

La fisiochinesiterapia respiratoria del polmone profondo. Basi meccaniche di un nuovo paradigma (Prima parte)

G. Postiaux

Gruppo di studio interdisciplinare, Servizio di Terapia Intensiva – site Notre-Dame (GHDC), Haute Ecole Condorcet-Hainaut, section kinésithérapie, Grand Hopital de Charleroi, Charleroi, Belgio

Riassunto

La letteratura medica recente dimostra un rinnovato interesse per le lesioni delle vie aeree distali, caratterizzate dallo stretto contatto col parenchima polmonare. Nonostante esse rappresentino la prima sede colpita dalle patologie polmonari bronco-secretive, le affezioni del polmone profondo non sono mai state oggetto di una proposta fisioterapica specifica. La classificazione funzionale delle tecniche manuali di fisioterapia, riferita ad un modello monoalveolare delle vie aeree, permette, superando la loro terminologia immaginifica o storica, di ridefinirle e di identificarne gli effetti sui quattro comparti del suddetto modello. Le tradizionali tecniche espiratorie, efficaci sulle vie aeree prossimali e medie, non sono applicabili a quelle distali. Questo limite impone un differente approccio al polmone profondo che deve diventare l'obiettivo prioritario della fisioterapia respiratoria. Considerando le sue specifiche caratteristiche meccaniche, viene proposto un nuovo paradigma che privilegia l'inspirazione lenta, effettuata contro resistenza ed in decubito laterale. L'auscultazione polmonare costituisce la pietra angolare per la validazione della tecnica ed il follow up clinico nel corso della sua applicazione.

Abstract

Recent medical literature has shown that there has been renewed interest focused on the small airways deep in the lung tissue. Although there is involvement of the distal airways at an early stage in mucus secreting lung diseases, no specific chest physical therapy (CPT) manoeuver has been proposed for small airways clearance. A four-tier classification of CPT has been established with identification of its benefits at each level of a monoalveolar respiratory tract model. The usual expiratory techniques directed towards

the upper and middle respiratory tract are not applicable to the small airways and new paradigm is proposed appropriate to their specific mechanical characteristics. This comprises a slow resistive inspiratory manoeuver in the lateral position. Clinical auscultation of the lung is the cornerstone of the validation and follow-up of the technique.

Introduzione

Nel corso dei decenni 1960-1970, l'ostruzione delle vie aeree distali (VAD) fu oggetto di particolare attenzione da parte dei fisiopatologi. Alcuni fisioterapisti condivisero tale interesse e le loro ricerche giunsero a proporre manovre espiratorie lente al fine di eliminare le secrezioni in eccesso da questa regione cruciale del polmone. Studi isotopici della clearance mucociliare (CMC) hanno identificato i bronchi medi come sede dei loro effetti, mentre ne hanno evidenziato i limiti a livello delle vie aeree distali legati al raggiungimento della capacità di chiusura [1-3]. Inoltre non è mai stata dimostrata la validità di nessuno dei classici metodi di fisiochinesiterapia mirati alle lesioni restrittive, come le polmoniti in stadio di consolidamento. La mancanza di una metodologia specifica per lo studio di questa regione polmonare costituisce tuttora una lacuna per la fisioterapia respiratoria. La recente rinascita dell'interesse della letteratura per le VAD giustifica il fatto che la fisioterapia si occupi nuovamente del polmone profondo, a partire dagli elementi meccanici che caratterizzano il suo comportamento dinamico. Ciò richiede che tutti i metodi e le tecniche manuali di fisioterapia respiratoria siano presi in esame, così come i loro effetti sui quattro diversi comparti dell'apparato respiratorio. Un inventario storico contribuisce a questa rassegna.

CORRISPONDENZA

xxxxxxxxxx

PAROLE CHIAVE

Fisiochinesiterapia, polmone profondo, vie aeree distali, resistenza inspiratoria, decubito laterale.

KEYWORDS

Chest physical therapy, Deep lung, Small airways, Inspiratory resistance, Lateral position.

Inventario storico delle tecniche manuali di fisioterapia respiratoria

Questo richiamo storico considera tra le voci bibliografiche solo gli articoli principali relativi a ciascuna tecnica di fisioterapia respiratoria, non avendo come scopo la definizione del loro livello di prova.

