

ASPECTOS PROPEDEÚTICOS NO USO DA ERGOESPIROMETRIA

PAULO YAZBEK JR., HORST HAEBISCH, HANS-HEINRICH KEDOR,
PAULO AUGUSTO DE CAMARGO JR., JOSÉ FRANCISCO SARAIVA,
LUIZ GASTÃO DE SERRO-AZUL

O consumo máximo de oxigênio ($VO_2^{max.}$), ou potência aeróbica máxima, é um indicador de metabolismo energético muscular e da eficiência dos sistemas pulmonar e cardiovascular.

Métodos de medida direta do consumo de oxigênio (VO_2) tornaram-se mais rápidos nos últimos dez anos, em decorrência do progresso das técnicas de determinação da concentração de gases. Exemplos mais recentes são o analisador de oxigênio (CO_2), bem como o de dióxido de carbono (CO_2), contrastando com os métodos diretos de Scholander¹ ou de Haldane². Convém lembrar que, bem antes da era da eletrônica, a ergoespirometria (medida direta dos gases expirados) foi usada para avaliar a capacidade funcional de cardiopatas. As variáveis usadas para este fim foram a ventilação (VE) e o quociente VO_2/VE e seu comportamento durante níveis diferentes de esforço³.

A determinação de O_2 e da produção de CO_2 baseia-se na ergoespirometria, que avalia a quantidade de O_2 consumido (resultante da diferença entre o O_2 inspirado, constante na atmosfera e a quantidade de O_2 expirado), e que pode ser facilmente captada e analisada através de aparelhamento adequadamente sensível. De maneira não invasiva, sem a necessidade de obter-se o valor do lactato sangüíneo, consegue-se a determinação do limiar anaeróbico (LAN), momento em que o metabolismo láctico é acelerado. Ademais, torna-se mais objetiva a classificação real do grau de insuficiência cardíaca nos diferentes processos patológicos cardiocirculatórios. Assim, devem ser realçadas as facilidades proporcionadas dos equipamentos atuais de ergoespirometria na avaliação de alguns aspectos da função cardíaca e respiratória.

METODOLOGIA

A propedêutica funcional das condições cardíaca e respiratória e da atividade muscular abrange a determinação de diversos dados: 1) Ventilação - VE (l/min); 2) Frequência respiratória - FR (v/min); 3) Frequência cardíaca - FC (b/min); 4) Volume corrente - VC (ml); 5) Consumo de oxigênio

VO_2 (ml/min ou ml/kg/min); 6) Produção de dióxido de carbono - VCO_2 (ml/min); 7) Equivalente ventilatório - VE/VO_2 ; 8) Pulso de oxigênio - VO/FC ; 9) Quociente respiratório - $QR = VCO_2/VO_2$; 10) Equivalente metabólico - Met (unidade² metabólica); 11) Fração expirada de CO_2 - ($\% \times 10^{-2}$); 12) Fração expirada de O_2 - ($\% \times 10^{-2}$).

1. A ventilação é medida através de um pneumotacógrafo. O volume de ar expirado passa por um sistema de turbina rotatória que, possuindo um transdutor, registra o fluxo de volume em l/min. Cada quantidade de gás expirada é analisada separadamente. A calibração é feita com uma seringa de volume conhecido, para ser empregado o fator de correção que determinará o volume respiratório (fig. 1). Automaticamente são obtidos os valores da frequência respiratória e volume corrente.

A determinação da concentração de O_2 , baseia-se no uso de sensor polarográfico (módulo OM-11). Esse possui um catodo de ouro e um anodo de prata entre os quais é empregada pequena corrente elétrica. O O_2 difunde-se através de fina membrana situada entre os eletrodos que contêm, como eletrólito, solução de cloreto de potássio, funcionando como sistema tampão. A determinação da concentração baseia-se nas modificações dessa corrente elétrica que ocorrem de maneira proporcional à pressão parcial de O_2 .

A detecção de CO_2 (módulo LB-2) fundamenta-se no princípio da absorção da radiação infravermelha proporcional à concentração do gás na mistura gasosa.

A calibração do equipamento é feita com uma mistura padrão contendo 15% de O_2 e 5,8% de CO_2 (fig. 2).

