

Prova de Esforço Cardiopulmonar

Variáveis estudadas

Valores de referência

Hermínia Brites Dias

Área Científica de Cardiopneumologia

Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa

18 Março de 2005



Variáveis estudadas - Valores de referência

Objectivos:

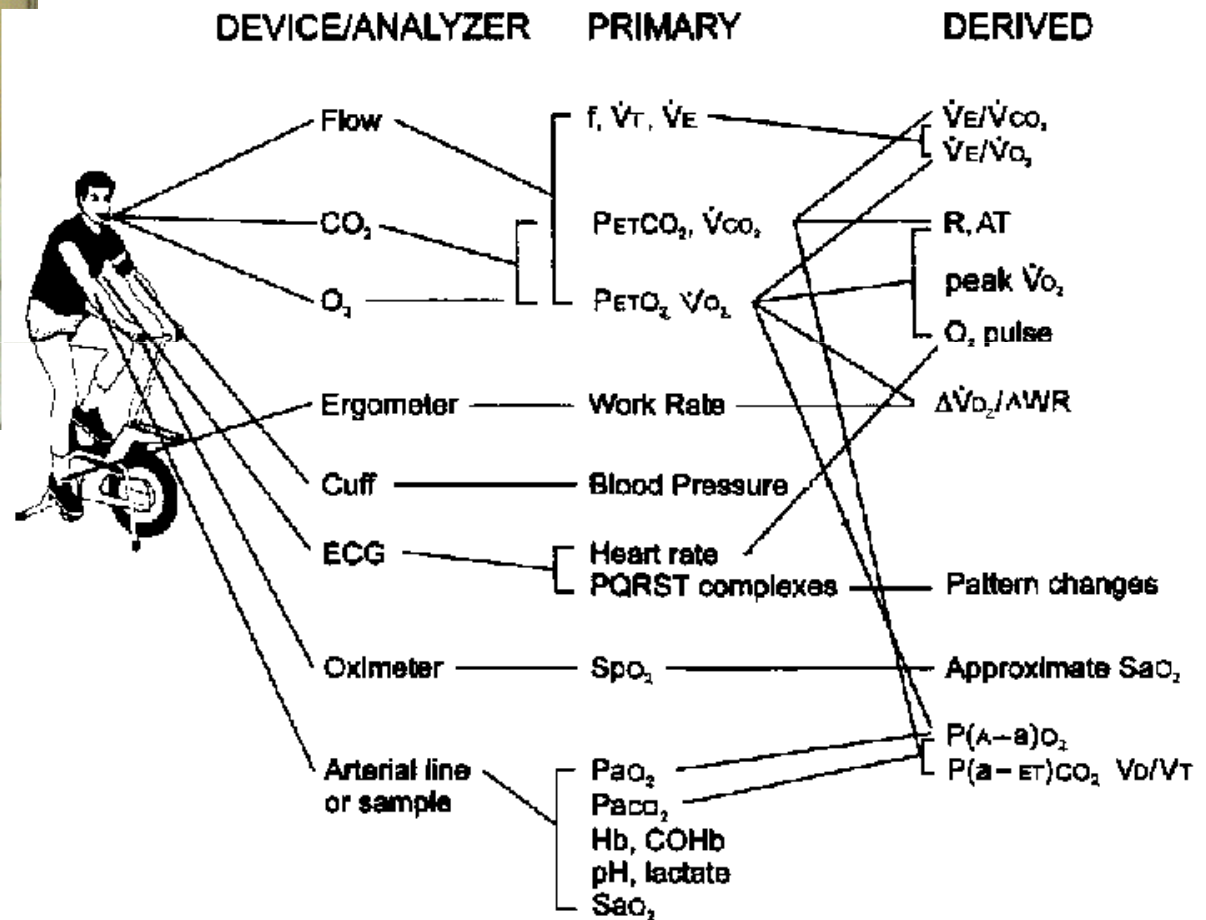
- identificar as principais variáveis estudadas na PECP
- caracterizar as suas respostas normais durante a PECP
- discutir a selecção dos valores de referência



Variáveis estudadas



<http://www.cpxtesting.com/cpxframe.html>



Variáveis estudadas (2)

- potência máxima

- $\dot{V}O_2$ máx

- $\dot{V}CO_2$

- limiar anaeróbio

- RQ e RER

metabólicas

- volume minuto

- reserva ventilatória

- VT/IC

- curvas débito-volume

ventilatórias

- equilíbrio ácido-base



Variáveis estudadas (3)

- saturação de O_2
- $P(A - a) O_2$
- $P(a - et) CO_2$
- VD / VT

trocas gasosas

- reserva cardíaca
- pulso de O_2
- débito cardíaco
- pressão arterial
- ECG

cardiovasculares

- $\dot{V}E / \dot{V}O_2$ e $\dot{V}E / \dot{V}CO_2$



Parâmetros Metabólicos

- $\dot{V}O_2$ máx
- $\dot{V}CO_2$
- limiar anaeróbio
- RQ e RER



Consumo de O₂

$$\dot{V}O_2 \sim \dot{V}E \times (F_I O_2 - F_E O_2)$$

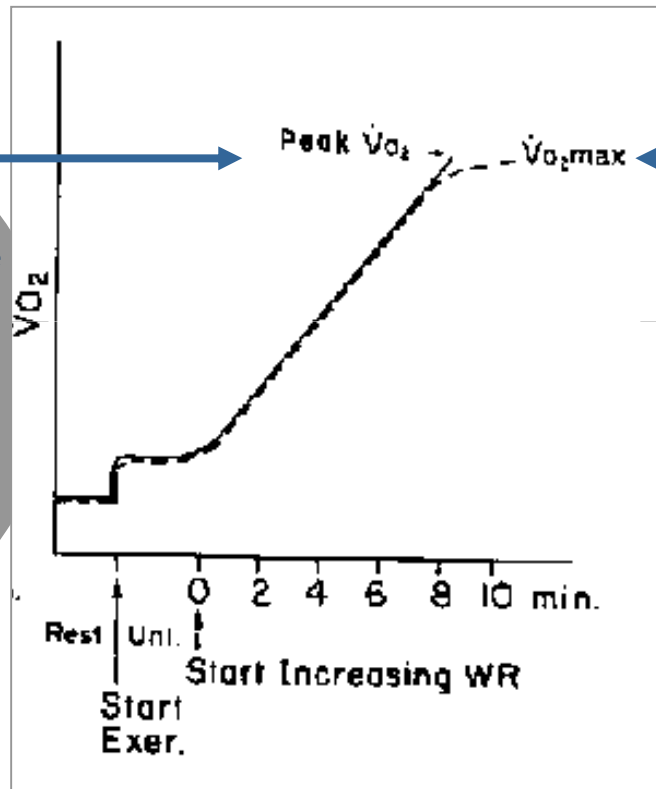
- indivíduo normal (repouso) \approx 250 ml/min
ou \approx 3.5 ml/min/Kg
(exercício) até \approx 4000 ml/min
- atleta \approx até 20 vezes o seu valor basal

(ATS / ACCP, 2003)



Consumo Máximo de O₂

mais elevado $\dot{V}O_2$ obtido num esforço que se presume máximo (teste incremental progressivo)



mais elevado $\dot{V}O_2$ para uma dada forma de exercício ($\dot{V}O_2$ não aumenta com aumento da potência)

(Wasserman et al, 1999)



Relação $\dot{V}O_2$ - Potência

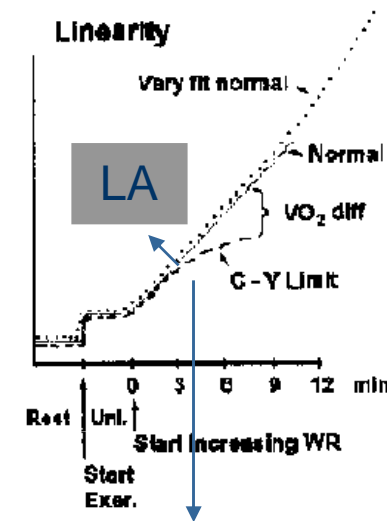
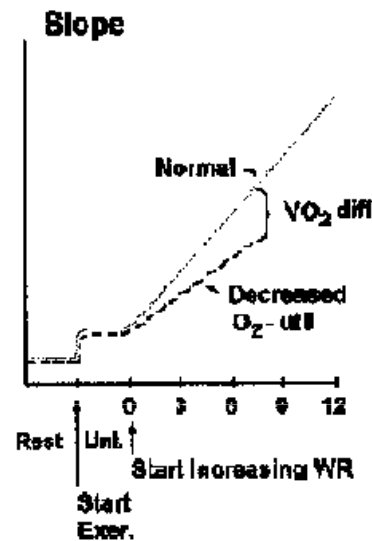
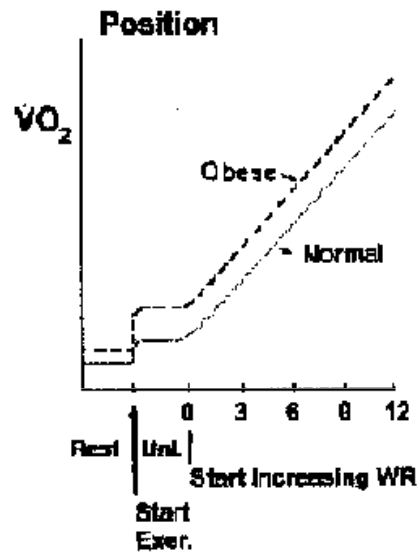
normalmente o $\dot{V}O_2$ aumenta quase linearmente com o aumento da potência.