Le prime pubblicazioni "scientifiche", relative alle tecniche manuali di disostruzione bronchiale, appaiono in Nuova Zelanda agli inizi degli anni '70, a partire da una proposta di Thompson e collaboratori che descrivono la *tecnica di espirazione forzata* (FET) applicata in portatori di mucoviscidiosi [4]. Successivamente appare la spirometria incentiva (SI) per trattare le lesioni restrittive conseguenti a chirurgia addominale [5,6]. La FET viene proposta in associazione a percussioni/vibrazioni e posture corporee ritenute favorevoli alla migrazione delle secrezioni, per gravità, verso le vie bronchiali prossimali, dove vengono eliminate con la tosse [7-9]. Questa metodica composta diviene la *conventional chest physiotherapy* (cCPT) che è tuttora il *gold standard* del mondo anglosassone. La cCPT si diffonde nell'Europa continentale dove è più raramente prescritta come *clapping* e drenaggio posturale; l'assenza di validazione scientifica la fa oggi considerare una tecnica obsoleta [10]. La cCPT evolve verso la definizione di *active cycle of breathing techniques* (ACBT) che fa appello, nella medesima seduta, a tutte le modalità ventilatorie cui associa il drenaggio posturale al quale vengono attribuiti i maggiori effetti della tecnica stessa [11,12]. In realtà è alla FET che bisogna attribuire gli effetti principali di tale protocollo che riguarda essenzialmente l'albero bronchiale prossimale [13]. Ecco perché il confronto di due protocolli che prevedono la FET associata al drenaggio posturale o a una pressione espiratoria positiva (PEP) fa osservare identici effetti sulla clearance tracheobronchiale [14]. La FET è dunque l'elemento determinante del trattamento, ma non ottiene risultati a lungo termine [15]. È opportuno ricordare che sono le regioni inferiori del pol-

mone, cioè quelle poste più in basso e dunque le più distensibili, a contribuire maggiormente all'eliminazione delle secrezioni, grazie alla relazione che lega la qualità della CMC all'entità della ventilazione regionale [16,17]. Questo dato fisiologico, supportato da studi con isotopi, gioca a favore di una mobilizzazione delle secrezioni "contro la gravità", contrariamente a quanto ritenuto dalla concezione anglosassone comune alla cCPT ed alla ACBT. Questo dato è stato ugualmente verificato per il neonato [18].

Altre manovre giungono a completare l'arsenale delle tecniche di fisioterapia respiratoria: in Francia l'accelerazione del flusso espiratorio (AFE) (*increase exhalation technique* (IET)) [19] e la tecnica insufflatoria di risoluzione delle atelectasie (TILA) [20], in Belgio l'espirazione lenta totale, a glottide aperta, in decubito laterale (ELTGOL) [21], l'espirazione lenta prolungata (ELPr) [22] (*prolonged slow expiration technique* (PSE)), il drenaggio autogeno (DA) [23] e l'esercizio a flusso inspiratorio controllato (EDIC) [24,25], in Inghilterra, più recentemente, la *resistive inspiratory maneuver* (RIM) [26]. Di fatto EDIC e RIM sono applicazioni particolari della SI.

Tutte queste tecniche sono abbinate alla tosse ad alto (THV) o basso volume (TBV) polmonare, alla tosse diretta (TD) o provocata (TP) nel neonato, a mobilizzazioni toraciche localizzate [27], a pressioni positive espiratorie (PEP) (mai inspiratorie!) e vibrazioni manuali o strumentali. Nel neonato la disostruzione rinofaringea retrograda (DRR), che è un russamento riflesso, è utilizzata in modo empirico per ripristinare la pervietà delle vie aeree extratoraciche.

Di fronte a questo arsenale, come giungere ad una nomenclatura didattica ed al tempo stesso analitica, per precisarne modalità e sedi di azione? La Consensus Conference di Lione (1994) si è dedicata a questo compito, ma senza riuscire a superare una multipla terminologia di carattere storico e fornendo raccomandazioni poco precise. Alcune tecniche simili sono state considerate differenti tra loro, altre sono state raggruppate

nonostante fondamentalmente diverse dal punto di vista funzionale.

Ad esempio la tosse, la FET e l'AFE sono state mantenute distinte, mentre si avvalgono della medesima manovra di espirazione forzata. Ogni espirazione forzata è caratterizzata funzionalmente dalla comparsa di un punto di ugual pressione lungo l'albero bronchiale. A valle di questo punto, il calibro del segmento bronchiale detto "a flusso limitato" si riduce, dando luogo ad un incremento locale della velocità dei gas ed a forze di frizione (interazione gas-liquido) che favorisce il distacco delle secrezioni [28]. Questa confusione funzionale si ritrova in una recente rassegna Cochrane che accomuna AFE-FET ed ELPr-PSE, giungendo pertanto ad una conclusione discutibile [29].

Questi errori possono essere evitati procedendo ad una analisi funzionali delle diverse tecniche.

Classificazione funzionale delle tecniche di fisioterapia respiratoria

La funzione polmonare si avvale di quattro modalità di ventilazione: inspirazioni ed espirazioni, lente e forzate, riconoscibili su uno spirogramma e su una curva flusso/volume.

I loro effetti su differenti sedi dell'apparato respiratorio possono essere riportati in un modello monoalveolare del polmone, derivato da quello morfometrico di Weibel [30] (Figura 1A). Ogni comparto è caratterizzato da un tipo di flusso: turbolento nelle vie aeree prossimali, laminare nei bronchi medi e "quasi assenza di flusso in periferia". L'analisi dell'insieme della letteratura contribuisce a precisare questa localizzazione [31].