Para uma avaliação segura, o O_2 e o CO_2 , bem como a quantidade de gás ventilado, necessitam de fatores de correção considerando-se a pressão barométrica local e a temperatura ambiente. Empregam-se, para isso, condições padronizadas adotadas internacionalmente, baseadas nas leis de Boyle e Mariotte e de Gay-Lussac, que estabelecem as relações de pressão, volume e temperatura. Utiliza-se condi-

Serviço de Condicionamento Físico da Divisão de Cardiologia Social Instituto do coração do Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo.



Fig. 1 - Com a utilização de um volume-padrão, empregando-se uma seringa, calibra-se a quantidade exata de ar na entrada do pneumotacógrafo.

ção STPD - Standard temperature, pressure and dry que - que admite o gás sem vapor d'água (sempre presente na atmosfera), à temperatura de 0° e pressão de 760 mmHg. Os sintomas OM-11, LB-2 e o pneumotacógrafo do equipamento estão ligados a um computador (Monroe - Modelo 1810), que fornece automaticamente os valores nas condições de STPD (fig. 3).

O equivalente ventilatório (VE/VO) ou seja, a relação entre a ventilação e o consumo de O_2 é obtida através do computador, que o corrige para as devidas condições de BTPS (body temperature, pressure standard) e STPD.

O pulso de O_2 (VO/F C) é obtido dividindo-se o consumo de O_2 pela frequência cardíaca do momento. Ele reflete indiretamente o volume sistólico e a diferença artério-venosa de O_2 .

O quociente respiratório (QR), relação entre a produção de dióxido de carbono e o oxigênio consumido (VCO/VO), é obtido automaticamente.

Obtêm-se, também, os valores das unidades metabólicas de medida (Met), onde 1 Met é igual a 3,5 ml/kg/min de consumo de O_2 em condições basais. Para isso, no início do exame, o peso e a estatura do paciente são fornecidos ao computador.

O controle eletrocardiográfico é obtido constantemente através de monitores HP (nº 7830-A e 7826-B). A atividade física é exercida em esteira ou cicloergô-



Fig. 2 - Com a utilização de torpedos com amostras conhecidas de CO_2 e O_2 procede-se à calibração dos gases após um período de aquecimento do equipamento. Retirada a amostra deverá ser lido no mostrador a concentração encontrada no ar atmosférico.

metro de regulagem eletromagnética. Empregam-se protocolos conhecidos, como o de Elllestad⁵ ou de Naughton⁶ para esteira, e o de Astrand⁷ para bicicleta ergométrica.

COMENTÁRIOS

Como as atividades de condicionamento físico exigem margem de segurança em relação ao trabalho executado, especialmente quando se trata de coronariopatas, devem-se valorizar métodos não-invasivos que orientem o médico em relação aos níveis de prescrição de exercícios a serem realizados e evitar a proximidade de eventos anaeróbicos.

Diversos autores como Wasserman e col.⁸, Koyal e col.⁹, Matsumura e col.¹⁰ e Araújo¹¹ preconizaram as alterações das trocas gasosas durante esforços contínuos, progressivos ou não, propondo um método não-invasivo para a obtenção do limiar anaeróbico (LAN). Com efeito, para Wasserman e col.⁸ o LAN ocorre quando há aumento não-linear do VE, e de alterações significativas do QR. Kindermann e Col.¹² sugerem que o momento no qual o ácido láctico começa a elevar-se marca o limiar aeróbico (LA), em contraste com o nível de ácido láctico sanguíneo de 4 mmol/litro, admitido como o LAN.



