

Métodos diagnósticos para avaliação da força muscular inspiratória e expiratória*

Diagnostic methods to assess inspiratory and expiratory muscle strength

Pedro Caruso, André Luis Pereira de Albuquerque, Pauliane Vieira Santana, Leticia Zumpano Cardenas, Jeferson George Ferreira, Elena Prina, Patrícia Fernandes Trevizan, Mayra Caleffi Pereira, Vinicius Jamonti, Renata Pletsch, Marcelo Ceneviva Macchione, Carlos Roberto Ribeiro Carvalho

Resumo

O acometimento da musculatura ventilatória (inspiratória e expiratória) é um achado clínico frequente, não somente nos pacientes com doenças neuromusculares, mas também nos pacientes com doenças primárias do parênquima pulmonar ou das vias aéreas. Embora esse acometimento seja frequente, seu reconhecimento costuma ser demorado porque seus sinais e sintomas são inespecíficos e tardios. Esse reconhecimento tardio, ou mesmo a falta de reconhecimento, é acentuado porque os exames diagnósticos usados para a avaliação da musculatura respiratória não são plenamente conhecidos e disponíveis. Usando diferentes métodos, a avaliação da força muscular ventilatória é feita para a fase inspiratória e expiratória. Os métodos usados dividem-se em volitivos (que exigem compreensão e colaboração do paciente) e não volitivos. Os volitivos, como a medida da pressão inspiratória e expiratória máximas, são os mais empregados por serem facilmente disponíveis. Os não volitivos dependem da estimulação magnética do nervo frênico associada a medida da pressão inspiratória na boca, no esôfago ou transdiafragmática. Finalmente, outro método que vem se tornando frequente é a ultrassonografia diafragmática. Acreditamos que o pneumologista envolvido nos cuidados a pacientes com doenças respiratórias deve conhecer os exames usados na avaliação da musculatura ventilatória. Por isso, o objetivo do presente artigo é descrever as vantagens, desvantagens, procedimentos de mensuração e aplicabilidade clínica dos principais exames utilizados para avaliação da força muscular ventilatória.

Descritores: Músculos respiratórios; Força muscular; Diafragma; Testes de função respiratória, Testes diagnósticos de rotina.

Abstract

Impairment of (inspiratory and expiratory) respiratory muscles is a common clinical finding, not only in patients with neuromuscular disease but also in patients with primary disease of the lung parenchyma or airways. Although such impairment is common, its recognition is usually delayed because its signs and symptoms are nonspecific and late. This delayed recognition, or even the lack thereof, occurs because the diagnostic tests used in the assessment of respiratory muscle strength are not widely known and available. There are various methods of assessing respiratory muscle strength during the inspiratory and expiratory phases. These methods are divided into two categories: volitional tests (which require patient understanding and cooperation); and non-volitional tests. Volitional tests, such as those that measure maximal inspiratory and expiratory pressures, are the most commonly used because they are readily available. Non-volitional tests depend on magnetic stimulation of the phrenic nerve accompanied by the measurement of inspiratory mouth pressure, inspiratory esophageal pressure, or inspiratory transdiaphragmatic pressure. Another method that has come to be widely used is ultrasound imaging of the diaphragm. We believe that pulmonologists involved in the care of patients with respiratory diseases should be familiar with the tests used in order to assess respiratory muscle function. Therefore, the aim of the present article is to describe the advantages, disadvantages, procedures, and clinical applicability of the main tests used in the assessment of respiratory muscle strength.

Keywords: Respiratory muscles; Muscle weakness; Diaphragm; Respiratory function tests; Diagnostic tests, routine.

*Trabalho realizado na Disciplina de Pneumologia, Instituto do Coração – InCor – Hospital das Clínicas, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP) Brasil.

Endereço para correspondência: Pedro Caruso. Avenida Dr. Enéas de Carvalho Aguiar, 45, 5º andar, bloco 2, sala 1, CEP 05403-900, São Paulo, SP, Brasil.

Tel/Fax: 55 11 2661-5990. E-mail: pedro.caruso@hc.fm.usp.br

Apoio financeiro: Nenhum.

Recebido para publicação em 27/10/2014. Aprovado, após revisão, em 5/2/2015.

Introdução

O acometimento da musculatura ventilatória (inspiratória e expiratória) é um achado clínico frequente, não somente nos pacientes com doenças neuromusculares, mas também naqueles com doenças respiratórias que afetam primariamente o parênquima pulmonar ou as vias aéreas.^(1,2)

A fraqueza dos músculos inspiratórios pode causar dispneia⁽²⁾ e intolerância aos esforços. Entretanto, o diagnóstico costuma ser tardio, porque a maioria dos protocolos de investigação de dispneia não incluem a avaliação da força muscular ventilatória. Além disso, quando a avaliação da força muscular ventilatória é feita, ela inclui testes que têm elevada porcentagem de falsos negativos, porque dependem da cooperação do paciente (testes volitivos). Portanto, para uma adequada investigação e eventual confirmação de fraqueza ventilatória como causa de insuficiência respiratória, é de suma importância termos conhecimento também de medidas não volitivas e mesmo de técnicas mais invasivas, como a medida da pressão transdiafragmática.

O objetivo do presente artigo é descrever as vantagens, as desvantagens, os procedimentos de mensuração e a aplicabilidade clínica dos principais métodos diagnósticos para a avaliação da força muscular ventilatória. Por fim, apesar de discorrermos sobre as principais medidas de força ventilatória, não abordamos especificamente o diagnóstico de fadiga muscular. Também não são descritos outros testes relacionados, mas não específicos ou sensíveis, para a confirmação diagnóstica de fraqueza ventilatória, como a espirometria e a gasometria arterial.

Métodos volitivos para medida da força muscular inspiratória

Pressão inspiratória máxima

A pressão inspiratória máxima (P_{Imáx}) é o método mais usado para medir a força inspiratória em pacientes com suspeita de fraqueza ventilatória.⁽³⁾ Baseia-se na medida da pressão nas vias aéreas superiores (boca para pacientes ambulatoriais e traqueia para pacientes intubados ou traqueostomizados) durante uma inspiração máxima voluntária. A pressão medida é uma composição da pressão gerada pelos músculos inspiratórios com a pressão de recolhimento elástico do pulmão e caixa torácica.

Vantagens

Usa equipamento de baixo custo e portátil, é simples de realizar, de rápida execução, não invasiva e tem valores de referência bem estabelecidos em diferentes populações (limite inferior da normalidade de 60 cmH₂O para mulheres e de 80 cmH₂O para homens).⁽⁴⁻⁶⁾ Além destas vantagens, como a relação entre os volumes pulmonares e a força muscular inspiratória não é linear,⁽⁷⁾ a medida da P_{Imáx} é mais precoce que as alterações dos volumes pulmonares para diagnosticar fraqueza inspiratória.

Desvantagens

A manobra não é intuitiva e depende da colaboração do paciente; portanto, um valor baixo pode não significar fraqueza, mas falta de colaboração. Tem alto coeficiente de variação intra e inter-individual (10 a 13%)⁽⁸⁾ e baixa acurácia para prever sucesso de extubação em pacientes em ventilação mecânica.⁽⁹⁾

Como medir

A P_{Imáx} pode ser medida a partir do VR ou da capacidade residual funcional (CRF). Como há uma relação inversa entre o volume pulmonar e a força inspiratória,⁽⁶⁾ a medida a partir do VR traz valores, em módulo, 30% maiores que as medidas a partir da CRF. Apesar de a força medida a partir do VR ser maior, alguns médicos e pesquisadores utilizam a medida a partir da CRF por ela ser mais reprodutível e mais fácil de realizar pelos pacientes. No entanto, quando a medida for a partir da CRF, deve-se conhecer o volume da CRF, já que este volume afetará a pressão gerada.

