
Teste de Exercício Cardiopulmonar

J. ALBERTO NEDER, LUIZ EDUARDO NERY

Siglas e abreviaturas utilizadas neste trabalho

AC – Anidrase carbônica	$\dot{Q}CO_2$ – Produção periférica de CO_2
ATP – Adenosina trifosfato	$\dot{Q}O_2$ – Captação periférica de O_2
ATPS – Temperatura e pressão ambiente, saturado	$\dot{Q}T$ – Débito cardíaco
BIE – Broncoconstrição induzida pelo exercício	R – Taxa de troca gasosa
BTPS – Temperatura corporal, pressão ambiente e saturado	RFC – Reserva cronotrópica
Ca – Conteúdo arterial	R $\dot{V}E$ – Reserva ventilatória
CI – Capacidade inspiratória	Sa O_2 – Saturação da oxihemoglobina
CO – Monóxido de carbono	STPD – Temperatura e pressão padrões, seco
CPT – Capacidade pulmonar total	TI – Tamponamento isocápnico
Cv – Conteúdo venoso	Ti – Tempo inspiratório
CV – Capacidade vital	Te – Tempo expiratório
D _L – Capacidade pulmonar de difusão	TECP – Teste de exercício cardiopulmonar
ECG – Eletrocardiograma	θ_L – Limiar de lactato estimado
f – Frequência respiratória	TTOT – Tempo total do ciclo respiratório
FC – Frequência cardíaca	Tx – Transplante
IMC – Índice de massa corpórea	$\dot{V}E$ – Volume minuto expirado
ln – Logaritmo natural	VE ₁ – Volume expiratório forçado no 1º segundo
LA – Limiar anaeróbico	$\bar{V}EM$ – Volume do espaço-morto
máx – Referente ao exercício máximo	$\dot{V}E/\dot{V}O_2$ – Equivalente ventilatório para o O_2
MET – Múltiplo do consumo basal de O_2	$\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ – Equivalente ventilatório para o CO_2
Pa – Pressão parcial gasosa arterial	VES – Volume de ejeção sistólico
PA – Pressão alveolar	VC – Volume corrente
PCr – Fosfocreatina	$\dot{V}CO_2$ – Liberação de CO_2
PCR – Ponto de compensação respiratório	$\dot{V}O_2$ – Consumo de VO_2
P \bar{E} – Pressão expiratória mista	$\dot{V}O_{2LS}$ – Consumo de O_2 limitado-por-sintomas
PEF – Pressão expiratória final	VPEF – Volume pulmonar expiratório final
pH – Potencial hidrogeniônico	VPIF – Volume pulmonar inspiratório final
Pu O_2 – Pulso de O_2	\dot{V}/\dot{Q} – Relação ventilação-perfusão
Pv – Pressão parcial gasosa venosa	VVM – Ventilação voluntária máxima
	\dot{W} – Taxa de trabalho ou potência

OBJETIVOS

A intolerância ao esforço constitui um aspecto clínico essencial a uma ampla faixa de doenças, notadamente as cardiorrespiratórias, estando intimamente associada à deterioração da qualidade de vida e elevada morbimortalidade. O exercício físico dinâmico, *i.e.*, aquele efetuado

por grandes grupos musculares com deslocamento de parte considerável, ou do todo, da massa corpórea, apresenta-se como um potente desafio fisiológico à cadeia anátomo-funcional que une o meio ambiente à atividade celular (**Figura 1**). Desta forma, o aumento nas taxas de

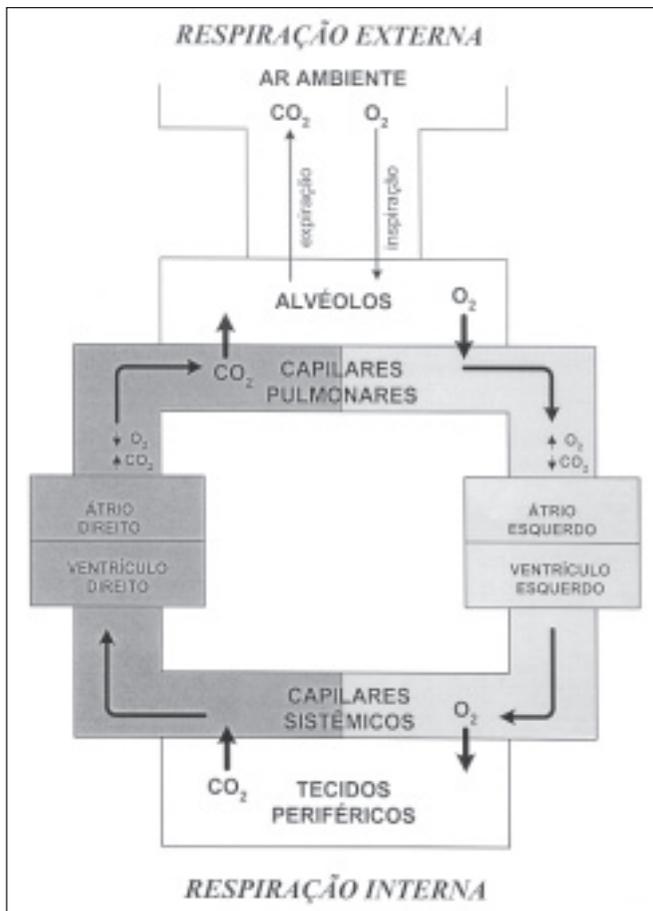


Figura 1 – O processo respiratório: os sistemas cardiovascular e respiratório propriamente dito unem a troca gasosa com o meio ambiente (respiração externa) à troca gasosa celular (respiração interna). A oferta e retirada dos gases vitais (O₂ e CO₂) dependem do fluxo contínuo de ar (ventilação) e sangue (circulação), impulsionados pelas bombas toracopulmonar e cardíaca, respectivamente. O exercício constitui um potente desafio fisiológico à complexa integração destes ajustes sistêmicos.

troca periférica de oxigênio ($\dot{Q}O_2$) e dióxido de carbono ($\dot{Q}CO_2$) com o exercício exige complexos ajustes nos dois principais sistemas envolvidos na captação e transporte dos gases (*i.e.* na Respiração entendida globalmente): o sistema respiratório e o sistema cardiovascular (**Figura 1**). Portanto, a avaliação das respostas metabólicas, ventilatórias, cardiovasculares e subjetivas (sintomas) durante o exercício dinâmico possui um importante potencial diagnóstico e prognóstico, que excedem amplamente a investigação isolada no repouso⁽¹⁻⁵⁾.

Embora imprecisa e excessivamente esquemática, existe uma clara tendência na literatura – e na prática médica – em classificar a avaliação clínica da tolerância ao esforço num enfoque (i) “cardiológico” (teste de exercício cardíaco, ergometria convencional, ou *stress testing*) – habi-

tualmente realizado com o intuito básico de avaliar o equilíbrio entre a demanda e oferta de O₂ miocárdicos através da observação continuada da atividade elétrica cardíaca (eletrocardiograma ou ECG)⁽⁶⁻⁸⁾. Em contraposição, há o enfoque (ii) “respiratório” (teste de exercício cardiopulmonar ou cardiorrespiratório, ergoespirometria ou teste de exercício clínico), em que, em adição à análise do ECG e o registro da frequência cardíaca, são mensurados diretamente o volume de ar ventilado (habitualmente o expirado) e as respectivas frações de oxigênio e dióxido de carbono (FEO₂ e FECO₂)^(1-3,9,10). Estas medidas primárias, por sua vez, são integradas em tempo real por tecnologia digital, permitindo a obtenção de diversas outras variáveis de interesse clínico (**Figura 2**).

O presente documento, endossado pela Sociedade Brasileira de Pneumologia e Tisiologia (SBPT), apresenta um resumo das recomendações consensuais, baseadas nas evidências atualmente disponíveis, acerca dos aspectos técnico-operacionais, interpretativos e de aplicabilidade clínica do teste de exercício cardiopulmonar (TECP) (*Parte II*). As características específicas das respostas eletrocardiográficas ao esforço e suas interpretações não serão aqui aprofundadas: as mesmas já foram alvo-específico de diversas recomendações na literatura estrangeira^(7,8,11) e no nosso meio⁽¹²⁾. Este texto traz, ainda, uma breve discussão sobre os aspectos fisiológicos básicos para o entendimento clínico do TECP (*Parte I*); em adição, a *Parte III* se constitui numa extensa fonte de valores de referência para o teste, a maioria dos quais obtidos na população brasileira adulta sedentária⁽¹³⁻¹⁵⁾.

Portanto, o objetivo mister deste documento é o de fornecer diretrizes fundamentais acerca da utilidade clínica da avaliação integrada das respostas cardiorrespiratórias ao esforço, visando a uniformização do procedimento e das suas estratégias interpretativas dentro do meio pneumológico brasileiro.

PARTE I. BASES FISIOLÓGICAS DOS TESTES DE EXERCÍCIO

I.1. AJUSTES METABÓLICOS

A análise das características da troca de gases nos tecidos periféricos constitui-se no alicerce para o entendimento dos processos fisiológicos envolvidos no exercício dinâmico. O termo *metabolismo* é também usado como sinônimo de intercâmbio gasoso sistêmico, já que O₂ é consumido ($\dot{V}O_2$) e CO₂ liberado ($\dot{V}CO_2$), como conseqüências da aceleração da atividade metabólica, principalmente a da muscular esquelética (**Figura 1**).

O exercício físico envolve, inevitavelmente, um aumento das necessidades orgânicas de suprimento de energia para a contração muscular. Normalmente, esta energia provém maciçamente dos chamados *complexos fosfato de*

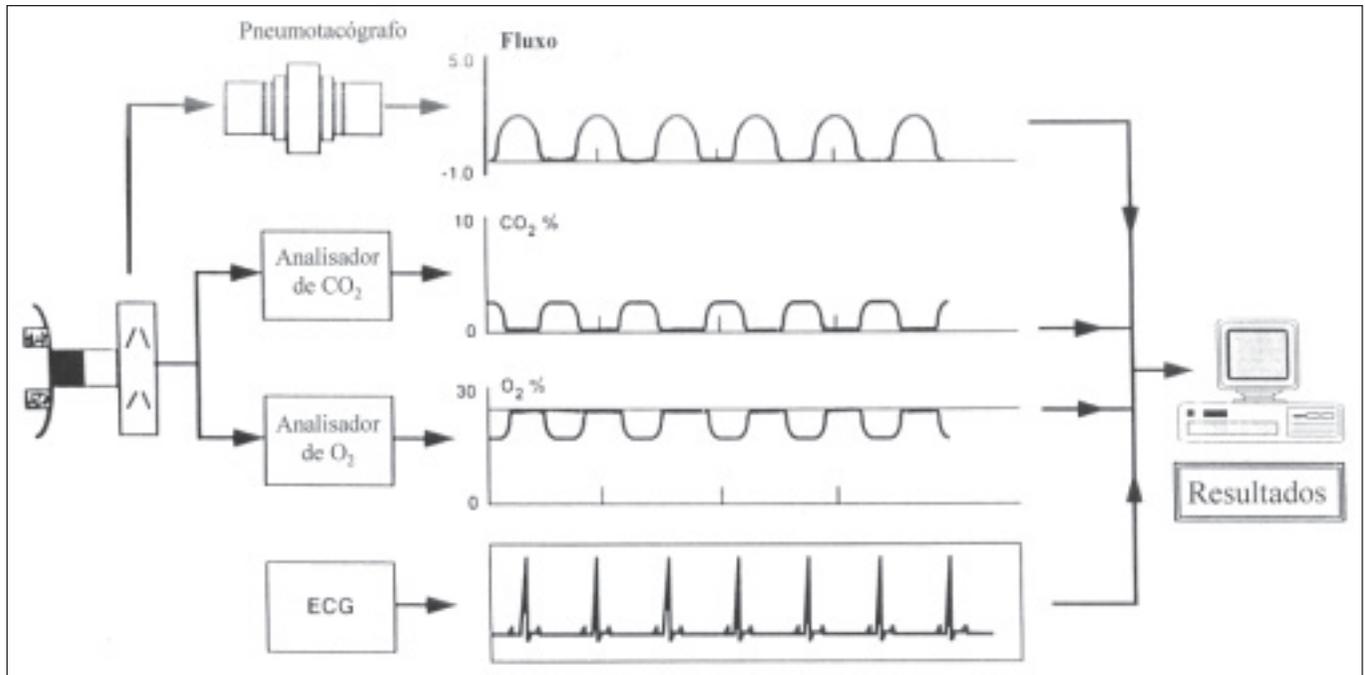


Figura 2 – Os quatro sinais básicos para a obtenção das variáveis metabólicas, ventilatórias e cardiovasculares durante o exercício: tal aparelhagem é disponível na forma de sistemas metabólicos integrados para o teste de exercício cardiopulmonar (TECP). Os volumes gasosos trocados ($\dot{V}O_2$ e $\dot{V}CO_2$) são obtidos como a diferença entre os volumes inspirados e expirados: estes podem ser obtidos pelo produto do volume de ar ventilado – obtido pela integração do fluxo contra o tempo decorrido – e as respectivas concentrações gasosas. A frequência cardíaca é calculada pela distância R-R do traçado eletrocardiográfico (ECG). Estes sinais são processados por tecnologia digital, apresentados em tempo-real, e armazenados – nas formas descritiva e gráfica – para futura análise. Notar que outros sinais aferentes, como a saturação da oxihemoglobina e pressão arterial, podem também ser processados continuamente por tais sistemas.

alta energia (~P), a grande maioria dos quais disponível na forma de adenosina trifosfato (ATP). Como, infelizmente, o organismo dispõe de ATP estocado para apenas algumas poucas contrações, necessitamos regenerá-lo continuamente. Embora algum “novo” ATP possa ser inicialmente obtido pela quebra da reserva de fosfato muscular (denominada de fosfocreatina ou PCr), após algum tempo (cerca de 20-30 segundos), o organismo precisa recorrer a uma, ou ambas, das seguintes opções:

- metabolismo anaeróbio (glicólise anaeróbia), que é capaz de fornecer energia prontamente, mas com um gasto elevado de substrato (glicose) e produção de um ácido forte, o ácido láctico, e/ou
- metabolismo aeróbio ou oxidativo (ciclo de Krebs e cadeia do transporte de elétrons), que, embora demande tempo para o seu ajuste preciso, apresenta um grande potencial para sustentar uma atividade prolongada.

Esquemáticamente, portanto, existe alguma hierarquia cronológica na seqüência de obtenção de ATP (i.e., ATP armazenado → sistema PCr → glicólise anaeróbia e/ou metabolismo oxidativo). Entretanto, deve-se observar que, num dado momento, é provável que todas as vias metabólicas estejam ativas: na realidade, o adjetivo “predomi-

nante” deveria sempre anteceder a denominação “aeróbio” ou “anaeróbio”⁽¹⁶⁾.

A grande vantagem do metabolismo anaeróbio é que ele independe do aporte de O_2 à mitocôndria e, portanto, do funcionamento rápido e adequado do complexo sistema de captação, transporte e oferta de O_2 (**Figura 1**). De fato, logo na transição entre o repouso e o exercício, existe um certo atraso no início do metabolismo aeróbio – um verdadeiro “déficit de O_2 ” – sendo este suprido pelos depósitos locais de O_2 (ligado a mioglobina, por exemplo), a PCr e a alguma glicólise anaeróbia. Logo, no início do exercício, haverá uma geração temporária, não-sustentada, de ácido láctico. Após algum tempo – que será mais curto em indivíduos mais treinados – as necessidades aeróbias são quase totalmente supridas e o organismo passa a depender crucialmente da integridade dos ajustes “cardiorrespiratórios” delineados na **Figura 1**.

Desta forma, caso a intensidade do exercício seja aumentada progressivamente (*exercício incremental*), observa-se que o $\dot{V}O_2$ também aumenta linearmente com a carga aplicada (**Figura 3**). Isso ocorre até um certo ponto, muito próximo à tolerância máxima de exercício, a partir do qual, por mais que a carga seja aumentada, o

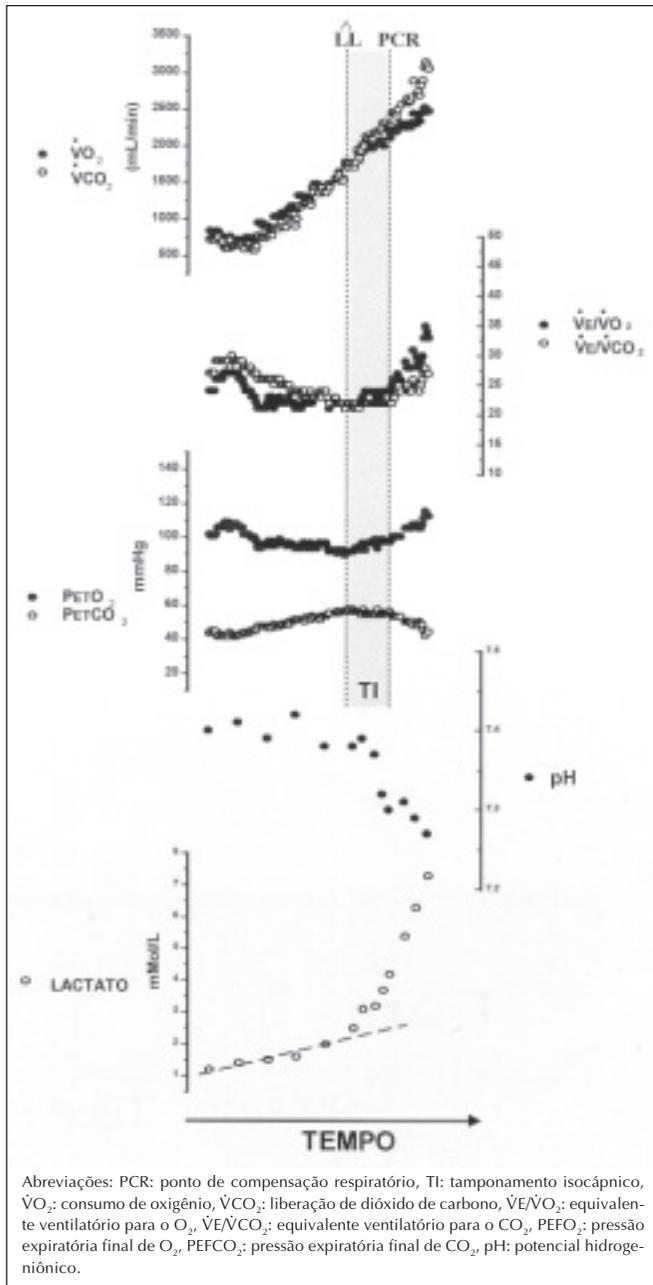
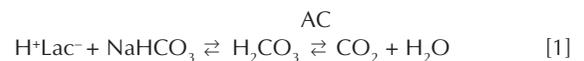


Figura 3 – Determinação não-invasiva do limiar de lactato (LL), durante um TECP incremental, utilizando-se variáveis de troca gasosa e ventilatórias. Ver o texto para explicações adicionais.

$\dot{V}O_2$ se estabiliza: este fenômeno caracteriza o chamado *consumo máximo de oxigênio* ou $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ ⁽¹⁷⁾. Embora, por definição, a existência de um platô na linha de ascensão do $\dot{V}O_2$ seja o que realmente defina o $\dot{V}O_{2\text{máx}}$, este achado é raramente visto em indivíduos sedentários normais – e muito menos em pacientes. Neste contexto, o mais correto é denominar esse valor como representativo do $\dot{V}O_2$ de pico ou $\dot{V}O_2$ limitado-por-sintomas ($\dot{V}O_{2\text{LS}}$); o

$\dot{V}O_{2\text{LS}}$, embora fisiologicamente distinto do $\dot{V}O_{2\text{máx}}$, pode, nas circunstâncias adequadas, apresentar a mesma importância prática.

Um outro fenômeno especialmente marcante na resposta metabólica ao exercício progressivo é a ocorrência de uma modificação, relativamente abrupta, da relação entre as taxas de incremento do $\dot{V}O_2$ e da $\dot{V}CO_2$. Em termos mais simples, ocorre, em algum ponto do exercício, uma liberação adicional de CO_2 (**Figura 3**)⁽¹⁸⁾. A fonte principal deste extra- CO_2 resulta da dissociação do ácido carbônico (H_2CO_3), formado a partir do tamponamento do ácido láctico pelo bicarbonato sanguíneo ($NaHCO_3$), ou seja:



onde AC representa a enzima anidrase carbônica, que apressa substancialmente esta reação na hemácia e no capilar pulmonar. Este “extra”- CO_2 é adicionado ao CO_2 que está sendo produzido pela respiração celular: no exercício intenso, por exemplo, o CO_2 advindo do tamponamento do lactato aumenta a $\dot{V}CO_2$, relativamente ao exercício puramente aeróbio, num fator de até 2,5 vezes⁽¹⁸⁾.

Embora ainda suscetível de debate⁽¹⁹⁾, a hipótese mais provável é a de que a falta relativa de O_2 no final da cadeia de transporte de elétrons desequilibra o potencial redox do citosol – cuja correção seria tentada pela formação de lactato a partir do piruvato. Como esta modificação do metabolismo predominantemente oxidativo para o progressivamente anaeróbio parece ter “limiar” de surgimento (*limiar de lactato*)⁽²⁰⁾, alguns autores também usam a denominação de *limiar anaeróbio* (LA)⁽²¹⁾. Independente do mecanismo exato, entretanto, este extra- CO_2 constitui um importante estímulo ventilatório – que podemos utilizar para detectar não-invasivamente o limiar de lactato, como será visto adiante.

I.2. AJUSTES PULMONARES

A função primordial do sistema respiratório é a de manter a homeostase das tensões gasosas arteriais sanguíneas. Embora seja intuitivo considerar que este controle fosse particularmente sensível ao O_2 – afinal este é o gás fundamental para a respiração celular – o organismo controla mais proximamente o CO_2 ⁽²²⁾. Isto ocorre, provavelmente, porque pequenas variações da PCO_2 podem ter dramáticas conseqüências no pH sistêmico – inclusive no pH do líquor cefalorraquidiano – com repercussões em toda a atividade enzimática corporal.

Portanto, a resposta ventilatória no exercício (volume minuto expirado ou $\dot{V}E$) guarda íntima relação com os próprios determinantes da $PaCO_2$: (i) a taxa metabólica muscular, já que, obviamente, o aumento do volume de CO_2 vindo dos músculos aumentará a $\dot{V}CO_2$; (ii) do ponto médio em que a $PaCO_2$ é controlada pelos centros respira-

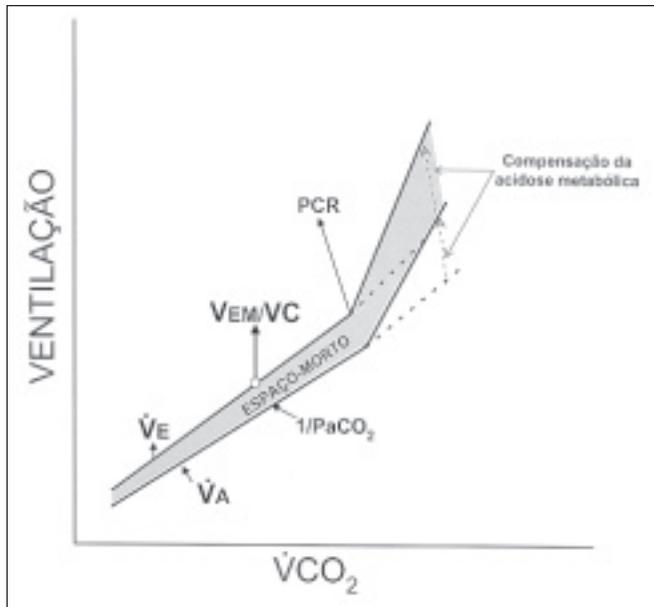


Figura 4 – Os determinantes da resposta ventilatória total (\dot{V}_E) e da ventilação alveolar (\dot{V}_A) ao exercício incremental. A ventilação relaciona-se linearmente com a taxa de liberação de CO_2 (\dot{V}_{CO_2}) até o ponto de compensação respiratória (PCR) à acidose metabólica. A inclinação e o intercepto desta resposta linear serão maiores quanto maior for a ventilação do espaço-morto como fração do volume corrente ($\bar{V}_{\text{EM}}/\text{VC}$) e menor for o ponto-de-ajuste da pressão parcial arterial de CO_2 (PaCO_2).

tórios (ponto-de-ajuste): quanto mais baixa for a PaCO_2 , maior será a ventilação alveolar necessária para mantê-la reduzida; e (iii) da fração do volume de ar inspirado (volume corrente ou VC) que é “desperdiçada” no espaço-morto pulmonar (EM), *i.e.*, da relação $\bar{V}_{\text{EM}}/\text{VC}$. Logo, pode-se dizer que:

$$\dot{V}_E = 863 \dot{V}_{\text{CO}_2} / \text{PaCO}_2 (1 - \bar{V}_{\text{EM}}/\text{VC}) \quad [2]$$

Esta equação demonstra, simplesmente, que a ventilação pulmonar será maior quanto maior a taxa de produção periférica de CO_2 , menor o ponto de ajuste do CO_2 e maior o espaço-morto como fração do volume corrente (**Figura 4**)⁽²³⁾.

A resposta ventilatória não parece ser o principal fator limitante à capacidade de exercício em indivíduos normais - pelo menos em indivíduos não-atléticos, exercitando-se em baixas altitudes. Diversas linhas de evidência corroboram tal raciocínio: por exemplo, a relação entre a ventilação máxima que é atingida no esforço progressivo ($\dot{V}_{\text{E máx}}$) habitualmente é menor do que a maior ventilação que, teoricamente, o indivíduo é capaz de gerar (ventilação voluntária máxima ou VVM) (ver *Valores de Referência*). Adicionalmente, os limites máximo de fluxo e volume não são normalmente atingidos no exercício (**Figura 5**) e, quando solicitados, indivíduos normais comu-

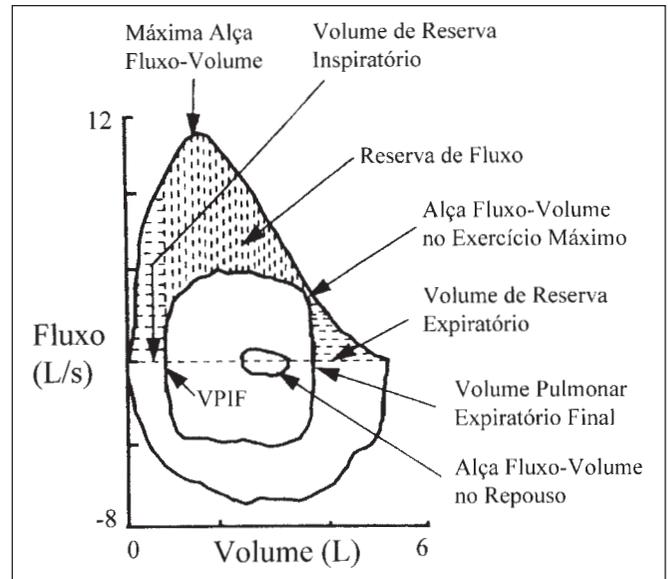


Figura 5 – Relação entre a alça fluxo-volume no pico do exercício e os limites máximos de geração de fluxo para um dado volume – a máxima alça fluxo volume de repouso. Notar a substancial reserva de fluxo e volume ins e expiratórios na atividade máxima: a resposta ventilatória, portanto, não limita a progressão do exercício na maioria dos seres humanos normais.

mente são capazes de aumentar volitivamente o - mesmo no exercício máximo extenuante⁽²⁴⁾.

No intuito de atender as demandas ventilatórias do exercício, a bomba ventilatória pode, teoricamente, utilizar inúmeras combinações entre frequência respiratória (f) e VC. Na prática, entretanto, em condições de exercício máximo, a combinação escolhida aproxima-se de 50-60 incursões respiratórias por minuto (irpm) à 50-60% da capacidade vital (**Figura 6**)⁽²²⁾. A escolha de tal padrão se constitui num compromisso entre os componentes de *stress* fluxo-resistivo e volo-elástico, de tal forma, que o trabalho respiratório total é minimizado dentro dos limites da máxima alça fluxo-volume (**Figura 5**).