È opportuno sottolineare che il modello meccanico monoalveolare cui si fa riferimento costituisce una semplificazione importante. In effetti all'interno dell'acino "gli alveoli non sono soltanto delle bolle al termine dei canali alveolari, ma delle camere laterali dove le fibre assiali si estendono all'interno del compartimento alveolare, conferendo al polmone profondo il carattere di *tensegrity structure*" (E. Weibel, comunicazione

personale, dicembre 2012). Analogamente “è riduttivo affermare che il flusso è nullo in periferia, dove la diffusione dell’ossigeno è più rapida del flusso aereo. Benché molto basso, un flusso nei canali alveolari esiste e negli alveoli è ancor più ridotto” (E. Weibel, comunicazione personale, febbraio 2013) [32]. In sede alveolare il movimento dei gas è piuttosto di tipo browniano. Il modello proposto è comunque molto utile dal punto di vista meccanico poiché consente di comprendere la suddivisione “quadri-ripartita” degli effetti della fisioterapia respiratoria sull’albero naso-tracheo-bronco-alveolare. Gli effetti sulla clearance tracheo-bronchiale delle quattro modalità di ventilazione possono essere così riferiti a questo modello (Figura 1B):

- > Le tecniche di espirazione forzata sono la FET, la TP, la TD e l’AFE. La sede predominante della loro azione corrisponde alle vie aeree prossimali, cioè alle 4-5 prime generazioni bronchiali. Seguono l’applicazione delle tecniche di espirazione lenta, allorché le secrezioni sono risalite dai bronchi medi verso le vie bronchiali prossimali.
- > Le tecniche espiratorie lente sono la ELTGOL, la ELPr, il DA. Consentono di avere effetti prevalentemente nell’albero bronchiale medio, la loro azione si localizza di preferenza oltre i bronchi prossimali e fino alla 8^a-10^a generazione bronchiale. Cronologicamente, queste tecniche precedono quelle di espirazione forzata.
- > Le tecniche di inspirazione forzata sono il DRR ed lo “sniffing” che favoriscono la disostruzione delle vie aeree extratoraciche, rinofaringee.
- > Le tecniche inspiratorie lente sono la SI, la EDIC e la RIM che interessano il polmone profondo, distalmente alla 10^a generazione bronchiale (Figura 1B).

Tra queste quattro modalità ventilatorie “standard” si possono avere valori di flusso intermedi, in qualche modo modulati. Questa classificazione funzionale permette di superare la terminologia storica, ma questa va dunque abolita? Certamente no, poiché fa parte di un linguaggio comune, precisa delle scelte posturali, si riferisce preferibilmente ad una

