

Física básica aplicada à fisioterapia respiratória

Basic physics applied to the chest physiotherapy

Armando C.F. de Godoy¹

¹Mestre, Fisioterapeuta do Hospital de Clínicas da Universidade Estadual de Campinas, Enfermaria de Emergência Clínica e Cirurgia do Trauma.

Resumo **Introdução:** A fisioterapia respiratória baseia-se em princípios físicos, tais como volumes, pressões, complacência, viscosidades e fluxo de fluidos relativos à fisiologia respiratória. Estes princípios proporcionam a base teórica da aplicação das técnicas fisioterapêuticas para prevenir ou reduzir as obstruções das vias aéreas, além de remover material infectado e mediadores inflamatórios com o intento de diminuir e mesmo evitar lesões no sistema respiratório. **Objetivo:** Dessa forma, este artigo tem como objetivo discutir alguns aspectos físicos básicos relacionados às manobras de fisioterapia respiratória de higiene das vias aéreas para melhor compreensão do seu funcionamento. **Conclusão:** A integração da física com a fisioterapia respiratória deve ser uma proposta educacional a ser ressaltada nos cursos de graduação de fisioterapia, pois os conhecimentos dos princípios físicos são essenciais para que as técnicas fisioterapêuticas sejam bem aplicadas e entendidas.

Palavras-chave Física; Fisiologia Respiratória; Modalidades de Fisioterapia; Terapia Respiratória; Muco.

Abstract **Introduction:** Chest physiotherapy can be seen as a therapeutic application based on physical principles such as volume, pressure, compliance, viscosity and flow of fluids on the respiratory physiology with the purposes to prevent or reduce the obstruction of the airway, removing infected and inflammatory mediators of the air ways with the intention to reduce and prevent respiratory tract injury. **Objective:** Thus, this article has the purpose to discuss some physical aspects of bronchial hygiene that facilitate the understanding of the process of chest physiotherapy maneuvers. **Conclusion:** The combination of physics with respiratory physiotherapy must be highlighted in the physiotherapy educational program proposal, because the knowledge of the physical principles is vital, so the respiratory techniques can be well applied and understood.

Keywords Physics; Respiratory Physiology; Physical Therapy Modalities; Respiratory Therapy; Mucus.

Introdução

A integração das ciências básicas, como a física, com as ciências clínicas, tem sido proposta como uma importante necessidade educacional por diferentes grupos de pesquisadores^{1, 2, 3, 4}. Concordando com esse fato, e para que se entenda melhor o mecanismo com que as manobras de fisioterapia respiratória (FR) podem realizar a sua função, é necessário compreender, entre outras coisas, alguns mecanismos físicos básicos que regem a função do sistema respiratório e correlacioná-los com os princípios de funcionamento das manobras de FR, as quais se baseiam em princípios da física. Desse modo, as técnicas de FR, para obter resultado devem se basear no funcionamento das variáveis físicas, tais como volumes, pressões, complacência, viscosidades, fluxo de fluidos e interação de fluxo de ar com o muco⁵⁻⁹.

Entre os objetivos das técnicas de FR encontra-se a prevenção e a redução das obstruções das vias aéreas, além de remoção de material infectado e de mediadores inflamatórios das vias aéreas com o intento de reduzir e, até mesmo, prevenir lesões no tecido pulmonar¹⁰⁻¹².

As vias aéreas são anatômica e fisiologicamente estruturadas para proteger os alvéolos de materiais inalados, tanto de micro-

organismos como de corpos estranhos, mesmo quando exposto a ambientes poluídos. Fisiologicamente as vias aéreas são preservadas limpas por diversos mecanismos, sendo alguns físicos, tais como aparelho mucociliar, tosse e interação do fluxo de ar com o muco no interior dos tubos do sistema respiratório, sendo que estes mecanismos podem interagir¹²⁻¹⁸.

Este artigo tem o objetivo de descrever os mecanismos básicos da física aplicados ao sistema respiratório, tais como interação entre o fluxo aéreo e o muco, tipos de fluxo aéreo, transporte do muco pela tosse ou pela expiração forçada e pressões transpulmonar, os quais podem levar a um melhor entendimento nas aplicações das manobras de FR de higiene das vias aéreas.