Esquemáticamente, duas a três fases podem ser identificadas no padrão de resposta ventilatória ao exercício incremental (**Figura 6**). Na fase inicial, o moderado incremento do faz-se fundamentalmente por um aumento linear do VC até próximo à 70-80% da capacidade inspiratória (ver *Valores de Referência*). Este é um ajuste importante, porque a demanda ventilatória é minimizada pela redução hiperbólica da relação $\bar{V}_{\text{EM}}/\text{VC}$, ou seja, a resposta ventilatória torna-se mais “eficiente” no exercício (**Figura 6**). Tal fenômeno ocorre fundamentalmente pelo incremento do VC e, secundariamente, pela diminuição do \bar{V}_{EM} fisiológico (melhor distribuição topográfica da relação ventilação-perfusão). Estes dois fatores, sobrepõem largamente o discreto aumento do \bar{V}_{EM} anatômi-

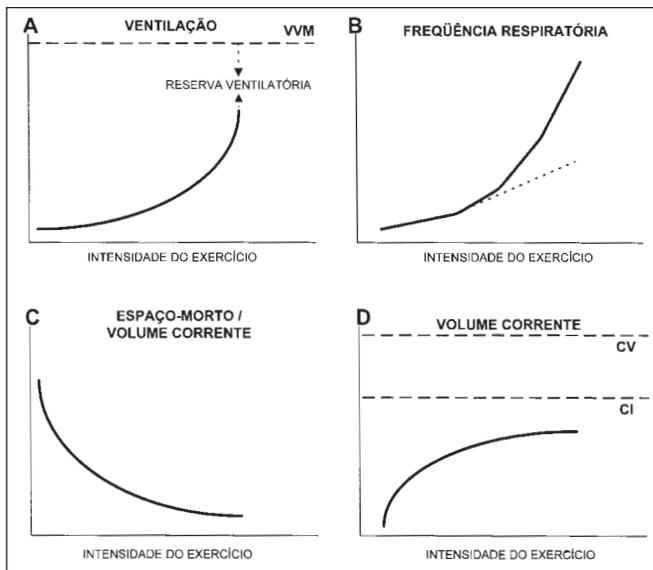


Figura 6 – Representação esquemática das principais respostas ventilatórias normais ao exercício incremental. O aumento curvilíneo da ventilação faz-se inicialmente pelo aumento desproporcional do volume corrente, o que ajuda a reduzir hiperbolicamente a relação deste com o espaço-morto: nos estágios posteriores, a resposta de frequência respiratória torna-se dominante. Notar a presença de reserva ventilatória no pico da atividade, i.e. a ventilação no exercício máximo não atinge a ventilação voluntária máxima (VVM). Baseado na referência 4.

co, decorrente da distensão das vias aéreas com o aumento do VC. Numa fase posterior, o VC atinge um relativo platô com conseqüente aceleração da *f*; em alguns indivíduos, uma terceira fase pode ser ainda evidenciada, com aumento desproporcional da *f* e discreta redução do VC (**Figura 6**). O aumento da *f* faz-se sobretudo pela diminuição do tempo expiratório (*T_e*), com o tempo inspiratório (*T_i*) tendo um comportamento variável. Em linhas gerais, a relação entre o tempo total do ciclo respiratório (TTOT) e o *T_i* (*T_i*/TTOT ou ciclo de serviço) habitualmente aumenta discretamente durante o exercício progressivo (0,4 a 0,5, aproximadamente).

O aumento do VC faz-se em ambas as direções, i.e., tanto pela redução dos volumes de reserva inspiratório quanto expiratório (**Figura 5**). Desta forma, o volume inspiratório final pode atingir até 75-85% da capacidade pulmonar total (CPT) e o volume expiratório final até 40% da CPT. De fato, a regulação do volume pulmonar expiratório final (VPEF) possui importância crítica no exercício. Frequentemente, observa-se uma redução do VPEF (até 0,7-1L em indivíduos jovens) por ação ativa da musculatura expiratória: tal redução otimiza o comprimento diafragmático para o desenvolvimento de força e acumula alguma energia elástica que será providencial para assistir a próxima inspiração^(25,26). Adicionalmente, a redução

do VPEF auxilia a manter os volumes pulmonares operantes dentro da porção linear da relação pressão-volume do sistema respiratório: isto diminui a carga elástica inspiratória, mantendo o volume pulmonar inspiratório final (VPIF) consideravelmente abaixo da CPT (25-15% abaixo) e o fluxo inspiratório geralmente dentro de 75% do fluxo máximo disponível (**Figura 5**)⁽²⁴⁾.

A capacidade de difusão pulmonar (*D_l*) aumenta substancialmente com o exercício, devido, sobretudo, à ampliação da área total da membrana alvéolo-capilar (aumento da perfusão e da ventilação) e do incremento do gradiente pressórico favorável à passagem do O₂ do alvéolo para o capilar (redução da pressão venosa mista de O₂)⁽²⁷⁾. Todavia, o incremento do débito cardíaco implica um menor tempo de contato da hemácia com o ar alveolar (tempo de trânsito): tal fenômeno tende a promover um desequilíbrio difusivo⁽²⁷⁾. Felizmente, ocorre um notável aumento do volume capilar operante – seja por recrutamento de novas unidades ou distensão das unidades já pérvias – minimizando tal desequilíbrio potencial em indivíduos normais⁽²⁷⁾. Logo, apesar de haver um alargamento variável da diferença alvéolo-arterial de O₂, o exercício é caracterizado pela ausência de hipoxemia – pelo menos em indivíduos não-atléticos, exercitando-se em baixas altitudes.

I.3. AJUSTES CARDIOVASCULARES

O fisiologista alemão Adolph Fick aplicou a lei de ação das massas no fluxo corporal de oxigênio, sugerindo que:

$$\dot{V}O_2 = \dot{Q}T \times C(a-v)O_2 \quad [3]$$

onde *QT* é o débito cardíaco (frequência cardíaca x volume de ejeção sistólico ou FC x VES) e *C(a-v)O₂* representa a diferença entre os conteúdos arterial e venoso misto de O₂. Esta relação ilustra o importante conceito de que o *VO₂máx* é diretamente relacionado à magnitude dos ajustes cardiovasculares: são eles, e não os ajustes pulmonares, que efetivamente limitam a capacidade de exercício em seres humanos saudáveis⁽¹⁸⁾.

O incremento linear do *QT* durante o exercício dinâmico (de 5-6L/min no repouso para 20-25L/min no exercício máximo) (**Figura 7**) é admiravelmente proporcional às necessidades de perfusão muscular. A relação *QT-VO₂* possui uma inclinação de aproximadamente 5L/min, a qual não é apreciavelmente modificada com o grau de desempenho atlético do indivíduo – atletas apresentam valores elevados de *QT* máximo, porque ambos, *QT* e *VO₂*, estendem-se adicionalmente.

O aumento do *QT* depende crucialmente da FC: isto é particularmente verdadeiro na posição supina, em que o VES de repouso já se encontra próximo aos valores de exercício (90-120mL). De fato, a FC aumenta quase linearmente com o *VO₂*, embora próximo ao *VO₂máx* alguns

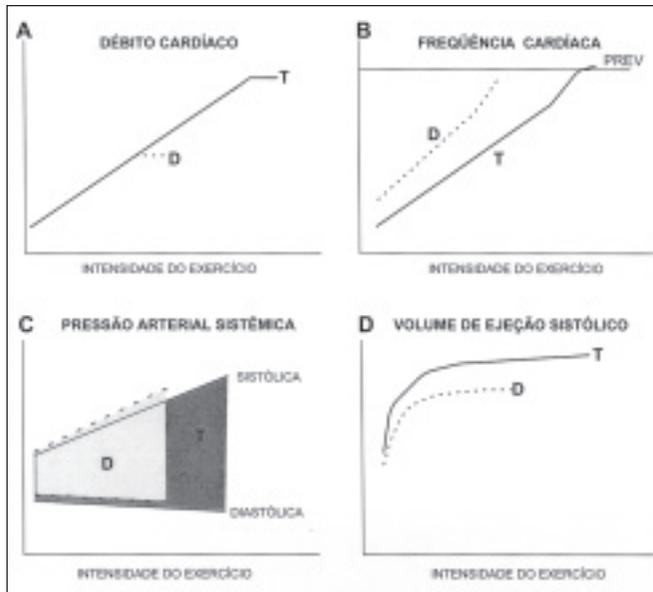


Figura 7 – Representação esquemática das principais respostas cardiovasculares normais ao exercício incremental. O aumento linear do débito cardíaco com o exercício depende fundamentalmente do incremento da frequência cardíaca até o máximo previsto para a idade – já que o volume de ejeção sistólica estabiliza-se precocemente. A pressão arterial sistólica eleva-se com o aumento do débito, mas a vasodilatação arteriolar no leito muscular, ajuda a reduzir a pressão diastólica: portanto, a pressão de pulso aumenta substancialmente no exercício. Abreviaturas: D = destreinado, T = treinado. Baseado na referência 4.

indivíduos apresentem um pseudoplátô (**Figura 7**). A retirada do tônus vagal é capaz de, isoladamente, elevar a FC até próximo a 100bpm⁽²⁸⁾. Acima desta frequência, a contribuição da estimulação β_2 -adrenérgica aumenta linearmente e a contribuição vagal declina exponencialmente – FC acima de 150bpm são produzidas fundamentalmente pelas catecolaminas circulantes. A FC máxima, um determinante importante do $\dot{V}O_{2\text{máx}}$, declina linearmente com a idade, provavelmente pela redução no número e responsividade dos β_2 -adrenoceptores cardíacos e/ou degeneração do tecido de condução⁽²⁸⁾.

O ajuste do VES é tipicamente bifásico, com uma fase de rápido incremento até cerca de 30-40% do $\dot{V}O_{2\text{máx}}$, seguido por um platô, ou ligeiro incremento – mas fisiologicamente importante – em indivíduos treinados (**Figura 7**). O retorno venoso é um importante determinante do VES, regulando o volume diastólico final e a obtenção da distensibilidade miocárdica ideal para a eficiência expulsiva (efeito de Frank-Starling)⁽²⁹⁾. Os efeitos combinados das bombas muscular periférica e abdominotorácica, o incremento da pressão arterial e a venoconstrição (notadamente esplâncnica), ajudam a manter um retorno adequado^(30,31). Paralelamente, a estimulação simpato-adrenérgica aumenta o inotropismo cardíaco, reduzindo o

volume sistólico final e elevando a fração de ejeção⁽³²⁾. O treinamento físico associa-se com o aumento do VES (e da $C(a-v)O_2$) para um determinado valor de $\dot{V}O_2$; desta forma, como a relação $\dot{Q}T-\dot{V}O_2$ é fixa (**Figura 7**), indivíduos treinados tipicamente apresentam menor FC para um dado nível de exigência metabólica, ou seja, $\dot{V}O_2$.

Como seria de se esperar, o fluxo sanguíneo, no exercício, deve ser redirecionado dos territórios esplâncnico-viscerais para os tecidos prementes (*i.e.*, músculo estriado periférico e cardíaco, além da pele, envolvida na termorregulação); todavia, tal redirecionamento deve ocorrer sem prejuízo do fluxo sanguíneo cerebral⁽³³⁾. Portanto, a brutal redução da resistência vascular arteriolar muscular com o exercício, deve ser contrabalançada pela vasoconstrição simpática em outros sítios. Assim, a pressão arterial sistólica no exercício máximo eleva-se linearmente até valores próximos a 180-200mmHg, enquanto a pressão diastólica mantém-se estável – ou mesmo declina discretamente (**Figura 7**). A pressão capilar sistêmica média eleva-se de 15-20mmHg para 25-35mmHg, com o fluxo capilar, sendo também incrementado pelo aumento local da osmolaridade. Notavelmente, a pressão arterial pulmonar média situa-se abaixo de 15mmHg em indivíduos jovens – consequência direta da elevada reserva de capilares a serem perfundidos e da notável distensibilidade do leito vascular pulmonar^(17,33).

I.4. RESPOSTAS SUBJETIVAS AO ESFORÇO

As sensações de desconforto muscular (ou dor) e cansaço geral (fadiga) são habitualmente referidas como os principais “sintomas” que limitam a progressão da atividade em indivíduos normais não-treinados⁽¹⁷⁾. Na realidade, isto poderia ser antecipado, considerando-se a importância dos aspectos cardiovasculares/musculares em fisiologicamente limitar a progressão da atividade. Todavia, os fatores orgânicos desencadeantes de tais sensações são extremamente complexos, podendo variar de acordo com a idade, sexo, nível de atividade física, perfil psicológico e tipo de atividade⁽³⁴⁾. As informações aferentes a partir de receptores musculotendíneos de tensão e estiramento (Golgi), informações cinestésicas e proprioceptivas e de stress térmico são todas integradas e apreciadas de acordo com a experiência prévia do indivíduo. Entretanto, a sensação secundária de esforço respiratório (ou mesmo desconforto) também é comum, principalmente no exercício intenso. Em indivíduos normais, a noção de respiração laboriosa guarda boa relação com a taxa ventilatória total e diversos índices da intensidade do comando neural e do trabalho muscular respiratório⁽³⁵⁾.

O esforço percebido aumenta numa função exponencial, tanto em relação à potência aplicada (expoente de 2,13), quanto à duração do esforço (expoente de 0,39)⁽³⁶⁾. Durante um teste de exercício incremental, por exemplo,

estas sensações, antes de se elevarem exponencialmente, parecem apresentar um limiar de surgimento. Diversos estudos demonstraram que em indivíduos livres-de-doença, as sensações de esforço percebido e desconforto respiratório são consistentemente maiores em mulheres, variando inversamente com a dimensão corpórea e diretamente com a idade⁽³⁷⁾.

PARTE II. TESTE DE EXERCÍCIO CARDIOPULMONAR

II. 1. INDICAÇÕES CLÍNICAS

A análise do TECP deve ser sempre realizada à luz da indagação clínica subjacente à indicação do teste, o que pressupõe uma avaliação conjunta da história clínica e dos exames complementares pertinentes. Desta forma, a questão clínica imediata à solicitação do teste deve permear todo o processo de análise dos resultados do TECP.

Adicionalmente, como em qualquer outro teste com pretensões diagnósticas e prognósticas, é fundamental certificar-se de que as condições técnicas foram ideais e a

colaboração do examinado foi adequada. O próximo passo é assegurar-se de que os dados são confiáveis e os valores obtidos são consistentes (ver *Calibração e Controle de Qualidade*). Posteriormente, deve-se apresentar os valores tanto da forma gráfica quanto tabular (ver *Apresentação dos Resultados*), analisando-os em conjunto. De fato, a apreciação dos resultados do TECP depende, mais do que em qualquer outro procedimento propedêutico, de uma análise integrada: nenhum parâmetro ou variável do teste pode ser visto separadamente do todo. Apenas após a observação destes pressupostos básicos, deve-se tentar alcançar conclusões válidas sobre os dados obtidos^(1,2,4,9,10).

As diversas aplicações clínicas do TECP (**Quadro I**) e sua estratégia básica de interpretação em cada situação específica serão delineadas abaixo. As recomendações apresentadas foram formuladas nas evidências atualmente disponíveis. Infelizmente, grande parte destas evidências são provenientes de estudos clínicos não-randomizados, pequenos estudos observacionais ou estudos experimentais fisiológicos. Não obstante essas limitações, o presente

QUADRO I Indicações clínicas do Teste de Exercício Cardiopulmonar
A. Avaliação da presença e etiologia da intolerância ao esforço Investigação da dispnéia crônica de origem indeterminada Discriminação dos mecanismos proponderantes em indivíduos com múltiplas causas possíveis
B. Quantificação da intolerância ao esforço na doença cardiorrespiratória
C. Avaliação da indicação e resposta a intervenções terapêuticas Drogas com ação cardiovascular e/ou pulmonar Oxigenioterapia
D. Análise prognóstica Insuficiência Cardíaca Crônica Doença Respiratória Crônica
E. Risco pré-operatório e avaliação pós-operatória Cirurgia torácica ressectiva Cirurgia redutora do volume pulmonar Cirurgia abdominal alta ou eletiva de grande porte
F. Transplante cardíaco Indicação Avaliação longitudinal pós-transplante
G. Transplante pulmonar e cardiopulmonar Avaliação da tolerância ao exercício pré- e pós-transplante Indicação
H. Prescrição e acompanhamento de treinamento físico Reabilitação Cardiovascular Reabilitação Pulmonar
I. Diagnóstico da broncoconstrição induzida pelo exercício
J. Quantificação da intolerância ao esforço na doença pulmonar ocupacional Avaliação da disfunção e incapacidade

documento evitou expressamente a apresentação de recomendações não baseadas na literatura publicada.

Baseado nestas evidências, portanto, o seguinte esquema foi utilizado para classificar a validade clínica da utilização ou não do teste:

- **classe I:** quando as evidências atuais, advindas de estudos randomizados ou não, indicam claramente que o TECP é de utilidade clínica;

- **classe II:** quando as evidências publicadas ainda não são suficientes para se obter uma conclusão clara da utilidade clínica do TECP.

DIAGNÓSTICO DIFERENCIAL DA INTOLERÂNCIA AO ESFORÇO

- **classe I**

Investigação da dispnéia crônica de origem indeterminada

O TECP deve ser entendido como um direcionador precoce da linha de investigação diagnóstica destes pacientes. Neste contexto, o teste deve ser a alternativa imedia-

tamente posterior à avaliação clínica, radiográfica, espirométrica e eletrocardiográfica de repouso. Tal conduta justifica-se também em termos de contenção de custos e limitação dos riscos por possível investigação invasiva desnecessária^(1,2,9,10). O teste é particularmente útil para (i) diferenciar dispnéia de origem cardiovascular de dispnéia de etiologia pulmonar; (ii) identificar componente circulatório insuspeito; e (iii) apontar componente psicogênico ou comportamental. O TECP parece não permitir uma diferenciação segura da limitação circulatória da periférica (descondicionamento)⁽³⁸⁻⁴²⁾.

A estratégia mais adequada para a separação das diferentes causas da intolerância ao esforço é a da classificação sindrômica dos distúrbios (**Quadro II**). Desta forma, enquanto estudos prospectivos não fornecerem a razão de probabilidade para as diferentes variáveis – ou grupo de variáveis – em identificar doenças cardiorrespiratórias específicas, a análise deve centrar-se na classificação sindrômica recomendada no **Quadro II**. Deve-se notar a importância da análise conjunta das diversas variáveis, sem-

QUADRO II Principais padrões fisiopatológicos de limitação ao esforço em resposta ao TECP incremental*						
	Distúrbio circulatório	Destreinamento (dist. periférico)	Distúrbio ventilatório	Distúrbio na troca gasosa pulmonar	Ansiedade/hiperventilação	Subesforço
$\dot{V}O_2$ máx	↓ ou ↔	↓ ou ↔	↓ ou ↔	↓ ou ↔	↓ ou ↔	↓ ou ↔
θL	↓↓	↓	↔ ou ↓	↔ ou ↓	↔	↔
$\Delta\dot{V}O_2/\Delta\dot{W}$	↓↓	↓	↔ ou ↓	↔ ou ↓	↔	↔
PuO_2 máx	↓↓, com platô precoce	↓	↓	↓	↔	↔
$\Delta FC/\Delta\dot{V}O_2$	↑↑	↑ ou ↔ (mas desviado para cima)	↔ (mas desviado para cima)	↑ ou ↔ (mas desviado para cima)	↔	↔
RFC	Variável, habitualmente ↓ ou ϕ	Variável	↑↑	Variável, habitualmente ↓	↔	↑
R $\dot{V}E$	↔ ocasionalmente ↑	↔	↓↓ ou ϕ	↔ ou ↓	↔ ou ↓	↑
Máx <i>f</i>	↔	↔	↔ ou ↑	↑↑	↑	↔ ou ↓
$\Delta VC/\Delta \ln \dot{V}E$	↔ ou ↓	↔	↓	↓↓	↓	↔
VC/CI	↔	↔	↔ ou ↑	↑ (distúrbio restritivo)	↔	↔ ou ↓
$\Delta \dot{V}E/\Delta \dot{V}CO_2$	↔ ou ↑	↔	↑↑	↑↑	↑	↔
SaO_2/PaO_2	↔	↔	Variável	↓↓	↔	↔
Sintoma limitante	Variável	Dor muscular	Dispnéia	Dispnéia	Dispnéia	Variável

Definição das abreviações: máx: referente ao exercício máximo, $\dot{V}O_2$: consumo de oxigênio, θL : limiar de lactato estimado, \dot{W} : taxa de trabalho ou potência, FC: frequência cardíaca, PuO_2 : pulso de oxigênio, $\dot{V}E$: volume minuto expirado, RFC = reserva cronotrópica, R $\dot{V}E$ = reserva ventilatória, *f*: frequência respiratória, VC: volume corrente, \ln = logaritmo natural, CI: capacidade inspiratória, $\dot{V}CO_2$: liberação de dióxido de carbono, SaO_2 = saturação da oxi-hemoglobina, PaO_2 : pressão parcial de oxigênio no sangue arterial.
Baseado na referência 4. ↑ = aumentado, ↓ = diminuído, ϕ = ausente, ↔ = inalterado.

pre à luz do contexto clínico específico. Especificamente, deve-se evitar o uso de “algoritmos” para a análise do TECP: não raramente, tais estratégias induzem a conclusões inadequadas e precipitadas.

• classe II

Diagnóstico diferencial da intolerância ao esforço em pacientes com múltiplas causas possíveis

Nestes casos, é provável que o teste também guie os esforços investigativos posteriores: faltam, entretanto, estudos prospectivos envolvendo número suficiente de pacientes. O TECP pode ser diagnóstico em algumas situações específicas, tais como: (i) presença de forame oval patente, com desenvolvimento de *shunt* direito-esquerdo durante o exercício, (ii) identificação de doença pulmonar vascular oclusiva sem hipertensão pulmonar e (iii) auxiliar na identificação de disfunção diastólica na insuficiência cardíaca crônica⁽²⁾.

DETERMINAÇÃO OBJETIVA DA TOLERÂNCIA AO ESFORÇO EM PACIENTES COM DOENÇAS CARDIORRESPIRATÓRIAS

• classe I

O TECP é substancialmente mais acurado e sensível do que os testes de repouso em determinar o impacto funcional das alterações fisiológicas de repouso⁽⁴³⁻⁴⁶⁾. Desta forma, a determinação do nível de incapacidade pode ser útil no manuseio, prognóstico e acompanhamento longitudinal de diversas condições cardiorrespiratórias.

INDICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE CONDUTAS TERAPÊUTICAS

• classe I

Indicação do uso e respostas a drogas com ação cardiovascular e/ou pulmonar

Diversos estudos demonstraram que o TECP é particularmente útil para determinar a necessidade e os efeitos de diversos medicamentos com atividade nos sistemas cardiovascular e/ou respiratório⁽⁴⁷⁻⁵²⁾. Neste contexto, o teste é clinicamente mais atraente do que os testes hemodinâmicos invasivos.

O teste de exercício também pode ser particularmente útil na indicação e avaliação do efeito de oxigenoterapia⁽⁵³⁻⁵⁵⁾. Nestes casos, entretanto, a análise do ar expirado pode não ser realizada por dificuldades técnicas na mensuração correta das variáveis metabólicas.

AVALIAÇÃO PROGNÓSTICA

• classe I

Avaliação prognóstica de pacientes com insuficiência cardíaca crônica

A tolerância ao exercício dinâmico é um fator prognóstico bem estabelecido na insuficiência cardíaca crônica⁽⁵⁶⁻⁵⁹⁾. A grande maioria dos estudos publicados utilizou

o $\dot{V}O_2$ no limite da tolerância de um teste incremental ($\dot{V}O_{2LS}$) como índice prognóstico – assumindo este como sendo equivalente ao $\dot{V}O_{2m\acute{a}x}$. Entretanto, o $\dot{V}O_{2LS}$ deve ser interpretado com cuidado em pacientes: valores espúrios podem ser obtidos caso não se certifique de que a interrupção do esforço não se deveu a fatores outros que limitação cardiovascular “central”⁽⁶⁰⁾. Adicionalmente, deve-se analisar com muita cautela os valores de $\dot{V}O_{2m\acute{a}x}$ corrigidos para o peso corporal, principalmente em obesos⁽⁶¹⁾. Similarmente, deve-se evitar a correção do $\dot{V}O_{2m\acute{a}x}$ pelo peso em atividades sem deslocamento da massa corpórea total (cicloergometria): nestas circunstâncias, a capacidade máxima de exercício ($\dot{V}O_{2m\acute{a}x}$ em mL/min/kg) pode ser grosseiramente subestimada⁽⁶²⁾. Tais considerações acerca do $\dot{V}O_{2m\acute{a}x}$ devem ser estendidas para os tópicos abaixo.

Os estudos publicados até o momento foram praticamente unânimes em considerar o $\dot{V}O_{2m\acute{a}x}$ como de importância prognóstica relevante. De fato, a classificação funcional de Weber^(56,63), baseada no $\dot{V}O_{2m\acute{a}x}$ e no limiar de lactato estimado, tem ampla aplicabilidade prognóstica e, embora sujeita a restrições, tem sido utilizada na prática por duas décadas. Todavia, é altamente improvável que um parâmetro isolado reúna toda a informação prognóstica necessária: o $\dot{V}O_{2m\acute{a}x}$ deve, portanto, ser analisado em conjunto com outros elementos clínicos e laboratoriais.

Embora diversos pontos-de-corte tenham sido sugeridos como indicadores prognósticos (e.g. $\dot{V}O_{2m\acute{a}x} < 10\text{mL}/\text{min}/\text{kg}$ ⁽⁶⁴⁾, $< 14\text{mL}/\text{min}/\text{kg}$ ⁽⁵⁷⁾, $< 50\%$ do previsto^(65,66) ou $< 60\%$ do previsto⁽⁶⁷⁾), dados recentes sugerem que o $\dot{V}O_{2m\acute{a}x}$ deva ser considerado como uma variável contínua em modelos de predição multivariada⁽⁵⁹⁾.

Recentemente, novas evidências demonstram que outras variáveis obtidas no TECP também apresentam elevado valor prognóstico, tais como inclinação aumentada da relação entre a variação de ventilação relacionada à demanda metabólica ($\Delta\dot{V}E/\Delta\dot{V}CO_2$)^(68,69) (ver *Variáveis e Parâmetros de Relevância Clínica*) e a presença de oscilação ventilatória durante o esforço⁽⁷⁰⁾.

• classe II

Avaliação prognóstica de pacientes com doença pulmonar crônica

Embora o TECP possa, teoricamente, ser útil nas avaliações prognósticas de pacientes com doença pulmonar crônica, poucos estudos analisaram sistematicamente este aspecto em doenças intersticiais pulmonares^(71,72) e na DPOC⁽⁷³⁻⁷⁵⁾. Portanto, ainda são necessários mais estudos prospectivos para se obter uma idéia precisa do valor clínico do TECP em prever a evolução de pacientes com doença pulmonar avançada.

RISCO PRÉ-OPERATÓRIO E AVALIAÇÃO PÓS-OPERATÓRIA

• classe I

Avaliação pré-operatória de pacientes submetidos à cirurgia torácica ressectiva

Diversos estudos demonstraram que parâmetros derivados do TECP, particularmente o $\dot{V}O_2$ máx, constituem-se em previsores importantes de morbidade e mortalidade pós-operatórias na toracotomia com ressecção⁽⁷⁶⁻⁸³⁾. O TECP **não** deve ser rotineiramente realizado em pacientes com risco funcional baixo (por exemplo, VEF_1 e/ou $D_LCO > 60\%$ ⁽⁸⁴⁾ ou, principalmente, $> 80\%$ do previsto⁽⁸³⁾): nestes pacientes, não existem evidências de que o TECP traga informações prognósticas úteis. Entretanto, a hierarquia na solicitação das avaliações adicionais (cintilografia de perfusão ou TECP, por exemplo) é ainda discutível: enquanto alguns grupos utilizam a cintilografia antes do TECP⁽⁸⁴⁾, outros realizam primeiro o TECP⁽⁸¹⁾. Parece claro, todavia, que a maioria dos autores preconiza o TECP quando o VEF_1 previsto pós-operatório (VEF_1 PPO) sugira a classificação do paciente como de alto-risco, *i.e.*, VEF_1 PPO $< 0,8L$ ou $< 40\%$ do previsto.