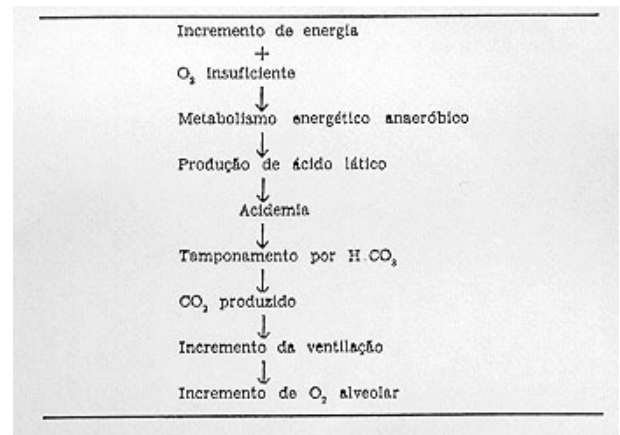
Fig. 3 - Paciente expirando em válvulas especiais que isolam do ar ambiente durante a expiração. Conhecendo-se porcentagem dos gases existentes no ar exterior, automaticamente obtém-se pela diferença obtida, o consumo de O_2 e a produção do CO_2 de minuto em minuto já corrigidas para as condições de STPD.²

A determinação do LAN se torna realmente expressiva na avaliação ergométrica gradativa em indivíduos sob condicionamento físico. O mecanismo fundamental dessa determinação baseia-se no fato de que, sendo o ácido láctico tamponado pelo bicarbonato no sangue, certa quantidade de CO_2 é liberada causando aumento da ventilação (VF, $m\dot{l}/m\dot{n}$) e da eliminação de CO_2 . Essa modificação, bem como outras respostas lógicas,² podem ocorrer durante a evolução de um determinado exercício, contribuindo para o início do metabolismo anaeróbico (quadro I).

Nos pacientes com comprometimento do desempenho ventricular esquerdo, uma exigência maior das necessidades energéticas é compensada com incremento da frequência cardíaca para a manutenção de débito cardíaco adequado. Dependendo do nível em que ocorre, esse fato pode resultar em uma deficiência de oxigenação dos músculos ativos, dando início aos fenômenos que precedem o LAN.

Recentemente, Weber e Col.¹³, utilizando ergoespirometria, revolucionaram a classificação clássica de "New York Herat Association" que tem como critério principal os sintomas referidos pelos pacientes. Essa avaliação, apenas subjetiva, parecia aguardar uma inovação objetiva. Esses autores, estudando 62 pacientes, e baseando-se no consumo direto de

Quadro I



O_2 , classificaram a insuficiência cardíaca congestiva (ICC) de A a D, sendo: A, o grupo de pacientes com o consumo de O_2 maior que $20 ml/kg/min$ (equivalente à classe I da NYHA); B, entre 16 e $20 ml/kg/min$ (correspondente à classe II); C, entre 10 a $15 ml/kg/min$ (correspondente à classe III da NYHA), e D (igual à IV da NYHA) com consumo de O_2 menor que $10 ml/kg/min$ e que a corresponde aos pacientes portadores de dispnéia em repouso. Weber e col. concluíram em seu trabalho que a medida dos gases expirados durante o exercício é um método não invasivo mais eficaz para a obtenção do grau real da capacidade cardíaca funcional e facilmente reprodutível.

Com o método do LAN, obtido pela ergoespirometria, o grau de sobrecarga imposta ao sistema metabólico dos músculos esqueléticos constitui o principal fator que permite a determinação da intensidade do exercício, diferenciando-se do método da frequência cardíaca (FC), que analisa apenas as solicitações impostas ao sistema cardiocirculatório.

Wilson e col., em trabalho com pacientes portadores de ICC, sugerem¹⁴ que a redução da máxima capacidade física ao exercício seria primariamente devida à diminuição do fluxo sanguíneo aos músculos esqueléticos, resultando maior fadiga muscular.

A fim de evitar-se a coleta periódica de amostras de sangue durante o exercício contínuo e progressivo, pode-se obter o LAN de maneira mais rápida e confortável, pela observação da ventilação/minuto, que aumenta praticamente linearmente com o incremento sucessivo de cargas de trabalho empregadas. A partir de um certo momento, deixa de haver essa proporcionalidade direta, ocorrendo ascensão rápida do VE e do VCO_2 , o que confirma o maior aumento dos valores de ácido láctico, ou seja, do LAN, coincidindo com os dados respiratórios obtidos.

Algumas relações das variáveis obtidas com o equipamento de avaliação direta permitem determinar o LAN sem necessidade de dosagem de lactato. Davis e col.¹⁵ concluíram que a relação entre o método do LAN e a dosagem do ácido láctico chega a 0.95.