Interação entre o fluxo aéreo e o muco

A interação entre o fluxo aéreo e o muco presente nas vias aéreas, como aparelho de limpeza traqueobrônquica, tem sido estudada desde o século passado, por diversos autores, principalmente na presença de grande volume de muco¹⁸⁻²¹. Esta integração pode ser complexa, pois pode ser influenciada por diversos fatores, tais como estreitamentos, dilatações e divisões apresentadas pelas vias aéreas, o que pode ocasionar mudança do sentido do fluxo aéreo e alterar o valor da sua taxa, já o muco

pode apresentar alteração da viscosidade e da quantidade ²¹⁻²⁴. A interação do fluxo aéreo com o muco pode ser dividida em duas categorias básicas, as quais podem gerar outras classes. As categorias básicas são: fluxo aéreo com muco obstruindo as vias aéreas, como uma rolha, e fluxo aéreo através de vias aéreas com as paredes forradas por muco ¹⁸⁻²⁴. Pode-se observar com mais detalhes os padrões de interação do fluxo aéreo com o muco quando o ar passa por uma região da via aérea preenchida parcial ou totalmente por secreções (figura 1), assim temos: fluxo aéreo baixo, no qual o ar pode atravessar a rolha de muco formando pequenas bo-

lhas de ar; fluxo aéreo lento, formando o movimento de grandes bolhas de ar na velocidade média de 60 a 100 cm/s, no interior do muco; fluxo estratificado, no qual existe uma camada de fluxo de ar sobre uma camada de muco; fluxo aéreo com ondas, nas quais o fluxo de ar promove movimentação ondulares no muco; fluxo circular, no qual o fluxo de ar, com uma velocidade de 200 a 2500 cm/s, faz um canal no muco, atravessando-o, e fluxo aéreo com muco pulverizado a uma velocidade de ar maior que 2500 cm/s, a qual destaca o muco da parede das vias aéreas, sendo o mais eficaz na limpeza das vias aéreas ¹⁸⁻²⁴.

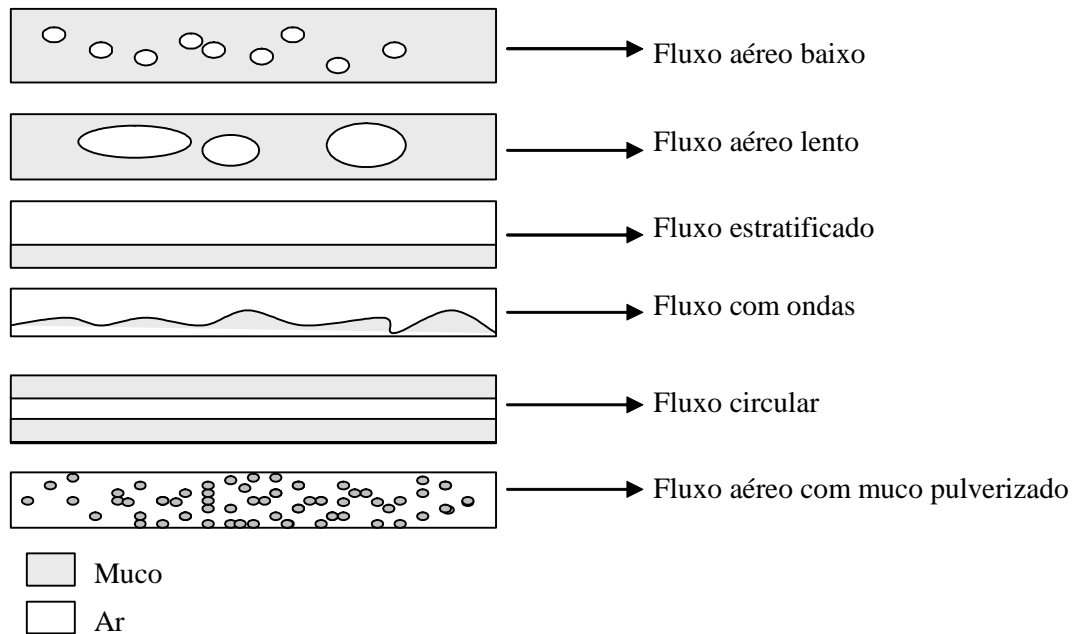


Figura 1: Tipos de interação entre o fluxo aéreo e o muco nas vias aéreas. Eventualmente o mecanismo de interação do fluxo aéreo com o muco pode não ser capaz de descolar as secreções das vias aéreas, como no caso da presença de uma rolha de muco, a qual pode requerer uma grande pressão para que seja deslocada ¹⁷⁻²⁰.