A medida pode ser feita com manovacuômetro analógico ou digital.⁽¹⁰⁾ A preferência é por aparelhos digitais, porque o maior valor de P_{Imáx} acontece brevemente e pode ser perdido num mostrador analógico (Figura 1). Habitualmente, a medida é feita com o paciente sentado, com ou sem clipe nasal e pedindo-se que o paciente expire até o VR e depois faça uma inspiração máxima e mantenha o esforço máximo por 1 a 2 segundos. Para evitar que o fechamento da glote e a pressão gerada pelos músculos da boca superestimem a medida, deve haver uma abertura de 2 mm de diâmetro no bocal, que pode ser rígido tubular ou de borracha. Este último traz valores ligeiramente maiores.⁽¹¹⁾

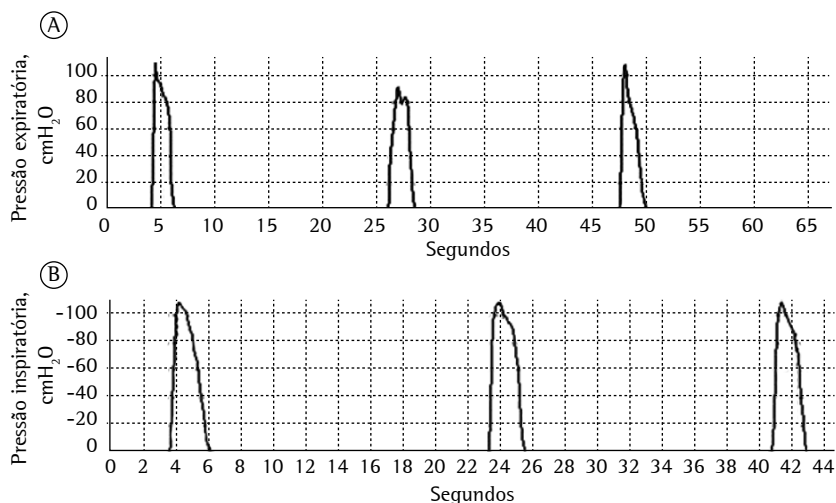


Figura 1 - Mensuração da PEmáx e da Plmáx por meio de um manovacômetro digital (Sistema MVD300). Em A, medida da PEmáx mostrando valores positivos. Em B, medida da Plmáx mostrando valores negativos.

Em pacientes críticos, intubados e não colaborativos, a medida ideal é com válvula unidirecional (permite expiração e bloqueia inspiração) acoplada ao tubo e mantida por 25 segundos (Figura 2).^(1,2)

Em qualquer método usado, deve-se repetir a manobra de 3 a 8 vezes, e o valor considerado será o maior obtido. A reprodutibilidade da medida da Plmáx com ou sem válvula unidirecional é de 10%.

Aplicabilidade clínica

A determinação da Plmáx é importante para o diagnóstico de fraqueza muscular inspiratória, que pode ocorrer em doenças pulmonares, cardíacas ou neuromusculares. Além disso, a mensuração da Plmáx também pode auxiliar o diagnóstico diferencial de dispneia,⁽²⁾ de distúrbios restritivos sem causa reconhecida, na avaliação de resposta à fisioterapia e reabilitação cardiopulmonar, na prescrição e acompanhamento de treinamento muscular respiratório,^(13,14) e finalmente, em pacientes críticos, na avaliação da possibilidade e eventual sucesso de desmame da ventilação mecânica.⁽¹⁰⁾

Pressão inspiratória nasal durante o fungar

A busca por um método para medir a força inspiratória contornando as limitações da Plmáx e ao mesmo tempo não sendo invasivo (sem a necessidade de balão esofágico) gerou a proposta de medida de pressão via nasal.⁽¹⁵⁾ O

termo SNIP é uma abreviatura do inglês *sniff nasal inspiratory pressure*, que se traduz por pressão inspiratória medida na narina durante uma manobra inspiratória rápida e profunda similar a fungar (“*sniff*” no inglês). A SNIP mede a ação conjunta do diafragma e dos outros músculos inspiratórios e reflete acuradamente a pressão esofágica (Pes), com a vantagem de ser não invasiva.^(15,16) No entanto, a correlação entre a Pes e a SNIP diminui quando há grande obstrução das vias aéreas, o que ocorre na asma e na DPOC. Estudos eletromiográficos demonstram que durante a manobra de SNIP observa-se uma contração seletiva dos músculos envolvidos na respiração, principalmente os músculos acessórios inspiratórios, demonstrando a especificidade do teste.⁽¹⁷⁾

Embora a SNIP tenha uma razoável correlação com a Plmáx,⁽¹⁸⁾ ela não a substitui e deve ser usada como medida complementar na avaliação da força inspiratória, pois o emprego de apenas um teste pode superestimar a fraqueza muscular, enquanto o uso de ambos os testes diminui em quase 20% os falsos positivos de fraqueza ventilatória.^(18,19)

Vantagens

Usa manovacômetros que são equipamentos simples e baratos, que também medem a Plmáx; é de fácil realização porque se baseia numa manobra intuitiva, o que torna a medida mais reprodutível; e tem valores normais bem

estabelecidos em diferentes populações (limite inferior da normalidade de 60 cmH₂O para mulheres e de 70 cmH₂O para homens; Tabela 1).⁽²⁰⁻²⁴⁾

Desvantagens

Depende da colaboração do paciente, não pode ser usada em pacientes em ventilação mecânica, pode subestimar valores em doentes com obstrução acentuada das vias aéreas e deve ser usada com cautela naqueles com obstrução nasal.

Com medir

A manobra pode ser realizada em qualquer posição corporal (a mais habitual é a sentada) porque apesar de pequenas variações, as mudanças na posição corpórea não apresentam significativas alterações da SNIP.⁽²⁰⁾ Uma narina deve estar totalmente ocluída com plugue nasal, evitando-se

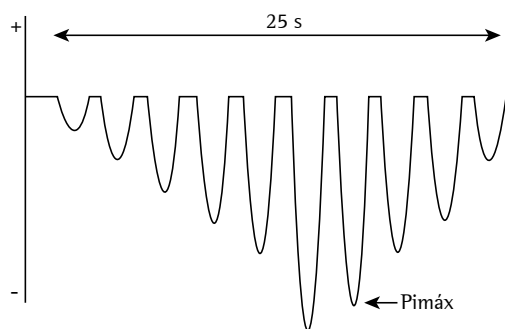


Figura 2 – Variação da pressão inspiratória durante a medida de PImax com válvula unidirecional. O maior valor costuma aparecer entre o 15º e 20º segundo.

o escape de pressão, enquanto a outra deve estar absolutamente pérvia. Após um período de respiração tranquila, a manobra inicia-se com uma inspiração profunda e rápida a partir da CRF e com a boca fechada. É necessário comando verbal vigoroso, uma vez que a manobra deve ser curta (≤ 500 ms) e explosiva, de tal forma que provoque o colapso da narina sem o plugue. Deve-se realizar dez manobras, porém se for observado um incremento considerável dos valores obtidos nas últimas manobras, pode-se realizar até mais dez esforços. A realização de vinte manobras também será necessária quando os valores das dez primeiras estiverem abaixo do predito e quando há suspeita de fraqueza inspiratória causada pelo esforço, como nas doenças neuromusculares.⁽²⁶⁾ O valor considerado é o maior obtido nessa série de manobras.

Aplicabilidade clínica

A SNIP é muito útil na avaliação da força inspiratória, com alta especificidade⁽¹⁷⁾ quando comparada à PImax. Nos últimos anos, muitos estudos utilizaram a SNIP para diagnóstico e acompanhamento da fraqueza muscular em diversas patologias onde o déficit muscular inspiratório é parte da história natural da doença, como nas doenças neuromusculares⁽²³⁾ e pulmonares.⁽²⁵⁾

Pressão inspiratória medida na boca

A medida da pressão inspiratória medida na boca (Pbo) utiliza um sensor de pressão junto

Tabela 1 – Limites inferiores dos valores normais do teste de força dos músculos respiratórios.^a

Métodos	Limite inferior de normalidade
PImax (cmH ₂ O)	60 (F) / 80 (M)
PEmax (cmH ₂ O)	120 (F) / 150 (M)
SNIP (cmH ₂ O)	60 (F) / 70 (M)
Pes, sniff (cmH ₂ O)	60 (F) / 70 (M)
Pdi, sniff (cmH ₂ O)	70 (F) / 80 (M)
Pes, tw (cmH ₂ O)	12 (F e M)
Pdi, tw (cmH ₂ O)	20 (F e M)
Pga, tw (cmH ₂ O)	16 (F e M)
Pga, tosse (cmH ₂ O)	95 (F) / 130 (M)
Pga, tw em T10 (cmH ₂ O)	16 (F e M)
Mobilidade diafragmática ao USG – respiração em repouso (mm)	11
Mobilidade diafragmática ao USG – respiração profunda (mm)	47
Espessamento diafragmático ao USG – respiração em repouso (mm)	1,5
Taxa de espessamento em inspiração até a CPT ao USG	20%