- descreve relação do $\dot{V}O_2$ com a quantidade de trabalho externo realizado
- reflecte a eficácia da conversão de energia química em trabalho mecânico e a eficácia mecânica do sistema músculo-esquelético

(ATS / ACCP, 2003)



Relação $\Delta\dot{V}O_2$ - Δ Potência(2)



Limitação no Aporte O_2

- $\downarrow \dot{V}O_{2\text{ MAX}}$
- inclinação \downarrow

aumento exagerado da potência para a capacidade do indivíduo



Relação $\Delta\dot{V}O_2$ - Δ Potência

valor normal (teste incremental progressivo)

8,5 -11 ml/min/watt (ATS/ACCP, 2003)

independente do sexo, idade ou altura



Produção de CO₂ e Limiar Anaeróbico



Produção de CO_2

$$\dot{V} \text{ CO}_2 \cong \dot{V} \text{ E} \times (\text{F}_\text{E} \text{ CO}_2 - 0.0003)$$

$\dot{V} \text{ CO}_2$ < 0.20 l/min (indiv. saudável em repouso)
> 4 l/min (indiv. treinado exerc. máx.)



Limiar Anaeróbico

AT (LA)

indicador do “*início*” da acidose metabólica causada predominantemente pelo aumento da concentração do lactato arterial durante o exercício

(ATS / ACCP, 2003)

Exprime-se em unidades de consumo de O_2 ou como percentagem do $\dot{V}O_2$ máx previsto

(Wasserman et al., 1999)



Limiar Anaeróbico

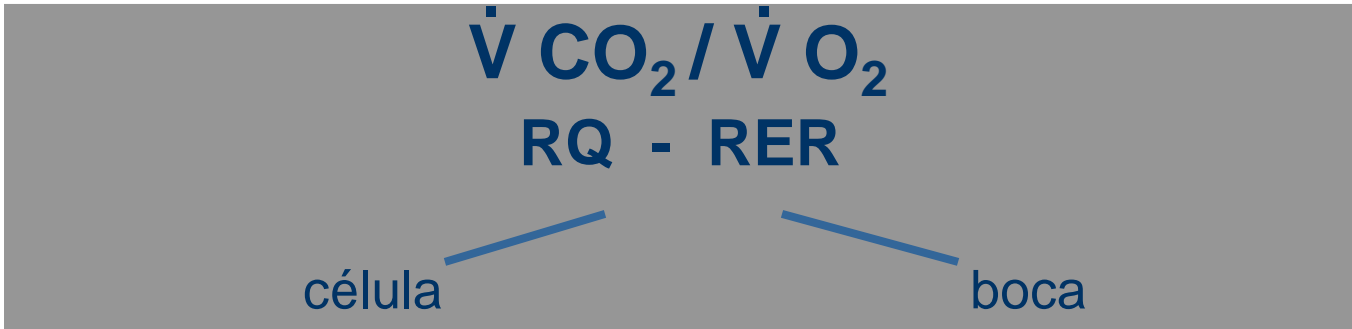
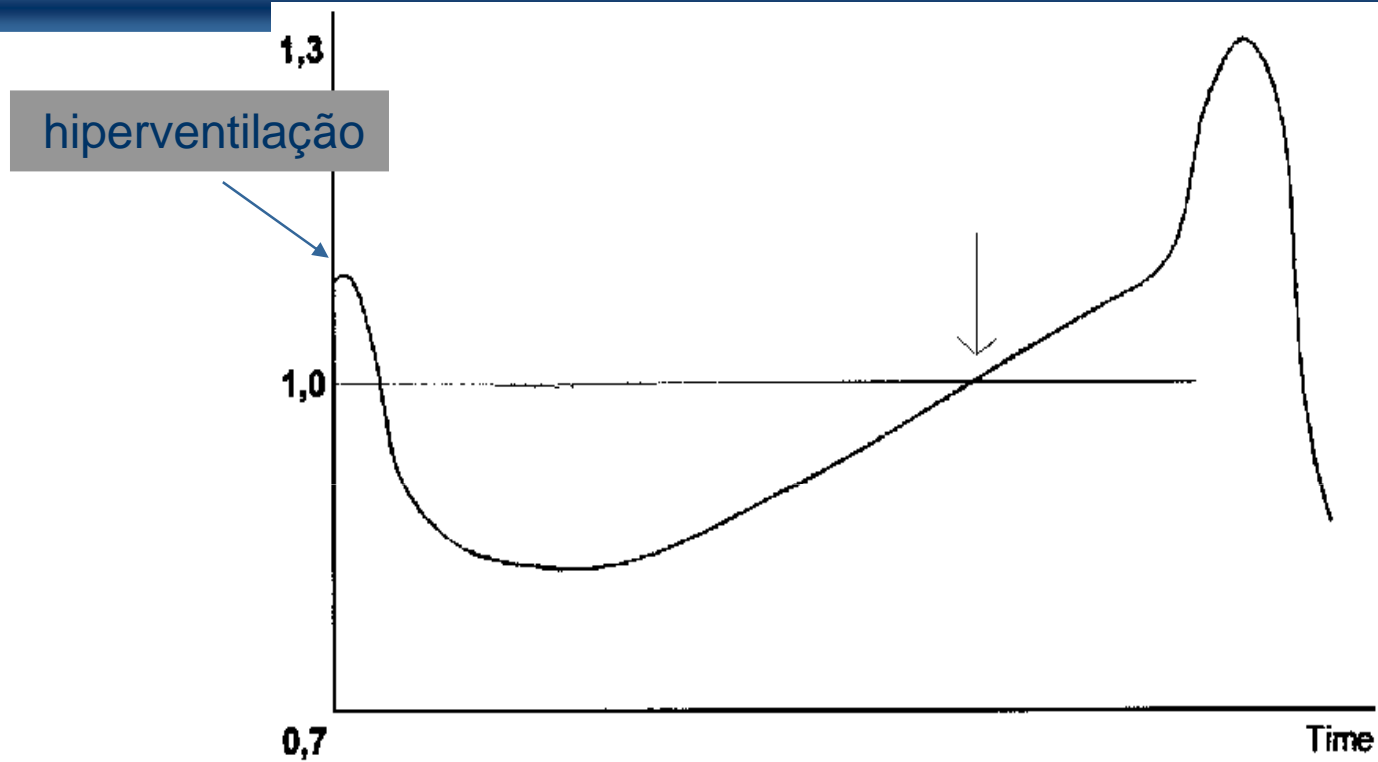
Gold Standard: determinação directa do lactato
(método invasivo)

Base das determinações não invasivas :