Em similaridade com a avaliação prognóstica para a insuficiência cardíaca, diversos pontos-de-corte baseados no $\dot{V}O_2$ máx foram sugeridos como indicadores de risco cirúrgico aumentado e/ou baixa capacidade funcional pós-operatória: $< 10mL/min/kg$ ⁽⁷⁸⁾, $< 15mL/min/kg$ ⁽⁷⁷⁾, $< 50\%$ do previsto⁽⁸⁵⁾ ou $< 60\%$ do previsto⁽⁸²⁾. Dados mais recentes indicam que o uso do $\dot{V}O_2$ máx previsto pós-operatório⁽⁸⁶⁾ também pode trazer importante informação prognóstica, assim como a D_LCO durante o exercício⁽⁸⁷⁾.

Por outro lado, deve-se observar que estimativas clínicas do “risco cardiopulmonar”⁽⁸⁸⁾ ou testes mais simples^(89,90) também se mostraram úteis. Recente revisão do tópico, entretanto, recomenda que o TECP deva fazer parte obrigatória da avaliação dos pacientes considerados de risco de acordo com o VEF_1 PPO⁽⁹¹⁾.

Avaliação pós-operatória longitudinal de pacientes submetidos à cirurgia redutora de volume pulmonar

O TECP tem sido amplamente utilizado para a determinação objetiva do impacto funcional da cirurgia redutora de volume⁽⁹²⁻⁹⁶⁾. Neste contexto, o TECP parece ser mais sensível que as avaliações funcionais de repouso, fornecendo informações úteis acerca das alterações fisiológicas longitudinais associadas à cirurgia.

Avaliação integrada do impacto funcional de cirurgia torácica

O TECP pode determinar, com maior acurácia e sensibilidade do que a avaliação clínica e funcional de repouso, o impacto da toracotomia com ressecção na tolerância ao esforço⁽⁹⁷⁻⁹⁹⁾.

• classe II

Risco pré-operatório em cirurgia abdominal alta ou cirurgia abdominal eletiva de grande porte

Alguns estudos demonstraram que o $\dot{V}O_2$ máx pode ser útil em definir risco cirúrgico elevado em pacientes selecionados submetidos a cirurgia abdominal alta, mesmo que eletiva, principalmente quando de grande porte^(100,101). Entretanto, outros estudos prospectivos são ainda necessários antes da generalização destes achados.

TRANSPLANTE CARDÍACO

• classe I

Indicação de transplante cardíaco

O $\dot{V}O_2$ máx tem sido largamente utilizado como parâmetro central para a indicação de transplante cardíaco (T_x)^(46,57,59,64,102-104). Como esperado, os mesmos pontos-de-corte indicadores de prognóstico reservado têm sido sugeridos como indicativos de T_x (ver acima). De fato, a XXIV Conferência de Bethesda em Transplante Cardíaco⁽⁶⁴⁾ sugeriu que pacientes com $\dot{V}O_2$ máx abaixo de $10mL/min/kg$ ou com alto risco clínico de morte súbita (isquemia e retenção fluidica intratáveis e arritmias ventriculares sintomáticas) devam ser aceitos como candidatos ao T_x . Na ausência destes achados clínicos e com $\dot{V}O_2$ máx $> 15mL/min/kg$, o T_x poderia ser postergado. Como citado acima, outros autores sugerem outros pontos-de-corte, enquanto estudos mais recentes questionam a própria existência de um ponto-de-corte absoluto para todos os pacientes⁽⁵⁹⁾. Outras variáveis baseadas no TECP podem também ser úteis, tais como a $\Delta VE/\Delta VCO_2$ ⁽⁶⁸⁾.

Portanto, embora o $\dot{V}O_2$ máx – quando realmente representativo dos limites máximos da reserva funcional cardiorrespiratória – tenha um papel crucial para a indicação de T_x cardíaco, persiste vívida controvérsia acerca dos valores indicativos de T_x . Neste sentido, é provável que o $\dot{V}O_2$ máx seja melhor utilizado como variável contínua em modelos preditivos multivariados.

• classe II

Avaliação longitudinal pós-transplante

Embora o seguimento longitudinal pós- T_x com o TECP tenha o potencial de produzir informações clinicamente relevantes⁽⁴⁶⁾, faltam estudos controlados acerca do seu valor quando comparado com a avaliação clínico-funcional de repouso – principalmente em termos da relação custo-benefício.

TRANSPLANTE PULMONAR E CARDIOPULMONAR

• classe I

Avaliação da tolerância ao exercício pré- e pós-transplante

O TECP determina objetivamente a tolerância ao exercício em pacientes com doença pulmonar avançada, po-

dendo ser auxiliar na indicação de Tx. O teste tem sido também utilizado no seguimento clínico pós-Tx⁽¹⁰⁵⁻¹¹⁰⁾, principalmente para a quantificação objetiva dos ganhos clínicos com o procedimento e determinação dos mecanismos residuais de limitação.

• **classe II**

Indicação de transplante

Embora o TECP possa, teoricamente, ser útil na indicação do Tx pulmonar⁽¹⁰⁶⁾ – em similaridade com o Tx cardíaco – faltam estudos controlados comprobatórios, envolvendo um número substancial de pacientes.

PRESCRIÇÃO E ACOMPANHAMENTO DE REABILITAÇÃO PULMONAR

• **classe I**

O teste de exercício incremental pré-reabilitação pode ser especialmente adequado para guiar a intensidade de treinamento, baseada esta na frequência cardíaca, carga ou intensidade de sintomas⁽¹¹¹⁻¹¹³⁾. Embora a mensuração metabólica e ventilatória não seja essencial, o TECP pode estabelecer com maior exatidão os mecanismos de limitação, permitindo uma abordagem de treinamento individualizada. O treinamento ao nível do limiar de lactato estimado (θ L) parece ser particularmente eficaz^(114,115); entretanto, não existem evidências claras de que o treinamento nesta intensidade seja superior a outras estratégias mais simples. Em pacientes com doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC), o θ L ocorre caracteristicamente mais próximo do $\dot{V}O_2$ máx do que em indivíduos normais; todavia, não é possível estimar clinicamente esta intensidade sem a realização do TECP e determinação direta do θ L⁽¹¹⁶⁾.

BRONCOPROVOCAÇÃO PELO ESFORÇO

• **classe II**

As evidências disponíveis indicam que para o diagnóstico e quantificação adequados da broncoconstrição induzida pelo exercício (BIE), um teste de exercício específico (ver **Quadro IV** e *Protocolos de Carga Constante*) deve ser realizado^(1,117). Embora as medidas metabólicas e ventilatórias não sejam cruciais, o TECP permite a mensuração precisa do stress ventilatório trazido pelo teste: tais dados podem ser úteis na análise do teste e no seguimento longitudinal dos pacientes^(1,117).

DETERMINAÇÃO DE DISFUNÇÃO E INCAPACIDADE NA DOENÇA PULMONAR OCUPACIONAL

• **classe I**

A indicação precípua do TECP envolve as situações nas quais a avaliação de repouso é inconclusiva ou há discordância entre as queixas clínicas e os testes de repouso, incluindo as alterações radiológicas⁽¹¹⁸⁻¹²⁰⁾. Neste contexto, o TECP adiciona elementos importantes na acurácia da quantificação da incapacidade, tanto quantitativa quanto qualitativamente, *i.e.*, definindo os mecanismos reais de limitação ao esforço^(1,121,122).

Neste sentido, diversos esquemas classificatórios, baseados no $\dot{V}O_2$ máx, foram propostos – incluindo uma classificação desenvolvida no nosso meio^(118-120,123). O $\dot{V}O_2$ máx deve ser expresso em valores absolutos (L/min, evitando-se o uso de mL/min/kg no caso da cicloergometria) quando o intuito for o de definir a capacidade atual de exercício. Nesta situação, deve-se tentar comparar os valores máximos com as demandas metabólicas estimadas da atividade, sabendo-se que indivíduos normais podem suportar confortavelmente atividades prolongadas a 40% do máximo (eventualmente períodos curtos a 60%)⁽¹⁷⁾. En-

<p align="center">QUADRO III Características de interesse clínico dos dois principais tipos de ergômetros utilizados para o TECP*</p>		
Característica	Bicicleta ergométrica	Esteira ergométrica
Maior $\dot{V}O_2$ máx		+
Maior estresse ventilatório e cardiovascular		++
Familiaridade com o tipo de exercício		++
Quantificação exata da potência	++	
Segurança	++	
Menos artefatos e melhor qualidade dos sinais	++	
Facilidade na obtenção de amostras sanguíneas	+	
Mais compacto e silencioso	+	
Menos caro	+	

* ++ = vantagem de importância relevante, + = vantagem de importância secundária.

tretanto, pacientes com doença respiratória podem tolerar frações mais elevadas do máximo atingido – mesmo acima de 80%. Por outro lado, a perda da capacidade aeróbia – que pode ser importante para a compensação trabalhista – é melhor analisada com o $\dot{V}O_2$ máx expresso em % do previsto⁽⁶²⁾.

II.2. ERGÔMETROS

Entre as diversas modalidades de ergometria disponíveis (bicicleta, esteira, escada, caiaque, ergometria de

membros superiores) somente as duas primeiras são comumente utilizadas para o TECP, notadamente por razões técnico-operacionais, nível de padronização e adequado *stress* sistêmico. As considerações acerca das vantagens e desvantagens da bicicleta e da esteira (**Quadro III**) devem ser vistas à luz da experiência individual e das necessidades práticas de cada laboratório. Indubitavelmente, o “melhor” ergômetro é aquele no qual o indivíduo a ser testado sinte-se seguro e confortável, e que o investigador esteja familiarizado com o padrão de respostas esperado.

QUADRO IV Critérios técnico-operacionais e interpretativos do teste de avaliação da broncoconstrição induzida pelo exercício (BIE)^(1,117)	
Cuidados pré-teste	Ausência de exercício intenso no dia do teste; quadro infeccioso de vias aéreas > 6 semanas; evitar café, chá, chocolate ou corticóides (se possível) no dia do teste $VEF_1 > 75\%$ do previsto ou > 80% do indivíduo e reprodutível (< 10% variação); $SaO_2 > 94\%$
Suspensão da medicação	6-8hs = β_2 -agonista de curta duração inalatório, cromoglicato 12hs = teofilina oral, β_2 -agonista de curta duração oral 24hs = ipratrópium, β_2 -agonista de longa duração oral, antileucotrienos 48hs = nedocromil, β_2 -agonista de longa duração inalatório 48hs = hidroxizina, cetirizina
Segurança	Afastar contra-indicações para o exercício (Quadro VI); monitorar pelo menos SaO_2 e ECG (principalmente em idosos)
Tipo de exercício	Bicicleta estacionária, esteira ergométrica ou corrida livre (difícil padronização). Embora o estresse ventilatório seja maior com a esteira, a bicicleta pode produzir resultados práticos equivalentes
Protocolo	Duração: 4-6 minutos sustentados na intensidade-alvo (tempo total de teste entre 7-9 minutos). Introduzir carga alvo gradativamente em, no máximo, 3 minutos. <i>Intensidade:</i> 80-90% da $FC_{máx}$ prevista (e.g. 220-idade) ou $\dot{V}E/VVM$ entre 0,4-0,6. Idealmente, deve-se mensurar a ventilação; caso não disponível, pode-se estimar a carga necessária para se atingir a $\dot{V}E$ alvo como: (i) $\dot{V}O_2$ (L/min) = (0,01 x carga) + 0,5, sendo $\dot{V}E$ (L/min) = 28 x $\dot{V}O_2$ (L/min) + 0,27 ou (ii) carga alvo (W) = (53,76 x VEF_1) - 11,07. <i>Ar inspirado:</i> ar comprimido seco, se possível; ar ambiente respirado com <i>clips</i> nasal, apresentando < 10mg% de água, umidade relativa < 50% e temperatura < 25°C; ar frio somente se representativo das condições ambientais usuais.
Medidas pós-teste	VEF_1 5, 10, 15, 20 e 30min pós-teste (eventualmente, iniciar após 1 ou 3min).
Interpretação	ΔVEF_1 ($VEF_{1,pré} - VEF_{1,pós} / VEF_{1,pré}$ x 100) > 10% = anormal; > 15% = diagnóstico de BIE; 15% < e < 25% = leve; 25% < e < 50% = moderado; > 50% = grave.
Cuidados pós-teste	Realizar rápida recuperação ativa (1-2 minutos de exercício); recuperação espirométrica espontânea ou com medicação; avaliar necessidade de O_2 suplementar; documentar retorno à normalidade ($VEF_1 < 10\%$ do valor pré-teste).
Definição das abreviações: VEF_1 = volume expiratório forçado no 1º segundo da capacidade vital; SaO_2 = saturação da oxihemoglobina; ECG = eletrocardiograma; $\dot{V}O_2$ = consumo de oxigênio, $\dot{V}E$ = volume minuto expirado, VVM = ventilação voluntária máxima.	

Cicloergometria

A bicicleta ergométrica, quando comparada à esteira, geralmente é menos cara, mais compacta, silenciosa e segura, além de ocasionar menor movimentação do tronco e membros superiores – aspecto de considerável importância na obtenção das variáveis, incluindo a medida da pressão arterial (**Quadro III**). Sua maior vantagem, entretanto, reside na mensuração precisa da relação potência aplicada-demanda metabólica, principalmente se o simples trabalho para mover os pedais é descontado^(15,124). Como potenciais desvantagem da cicloergometria, poder-se-ia citar inicialmente que alguns indivíduos podem apresentar uma estratégia de desempenho acentuadamente pobre – geralmente porque não estão habituados a pedalar – o que pode dificultar sobremaneira o seu uso, notadamente em idosos. Similarmente, o desconforto trazido pelo selim pode ser substancial, além da ocorrência frequente de dores lombares ou articulares (por exemplo, joelho em pacientes com osteoartrose) em testes prolongados – um selim especial, de dimensões maiores e com encosto baixo, é altamente desejável para obesos. Torna-se importante, ainda, selecionar cuidadosamente a altura do selim: (i) inicialmente com o paciente em pé, quando o selim deve ficar ao nível da raiz da coxa e (ii) com o paciente sentado, quando os membros inferiores devem ficar quase completamente estendidos no ponto mais distal de excursão dos pedais (ângulo perna-coxa de aproximadamente 5°-15°). Deve-se, obviamente, confirmar com o paciente se a posição lhe é confortável.

Esteira ergométrica

No exercício realizado na esteira, a taxa de trabalho ou potência depende teoricamente da massa corporal total sob ação da gravidade (peso), da velocidade (trabalho horizontal) e da inclinação (trabalho vertical). De fato, é aqui que reside a sua grande desvantagem quando comparada com a bicicleta (**Quadro III**): a potência, na realidade, não pode ser acuradamente medida na esteira, já que esta depende também da estratégia da marcha (tamanho e frequência das passadas, equilíbrio, grau de movimentação dos membros, etc.) e do nível de suporte externo. Desta forma, as estimativas indiretas do $\dot{V}O_2$ (usualmente expressas em múltiplos do consumo basal – MET – sendo 1 MET = 3,5mL/min/kg) são particularmente inacuradas na esteira. Isto é ainda mais verdadeiro quando se considera que o custo metabólico de correr em baixa velocidade (*jogging*) é muito maior do que andar rapidamente na mesma velocidade, além de existir um largo salto no dispêndio energético quando se passa da marcha para a corrida⁽¹⁷⁾.

A esteira ergométrica, entretanto, possui a vantagem de exigir maior demanda metabólica (o $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ é 6-11% maior do que na bicicleta) (**Quadro III**) e, possivelmente,

maior *stress* cardíaco (importante na detecção de isquemia) e ventilatório (útil na avaliação da BIE). Adicionalmente, pode-se argumentar que a marcha, e não o ciclismo, seja a atividade inerente aos seres humanos – mesmo aos mais sedentários. Todavia, deve-se observar que quase todos os pacientes, e até alguns atletas, necessitam de um tempo considerável de familiarização com a esteira: na realidade, muitos deles podem interromper o teste precocemente quando altas velocidades ou grandes inclinações são atingidas. Adicionalmente, esteiras são mais caras, imóveis e volumosas, e a mensuração metabólica (nível de variabilidade nos dados ou “ruído”) é apreciavelmente maior do que o observado na bicicleta. Como complicador adicional, a aferição da pressão arterial pelo método auscultatório pode ser particularmente difícil.

II.3. PROTOCOLOS

A caracterização das respostas ao TECP pode ser obtida com dois tipos básicos de protocolo: (i) *incremental*, com aumento progressivo da carga em períodos predeterminados e (ii) de *carga constante* ou onda quadrática, em que a carga é mantida estável por um tempo fixo definido previamente, ou sustentada até o limite da tolerância (*endurance*). A escolha do protocolo depende, em última análise, do objetivo do teste, ou seja, da(s) pergunta(s) a ser(em) respondida(s).

Protocolos incrementais

Existem diversas opções de protocolos incrementais em esteira: embora o de Bruce⁽¹²⁵⁾ seja mais utilizado para a detecção de doença arterial coronariana, sua maior desvantagem para o TECP reside nas súbitas e intensas variações do nível de *stress* metabólico. Tais variações dificultam sobremaneira a padronização das respostas e induzem a exageradas variações no esforço despendido. As alternativas mais utilizadas para o TECP clínico em esteira são: (i) protocolo de Balke⁽¹²⁶⁾ modificado: velocidade constante (2-3mph) com incrementos iguais de inclinação (1 a 2,5%) a cada 1 ou 2 minutos - em pacientes, a velocidade ideal (marcha acelerada) deve ser atingida gradualmente em 2 a 3 minutos, ou (ii) protocolo de Weber⁽³⁾, o qual envolve aumentos suaves de velocidade e inclinação (**Figura 8**).

No caso da utilização de cicloergômetros, os incrementos podem ser: (i) rápidos (a cada 1-3 minutos), tanto continuamente – “rampa” – (**Figura 9**) ou em incrementos súbitos em “degraus”, ou (ii) lentos, ou seja, a cada 3 minutos ou mais, em “degraus”. Protocolos rapidamente-incrementais do tipo rampa parecem originar os melhores resultados para o TECP; todavia, protocolos em degraus de até dois minutos produzem respostas virtualmente indistinguíveis dos testes em rampa⁽¹²⁷⁾. Observar, entretanto, que nos protocolos do tipo “rampa” – nos

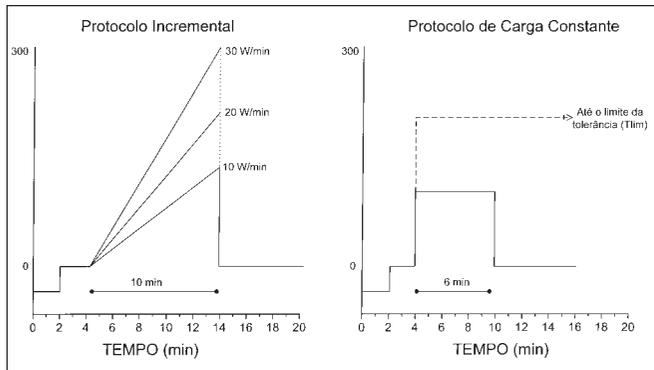


Figura 8 – Protocolos cicloergométricos para o TECP no contexto clínico. No protocolo incremental do tipo “rampa” (painel à esquerda), após um período de coleta das variáveis no repouso e na carga zero (2-3 minutos cada), a potência deve ser incrementada de acordo com o grau de aptidão estimada do indivíduo – de tal forma que o tempo total de incrementação varie entre 8 e 12 minutos. No protocolo de carga constante (painel à direita), após as fases de repouso e carga zero, a potência escolhida pode ser mantida por: (i) um tempo fixo pré definido (no mínimo 3 minutos) ou (ii) até o limite da tolerância (Tlim, num teste de endurance).

quais a variação de carga é rápida e contínua – o valor de $\dot{V}O_2$ correspondente a carga sendo aplicada num instante qualquer estará sempre atrasado em relação à verdadeira demanda de $\dot{V}O_2$ para aquela carga. Isto ocorre, simplesmente, porque leva tempo para o que está acontecendo no músculo ser representado na troca gasosa medida ao nível do ar expirado: quando isto eventualmente ocorre, a carga já aumentou para um valor mais alto⁽¹²⁷⁾. Felizmente, entretanto, este atraso é constante (*constante de tempo*) e corresponde, aproximadamente, a 45-60 segundos (ou menos em indivíduos jovens); logo, a carga referente ao limiar de lactato num teste do tipo “rampa” é aquela que ocorre 45-60 segundos antes do limiar expresso em $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_{2\theta L}$). É mais seguro e acurado, portanto, expressar o limiar de lactato em termos de $\dot{V}O_2$ (mL/min ou L/min) do que como carga (\dot{W}).

Neste protocolo, um aspecto de notável importância é a duração do período de exercício incremental: como delineado na **Figura 9**, 8-12 minutos são um compromisso satisfatório entre testes muito rápidos (os quais podem ser interrompidos precocemente por fatores musculares periféricos ou fadiga) ou muito lentos (baixa motivação, limiar de lactato de mais difícil identificação, pressão do selim no caso da bicicleta)⁽¹²⁸⁾. Um protocolo incremental típico para pacientes deve ter: (i) uma fase de repouso (2-3 minutos ou mais), no qual verifica-se a ausência de hiperventilação antes de iniciar-se o teste (ver *Cuidados Trans- e Pós-TECP*); (ii) um período de aquecimento em carga zero (2-3 minutos); (iii) um período de incrementação (8-12 minutos) e (iv) um período de recuperação ativa na carga zero (3-6 minutos, se possível) (**Figura 9**).

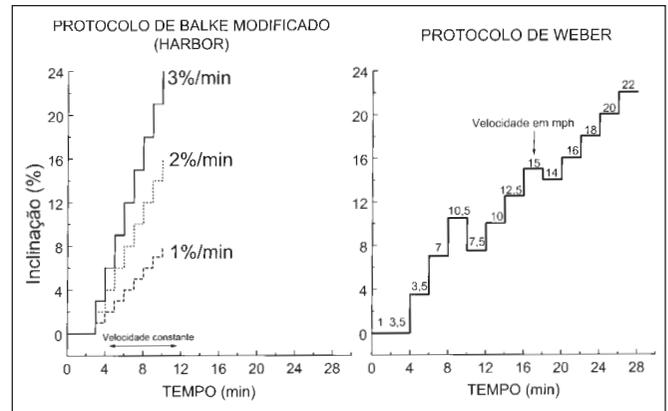


Figura 9 – Protocolos para o TECP utilizando esteira ergométrica. No protocolo de Balke modificado (painel à esquerda), a velocidade é constante (marcha acelerada) e a inclinação varia de acordo com o grau de aptidão estimada do indivíduo: o tempo total de incrementação deve oscilar entre 8 e 12 minutos. O protocolo de Weber (painel à direita) é mais adequado para pacientes menos limitados.

Considerando-se que no protocolo de rampa o incremento de $\dot{V}O_2$ é virtualmente linear durante todo o teste (com uma inclinação de cerca de 10mL/min/W), pode-se estimar a taxa de incrementação (W/min) – para que um teste dure cerca de 10 minutos – como a diferença entre o $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ previsto (em mL/min, ver *Valores de Referência*) e o $\dot{V}O_2$ previsto para a carga zero, dividida por 100. Este último é melhor calculado estimando-se a massa total dos membros inferiores⁽¹⁵⁾:

$$\dot{V}O_2 \text{ na carga zero para homens (mL/min)} = 16,8 \times ((0,23 \times \text{peso}) + 6,8) \quad [4]$$

$$\dot{V}O_2 \text{ na carga zero para mulheres (mL/min)} = 16,8 \times ((0,33 \times \text{peso}) - 0,41) \quad [5]$$

Todavia, a experiência indica que incrementos de 10-15W/min para indivíduos sedentários (eventualmente 5W/min em pacientes idosos) ou 20-25W/min para indivíduos treinados (ocasionalmente até 30-35W/min em homens saudáveis) freqüentemente ocasionam testes com 8-12 minutos de fase incremental. Eventualmente, em indivíduos muito debilitados, o tempo de carga zero pode ser aumentado ou ainda, em indivíduos treinados, o incremento iniciar-se a partir de um platô de 30-50W.

Os protocolos incrementais são particularmente úteis para: i) definir a tolerância máxima ao exercício e seus possíveis fatores limitantes, ii) estimar não-invasivamente o limiar de lactato (θL), iii) triar candidatos à reabilitação cardiovascular e pulmonar, e iv) avaliar respostas pós-intervenção - tais testes são bem padronizados e com valores de referência estabelecidos^(2,4).

Protocolos de carga constante

Os testes de carga constante (i) podem estabelecer precisamente as demandas metabólicas para uma dada car-

ga, (ii) possibilitam a avaliação das respostas pós-intervenção ou treinamento em condições de carga igual – como, por exemplo, possíveis modificações na capacidade de sustentar prolongadamente uma determinada intensidade de exercício (*endurance*), (iii) auxiliam na detecção da BIE (ver abaixo), (iv) permitem a avaliação da rapidez das modificações (cinética) das respostas na transição repouso-exercício – um indicador importante da aptidão ao exercício, e (v) podem ser utilizados para aferir a necessidade de oxigenioterapia sob diferentes níveis de demanda metabólica. Um protocolo de carga constante típico para pacientes deve incluir: (i) uma fase de repouso (2-3 minutos ou mais), no qual verifica-se a ausência de hiperventilação antes de iniciar-se o teste (ver *Cuidados Trans- e Pós-TECP*); (ii) um período de aquecimento em carga zero (2-3 minutos); (iii) um período de exercício na carga previamente definida (no mínimo 3-6 minutos ou até o limite da tolerância) e (iv) um período de recuperação ativa na carga zero (3-6 minutos, se possível) (**Figura 9**)^(2,4).

Protocolos de carga constante específicos devem ser utilizados quando o objetivo for a detecção da BIE. Como esta condição parece ser desencadeada pela perda de umidade e/ou calor da mucosa em condições de alto fluxo aéreo^(129,130), a premissa básica é a de estimular subitamente elevadas taxas ventilatórias capazes de serem mantidas por um tempo mínimo adequado. A situação clínica mais comum é a do diagnóstico de BIE em indivíduo com suspeita de asma brônquica e teste espirométrico de repouso normal: nestes indivíduos, uma resposta negativa à metacolina ou histamina não afasta a presença de BIE. Outras indicações possíveis dizem respeito à avaliação da efetividade de medicações anti-BIE, investigação da presença de BIE em indivíduo com asma estável e sintomas de esforço inexplicados e determinação da presença e gravidade do BIE em indivíduos trabalhando em atividades com alta demanda metabólica e ventilatória^(1,117).

Habitualmente recomenda-se atividade dinâmica (corrida, bicicleta) por no mínimo 4 minutos (ideal de 6 minutos) sob elevado *stress* ventilatório: o **Quadro IV** traz as recomendações consensuais da *American Thoracic Society*⁽¹¹⁷⁾ e da *European Respiratory Society*⁽¹⁾ acerca da intensidade ideal de exercício e outros aspectos operacionais do teste. Os melhores resultados parecem ser encontrados com a corrida livre; entretanto, a mesma é de difícil padronização e execução no ambiente hospitalar. Pode-se, portanto, utilizar: (i) esteira ergométrica, com aumento rápido, mas confortável, da velocidade nos primeiros minutos e posterior modificação da inclinação – valores de 4,5-5,5km/h e 15-20% de inclinação são alvos finais factíveis, ou (ii) cicloergômetro, com aumento gradual da carga nos primeiros três minutos até a estabilização e manutenção desta por 4-6 minutos (**Quadro IV**).

Para a interpretação do teste, devem ser realizadas espirometria sucessivas pós-exercício (*e.g.*, 5, 10, 15, 20, e 30 minutos): Os valores de VEF_1 devem ser expressos em relação ao basal pré-exercício ($\Delta VEF_1 = (\text{pré-pós}/\text{pré}) \times 100$). Embora uma redução do VEF_1 pós-exercício > 10% possa ser considerada anormal, a maioria dos autores considera queda > 15% como efetivamente diagnóstica de BIE^(1,117).