F: feminino; M: masculino; SNIP: *sniff nasal inspiratory pressure* (pressão inspiratória nasal durante o fungar); Pes: pressão esofágica; *sniff*: manobra de “fungar” bruscamente; Pdi: pressão transdiafragmática; tw: *twitch* (estimulação magnética); Pgas; pressão gástrica; e USG: ultrassonografia. ^aModificado de Polkey & Moxham.⁽²¹⁾

a um bocal (como na medida da $Pl_{\text{máx}}$) ou a um tubo traqueal.⁽²⁷⁾ Habitualmente é utilizada em três situações clínicas. Primeiro, como uma medida indireta da Pes durante uma manobra de fungar, quando não há ou não foi possível colocar um cateter esofágico. Uma limitação da medida nesta situação é que há maior dificuldade, pelo paciente, da realização da medida da Pbo do que da medida da SNIP.⁽³⁾ A segunda aplicação é na verificação da locação do cateter esofágico, a qual será abordada posteriormente. Por fim, a Pbo também é usada na medida da $P_{0,1}$, que é a pressão gerada nos primeiros 100 ms de uma inspiração com a via aérea ocluída, e sua correlação é maior com a medida do estímulo respiratório do que com a medida da $Pl_{\text{máx}}$.

Vantagens

É um método simples e não invasivo, pode ser usado com o mesmo instrumental que se usa na medida da $Pl_{\text{máx}}$ e SNIP e é um método alternativo em pacientes com contraindicação aos cateteres esofágicos (varizes esofágicas ou hipoxemia grave) ou em pacientes em que não se consegue colocar um cateter esofágico (intolerância a passagem ou alterações anatômicas das vias aéreas).

Desvantagens

Para os pacientes, as medidas através da boca são mais difíceis de realizar que as nasais, sem acrescentar outras vantagens. Como a $Pl_{\text{máx}}$, a medida da Pbo não diferencia qual músculo respiratório está afetado. Nos pacientes com limitações graves ao fluxo expiratório e doença parenquimatosa, a transmissão da pressão ao longo das vias aéreas pode estar comprometida, e nestas situações a Pbo pode não ser uma medida acurada da pressão alveolar.⁽³⁾ Como a $Pl_{\text{máx}}$, o valor pode ser afetado pelo tipo de dispositivo bucal.⁽¹¹⁾

Como medir

Na medida da Pbo, a área transversal do bocal deve ser larga o suficiente para evitar erros decorrentes do efeito Bernoulli (a redução da área transversal de uma tubulação aumenta a velocidade do gás e reduz a pressão). Adicionalmente, a complacência das bochechas pode falsear a medida, e para contornar esta limitação pode-se pressionar as bochechas com as mãos durante

a medida. Na medida da $P_{0,1}$ o bocal deve ter sua porção distal ocluída para a checagem da inserção do balão esofágico.⁽²⁷⁾ A Pbo também pode ser medida de uma forma não volitiva, através da estimulação do nervo frênico,⁽²⁸⁻³⁰⁾ tópico abordado mais à frente.

Aplicabilidade clínica

As principais aplicações são a medida indireta da Pes durante a manobra de fungar,⁽¹⁾ neste caso para confirmar uma fraqueza inspiratória,⁽²⁾ e para a verificação da posição do balão esofágico (Figura 3) pelo teste de Baydur^(27,31) – ver *Como medir* no próximo item.

Pressão transdiafragmática

A pressão transdiafragmática (Pdi) é a diferença entre a pressão gástrica (Pga) e a Pes ($Pdi = Pga - Pes$; Figura 4) e traduz a força gerada especificamente pelo diafragma e não pelos outros músculos da ventilação.

Vantagens

Força específica do diafragma, que é o principal músculo inspiratório por ser responsável por 60 a 70% do volume corrente das respirações normais, tem valores de referência bem estabelecidos tanto em voluntários em diferentes faixas etárias (limite inferior da normalidade de 70 cmH_2O para mulheres e de 80 cmH_2O para homens durante manobras de fungar),⁽³²⁾ como em pacientes com diferentes doenças respiratórias (Tabela 1).^(33,34)

Desvantagens

É um método invasivo, que depende da passagem de cateteres por via nasal até o esfôago distal e o estômago e que usa materiais poucos disponíveis na maioria dos hospitais assistenciais. Depende de experiência do examinador para locação correta dos cateteres.

Como medir

A medida da Pdi pode ser feita com cateteres com balão de látex cheio de ar, cateteres preenchidos com líquido ou cateteres com microtransdutores.^(35,36) Os cateteres de balão obrigam a passagem de um cateter posicionado no esfôago e outro no estômago, embora recentemente tenha sido comercializado um cateter com os dois balões instalados, o que

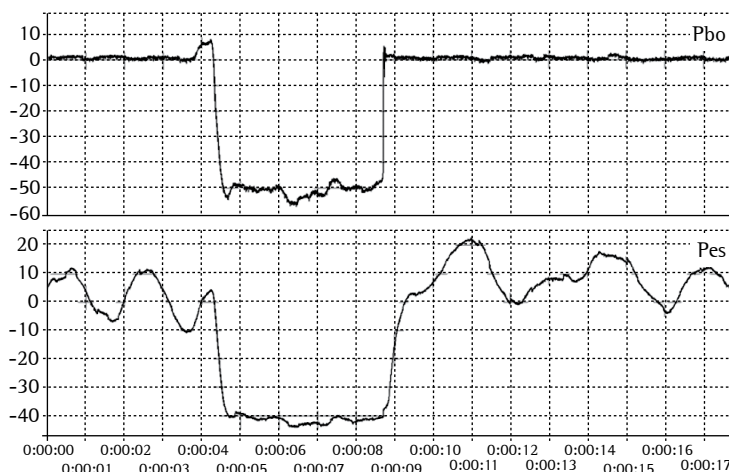


Figura 3 - Comparação entre pressões inspiratórias medidas na boca (Pbo) e no esôfago (Pes) durante a oclusão da boca (Manobra de Baydur), para verificação da correta localização do cateter esofágico. Notar a boa correlação entre as duas medidas.

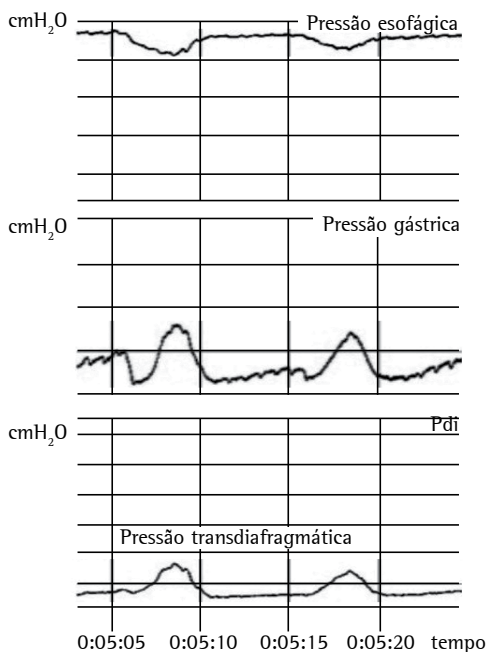


Figura 4 - Pressão transdiafragmática. A curva superior é a pressão esofágica, a do meio, a pressão gástrica, e a inferior, a pressão transdiafragmática (Pdi). Neste exemplo há diferenças na escala da medida da pressão esofágica e gástrica.

evita a colocação do segundo cateter.⁽³⁷⁾ O cateter com microtransdutor faz as medidas esofágicas e gástricas com apenas um cateter e também tem a vantagem de ser melhor tolerado pelos pacientes e ter um tempo de resposta rápido, que garante medidas mais acuradas em manobras rápidas,⁽³⁸⁾ como as medidas com estimulação magnética do nervo frênico.