Tipos de fluxo aéreo.

A interação mais efetiva do fluxo aéreo com as secreções nas vias aéreas, no sentido de descolar o muco impregnado nas paredes das vias aéreas, ocorre quando o fluxo de característica laminar passa a ter característica de fluxo turbulento, sendo que este fato pode ser fisicamente medido pelo número de Reynold (NRe). Para se entender o NRe, primeiro é necessário definir fluido, fluxo laminar e fluxo turbulento. A matéria pode ser classificada, do ponto de vista macroscópico, em sólidos, líquidos e gases. Os primeiros apresentam forma própria, já os líquidos e os gases adotam a forma dos recipientes que os contêm e por esta característica podem

ser denominados fluidos. Se o ar flui por um tubo reto de forma rítmica este fluxo é definido como fluxo laminar, e este pode ser considerado como um conjunto de lâminas concêntricas que deslizam umas sobre as outras, sendo que as lâminas centrais apresentam maior velocidade que as lâminas periféricas, de forma que as lâminas que estão tocando a parede do tubo apresentam velocidade mínima ou praticamente não se movem (Figura 2 A) ²⁰⁻²⁹. Em um fluxo turbulento, o fluido gira erraticamente, sendo que as partículas misturam-se seguindo trajetórias não paralelas, formando vários redemoinhos, os quais apresentam interações com a parede do tubo (Figura 2 B) ²⁴⁻²⁹.

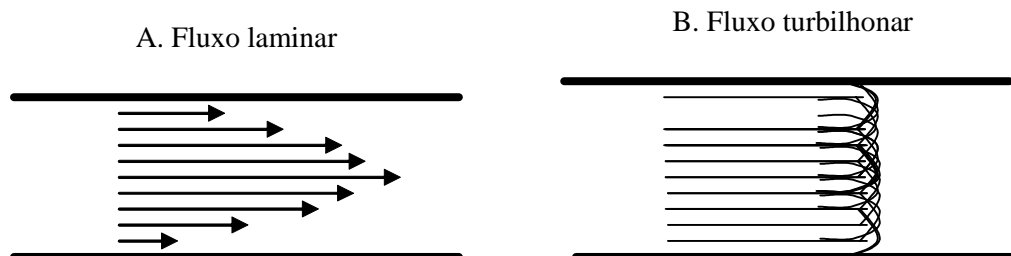


Figura 2: Fluxo laminar (A) e fluxo turbulento (B)

O NRe foi estudado pelo engenheiro Reynolds (1874), e por esse número pode-se avaliar quando o fluxo de característica laminar passa a ser turbulento. Obtém-se o NRe pela seguinte equação: $NRe = \frac{\rho D [v]}{\mu}$ na qual ρ é a densidade do fluido, D o diâmetro do tubo, [v] o módulo da velocidade resultante de escoamento do fluido para frente e μ o coeficiente de viscosidade do fluido. O NRe é adimensional, pois as unidades no lado direito se cancelam. NRe de 2000 é considerado o valor de transição de fluxo laminar para fluxo turbulento, acima desse valor a corrente laminar se rompe e se converte em uma corrente turbulenta. A energia requerida para manter uma corrente turbulenta é maior que a energia necessária para manter uma corrente laminar. NRe maior que 2000 é conseguido facilmente pelo sistema respiratório humano, sendo que altos valores de NRe são necessários para descolar camadas finas de muco, mas valores baixos são suficientes para descolar muco nas vias aéreas pequenas. De uma forma geral, nos bronquíolos encontramos um fluxo laminar, o que implica que não há uma interação efetiva entre fluxo aéreo e muco; já nas vias aéreas de maior calibre o fluxo se torna turbulento, o que pode gerar uma grande interação do fluxo de ar com o muco impregnado na parede interna destas vias aéreas²⁴⁻²⁹.