II.4. APARELHAGEM BÁSICA

A aparelhagem mínima necessária para a realização do TECP apresenta-se comercialmente disponível na forma de sistemas metabólicos integrados ou “carros metabólicos”. Estes sistemas caracterizam-se por apresentar um pacote de *hardware* e *software* dedicados ao teste, os quais medem e integram continuamente os diversos sinais através de tecnologia microprocessada (**Figura 2**). Embora tais avanços, indubitavelmente, simplificaram e popularizaram enormemente o TECP, deve-se notar que os mesmos dados podem ser obtidos pelo registro analógico dos sinais primários num polígrafo padrão de múltiplos canais – com cálculo posterior das variáveis. De fato, a mesma aparelhagem pode ser obtida separadamente e, como será visto abaixo, as antigas técnicas de medida fracionada – quando cuidadosamente realizadas – fornecem os dados mais confiáveis para a avaliação da acurácia dos sistemas modernos.

Um aspecto fundamental dos sistemas computadorizados é a capacidade de amostragem do conversor analógico-digital para a entrada *online* dos sinais básicos: diversos sinais devem ser passíveis de captação numa faixa de frequência de 50-100Hz. O programa deve ser capaz de analisar, se possível respiração-por-respiração, uma gama de variáveis, apresentá-las de forma tabular e gráfica e armazená-las para futura análise (ver *Apresentação dos Resultados*). Aspectos particularmente importantes são: (i) o sistema deve permitir qualquer combinação de variáveis, com possibilidade de apresentar vários eixos *y*; (ii) presença de uma forma de exportação dos dados para pacotes estatísticos ou base de dados (*e.g.*, via linguagem ASCII); (iii) o usuário deve poder modificar e inserir novos valores de referência; (iv) a determinação do “limiar anaeróbio” pode (e deve) ser realizada manualmente pelo usuário – determinações “automáticas” não são confiáveis; (v) o sistema deve permitir o interfaciamento com qualquer ergômetro, e (vi) facilidades adicionais são desejáveis, como determinação e apresentação *online* da alça fluxo-volume durante o exercício⁽¹³¹⁾ e estudo do comportamento cinético de diversas variáveis⁽¹³²⁾.

O direcionamento adequado e seguro (sem fuga aérea) do ar inspirado e expirado é crucial para a confiabilidade das medidas obtidas durante o TECP. A alternativa mais utilizada ainda envolve o emprego de bocal plástico, ideal-

mente com coletor de saliva, e prendedor nasal – cuja superfície de contato com a pele deve ser macia (borracha) e de material antialérgico. Uma boa conduta é a utilização de uma gase entre o prendedor e a pele do nariz, evitando assim que a sudorese durante o exercício desloque o prendedor. Como alternativa ao bucal, pode-se utilizar máscaras faciais com pequeno espaço-morto (o qual, entretanto, deve ser levado em consideração pelo sistema para o cálculo adequado das respostas ventilatórias) com ajuste preciso à morfologia facial. Novas máscaras siliconadas (espaço-morto de aproximadamente 40mL) estão disponíveis, produzindo resultados confiáveis e menor desconforto durante o teste, e.g., menor ressecamento das vias aéreas superiores e deglutição mais fácil.

Para a obtenção das variáveis metabólicas e ventilatórias no TECP, necessita-se, portanto, da obtenção de dois sinais básicos: (i) as concentrações gasosas expiradas – já que as inspiradas são habitualmente constantes e sabidas, e (ii) os fluxos e volumes expiratórios, já que os inspiratórios podem ser estimados, com algumas modificações, a partir dos expiratórios (**Figura 2**). Notar, entretanto, que alguns dispositivos modernos são capazes de mensurar diretamente os fluxos ins e expiratórios. Diversos outros sinais podem ser captados analogicamente e integrados digitalmente pelos sistemas computadorizados; dentre estes, os mais utilizados são os sinais de frequência cardíaca (FC) e saturação de oxihemoglobina (SaO_2) (**Figura 2**).

Metabolismo

A medida das frações gasosas expiradas (e inspiradas, em algumas circunstâncias) pode ser realizada por espectrometria de massa ou analisadores separados de O_2 e CO_2 . Os analisadores gasosos individuais medem separadamente as concentrações ($[O_2]$ e $[CO_2]$): no primeiro caso, isto pode ser efetuado por (i) célula eletroquímica – em que a reação de um substrato (geralmente zircônio aquecido) com o O_2 gera uma corrente elétrica proporcional à

$[O_2]$ – ou (ii) analisador paramagnético, que responde a variações $[O_2]$ induzidas em um campo magnético. Por outro lado, a $[CO_2]$ geralmente é obtida numa câmara de absorção de infravermelho. Adequada estabilidade, linearidade e extrema rapidez de resposta são as características ideais de um analisador (**Tabela I**).

A mensuração da troca gasosa sistêmica evoluiu, do ponto-de-vista tecnológico, em três fases: (i) técnica de análise fracionada, (ii) câmara de mistura e (iii) técnica respiração-por-respiração (*breath-by-breath* ou b-b-b)⁽¹³³⁾. As duas primeiras analisam o gás expirado misto: na análise fracionada, o gás é coletado num reservatório fechado (e.g. bolsa de Douglas, espirômetro a seco), homogeneizado e analisado fracionadamente em alíquotas; no segundo caso, o gás é direcionado para uma câmara (4-8L) com a função específica de misturar os gases, que é amostrado continuamente na sua extremidade distal. Entretanto, alguns sistemas metabólicos com câmara de mistura também amostram o gás próximo à boca, permitindo uma análise aproximada de respirações individuais.

A técnica de coleta dos gases em bolsa de Douglas com análise fracionada produz excelentes resultados em protocolos de carga constante, notadamente no exercício moderado, e nos protocolos lentamente-incrementais (*quasi estado-estáveis*, ou seja, incrementos no mínimo a cada 3 minutos). De fato, esta ainda deve ser considerada a técnica padrão para a avaliação da acurácia de sistemas mais complexos. A câmara de mistura pode fornecer valores equiparáveis aos obtidos na análise fracionada, sobretudo nessas condições estáveis ou de lenta variação. Entretanto, na transição repouso-exercício ou exercício-repouso, e em algumas circunstâncias em protocolos rapidamente incrementais do tipo ‘rampa’, os sinais provenientes da câmara de mistura podem perder a linearidade.

Estas limitações das técnicas mais antigas, entretanto, não ocorrem na análise respiração-por-respiração. Nestes sistemas, o ar expirado é amostrado junto à boca e, pela ação da pressão negativa de uma bomba de sucção a

TABELA I
Critérios de calibração para o TECP

	Mensuração	Acurácia	Reprodutibilidade	Frequência de análise	Calibração
Analizador de O_2	0-100%	1%	1%	< 130ms	2-3 pontos
Analizador de CO_2	0-10%	1%	1%	< 130ms	2-3 pontos
Fluxo	0-14L/min	3%	3%	< 40ms	3L
Cicloergômetro	0-600W	2%/3W	–	–	Torquímetro
Esteira	1-8mph (1,6-12,8km/h) 0-20% inclinação	2%	–	–	Velocidade e inclinação

vácuo, impulsionado através de uma linha de amostragem em direção aos analisadores. Embora aqui os mesmos conceitos gerais sejam aplicados, cada expiração é dividida em centenas de alíquotas, cada uma com duração de cerca de 20 milissegundos⁽¹³³⁾. Tal procedimento permite a obtenção dos valores expiratórios finais (EF) dos gases respiratórios, ou seja, após o ar do espaço-morto ter sido clareado, fornecendo uma amostra aproximada da concentração média das pressões parciais alveolares de O_2 e CO_2 . O $\dot{V}O_2$ e o $\dot{V}CO_2$ são então computados, para cada intervalo de tempo, integrando-se o produto do fluxo instantâneo com o gás consumido na respiração em questão, derivando-se posteriormente tal quantidade contra o tempo decorrido. O aspecto crucial desta análise é o correto alinhamento temporal entre os sinais de fluxo (virtualmente instantâneo) e o gasoso (atrasado pelo tempo gasto a percorrer a linha de amostra + tempo de análise) – este “atraso de fase” deve ser calibrado precisamente numa base diária ou ainda mais freqüentemente (ver *Calibração e Controle de Qualidade*).

VENTILAÇÃO

Para a obtenção destas variáveis, utiliza-se um sinal eletrônico de fluxo ou volume a partir de diferentes dispositivos. Os critérios de calibração e controle de qualidade devem ser os mesmos sugeridos para a espirometria convencional neste Consenso. Existem basicamente quatro tipos de dispositivos para medida fluxo-volumétrica em uso no TECP:

1) transdutor diferencial de pressão, o qual, utilizando o princípio de Poiseuille, mede a queda de pressão sofrida por um fluxo aéreo laminar ao atravessar uma pequena resistência de desenho variável (por exemplo, tubos paralelos no aparelho do tipo Fleisch), assumindo-se uma temperatura local constante;

2) fluxômetro ou tubo de Pitot, o qual mede, próximo à boca, um gradiente de pressão induzido por um fluxo aéreo turbulento entre orifícios posicionados tanto frontal quanto perpendicularmente à corrente aérea principal ($\Delta P = \text{fluxo}^2$, de acordo com o princípio de Bernoulli);

3) turbina ou transdutor de volume, consistindo de uma hélice de pequena massa, que, ao girar sob influência do fluxo aéreo, interrompe periodicamente um feixe de luz numa taxa que é aferida por computador;

4) anemômetro ou fluxômetro de massa, no qual a corrente elétrica necessária para manter constante a temperatura de um fio metálico aquecido e exposto ao ar expirado é proporcional ao número de moléculas passando pelo sensor por unidade tempo, *i.e.*, de acordo com a velocidade do fluxo aéreo.

Cada um destes dispositivos apresenta vantagens e desvantagens: todos, com exceção do transdutor diferencial

de pressão, possuem transdutores bidirecionais, prescindindo, portanto, de válvulas respiratórias. O aparelho do tipo Fleisch deve ser posicionado longe da boca, com o objetivo de menor variação térmica (o aumento da temperatura expande o volume gasoso de acordo com a lei de Charles) e provável obtenção de fluxo laminar – o que exige a presença de válvulas respiratórias bidirecionais de baixa resistência. Estas, portanto, permitem a separação dos fluxos ins e expiratórios: uma válvula ideal deve ter um pequeno espaço-morto relativamente ao espaço-morto anatómico do indivíduo (menor de 100-150mL para adultos).

A linearidade do sinal derivado de qualquer dos dispositivos pode ser perdida em taxas elevadas de fluxo (acima de 10L/sec no pneumotacógrafo do tipo Fleisch); outro problema potencial deriva da necessidade de manter-se a temperatura deste pneumotacógrafo ligeiramente acima do ar expirado – para evitar condensação local – o que pode aumentar artificialmente o volume gasoso medido. Entretanto, a experiência acumulada com esses dispositivos é maior do que com os outros, apresentando elevada acurácia e reprodutibilidade. De fato, o tubo de Pitot pode apresentar não-linearidade dinâmica em altas taxas de fluxo e impactação de muco pode ser um problema em pacientes. Por outro lado, a turbina (com massa e portanto inércia) possui o potencial de ligeiro atraso de resposta no início do fluxo e excesso cinético no fim do fluxo. Os anemômetros são criticamente dependentes da integridade do circuito elétrico e também podem ser afetados pela impactação de muco⁽¹³⁴⁾.

II.5. CALIBRAÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE

O emprego disseminado da tecnologia computadorizada no TECP apresenta uma importante desvantagem: a excessiva dependência no funcionamento adequado de *hardware* e *software*. Como salientado acima, sistemas de análise fracionada (bolsa de Douglas), com coleta do ar expirado em reservatórios e análise gasosa em espectrômetros de massa, ainda devem ser considerados como padrões de referência – os quais podem ser utilizados periodicamente para a validação de um sistema automatizado (ver *Controle de Qualidade*).

Como premissa básica, é importante a diferenciação entre acurácia e precisão: enquanto a primeira refere-se à capacidade de um dispositivo em determinar corretamente a quantidade que se propõe a medir, a última relaciona-se com a propriedade de produzir resultados similares, independente da acurácia. Exemplificando, um espirômetro que registre consistentemente o volume de uma seringa de calibração de 3L como 2,5L, é preciso, mas inaccurado. Neste contexto, o termo *calibração* refere-se ao ajuste de um dispositivo com o intuito de se produzir um sinal conhecido e *controle de qualidade*, o teste, ou grupo de testes, realizados com o objetivo de

determinar a precisão e acurácia relativos a uma quantidade conhecida ou padrão.

Os manuais dos sistemas integrados para o TECP são auto-explicativos e provêm o usuário com a rotina de calibração específica para cada sistema. O **Quadro V**, entretanto, traz uma visão sumarizada dos principais passos a serem seguidos para se obter uma calibração tecnicamente adequada. Uma característica básica de um bom

QUADRO V Etapas a serem cumpridas na calibração dos sistemas metabólicos integrados (“carros metabólicos”) para o teste de exercício cardiopulmonar (TECP)
1. Ligar o sistema
2. Aguardar o tempo de aquecimento e estabilização elétrica dos diferentes dispositivos: habitualmente 20-30 minutos
3. Certificar-se de que a bomba de sucção do módulo de análise gasosa está estabilizada
4. Abrir as válvulas dos cilindros de calibração
5. Obter os valores de temperatura e umidade do laboratório e pressão barométrica local: incluir estes valores no programa
6. Calibrar o módulo de fluxo-volume (a) Zerar o dispositivo: certificar-se de sua imobilidade durante todo o procedimento (b) Gerar, através de uma seringa de 3L, diferentes fluxos (e.g. 10 manobras entre 1-15seg) (c) Erro máximo deve ser de 3% ou 50mL, o que for maior
7. Calibrar o módulo de análise gasosa (a) Obtenção de um valor “zero” para a $[O_2]$ lida (b) Calibração do primeiro ponto (gás de referência), com ajuste do valor lido ao esperado: a $[O_2]$ no ar ambiente seco, deve ser lida como $20,93 \pm 0,03\%$ e a $[CO_2]$, $0,03 \pm 0,02\%$ (c) calibração do segundo ponto (gás de calibração), com ajuste do valor lido ao esperado (d) calibração do atraso de fase (<i>phase delay</i>) nos sistemas respiração-por-respiração
8. Ajustar o valor lido pelo sistema àquele gerado pelos dispositivos com aferência analógica (a) oxímetro de pulso (b) eletrocardiograma
9. Ajustar o valor lido àquele gerado nos dispositivos controlados pelo sistema (c) ergômetros
10. Imprimir e assinar o Relatório de Calibração. Posteriormente, registrar estes valores num livro de acompanhamento diário da calibração
11. Repetir a calibração de fluxo-volume e gases antes de cada TECP

laboratório de TECP é o da preocupação constante em manter um livro de calibração com gráficos evolutivos do desempenho diário do sistema: uma cópia impressa do relatório de calibração deve ser anexada a este livro de controle. Não existe absolutamente um número x adequado de calibrações diárias: elas devem ser feitas o mais freqüentemente possível, idealmente antes de cada teste de exercício. Pelas razões que serão discutidas abaixo, todos os cuidados devem ser tomados para se manter o ar do laboratório em temperatura (entre 18°-22°C) e umidade estáveis.

Cuidados pré-calibração

Os sistemas integrados para o TECP podem ser mantidos ligados por tempo prolongado (com as válvulas dos cilindros dos gases de calibração fechadas), desde que se confie na fonte de energia elétrica. De fato, a vida útil dos analisadores e do computador pode ser reduzida caso o sistema seja desligado com freqüência. Sempre que se ligar o sistema, deve-se obedecer cuidadosamente o tempo mínimo de aquecimento dos diversos componentes do sistema: geralmente este corresponde a 20-30 minutos. Cuidado especial deve ser tomado para certificar-se que a bomba de sucção esteja adequadamente aquecida (“estabilizada”), antes de qualquer procedimento de calibração gasosa.

Habitualmente, são requeridos para a calibração os valores atuais de pressão barométrica, temperatura ambiente, e umidade relativa do ar – obviamente, barômetro, termômetro atmosférico e higrômetro devem estar disponíveis no laboratório. O conhecimento adequado destes valores pode ser crítico, já que a concentração de vapor d’água no ar analisado ($[H_2O]$) influencia decisivamente o cálculo dos dados; infelizmente, ainda, a $[H_2O]$ varia de acordo com a temperatura e a pressão barométrica. Assim, a fração medida de O_2 será sempre uma função inversa da umidade relativa do ar – já que o O_2 estará sendo diluído – numa inclinação proporcional à temperatura.

Outra razão fundamental para sabermos as condições ambientais, relaciona-se ao fato de que o sistema habitualmente mede os volumes gasosos saturados com vapor d’água, submetidos às condições de pressão e temperatura atmosféricas (ATPS, acrônimo em inglês para *ambient temperature and pressure, saturated*). Entretanto, é preciso expressar as variáveis metabólicas ($\dot{V}O_2$ e $\dot{V}CO_2$) de tal forma que as mesmas sejam proporcionais ao volume de gás efetivamente trocado em moles: portanto, estas são expressas em valores padrões de temperatura (0°C), pressão atmosférica (760mmHg) e ausência completa de umidade (STPD ou *standard temperature and pressure, dry*). Por outro lado, as variáveis ventilatórias precisam ser corrigidas para as condições efetivamente

vigentes nos pulmões, ou seja, temperatura corporal, pressão atmosférica e gás saturado com $[H_2O]$ (BTPS ou *body temperature and pressure, saturated*). Logo, para a transformação adequada entre ATPS, BTPS e STPD, as condições ambientais locais devem ser sabidas e controladas.

Calibração volumétrica

Os dispositivos de análise fluxo-volumétrica (ver abaixo) devem ser calibrados antes da calibração dos gases (**Quadro V**), obedecendo-se rigorosamente os critérios determinados neste II Consenso Brasileiro sobre Função Pulmonar. Como mencionado, é importante observar um tempo de aquecimento mínimo antes de efetuar qualquer medida de fluxo: tal conduta visa evitar que qualquer *drift* elétrico possa comprometer a acurácia e linearidade dos transdutores. Portanto, após a certificação da ausência de fluxo aéreo através do dispositivo (fluxo zero por 5-10 segundos), deve-se gerar, através de uma seringa padrão de 3L, diferentes taxas de fluxo, e.g., 10 manobras entre 1 e 15 segundos de duração. O erro aceitável máximo deve ser de $\pm 3\%$ ou $\pm 50\text{mL}$, o que for maior: o sistema cria, desta forma, um fato de correção para o volume medido⁽¹⁾. Deve-se notar que é a acurácia da mensuração de volume sob diversas taxas de fluxo que é calibrada: não se trata, portanto, de uma verdadeira calibração de fluxo. Tal calibração deve ser repetida antes de cada novo teste: a presença de *drift* é bastante comum após um TECP.

Calibração metabólica

A calibração do módulo de análise gasosa dos sistemas metabólicos integrados deve iniciar-se apenas após o seu tempo de aquecimento e a estabilização da bomba de sucção a vácuo (geralmente 20-30 minutos), a qual é responsável pela amostragem contínua do ar expirado. Durante a calibração, dois pontos são habitualmente utilizados, assumindo-se uma linearidade adequada do sistema: a amostra gasosa de referência (ar atmosférico saturado à temperatura ambiente ou gás de referência seco, ou seja, O_2 a 21% e CO_2 a 0%) e a amostra gasosa de uma mistura de calibração (O_2 a 12%, CO_2 a 5% e N_2 de balanço, por exemplo). Esta concentração de oxigênio e gás carbônico parece ser particularmente útil, já que a mesma se encontra num meio-termo dentro do provável espectro de frações mensuradas no evolver do teste^(5,134). Outras combinações úteis são: $[CO_2]/[O_2] = 3\%/13\%$, $5\%/15\%$, $6\%/17\%$). Caso seja necessário o uso de O_2 suplementar durante o teste – que deve ser sempre evitado, devido aos erros inerentes de cálculo das variáveis – a calibração deve necessariamente envolver uma $[O_2]$ similar à FiO_2 a ser empregada.

O cuidado com o controle da pressão parcial de vapor d'água $[PH_2O]$ é particularmente crítico quando se utiliza o

ar ambiente como gás de referência. Desta forma, os analisadores ao mensurarem a pressão parcial dos gases, são afetados pela $[PH_2O]$, além da pressão no sistema de amostragem e modificações na pressão barométrica (conhecida previamente). Como o gás expirado satura-se rapidamente com o vapor d'água à medida que sua temperatura reduz-se ao contato com o ambiente, este aumento da PH_2O deve ser conhecido a fim de evitar-se a subestimação das frações expiradas de O_2 e CO_2 ⁽¹³³⁾. Habitualmente, as frações ins e expiratórias de vapor d'água são estimadas a partir da umidade relativa do ar na temperatura ambiente, partindo do pressuposto de que o gás expirado é “totalmente saturado” a uma dada temperatura, e o volume de nitrogênio e o de outros gases inertes não diferem entre as fases do ciclo respiratório. A maioria dos sistemas modernos utiliza uma linha de amostragem constituída de um polímero com permeabilidade seletiva à água (*Nafion*TM), permitindo um equilíbrio rápido com a umidade ambiente. No caso da utilização de amostras secas (na calibração e no teste, por desidratação ativa ou pelo uso de uma contracorrente dessecante em torno da linha de *Nafion*TM), tais correções não se fazem, ao menos teoricamente, necessárias.

Esquemáticamente, as seguintes etapas devem ser seguidas na calibração dos analisadores (**Quadro V**):

- obtenção de um valor “zero” para a $[O_2]$ lida – geralmente não necessária para a $[CO_2]$, já que esta é de aproximadamente 0,03%;
- calibração do primeiro ponto (gás de referência), com ajuste do valor lido ao esperado: a $[O_2]$ no ar ambiente seco, por exemplo, deve ser lida como $20,93 \pm 0,03\%$ e a $[CO_2]$, $0,03 \pm 0,02\%$;
- calibração do segundo ponto (gás de calibração), com ajuste do valor lido ao esperado;
- calibração acurada do atraso de fase (*phase delay*) – nos sistemas respiração-por-respiração – tanto para o O_2 quanto para o CO_2 . Nesta calibração, define-se o tempo no qual o sistema irá “aguardar” o sinal gasoso antes de analisá-lo em concomitância com o sinal de fluxo: como comentado previamente, o sinal de fluxo é virtualmente instantâneo, mas as frações gasosas demoram algum tempo para serem mensuradas.

Uma estratégia prática em nosso meio pode ser a obtenção de misturas gasosas precisas de fornecedores de gases medicinais, exigindo-se, do fornecedor, um adequado controle de qualidade. Uma alternativa adicional é a manutenção de um cilindro original de calibração – geralmente fornecido quando da compra do sistema – para futuras comparações. Entretanto, deve-se rolar o cilindro periodicamente para evitar estratificação após longo tempo de depósito. Os problemas mais comuns de calibração dos analisadores geralmente dizem respeito ao supe-

raquecimento da célula de O_2 (alguns sistemas fornecem a possibilidade de tentar resfriá-la, antes da troca) e *debris* ou condensação aquosa na câmara de CO_2 .

Outras calibrações

O ganho dos dispositivos externos com aferência analógica ao sistema (e.g., oxímetro, monitor cardíaco) devem ser também diariamente “calibrados”: na verdade, não se trata de uma verdadeira calibração, mas sim a verificação de quão corretamente o sistema está registrando o sinal analógico. Na prática, comparam-se os valores registrados pelo dispositivo (e.g., oximetria digital captada do próprio operador e frequência padrão de um eletrocardiograma) e os de referência, definida anteriormente. Em caso de diferença, o valor registrado deve ser convertido automaticamente no desejado. Procedimento semelhante é realizado em relação ao ergômetro, quando conectado ao sistema: exemplificando, deve-se gerar uma frequência de pedalagem (rpm) a uma carga sabida (ambos lidos pelo cicloergômetro), induzindo o sistema a registrar estes valores como voltagem de referência. Assim as variações de rpm e W serão comparadas com este valor padrão, garantindo-se uma intercomunicação adequada entre o ergômetro e o computador.

Sempre que factível, o cicloergômetro deve ser calibrado com torquímetro a cada seis meses – ou sempre que um ergômetro eletromagnético for movido. O funcionamento adequado da esteira pode ser analisado tanto em termos de grau de inclinação⁽⁹⁾ quanto velocidade – por exemplo, contando-se o número de revoluções por minuto, com o indivíduo exercitando-se, e multiplicando este número pelo comprimento da plataforma.

Controle de qualidade

O elemento fundamental para o controle de qualidade num laboratório que se propõe a realizar o TECP é o de garantir-se da execução de uma calibração criteriosa. Esta deve ser acompanhada do registro, descritivo e gráfico, das tendências de modificação das variáveis calibradas a longo prazo. Assim, pode-se detectar, muito precocemente, qualquer mudança sistemática nas quantidades biológicas que estão sendo calibradas longitudinalmente.

Portanto, a validação conjunta da calibração do sistema pode ser realizada contra:

(a) o trabalhoso, mas extremamente acurado, “padrão-ouro”, ou seja, análise fracionada em espectrômetro de massa com o ar coletado numa bolsa de Douglas e depois direcionado para um gasômetro de Tissot (de campânula) para a medida volumétrica;

(b) simuladores específicos de troca gasosa, os quais, através de um sistema de cilindro e pistão, geram diferentes combinações de “VC” e “f”. Estes, por sua vez, impulsionam uma mistura gasosa de concentração conhecida,

produzindo diferentes “taxas metabólicas”. Deve-se atentar, entretanto, que tais validadores não consideram aspectos relacionados à temperatura e umidade⁽¹³⁵⁾. Tanto para o item (a) quanto (b), deve-se procurar obter valores medidos dentro de $\pm 3\%$ do esperado;

(c) “validação biológica”, repetindo-se freqüentemente o teste em 3-5 indivíduos (por exemplo, pessoal do laboratório), em três níveis de potência sublimar de lactato por seis minutos cada: valores estado-estáveis (média do quinto a sexto minuto) de $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ e $\dot{V}E$ que não difiram entre si mais do que 7% (ou que estejam dentro de 100mL para o $\dot{V}O_2$, o que for menor), podem ser considerados reprodutíveis⁽¹⁾ (**Tabela I**).

II.6. VARIÁVEIS E PARÂMETROS DE RELEVÂNCIA CLÍNICA

Carga ou potência

Potência (ou “carga” do cicloergômetro) representa a quantidade de trabalho (força aplicada x distância) que é realizado num dado período de tempo. A potência geralmente é expressa em Watts ($1W = 1J/s$) ou kilopondmetro por minuto ($1W = 6,12kpm/min$).

Deve-se ter cautela na interpretação dos valores previstos para a carga máxima atingida num protocolo rapidamente incremental ($\dot{W}_{máx}$): valores bastante diferentes podem ser obtidos num mesmo indivíduo, caso se usem incrementos mais rápidos (geralmente valores de pico maiores) ou mais lentos (valores menores). A **Tabela II** traz as equações de previsão para a $\dot{W}_{máx}$ em indivíduos sedentários adultos⁽¹⁴⁾. Notar que idade (negativamente) e altura (positivamente) devem ser considerados em ambos os sexos; nos homens, o peso também constitui-se em variável preditiva positiva.

Metabolismo

Consumo de oxigênio ($\dot{V}O_2$)

Constitui o volume de O_2 extraído do ar inspirado pela ventilação pulmonar num dado período de tempo: calculado, portanto, como a diferença entre o volume de O_2 inspirado e expirado. Em condições estado-estáveis (carga constante), ou após considerarmos o tempo de atraso músculo-pulmão (carga incremental), o $\dot{V}O_2$ pode ser uma estimativa confiável da taxa periférica de troca de O_2 ($\dot{Q}O_2$). Geralmente expresso em mL/min ou L/min (STPD); correções para massa corporal total devem ser interpretadas com cautela, principalmente nos indivíduos em sobrepeço realizando atividade cicloergométrica.