Várias evidências sugerem que o transporte de gases é limitado pelo sistema cardiovascular e não pela ventilação, pois esta possui uma reserva funcional quatro vezes maior do que o coração.

Durante a atividade física, a ventilação é adaptada continuamente por mecanismos de controle necessários para manter a homeostase. O aumento da ventilação com o exercício é o resultado de estímulos nervosos e hormonais, bem como da ação integrada entre a pressão parcial de CO (PaCO₂) no sangue arterial, o pH e o estímulo hipóxico.²

Nos primeiros minutos de exercício, pode ocorrer certa hiperventilação, com maior eliminação de CO₂ do que o produzido na atividade em relação ao O₂ consumido. Isso modifica a relação VCO₂/VO₂ e causa valores elevados do quociente respiratório (QR). Passando, a seguir, por uma fase de equilíbrio, o QR começa a elevar-se e atinge a unidade, ultrapassando a mesma, pois o tamponamento do ácido pelo bicarbonato de sódio causa liberação de grande quantidade de CO₂, chamado CO₂ metabólico, para diferenciar do CO₂ respiratório, produzido pelo ciclo de Krebs.

Assim sendo, a relação entre o CO₂ produzido e o O₂ consumido, assume valores altos, indicando que as vias anaeróbicas de Embden - Meyerhof estão sendo utilizadas. A partir do LAN há um excesso de metabólitos ácidos, com que da PaCO₂, terminando em exaustão.

Sabe-se que indivíduos normais necessitam de 25 a 30 litros de ar ventilado para consumir um litro de O₂, em média. Essa relação, chamada equivalente respiratório entre ventilação e consumo de O₂ (VE/VO₂), pode diferenciar um grupo de coronariopatas.

Na figura 4, pode-se verificar que o coronariopata apresenta maior elevação da ventilação na fase de trabalho aeróbico, mantendo a proporcionalidade dos valores obtidos de forma aparentemente distinta do grupo normal. Obviamente, devem-se considerar indivíduos com pesos equivalentes. Isto indica que, para um mesmo consumo de O₂, a ventilação necessária para o indivíduo normal é menor. Na mesma figura, nota-se que a FC no coronariopata não guarda a mesma relação com o VO₂, apresentando uma baixa resposta, cronotrópica com a evolução do exercício. No grupo normal, as curvas de FC e consumo de O₂ são praticamente paralelas, principalmente nas fases iniciais.

A importância da obtenção do LAN em coronariopatas com ou sem problemas de ordem pulmonar, reveste-se de interesse prático; porque se pode comparar a FC com os dados obtidos em um grupo de coronariopatas selecionados. Utiliza-se também o LAN para estabelecer níveis próprios de treinamento, muitas vezes calculados abaixo do preconizado apenas pela FC. Em contrapartida, podem estar acima, em casos cujo equivalente respiratório mostra níveis superiores.

A American Heart Association¹⁶ e o American College of Sports Medicine¹⁷ preconizam que a in-

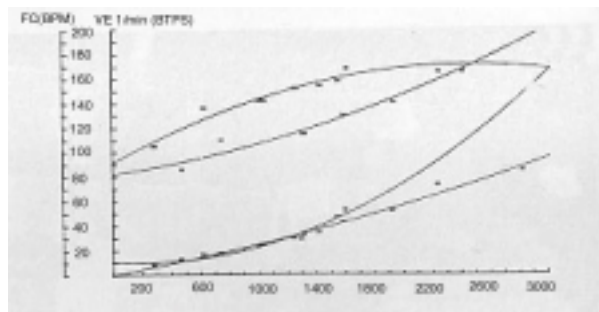


Fig. 4 - Na ordenada valores de frequência cardíaca e ventilação pulmonar por minuto em condições BTPS. Na abscissa consumo de O₂. A ventilação pulmonar no coronariopata é maior do que no indivíduo sem comprometimento cardíaco. O comportamento da FC em normais é praticamente paralela ao consumo de O₂. Nos coronariopatas é frequente uma baixa resposta cronotrópica ao exercício.

tensidade do exercício durante o treinamento deva situar-se entre 60 a 85% do VO₂ máximo. A intensidade do exercício pode ser calculada também a partir da capacidade metabólica funcional do indivíduo, medida em Mets.