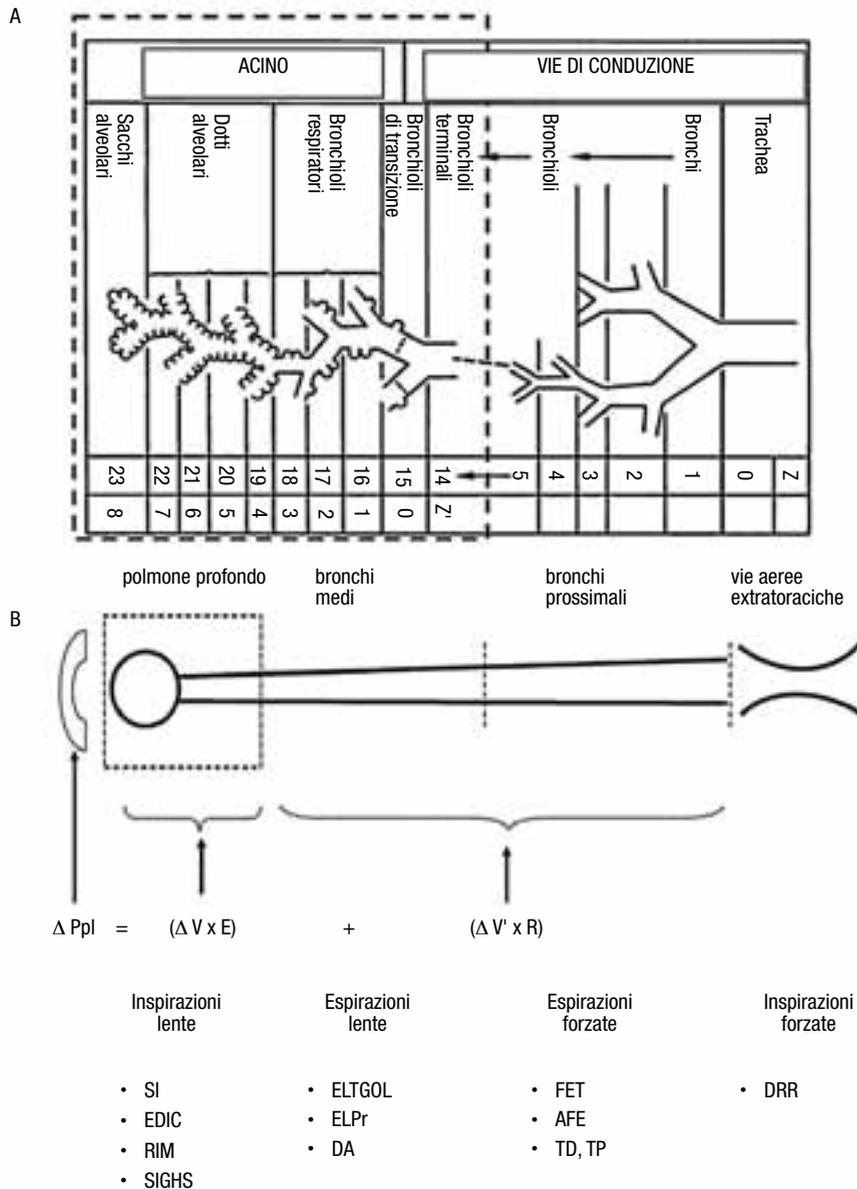


Figure 1 Nomenclature des techniques manuelles de kinésithérapie. A. Le modèle morphométrique de Weibel (1968, 2009) distingue les zones de conduction et des échanges. B. À ce modèle peut être schématiquement associé un modèle physico-mathématique mono-alvéolaire de l’appareil respiratoire et de la kinésithérapie respiratoire qui est une application de l’équation du mouvement du poumon. Quatre étages et quatre groupes de manoeuvres peuvent être identifiés en rapport au type local d’écoulement gazeux. Les encadrés tracent les limites du poumon profond et du lieu d’action des inspirations lentes. Ppl: pression pleurale, V: volume, E: élastance, V’: débit, R: résistance. SI: spirométrie incitative, EDIC: exercice à débit inspiratoire contrôlé, RIM: resistive inspiratory maneuver, ELTGOL: expiration lente totale glotte ouverte en infra-latéral, ELPr: expiration lente prolongée, DA: drainage autogène, FET: *forced expiration technique*, AFE: accélération du flux expiratoire, TD: toux dirigée, TP: toux provoquée, DRR: désobstruction rhinopharyngée rétrograde. Avec les permissions de Springer Science. Business Media-Verlag et de Erwan Weibel pour la partie A de la figure.

determinata fascia d’età e precisa alcune varianti applicative. In ogni caso, qualunque sia la procedura, la loro identità funzionale aiuta nella comprensione del loro meccanismo d’azione e permette una classificazione semplificata, interessante sul piano didattico.

Tecniche di fisioterapia disostruttiva e meccanismi di difesa del polmone

Queste tecniche devono essere considerate come le principali, mentre quelle strumentali hanno un significato complementare o aggiuntivo

[33]. Le seconde non possono essere considerate equivalenti alle prime, poiché riproducono degli atti fisiologici di cui esse non sono che un'applicazione o una imitazione. Alcuni contesti patologici costituiscono una eccezione. Ad esempio, nel caso di patologie neuromuscolari, le tecniche strumentali come l'assistenza alla tosse o la ventilazione meccanica giocano un ruolo essenziale [34-36].

L'apparato respiratorio è l'unico sistema dell'organismo a diretto contatto con l'ambiente: ad ogni atto ventilatorio l'essere umano inala milioni di aerocontaminanti, sostanze esogene microbiologiche, organiche ed inorganiche. Nonostante ciò, a partire dalla settima generazione, l'albero bronchiale è sterile grazie a meccanismi di difesa particolarmente efficaci basati su elementi strutturali (cellule cigliate, cellule sierose o mucose, neurosecretorie, ghiandole bronchiali, surfactant...), ematologici (tessuto linfoide, plasmociti, mastociti, macrofagi, leucociti,...), immunologici, enzimatici, sul sistema fagocitario e sulla presenza del surfactant.

La ventilazione e le sue diverse modalità costituiscono di per sé un elemento depuratore stimolando la CMC [37-39]. La stasi di secrezioni osservabile in periodo post-operatorio e nei portatori di malattie neuromuscolari è un esempio di clearance deficitaria legata ad un'insufficienza ventilatoria [40]. Tali processi ventilatori sono innati come il fatto di tossire, sospirare, russare, espirare a labbra increspate o gemere adottati spontaneamente dai pazienti. La parola, il canto, il grido ed il pianto del neonato producono vibrazioni e contribuiscono anch'essi alla rimozione delle secrezioni. L'ingombro broncopolmonare può dunque essere considerato come la conseguenza dell'inefficienza temporanea o definitiva dei meccanismi di difesa. Ciò accade in quattro circostanze:

- > allorché il volume delle secrezioni è eccessivamente elevato;
- > allorché un'alterazione delle proprietà reologiche delle secrezioni le rende troppo aderenti;
- > in presenza di alterazione della funzione ciliare;

> in caso di inefficacia dell'effettore muscolare.