Como seria de se esperar, o $\dot{V}O_2$ depende da intensidade do exercício sendo realizado (painel superior da **Figura 3**): uma análise particularmente informativa é obtida relacionando-se dinamicamente o $\dot{V}O_2$ com a carga aplicada. Logo, a inclinação da relação linear entre $\dot{V}O_2$ e potência ($\Delta\dot{V}O_2/\Delta W$) oferece importantes informações relativas à

TABELA II
Equações de previsão para variáveis metabólicas e cardiovasculares em homens (M) e mulheres (F) sedentários^(4,14)

Equação	Idade (anos)	Peso (kg)	Altura (cm)	Escore de atividade*	Constante	R ²	SEE
1. $\dot{V}O_2$ máx (mL/min)							
M	-24,3	12,5	9,8	-	702	0,755	270
F	-13,7	7,5	7,4	-	372	0,812	136
2. $\dot{V}O_2$ máx (mL/min)							
M	-22,8	-	17,9	-	207	0,687	302
F	-12,7	-	13,6	-	-170	0,754	155
3. $\dot{V}O_2$ máx (mL/min)							
M	-25,2	14,3	-	-	2267	0,742	274
F	-14,7	9,5	-	-	1470	0,794	141
4. $\dot{V}O_2$ máx (mL/min)							
M	-24,5	14,3	4,9	197,1	1113	0,796	249
F	-14,5	8,3	5,4	103,2	535	0,843	126
5. \dot{W} máx (W)							
M	-1,78	0,65	1,36	-	-45,4	0,674	25
F	-1,19	-	0,96	-	28,1	0,714	14
6. FC máx (bpm)							
M	-0,87	-	-	-	211	0,563	13
F	-0,88	-0,43	-	-	239	0,691	11
7. PuO_2 máx (mL/bat)							
M	-0,09	0,09	-	-	10,1	0,452	2,13
F	-0,04	0,08	-	-	5,1	0,498	1,16
8. θL (mL/min)							
M	-6,043	4,477	-	-	943	0,425	248
F	-3,011	5,654	-	-	519	0,408	185
9. θL (% $\dot{V}O_2$ máx)							
M	0,277	-	-0,241	-	75,6	0,582	7,2
F	0,347	-	-	-	37,4	0,494	10,1

Definição das abreviações: máx = relativo ao exercício máximo, $\dot{V}O_2$ = consumo de oxigênio, \dot{W} = potência, FC = frequência cardíaca, PuO_2 = pulso de O_2 , θL = limiar de lactato estimado. * Baseado no número de horas semanais de atividade física regular: I = < 1h, II = 1-3hs, III = 3-6hs, IV = > 6hs.

“eficiência” em suprir, através de vias predominantemente aeróbias, as demandas metabólicas (**Figura 10A**). Em outros termos, valores reduzidos sugerem que grande parte destas demandas estão sendo supridas anaerobiamente, o que pode indicar limitação circulatória (cardiovascular e/ou periférica). Embora homens apresentem o limite inferior do intervalo de confiança de 95% ligeiramente superior ao das mulheres (*i.e.* 9,8mL/min/W e 8,5mL/min/W, respectivamente)⁽⁴⁾, idade e características antropométricas não apresentam influência sistemática nesta relação (**Tabela IV**).

Diversos fatores influenciam os valores de consumo máximo de O_2 ($\dot{V}O_2$ máx): tipo de exercício, sexo, idade, dimensão e composição corporais e nível de atividade física regular.

A **Tabela II** traz uma série de equações predictoras para o $\dot{V}O_2$ máx, obtidas em adultos sedentários brasileiros⁽¹⁴⁾. Em linhas gerais, deve-se utilizar as equações **1** (idade, peso e altura) para: (i) indivíduos eutróficos, com índice de massa corpórea (IMC, peso/altura²) entre 18-25kg/m² ou (ii) com peso abaixo do esperado para a altura (IMC abaixo de 18kg/m²). As equações **3** (idade e peso) podem também ser úteis para os últimos. Em indivíduos em sobrepeso ou obesos (IMC acima de 25kg/m²) recomenda-se o uso das equações **2** (idade e altura). Sempre que possível, é aconselhável obter-se uma estimativa do nível de atividade física regular, notadamente em indivíduos envolvidos em alguma atividade a longo prazo (equações **4**): o escore de atividade física de Saltin e Grimby

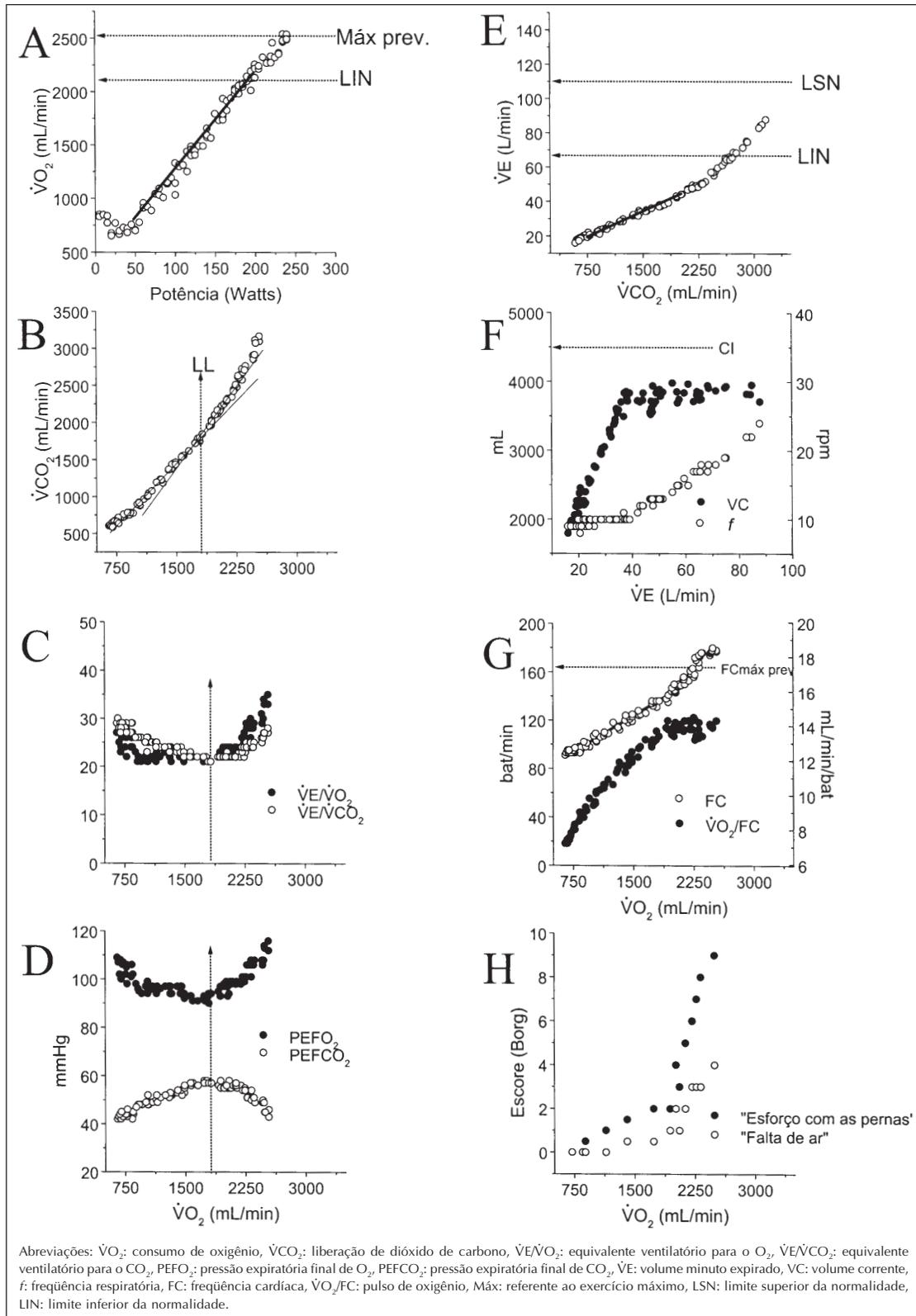


Figura 10 – Esquema padrão de 8 gráficos para a interpretação clínica do TECP. Ver o texto para uma explicação detalhada da sistemática de análise destes gráficos. Notar que outros gráficos auxiliares podem também ser de utilidade em situações específicas.

TABELA III
Equações de previsão para variáveis ventilatórias ao nível do limiar de lactato estimado (θ L) e no exercício máximo em homens (M) e mulheres (F) sedentários^(4,14)

Variável	Sexo	Idade (anos)	Altura (cm)	Constante	R ²	SEE
V̇E máx (L/min)	M	-0,97	-	146	0,379	21
	F	-0,55	0,58	-1	0,536	11
V̇E/V̇O ₂ (no θ L)	M	0,08	-	21,6	0,355	3,8
	F	0,07	-	29,9	0,125	3,9
V̇E/V̇CO ₂ (no θ L)	M	0,17	-0,08	38,6	0,564	2,8
	F	0,02	-0,14	56,8	0,111	3,2
V̇E máx/VVM	Ambos	-	-	0,68 (M) 0,58 (F)	0,160	0,12
f máx (rpm)	Ambos	-0,15	-	49	0,102	8
VC máx (mL)	M	-8,65	31,45	-2450	0,359	382
	F	-10,13	17,06	-561	0,427	282
f/VC máx (rpm/L)	M	-	-0,29	67,6	0,115	5,7
	F	-	-0,37	86,0	0,368	4,4
VC máx/CV	Ambos	0,001	-0,002	0,85 (M) 0,79 (F)	0,177	0,07
	Ambos	-	-	0,70 (M) 0,66 (F)	0,164	0,09
VC/Ti máx (mL/seg)	M	-22,90	21,90	781	0,266	752
	F	-18,52	22,19	-336	0,375	521

Definição das abreviações: V̇E: volume minuto expirado, V̇O₂: consumo de oxigênio, V̇CO₂: liberação de dióxido de carbono, VVM: ventilação voluntária máxima; f: frequência respiratória; VC: volume corrente, CV: capacidade vital, CI: capacidade de inspiratória, Ti: tempo inspiratório.

TABELA IV
Valores de referência para as relações submáximas de interesse clínico na análise do TECP⁽⁴⁾

Idade (anos)	Homens				Mulheres			
	$\Delta\dot{V}O_2/\Delta\dot{W}$ (mL/min/W)	$\Delta FC/\Delta\dot{V}O_2$ (bat/L/min)	$\Delta\dot{V}E/\Delta\dot{V}CO_2$ (L/L)	$\Delta VC/\Delta \ln\dot{V}E$	$\Delta\dot{V}O_2/\Delta\dot{W}$ (mL/min/W)	$\Delta FC/\Delta\dot{V}O_2$ (bat/L/min)	$\Delta\dot{V}E/\Delta\dot{V}CO_2$ (L/L)	$\Delta VC/\Delta \ln\dot{V}E$
20-39	11,2 ± 0,9 (9,8)	48,3 ± 8,2 (61,7)	24,3 ± 2,2 (27,9)	0,96 ± 0,17 (0,68)	10,4 ± 1,2 (8,5)	70,0 ± 9,4 (85,4)	27,8 ± 2,6 (32,0)	0,72 ± 0,14 (0,49)
40-59	11,3 ± 0,8 (10,0)	50,5 ± 14,1 (73,6)	27,2 ± 2,8 (31,8)	0,96 ± 0,21 (0,62)	9,9 ± 1,1 (8,1)	83,4 ± 13,6 (105,7)	28,4 ± 3,2 (33,6)	0,71 ± 0,17 (0,44)
60-80	10,7 ± 0,7 (9,6)	65,6 ± 14,0 (88,5)	29,8 ± 2,2 (33,4)	0,89 ± 0,24 (0,50)	9,8 ± 1,1 (8,3)	89,6 ± 12,3 (109,7)	31,2 ± 2,5 (35,3)	0,58 ± 0,13 (0,37)
Todos	11,1 ± 0,8 (9,8)	54,8 ± 14,4 (78,4)	27,1 ± 3,2 (32,3)	0,94 ± 0,21 (0,60)	10,1 ± 1,3 (8,5)	81,0 ± 14,3 (104,4)	29,1 ± 3,1 (34,2)	0,67 ± 0,16 (0,41)

Definição das abreviações: V̇O₂: consumo de oxigênio, Ẇ = potência, FC = frequência cardíaca; V̇E: volume minuto expirado, V̇CO₂: liberação de dióxido de carbono, VC = volume corrente; ln = logaritmo natural.

* Valores apresentados como média ± desvio padrão (intervalo de confiança unicaudal ao nível de 95%).

é extremamente simples de se obter (número de horas semanais de atividade física – ver **Tabela II**).

Cuidado especial deve ser tomado quando se analisam os valores de $\dot{V}O_2$ máx de indivíduos nos extremos de altura, peso ou idade: nestes casos, pode-se antecipar que a acurácia destas equações seja menor. Deve-se ressaltar que, no caso do uso da esteira, uma estimativa dos valores previstos de $\dot{V}O_2$ máx pode ser obtida pela multiplicação por 1,11⁽²⁾ dos valores calculados pelas equações da **Tabela II**. O uso das equações estrangeiras de Jones *et al.*⁽⁵⁾ e Wasserman *et al.*⁽²⁾ tendem a superestimar os valores de $\dot{V}O_2$ máx de populações sedentárias encaminhadas para o TECP clínico⁽¹⁴⁾; estas equações podem ser mais úteis em indivíduos fisicamente ativos.

Liberação de dióxido de carbono ($\dot{V}CO_2$)

Pode ser definida como o volume de CO_2 adicionado ao ar inspirado pela ventilação pulmonar num dado período de tempo: calculado, portanto, como a diferença entre o volume de CO_2 expirado e inspirado. Em condições estado-estáveis (carga constante) ou após considerarmos o tempo de atraso músculo-pulmão (carga incremental), a $\dot{V}CO_2$ pode ser uma estimativa confiável da taxa periférica de troca de CO_2 ($\dot{Q}CO_2$). Deve-se ter em mente, todavia, que como o CO_2 é cerca de 20 vezes mais difusível do que o O_2 (ou seja, tem vastos depósitos corporais), uma dada mudança na $\dot{Q}CO_2$ demora mais tempo de ser refletida na $\dot{V}CO_2$ do que variações na $\dot{Q}O_2$ modificam a $\dot{V}O_2$. A $\dot{V}CO_2$ é geralmente expressa em mL/min ou L/min (STPD).

Valores isolados de $\dot{V}CO_2$, tanto no exercício máximo como submáximo, apresentam escassa importância prática: estes dependem da intensidade do exercício (sub ou supralimiar de lactato) e da taxa de incrementação da carga. Assim, a $\dot{V}CO_2$ será maior quanto: (i) mais elevada for a ventilação alveolar para uma dada taxa de produção periférica de CO_2 (hiperventilação) e/ou (ii) maior for a contribuição anaeróbia (e.g., quando se incrementa muito rapidamente a carga num indivíduo sedentário) – já que mais lactato será tamponado e, portanto, mais CO_2 liberado por unidade de tempo (equação [1]). Entretanto, o $\dot{V}CO_2$ submáximo quando relacionado dinamicamente ao $\dot{V}O_2$ (**Figura 11**) e à $\dot{V}E$ (**Figura 10E**) fornece importantes informações quanto à detecção não-invasiva do limiar de lactato (θL) e a adequação da resposta ventilatória para a demanda metabólica periférica ($\Delta\dot{V}E/\Delta\dot{V}CO_2$) – como será visto abaixo.

Taxa de troca gasosa (R)

Reflete a razão entre a liberação de CO_2 e a captação de O_2 pulmonares medidos no ar expirado ($\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$).

Embora o R tenha sido tradicionalmente utilizado como um indicador de exercício máximo ($R_{máx} > 1.15$ ou 1.20), deve-se também analisar criticamente este conceito. Logo, o $R_{máx}$ será maior quanto mais rápida for a incrementa-

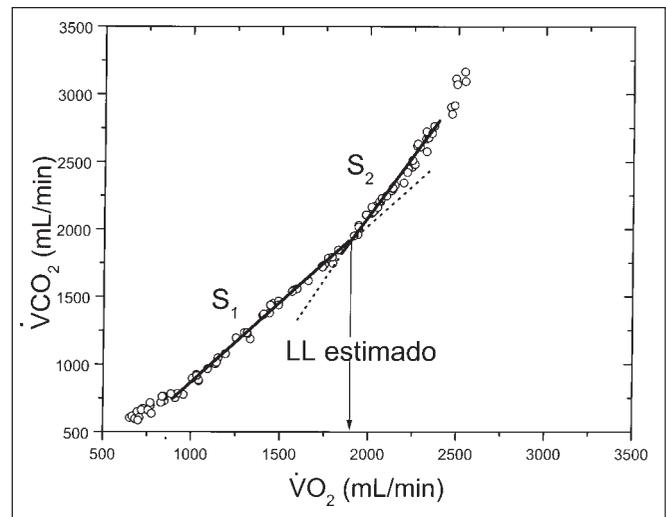


Figura 11 – Identificação não-invasiva do limiar de lactato (LL) utilizando-se variáveis de troca gasosa (método do V-slope)^(137,138). O LL corresponde a intersecção de duas linhas com inclinações distintas (S_1 e S_2): o mesmo intervalo de valores foi utilizado para o $\dot{V}O_2$ e a $\dot{V}CO_2$. Notar que nem todos os pontos foram considerados – explicações adicionais são fornecidas no texto.

ção da carga para o nível de aptidão do indivíduo e/ou maior for a utilização de carboidratos na mistura de substratos sendo metabolizada (mais CO_2 é liberado por ATP regenerado quando a mistura sendo “queimada” é rica em carboidratos). Embora o R decline e posteriormente aumente com a progressão do exercício, o R *per se* **não** deve ser utilizado para a estimativa do limiar de lactato, muito menos seus valores isolados – como, por exemplo, $R > 1$. Entretanto, os valores de R podem ser informativos na identificação de hiperventilação voluntária ($R > 0,9$ no repouso, na ausência de hipoxemia): nenhum TECP deve iniciar-se com evidências claras de hiperventilação pré-teste.

Limiar de lactato estimado

O limiar de lactato marca a aceleração da taxa de acúmulo sustentado de lactato na corrente sanguínea (**Figura 3**). Este parâmetro aeróbio pode ser obtido diretamente (mMol/L ou mEq/L), ou estimado não-invasivamente (θL) e expresso em relação ao nível de stress metabólico ($\dot{V}O_2\theta L$ em mL/min ou L/min ou em % do $\dot{V}O_2$ máx previsto) ou cardiovascular (FC em batimentos/min).

Deve-se relembrar, entretanto, que, em resposta a protocolos rapidamente incrementais, (i) a carga (\dot{W}) correspondente ao $\dot{V}O_2\theta L$ em um determinado instante é aquela obtida cerca de 45-60 segundos antes (ver *Protocolos Incrementais*), e (ii) diferentes $\dot{W}\theta L$ podem ser obtidas modificando-se a taxa de incrementação da carga – os valores de $\dot{V}O_2\theta L$, entretanto, são largamente independentes do protocolo (mas variam com o tipo de exercício,

sendo mais precoces na bicicleta do que na esteira). O erro de se expressar o θ_L em termos de frequência cardíaca (FC) é menor do que o observado com a carga, já que esta varia mais rapidamente do que a FC num teste rapidamente incremental. Desta forma, o limiar de lactato é melhor expresso em termos de $\dot{V}O_2$ – a menos que se esteja comparando o mesmo indivíduo, submetido duas ou mais vezes ao mesmo protocolo.

Embora persistam profundas discussões acerca do significado exato das modificações da lactatemia no exercício^(19,136), é inegável que o acúmulo de lactato traz dramáticos efeitos na habilidade humana de tolerar o exercício dinâmico. Neste sentido, o grau de lactatemia para um dado dispêndio metabólico tem sido amplamente utilizado como marcador de aptidão cardiorrespiratória e delimitador da intensidade de exercício. Em adição, tal resposta é sensível ao treinamento, seja em pacientes como atletas, podendo apresentar valor clínico sugestivo de limitação cardiocirculatória/periférica e indicação prognóstica clinicamente útil⁽²⁾.

Como discutido acima, a perda abrupta de linearidade entre a relação $\dot{V}O_2$ - $\dot{V}CO_2$ num determinado ponto do exercício incremental deve-se à liberação adicional de $\dot{V}CO_2$. As evidências atuais demonstram que a fonte principal deste “extra- CO_2 ” resulta da dissociação do ácido carbônico, formado a partir do tamponamento do lactato pelo bicarbonato sanguíneo (equação [1]). Este “extra- CO_2 ” adiciona-se ao CO_2 que está sendo produzido aerobiamente e provoca modificações ventilatórias que serão úteis para a detecção não-invasiva do $\dot{V}O_2\theta_L$. Portanto, o $\dot{V}O_2\theta_L$ pode ser estimado indiretamente no TECP por métodos envolvendo: (i) a troca gasosa (como, por exemplo, o método da *V-slope*^(137,138) (**Figura 11**) e/ou (ii) analisando-se o comportamento da ventilação em relação à $\dot{V}O_2$ e à $\dot{V}CO_2$ ($\dot{V}E/\dot{V}O_2$ ou *equivalente ventilatório para o O_2* e $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ ou *equivalente ventilatório para o CO_2*) e as respectivas estimativas das pressões alveolares médias, ou seja, as *pressões expiratórias finais* ($PEFO_2$ e $PEFCO_2$)⁽¹³⁹⁾ (**Figura 3**).

No **método da troca gasosa** (*V-slope*) busca-se localizar diretamente o ponto de início da aceleração da taxa de liberação do CO_2 ($\dot{V}CO_2$) em relação ao $\dot{V}O_2$ ^(137,138). Para tanto, deve-se plotar a $\dot{V}CO_2$ no eixo y e a $\dot{V}O_2$ no eixo x, tomando-se o cuidado de utilizar a mesma escala e tamanho dos eixos (**Figura 11**). Num teste incremental típico podemos observar duas fases lineares bem distintas da taxa de resposta da $\dot{V}CO_2$ em relação ao $\dot{V}O_2$, as quais são separadas por um ponto de inflexão (o θ_L): (i) uma fase inicial, na qual a inclinação é inferior a 1 (chamada de “fase S_1 ”) e (ii) uma fase tardia, na qual o extra- CO_2 vindo do tamponamento do lactato eleva a inclinação para acima de 1 (“fase S_2 ”). Como citado, entretanto, o CO_2 é muito mais difusível que o O_2 , ocupando um grande reservatório corporal: logo, demora algum tempo para que a

liberação de CO_2 muscular seja fielmente representada ao nível do ar expirado. Portanto, a resposta de $\dot{V}CO_2$ pode ficar distorcida nos primeiros dois minutos do teste, devendo ser desprezada para a estimativa correta da S_1 . Similarmente, deve-se, para a estimativa correta da S_2 , desconsiderar o aumento da $\dot{V}CO_2$ próximo ao final do teste (ver discussão abaixo sobre o ponto de compensação respiratória)^(137,138).

Para o entendimento do **método ventilatório**⁽¹³⁹⁾, é crucial observar que, após o início do exercício, há um declínio fisiológico das relações $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ e $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$, tanto porque a ventilação varia mais lentamente do que o metabolismo quanto porque há um aumento da eficiência ventilatória (aumento do VC e redução hiperbólica de razão $\bar{V}EM/VC$) (**Figura 6**) – uma discussão mais aprofundada é apresentada na referência 4. Como conseqüências, ocorrem uma diminuição da $PEFO_2$ (sobra menos O_2 nos alvéolos já que a ventilação não acompanha a taxa de retirada de O_2 pelo sangue capilar), mas um aumento da $PEFCO_2$ (já que menos CO_2 é retirado dos alvéolos pela ventilação) (**Figura 3**). Entretanto, quando ocorre o θ_L – e o extra CO_2 produzido pelo tamponamento do ácido láctico eleva a $\dot{V}CO_2$ – a ventilação aumenta proporcionalmente à $\dot{V}CO_2$. Todavia, o $\dot{V}O_2$ continua elevando-se aproximadamente na mesma taxa; logo, a taxa ventilatória torna-se agora excessiva para as necessidades de O_2 , *i.e.*, a ventilação aumenta mais rapidamente do que o $\dot{V}O_2$ após o θ_L . Desta forma, o $\dot{V}O_2\theta_L$ é caracterizado pelo aumento da $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ (e da $PEFO_2$) e estabilização da $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ (e da $PEFCO_2$) (**Figura 3**). De fato, por um período variável, a relação $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ e $PEFCO_2$ mantêm-se ambos estáveis, no assim chamado *período de tamponamento isocápnico*. Portanto, através da análise combinada dos equivalentes e das pressões expiratórias finais, podemos contrastar, ao nível do θ_L , a estabilização da $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ e da $PEFCO_2$ (**Figura 3**) com um aumento da $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ e queda da $PEFCO_2$ – o que seria compatível com hiperventilação.

Finalmente, após um período – o qual será menor quanto mais rápida for a taxa de incrementação da carga, maior a sensibilidade dos receptores carotídeos ao pH e mais baixo o ponto-de-ajuste do CO_2 ⁽¹⁴⁰⁾ – a resposta hiperventilatória à acidose se inicia, *i.e.*, alcalose respiratória compensatória. Esta caracteriza-se pelo aumento do $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ e redução da $PEFCO_2$ – no chamado *ponto de compensação respiratória* (PCR) (**Figura 3**). Assim, após o PCR, os valores elevados de $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ e a acentuada taquipnéia, reduzem progressivamente a $PEFCO_2$ (e a $PaCO_2$). Obviamente, esta atividade ventilatória adicional acaba por aumentar a $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ (e a $PEFO_2$) até valores bem elevados, típicos do exercício máximo (**Figura 3**).

Na realidade, deve-se sempre lançar mão do maior número possível de evidências comprobatórias do θ_L : as técnicas de troca gasosa e ventilatória devem, portanto,

ser apreciadas conjuntamente (**Figuras 3 e 11**). A **Tabela II** traz uma série de equações sexo-específicas para a previsão do $\dot{V}O_2\theta L$, tanto em mL/min quanto em % do $\dot{V}O_2$ máx previsto, as quais consideram: sexo, idade e dimensão corpórea⁽¹⁴⁾. Deve-se, ainda, atentar para dois aspectos importantes: (i) embora o $\dot{V}O_2\theta L$ seja menor em idosos e mulheres, a diferença $\dot{V}O_2$ máx- $\dot{V}O_2\theta L$ reduz-se progressivamente com a idade, *i.e.*, o $\dot{V}O_2\theta L$ em % do $\dot{V}O_2$ máx previsto umenta com a idade, principalmente em mulheres, e (ii) expressar o $\dot{V}O_2\theta L$ em % do $\dot{V}O_2$ máx obtido pode ser particularmente enganoso em pacientes – onde a diminuição do $\dot{V}O_2$ de pico é habitualmente mais ampla do que a redução do $\dot{V}O_2\theta L$, *i.e.*, nesse caso, haveria uma superestimação dos valores relativos de $\dot{V}O_2\theta L$. Deve-se, portanto, expressar sempre o $\dot{V}O_2\theta L$ em % do $\dot{V}O_2$ máx previsto (**Tabela II**).

Ventilação e tensões gasosas arteriais

Volume minuto expirado (VE)

Constitui o volume de ar exalado por minuto (L/min, BTPS). O VE atingido no ponto de tolerância máxima ao exercício incremental ($\dot{V}Emáx$) depende fundamentalmente da taxa de aumento da $\dot{V}CO_2$ e da $[H^+]$, ou seja, da própria intensidade de exercício realizada. Logo, o $\dot{V}Emáx$ será maior em homens e indivíduos jovens, variando ainda inversamente com a altura em mulheres (**Tabela III**)⁽¹⁴⁾. Notar, todavia, que é mais instrutivo considerar o VE em relação ao máximo teórico de acordo com as condições mecânicas da bomba ventilatória, ou seja, em relação à ventilação voluntária máxima (VVM) estimada ou obtida (ver *Reserva Ventilatória*).

Como visto na equação [2], a taxa de variação da ventilação em relação ao CO_2 será maior quanto: (i) maior for o “desperdício” ventilatório no espaço-morto EM (seja porque o volume corrente (VC) não aumenta satisfatoriamente e/ou o EM fisiológico eleva-se) e/ou (ii) mais baixo for o ponto-de-ajuste do CO_2 (porque é preciso ventilar mais para se manter um CO_2 já baixo). Logo, a relação $\Delta VE/\Delta \dot{V}CO_2$ abaixo do ponto de compensação respiratória é notavelmente linear (**Figura 10C**), constituindo um importante índice de “eficiência” ventilatória. Esta relação é extremamente reprodutível e estável numa base interindividual: seu coeficiente de variação é bem inferior a 10% tanto em homens como mulheres (**Tabela IV**)⁽¹⁴⁾. Para a sua interpretação adequada, deve-se considerar idade e sexo: mulheres apresentam valores consistentemente maiores, os quais também se elevam com a idade nos dois sexos (**Tabela IV**).