A determinação exata do LAN por métodos indiretos não é possível, porém o grande número de variáveis fornecidas pela ergoespirometria moderna, permite uma avaliação substancial, além da valorização dos traçados eletrocardiográficos que ocorre simultaneamente.

Em nossa experiência, a passagem para as condições anaeróbicas foi acompanhada de sintomas compatíveis com acúmulo de ácido láctico, pois a grande maioria dos pacientes e voluntários referiram dores musculares nessa circunstância.

A obtenção do consumo de O₂ por determinação das frações de concentração de gases expirados fornece, portanto, uma expressiva quantidade de dados utilizando metodologia não-invasiva e abrindo vasta perspectiva de novas informações acerca do condicionamento físico em coronariopatas, cardiopatas em geral e indivíduos normais.

REFERÊNCIAS

- Scholander, P. F. - Analysis for accurate estimation of respiratory gases in one half cubic centimeter samples. J. Biol. Chem. 167: 235, 1947.
- Haldane, (aparelho de Haldane): apud Muralt, V. A. - Einführung in Die Praktische Physiologie: 3.^a ed. Springer-Verlag, Berlin e Heidelberg, 1948. p. 112.
- Haebisch, H. - Ueber die Arbeitsatmung und die Beurteilung des Kreislaufes aus der Arbeitsatmung. zbl. in. Med. 60: 97, 1939.
- Bruce, R. A.; Kusumi, F.; Hosmer, D. - Maximal oxygen intake and nomographic assessment of functional aerobic impairment in cardiovascular disease. Am. Heart J. 85: 546, 1973.
- Ellestad, M. H. et al. - Maximal treadmill stress testing for cardiovascular evaluation. Circulation, 39a. 517, 1969.
- Naughton, J. P.; Hellerstein, H. K.; Mohler, I. C. - Exercise testing and exercise training in coronary heart disease. New York Academic Press, 1973.
- Astrand, P. P. et al. - A nomogram for calculation of aerobic capacity (Physical Fitness) from pulse rate during submaximal work. J. Appl. Physiol, 7: 218, 1954.

8. Wasserman, K.; Whipp, J.; Koyal, S. N. et al. - Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J. Apply Physiology*, 35: 236, 1973.
9. Koyal, S. N.; Whipp, B. J - Exercise physiology in health and disease. *Am. Rev. Respir. Dis.* 112: 219, 1975.
10. Matsumura, N.; Nishijima, H.; Kojima, S.; Hashimoto, F. Ninami, M.; Yasuda, H. - Determination of anaerobic threshold for assessment of functional state in patients with chronic heart failure. *Circulation*, 68: 360, 1983.
11. Araujo, C. G. S. - Respostas cardiocirculatórias a um exercício submáximo prolongado. *Arq. Bras. Cardiol.* 41: 37, 1983.
12. Kindermann, W.; Simon, G.; Keul, J. - The significance of the anaerobic transition for the determination of workload intensities during endurance training. *Eur. J. Apply Physiol.* 42: 25, 1979.
13. Weber, K. T.; Kinasewitz, G. T.; Janicki, J. S.; Fishman, A. P. - Oxygen utilization and ventilation during exercise in patients with chronic cardiac failure. *Circulation*, 65: 1218, 1982.
14. Wilson, J. R.; Martin, J. L; Schwartz, D.; Ferraro, N. - Exercise intolerance in patients with chronic heart failure: role of impaired nutritive flow to skeletal muscle. *Circulation*, 69: June - 1984.
15. Davis, J. A.; Franck, M. H.; Whipp, B. J.; Wasserman, K. - Anaerobic threshold alterations caused by endurance training. in middle aged men. *J. Apply Physiol.* 46: 1039, 1979.
16. American College of Sports Medicine - The recommended quantity and quality of exercise developing and main training fitness in healthy adults. *Med. SCC: Sports*, 10(3) VII, 1978.
17. American Heart Association - Heart facts - 1978. Dallas. Texas American Heart Association, 1977.