Usando os cateteres com balão de látex, que são os mais comuns, um cateter é locado no esôfago distal e outro no estômago. Para garantir a posição correta, deve-se observar as curvas da Pga e Pge. Este reconhecimento é facilitado porque durante a inspiração, a Pes negativa-se e a Pga positiva-se, numa imagem em espelho (Figura 5). A manobra final para assegurar que a Pes do balão está correta é compará-la com a Pbo do bocal ocluído. Se a posição esofágica estiver correta, ou seja, refletindo bem a pressão pleural, a variação da Pes será pelo menos 80% da variação da Pbo. Este teste confirmatório é conhecido como teste de Baydur⁽²⁷⁾ e é validado para diferentes volumes pulmonares e posições posturais.⁽³¹⁾

A Pdi pode ser medida durante a respiração normal ou com manobras inspiratórias máximas, geralmente a de fungar. A Pdi também pode ser medida durante um estímulo magnético sobre o nervo frênico, o que será abordado em Métodos não volitivos para medida de força inspiratória (ver item Estimulação elétrica e magnética do nervo frênico).

Aplicabilidade clínica

Por ser um método invasivo e de maior complexidade de equipamentos e realização, é usado quase que exclusivamente para pesquisas da força dos músculos ventilatórios.⁽³⁵⁾ Sua grande aplicabilidade é a de possibilitar a medida mais representativa da força diafragmática,

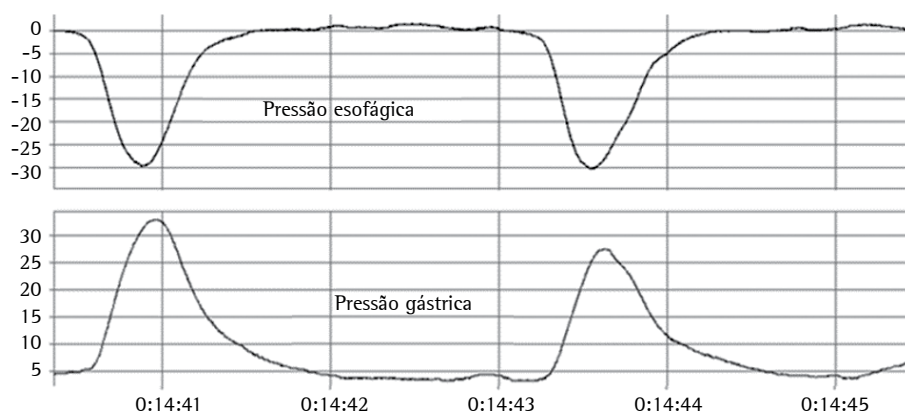


Figura 5 - Exemplo de gravação simultânea da pressão esofágica e gástrica durante a inspiração forçada. Nota-se que a pressão esofágica fica mais negativa, enquanto a pressão gástrica fica positiva, criando uma imagem em espelho dessas duas curvas.

principalmente nos pacientes com obstrução de vias aéreas, onde a Pes não seria acuradamente refletida pela Pbo ou pela SNIP.^(3,18)

Métodos não volitivos para medida de força muscular inspiratória

Estimulação elétrica e magnética do nervo frênico

As indicações de métodos não volitivos para a medida da força inspiratória aparecem quando o paciente apresenta dificuldade na compreensão ou realização das manobras, gerando baixos valores de força nas manobras volitivas (Plmáx, SNIP ou Pbo) ou quando há grande variação nas medidas, que provavelmente é secundária a diferentes níveis de esforço. Para se obter uma contração inspiratória máxima involuntária, há dois métodos possíveis e de resultados similares: a estimulação elétrica ou a estimulação magnética (*twitch*) do nervo frênico. Ambas baseiam-se na estimulação do frênico no seu trajeto cervical, que é superficial (Figura 6). A estimulação elétrica é dolorosa, e há raros relatos de indução de convulsão, embora ela seja mais específica para a estimulação diafragmática que a estimulação magnética.⁽³⁹⁾ A estimulação magnética do frênico causa um mínimo desconforto, que é bem tolerado pela maioria dos pacientes.⁽⁴⁰⁾ Seu princípio é a criação de um campo magnético na região cervical por pequenas bobinas colocadas sobre esta região. Os valores de Pdi obtidos com a estimulação magnética e elétrica são similares.⁽⁴⁰⁾ Pela maior



Figura 6 - Bobina de estimulação magnética do frênico colocada na região cervical anterior de voluntário.

segurança e conforto, a estimulação magnética do frênico impôs-se sobre a estimulação elétrica.

Vantagens

Permite a medida da força inspiratória independentemente da colaboração ou compreensão do paciente. A razão para isto é que o diafragma é innervado exclusivamente pelo nervo frênico, o que possibilita um estímulo total do músculo. A estimulação magnética atravessa facilmente tecidos moles e ossos, atingindo preferencialmente as fibras neurais mais largas e não as fibras mais curtas, que são as responsáveis pelos estímulos dolorosos.⁽⁴¹⁾ Há valores bem definidos de Pdi após estímulos magnéticos cervicais bilaterais (limite inferior da normalidade de 20 cmH₂O para mulheres e homens).⁽⁴⁰⁾

Desvantagens

Como o campo magnético pode estimular outros nervos e músculos cervicais, seu uso costuma ser menos específico para a medida da força diafragmática do que a estimulação elétrica, embora esta diferença não pareça ter relevância clínica.^(39,40) Outra desvantagem é que os equipamentos para estimulação magnética ainda são pouco disponíveis e de alto custo.

Como medir

O aparelho consiste em uma base com um capacitor ligado a uma bobina que é aplicada sobre o local a ser estimulado. O tipo de bobina tem grande influência na intensidade e forma do campo magnético gerado. Inicialmente, a bobina mais utilizada era uma circular de 90 mm de diâmetro colocada na região cervical posterior ao nível da sétima vértebra cervical. Esta, no entanto, criava um campo magnético mais amplo e acabava estimulando outras fibras neurais do pescoço e dos músculos intercostais superiores. Atualmente, utiliza-se a bobina em formato de 8 com 45 mm de diâmetro, que cria um campo mais focado sobre o nervo frênico quando colocada na borda posterior do músculo esternocleidomastoideo na altura da cartilagem cricóide. Com uma bobina em oito, pode-se medir a força de um hemidiafragma, e com duas bobinas ativadas simultaneamente, mede-se a força gerada pela ação conjunta de ambos os hemidiafragmas.^(3,39,40) Com a estimulação magnética do frênico, as duas medidas mais comumente realizadas são a Pdi e a Pbo. A Pbo é não invasiva, mas depende de a glote permanecer aberta após o estímulo magnético, o que pode resultar em valores bastante subestimados em pacientes com resistência elevada das vias aéreas e doença parenquimatosa grave. A Pdi tem como desvantagem a necessidade de inserção de cateteres esofágicos e gástricos.

Aplicabilidade clínica

Usada principalmente em pesquisa e assistencialmente quando se deseja evitar a variação dada pela colaboração do paciente ou quando o paciente não consegue colaborar corretamente, como pacientes sob ventilação mecânica ou que não conseguem compreender ou realizar as manobras solicitadas.

Ultrassonografia diafragmática

Nos últimos anos, houve um grande aumento no interesse do uso da ultrassonografia (USG) para avaliação do diafragma.⁽⁴²⁾ A literatura demonstrou que a USG diafragmática é uma ferramenta útil para avaliação a beira-leito porque é não invasiva, livre de radiação, bastante disponível nos hospitais e permite avaliações repetidas. Quando comparada à radioscopia, a USG apresenta acurácia similar na avaliação da mobilidade do diafragma.⁽⁴³⁾ Recentemente, alguns artigos foram publicados sobre o uso da USG para avaliar a função diafragmática de pacientes em ventilação mecânica, especialmente para a predição de falha de extubação⁽⁴⁴⁾ e nos pacientes cirúrgicos para diagnóstico e seguimento de lesões inadvertidas relacionadas à cirurgia.⁽⁴⁵⁾ Também foram publicados estudos sobre o uso da USG em pacientes ambulatoriais para o diagnóstico e seguimento de paralisia diafragmática.^(46,47)

Vantagens

É método não invasivo, livre de irradiação, pode ser repetido várias vezes em curto espaço de tempo, usa aparelho de USG em configuração básica que é um equipamento que se disseminou nos hospitais e clínicas, e o tempo de aprendizado não é extenso. Finalmente, valores de normalidade para espessamento e mobilidade diafragmática estão bem estabelecidos (Tabela 1). Para homens e mulheres, a mobilidade diafragmática na respiração tranquila deve ser de no mínimo 11 mm, e na respiração profunda, de no mínimo 47 mm. Também para homens e mulheres o espessamento diafragmático após uma inspiração até a CPT deve ser de no mínimo 1,5 mm ou 20%.⁽⁴⁸⁻⁵⁰⁾

Desvantagens

É um método operador dependente, e, em pacientes obesos com distensão abdominal ou extensos curativos, pode ser difícil obter imagens de boa qualidade. A mobilidade diafragmática é afetada pela pressão e conteúdos abdominais, o que diminui a relação da mobilidade com a variação de volume pulmonar durante as manobras, obrigando o uso concomitante de pneumotacógrafo.