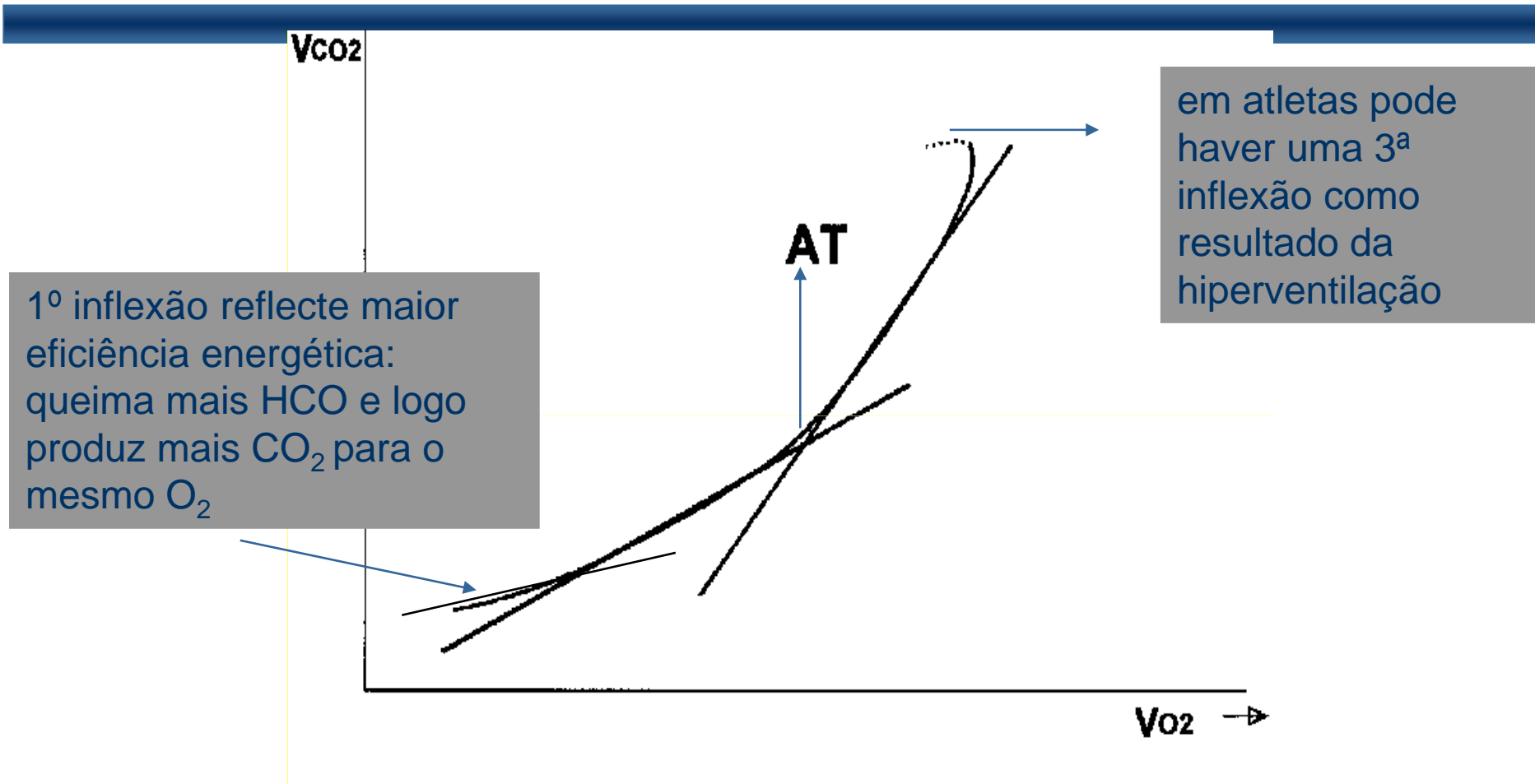
- produção de CO_2 aumenta com tamponamento do lactato pelo bicarbonato.
- análise dos padrões de $\dot{V}\text{O}_2$, $\dot{V}\text{CO}_2$ e $\dot{V}\text{E}$
V-SLOPE (mais popular)



RER



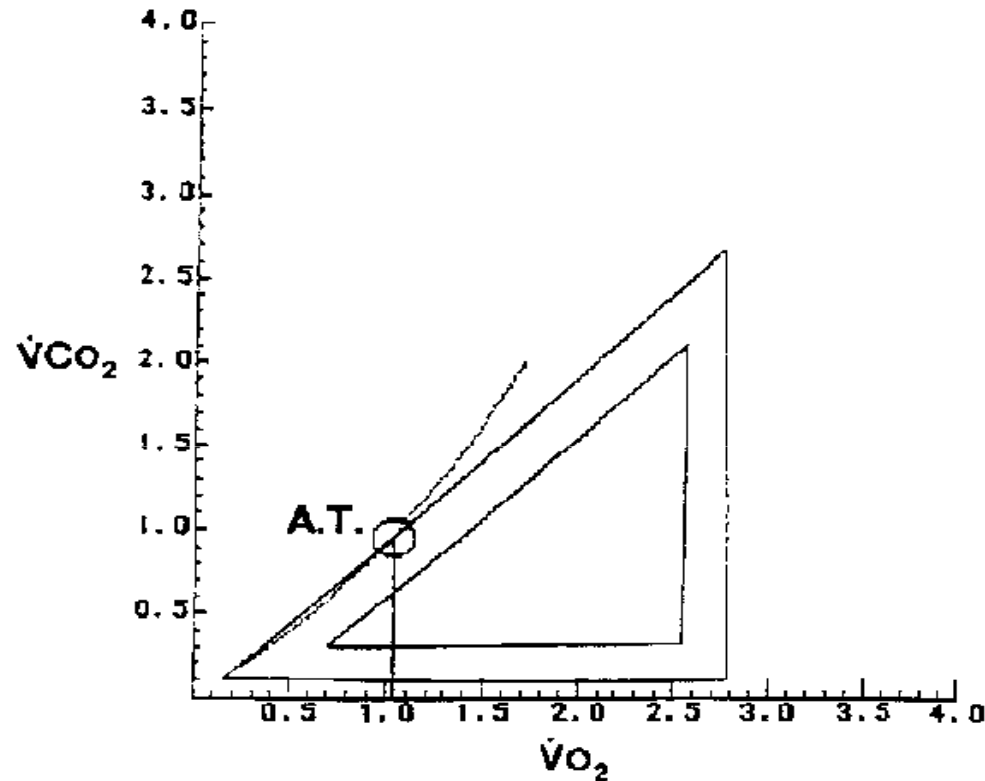
Limiar Anaeróbico – V-SLOPE



V_{CO_2} versus V_{O_2}



Limiar Anaeróbico – V-SLOPE Modificada

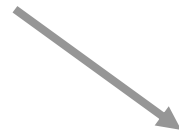


- permite cálculo manual com triângulo isósceles
- não influenciado pela ventilação

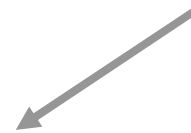


Equivalentes Ventilatórios

$$\dot{V}E / \dot{V}O_2$$



$$\dot{V}E / \dot{V}CO_2$$



exprimem a ventilação necessária ao consumo / eliminação de 1 litro de O_2 / CO_2



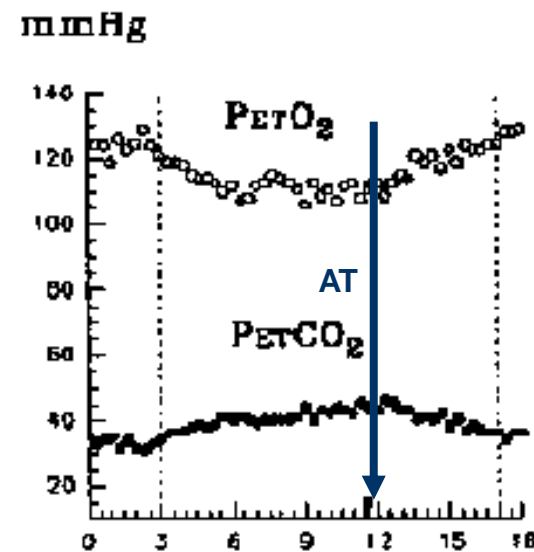
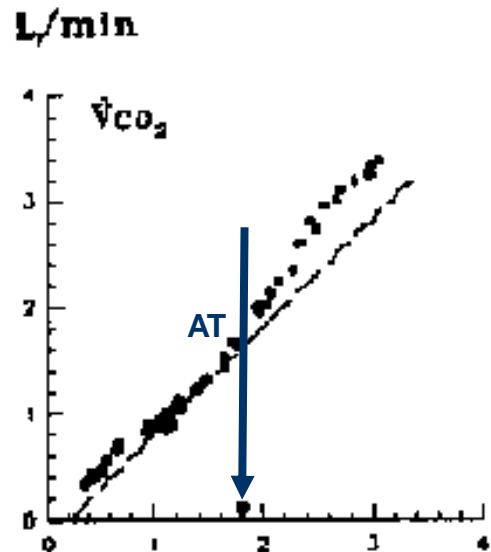
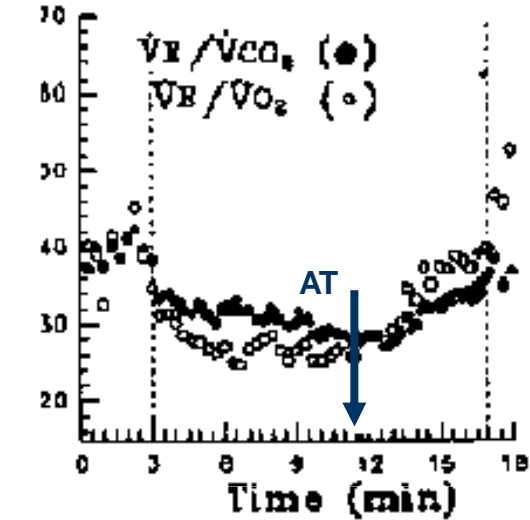
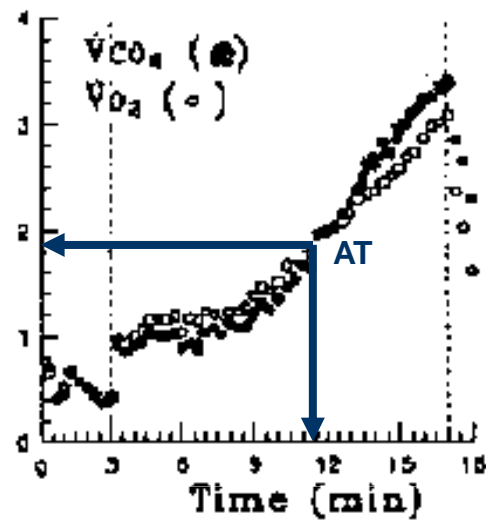
Limiar Anaeróbico – Equivalentes Ventilatórios