La fisioterapia respiratoria trova allora la sua indicazione, ma non può fare altro che riprodurre dei fenomeni naturali, imitandoli in qualche modo: ecco nuovamente giustificata la ridefinizione delle varie tecniche dal punto di vista funzionale e meccanico, il che ci permette di identificare i loro effetti sulla CMC.

Il pianto dei neonati ci fornisce un esempio di più componenti sinergiche:

> l'adduzione delle corde vocali è un potente freno che prolunga l'espirazione e genera delle pressioni intratoraciche elevate, come farebbe l'applicazione di una pressione positiva espiratoria. La pervietà bronchiale distale che ne risulta, tende ad uniformare le costanti di tempo delle unità polmonari, rendendo l'espirazione omogenea (con effetti positivi sugli scambi gassosi) e favorendo la mobilizzazione delle secrezioni distali.

> il pianto è un fenomeno sonoro che produce vibrazioni meccaniche di grande ampiezza che si trasmettono a tutte le strutture broncopolmonari. Esse favorirebbero il trasporto mucociliare per risonanza ciliare e per interazione gas-liquido in grado di far oscillare la colonna d'aria. Lo stesso metodo di analisi può essere applicato a tutte le tecniche composite come il DA, l'ACBT, la cCPT.

> Le analisi funzionale e meccanica riconducono le tecniche manuali di fisioterapia respiratoria alle quattro modalità ventilatorie: inspirazioni ed espirazioni, lente o forzate.

È opportuno ricordare che l'azione della fisioterapia si limita agli effetti reversibili causati dalla presenza di secrezioni o essudati muco-infiammatori di origine infettiva. Danni strutturali noti come secondari alla flogosi cronica, al broncospasmo [41] o ad alterazioni anatomiche relative a malattie sistemiche, richiedono terapie mediche specifiche [42].

Il polmone profondo, obiettivo prioritario della fisioterapia respiratoria

La ramificazione dell'albero bronchiale, di tipo dicotomico, comporta 23 generazioni. I bronchioli terminali compaiono alla 8^a-10^a generazione fino alla 14^a-16^a cui succedono, all'ingresso dell'acino, i bronchioli di transizione e quindi i bronchioli respiratori, nelle cui pareti sono presenti unità alveolari. Più precisamente "i bronchioli di transizione, cioè i primi bronchioli respiratori che seguono quelli denominati bronchioli terminali, si trovano in media nella 14^a generazione, ma con una certa distribuzione tra la 10^a e la 18^a a causa dell'andamento irregolare dell'albero bronchiale che deve distribuire l'aria a tutto il polmone, la cui forma non è regolare". (E. Weibel, comunicazione personale, dicembre 2012). Elementi di suddivisione appaiono nel tessuto polmonare fino alla 23^a generazione. Le VAD sono abitualmente definite come le vie aeree che hanno un diametro interno pari o inferiore ai 2 mm e sono sprovviste di cartilagine [43,44]. La loro pervietà è assicurata dalla tensione elastica del tessuto circostante [45]. Le VAD sono caratterizzate dalla facile collassabilità ed il tessuto polmonare dall'isteresi. L'intreccio interdependente delle fibre dei bronchioli con quelle del parenchima polmonare ne fa un'entità anatomo-funzionale unica, qui definita come polmone profondo, sede degli eventi principali della funzione respiratoria [46] (Figura 1A, B). Nel soggetto sano, le VAD costituiscono una componente minoritaria della resistenza totale, al contrario di quanto accade nei soggetti malati, nei quali è ripartita in modo eterogeneo [47]. Divengono il punto critico per la pervietà globale delle vie aeree ostruite da essudato muco-infiammatorio o da tappi di muco. Le VAD sono il punto di origine e la sede principale dell'ostruzione nella maggior parte delle patologie bronco-secretive [48-53]. La pervietà delle VAD può essere apprezzata per mezzo di diversi test funzionali. La determinazione delle loro resistenze richiede un pletismo-grafo o, con metodica invasiva, la mi-

sura della pressione esofagea. La misura del VR ed il suo rapporto con la CPT permettono di valutare la presenza di iperinflazione, segno indiretto di chiusura prematura delle VAD con intrappolamento aereo. La misurazione dell'azoto espirato e del volume di chiusura sono invece appannaggio di laboratori specializzati. La morfologia della curva flusso/volume (in caso di ostruzione si osserva concavità della parte destra della sua porzione espiratoria) e la misurazione dei flussi tra il 25% e 75% della capacità vitale sono elementi facilmente disponibili nella routine clinica.