Como medir

O uso da USG permite medir a mobilidade da cúpula diafragmática e a espessura diafragmática na

sua região de aposição ao gradeado costal (Figura 7A e B). A mobilidade da cúpula diafragmática é medida usando-se um transdutor (convexo ou cardíaco) de baixa frequência (3-5 MHz) e fixando-se o ponto de avaliação na região mais elevada do diafragma (a cúpula diafragmática). Dependendo do método empregado, o transdutor pode ser colocado na orientação transversal⁽⁵⁰⁾ ou longitudinal⁽⁴⁹⁾ na região subcostal, tendo como referência o ponto entre as linhas médio-clavicular e axilar anterior. O diafragma é visualizado em modo B, e sua excursão é mensurada no modo M, o que reduz a variabilidade interobservador.⁽⁵¹⁾ É importante avaliar a mobilidade não somente em uma respiração normal, mas também durante inspirações profundas lentas e rápidas. A avaliação da mobilidade durante uma manobra de fungar é útil porque potencializa a detecção do movimento paradoxal diafragmático, que pode não ocorrer durante uma respiração normal. Os valores de mobilidade diafragmática são iguais para medidas no diafragma direito e esquerdo, mas as medidas à direita são mais fáceis pela presença do fígado que cria uma janela acústica (Figura 7A).

O espessamento diafragmático é medido com o transdutor de alta frequência (7-10 MHz) colocado na zona de aposição do diafragma sobre a linha axilar média. A espessura do diafragma é a distância entre as duas linhas hiperecogênicas que representam suas bordas (Figura 7B). Usualmente, mede-se essa espessura na CRF e também na CPT

após uma inspiração máxima.⁽⁴⁸⁾ O espessamento diafragmático deve aumentar pelo menos 20% na CPT quando comparado ao valor obtido na CRF.

Aplicabilidade clínica

Medida que pode ser realizada à beira do leito ou em ambiente ambulatorial. A USG diafragmática permite a obtenção de dois parâmetros úteis e fundamentais, que são a mobilidade e espessura diafragmáticas. Ademais, ela pode ser realizada em posições corporais diferentes. As doenças respiratórias que tiveram maior número de estudos com a aplicação da USG diafragmática foram a DPOC e a paralisia diafragmática, e há estudos com essa aplicação no desmame da ventilação mecânica.^(47,48)

Métodos volitivos para medida da força muscular expiratória

Pressão expiratória máxima

A pressão expiratória máxima (PE_{máx}) é o método mais usado para medir a força expiratória em pacientes críticos e ambulatoriais.⁽³⁾

Vantagens

Método simples e rápido de realizar, usa equipamento de baixo custo e baixa complexidade

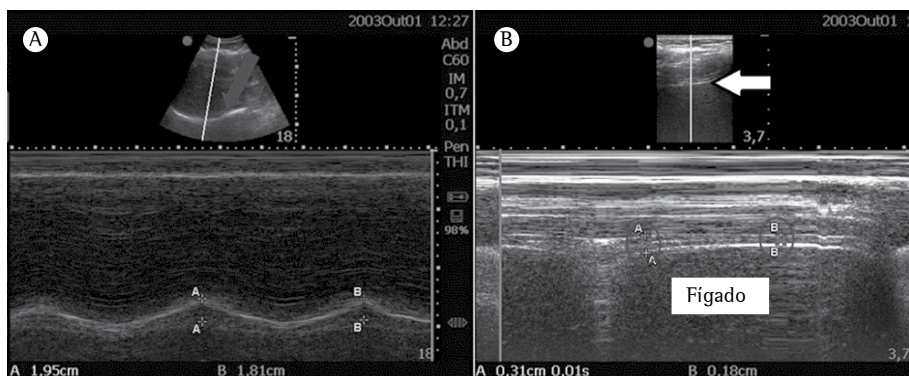


Figura 7 – Ultrassom diafragmático. Em A, ultrassom para estudo da mobilidade diafragmática. A imagem superior é em modo B, e a seta cinza indica o diafragma, que é visto como uma linha mais ecogênica. A imagem de baixo é a superior em modo M e serve para medir a excursão diafragmática (distâncias entre os pontos A-A e B-B) durante a respiração em repouso. Em A, a mobilidade diafragmática foi de 19,5 e 18,1 mm, portanto normal. Em B, ultrassom para estudo do espessamento diafragmático. A imagem superior é em modo B, e a seta branca indica o diafragma, que é visto como uma linha mais ecogênica. A imagem de baixo é a superior em modo M e serve para medir o espessamento durante uma inspiração (pontos A-A) e na expiração seguinte (pontos B-B). Em B, o espessamento foi de 1,3 mm, portanto pouco abaixo do normal.

(os mesmo usados para a medida de $PI_{máx}$) e tem valores de referência bem estabelecidos (limite inferior da normalidade de 120 cmH_2O para mulheres e de 150 cmH_2O para homens; Tabela 1).⁽⁵²⁾

Desvantagens

Depende de colaboração do paciente e também da coordenação entre o paciente e o examinador, além de ter baixa acurácia para prever capacidade de tosse. Tem alto índice de falso positivo para fraqueza expiratória porque pode superestimar o número de pacientes com fraqueza expiratória, já que baixos valores são causados por esforços submáximos ou vazamento ao redor do bocal, o que é frequente em pacientes com fraqueza na musculatura facial.

Como medir

A medida é feita por manovacuômetro, geralmente com o paciente sentado e com clipe nasal, embora este seja dispensável. A $PE_{máx}$ pode ser medida a partir da CPT ou da CRF. O paciente faz uma expiração máxima e mantém o esforço por 1 a 2 segundos. Deve-se repetir a manobra de 3 a 8 vezes, e o valor considerado é o maior obtido. Como há uma relação direta entre o volume pulmonar e a força expiratória,⁽⁵¹⁾ a medida a partir da CPT traz valores maiores que a medida a partir da CRF.

Aplicabilidade clínica

A maior aplicação é para avaliar a força da tosse, já que uma das fases da tosse é a expiração explosiva e a fraqueza expiratória correlaciona-se com infecções respiratórias⁽⁵³⁾ e falência de extubação.⁽⁵⁴⁾

Pressão gástrica na manobra de tosse

A Pga medida durante a tosse é um teste complementar na investigação da fraqueza muscular expiratória porque a musculatura abdominal é a principal responsável pelo fluxo expiratório.

Vantagens

Valores de referência bem estabelecidos (limite inferior da normalidade de 95 cmH_2O para mulheres e de 130 cmH_2O para homens; Tabela 1)⁽⁵⁵⁾ e maior especificidade que a $PE_{máx}$.

Com isto, essa medida tem um valor preditivo negativo superior ao da $PE_{máx}$ isolada. Estudo prévio mostrou que 42% dos pacientes com $PE_{máx}$ reduzida, na verdade tinham valor normal de Pga na tosse.⁽⁵⁵⁾

Desvantagens

A principal desvantagem consiste em ser um método invasivo que requer a inserção de cateter com sensor de pressão no estômago.

Como medir

A medida da Pga normalmente é feita com a inserção de um cateter, seguindo as mesmas recomendações já descritas para a medida da Pdi (ver item *Pressão transdiafragmática*). O paciente na posição sentada é instruído a inspirar até a CPT e então tossir com força máxima, repetindo a manobra com intervalo de 30 segundos até o valor não aumentar mais. Normalmente, são necessárias até seis manobras.⁽⁵⁵⁾

Aplicabilidade clínica

Descartar a presença de fraqueza expiratória, principalmente em pacientes em que se suspeita que possa haver diminuição da força da tosse por diminuição da prensa expiratória, como os pacientes com doença neuromuscular e os pacientes críticos imediatamente antes ou após a extubação.