Reserva ventilatória (RVE)

É a diferença entre a taxa máxima de ventilação que um indivíduo pode teoricamente gerar (*i.e.*, a ventilação voluntária máxima ou VVM) e a taxa ventilatória realmen-

te desenvolvida num dado momento (*i.e.*, o VE no exercício submáximo e o $\dot{V}Emáx$ no pico da atividade). A VVM pode ser medida diretamente ou estimada ($VEF_1 \times 37,5$)⁽¹⁴¹⁾; em pacientes com distúrbio restritivo pulmonar, deve-se utilizar a VVM estimada – já que estes pacientes tendem a apresentar freqüências respiratórias irrealisticamente altas durante as manobras curtas de VVM. A RVE pode ser expressa em valores absolutos ($RVE, L/min = VVM - VE$) ou relativos ($RVE, \% = (1 - (VE/VVM)) \times 100$) (**Figura 6**). A simples razão VE/VVM tem sido utilizada como um índice de reserva ventilatória, ou melhor, do seu inverso (valores elevados indicando baixa RVE): deve-se, todavia, evitar o uso do termo “índice de dispnéia” como sinônimo desta razão.

Embora existam diversas limitações teóricas quanto à validade da razão $\dot{V}Emáx/VVM$ em indicar limitação ventilatória⁽¹³¹⁾, esta é largamente utilizada na prática com este propósito. A **Tabela III** traz equações preditivas sexo-específicas para a relação VE/VVM ao nível do exercício máximo. Embora exista larga variabilidade na $\dot{V}Emáx/VVM$ em ambos os sexos, valores acima de 0,85 (eventualmente 0,80) em homens e 0,75 em mulheres (ou RVE menor do que 15% e 25%, respectivamente) são incomuns em indivíduos sedentários saudáveis (**Tabela III**).

Equivalentes ventilatórios

Trata-se das razões entre a taxa ventilatória instantânea (VE) e a taxa de captação de O_2 e liberação de CO_2 (*i.e.* $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ e $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$). Como comentado acima (*Limiar de Lactato Estimado*), o $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ reduz-se progressivamente até o seu ponto mais baixo ao nível do θL ; a partir deste ponto, o $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ aumenta inexoravelmente até seus valores máximos no pico do exercício. Por outro lado, embora o $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ também decline até o θL , esta razão só se eleva após o ponto de compensação respiratória, ou seja, permanece estável no período de tamponamento isocápnico (**Figura 3**). Desta forma, os equivalentes são úteis para auxiliar na detecção não-invasiva do θL : o ponto mais baixo dos equivalentes (*nadir*), principalmente quando analisados com as pressões gasosas expiratórias finais, podem fornecer uma estimativa razoável do θL pelo método ventilatório. Adicionalmente, valores elevados dos equivalentes no repouso e exercício moderado sugerem aumento do espaço-morto ou hiperventilação (notadamente quando associados com baixa $PEFCO_2$).

Os equivalentes ventilatórios ao nível do θL , principalmente o $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$, têm também sido utilizados como indicadores da eficiência ventilatória, *i.e.*, do grau de adequação da resposta ventilatória aos estímulos metabólicos. Tais valores são sexo e idade dependentes, sendo maiores em mulheres e idosos (**Tabela III**)⁽⁴⁾. Entretanto, um aspecto pouco lembrado é de que os valores do $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ variam inversamente com o próprio valor do θL . Assim, o

$\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ será maior quanto menor for o θL , *i.e.* sempre que o θL ocorrer muito precocemente, não haverá tempo para os equivalentes declinarem suficientemente. Por outro lado, a análise da inclinação da relação linear $\Delta\dot{V}E/\Delta\dot{V}CO_2$ não apresenta estas limitações⁽⁴⁾.

Pressões expiratórias finais (PEF)

Constituem-se nos valores da pressão parcial dos gases respiratórios na porção final da expiração, *i.e.*, após o ar do espaço-morto anatômico – o qual é “contaminado” com o ar da inspiração anterior – ter sido exalado (PEFO₂ e PEFCO₂, em mmHg). As pressões expiratórias finais podem representar razoavelmente as pressões alveolares médias de O₂ e CO₂ em indivíduos normais, mas não em pacientes com acentuados desequilíbrios da relação ventilação/perfusão.

Na prática, as pressões expiratórias finais são utilizadas em conjunção com os equivalentes ventilatórios para a detecção não-invasiva do θL pelo método ventilatório (**Figura 3**). Sua importância maior é a de afastar hiperventilação voluntária como causa do aumento do $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ (*i.e.* baixa PEFCO₂), notadamente quando o $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ começa a elevar-se após o θL e o $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ ainda não se estabilizou.

Outra aplicação prática é a análise dos valores de PEFCO₂ ao nível do θL como indicativos da integridade da vasculatura pulmonar, já que se necessita de uma rede íntegra para “descarregar” a maior taxa de CO₂ produzido periféricamente no exercício. Entretanto, as mesmas limitações descritas acima para o $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ são também aplicáveis aqui: quanto mais precoce for o θL , mais baixo será a PEFCO₂ (maior $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$)⁽⁴⁾. A PEFCO₂ é de difícil interpretação em pacientes com desequilíbrios \dot{V}/\dot{Q} , em que a mesma pode subestimar grosseiramente a pressão alveolar de CO₂; de fato, a diferença entre os valores de PEFCO₂ e PaCO₂ pode ser utilizada clinicamente para estimar a integridade da troca gasosa intrapulmonar (gradiente a-EF de CO₂)⁽²⁾. Pontos-de-corte para análise dos valores de PEFCO₂ em nível do θL estão apresentados nos *Valores de Referência*: valores de referência para a PEFCO₂ expressas dinamicamente em relação à $\dot{V}O_2$ já são disponíveis⁽⁴⁾.

Padrão ventilatório

A obtenção de uma determinada resposta da bomba ventilatória pode fazer-se através de múltiplas combinações entre frequência (*f*, incursões respiratórias por minuto ou irpm) e amplitude (volume corrente ou VC, L) de “bombeamento”. Como discutido previamente, o aumento do $\dot{V}E$ nos períodos iniciais do exercício progressivo faz-se maciçamente às custas do VC, o qual cresce curvilinearmente até uma fração razoavelmente fixa do volume total disponível para a inspiração (capacidade inspiratória ou capacidade vital) (**Figura 6**). Nesta fase inicial, a *f* aumenta apenas discretamente. Posteriormente ao θL , o aumento de frequência passa a ser o aspecto dominante da respos-

ta ventilatória: valores de *f* de até 55-60irpm podem ser observados em adultos jovens saudáveis (**Tabela III**). Uma maneira particularmente útil para a análise do padrão ventilatório é o da apresentação do VC em função da resposta ventilatória linearizada (por exemplo, $\ln\dot{V}E$)⁽⁴⁾: valores de referência para esta relação estão apresentados na **Tabela IV**. A **Tabela III** traz valores de referência para diversos descritores do padrão ventilatório: é instrutivo também analisar dinamicamente (tendências) as mudanças do padrão durante o esforço⁽⁴⁾.

Tensões gasosas arteriais/saturação de oxihemoglobina

As pressões parciais de oxigênio e dióxido de carbono no sangue arterial (PaO₂ e PaCO₂, mmHg) são mantidas, durante o exercício, dentro de limites estreitos, os quais são compatíveis com a homeostase da troca gasosa sistêmica. A maior vantagem da apreciação adicional da P(A-a)O₂ – e não apenas da PaO₂ – é que a diferença alvéolo-arterial é largamente independente da ventilação (assumindo-se constância nos depósitos pulmonares de nitrogênio). Por outro lado, a hiperventilação pode mascarar uma eventual queda da PaO₂. Logo, valores elevados de P(A-a)O₂ são sugestivos de alteração da relação \dot{V}/\dot{Q} , difusão ou “shunt”; entretanto, variações ventilatórias acentuadas, queda da PvO₂ e mudanças no débito cardíaco também podem modificá-la. Valores de referência para a PaO₂ e P(A-a)O₂ em resposta ao exercício de carga constante e incremental podem ser encontrados nos livros-texto acerca do TECP^(2,4,5). Por outro lado, a SaO₂ está habitualmente acima de 95% no repouso, modificando-se menos do que 3% com o exercício incremental: quedas superiores a 3-4% podem ser consideradas anormais – desde que se assegure que não se trata de problema técnico na obtenção do sinal. Deve-se ainda lembrar que, devido ao aspecto sigmóide da curva de dissociação da oxihemoglobina, alterações da PaO₂ – quando acima de cerca de 60mmHg – podem não se traduzir em modificações apreciáveis da SaO₂.

Como discutido previamente, a PaCO₂ mantém-se estável ou aumenta discretamente no exercício moderado: isto ocorre porque muitos indivíduos hiperventilam antes do início do teste (baixa PaCO₂ pré-exercício, *i.e.* abaixo de 36mmHg) e a $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ cai progressivamente até o limiar de lactato (ajudando a elevar a PaCO₂ em alguns poucos mmHg) (**Figura 3**). No período de tamponamento isocápnico, a PaCO₂ mantém-se, obviamente, estável, declinando progressivamente a partir do ponto de compensação respiratória até os seus valores mais baixos no exercício máximo.

Espaço-morto fisiológico (EM)

A equação de Bohr para o cálculo do espaço-morto fisiológico (englobando o espaço-morto anatômico e o

alveolar), como fração do volume corrente (\overline{VEM}/VC), estabelece que:

$$VEM/VC = PaCO_2 - \overline{PECO}_2/PaCO_2 \quad [6]$$

em que \overline{PECO}_2 representa a pressão expiratória mista de CO_2 . Logo, quando menor for a \overline{PECO}_2 em relação a $PaCO_2$, maior será o EM como fração do VC – já que mais sangue passaria sem contato com o ar alveolar, ou seja, mais unidades com alta relação ventilação/perfusão (\dot{V}/\dot{Q}).

A relação \overline{VEM}/VC declina hiperbolicamente com o exercício incremental (de 0,28-0,35 no repouso para 0,20-0,25 próximo ao limiar, caindo até 0,20 ou menos no exercício máximo) – sobretudo porque o VC aumenta acen-tuadamente no exercício leve a moderado (**Figura 6**). Valores 0,10 unidades maiores podem ser vistos em idosos normais⁽²⁾.

Deve-se tomar cuidado com “estimativas não-invasivas” da relação \overline{VEM}/VC , obtidas automaticamente por muitos dos sistemas metabólicos integrados. Nesta estratégia, estima-se a $PaCO_2$ pela $PEFCO_2$, ignorando-se o fato que existe um gradiente variável entre estas pressões (ver *Tensões Gasosas Arteriais/Saturação de Oxihemoglobina*): na realidade, esta pode alargar-se substancialmente no exercício, principalmente nos pacientes com aumento do EM (diferença $(a-EF)CO_2$ positiva). Portanto, o uso destas estimativas (sem gasometria arterial) do \overline{VEM}/VC pode induzir a erros grosseiros⁽¹⁴²⁾, habitualmente subestimando os reais valores. Estas devem ser utilizadas apenas para (i) observar a tendência de modificação com o progredir do exercício, ou (ii) observar o comportamento da relação no mesmo indivíduo em exames sucessivos.

Respostas cardiovasculares

Respostas eletrocardiográficas

O interesse e a preocupação despendidos com a qualidade dos traçados eletrocardiográficos no TECP não é menor do que aqueles comumente encontrados na ergometria convencional ou “*stress testing*”. Tais respostas são de crucial importância para a avaliação global do examinado e devem ser rigorosamente acompanhadas e relatadas.

Os registros eletrocardiográficos comumente utilizados como parte do TECP envolvem: (i) registro uniderivacional, geralmente a clássica CM_5 lida, habitualmente, em D_1 , (ii) três derivações ou (iii) 12 derivações. Na derivação CM_5 , a mais utilizada, empregam-se três eletrodos: o de braço direito (RA, negativo) situado ao nível da fúrcula esternal, o de braço esquerdo (LA, positivo) na posição V5 e o comum (perna direita ou RL), ao nível da posição V5R. O Consenso Brasileiro de Ergometria traz uma discussão aprofundada dos diferentes arranjos derivacionais úteis para os testes de exercício⁽¹²⁾.

A escolha do número de derivações deve ser individualizada de acordo com o perfil do paciente (risco pré-teste), indicação do TECP e, não menos importante, experiência do médico acompanhante com a leitura eletrocardiográfica de esforço. Exemplificando, a utilização de 12 derivações raramente se mostra útil na avaliação de um paciente idoso gravemente limitado por DPOC ou na determinação do grau de aptidão atlética de um jovem assintomático; por outro lado, esta pode ser crítica num homem de meia-idade com queixas típicas de angina. Um compromisso adequado para a maioria dos TECP de rotina é a utilização de três derivações. Aspectos interpretativos da eletrocardiografia de esforço podem ser encontrados na abundante literatura disponível^(7,8,11,12).

Frequência cardíaca (FC)

A resposta cronotrópica ao exercício (frequência cardíaca ou FC em batimentos/minuto) geralmente é obtida pela determinação contínua da distância R-R em uma das derivações de membros do traçado eletrocardiográfico. A **Tabela II** traz os valores esperados para a FC no limite da tolerância em um teste incremental: notar que idade é o fator fundamental para a previsão da resposta cronotrópica ao esforço. Desta forma, a reserva cronotrópica, ou reserva de frequência cardíaca (RFC, %), constitui-se na diferença entre a $FC_{m\acute{a}x}$ prevista para uma determinada idade (*prev*) e a $FC_{m\acute{a}x}$ atingida no limite da tolerância (*ating*), ou seja, $RFC = (1 - (FC_{ating}/FC_{prev})) \times 100$.

Uma RFC diminuída pode ser normal num indivíduo que realizou esforço máximo (RFC < 15%) e atingiu os valores esperados de carga e $\dot{V}O_2_{m\acute{a}x}$; por outro lado, pode ser anormal num indivíduo que atingiu a $FC_{m\acute{a}x}$ precocemente, *i.e.*, com carga e $\dot{V}O_2_{m\acute{a}x}$ reduzidos. Similarmente, uma RC aumentada pode ser encontrada em atletas, indivíduos com pronunciada limitação periférica ou ventilatória (*e.g.* pacientes com DPOC) ou dever-se a subesforço, uso de medicamentos (β -bloqueadores), ou insuficiência cronotrópica na doença arterial coronariana. Portanto, a análise da RFC deve considerar o contexto clínico específico e a intensidade de exercício realizada: de fato, a análise da relação dinâmica entre FC e $\dot{V}O_2$ pode ser mais informativa.

Pulso de oxigênio (PuO_2)

O pulso de oxigênio (mL/min/bat) consiste, teoricamente, no volume de O_2 extraído pelo metabolismo a cada batimento cardíaco, *i.e.*, $PuO_2 = \dot{V}O_2/FC$. Logo, o PuO_2 depende do volume de sangue oferecido (ou seja, do volume de ejeção sistólico ou VES) e da avidéz tissular em captá-lo (isto é, da diferença entre os conteúdos arterial e venoso misto de O_2 ou $C(a-\bar{v})O_2$).

O PuO_2 aumenta progressivamente com o exercício, já que ambos os seus determinantes (VES e $C(a-\bar{v})O_2$) elevam-se. A mesma informação pode ser obtida pela análise da

inclinação da relação linear $\Delta FC/\Delta \dot{V}O_2$ (**Figura 10G**): quanto mais inclinada for esta relação (maior FC para uma dada demanda metabólica), menor será o PuO_2 no exercício máximo e, portanto, menor o grau de aptidão cardiovascular ao exercício. A análise contínua do PuO_2 e da $\Delta FC/\Delta \dot{V}O_2$ podem ser úteis em sugerir limitação cardiovascular antes do que limitação periférica – uma análise mais aprofundada encontra-se disponível na referência 4.

A **Tabela II** apresenta os valores de referência para o PuO_2 no limite da tolerância em um teste incremental em cicloergômetro. A idade e o sexo decisivamente influenciam estas variáveis: idosos e mulheres apresentam os maiores valores de $\Delta FC/\Delta \dot{V}O_2$ e os menores do PuO_2 . Curiosamente, o peso também é uma variável preditiva positiva independente, provavelmente refletindo o maior débito cardíaco dos indivíduos pesados e/ou o próprio “efeito de treinamento” em deslocar uma maior massa corpórea. Adicionalmente, a **Tabela IV** traz os valores de referência para a $\Delta FC/\Delta \dot{V}O_2$; como esperado, idade e sexo devem ser considerados para a previsão desta relação⁽¹⁴⁾.

Sintomas

As respostas subjetivas são parte inerente da análise clínica de qualquer teste de esforço⁽¹⁴³⁾, sendo particularmente importantes em pacientes com suspeita de intolerância ao exercício. Nestes indivíduos, o desconforto associado à atividade física freqüentemente limita a progressão da atividade antes que os limites fisiológicos máximos sejam atingidos. Dentre as diversas alternativas disponíveis para a mensuração das sensações associadas ao esforço – ou seja, (i) esforço percebido ou fadiga geral, (ii) cansaço ou esforço muscular e (iii) desconforto respiratório ou dispnéia – as mais utilizadas são as escalas categórica de Borg⁽¹⁴⁴⁾ e a escala analógico-visual⁽¹⁴⁵⁾. Na escala de Borg modificada, o paciente deve graduar a intensidade dos sintomas numa variação não-linear de 0 (nenhuma) – 10 (máxima), tendo palavras descritivas associadas aos números. A escala visual-analógica consiste de uma linha de 100mm de comprimento, disposta tanto horizontal quanto verticalmente, com descritores nos extremos (ausência de falta de ar ou máxima falta de ar, por exemplo) (**Figura 12**).

Valores de referência para os escores de esforço muscular e dispnéia, de acordo com a escala categórica de Borg para o exercício cicloergométrico incremental, estão disponíveis⁽³⁷⁾. Nesta fonte de referência, os valores foram expressos em função da potência aplicada (ou seja, avaliação contínua durante o teste), considerando-se a idade e o sexo.

II. 7. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Um aspecto importante para guiar a interpretação dos resultados do TECP é o de apresentar os dados obtidos de

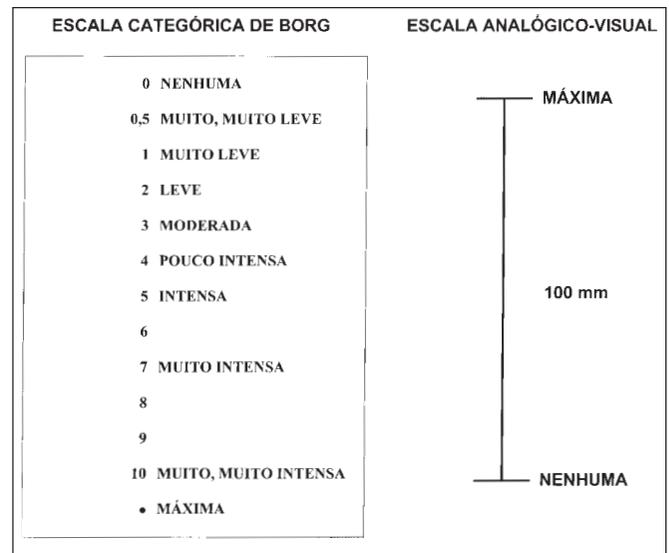


Figura 12 – As escalas categórica de Borg (modificada para 10 pontos⁽¹⁴⁴⁾ e visual-analógica⁽¹⁴⁵⁾ para a quantificação dos sintomas relacionados ao esforço

forma ampla o suficiente para focalizar as relações de real interesse – mas não demasiadamente prolixa, o que poderia levar a uma sobrecarga de informações pouco úteis. A **Figura 10** ilustra as principais variáveis e gráficos de interesse para a análise clínica do TECP incremental⁽⁴⁾. Tais gráficos são também úteis para o teste realizado em esteira, embora, como comentado, a estimativa da carga imposta seja imprecisa nesta modalidade ergométrica.

O Gráfico **A** ($\dot{V}O_2$ em mL/min vs. potência em W) permite a apreciação da relação entre a resposta e a demanda metabólica, além de possibilitar a análise da “normalidade” da carga máxima e do $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ atingidos. Desta forma, os seguintes aspectos devem ser avaliados neste gráfico: (i) se há ou não redução na inclinação da relação $\Delta \dot{V}O_2/\Delta W$, o que sugeriria problemas na oferta e/ou captação de O_2 (limitação circulatória por distúrbio cardiovascular e/ou sedentarismo); (ii) perda da linearidade (achatamento repentino), o que seria mais condizente com uma redução pronunciada da oferta de O_2 por distúrbio cardiovascular; e (c) deslocamento para cima com inclinação inalterada, geralmente por obesidade ou baixa eficiência mecânica (isto é, gasto excessivo de O_2 para realizar uma mesma tarefa)^(1,2).

Os Gráficos **B** ($\dot{V}CO_2$ em mL/min vs. $\dot{V}O_2$ em mL/min), **C** ($\dot{V}E/\dot{V}O_2$ e $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ vs. $\dot{V}O_2$ em mL/min) e **D** (PEF_{O_2} e PEF_{CO_2} em mmHg vs. $\dot{V}O_2$ em mL/min) devem ser vistos em conjunto permitindo a estimativa não-invasiva do θL pelas técnicas de troca gasosa (**B**) e ventilatória (**C** e **D**). Os Gráficos **C** e **D** são particularmente importantes para afastar hiperventilação como causa da mudança de inclinação da $\dot{V}CO_2$ em relação ao $\dot{V}O_2$. Adicionalmente, deve-

se comparar os valores de $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ e $PEFCO_2$ ao nível do θ_L em relação aos previstos: valores elevados de $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ com $PEFCO_2$ reduzida sugerem aumento do $\bar{V}EM/VC$ ou hiperventilação (primária ou secundária), *i.e.* baixa “eficiência ventilatória”. Por outro lado, valores normais de $PEFCO_2$ falam contra um aumento substancial do espaço-morto. Notar, entretanto, que valores baixos da $PEFCO_2$ podem se dever simplesmente a um aumento da frequência respiratória – uma f elevada pode amputar o traçado expiratório – ou θ_L muito precoce. Similarmente, θ_L reduzido também pode originar valores do $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ mais altos (ver *Equivalentes Ventilatórios*). Nestes casos, a análise da eficiência ventilatória pelo Gráfico **E** é mais confiável.

O Gráfico **E** ($\dot{V}E$ em L/min *vs.* $\dot{V}CO_2$ em L/min) fornece a inclinação da relação $\Delta\dot{V}E/\Delta\dot{V}CO_2$ abaixo do ponto de compensação respiratória (PCR), *i.e.*, antes do surgimento de um excesso ventilatório para a taxa de $\dot{V}CO_2$. Esta relação é um indicador importante da “eficiência ventilatória” (valores elevados indicam baixa eficiência, com elevado $\bar{V}EM/VC$ ou baixo ponto-de-ajuste do CO_2), possuindo ainda a vantagem de ser independente do grau de precocidade do θ_L . Adicionalmente, deve-se traçar o limite inferior da resposta ventilatória máxima esperada – a qual pode auxiliar na detecção de subesforço – e o limite superior (VVM), que permite estimar se houve ou não limitação ventilatória ao exercício (baixa VVM- $\dot{V}Emax$ ou elevada $\dot{V}Emax/VVM$).

As características do padrão respiratório podem ser analisadas no Gráfico **F**: um padrão taquipnéico de resposta pode ser identificado por: (i) aumento insuficiente do VC em função do $\dot{V}E$ e (ii) frequência máxima superior ou igual ao previsto, principalmente se atingida precocemente. A análise do VC em relação à capacidade inspiratória (CI) fornece uma apreciação rápida do uso da reserva volumétrica disponível. Este gráfico também permite a visualização de padrão ventilatório errático, o que pode ser condizente com subesforço, ansiedade ou mesmo tentativa de falseamento dos resultados.

O Gráfico **G** (FC em bat/min e PuO_2 em mL/bat *vs.* $\dot{V}O_2$ em mL/min) condensa as principais respostas cardiovasculares. Devem ser observados: (i) a reserva cronotrópica, isto é, a diferença entre a FC máx atingida e a prevista, com o intuito de analisar o grau de *stress* cardiovascular; (ii) redução do PuO_2 máximo, que sugere limitação circulatória e/ou periférica; (iii) a inclinação da relação $\Delta FC/\Delta\dot{V}O_2$: elevadas inclinações são também compatíveis com baixa oferta e/ou captação de O_2 ; e (iv) perda precoce da linearidade (súbita elevação) da relação $\Delta FC/\Delta\dot{V}O_2$ e/ou platô precoce da curva de ascensão do PuO_2 , os quais – dentro de um contexto clínico adequado – podem sugerir distúrbio cardiovascular subjacente mais do que descondiçãoamento^(2,4).

Finalmente, o Gráfico **H** (Borg “dispnéia” e Borg “esforço ou desconforto muscular” *vs.* $\dot{V}E$ ou $\dot{V}O_2$) ilustra as respostas subjetivas em função das demandas objetivas. Nestes gráficos, deve-se observar não apenas os valores máximos atingidos dos escores de sintomas, mas também o desconforto para uma dada demanda objetiva, o qual pode mudar substancialmente após intervenções – mesmo que o nível de desconforto máximo fique inalterado.

Outros gráficos auxiliares podem também ser úteis: dentre estes, destacam-se a apresentação dos valores de R em função do $\dot{V}O_2$, a análise do padrão ventilatório em função da resposta ventilatória linearizada, ou seja, utilizando-se $\ln\dot{V}E$ (Tabela IV). Quando o teste envolver coleta de sangue “arterializado” (lóbulo da orelha ou dorso da mão aquecidos), o pH, $PaCO_2$, $(a-EF)CO_2$, e $[HCO_3^-]$ padrão também devem ser apresentados. Na eventualidade de amostras arteriais seriadas estarem disponíveis, deve-se apresentar a PaO_2 , a $P(A-a)O_2$ e a razão $\bar{V}EM/VC$ – como discutido previamente, estimativas “não-invasivas” desta última relação não são confiáveis.

Todas as variáveis descritas acima devem também ser apresentadas numa forma tabular descritiva, isto é, com os valores numéricos absolutos e comparados ao previsto nas condições de repouso, ao nível do θ_L e no pico do exercício (Figura 13).

II.8. PROCEDIMENTO

O primeiro passo para a realização de um TECP que se mostre clinicamente útil depende da obtenção pré-teste do maior número possível de informações relativas ao examinado. Portanto, deve-se preencher uma ficha-padrão de requisição, a qual deve conter os aspectos cruciais que guiarão a escolha do protocolo e do grau de complexidade do teste, além de sedimentarem as bases duma interpretação clínica realista. Não menos importante, ainda, é a obtenção de um *Consentimento por Escrito* do examinado, após explicação detalhada dos riscos e benefícios do procedimento, o qual deve ser submetido e aprovado pela Comissão de Ética da instituição.

O **Quadro VI** apresenta uma relação sumarizada das diversas etapas a serem observadas na preparação e realização de um TECP dentro do contexto clínico.

Cuidados pré-TECP

Um aspecto básico de grande importância para o teste de exercício – mas raramente observado na prática – é o da obtenção de um ambiente calmo e livre de influências auditivas (com exceção de música relaxante de fundo) ou visuais externas. Mais especificamente, nenhum TECP deveria ser realizado num laboratório onde testes rotineiros de função pulmonar estão sendo realizados: é mandatório, portanto, que apenas a equipe acompanhante e o examinado estejam dentro da sala durante todo o teste.