$$\dot{V}E / \dot{V}O_2 , \dot{V}E / \dot{V}CO_2$$

- $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$ e $\dot{V}CO_2$ \uparrow linearmente até exercício abaixo do *LA*
- acima do *LA*, $\dot{V}CO_2$ \uparrow mais que $\dot{V}O_2$ (V-SLOPE)
- no início: $\dot{V}E$ acompanha $\dot{V}CO_2$ (tampon. isocápnico)
(mas \uparrow em relação ao $\dot{V}O_2$)
- com \uparrow da potência $\dot{V}E$ \uparrow mais que $\dot{V}CO_2$
($\uparrow \dot{V}E / \dot{V}CO_2$, $\downarrow PaCO_2$ e $PETCO_2$)



Limiar Anaeróbico



Limiar Anaeróbico – valores normais

- 50 a 60 % do VO_2 máx previsto
- 40 - 80% (grande variação da normalidade)
- inferior a 40 % possível limitação cardíaca, pulmonar, ou outra alteração no aporte ou utilização de O_2

(ATS / ACCP, 2003)



Parâmetros Ventilatórios

- volume minuto
- reserva ventilatória
- VT/IC
- curvas débito-volume



Parâmetros Ventilatórios

- aumenta para manter pressões arteriais de O_2 e CO_2
- inicialmente por aumento do VC (à custa de VRE e VRI)

contracção dos
músculos expiratórios

diminuição da CRF

- contribuição para a inspiração seguinte
- aumento do comprimento dos músculos inspiratórios
- volume pulmonar mobilizado permanece na porção linear da curva pressão - volume



Parâmetros Ventilatórios

- volume corrente e capacidade inspiratória

VT/IC

(Wasserman et al. 1999)

- VT (exercício) – raramente excede 75% da CPT (basal)
- FR (normal no pico do exercício): < 60/min

(ATS / ACCP, 2003)



Volume minuto - indivíduo normal

- **exercício leve e moderado**

VE ↑ linearmente com ↑ do trabalho
(↑ do **VO₂**)

- **níveis elevados de exercício** (> 60% **VO₂ MÁX**)

necessária a via anaeróbia láctica
↑ **VE** acompanha o ↑ do **VCO₂**



Volume-minuto (VE)

normal: 5 a 10 L/min

exercício: > 100 L/min (indivíduo normal)
> 200 L/min (atleta)



Capacidade Ventilatória

Máxima Ventilação Voluntária (MVV)

- directo:

$$\text{MVV (L/min)} = \text{MVV em 12 s} \times 5$$

- indirecto:

$$\text{MVV (L/min)} = \text{FEV1} \times 40$$



Reserva Ventilatória (BR)

- $(VE_{MÁX} / MVV) \times 100$

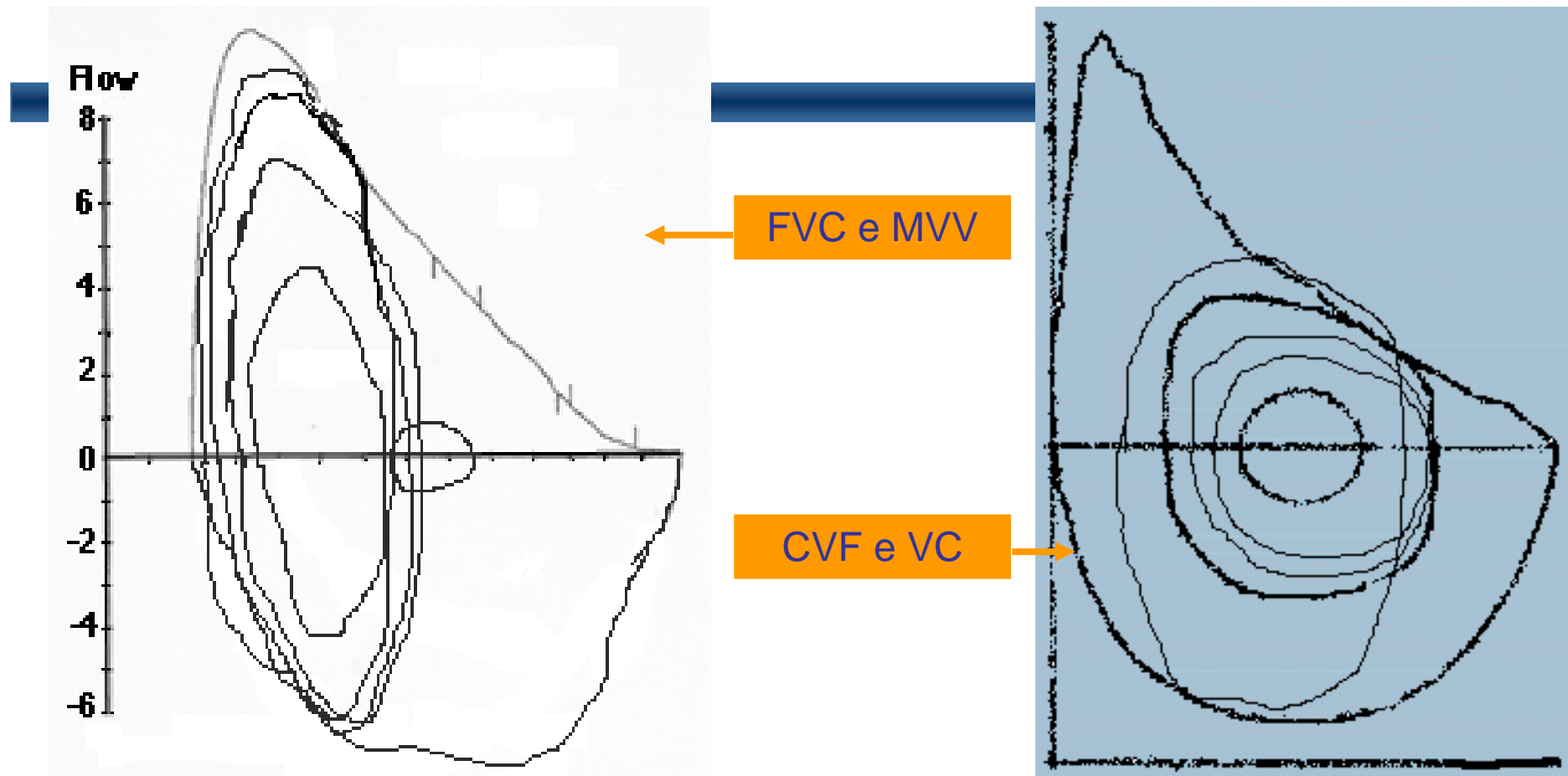
(ind. normal até ~ 50% ; lim. inferior da normalidade – 15 %)

- $MVV - VE_{max}$ (normal > 11L/min)

(ATS / ACCP, 2003)



Curvas de débito - volume

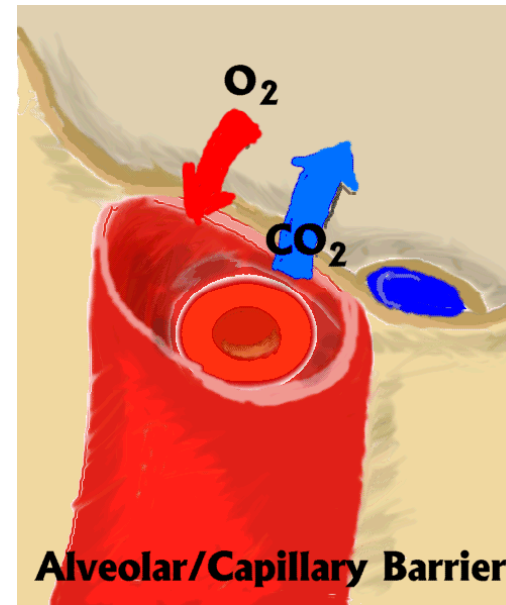


MVV pode sobrevalorizar a capacidade ventilatória:

- esforço breve de grande intensidade e impossível de ser sustido
- padrão ventilatório provavelmente diferente do adoptado durante o exercício (e também diferente padrão de activação muscular)