Transporte do muco pela tosse ou pela expiração forçada. Para obter o transporte do muco pela tosse ou pela expiração forçada é necessário que os músculos inspiratórios possam gerar um volume corrente adequado. Dessa forma, o volume pulmonar inspirado pode ser considerado outro princípio físico terapêutico aplicado pela fisioterapia respiratória, pois esse volume pode tornar a tosse mais eficaz e permitir que o muco seja expelido com o ar expirado^{19,25,30-33}. Não obstante, alguns alvéolos que estão colapsados podem ser abertos pela ventilação colateral, durante a inspiração, baseado no princípio da interdependência alveolar^{19,25,30}. Se o objetivo é o aumento do volume pulmonar inspiratório, e como este pode ser inversamente pro-

porcional à obstrução das vias aéreas pelo muco, pode-se realizar aspirações endotraqueais e manobras de inspiração pulmonar com a bolsa manual de ressuscitação tanto em pacientes portando ou não o tubo endotraqueal para se conseguir um aumento do volume inspiratório^{10,12}. Se a força dos músculos expiratórios está reduzida, acarretando uma pequena pressão dinâmica na cavidade pleural durante a tosse ou se processos inflamatórios e/ou infecciosos do tecido pulmonar reduzem o diâmetro dos brônquios, limitando o fluxo das vias aéreas, o efetivo transporte do muco pulmonar pode estar comprometido e pode não ocorrer a higiene brônquica^{19,25,28,31}. Nesta condição a expiração forçada pode ser realizada por uma expiração assistida, dada pela compressão do abdome e ou do tórax pelo fisioterapeuta³⁰⁻³³. Desse modo a fisioterapia respiratória utiliza a fisiologia da expiração forçada para mobilizar e transportar secreções pulmonares e esta é provavelmente a manobra mais eficaz na fisioterapia respiratória para promover o transporte de muco de vias aéreas centrais^{32,33}.

Pressões transpulmonar.

Durante a expiração normal a pressão intra-alveolar (Palv), pode ser representada pela equação $Palv = Ppl + Pel$, na qual Ppl é a pressão pleural exercida pela musculatura respiratória sobre a caixa torácica, uma vez que esta é transmitida diretamente sobre as pleuras e Pel é a pressão de retração elástica pulmonar. Durante a inspiração normal, a pressão no exterior das vias aéreas (Ppl) é negativa e se mantém assim até o final desta fase^{5,6,9,12,13,19,28}. A pressão no interior dos alvéolos e das vias aéreas, terminada a inspiração, equilibra-se com a pressão atmosférica, portanto, em todos os pontos localizados entre os alvéolos e o meio externo será igual à pressão atmosférica; como se pode observar na representação esquemática de um pulmão mono-alveolar, Figura 3 (A).

