Ltd 1988:3-31.
- 5 Cornut G. *Fisiologia dell'apparato respiratorio*. In: Croatto L, ed. *Trattato di Foniatria e Logopedia. Volume I: Anatomia e fisiologia degli organi della comunicazione*. Padova: La Garangola 1985:21-46.
- 6 Dejonckère PH. *Physiologie phonatoire du larynx: le concept oscilloimpédantiel*. Rev Laryng 1987;108:365-8.
- 7 Fried MP. *The Larynx: a multidisciplinary approach*. Second Edition. St. Louis: Mosby-Year Book, Inc 1996.
- 8 Fried MP, Laureano AM. *Neurologic disorders of the larynx*. In: Ferlito A, ed. *Diseases of the Larynx*. London: Arnold 2000:353-61.
- 9 Gacek RR, Lyon MJ. *Fiber components of the recurrent laryngeal nerve in the cat*. Ann Otol 1976;85:460-71.
- 10 Gacek RR, Malmgren LT, Lyon MJ. *Localisation of adductor and abductor motor nerve fibers to the larynx*. Ann Otol 1977;86:770-6.
- 11 Gacek RR, Malmgren LT. *Laryngeal Motor Innervation-Central*. In: Blitzer A, Brin MF, Sasaki

- CT, Fahn S, Harris KS, eds. *Neurologic Disorders of the Larynx*. New York: Thieme Medical Publishers, Inc 1992:29-35.
- <sup>12</sup> Gremy F. *Considerations sur l'énergie mécanique du larynx durant la phonation*. J Physiol 1960;52:555-67.
- <sup>13</sup> Hartl DM, Brasnu D. *Les paralysies récurrentielles: connaissances actuelles et traitements*. Ann Otolaryngol Chir Cervicofac 2000;117:60-84.
- <sup>14</sup> Hirano M. *Structure and vibratory pattern of the vocal folds*. In: Sawashima N, Cooper FS, eds. *Dynamic Aspects of Speech Production*. Tokio: University of Tokio Press 1977:13-27.
- <sup>15</sup> Hirano M. *Outline of Voice Production and Its Examination*. In: Hirano M, ed. *Clinical examination of voice*. Vienna: Springer-Verlag 1981:1-10.
- <sup>16</sup> Hirano M. *Surgical anatomy and physiology of the vocal folds*. In: Gould WJ, Sataloff RT, Spiegel JR, eds. *Voice Surgery*. St. Louis: Mosby-Year Book 1993:135-58.
- <sup>17</sup> Husson R. *Étude des phénomènes physiologique et acoustiques fondamentaux de la voix chantée*. Paris: Thèse de la Faculté des Sciences 1950.
- <sup>18</sup> Husson R. *Physiologie de la phonation*. Paris: Masson 1962.
- <sup>19</sup> Jiang J, Lin E, Hanson DG. *Vocal Fold Physiology*. In: Rosen CA, Murry T. *The Otolaryngologic Clinics of North America. Voice Disorders and Phonosurgery I*. Philadelphia: W.B. Saunders Co. 2000:699-718.
- <sup>20</sup> Krmptotic-Nemanic J. *Cenni di embriologia e anatomia del sistema vibratorio*. In: Croatto L, ed. *Trattato di Foniatria e Logopedia. Volume I: Anatomia e fisiologia degli organi della comunicazione*. Padova: La Garangola 1985:47-71.
- <sup>21</sup> Lafon JC, Cornut G. *Étude de la formation impulsionnelle de la voix et de la parole*. Folia Phoniatrica 1960;12: 176-181.
- <sup>22</sup> Lafon J-C, Faure M-A. *Fisiologia del sistema vibratorio*. In: Croatto L, ed. *Trattato di Foniatria e Logopedia. Volume I: Anatomia e fisiologia degli organi della comunicazione*. Padova: La Garangola 1985:73-97.
- <sup>23</sup> Le Huche F, Allali A. *La voce. Volume I: anatomia e fisiologia degli organi della voce e della parola*. Seconda Edizione. Milano: Masson 1993.
- <sup>24</sup> Malmgren LT, Gacek RR. *Periferal Motor Innervation of the Larynx*. In: Blitzer A, Brin MF, Sasaki CT, Fahn S, Harris KS, eds. *Neurologic Disorders of the Larynx*. New York: Thieme Medical Publishers Inc. 1992:36-44.
- <sup>25</sup> Munari FP, Fabretto DA. *Anatomia dell'apparato respiratorio*. In: Croatto L, ed. *Trattato di Foniatria e Logopedia. Volume I: Anatomia e fisiologia degli organi della comunicazione*. Padova: La Garangola 1985:3-19.
- <sup>26</sup> Nemiroff PM, Katz AD. *Extralaryngeal division of the recurrent laryngeal nerve*. Am J Surg 1982;144:466-9.
- <sup>27</sup> Perello J. *La théorie muco-ondulatoire de la phonation*. Ann Oto-Larynx 1962;79:722-5.
- <sup>28</sup> Piazza C, Nicolai P, Antonelli AR. *La patologia iatrogenica nella chirurgia del collo*. In: Balli R, ed. *La patologia iatrogenica in O.R.L.* Torino: Edizioni Minerva Medica 1998:125-66.
- <sup>29</sup> Sataloff RT. *Clinical Anatomy and Physiology of the Voice*. In: *Professional Voice. The Science and Art of Clinical Care*. Second Edition. San Diego-London: Singular Publishing Group Inc. 1997:111-30.
- <sup>30</sup> Schweizer V, Dörfel J. *The anatomy of the inferior laryngeal nerve*. Clin Otolaryngol 1977;22:362-9.
- <sup>31</sup> Sundberg J. *The Science of the Singing Voice*. DeKalb: Northern Illinois University Press 1987.
- <sup>32</sup> Vallancien B. *Étude physiologique de la phonation*. G.M. de France 1971;78:4537-8.
- <sup>33</sup> Van Den Berg J. *Sur les théories myoélastique et neurochronaxique de la phonation*. Rev Laryngol 1954;75:492-512.
- <sup>34</sup> Van Den Berg J, Tan TS. *Donnés nouvelles sur la fonction laryngée*. J F O.R.L. 1959;8:103-8.
- <sup>35</sup> Widdicombe J.G. *Fisiologia della tosse*. In: Braga PC, Allegra L, eds. *La Tosse*. New York: Raven Press, Ltd. 1988:3-31.