Trocas gasosas

- $P(A-a)O_2$
- VD / VT
- PaO_2
- $PaCO_2$
- $P(a - ET)CO_2$
- $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ e $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$



Gradiente Alvéolo-arterial de O_2

$$P(A-a)O_2$$

- medida da eficiência das trocas gasosas do alvéolo para o capilar pulmonar
- mede a diferença entre a PO_2 alveolar ideal e a PO_2 arterial



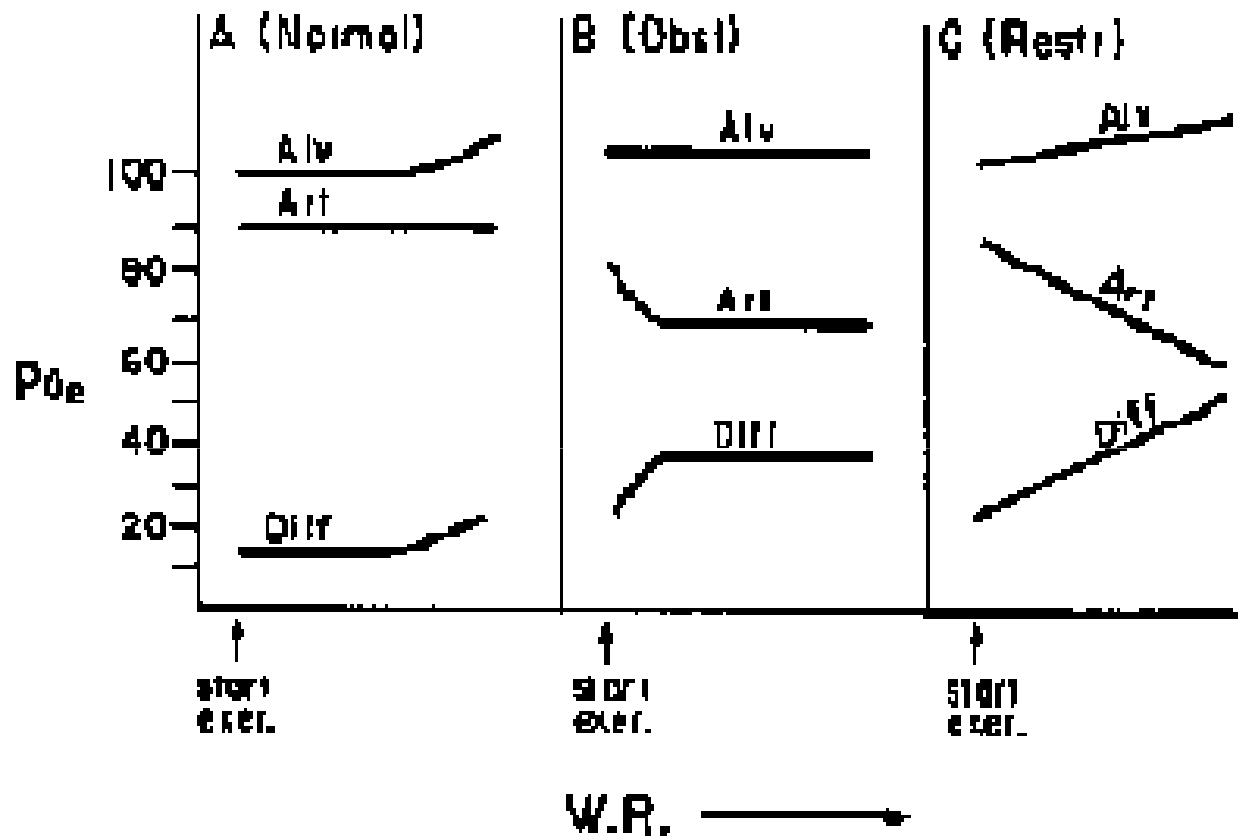
P(A-a)O₂

- valor normal (repouso): ~ 6 mmHg (inf. a 10 mmHg)
- valor normal durante exercício (máx): ~ 20 mmHg
- Limite da normalidade: ~ 35 mmHg
- Cálculo

$$P(A-a)O_2 = (P_{IO_2} - P_{aCO_2} / R) - P_{aO_2}$$



$P(A-a)O_2$



PaO_2 não deve ↓

$P(A - a)O_2 \approx 20$ mmHg



VD / VT

a partir da P_{aCO_2} e P_{ECO_2}

$$VD / VT = (P_{aCO_2} - \bar{P}_{ECO_2}) / P_{aCO_2}$$

(subtrair o espaço morto da peça bucal: 30 – 110 ml)

\bar{P}_{ECO_2} : P do gás alveolar e do espaço morto expirado (mmHg)



Espaço Morto

(EQUAÇÃO BOHR)

$$VD(L) = VT(L) \times \frac{(PaCO_2 - PECO_2)}{PaCO_2} - VDm (L)$$

$$PECO_2 = \frac{VCO_2(L/min) \times (PB - 47 \text{ mmHg})}{VE (L/min)}$$

→ **PaCO₂ E NÃO PETCO₂**

(ATS / ACCP, 2003)



VD/VT - resposta ao exercício

podem provocar modificação da VD/VT:

- aumento VT
- Broncodilatação induzida pelo exercício → aumento do volume vias aéreas intrapulmonares (tb de condução)
- agravamento ligeiro das V/Q – aumenta VD/VT

tendem
a aumentar
VD / VT

ma
s

prevalece aumento do
volume corrente:

VD / VT diminui



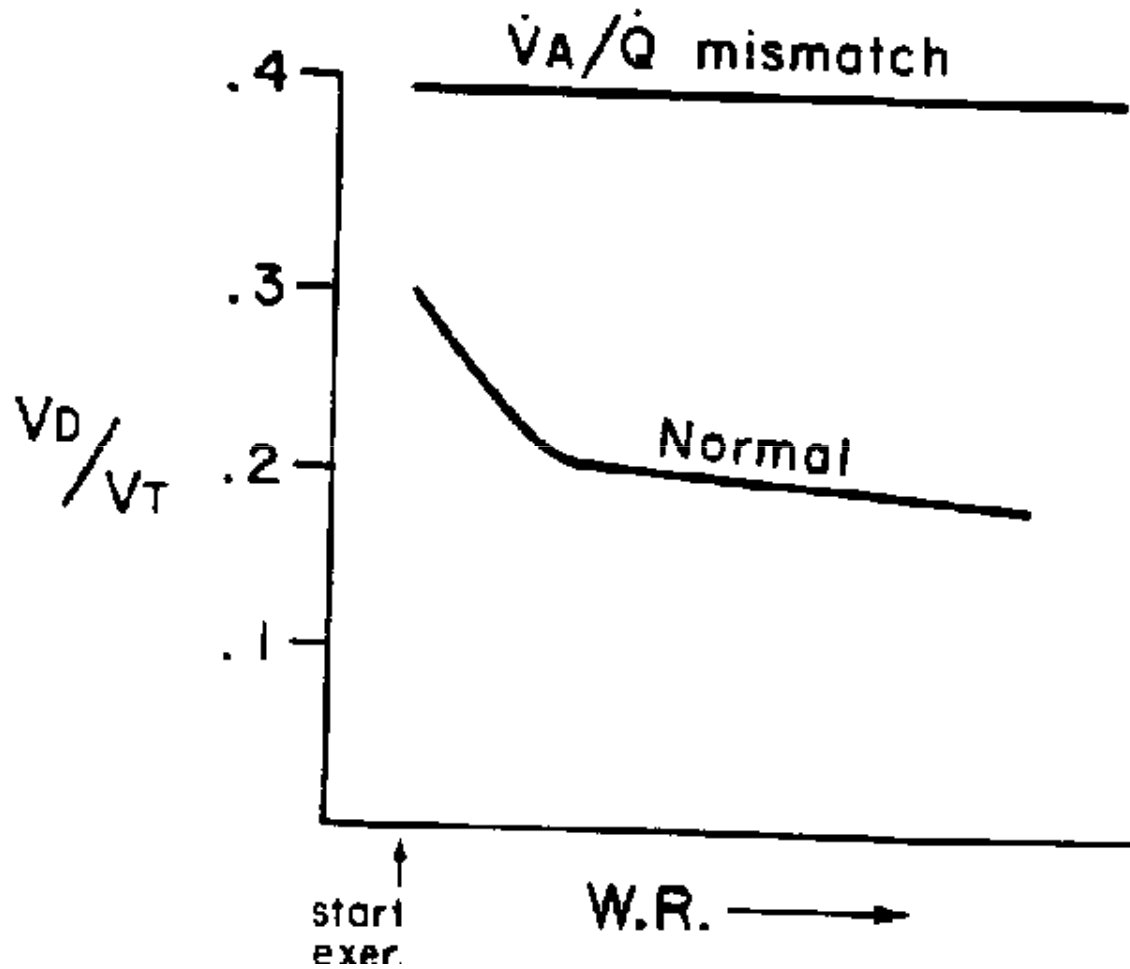
VD/VT - resposta ao TECP

- valor normal em repouso - 0.30 a 0.40
- valor normal no pico exercício:
 - jovens = < 0.20
 - adultos $< 40 A = < 0.28$
 - adultos $> 40 A = < 0.30$