	VO₂ MÁX					
	Repouso	LA	Obtido	Previsto	(Limite)	Máx/Prev
Tempo (min)	2:00	8:30	15:15			
Carga (Watts)	0	67.0	169	123	100	137.2%
Tempo de exer (min)		6:30	13:15			
Metabolismo (STPD)						
VO ₂ (ml/min)	260	1000	2100	1765.3	1542	119.0%
VO ₂ / kg	3.9	14.8	31.1	26.5		117.3%
VCO ₂ (ml/min)	223	877	2516			
R	0.86	0.9	1.20			
METs	1.1	4.2	8.9	8.5		104.7%
VO ₂ LA (ml/min) Prev. 95% IC		824 637				
Ventilação (BTPS)						
VE (L/min)	8.6	25.9	90.2	82	84	109.8%
VC (L)	840	1448	2922			
f (irpm)	10	18.0	31			
VE / VO ₂	33	26.0	43			
VE / VCO ₂	39	30.0	36			
Ti / Tot	0.44	0.5	0.48			
Ti (seg)	2.58	1.7	0.94			
Te (seg)	3.26	1.7	1.00			
VE / VVM	0.07	0.2	0.76			
VC / CI	29	49.0	75			
Cardiovascular						
FC (bpm)	80	137	182	186	168	97.8%
VO ₂ / FC (mL/bpm)	3	7	12	9	7	136.6%
PA Sistólica (mmHg)	120.0	150	170.0			
PA Diastólica (mmHg)	80	90	90			
Sintomas						
Esforço com as pernas		2	9			
Falta de ar		0	4			
Trocas Gasosas						
PEFO ₂ (mmHg)	98	92.0	107			
PEFCO ₂ (mmHg)	33	39	32			
VEM / VC Real						
pH						
PaO ₂ (mmHg)						
PaCO ₂ (mmHg)						
HCO ₃						
BE (mEq/l)						
SpO ₂	99.0	99.0	98.0			
P(A-a) O ₂ (mmHg)						
P(a-EF) CO ₂ (mmHg)						

Abreviações: LA: limiar anaeróbio, VO₂: consumo de oxigênio, VCO₂: liberação de dióxido de carbono, VE/VO₂: equivalente ventilatório para o O₂, VE/VCO₂: equivalente ventilatório para o CO₂, PEFO₂: pressão expiratória final de O₂, PEFCO₂: pressão expiratória final de CO₂, VE: volume minuto expirado, VC: volume corrente, f: frequência respiratória, FC: frequência cardíaca, VO₂/FC: pulso de oxigênio.

Figura 13 – Modelo de apresentação numérica, numa forma tabular, das variáveis metabólicas, ventilatórias e cardiovasculares obtidas num TECP incremental. Notar que os limites dos intervalos de confiança de 95%^(4,14) estão também disponíveis. Baseado na referência 4.

Previamente ao TECP, o examinado deve ser orientado a: (i) manter qualquer eventual medicação em uso (a menos que haja uma indicação específica para a interrup-

ção), (ii) observar jejum de pelo menos duas horas (nos testes realizados pela manhã um lanche leve ao acordar é obrigatório), e (iii) evitar cafeína, cigarro e exercício físico no dia do teste. O uso de roupa confortável, se possível abrigo esportivo e tênis, deve ser estimulado. Exames complementares recentes que estejam em poder do paciente também devem ser trazidos ao laboratório. A realização de testes preliminares depende de cada caso e do contexto clínico envolvido; todavia, a maior parte dos TECP provavelmente necessitarão da realização dos seguintes exames (a menos que tenham sido feitos muito recentemente): (i) espirometria simples – três manobras expiratórias forçadas acuradas e reprodutíveis – com obtenção direta ou estimada da ventilação voluntária máxima a partir do VEF_1 ($VVM = 37,5 \times VEF_1$)⁽¹⁴¹⁾ e (ii) ECG simples de repouso de 12 derivações. Adicionalmente, o médico responsável pela condução do teste deve submeter o examinado a um exame físico geral e registrar, por escrito numa ficha-padrão, os sinais vitais (incluindo pressão arterial sistêmica) e suas impressões clínicas pré-teste.

Os eletrodos do ECG devem ser posicionados de acordo com um dos arranjos derivacionais clássicos⁽¹²⁾. Após tricotomia (se necessária), deve-se desengordurar a pele com água e sabão seguidos de álcool ou éter; caso seja possível, recomenda-se realizar ligeira abrasão cutânea com lixas finas, empregando alguns poucos movimentos no mesmo sentido. Pasta eletrolítica deve ser aplicada nos eletrodos de cloreto de prata; geralmente os eletrodos descartáveis de liga de prata já contêm pasta condutora. Deve-se tomar cuidado para utilizar-se adesivos antialérgicos e, após colocação do ECG, cobrir adequadamente o tórax da paciente com roupão hospitalar descartável.

Provavelmente, o aspecto mais decisivo para a obtenção da cooperação do examinado e, portanto, de valores representativos, é a completa familiarização com o laboratório e com o equipamento. Neste sentido, alguns poucos minutos de atividade em carga “zero” no cicloergômetro ou marcha lenta na esteira podem ser muito importantes. Particularmente em relação à esteira, o examinado deve sentir-se à vontade com o ergômetro, tomando ciência dos seus mecanismos de segurança e sabendo como interromper ou reduzir sua movimentação. Deve-se, ainda, explicar cuidadosamente toda a seqüência de eventos que constituirão o teste, enfatizando – no caso do uso da bicicleta – de que a velocidade de pedalagem deve ser constante. Assegurar, entretanto, que um dispositivo visual (tipo tacômetro) esteja disponível para o controle da velocidade pelo examinado.

A explicação rápida e em linguagem acessível do significado da aparelhagem em volta – ressaltando as funções do bocal e do prendedor nasal (ou da máscara) – constitui-se num aspecto de grande relevância. De fato, a im-

QUADRO VI Esquema das etapas e procedimentos a serem observados durante a realização de um teste de exercício cardiopulmonar (TECP) incremental num contexto clínico
1. Certificar-se de que a ficha de solicitação do teste foi adequadamente preenchida e a pergunta clínica subjacente à indicação do TECP está claramente colocada
2. Explicar em linhas gerais o procedimento para o examinado, apresentar o laboratório e a aparelhagem, além de obter o <i>Consentimento por Escrito</i>
3. Realizar exame físico cardiopulmonar (anotando-se os achados) e, a menos que tenham sido feitos muito recentemente (dias), espirometria e ECG de 12 derivações
4. Familiarizar o examinado com o ergômetro e bocal/máscara: explicar detalhadamente a seqüência de eventos e cuidados a serem observados, principalmente: <ol style="list-style-type: none"> (a) Necessidade de contato não-verbal: estabelecer via de comunicação gestual (b) Enfatizar a possibilidade de interrupção do teste pelo examinado a qualquer momento (c) Explicar cuidadosamente a escala de sintomas a ser utilizada: “ancorar” o valor máximo como a “maior falta de ar/cansaço nas pernas/cansaço geral que o sr/sra já sentiu”
5. Posicionar os eletrodos de ECG respeitando um dos esquemas derivacionais descritos no texto
6. Definir o protocolo de incremento a ser obedecido, incluindo-se o tempo de repouso, carga zero e recuperação
7. No teste em si: <ol style="list-style-type: none"> (a) Manter estimulação verbal e tranquilização constantes do paciente: centrá-los no médico (b) Acompanhar atentamente a atividade elétrica cardíaca no monitor (c) Obter o traçado eletrocardiográfico, a pressão arterial sistêmica e a saturação da oxihemoglobina a cada minuto (d) Inquirir, minuto-a-minuto, acerca dos sintomas de acordo com uma das escalas disponíveis (Figura 12), anotando os valores numa ficha-padrão (e) Observar atentamente a ausência de fuga aérea junto ao bocal ou no restante do sistema: certificar-se de que os valores registrados são fisiologicamente coerentes
8. Obedecer rigidamente aos critérios de interrupção do teste descritos no Quadro VII
9. Após a retirada do bocal/máscara, inquirir acerca da natureza e intensidade dos sintomas limitantes: anotá-los na ficha-padrão
10. Certificar-se da normalização do ECG (documentando-a) e da pressão arterial sistêmica antes da liberação do examinado.

portância fundamental do bocal deve ser enfatizada, bem como a explicação (ou mesmo demonstração, com outro bocal) de como o examinado deve manter os lábios em torno do dispositivo, sem a necessidade de mordê-lo. Deve-se ainda estimular um teste com o bocal antes do início do procedimento, observando a completa vedação da abertura oral: caso próteses dentárias móveis compliquem o seu posicionamento, estas deverão ser retiradas. As máscaras faciais devem ser cuidadosamente ajustadas à morfologia fascial: o uso de barba, mas não de bigode, pode ser uma contra-indicação para o emprego da máscara.

Finalmente, mas não menos importante, é crucial o estabelecimento de uma boa via de comunicação gestual durante o teste (sinal de positivo ou negativo às indagações do médico). Deve-se informar especificamente que deglutir saliva ou tossir é plenamente possível, mas o con-

tato com a equipe não pode ser verbal – mesmo com o uso de máscara. Toda a equipe deve estar ciente de que a comunicação com paciente durante o teste deve ser centrada no médico acompanhante. Cuidado especial deve ser tomado para se evitar qualquer diálogo entre os membros da equipe durante o procedimento – a menos que seja relacionado ao teste e absolutamente indispensável.

Segurança

Embora a mortalidade durante o TECP geral não seja elevada (0-5 casos/100.000),⁽¹⁾ a ocorrência de emergências numa população clínica pode ser razoavelmente frequente. Desta forma, nenhum TECP pode ser realizado sem a presença do material necessário (incluindo desfibrilador ligado e pronto para o uso) e de pessoal treinado em reanimação cardiopulmonar. Uma estratégia de conduta em equipe, em caso de emergência, deve ser de

QUADRO VII Contra-indicações absolutas e relativas para a realização do teste de exercício e indicações clínicas para a sua interrupção⁽¹⁴⁶⁾	
Contra-indicações para a realização do teste de exercício	Indicações para a interrupção do teste de exercício
<p>Absolutas Doença febril aguda Infarto miocárdio recente (3-5 dias) Angina instável Arritmias cardíacas não-controladas Bloqueio atrioventricular de 3º grau Insuficiência cardíaca congestiva não-controlada Suspeita de aneurisma dissecante da aorta Tromboflebite ou trombo intracardíaco Embolia pulmonar ou sistêmica recente Pericardite ou miocardite ativos Pressão arterial sistêmica sistólica > 250mmHg Pressão arterial sistêmica diastólica > 120mmHg Edema pulmonar Estenose aórtica grave Insuficiência respiratória aguda Alterações eletrolíticas intensas Doença metabólica sistêmica não-controlada SaO₂ de repouso < 85%</p> <p>Relativas Doença valvular descompensada Ectopia ventricular freqüente e complexa Aneurisma ventricular Doenças tromboembólicas crônicas Epilepsia Gravidez de risco ou avançada Doença cerebrovascular Doença infecciosa crônica Taquicardia de repouso (FC > 120bpm) Anormalidades no ECG de repouso Cardiomiopatia</p>	<p>Dor torácica importante Palidez e sudorese fria Desorientação e perda da coordenação Tonturas e pré-lipotímia Dispneia intolerável Cianose Depressão significativa do segmento ST Inversão de ondas T e surgimento de onda Q Ectopia ventricular progressiva e multifórmica Aparecimento de onda R sobre onda T Salvas de 3 ou mais extrassístoles ventriculares Taquicardia paroxística ventricular Bloqueio atrioventricular de 2º ou 3º graus Pressão arterial sistólica > 250mmHg Pressão arterial diastólica > 120mmHg Queda da pressão sistólica > 20mmHg Padrão de bloqueio de ramo esquerdo Insuficiência cronotrópica intensa Taquicardia supraventricular sustentada SaO₂ de exercício < 80% Claudicação sintomática Paciente solicita a interrupção</p>

domínio do pessoal envolvido na assistência ao teste: tal estratégia deve ser periodicamente lembrada e ensaiada. Habitualmente, o acompanhamento por um médico e um técnico treinado é o suficiente - em situações de coleta sanguínea, a presença de um terceiro indivíduo é recomendável. O **Quadro VII** traz as contra-indicações para a realização do teste e as indicações para a sua interrupção por critérios médicos, tanto relativas quanto absolutas⁽¹⁴⁶⁾.

Cuidados trans- e pós-TECP

Deve-se tomar o cuidado de registrar os diversos sinais numa condição basal de repouso por, no mínimo, dois minutos (ver também *Protocolos*). Apenas após este período - ou mais, no caso de o examinado ainda apresentar evidências de hiperventilação voluntária (e.g., valores de $R > 0,90$ e $PEFCO_2$ abaixo de 35, na ausência de hipoxemia) - o mesmo deve ser estimulado a iniciar o exercício. Durante a cicloergometria, é importante que o indivíduo seja continuamente lembrado a manter uma frequência de rotação dos pedais entre 50 e 75rpm - o ideal seria algo entre 55-60rpm. Paralelamente à estimulação verbal do examinado pelo médico acompanhante, deve-se: (i) acompanhar a atividade elétrica cardíaca no monitor; (ii) obter-se o traçado eletrocardiográfico, a pressão arterial sistêmica e a saturação da oxihemoglobina a cada minuto - caso estes sinais não entrem *online* no sistema metabólico, um técnico deve anotá-los numa ficha-padrão de acompanhamento do teste; (iii) inquirir minuto-a-minuto acerca dos sintomas utilizando-se as escalas específicas (**Figura 12**), anotando também os valores na citada ficha-padrão, e (iv) observar continuamente a ausência de fuga aérea junto ao bocal ou no restante do sistema.

Após a interrupção do teste, o indivíduo deve, sempre que possível, realizar recuperação ativa (exercitando-se a cargas baixas ou mesmo carga zero), ainda conectado ao bocal com registro das variáveis por no máximo 3-6 minutos. O TECP pode ser interrompido a critério do examinado ou do médico acompanhante. A cessação da atividade pelo paciente deve ser provocada por sintomas limitantes: dispnéia, dor nas pernas, dor torácica, tonturas, fadiga geral ou qualquer outro sintoma impeditivo do prosseguimento do exercício. Por outro lado, o teste pode ser interrompido a critério médico, desde que se evidencie um ou mais dos achados descritos no **Quadro VII**: as indicações relativas devem ser avaliadas na situação específica de cada teste, à luz das condições de base do paciente. No caso de término do teste por solicitação do examinado, este deve ser cuidadosamente inquirido acerca da natureza e intensidade do(s) sintoma(s) limitante(s), procurando, por exemplo, diferenciar os sintomas de dispnéia e fadiga geral. Da mesma forma, ao final do teste, o médico acompanhante deve sempre relatar por escrito

suas impressões subjetivas quanto ao grau de cooperação e empenho do examinado.

Após o final do teste, o ECG deve ser acompanhado pelo tempo necessário à volta às condições pré-teste, com documentação do traçado normalizado. No caso da realização de punção arterial para a análise dos gases sanguíneos, esta deve ser realizada pouco antes do final do teste - e não após a interrupção - já que o retorno venoso e o padrão ventilatório mudam muito rapidamente após o final da atividade. No caso da verificação do nível de *stress* acidótico com uma única amostragem sanguínea (lactatemia e bicarbonato-padrão, por exemplo), a coleta deve ser realizada cerca de 2-4 minutos após o final do teste - próxima, portanto, do pico máximo de remoção muscular do lactato. Quando o teste envolver canulação arterial, o local deve ser comprimido por pelo menos 10-15 minutos após a retirada da cânula e o paciente deve ser orientado a não remover a bandagem, além de evitar esforço com o membro superior por pelo menos seis horas. Finalmente, em caso de esforço submáximo ou interrupção por problemas técnicos, o teste pode ser repetido em 30-45 minutos, de acordo com o esforço despendido e o nível de aptidão do examinado. Todavia, um novo teste deve ser agendado para pacientes debilitados ou pouco cooperativos.

Relatório final

Tal relatório deve ser conciso o suficiente para expressar uma resposta objetiva à indagação clínica em questão, mas também deve conter um apanhado breve do arrazoado fisiopatológico que levou à(s) conclusão(ões) fundamental(is). Como discutido anteriormente, a interpretação do TECP deve ser sempre feita à luz da pergunta clínica que orientou a indicação do teste e, portanto, o relatório final deve ser coerente com esta perspectiva. Um exemplo prático de um laudo referente a um teste normal é apresentado na **Figura 14**.

Particularmente, deve-se atentar para: (i) descrever o tipo de protocolo e ergômetro utilizados; (ii) avaliar sistematicamente as impressões anotadas durante o teste, tanto em relação à cooperação do examinado quanto aos detalhes técnicos - e considerá-las no texto; (iii) procurar inferir acerca da representatividade dos achados para as atividades da vida diária e para os sintomas apresentados; (iv) recomendar, se possível e pertinente, os próximos passos e condutas investigativas para o paciente; e, provavelmente o mais importante, (v) evitar qualquer opinião diagnóstica ou prognóstica especulativa, i.e., não consubstanciada pelos dados objetivos encontrados. Finalmente, deve-se anexar cópias de boa qualidade da forma tabular descritiva das principais variáveis de interesse (**Figura 13**) e, pelo menos, do painel-padrão de oito gráficos (**Figura 10**).

HOSPITAL XXXXXXXX		
LABORATÓRIO DE TESTES FUNCIONAIS TESTE DE EXERCÍCIO CARDIOPULMONAR		
Paciente: L.M.N.	Prontuário nº: 2857	Data: 08/08/2001
Sexo: M	Idade: 51	
<p>INDICAÇÃO: Determinação objetiva da tolerância ao exercício e avaliação dos mecanismos responsáveis por eventual limitação da capacidade física. Paciente com história e exames complementares sugestivos de doença intersticial pulmonar incipiente.</p> <p>PROTÓCOLO: O paciente realizou teste de exercício cardiopulmonar num cicloergômetro de frenagem eletromagnética, seguindo um protocolo de incrementos progressivos de carga (20W/min) até o limite máximo da tolerância. Sintomas relacionados ao esforço foram obtidos a cada minuto (escala de Borg); ECG de esforço e oximetria digital de pulso foram seguidos continuamente.</p> <p>CONDIÇÕES TÉCNICAS: Calibração adequada do sistema (XXXX) imediatamente antes do procedimento. Teste realizado em condições técnicas adequadas com cooperação satisfatória do examinado.</p> <p>INTERPRETAÇÃO: Exercício interrompido pelo examinado a 100W, com evidências objetivas e subjetivas de esforço máximo.</p> <p><i>Respostas metabólicas</i></p> <ul style="list-style-type: none">– Consumo máximo de O₂ ($\dot{V}O_2$ máx) dentro dos limites da normalidade: valores de $\dot{V}O_2$ máx indicativos de baixo nível de desempenho aeróbio. Padrão fisiológico de incremento do $\dot{V}O_2$ em relação à carga imposta, com inclinação normal da relação $\dot{V}O_2$/carga.– Limiar de lactato estimado (% do $\dot{V}O_2$ máx previsto) dentro do esperado, mas próximo ao limite inferior da normalidade para indivíduos sedentários do mesmo sexo e idade. <p><i>Respostas cardiovasculares</i></p> <ul style="list-style-type: none">– Ausência de reserva cronotrópica no pico da atividade.– Padrão fisiológico de incremento da FC e do pulso de O₂: valores máximos do pulso de O₂ reduzidos. A inclinação da relação submáxima entre FC e $\dot{V}O_2$, embora desviada para cima, mostrou-se normal.– Ausência de alterações eletrocardiográficas até a intensidade de exercício realizada. <p><i>Respostas ventilatórias e de troca gasosa</i></p> <ul style="list-style-type: none">– Presença de reserva ventilatória fisiológica no exercício máximo.– A inclinação da relação entre ventilação e a demanda metabólica ao exercício ($\dot{V}E/\dot{V}CO_2$) esteve dentro dos limites previstos.– Padrão respiratório normal, com incremento esperado do volume corrente e frequência respiratória máxima dentro da esperada.– Ausência de dessaturação da oxihemoglobina. <p><i>Respostas subjetivas</i></p> <ul style="list-style-type: none">– “Dor nas pernas” (8/10) foi o sintoma limitante: “cansaço geral” (5/10) e “falta de ar” (4/10) foram considerados sintomas secundários.– Ausência de dor torácica ou qualquer outro sintoma. <p>CONCLUSÃO: Teste de exercício cardiopulmonar demonstrando tolerância adequada ao exercício dinâmico progressivo, sem evidências de anormalidades ou limitação cardiovascular, ventilatória ou na troca gasosa pulmonar.</p> <p>COMENTÁRIOS ADICIONAIS: Embora o paciente não apresente intolerância ao esforço, diversos dados são compatíveis com baixa aptidão aeróbia. Tais respostas sugerem destreinamento crônico (sedentarismo): considerando-se, entretanto, os valores de $\dot{V}O_2$ máx preservados, é improvável que o paciente apresente limitação substancial para realizar atividades da vida diária.</p>		
_____ Dr. XXXXXXXX		

Figura 14 – Representação esquemática de laudo-padrão referente a um TECP incremental realizado num indivíduo sem anormalidades aparentes na tolerância ao exercício dinâmico. Baseado na referência 4.

PARTE III. VALORES DE REFERÊNCIA

Existem diversas fontes de referência para a análise clínica do desempenho ao exercício em indivíduos adultos^(2,5,14,5,61,147). Infelizmente, a esmagadora maioria destes valores de referência foram obtidos em estudos não-randomizados, utilizando voluntários ou dados obtidos retrospectivamente em indivíduos nos quais uma óbvio anormalidade não foi evidenciada. Tais valores constituem-se, provavelmente, numa superestimação dos verdadeiros valores esperados para populações acentuadamente sedentárias: de fato, esta limitação foi reconhecida pelo documento oficial da *European Respiratory Society* acerca do TECP⁽¹⁾.

O único estudo publicado até o momento com metodologia randomizada foi realizada em nosso meio⁽¹⁴⁾. Tal fonte de referência tem ainda a vantagem adicional de ter sido obtida numa amostra com características demográficas e antropométricas semelhantes às da população brasileira adulta. Entretanto, tais padrões não são úteis para a previsão da capacidade máxima de exercício de atletas; nos indivíduos particularmente ativos, deve-se sempre le-

var em consideração o nível de atividade física regular para a previsão do $\dot{V}O_2$ máx (equações 4 da **Tabela II**). Embora tais valores sejam aplicáveis particularmente à cicloergometria, os valores de $\dot{V}O_2$ máx previsto para o exercício realizado na esteira ergométrica podem ser estimados pela multiplicação dos valores previstos por 1,11⁽²⁾.

As **Tabelas II-IV** apresentam uma ampla fonte de consulta para a previsão dos valores esperados em resposta ao exercício dinâmico incremental em sedentários aparentemente saudáveis. As **Tabelas V e VI** são particularmente importantes: elas trazem uma extensa relação de pontos-de-corte da “normalidade”, idade- e sexo-ajustados, para a interpretação clínica do TECP. Note-se, entretanto, que estas são apenas recomendações gerais para indivíduos com características antropométricas similares às “médias” encontradas na amostra avaliada: recomenda-se, assim, calcular individualmente os valores previstos de acordo com as equações de regressão apresentadas nas **Tabelas II-IV**. Outras considerações acerca de tais valores foram discutidos na parte *Variáveis e Parâmetros de Relevância Clínica*. Valores de referência para variáveis obtidas invasivamente, *i.e.*, hemodinâmicas e gasométricas, estão disponíveis nos livros-texto acerca do TECP^(2,4,5).

TABELA V

Pontos-de-corte sugeridos para a interpretação do TECP em homens sedentários adultos. Valores calculados de acordo com idade e características antropométricas específicas*. Notar que alguns valores podem ser marcadamente diferentes em homens com peso e altura distintos dos utilizados

	20 anos	40 anos	60 anos	80 anos
$\dot{V}O_2$ máx (L/min)	> 2,3	> 1,8	> 1,5	> 1,3
θ L (% $\dot{V}O_2$ máx)	> 35	> 40	> 45	> 55
$\Delta\dot{V}O_2/\Delta\dot{W}$ (ml/min/W)	> 9,8	> 9,8	> 9,8	> 9,8
FCmáx (bpm)	> 175	> 160	> 150	> 130
PuO ₂ máx (ml/min/bat)	> 12	> 10	> 9	> 7
Δ FC/ $\Delta\dot{V}O_2$ (bat/L/min)	< 60	< 70	< 80	< 90
$\dot{V}E$ máx/VVM	< 0,85	< 0,85	< 0,85	< 0,85
$\dot{V}E$ máx/VVM θ L	< 0,35	< 0,40	< 0,45	< 0,50
$\dot{V}E$ máx-VVM (L)	> 20	> 20	> 15	> 10
<i>f</i> máx (rpm)	< 60	< 50	< 45	< 45
VC máx (L)	> 2,3	> 2,1	> 1,9	> 1,6
<i>f</i> /VC máx (rpm/L)	< 28	< 28	< 28	< 28
Δ VC/ Δ ln $\dot{V}E$	> 0,65	> 0,63	> 0,60	> 0,60
VC máx/CI (mL/mL)	< 0,85	< 0,85	< 0,85	< 0,85
$\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ θ L (L/L)	< 32	< 34	< 38	< 42
PEFCO ₂ θ L (mmHg)	> 43	> 41	> 39	> 37
$\Delta\dot{V}E/\Delta\dot{V}CO_2$ (L/L)	< 27	< 29	< 31	< 33

* 20 anos: 171cm e 70kg, 40 anos: 169cm e 76kg, 60 anos: 168cm e 78kg, 80 anos: 167cm e 70kg.

Definição das abreviações: máx: referente ao exercício máximo, $\dot{V}O_2$: consumo de oxigênio, θ L: limiar de lactato estimado, W: taxa de trabalho ou potência, FC: frequência cardíaca, PuO₂: pulso de oxigênio, $\dot{V}E$: volume minuto expirado, VVM: ventilação voluntária máxima, *f*: frequência respiratória, VC: volume corrente, ln = logaritmo natural, CI: capacidade inspiratória, $\dot{V}CO_2$: liberação de dióxido de carbono, PEFCO₂: pressão expiratória final de CO₂.

TABELA VI

Pontos-de-corte sugeridos para a interpretação do TECP em mulheres sedentárias adultas. Valores calculados de acordo com idade e aspectos antropométricos específicos*. Notar que alguns valores podem ser diferentes em mulheres com peso e altura discrepantes dos aqui utilizados

	20 anos	40 anos	60 anos	80 anos
$\dot{V}O_2$ máx (L/min)	> 1,5	> 1,2	> 1,0	> 0,9
θ L (% $\dot{V}O_2$ máx)	> 42	> 42	> 52	> 58
$\Delta\dot{V}O_2/\Delta\dot{W}$ (ml/min/W)	> 8,5	> 8,5	> 8,5	> 8,5
FCmáx (bpm)	> 170	> 155	> 145	> 125
PuO ₂ máx (ml/min/bat)	> 10	> 8	> 7	> 6
Δ FC/ $\Delta\dot{V}O_2$ (bat/L/min)	< 85	< 90	< 100	< 105
$\dot{V}E$ máx/VVM	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75
$\dot{V}E$ máx/VVM θ L	< 0,40	< 0,40	< 0,45	< 0,50
$\dot{V}E$ máx-VVM (L)	> 28	> 28	> 20	> 20
<i>f</i> máx (rpm)	< 50	< 50	< 50	< 45
VC máx (L)	> 1,5	> 1,5	> 1,2	> 0,9
<i>f</i> /VC máx (rpm/L)	< 30	< 30	< 35	< 40
Δ VC/ Δ ln $\dot{V}E$	> 0,60	> 0,50	> 0,50	> 0,45
VC máx/CI (L/L)	< 0,80	< 0,80	< 0,80	< 0,80
$\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ θ L (L/L)	< 36	< 38	< 40	< 42
PEFCO ₂ θ L (mmHg)	> 41	> 40	> 39	> 37
$\Delta\dot{V}E/\Delta\dot{V}CO_2$ (L/L)	< 28	< 30	< 32	< 35

* 20 anos: 171cm e 70kg, 40 anos: 169cm e 76kg, 60 anos: 168cm e 78kg, 80 anos: 167cm e 70kg.

Definição das abreviações: ver TABELA V.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao suporte competente fornecido pelo pessoal técnico do Laboratório de Exercício e Função Pulmonar da Disciplina de Pneumologia da Unifesp/EPM.

As atividades de J.A. Neder foram patrocinadas pelo CNPq, Fapesp e *European Respiratory Society* (ERS).