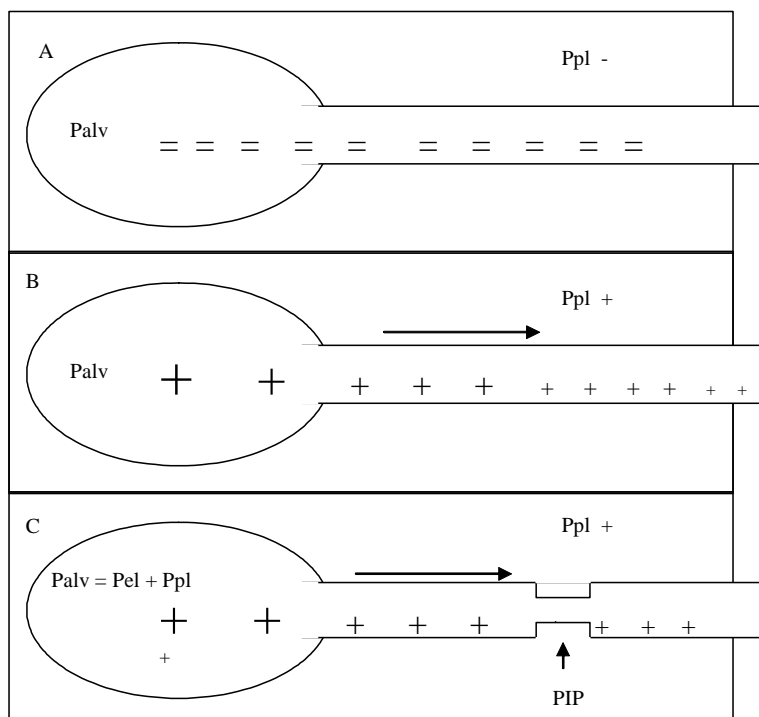


Figura 3: (A) Equilíbrio da pressão alveolar (Palv) com a pressão atmosférica no final da inspiração, (B) Pressões nas vias aéreas durante a expiração normal e (C) Formação do ponto de igual pressão (PIP).

Na realização de uma expiração normal, a pressão intrapleural torna-se mais positiva do que durante a inspiração normal, o que faz com que a pressão no interior das vias aéreas se torne moderadamente positiva, decrescendo no sentido do alvéolo para a traquéia, na medida em que o ar vai sendo expulso. Na expiração normal, a pressão nas vias aéreas é sempre superior à pressão pleural, para que o ar possa ser expelido, Figura 3 (B).

Durante uma expiração forçada ou durante a tosse a Ppl torna-se mais positiva, quando comparada à expiração normal, como se observa na Figura 3 (C). Nota-se que nesta situação a pressão no alvéolo é igual à pressão pleural, adicionada à pressão de retração elástica pulmonar (Pel). À medida que o ar vai sendo expulso dos alvéolos por meio das vias aéreas, a pressão de retração elástica diminui de tal modo que acaba por desaparecer totalmente, restando apenas a Ppl como força impulsora. Neste ponto, no qual somente a Ppl atua sobre e sob a parede externa, esses vetores de força se anulam. Este local denomina-se Ponto de igual pressão (PIP), ou seja, é o local onde a pressão do lado de fora da via aérea se iguala à pressão do lado de dentro da mesma^{13, 15, 18, 19}.

Durante a tosse ou a expiração forçada o PIP divide as vias aéreas em dois compartimentos, um situado entre os alvéolos e o PIP e o outro entre o PIP e a boca. Entre o alvéolo e o PIP parte o impulso gerador de débito aéreo, e o outro compartimento, situado entre o PIP e a boca, é submetido à compressão dinâmica, sendo o local no qual a via aérea sofre uma maior pressão na sua parede externa, portanto, com tendência a colapsar e, assim, limitar o fluxo aéreo. No local em que se forma o PIP, o fluxo aéreo apresentará velocidade máxima, com alto valor de NRe, passando de fluxo laminar para fluxo turbulento, criando uma onda mecânica e um ponto de choque, o que acarretará uma grande interação do fluxo aéreo com a eventual presença de muco impregnado nas paredes das vias aéreas nessa região, com conseqüente poder de limpeza das vias aéreas. Além disso, a estenose formada pelo PIP move-se rapidamente, tomando o sentido distal das vias aéreas, o que pode gerar o deslocamento do muco impregnado nestas vias^{5, 6, 9, 15, 18, 19, 25, 28, 31}.

Em razão do rápido aumento do diâmetro das vias aéreas inferiormente ao PIP, o fluxo aéreo decrescerá drasticamente pelos brônquios, não obstante acarretará um progressivo decréscimo na eficácia na limpeza das vias aéreas nos brônquios de pequenos calibres. Nas baixas taxas de fluxo aéreo as secreções presas nas paredes das vias aéreas podem permanecer coladas, mas com o aumento da taxa de fluxo aéreo o muco pode se descolar e tomar o sentido deste fluxo, dessa forma, um aumento na taxa do fluxo aéreo poderia então provocar o movimento das secreções no interior das vias aéreas; além disso, a altura em que o PIP se forma nas vias aéreas dependerá do volume pulmonar inspirado, sendo mais distal quanto maior o volume inspirado^{5, 6, 12, 15, 18, 19}.