ATS / ACCP, 2003



VD/VT



Adapt. Wasserman et al, 1999

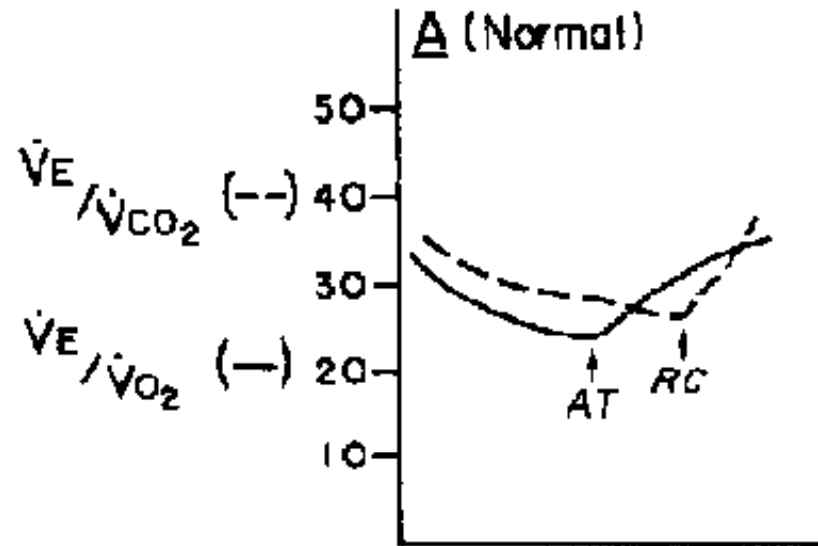


VD/VT - limitações

- não é sensível nem específica para as doenças pulmonares (deve ser interpretada cuidadosamente)
- muito afectada pelo padrão ventilatório (assim deve ser também considerado o volume de espaço morto (valor absoluto))



Equivalentes Ventilatórios



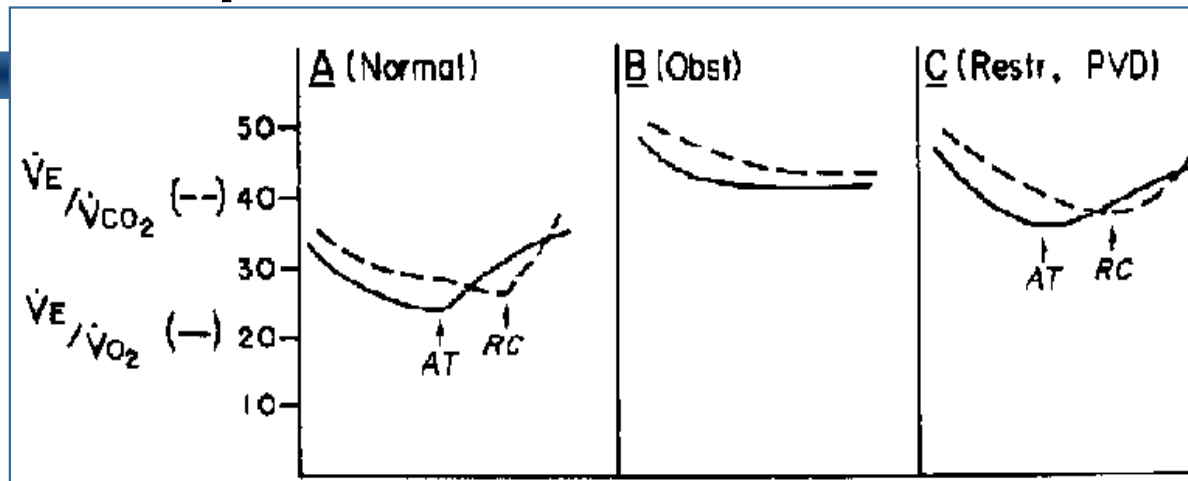
Adapt. Wasserman et al, 1999

valor normal no nadir

- $\dot{V}_E / \dot{V}_{CO_2}$ – 26 a 30 (lim. normal: 34) (ATS/ACCP, 2003)
- $\dot{V}_E / \dot{V}_{O_2}$ – 22 - 27



Equivalentes Ventilatórios



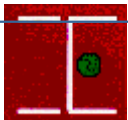
Wasserman et al, 1999

→ \dot{V}_E/\dot{V}_{O_2} , \dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2} - avaliação não invasiva V/Q

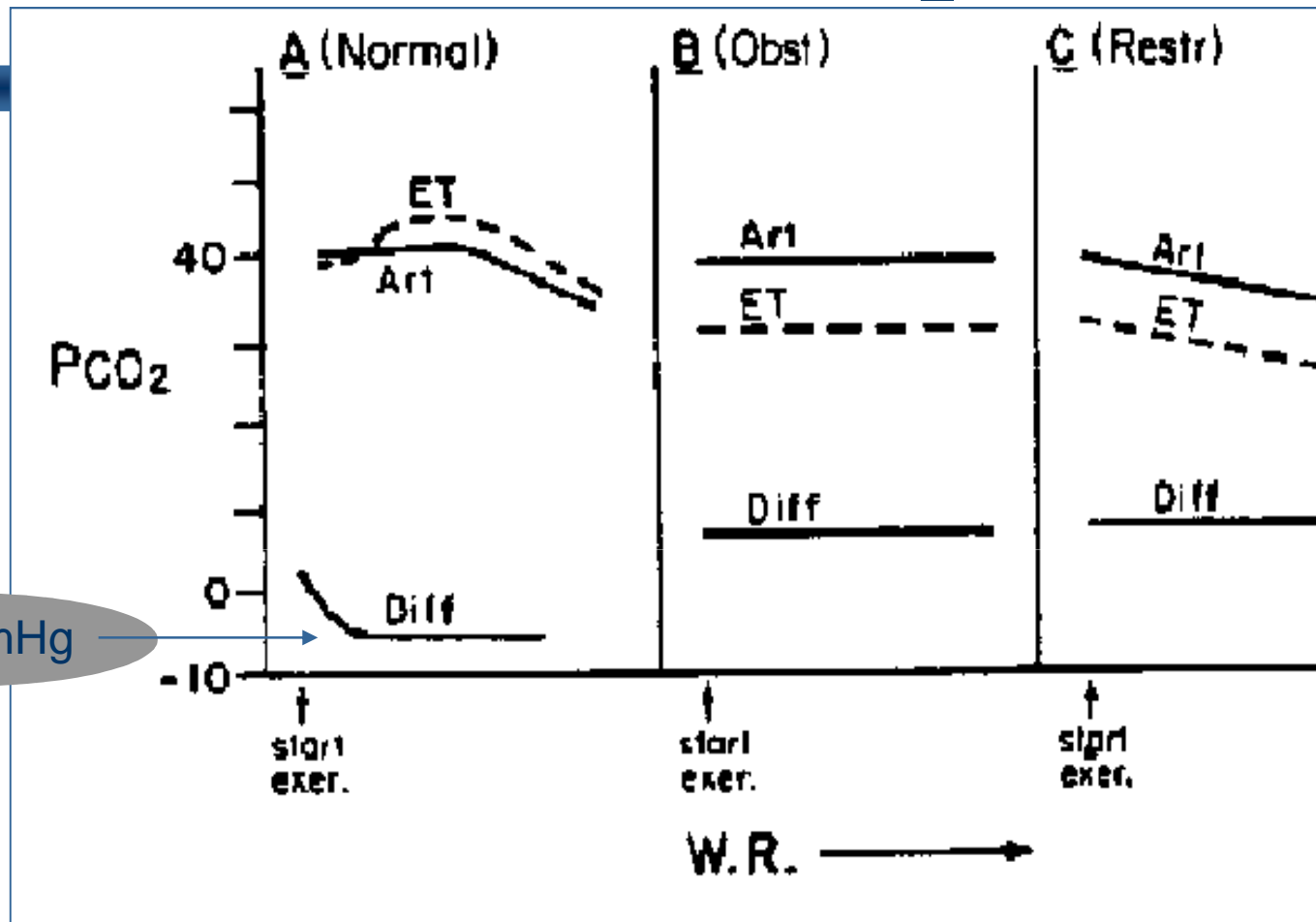
nadir \dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2} – estima alterações V/Q

AT: \dot{V}_E/\dot{V}_{O_2} , \dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2} ↑↑ – hiperventilação ou ↑↑ espaço morto (V/Q)