REFERÊNCIAS

1. Clinical exercise testing with reference to lung diseases: indications, standardization and interpretation strategies. European Respiratory Society Task Force on Standardization of Clinical Exercise Testing. *Eur Respir J* 1997;10:2662-89.
2. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Casaburi R, Whipp BJ. Principles of exercise testing and interpretation. 3rd ed. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins, 1999.
3. Weber KT, Janicki JS. Cardiopulmonary exercise testing: physiologic principles and clinical applications. Philadelphia: WB Saunders, 1986.
4. Neder JA, Nery LE. Fisiologia clínica do exercício: teoria e prática. São Paulo: Artes Médicas, 2002.
5. Jones NL. Clinical exercise testing. 4th ed. Philadelphia: W.B. Saunders, 1997.
6. Lear SA, Brozic A, Myers JN, Ignaszewski A. Exercise stress testing. An overview of current guidelines. *Sports Med* 1999;27:285-312.
7. Schlant RC, Blomqvist CG, Brandenburg RO, DeBusk R, Ellestad MH, Fletcher GF, et al. Guidelines for exercise testing. A report of the Joint American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Assessment of Cardiovascular Procedures (Subcommittee on Exercise Testing). *Circulation* 1986;74:653A-67A.
8. Gibbons RJ, Balady GJ, Beasley JW, Bricker JT, Duvernoy WF, Froelicher VF, et al. ACC/AHA guidelines for exercise testing: executive summary. A report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines (Committee on Exercise Testing). *Circulation* 1997;96:345-54.
9. Myers JN. Essentials of cardiopulmonary exercise testing. 1st ed. Champaign: Human Kinetics, 1996.
10. Leff AR. Cardiopulmonary exercise testing. Orlando: Grune & Stratton, 1986.
11. Fletcher GF, Froelicher VF, Hartley LH, Haskell WL, Pollock ML. Exercise standards. A statement for health professionals from the American Heart Association. *Circulation* 1990;82:2286-322.
12. National Consensus on Ergometry. Department of Ergometry and Cardiovascular Rehabilitation of the Brazilian Cardiology Society. *Arq Bras Cardiol* 1995;65:189-211.
13. Neder JA, Nery LE, Silva AC, Andreoni S, Whipp BJ. Maximal aerobic power and leg muscle mass and strength related to age in non-athletic males and females. *Eur J Appl Physiol* 1999;79:522-30.
14. Neder JA, Nery LE, Castelo A, Andreoni S, Lerario MC, Sachs A, et al. Prediction of metabolic and cardiopulmonary responses to maximum cycle ergometry: a randomized study. *Eur Respir J* 1999;14:1304-13.
15. Neder JA, Nery LE, Andreoni S, Sachs A, Whipp BJ. Oxygen cost for cycling as related to leg mass in males and females, aged 20 to 80. *Int J Sports Med* 2000;21:263-9.
16. Whipp BJ. The bioenergetic and gas exchange basis of exercise testing. *Clin Chest Med* 1994;15:173-92.
17. Astrand P-O, Rodahl K. Textbook of work physiology. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1986.
18. Wasserman K, Whipp BJ. Exercise physiology in health and disease. *Am Rev Respir Dis* 1975;112:219-49.
19. Brooks GA. Anaerobic threshold: review of the concept and directions for future research. *Med Sci Sports Exerc* 1985;17:22-34.
20. Wasserman K, Stringer WW, Casaburi R, Koike A, Cooper CB. Determination of the anaerobic threshold by gas exchange: biochemical considerations, methodology and physiological effects. *Z Kardiol* 1994; 83(Suppl 3):1-12.
21. Wasserman K. Determinants and detection of anaerobic threshold and consequences of exercise above it. *Circulation* 1987;76(6 Pt 2):VI29-VI39.
22. Whipp BJ, Ward SA, Wasserman K. Ventilatory responses to exercise and their control in man. *Am Rev Respir Dis* 1984;129(2 Pt 2):S17-S20.
23. Whipp BJ. Ventilatory control during exercise in humans. *Annu Rev Physiol* 1983;45:393-413.
24. Dempsey JA, Johnson BD, Saupe KW. Adaptations and limitations in the pulmonary system during exercise. *Chest* 1990;97(3 Suppl):81S-7S.
25. Johnson BD, Reddan WG, Pegelow DF, Seow KC, Dempsey JA. Flow limitation and regulation of functional residual capacity during exercise in a physically active aging population. *Am Rev Respir Dis* 1991;143(5 Pt 1):960-7.
26. Dempsey JA, Harms CA, Ainsworth DM. Respiratory muscle perfusion and energetics during exercise. *Med Sci Sports Exerc* 1996;28:1123-8.
27. Glenny R, Wagner PD, Roca J, Rodriguez-Roisin R. Gas exchange in health: rest, exercise, and aging. In: Roca J, Rodriguez-Roisin R, Wagner PD, eds. Pulmonary and peripheral gas exchange in health and disease. New York: Marcel Dekker, 2000;121-48.
28. Rowell LB. Human cardiovascular control. New York: Oxford University Press, 1993.
29. Rerych SK, Scholz PM, Newman GE, Sabiston DC, Jones RH. Cardiac function at rest and during exercise in normals and in patients with coronary heart disease: evaluation by radionuclide angiocardiology. *Ann Surg* 1978;187:449-64.
30. Higginbotham MB, Morris KG, Williams RS, McHale PA, Coleman RE, Cobb FR. Regulation of stroke volume during submaximal and maximal upright exercise in normal man. *Circ Res* 1986;58:281-91.
31. Sullivan MJ, Cobb FR, Higginbotham MB. Stroke volume increases by similar mechanisms during upright exercise in normal men and women. *Am J Cardiol* 1991;67:1405-12.
32. Poliner LR, Dehmer GJ, Lewis SE, Parkey RW, Blomqvist CG, Willerson JT. Left ventricular performance in normal subjects: a comparison of the responses to exercise in the upright and supine positions. *Circulation* 1980;62:528-34.
33. Ward SA, Whipp BJ. Coordination of circulation and respiration during exercise. In: Greger R, Windhorst U, editors. Comprehensive human physiology. Berlin: Springer-Verlag, 1996;2145-78.
34. Hamilton AL, Killian KJ, Summers E, Jones NL. Quantification of intensity of sensations during muscular work by normal subjects. *J Appl Physiol* 1996;81:1156-61.
35. Killian KJ, Campbell EJ. Dyspnea and exercise. *Annu Rev Physiol* 1983;45:465-79.
36. Jones NL, Killian KJ. Exercise limitation in health and disease. *N Engl J Med* 2000;343:632-41.
37. Killian KJ, Summers E, Jones NL, Campbell EJ. Dyspnea and leg effort during incremental cycle ergometry. *Am Rev Respir Dis* 1992; 145:1339-45.
38. Palange P, Carlone S, Forte S, Galassetti P, Serra P. Cardiopulmonary exercise testing in the evaluation of patients with ventilatory vs circulatory causes of reduced exercise tolerance. *Chest* 1994;105:1122-6.
39. Sridhar MK, Carter R, Banham SW, Moran F. An evaluation of integrated cardiopulmonary exercise testing in a pulmonary function laboratory. *Scott Med J* 1995;40:113-6.

40. DePaso WJ, Winterbauer RH, Lusk JA, Dreis DF, Springmeyer SC. Chronic dyspnea unexplained by history, physical examination, chest roentgenogram, and spirometry. Analysis of a seven-year experience. *Chest* 1991;100:1293-9.
41. Pratter MR, Curley FJ, Dubois J, Irwin RS. Cause and evaluation of chronic dyspnea in a pulmonary disease clinic. *Arch Intern Med* 1989; 149:2277-82.
42. Bersácola SH, Pereira CAC, Silva RCC, Ladeira RM. Dispneia crônica de causa indeterminada: avaliação de um protocolo de investigação em 90 pacientes. *J Pneumol* 1998;24:283-97.
43. Brown HV, Wasserman K, Whipp BJ. Strategies of exercise testing in chronic lung disease. *Bull Eur Physiopathol Respir* 1977;13:409-23.
44. O'Donnell DE. Assessment of bronchodilator efficacy in symptomatic COPD: is spirometry useful? *Chest* 2000;117(2 Suppl):42S-7S.
45. O'Donnell DE, Webb KA. Exertional breathlessness in patients with chronic airflow limitation. The role of lung hyperinflation. *Am Rev Respir Dis* 1993;148:1351-7.
46. Tjahja IE, Reddy HK, Janicki JS, Weber KT. Evolving role of cardiopulmonary exercise testing in cardiovascular disease. *Clin Chest Med* 1994;15:271-85.
47. O'Donnell DE, Lam M, Webb KA. Spirometric correlates of improvement in exercise performance after anticholinergic therapy in chronic obstructive pulmonary disease. *Am J Respir Crit Care Med* 1999;160: 542-9.
48. O'Donnell DE, D'Arsigny C, Raj S, Abdollah H, Webb KA. Ventilatory assistance improves exercise endurance in stable congestive heart failure. *Am J Respir Crit Care Med* 1999;160:1804-11.
49. Hay JG, Stone P, Carter J, Church S, Eyre-Brook A, Pearson MG, et al. Bronchodilator reversibility, exercise performance and breathlessness in stable chronic obstructive pulmonary disease. *Eur Respir J* 1992; 5:659-64.
50. Metra M, Nardi M, Giubbini R, Dei CL. Effects of short- and long-term carvedilol administration on rest and exercise hemodynamic variables, exercise capacity and clinical conditions in patients with idiopathic dilated cardiomyopathy. *J Am Coll Cardiol* 1994;24:1678-87.
51. Sullivan M, Atwood JE, Myers J, Feuer J, Hall P, Kellerman B, et al. Increased exercise capacity after digoxin administration in patients with heart failure. *J Am Coll Cardiol* 1989;13:1138-43.
52. Stewart KJ, Effron MB, Valenti SA, Kelemen MH. Effects of diltiazem or propranolol during exercise training of hypertensive men. *Med Sci Sports Exerc* 1990;22:171-7.
53. Carone M, Patessio A, Appendini L, Purro A, Czernicka E, Zanaboni S, et al. Comparison of invasive and noninvasive saturation monitoring in prescribing oxygen during exercise in COPD patients. *Eur Respir J* 1997;10:446-51.
54. Braun SR, Spratt G, Scott GC, Ellersieck M. Comparison of six oxygen delivery systems for COPD patients at rest and during exercise. *Chest* 1992;102:694-8.
55. Revill SM, Singh SJ, Morgan MD. Randomized controlled trial of ambulatory oxygen and an ambulatory ventilator on endurance exercise in COPD. *Respir Med* 2000;94:778-83.
56. Weber KT, Kinasewitz GT, Janicki JS, Fishman AP. Oxygen utilization and ventilation during exercise in patients with chronic cardiac failure. *Circulation* 1982;65:1213-23.
57. Mancini DM, Eisen H, Kussmaul W, Mull R, Edmunds LH, Wilson JR. Value of peak exercise oxygen consumption for optimal timing of cardiac transplantation in ambulatory patients with heart failure. *Circulation* 1991;83:778-86.
58. Myers J, Gullestad L, Vagelos R, Do D, Bellin D, Ross H, et al. Clinical, hemodynamic, and cardiopulmonary exercise test determinants of survival in patients referred for evaluation of heart failure. *Ann Intern Med* 1998;129:286-93.
59. Myers J, Gullestad L, Vagelos R, Do D, Bellin D, Ross H, et al. Cardiopulmonary exercise testing and prognosis in severe heart failure: 14 mL/kg/min revisited. *Am Heart J* 2000;139(1 Pt 1):78-84.
60. Ramos-Barbon D, Fitchett D, Gibbons WJ, Latter DA, Levy RD. Maximal exercise testing for the selection of heart transplantation candidates: limitation of peak oxygen consumption. *Chest* 1999;115:410-7.
61. Hansen JE, Sue DY, Wasserman K. Predicted values for clinical exercise testing. *Am Rev Respir Dis* 1984;129(2 Pt 2):S49-S55.
62. Neder JA, Nery LE, Bagatin E, Lucas SR, Ancao MS, Sue DY. Differences between remaining ability and loss of capacity in maximum aerobic impairment. *Braz J Med Biol Res* 1998;31:639-46.
63. Weber KT, Janicki JS. Lactate production during maximal and sub-maximal exercise in patients with chronic heart failure. *J Am Coll Cardiol* 1985;6:717-24.
64. Mudge GH, Goldstein S, Addonizio LJ, Caplan A, Mancini D, Levine TB, et al. 24th Bethesda conference: Cardiac transplantation. Task Force 3: Recipient guidelines/prioritization. *J Am Coll Cardiol* 1993; 22:21-31.
65. Stelken AM, Younis LT, Jennison SH, Miller DD, Miller LW, Shaw LJ, et al. Prognostic value of cardiopulmonary exercise testing using percent achieved of predicted peak oxygen uptake for patients with ischemic and dilated cardiomyopathy. *J Am Coll Cardiol* 1996;27:345-52.
66. Osada N, Chaitman BR, Miller LW, Yip D, Cishek MB, Wolford TL, et al. Cardiopulmonary exercise testing identifies low risk patients with heart failure and severely impaired exercise capacity considered for heart transplantation. *J Am Coll Cardiol* 1998;31:577-82.
67. Cohen-Solal A, Barnier P, Pessione F, Seknadji P, Logeart D, Laperche T, et al. Comparison of the long-term prognostic value of peak exercise oxygen pulse and peak oxygen uptake in patients with chronic heart failure. *Heart* 1997;78:572-6.
68. Francis DP, Shamim W, Davies LC, Piepoli MF, Ponikowski P, Anker SD, et al. Cardiopulmonary exercise testing for prognosis in chronic heart failure: continuous and independent prognostic value from VE/VCO₂ slope and peak VO₂. *Eur Heart J* 2000;21:154-61.
69. Ponikowski P, Francis DP, Piepoli MF, Davies LC, Chua TP, Davos CH, et al. Enhanced ventilatory response to exercise in patients with chronic heart failure and preserved exercise tolerance: marker of abnormal cardiorespiratory reflex control and predictor of poor prognosis. *Circulation* 2001;103:967-72.
70. Leite JJ, Mansur AJ, Freitas FG, Bochi E, Terra-Filho M, Lorenzi-Filho G. Periodic ventilation in awake patients with chronic heart failure in cardiopulmonary exercise testing predicts cardiac mortality. *Am J Respir Crit Care Med* 2000;161:A427.
71. Schrijen F, Ferrara G, Romero CP, Sadoul P. Is it possible to predict pulmonary arterial hypertension from an exercise test? *G Ital Cardiol* 1984;14(Suppl 1):56-60.
72. Hansen JE, Wasserman K. Exercise testing in patients with interstitial lung disease. *Chest* 1998;113:1148-9.
73. Simard AA, Maltais F, LeBlanc P. Functional outcome of patients with chronic obstructive pulmonary disease and exercise hypercapnia. *Eur Respir J* 1995;8:1339-44.
74. Kawakami Y, Terai T, Yamamoto H, Murao M. Exercise and oxygen inhalation in relation to prognosis of chronic obstructive pulmonary disease. *Chest* 1982;81:182-8.
75. Anthonisen NR, Wright EC, Hodgkin JE. Prognosis in chronic obstructive pulmonary disease. *Am Rev Respir Dis* 1986;133:14-20.
76. Colman NC, Schraufnagel DE, Rivington RN, Pardy RL. Exercise testing in evaluation of patients for lung resection. *Am Rev Respir Dis* 1982;125:604-6.

77. Smith TP, Kinasewitz GT, Tucker WY, Spillers WP, George RB. Exercise capacity as a predictor of post-thoracotomy morbidity. *Am Rev Respir Dis* 1984;129:730-4.
78. Bechard D, Wetstein L. Assessment of exercise oxygen consumption as preoperative criterion for lung resection. *Ann Thorac Surg* 1987; 44:344-9.
79. Morice RC, Peters EJ, Ryan MB, Putnam JB, Ali MK, Roth JA. Exercise testing in the evaluation of patients at high risk for complications from lung resection. *Chest* 1992;101:356-61.
80. Walsh GL, Morice RC, Putnam JB, Nesbitt JC, McMurtrey MJ, Ryan MB, et al. Resection of lung cancer is justified in high-risk patients selected by exercise oxygen consumption. *Ann Thorac Surg* 1994; 58:704-10.
81. Bolliger CT, Jordan P, Soler M, Stulz P, Gradel E, Skarvan K, et al. Exercise capacity as a predictor of postoperative complications in lung resection candidates. *Am J Respir Crit Care Med* 1995;151:1472-80.
82. Richter LK, Svendsen UG, Milman N, Brenoe J, Petersen BN. Exercise testing in the preoperative evaluation of patients with bronchogenic carcinoma. *Eur Respir J* 1997;10:1559-65.
83. Wyser C, Stulz P, Soler M, Tamm M, Muller-Brand J, Habicht J, et al. Prospective evaluation of an algorithm for the functional assessment of lung resection candidates. *Am J Respir Crit Care Med* 1999;159(5 Pt 1):1450-6.
84. Gilbreth EM, Weisman IM. Role of exercise stress testing in preoperative evaluation of patients for lung resection. *Clin Chest Med* 1994; 15:389-403.
85. Brutsche MH, Spiliopoulos A, Bolliger CT, Licker M, Frey JG, Tschopp JM. Exercise capacity and extent of resection as predictors of surgical risk in lung cancer. *Eur Respir J* 2000;15:828-32.
86. Bolliger CT, Wyser C, Roser H, Soler M, Perruchoud AP. Lung scanning and exercise testing for the prediction of postoperative performance in lung resection candidates at increased risk for complications. *Chest* 1995;108:341-8.
87. Wang JS, Abboud RT, Evans KG, Finley RJ, Graham BL. Role of CO diffusing capacity during exercise in the preoperative evaluation for lung resection. *Am J Respir Crit Care Med* 2000;162(4 Pt 1):1435-44.
88. Epstein SK, Faling LJ, Daly BD, Celli BR. Predicting complications after pulmonary resection. Preoperative exercise testing vs a multifactorial cardiopulmonary risk index. *Chest* 1993;104:694-700.
89. Epstein SK, Faling LJ, Daly BD, Celli BR. Inability to perform bicycle ergometry predicts increased morbidity and mortality after lung resection. *Chest* 1995;107:311-6.
90. Olsen GN, Bolton JW, Weiman DS, Hornung CA. Stair climbing as an exercise test to predict the postoperative complications of lung resection. Two years' experience. *Chest* 1991;99:587-90.
91. Reilly JJ. Evidence-based preoperative evaluation of candidates for thoracotomy. *Chest* 1999;116(6 Suppl):474S-6S.
92. Fein AM, Branman SS, Casaburi R, Irvin CG, Make BJ, Rodarte JR, et al. American Thoracic Society Statement: Lung volume reduction surgery. *Am J Respir Crit Care Med* 1996;154(4 Pt 1):1151-2.
93. Benditt JO, Lewis S, Wood DE, Klima L, Albert RK. Lung volume reduction surgery improves maximal O₂ consumption, maximal minute ventilation, O₂ pulse, and dead space-to-tidal volume ratio during leg cycle ergometry. *Am J Respir Crit Care Med* 1997;156(2 Pt 1):561-6.
94. Tschernko EM, Gruber EM, Jaksch P, Jandrasits O, Jantsch U, Brack T, et al. Ventilatory mechanics and gas exchange during exercise before and after lung volume reduction surgery. *Am J Respir Crit Care Med* 1998;158(5 Pt 1):1424-31.
95. Kaiwa Y, Kurokawa Y, Ando K, Nakagawa A, Mitsui K, Miki H, et al. Correlation of unilateral thoracoscopic lung volume reduction with improvement in lung function and exercise performance in patients with severe pulmonary emphysema. *Surg Today* 1999;29:718-23.
96. Leyenson V, Furukawa S, Kuzma AM, Cordova F, Travaline J, Criner GJ. Correlation of changes in quality of life after lung volume reduction surgery with changes in lung function, exercise, and gas exchange. *Chest* 2000;118:728-35.
97. Nugent AM, Steele IC, Carragher AM, McManus K, McGuigan JA, Gibbons JR, et al. Effect of thoracotomy and lung resection on exercise capacity in patients with lung cancer. *Thorax* 1999;54:334-8.
98. Miyoshi S, Yoshimasu T, Hirai T, Hirai I, Maebeya S, Bessho T, et al. Exercise capacity of thoracotomy patients in the early postoperative period. *Chest* 2000;118:384-90.
99. Nezu K, Kushibe K, Tojo T, Takahama M, Kitamura S. Recovery and limitation of exercise capacity after lung resection for lung cancer. *Chest* 1998;113:1511-6.
100. Older P, Hall A, Hader R. Cardiopulmonary exercise testing as a screening test for perioperative management of major surgery in the elderly. *Chest* 1999;116:355-62.
101. Gerson MC, Hurst JM, Hertzberg VS, Baughman R, Rouan GW, Ellis K. Prediction of cardiac and pulmonary complications related to elective abdominal and noncardiac thoracic surgery in geriatric patients. *Am J Med* 1990;88:101-7.
102. Weber KT, Janicki JS, Likoff MJ. Exercise testing in the evaluation of cardiopulmonary disease. A cardiologist's point of view. *Clin Chest Med* 1984;5:173-80.
103. Mancini DM. Cardiopulmonary exercise testing for heart transplant candidate selection. *Cardiologia* 1997;42:579-84.
104. Myers J, Gullestad L. The role of exercise testing and gas-exchange measurement in the prognostic assessment of patients with heart failure. *Curr Opin Cardiol* 1998;13:145-55.
105. Schwaiblmair M, Reichensperner H, Muller C, Briegel J, Furst H, Groh J, et al. Cardiopulmonary exercise testing before and after lung and heart-lung transplantation. *Am J Respir Crit Care Med* 1999; 159(4 Pt 1):1277-83.
106. Howard DK, Iademarco EJ, Trulock EP. The role of cardiopulmonary exercise testing in lung and heart-lung transplantation. *Clin Chest Med* 1994;15:405-20.
107. Estenne M, Primo G, Yernault JC. Cardiorespiratory responses to dynamic exercise after human heart-lung transplantation. *Thorax* 1987;42:629-30.
108. Miyoshi S, Trulock EP, Schaeffers HJ, Hsieh CM, Patterson GA, Cooper JD. Cardiopulmonary exercise testing after single and double lung transplantation. *Chest* 1990;97:1130-6.
109. Levy RD, Ernst P, Levine SM, Shennib H, Anzueto A, Bryan CL, et al. Exercise performance after lung transplantation. *J Heart Lung Transplant* 1993;12(1 Pt 1):27-33.
110. Orens JB, Becker FS, Lynch JP, Christensen PJ, Deeb GM, Martinez FJ. Cardiopulmonary exercise testing following allogeneic lung transplantation for different underlying disease states. *Chest* 1995;107: 144-9.
111. American Thoracic Society Statement: Standards for the diagnosis and care of patients with chronic obstructive pulmonary disease (COPD) and asthma. *Am Rev Respir Dis* 1987;136:225-44.
112. Statement on exercise. A position statement for health professionals by the Committee on Exercise and Cardiac Rehabilitation of the Council on Clinical Cardiology, American Heart Association. *Circulation* 1990;81:396-8.
113. Pulmonary rehabilitation: joint ACCP/AACVPR evidence-based guidelines. ACCP/AACVPR Pulmonary Rehabilitation Guidelines Panel. American College of Chest Physicians. American Association of Cardiovascular and Pulmonary Rehabilitation. *Chest* 1997;112:1363-96.
114. Casaburi R, Patessio A, Ioli F, Zanaboni S, Donner CF, Wasserman K. Reductions in exercise lactic acidosis and ventilation as a result of

- exercise training in patients with obstructive lung disease. *Am Rev Respir Dis* 1991;143:9-18.
115. Casaburi R, Wasserman K, Patessio A, Ioli F, Zanaboni S, Donner CF. A new perspective in pulmonary rehabilitation: anaerobic threshold as a discriminant in training. *Eur Respir J Suppl* 1989;7:618s-23s.
 116. Zacarias EC, Neder JA, Cendom SP, Nery LE, Jardim JR. Heart rate at the estimated lactate threshold in patients with chronic obstructive pulmonary disease: effects on the target intensity for dynamic exercise training. *J Cardiopulm Rehabil* 2000;20:369-76.
 117. Crapo RO, Casaburi R, Coates AL, Enright PL, Hankinson JL, Irvin CG, et al. American Thoracic Society Statement: Guidelines for methacholine and exercise challenge testing-1999. *Am J Respir Crit Care Med* 2000;161:309-29.
 118. Evaluation of impairment/disability secondary to respiratory disease. American Thoracic Society. *J Med Assoc Ga* 1985;74:649-54.
 119. Evaluation of impairment/disability secondary to respiratory disorders. American Thoracic Society. *Am Rev Respir Dis* 1986;133:1205-9.
 120. American Medical Association. The respiratory system. Guides to the evaluation of permanent impairment. Chicago: AMA, 1993;115-29.
 121. Sue DY. Exercise testing in the evaluation of impairment and disability. *Clin Chest Med* 1994;15:369-87.
 122. Oren A, Sue DY, Hansen JE, Torrance DJ, Wasserman K. The role of exercise testing in impairment evaluation. *Am Rev Respir Dis* 1987;135:230-5.
 123. Nery LE, Neder JA, Sabino M, Lucas SRR, Bagatin E. Proposal of a new classification of aerobic dysfunction in patients with pneumoconiosis. *Am J Respir Crit Care Med* 1994;149:403.
 124. Whipp BJ, Wasserman K. Efficiency of muscular work. *J Appl Physiol* 1969;26:644-8.
 125. Bruce RA. Exercise testing of patients with coronary heart disease. Principles and normal standards for evaluation. *Ann Clin Res* 1971;3:323-32.
 126. Balke B, Ware R. An experimental study of physical fitness of Air Force personnel. *U S Armed Forces Med J* 1959;10:675-88.
 127. Davis JA, Whipp BJ, Lamarra N, Huntsman DJ, Frank MH, Wasserman K. Effect of ramp slope on determination of aerobic parameters from the ramp exercise test. *Med Sci Sports Exerc* 1982;14:339-43.
 128. Buchfuhrer MJ, Hansen JE, Robinson TE, Sue DY, Wasserman K, Whipp BJ. Optimizing the exercise protocol for cardiopulmonary assessment. *J Appl Physiol* 1983;55:1558-64.
 129. Deal EC, McFadden ER, Ingram RH, Strauss RH, Jaeger JJ. Role of respiratory heat exchange in production of exercise-induced asthma. *J Appl Physiol* 1979;46:467-75.
 130. Lee TH, Anderson SD. Heterogeneity of mechanisms in exercise induced asthma. *Thorax* 1985;40:481-7.
 131. Johnson BD, Weisman IM, Zeballos RJ, Beck KC. Emerging concepts in the evaluation of ventilatory limitation during exercise: the exercise tidal flow-volume loop. *Chest* 1999;116:488-503.
 132. Whipp BJ, Ward SA. Physiological determinants of pulmonary gas exchange kinetics during exercise. *Med Sci Sports Exerc* 1990; 22: 62-71.
 133. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. On-line computer analysis and breath-by-breath graphical display of exercise function tests. *J Appl Physiol* 1973;34:128-32.
 134. Ruppel GE. Manual of pulmonary function testing. St. Louis: Mosby, 1994.
 135. Huszczuk A, Whipp BJ, Wasserman K. A respiratory gas exchange simulator for routine calibration in metabolic studies. *Eur Respir J* 1990;3:465-8.
 136. Wasserman K. Anaerobiosis, lactate, and gas exchange during exercise: the issues. *Fed Proc* 1986;45:2904-9.
 137. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol* 1986;60:2020-7.
 138. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. Improved detection of lactate threshold during exercise using a log-log transformation. *J Appl Physiol* 1985;59:1936-40.
 139. Reinhard U, Muller PH, Schmulling RM. Determination of anaerobic threshold by the ventilation equivalent in normal individuals. *Respiration* 1979;38:36-42.
 140. Rausch SM, Whipp BJ, Wasserman K, Huszczuk A. Role of the carotid bodies in the respiratory compensation for the metabolic acidosis of exercise in humans. *J Physiol (Lond)* 1991;444:567-78.
 141. 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;32:719-27.
 142. Lewis DA, Sietsema KE, Casaburi R, Sue DY. Inaccuracy of noninvasive estimates of VD/VT in clinical exercise testing. *Chest* 1994; 106:1476-80.
 143. Mahler DA, Franco MJ. Clinical applications of cardiopulmonary exercise testing. *J Cardiopulm Rehabil* 1996;16:357-65.
 144. Borg GA. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc* 1982;14:377-81.
 145. Aitken RC. Measurement of feelings using visual analogue scales. *Proc R Soc Med* 1969;62:989-93.
 146. American College of Sports Medicine. Guidelines for Exercise Testing and Prescription. 4th ed. Philadelphia: Lea & Febiger, 199.
 147. Jones NL, Summers E, Killian KJ. Influence of age and stature on exercise capacity during incremental cycle ergometry in men and women. *Am Rev Respir Dis* 1989;140:1373-80.