Considerações Finais

A FR apresenta um arsenal composto de diversas manobras, com diversos objetivos, sendo que entre estas, algumas têm a finalidade de limpeza das vias aéreas do paciente, estando este portando ou não tubo endotraqueal. Essas manobras funcionam com base em princípios físicos, e são inclusive denominadas por termos físicos, entre os quais podemos citar: drenagem postural, percussão, vibração e compressão torácica, aspiração endotraqueal, manobra de hiperventilação pulmonar, CPAP (pressão positiva contínua nas vias aéreas) e expiração forçada³⁴⁻⁴¹. Dessa forma, a importância da integração da física com a fisioterapia deve ser uma proposta educacional a ser ressaltada nos curso

de graduação de fisioterapia, pois se observa que os princípios da física devem fazer parte do cabedal de conhecimentos de um fisioterapeuta respiratório para que a suas manobras sejam bem aplicadas e entendidas.

Referências bibliográficas

1. Lowry S. Making change happen. *BMJ* 1993;306(6873):320-2.
2. Fasce Henry E, Calderón B. M, Braga I. L, De Orúe R. M, Mayer S. H, Wagemann B. H et al. Utilización del aprendizaje basado en problemas en la enseñanza de física en estudiantes de medicina: comparación con enseñanza tradicional. *Rev Méd Chile* 2001;129(9):1031-7.
3. Fasce Henry E, Ramírez F. L, Ibáñez G. P. Resultados de una experiencia educacional basada en problemas aplicada a estudiantes de primer año de medicina. *Rev Méd Chile* 1994; 122(11):1257-62.
4. Neufeld VR, Barrows HS. The "McMaster Philosophy": an approach to medical education. *J Med Educ* 1974;49(11):1040-50.
5. McIlwaine M. Physiotherapy and airway clearance techniques and devices. *Paediatr Respir Rev* 2006;7 Suppl 1:S220-2.
6. Selsby D, Jones JG. Some physiological and clinical aspects of chest physiotherapy. *Br J Anaesth* 1990;64(5):621-31.
7. Balachandran A, Shivbalan S, Thangavelu S. Chest physiotherapy in pediatric practice. *Indian Pediatr* 2005;42(6):559-68.
8. Konrad F, Schreiber T, Brecht-Kraus D, Georgieff M. Mucociliary transport in ICU patients. *Chest* 1994;105(1):237-41.
9. McCarren B, Alison JA. Physiological effects of vibration in subjects with cystic fibrosis. *Eur Respir J* 2006;27(6):1204-9.
10. Peruzzi WT, Smith B. Bronchial hygiene therapy. *Crit Care Clin* 1995;11(1):79-96.
11. Dodd ME, Prasad SA. Physiotherapy management of cystic fibrosis. *Chron Respir Dis* 2005;2(3):139-49.
12. Chaboyer W, Gass E, Foster M. Patterns of chest physiotherapy in Australian Intensive Care Units. *J Crit Care* 2004;19(3):145-51.
13. Paiva D, Agnew JE, Lopez-Vidriero MT, Clarke WS. General review of tracheobronchial clearance. *Eur J Respir Dis Suppl* 1987;153:123-9.
14. Kilburn KH. A hypothesis for pulmonary clearance and its implications. *Am. Rev Respir Dis* 1968;98(3):449-63.
15. Butler SG, Sutherland RJ. Current airway clearance techniques. *N Z Med J* 1998;111(1066):183-6.
16. Lewis RM. Airway clearance techniques for the patient with an artificial airway. *Respir Care* 2002;47(7):808-17.
17. Wanner A. Clinical aspects of mucociliary transport. *Am Rev Respir Dis* 1997;116(1):73-125.
18. Warwick WJ. Mechanisms of mucous transport. *Eur J Respir Dis Suppl* 1983;127:162-7.
19. Scherer PW. Mucus transport by cough. *Chest* 1981;80(6 Suppl):830-3.
20. Clarke SW, Jones JG, Oliver DR. Resistance to two-phase gas-liquid flow in airways. *J Appl Physiol* 1970;29(4):464-71.
21. Benjamin RG, Chapman GA, Kim CS, Sackner MA. Removal of bronchial secretions the two-phase gas-liquid transport. *Chest* 1989;95(3):658-63.
22. Kim CS, Rodriguez CR, Eldrige MA, Sackner MA. Criteria for mucus transport in the airways by two-phase gas-liquid flow mechanism. *J Appl Physiol* 1986;60(3):901-7.
23. Kim CS, Iglesias AJ, Sackner MA. Mucus clearance by two-phase gas-liquid flow mechanism: asymmetric periodic flow model. *J Appl Physiol* 1987;62(3):959-71.
24. Kim CS, Greene MA, Sankaran S, Sackner MA. Mucus transport in the airways by two-phase gas-liquid flow mechanism: continuous flow model. *J Appl Physiol* 1986;60(3):908-17.
25. Scherer PW, Burtz L. Fluid mechanical experiments relevant to coughing. *J Biomech* 1978;11(4):183-7.
26. Sturgess JM, Palfrey AJ, Reid L. The viscosity of bronchial secretion. *Clin Sci* 1970;38(1):145-56.
27. Sackner MA, Kim CS. Phasic flow mechanisms of mucus clearance. *Eur J Respir Dis Suppl* 1987;153:159-64.
28. Jones MR, Blanch BA, Rimes JR. A mathematical method for predic-