↪ medir P_aCO_2



$P(a - ET)CO_2$



$P(a - ET)CO_2$: espaço morto
alvéolos ventilados e não perfundidos $\Rightarrow [CO_2] \downarrow$
 $PETCO_2 < PaCO_2$

Equilíbrio Ácido-base

lactato em repouso < 1 mmol/l

ácido láctico:
CH3CHOHCOOH

- **exercício pesado: acidose metabólica intensa**

↓
↓ **bicarbonato e pH**

↓ **HCO_3^-** e ↑ **lactato** (mmol/l)

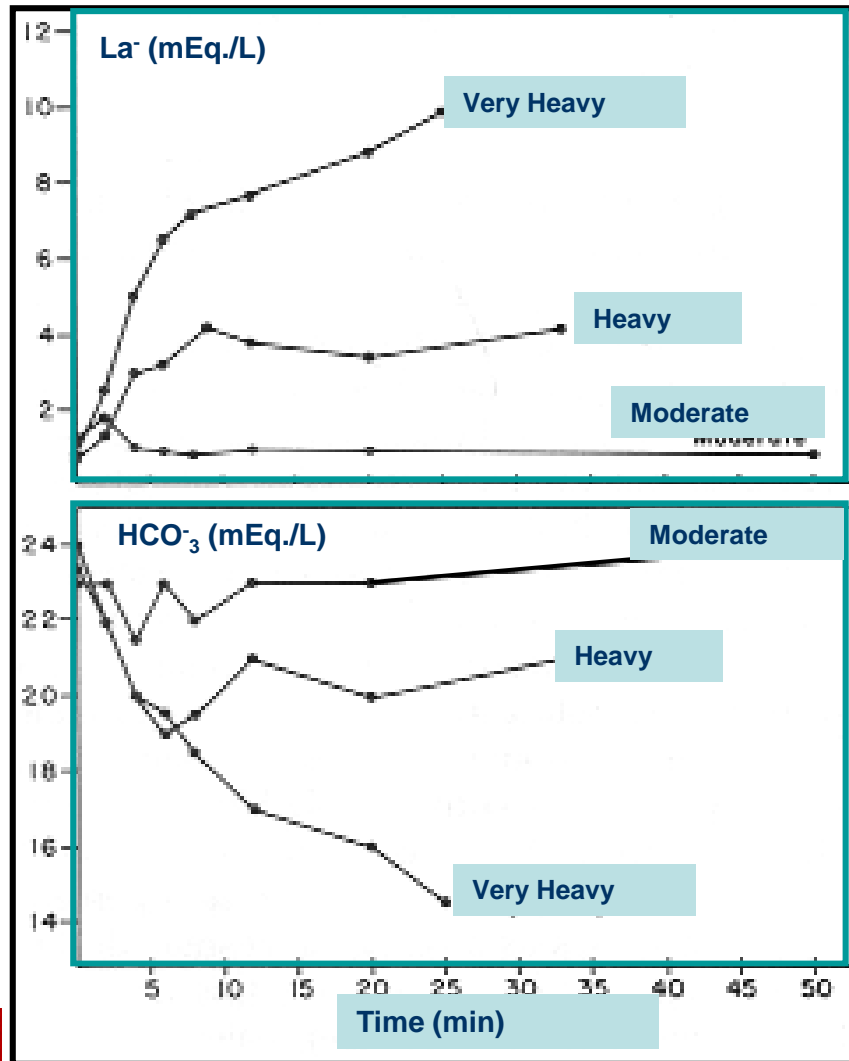
fim do teste: **6 (\pm 2) e 4 (\pm 2,5)**

idosos

2 min rec.: **8,4 (\pm 2,5)**



Aumento do lactato e diminuição do bicarbonato



variação quantitativamente semelhante mas em sentido oposto

Wasserman et al., 1999

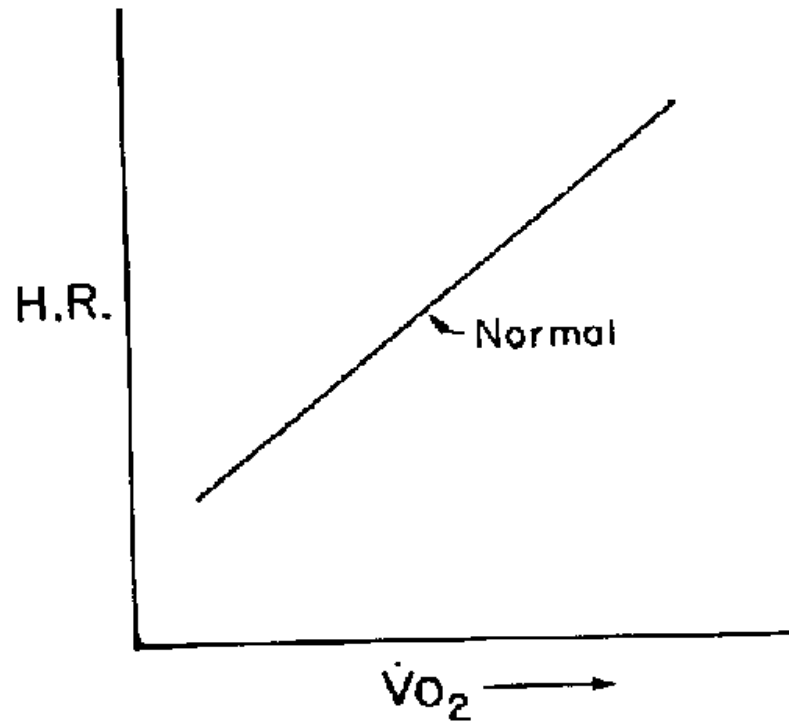


Frequência Cardíaca

- relação quase linear com VO_2
- atingir $\text{FC}_{\text{máx}}$ (prevista) – indicador de esforço máximo (ou quase) e portanto de $\text{VO}_{2\text{máx}}$.
- parar o teste por se verificar uma FC igual à teórica **NÃO** é recomendado
 - variação de 10 a 15 bpm verificada em grupo com a mesma idade



Relação entre FC e $\dot{V}O_2$



adapt. Wasserman et al., 1999

- **normal:**
 - relação quase linear**
 - início – por vezes não linear**
 - ↑ potência – quase linear**

inclinação é função do volume sistólico

- maior VS – menor FC
- menor VS – maior FC



Frequência Cardíaca estimada

mais usados:

- $220 - \text{idade}$

parece subestimar FCmáx em idosos

- $210 - (\text{idade} \times 0.65)$

valores semelhantes até aos 40 anos

(ATS/ACCP, 2033)



Reserva Cardíaca:

- Diferença entre a frequência cardíaca máxima prevista e a frequência máxima no exercício
- Expressão do potencial aumento da FC no fim de um teste de exercício máximo

valores normais:

FC máx > 90% referência (idade)

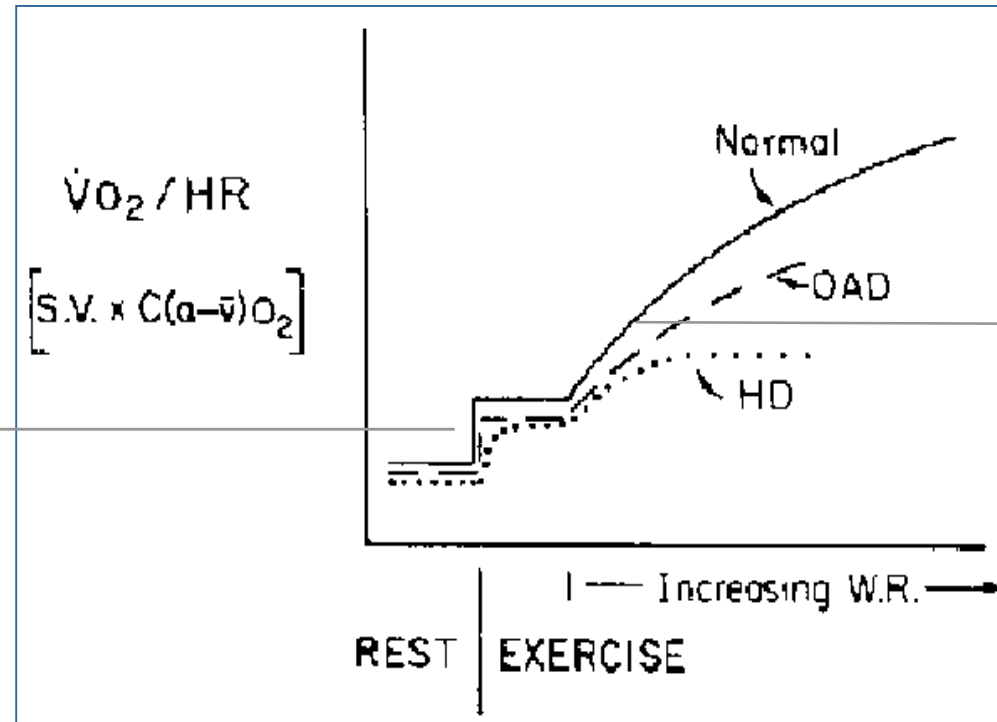
RC < 15 bpm

(ATS/ACCP, 2003)