Il polmone profondo è parimenti la sede di patologie polmonari restrittive: polmoniti ed atelectasie. Al loro stadio acuto di consolidamento parenchimale non corrisponde alcuna proposta di fisioterapia, salvo alcune segnalazioni in favore di accorgimenti posturali come in rianimazione neonatale. I rari studi disponibili a proposito della fisioterapia respiratoria in caso di consolidamento polmonare, nell'adulto e nel bambino, non la ritengono efficace [54,55].

Questa mancanza di risultati deriva da tre fattori:

> La soluzione proposta è di tipo classicamente espiratorio e dunque non può che interessare il tratto prossimale o medio dell'albero tracheobronchiale.

> I test funzionali disponibili raccolgono un segnale globale alla bocca, incapace di evidenziare gli eventuali effetti loco-regionali di una seduta di fisioterapia.

> La valutazione stetoacustica, spazialmente più vicina e selettiva, è trascurata.

Il rapporto di proporzionalità spiega la minor importanza relativa delle vie aeree prossimali e medie rispetto al polmone profondo. Le tecniche usuali, di tipo espiratorio, non riguardano che la zona di conduzione (sede dei flussi e della resistenza), il cui volume totale è di soli 150 ml e la superficie di 0,5 m²; al contrario la zona di scambio (luogo dei volumi e della compliance) ha un volume 20 volte superiore (circa 3000 ml) e la sua area è di circa 100-150 mq [56]. Spesso la presenza di secrezioni bronchiali nelle vie aeree prossimali non è altro che l'effetto a distanza di

una patologia distale. In alcune patologie questa migrazione può durare più ore, in altre parecchi giorni [57]. In caso di ostruzione patologica delle VAD, la ventilazione degli spazi alveolari a valle della stessa può essere conservata per qualche tempo grazie alla ventilazione collaterale assicurata dai pori di Khon, dai canali di Lambert e da quelli di Martin. Il bambino piccolo ne è sprovvisto. Questo meccanismo di protezione previene o ritarda la comparsa di atelectasie [58-60]. Nonostante l'atelectasia post-ostruttiva ed il consolidamento polmonare costituiscano funzionalmente delle sindromi restrittive, la loro eziologia e patogenesi sono diverse: la restrizione atelectasica corrisponde ad una riduzione volumetrica per uno svuotamento delle unità alveolari, quella secondaria a polmonite deriva dall'occupazione di volume alveolare da parte di liquidi e materiali biologici diversi. Da un punto di vista semplicemente meccanico, appare dunque logico tentare di richiamare aria negli spazi aerei periferici, indipendentemente dal meccanismo di base. Ecco il concetto sul quale dovrà basarsi il trattamento fisioterapico: il "reclutamento alveolare" inspiratorio, adottando accorgimenti posturali relativi alla precisa localizzazione dell'alterazione. Il termine di *disostruzione bronco-polmonare*, riferito più specificatamente al polmone profondo, deve essere preferito a quello più riduttivo di *disostruzione* che riguarda le sole vie di conduzione.

> Il polmone profondo possiede caratteristiche particolari che lo indicano come obiettivo prioritario della fisioterapia respiratoria:

- le vie aeree distali sono il punto di origine della maggior parte delle patologie broncosecretive,
- le tradizionali tecniche espiratorie hanno scarsi effetti sulle vie aeree distali, il loro limite è costituito dal volume di chiusura delle vie aeree,
- l'ingombro bronchiale prossimale non è che l'effetto a distanza di un'alterazione distale,
- il rapporto di proporzionalità tra le vie di conduzione ed il polmone profondo giustifica la relativa minore importanza delle vie aeree.