- ting the expiratory time necessary to achieve a desired intrinsic PEEP level. *Resp Care* 1993;38(8):896-905.
29. Meine FJ, Lorenzo RL, Lynch PF, Capitanio MA, Krikpatrick JA. Pharyngeal distension associated with upper airway obstruction. Experimental observations in dogs. *Radiology* 1974;111(2):395-8.
30. Lum S, Hulskamp G, Merkus P, Baraldi E, Hofhuis W, Stocks J. Lung function tests in neonates and infants with chronic lung disease: forced expiratory maneuvers. *Pediatr Pulmonol* 2006;41(3):199-214.
31. Arora NS, Gal TJ. Cough dynamics during progressive expiratory muscle weakness in healthy curarized subjects. *J Appl Physiol* 1981;51(2):494-8.
32. Panitch HB. Airway clearance in children with neuromuscular weakness. *Curr Opin Pediatr* 2006;18(3):277-81.
33. McCarren B, Alison JA. Physiological effects of vibration in subjects with cystic fibrosis. *Eur Respir J* 2006;27(6):1204-9.
34. Bradley JM, Moran FM, Elborn JS. Evidence for physical therapies (airway clearance and physical training) in cystic fibrosis: an overview of five Cochrane systematic reviews. *Respir Med* 2006;100(2):191-201.
35. Fifoot S, Wilson C, MacDonald J, Watter P. Respiratory exacerbations in children with cystic fibrosis: physiotherapy treatment outcomes. *Physiother Theory Pract* 2005;21(2):103-11.
36. Placidi G, Cornacchia M, Polese G, Zanolla L, Assael BM, Braggion C. Chest physiotherapy with positive airway pressure: a pilot study of short-term effects on sputum clearance in patients with cystic fibrosis and severe airway obstruction. *Respir Care* 2006;51(10):1145-53.
37. Neve V, Edme JL, Devos P, Deschildre A, Thumerelle C, Santos C et al. Spirometry in 3-5-year-old children with asthma. *Pediatr Pulmonol* 2006;41(8):735-43.
38. Schindler MB. Treatment of atelectasis: where is the evidence? *Crit Care* 2005;9(4):341-2.
39. McCarren B, Alison JA, Herbert RD. Vibration and its effect on the respiratory system. *Aust J Physiother* 2006;52(1):39-43.
40. Ntoumenopoulos G. Indications for manual lung hyperinflation (MHI) in the mechanically ventilated patient with chronic obstructive pulmonary disease. *Chron Respir Dis* 2005;2(4):199-207.
41. Morrow B, Futter M, Argent A. Effect of endotracheal suction on lung dynamics in mechanically-ventilated paediatric patients. *Aust J Physiother* 2006;52(2):121-6.

Correspondência:

Armando Carlos Franco de Godoy
Rua Hercules Florence, 100 Ap.23
13020-170 - Campinas-SP
e-mail: armandogodoy@ig.com.br