Métodos não volitivos para medida da força muscular expiratória

Pressão gástrica após estimulação magnética dos músculos da parede anterior do abdome

Em pacientes não colaborativos pode-se avaliar a força dos músculos expiratórios medindo-se a Pga após a estimulação magnética neural dos músculos da parede abdominal.^(3,56,57) O estímulo magnético é feito colocando-se a bobina circular na região dorsal sobre a coluna vertebral, ao nível da oitava a décima vértebra torácica (T8 a T10).^(56,58)

Vantagem

O valor é independente da colaboração do paciente.

Desvantagem

A medida é invasiva porque precisa da passagem de um cateter em posição gástrica, e há somente um estudo que descreveu os valores de referência, e ainda assim obtidos de uma pequena amostra de indivíduos (limite inferior da normalidade de 10 cmH₂O para mulheres e homens; Tabela 1).⁽¹⁸⁾

Como medir

A medida deve ser feita com um cateter com balão ou microtransdutor locado no estômago. Para garantir que o cateter esteja na posição correta, deve-se observar a curva de pressão, que durante a inspiração deve assumir valores mais positivos (Figura 4). Outra manobra para assegurar a posição gástrica é a de compressão manual do epigástrico e observação da elevação da Pga. Quando o cateter estiver em posição gástrica, é feito um estímulo magnético na região dorsal entre T8 e T10 e registra-se a variação da pressão. São realizadas aproximadamente 5 medidas com intervalos mínimos de 30 segundos para evitar a potencialização muscular.

Aplicabilidade clínica

Também é usada para confirmar possível fraqueza expiratória,^(43,59) principalmente nos indivíduos com dificuldade para realização de medidas volitivas em que se pretende avaliar a força da tosse, como os pacientes com doenças neuromusculares e críticos.

Eletromiografia

É o estudo da atividade muscular baseado na análise de sinais eletromiográficos, que são atividades elétricas geradas durante uma contração voluntária ou estimulada. Pode ser realizado através de eletrodos colados à pele (eletromiografia de superfície)⁽⁵⁹⁾ ou através de agulhas finas inseridas na superfície do músculo a ser avaliado (eletromiografia por agulha).^(60,61) No caso dos músculos ventilatórios, há uma terceira via, que é o uso de cateteres esofágicos com eletrodos para se realizar a eletromiografia do diafragma na sua parte crural.^(62,63)

Vantagens

Na forma de eletromiografia de superfície, é um método não invasivo e de simples manuseio, sendo bastante útil para monitorizações contínuas. É extremamente sensível para captar a contração

muscular.⁽⁶⁴⁾ Mesmo a eletromiografia por agulha é minimamente invasiva e pouco dolorosa.

Desvantagens

O principal problema da eletromiografia de superfície é a interferência da atividade de outros grupos musculares (*cross-talk*). Por ser muito sensível, frequentemente é difícil isolar a atividade somente de um grupo muscular. Outra desvantagem é a pouca normatização para a análise do sinal, que pode ser interpretado visualmente através de seus componentes de amplitude e duração ou através de um valor numérico que é obtido com a elevação ao quadrado da amplitude do sinal, seguida da extração da raiz quadrada desse número (rms, do inglês *root mean square*). A eletromiografia diafragmática com cateter esofágico é invasiva e depende de material e habilidades muito específicas e ainda pouco disponíveis, embora haja um aparelho de ventilação mecânica comercialmente disponível que tem um modo ventilatório que se baseia na aquisição de sinais da eletromiografia esofágica (modo *Neurally Adjusted Ventilatory Assist* [NAVA] dos ventiladores Servo; Maquet, Suécia). Neste ventilador a monitorização da eletromiografia esofágica pode ser feita inclusive com o paciente fora da ventilação mecânica. Por fim, não há valores de referência populacional, o que dificulta essa medida como índice de diagnóstico de fraqueza muscular.

Como medir

Os sinais captados são amplificados e filtrados, sendo que isso pode ser adaptado e dependerá das características do sinal adquirido. O método mais empregado é o de eletrodos de superfície colados sobre o músculo após a região ser bem limpa previamente para melhorar a transmissão do sinal elétrico.⁽⁵⁹⁾ Pode-se também usar agulhas com inserção intramuscular, obtendo-se assim um sinal menos ruidoso e mais representativo de uma atividade muscular particular. Em indivíduos obesos a monitorização com agulha na musculatura abdominal tem um resultado mais expressivo do que os eletrodos de superfície. Muitas vezes, a inserção da agulha é guiada por USG para evitar sangramentos ou perfurações de outros órgãos.^(60,61) Por fim, pode-se utilizar também a eletromiografia esofágica, na qual se busca refletir a atividade do diafragma crural posicionando-se os eletrodos de 1 a 3 cm acima da transição esôfago-gástrica.^(62,63)

Aplicabilidade clínica

A eletromiografia é um bom método de monitorização contínua, principalmente de determinados músculos respiratórios, como os abdominais e inspiratórios acessórios, desde que observados os cuidados do bom preparo técnico. A eletromiografia tem sua maior aplicabilidade na monitorização contínua do mesmo indivíduo, porque os valores absolutos não permitem a comparação entre indivíduos. A eletromiografia de superfície é usada para verificar qualitativamente a ativação dos músculos inspiratórios acessórios e dos expiratórios. Quando essa avaliação precisa ser mais específica ou quantitativa (geralmente para fins de pesquisa), o método usado é a eletromiografia com agulha. Além de pesquisa, a eletromiografia diafragmática é usada como guia no modo ventilatório NAVA.

Considerações finais

O acometimento da musculatura ventilatória está presente não somente nas doenças respiratórias, mas em outras diversas doenças, e sua correta avaliação depende da aplicação dos testes apropriados. Os testes não invasivos volitivos ainda são os mais empregados na prática clínica em função do maior conhecimento e fácil manuseio em diferentes centros. Entretanto, os pacientes com elevada suspeita de fraqueza ventilatória e com dificuldade de entendimento dessas medidas devem ter uma avaliação complementar com os testes não volitivos e mais invasivos, apesar de estes testes serem pouco disponíveis e estarem, até o momento, mais presentes em centros de pesquisa.