Bibliografia

- [1] Postiaux G, Lens E, Alsteens G, et al. Efficacité de l'expiration lente totale glotte ouverte en décubitus latéral (ELTGOL) sur la toilette en périphérie de l'arbre trachéo-bronchique. *Ann Kinesither* 1990;3:87-89.
- [2] Postiaux G. Des techniques expiratoires lentes pour l'épuration des voies aériennes distales. Rapport d'expertise. Proc. 1^{ère} Conférence de Consensus sur la toilette bronchique. *Ann Kinesither* 1997;24:166-177.
- [3] Martins JA, Dornelas de Andrade A, Britto CR, et al. Effect of ELTGOL on mucus clearance in stable patients with chronic bronchitis. *Respir Care* 2012;57:420-426.
- [4] Thompson B, Thompson HT. Forced expiration exercises in asthma and their effect on FEV₁. *NZ J Physiotherapy* 1968;3:19-21.
- [5] Bartlett RH, Gazzaniga AB, Geraghty TR. The yawn maneuver: prevention and treatment of postoperative pulmonary complications. *Surg Forum* 1971;22:196-198.
- [6] Bartlett RH, Brennan ML, Gazzaniga AB, et al. Studies on the pathogenesis and prevention of postoperative pulmonary complications. *Surg* 1988;137:925-933.
- [7] Gaskell DV, Webber BA. The Brompton hospital guide to chest physiotherapy. 4th ed. Blackwell scientific publications; 1982, 120 pp.
- [8] Pryor JA, Webber BA, Hodson ME, et al. Evaluation of the forced expiration technique as an adjunct to postural drainage in treatment of cystic fibrosis. *Br Med J* 1979;2:417-418.
- [9] Frownfelter D. Chest Physical Therapy and pulmonary rehabilitation. Chicago: Year Book Medical Publishers, INC; 1978, 678 pp.
- [10] Postiaux G, Lahaye JM, Lens E, et al. Le drainage postural en question. *Kinesither Sci* 1985;238:13-43.
- [11] Webber BA. The active cycle of breathing technique. *Ped Pulmonol* 1992;Suppl. 8:S9.1.
- [12] Miller S, Hall DO, Clayton CB, et al. Chest physiotherapy in cystic fibrosis: a comparative study of autogenic drainage and active cycle of breathing techniques. *Thorax* 1995;50:165-169.
- [13] Van Hengstrum M, Festen J, Beurskens C, et al. Conventional physiotherapy and forced expiration maneuvers have similar effects on tracheobronchial clearance. *Eur Respir J* 1988;1:758-761.
- [14] Mortensen J, Falk M, Groth S, et al. The effects of postural drainage and positive expiratory pressure physiotherapy on tracheobronchial clearance in cystic fibrosis. *Chest* 1991;100:1350-1357.
- [15] Cross LJ, Elender F, Barton G, et al. An evaluation of the effectiveness of manual chest physiotherapy techniques on quality of life at six months post exacerbation of COPD (MATREX): a randomised controlled equivalence trial. *BMC Pulm Med* 2012;12:33.
- [16] Kim CS, Greene MA, Sankaran S, et al. Mucus transport in the airways by two-phase gas-liquid flow mechanism: continuous flow model. *J Appl Physiol* 1986;3:908-917.

- [17] van der Schans CP. Bronchial mucus transport. *Respir Care* 2007;52:1150-1156.
- [18] Pham TM, Yuill M, Dakin C, et al. Regional ventilation distribution in the first months of life. *Eur Respir J* 2011;37:919-924.
- [19] Barthe J, Catalano G, Delaunay JP. Kinésithérapie respiratoire dans les bronchiolites. *J Pediatr Puericult* 1988;1:41-45.
- [20] Herry S. Technique insufflatrice de levée d'atélectasie (TILA) en réanimation néonatale. *Kinesither Rev* 2007;65:30-34.
- [21] Postiaux G, Lens E, Alsteens G, et al. L'expiration lente totale glotte ouverte en décubitus latéral (ELTGOL): nouvelle manœuvre pour la toilette bronchique objectivée par vidéobronchographie. *Ann Kinesither* 1987;7-8:341-350.
- [22] Postiaux G. Quelles sont les techniques de désencombrement bronchique et des voies aériennes supérieures adaptées chez le nourrisson? Rapport d'expertise Conférence de Consensus sur la Bronchiolite du Nourrisson. Paris 21 septembre 2000. *Arch Ped* 2001;8:117-125.
- [23] Dab IF, Alexander P. Evaluation of the effectiveness of a particular bronchial drainage procedure called autogenic drainage. Cystic fibrosis. Gent, Belgium: D. Baran-E. Van Bogaert European press; 1977. p. 185-187.
- [24] Postiaux G. Kinésithérapie respiratoire et auscultation pulmonaire. Deboeck-Wesmael, Éditions Universitaires; 1990, 224 pp.
- [25] Postiaux G. Kinésithérapie et pathologie du poumon profond. Les techniques inspiratoires lentes pour l'épuration des voies aériennes périphériques. *Rev Mal Respir* 2000;17:S315-318.
- [26] Chatham K, Ionescu AA, Nixon LS, et al. A short-term comparison of two methods of sputum expectoration in cystic fibrosis. *Eur Respir J* 2004;435-439.
- [27] Hubert J. Mobilisations du thorax. Kinésithérapie respiratoire tome 2. Paris: Chiron; 1989, 191 pp.
- [28] Mead J, Turner JM, Macklem PT, et al. Significance of relationship between lung recoil and maximum expiratory flow. *J Appl Physiol* 1967;22:95-108.
- [29] Roqué i Figuls M, Giné-Garriga M, Granados Rugeles C, et al. Chest physiotherapy for acute bronchiolitis in paediatric patients between 0 and 24 months old. *Cochrane Database Syst Rev* 2012;2:CD004873.
- [30] Weibel ER, Gomez DM. Architecture of the human lung. *Science* 1962;137:577-585.
- [31] Postiaux G, 354 pp La kinésithérapie respiratoire de l'enfant. Les techniques de soins guidées par l'auscultation pulmonaire. 3eed. Bruxelles: Deboeck-Université; 2003.
- [32] Weibel E. It takes more than cells to make a good lung. *Am J Respir Crit Care Med* 2013;187:342-346.
- [33] Reyckler G, Coppens T, Leonard A, et al. Mucoviscidose: les techniques instrumentales de désencombrement des voies aériennes. *Rev Mal Respir* 2012;29:128-137.
- [34] Hull J, Anipravan R, Chan E, et al. British Thoracic Society guideline for respiratory management of children with neuromuscular weakness. *Thorax* 2012;67:1-40.
- [35] Toussaint M, Steens M, Soudon P. L'insufflation-exsufflation mécanique (Cough-Assist et Pegaso®): bases physiologiques, indications et recommandations pratiques. *Reanimation* 2009;18:137-145.
- [36] Toussaint M, Boitano LJ, Gathot V, et al. Limits of effective cough-augmentation techniques in patients with neuromuscular disease. *Respir Care* 2009;54:359-366.
- [37] Griesse M. Pulmonary surfactant in health and human lung diseases state of the art. *Eur Respir J* 1991;1455-1476.
- [38] Puchelle E. Airway secretions: new concepts and functions. *Eur Respir J* 1992;5:3-4.
- [39] Girod S, Zahm J, Plotkowski C, et al. Role of the physicochemical properties of mucus in the protection of the respiratory epithelium. *Eur Respir J* 1992;5:477-487.
- [40] Houtmeyers E, Gosselinck R, Gayan-Ramirez G, et al. Regulation of mucociliary clearance in health and disease. *Eur Respir J* 1999;13: 1177-1188.
- [41] Grainge CL, Lau LC, Ward JA, et al. Effect of bronchoconstriction on airway remodeling on asthma. *N Engl J Med* 2011;364:2006-2015.
- [42] Tillie-Leblond U, Crestani B, Perez T, et al. Voies aériennes distales et maladies de système. *Rev Mal Respir* 2012;29:1254-1263.
- [43] Tammeling GJ, Quanjer H. Physiologie respiratoire. Ed Boehringer Ingelheim SA; 1979. p. 38.
- [44] Burgel PR, Bourdin A, Chanez P, et al. Update on the role of distal airways in COPD. *Eur Respir Rev* 2011;20:7-22.
- [45] Tiddens HA, Hofhuis WM, Bogaard JM, et al. Compliance, hysteresis, and collapsibility of human small airways. *Am J Respir Crit Care Med* 1999;160:1110-1118.
- [46] Weibel ER. What makes a good lung? The morphometric basis of lung function. *Swiss Med Wkly* 2009;139:375-386.
- [47] Sterk PJ, Bel EH. Small airways, big challenge. *Eur Respir Rev* 2011;20:1-2.
- [48] Dubus JC, de Blic J, Mezzi K. Rôle des petites voies aériennes dans l'asthme de l'enfant. *Rev Mal Respir* 2004;21:737-742.
- [49] Burgel PR, Bourdin A, Pilette C, et al. Modifications structurales et inflammation dans la BPCO: importance des voies aériennes distales. *Rev Mal Respir* 2011;28:749-760.
- [50] Burgel PR. Les voies aériennes distales : une cible thérapeutique dans la mucoviscidose. *Rev Mal Respir* 2012;29:109-110.
- [51] Hogg JC, Macklem PT, Thurlbeckl WM. Site and nature of airway obstruction in chronic obstructive lung disease. *N Engl J Med* 1968; 278:1355-1360.
- [52] McDonough JE, Yuan R, Suzuki M, et al. Small airway obstruction and emphysema in chronic obstructive pulmonary disease. *N Engl J Med* 2011;365:1567-1575.
- [53] Tiddens H, Donaldson S, Rosenfeld M, et al. Cystic fibrosis lung disease starts in the small airways: can we treat it more effectively? *Pediatr Pulmonol* 2010;45:107-117.
- [54] Yang M, Yan Y, Yin X, et al. Chest physiotherapy for pneumonia in adults. *Cochrane Database Syst Rev* 2013;2:CD006338.
- [55] Chaves GSS, Fregonezi GAF, Dias FAL, et al. Chest physiotherapy for pneumonia in children. *Cochrane Database of Syst Rev* 2013; 9:CD010277.
- [56] Gerh P, Bachofen M, Weibel ER. The normal lung: ultrastructure and morphometric estimation of diffusion capacity. *Respir Physiol* 1978;32:121-140.
- [57] Lindström M, Falk R, Hjelte L, et al. Long term clearance from small airways in subject with ciliary dysfunction. *Respir Res* 2006;79.
- [58] Menkes HA, Traystman RJ. State of the art: collateral ventilation. *Am Rev Respir Dis* 1977;116:287-309.
- [59] Kawakami M, Takizawa T. Distribution of pores within alveoli in the human lung. *J Appl Physiol* 1987;33:1866-1870.
- [60] Scarpelli EM. Pulmonary physiology. Fetus. Newborn. Child. Adolescent. 2d ed. Philadelphia PA, USA: Lea & Febiger; 1990, 500 pp.