Referências

- Laghi F, Tobin MJ. Disorders of the respiratory muscles. *Am J Respir Crit Care Med.* 2003 1;168(1):10-48.
- Dyspnea. Mechanisms, assessment, and management: a consensus statement. American Thoracic Society. *Am J Respir Crit Care Med.* 1999;159(1):321-40. <http://dx.doi.org/10.1164/ajrccm.159.1.ats898>
- American Thoracic Society/European Respiratory Society. ATS/ERS Statement on respiratory muscle testing. *Am J Respir Crit Care Med.* 2002;166(4):518-624. <http://dx.doi.org/10.1164/rccm.166.4.518>
- Neder JA, Andreoni S, Lerario MC, Nery LE. Reference values for lung function tests. II. Maximal respiratory pressures and voluntary ventilation. *Braz J Med Biol Res.* 1999;32(6):719-27. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-879X1999000600007>
- Black LF, Hyatt RE. Maximal respiratory pressures: normal values and relationship to age and sex. *Am Rev Respir Dis.* 1969;99(5):696-702.
- Black LF, Hyatt RE. Maximal static respiratory pressures in generalized neuromuscular disease. *Am Rev Respir Dis.* 1971;103(5):641-50.
- De Troyer A, Borenstein S, Cordier R. Analysis of lung volume restriction in patients with respiratory muscle weakness. *Thorax.* 1980;35(8):603-10. <http://dx.doi.org/10.1136/thx.35.8.603>
- Caruso P, Friedrich C, Denari SD, Ruiz SA, Deheinzelin D. The unidirectional valve is the best method to determine maximal inspiratory pressure during weaning. *Chest.* 1999;115(4):1096-101. <http://dx.doi.org/10.1378/chest.115.4.1096>
- Yang KL, Tobin MJ. A prospective study of indexes predicting the outcome of trials of weaning from mechanical ventilation. *N Engl J Med.* 1991;324(21):1445-50. <http://dx.doi.org/10.1056/NEJM199105233242101>
- Sociedade Brasileira de Pneumologia e Tisiologia. Diretrizes para Testes de Função Pulmonar. *J Pneumol.* 2002;28(Suppl 3):S155-S165.
- Koulouris N, Mulvey DA, Laroche CM, Green M, Moxham J. Comparison of two different mouthpieces for the measurement of Pimax and Pemax in normal and weak subjects. *Eur Respir J.* 1988;1(9):863-7.
- Truwit JD, Marini JJ. Validation of a technique to assess maximal inspiratory pressure in poorly cooperative patients. *Chest.* 1992;102(4):1216-9. <http://dx.doi.org/10.1378/chest.102.4.1216>
- Caruso P, Denari SD, Ruiz SA, Bernal KG, Manfrin GM, Friedrich C, et al. Inspiratory muscle training is ineffective in mechanically ventilated critically ill patients. *Clinics (Sao Paulo).* 2005;60(6):479-84. <http://dx.doi.org/10.1590/S1807-59322005000600009>
- Martin AD, Smith BK, Davenport PD, Harman E, Gonzalez-Rothi RJ, Baz M, et al. Inspiratory muscle strength training improves weaning outcome in failure to wean patients: a randomized trial. *Crit Care.* 2011;15(2):R84. <http://dx.doi.org/10.1186/cc10081>
- Koulouris N, Vianna LG, Mulvey DA, Green M, Moxham J. Maximal relaxation rates of esophageal, nose, and mouth pressures during a sniff reflect inspiratory muscle fatigue. *Am Rev Respir Dis.* 1989;139(5):1213-7. <http://dx.doi.org/10.1164/ajrccm/139.5.1213>
- Héritier F, Rahm F, Pasche P, Fitting JW. Sniff nasal inspiratory pressure. A noninvasive assessment of inspiratory muscle strength. *Am J Respir Crit Care Med.* 1994;150(6 Pt 1):1678-83. <http://dx.doi.org/10.1164/ajrccm.150.6.7952632>
- Katagiri M, Abe T, Yokoba M, Dobashi Y, Tomita T, Easton PA. Neck and abdominal muscle activity during a sniff. *Respir Med.* 2003;97(9):1027-35. [http://dx.doi.org/10.1016/S0954-6111\(03\)00133-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0954-6111(03)00133-1)
- Steier J, Kaul S, Seymour J, Jolley C, Rafferty G, Man W, et al. The value of multiple tests of respiratory muscle strength. *Thorax.* 2007;62(11):975-80. <http://dx.doi.org/10.1136/thx.2006.072884>
- Laroche CM, Mier AK, Moxham J, Green M. The value of sniff esophageal pressures in the assessment of global inspiratory muscle strength. *Am Rev Respir Dis.* 1988;138(3):598-603. <http://dx.doi.org/10.1164/ajrccm/138.3.598>
- Uldry C, Fitting JW. Maximal values of sniff nasal inspiratory pressure in healthy subjects. *Thorax.* 1995;50(4):371-5. <http://dx.doi.org/10.1136/thx.50.4.371>
- Polkey MI, Moxham J. Clinical aspects of respiratory muscle dysfunction in the critically ill. *Chest.* 2001;119(3):926-39. <http://dx.doi.org/10.1378/chest.119.3.926>
- Araújo PR, Resqueti VR, Nascimento Junior J, Carvalho Lde A, Cavalcanti AG, Silva VC, et al. Reference values for sniff nasal inspiratory pressure in healthy subjects in Brazil:

- a multicenter study. *J Bras Pneumol*. 2012;38(6):700-7. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-37132012000600004>
23. Chaudri MB, Liu C, Watson L, Jefferson D, Kinneer WJ. Sniff nasal inspiratory pressure as a marker of respiratory function in motor neuron disease. *Eur Respir J*. 2000;15(3):539-42. <http://dx.doi.org/10.1034/j.1399-3003.2000.15.18.x>
 24. Stefanutti D, Benoist MR, Scheinmann P, Chaussain M, Fitting JW. Usefulness of sniff nasal pressure in patients with neuromuscular or skeletal disorders. *Am J Respir Crit Care Med*. 2000;162(4 Pt 1):1507-11. <http://dx.doi.org/10.1164/ajrccm.162.4.9910034>
 25. Uldry C, Janssens JP, de Muralt B, Fitting JW. Sniff nasal inspiratory pressure in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Eur Respir J*. 1997;10(6):1292-6. <http://dx.doi.org/10.1183/09031936.97.10061292>
 26. Lofaso F, Nicot F, Lejaille M, Falaize L, Louis A, Clement A, et al. Sniff nasal inspiratory pressure: what is the optimal number of sniffs? *Eur Respir J*. 2006;27(5):980-2. <http://dx.doi.org/10.1183/09031936.04.00029004>
 27. Baydur A, Behrakis PK, Zin WA, Jaeger M, Milic-Emili J. A simple method for assessing the validity of the esophageal balloon technique. *Am Rev Respir Dis*. 1982;126(5):788-91.
 28. Hamnegård CH, Wragg S, Kyroussis D, Mills G, Bake B, Green M, et al. Mouth pressure in response to magnetic stimulation of the phrenic nerves. *Thorax*. 1995;50(6):620-4. <http://dx.doi.org/10.1136/thx.50.6.620>
 29. Hughes PD, Polkey MI, Kyroussis D, Hamnegard CH, Moxham J, Green M. Measurement of sniff nasal and diaphragm twitch mouth pressure in patients. *Thorax*. 1998;53(2):96-100. <http://dx.doi.org/10.1136/thx.53.2.96>
 30. de Bruin PF, Watson RA, Khalil N, Pride NB. Use of mouth pressure twitches induced by cervical magnetic stimulation to assess voluntary activation of the diaphragm. *Eur Respir J*. 1998;12(3):672-8. <http://dx.doi.org/10.1183/09031936.98.12030672>
 31. Baydur A, Cha EJ, Sassoon CS. Validation of esophageal balloon technique at different lung volumes and postures. *J Appl Physiol* (1985). 1987;62(1):315-21.
 32. Polkey MI, Harris ML, Hughes PD, Hamnegård CH, Lyons D, Green M, et al. The contractile properties of the elderly human diaphragm. *Am J Respir Crit Care Med*. 1997;155(5):1560-4. <http://dx.doi.org/10.1164/ajrccm.155.5.9154857>
 33. de Troyer A, Yernault JC. Inspiratory muscle force in normal subjects and patients with interstitial lung disease. *Thorax*. 1980;35(2):92-100. <http://dx.doi.org/10.1136/thx.35.2.92>
 34. Laporta D, Grassino A. Assessment of transdiaphragmatic pressure in humans. *J Appl Physiol* (1985). 1985;58(5):1469-76.
 35. Akoumianaki E, Maggiore SM, Valenza F, Bellani G, Jubran A, Loring SH, et al. The application of esophageal pressure measurement in patients with respiratory failure. *Am J Respir Crit Care Med*. 2014;189(5):520-31. <http://dx.doi.org/10.1164/rccm.201312-2193CI>
 36. Beda A, Güldner A, Carvalho AR, Zin WA, Carvalho NC, Huhle R, et al. Liquid- and air-filled catheters without balloon as an alternative to the air-filled balloon catheter for measurement of esophageal pressure. *PLoS One*. 2014;9(9):e103057. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0103057>
 37. Chiumello D, Gallazzi E, Marino A, Berto V, Mietto C, Cesana B, et al. A validation study of a new nasogastric polyfunctional catheter. *Intensive Care Med*. 2011;37(5):791-5. <http://dx.doi.org/10.1007/s00134-011-2178-4>
 38. Stell IM, Tompkins S, Lovell AT, Goldstone JC, Moxham J. An in vivo comparison of a catheter mounted pressure transducer system with conventional balloon catheters. *Eur Respir J*. 1999;13(5):1158-63. <http://dx.doi.org/10.1034/j.1399-3003.1999.13e36.x>
 39. Wragg S, Aquilina R, Moran J, Ridding M, Hamnegard C, Fearn T, et al. Comparison of cervical magnetic stimulation and bilateral percutaneous electrical stimulation of the phrenic nerves in normal subjects. *Eur Respir J*. 1994;7(10):1788-92. <http://dx.doi.org/10.1183/09031936.94.07101788>
 40. Similowski T, Fleury B, Launois S, Cathala HP, Bouche P, Derenne JP. Cervical magnetic stimulation: a new painless method for bilateral phrenic nerve stimulation in conscious humans. *J Appl Physiol* (1985). 1989;67(4):1311-8.
 41. Man WD, Moxham J, Polkey MI. Magnetic stimulation for the measurement of respiratory and skeletal muscle function. *Eur Respir J*. 2004;24(5):846-60. <http://dx.doi.org/10.1183/09031936.04.00029004>
 42. Lerolle N, Diehl JL. Ultrasonographic evaluation of diaphragmatic function. *Crit Care Med*. 2011;39(12):2760-1. <http://dx.doi.org/10.1097/CCM.0b013e31822a55e9>
 43. Houston JG, Fleet M, Cowan MD, McMillan NC. Comparison of ultrasound with fluoroscopy in the assessment of suspected hemidiaphragmatic movement abnormality. *Clin Radiol*. 1995;50(2):95-8. [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-9260\(05\)82987-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-9260(05)82987-3)
 44. Matamis D, Soilemezi E, Tsagourias M, Akoumianaki E, Dimassi S, Boroli F, et al. Sonographic evaluation of the diaphragm in critically ill patients. Technique and clinical applications. *Intensive Care Med*. 2013;39(5):801-10. <http://dx.doi.org/10.1007/s00134-013-2823-1>
 45. Lerolle N, Guérot E, Dimassi S, Zegdi R, Faisy C, Fagon JY, et al. Ultrasonographic diagnostic criterion for severe diaphragmatic dysfunction after cardiac surgery. *Chest*. 2009;135(2):401-7. <http://dx.doi.org/10.1378/chest.08-1531>
 46. Gottesman E, McCool FD. Ultrasound evaluation of the paralyzed diaphragm. *Am J Respir Crit Care Med*. 1997;155(5):1570-4. <http://dx.doi.org/10.1164/ajrccm.155.5.9154859>
 47. Summerhill EM, El-Sameed YA, Glidden TJ, McCool FD. Monitoring recovery from diaphragm paralysis with ultrasound. *Chest*. 2008;133(3):737-43. <http://dx.doi.org/10.1378/chest.07-2200>
 48. Boon AJ, Harper CJ, Ghahfarokhi LS, Strommen JA, Watson JC, Sorenson EJ. Two-dimensional ultrasound imaging of the diaphragm: quantitative values in normal subjects. *Muscle Nerve*. 2013;47(6):884-9. <http://dx.doi.org/10.1002/mus.23702>
 49. Bousuges A, Gole Y, Blanc P. Diaphragmatic motion studied by m-mode ultrasonography: methods, reproducibility, and normal values. *Chest*. 2009;135(2):391-400. <http://dx.doi.org/10.1378/chest.08-1541>
 50. Testa A, Soldati G, Giannuzzi R, Berardi S, Portale G, Gentiloni Silveri N. Ultrasound M-mode assessment of diaphragmatic kinetics by anterior transverse scanning in healthy subjects. *Ultrasound Med Biol*. 2011;37(1):44-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2010.10.004>
 51. Rahn H, Otis A, Fenn WO. The pressure-volume diagram of the thorax and lung. *Fed Proc*. 1946;5(1 Pt 2):82.
 52. Coelho CM, Carvalho RM, Gouvêa DS, Novo Júnior JM. Comparisons among parameters of maximal respiratory pressures in healthy subjects. *J Bras Pneumol*. 2012;38(5):605-13. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-37132012000500010>
 53. Irwin RS, Boulet LP, Cloutier MM, Fuller R, Gold PM, Hoffstein V, et al. Managing cough as a defense mechanism and as a symptom. A consensus panel report of the American College of Chest Physicians. *Chest*. 1998;114(2 Suppl Managing):133S-181S.
 54. Khamiees M, Raju P, DeGirolamo A, Amoateng-Adjepong Y, Manthous CA. Predictors of extubation outcome in

- patients who have successfully completed a spontaneous breathing trial. *Chest*. 2001;120(4):1262-70. <http://dx.doi.org/10.1378/chest.120.4.1262>
55. Man WD, Kyroussis D, Fleming TA, Chetta A, Harraf F, Mustfa N, et al. Cough gastric pressure and maximum expiratory mouth pressure in humans. *Am J Respir Crit Care Med*. 2003;168(6):714-7. <http://dx.doi.org/10.1164/rccm.200303-334BC>
56. Kyroussis D, Mills GH, Polkey MI, Hamnegard CH, Koulouris N, Green M, et al. Abdominal muscle fatigue after maximal ventilation in humans. *J Appl Physiol* (1985). 1996;81(4):1477-83.
57. Kyroussis D, Polkey MI, Mills GH, Hughes PD, Moxham J, Green M. Simulation of cough in man by magnetic stimulation of the thoracic nerve roots. *Am J Respir Crit Care Med*. 1997;156(5):1696-9. <http://dx.doi.org/10.1164/ajrccm.156.5.9702008>
58. Suzuki J, Tanaka R, Yan S, Chen R, Macklem PT, Kayser B. Assessment of abdominal muscle contractility, strength, and fatigue. *Am J Respir Crit Care Med*. 1999;159(4 Pt 1):1052-60. <http://dx.doi.org/10.1164/ajrccm.159.4.9803025>
59. Merletti R, Botter A, Troiano A, Merlo E, Minetto MA. Technology and instrumentation for detection and conditioning of the surface electromyographic signal: state of the art. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2009;24(2):122-34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2008.08.006>
60. Daube JR, Rubin DI. Needle electromyography. *Muscle Nerve*. 2009;39(2):244-70. <http://dx.doi.org/10.1002/mus.21180>
61. Rubin DI. Needle electromyography: basic concepts and patterns of abnormalities. *Neurol Clin*. 2012;30(2):429-56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ncl.2011.12.009>
62. Luo YM, Moxham J, Polkey MI. Diaphragm electromyography using an oesophageal catheter: current concepts. *Clin Sci (Lond)*. 2008;115(8):233-44. <http://dx.doi.org/10.1042/CS20070348>
63. Luo YM, Polkey MI, Johnson LC, Lyall RA, Harris ML, Green M, et al. Diaphragm EMG measured by cervical magnetic and electrical phrenic nerve stimulation. *J Appl Physiol* (1985). 1998;85(6):2089-99.
64. Criswell E. *Cram's Introduction to Surface Electromyography*. 2nd ed. Burlington (MA): Jones & Bartlett Learning; 2010.

Sobre os autores

Pedro Caruso

Professor Colaborador. Grupo de Músculo Respiratório, Divisão de Pneumologia, Instituto do Coração – InCor – Hospital das Clínicas, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP) Brasil.

André Luis Pereira de Albuquerque

Professor Colaborador. Grupo de Músculo Respiratório, Divisão de Pneumologia, Instituto do Coração – InCor – Hospital das Clínicas, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP) Brasil.

Pauliane Vieira Santana

Doutoranda. Grupo de Músculo Respiratório, Divisão de Pneumologia, Instituto do Coração – InCor – Hospital das Clínicas, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP) Brasil.

Leticia Zumpano Cardenas

Doutoranda. Grupo de Músculo Respiratório, Divisão de Pneumologia, Instituto do Coração – InCor – Hospital das Clínicas, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP) Brasil.

Jeferson George Ferreira

Fisioterapeuta. Grupo de Músculo Respiratório, Divisão de Pneumologia, Instituto do Coração – InCor – Hospital das Clínicas, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP) Brasil.

Elena Prina

Médica. Grupo de Músculo Respiratório, Divisão de Pneumologia, Instituto do Coração – InCor – Hospital das Clínicas, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP) Brasil.

Patrícia Fernandes Trevizan

Doutoranda. Grupo de Músculo Respiratório, Divisão de Pneumologia, Instituto do Coração – InCor – Hospital das Clínicas, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP) Brasil.

Mayra Caleffi Pereira

Fisioterapeuta. Grupo de Músculo Respiratório, Divisão de Pneumologia, Instituto do Coração – InCor – Hospital das Clínicas, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP) Brasil.

Vinicius Iamonti

Doutorando. Grupo de Músculo Respiratório, Divisão de Pneumologia, Instituto do Coração – InCor – Hospital das Clínicas, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP) Brasil.

Renata Pletsch

Doutoranda. Grupo de Músculo Respiratório, Divisão de Pneumologia, Instituto do Coração – InCor – Hospital das Clínicas, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP) Brasil.

Marcelo Ceneviva Macchione

Doutorando. Grupo de Músculo Respiratório, Divisão de Pneumologia, Instituto do Coração – InCor – Hospital das Clínicas, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP) Brasil

Carlos Roberto Ribeiro Carvalho

Professor Titular. Divisão de Pneumologia, Instituto do Coração – InCor – Hospital das Clínicas, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP) Brasil.