Pulso de O_2 ($\dot{V}O_2/HR$)

aumento do VS



principal/aumento da $C(a-v)O_2$

Wasserman et al., 1999

• valor normal: > 80 %

(ATS/ACCP, 2003)



Pulso de O₂

$VO_2/FC = \text{volume sistólico} \times C(a - v) O_2$

- estima volume sistólico (extracção normal de O₂) (controverso)

extracção máxima de O₂ em ind. normais:
≈ 75% do conteúdo arterial



Débito Cardíaco (Q)

- melhor índice da *performance* cardíaca no exercício

VO_2 e Q variam linearmente (indivíduos saudáveis)



Q - Método de Fick indirecto

$$Q \text{ (l/min)} = V\text{CO}_2 \text{ (ml/min)} / C(v - a)\text{CO}_2 \text{ (ml CO}_2\text{/l sangue)}$$

- **PaCO₂** (não estimar por **P_{ET}CO₂**)
- **PvCO₂** - rebreathing CO₂



- CO₂ > PACO₂ (**7 – 15%**) (ref: P_{ET}CO₂)
- 1 a 2 vezes vol. corrente (**1 – 3 L**)
- CO₂ – **equilíbrio** entre saco e alvéolo
- [CO₂] ≡ capilar pulmonar
- PvCO₂ estimada pela curva dissoc. Hb

(Wasserman et al, 1999)



$\dot{V}O_2$ medido e $C(a - \bar{v})O_2$ estimado

Princípio de Fick

- utiliza $\dot{V}O_2$
- pressuposto: $C(a - \bar{v})O_2$ aumento *linear* (15 ml/dl)

(Wasserman et al, 1999)



Pressão Arterial

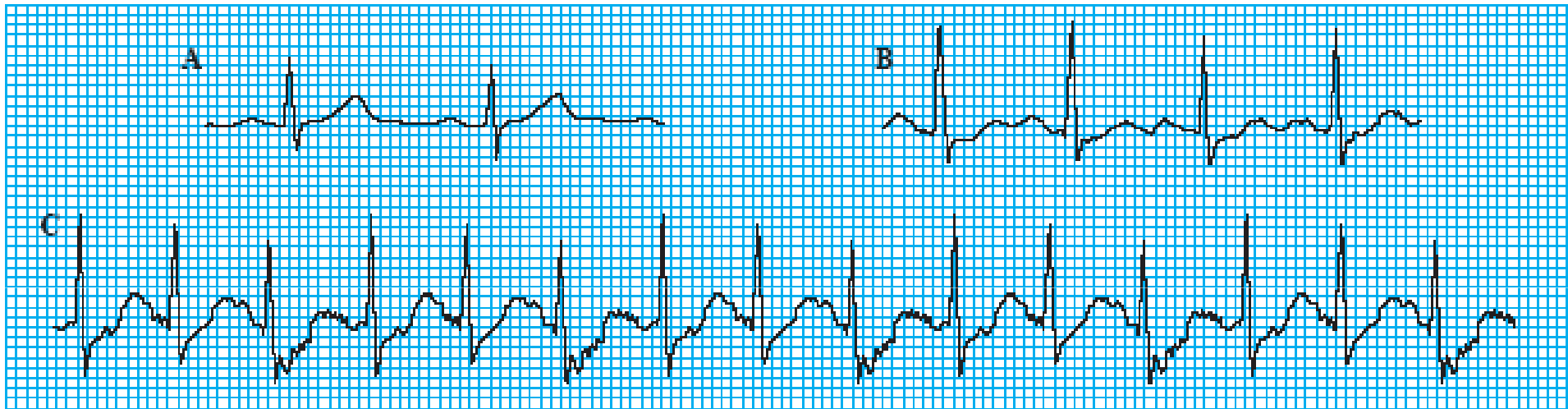
Pressão arterial

- **Sistólica aumenta com a potência**
- **Diastólica aumento inferior ou quase nulo**

• **valores normais: < 220 / 90** (ATS/ACCP, 2003)



Resposta normal



Normal changes from rest (A), after three minutes' exercise (B), and after six minutes' exercise (C). Note the upsloping ST segments

Depressão do ponto J (máxima no pico do exercício)
logo
ST em rampa ascendente

BMJ, 2002



Valores de referência

SELECTED REFERENCE VALUES FOR MAXIMAL INCREMENTAL EXERCISE TEST

Variable	Equations*	SEE
Work rate, kpm/min	$20.4(\text{ht}) - 8.74(\text{age}) - 288(\text{sex}) - 1909$	216
$\dot{V}O_2$, L/min	$0.046(\text{ht}) - 0.021(\text{age}) - 0.62(\text{sex}) - 4.31$	0.458
HR, beats/min	$202 - 0.72(\text{age})$	10.3
O ₂ pulse, ml/beat	$0.28(\text{ht}) - 3.3(\text{sex}) - 26.7$	2.8
\dot{V}_E , L/min	$26.3(\text{VC}) - 34$	23.1
AT, L/min ($\dot{V}O_2$)	$0.024(\text{ht}) - 0.0074(\text{age}) - 2.43$	0.316

Definition of abbreviations: HR = Heart rate; SEE = standard error of estimate; \dot{V}_E = minute ventilation; $\dot{V}O_2$ = oxygen uptake.
Adapted by permission from Reference 427.

* Sex, male, 0; female, 1; age, years; height (ht), centimeters.



Valores de referência

SELECTED REFERENCE VALUES FOR MAXIMAL INCREMENTAL CYCLE EXERCISE TEST

Variables	Equations*
$\dot{V}O_2$, ml/min, male	$W \times [50.75 - 0.372 (A)]$
$\dot{V}O_2$, ml/min, female	$(W + 43) \times [22.78 - 0.17 (A)]$
HR, beats/min	$210 \times 0.65 (A)^\dagger$
O ₂ pulse, ml/beat	Predicted $\dot{V}O_{2\max}$ /predicted HRmax
$\dot{V}E/MVV$, %	$\sim 72 \pm 15$
AT, L/min ($\dot{V}O_2$)	$> 40\% \dot{V}O_2 \text{ pred}$

Definition of abbreviations: AT = Anaerobic threshold; HR = heart rate; $\dot{V}E$ = minute ventilation; $\dot{V}O_2$ = oxygen uptake.

Data from References 235, 533, and 210.

* Age (A): years; height (H): centimeters; weight (W), kilograms.

Predicted weight men: $0.79 \times H - 60.7$. Predicted weight women: $0.65 \times H - 42.8$. When actual weight $>$ predicted, the predicted weight should be used in the equations. Wasserman and colleagues introduced new correction factors (3, 210), which have not yet been published in peer reviewed journals.



Valores de Referência

VO₂ Peak

sobrecarga ponderal – aumentar o VO₂ Peak previsto em 6 ml/min por kg de peso acima do previsto para o sujeito se for usado um cicloergómetro

- peso previsto:

homens: $W = .79 \times H - 60.7$

mulheres: $W = .65 \times H - 42.8$

- treadmill – multiplicar VO₂ Peak previsto por 1.11

Wasserman et al., 1999



Valores Normais

SUGGESTED GUIDELINES FOR NORMAL MAXIMUM CARDIOPULMONARY EXERCISE VARIABLES DURING CYCLE ERGOMETRY TESTING IN ADULTS

$\dot{V}O_2$ Responses

$\dot{V}O_{2\max}$	>84% predicted
Anaerobic threshold	>40% $\dot{V}O_{2\max}$ predicted
$\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$	>8.29 mL/min/W

Heart Response

O_2 pulse	>80%
Heart rate reserve (beats/min)	<15 bpm
Blood pressure	<220/90

Breathing Responses

Breathing reserve	$\dot{V}_{E\max}/MVV >75\%$; $MVV - \dot{V}_{E\max} >11$ L
V_T/V_C	<55
Frequency (breaths/min)	<60 brpm

Pulmonary Gas Exchange (Peak Values)

\dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2} at anaerobic threshold	<34
V_D/V_T	<0.28
$P(a-ET)CO_2$	<0
PaO_2	>80 mm Hg
$P(A-a)O_2$	<35 mmHg

Data from multiple sources



SUGGESTED NORMAL GUIDELINES FOR INTERPRETATION OF CARDIOPULMONARY EXERCISE TESTING RESULTS*

Variables	Criteria of Normality
$\dot{V}O_{2\max}$ or $\dot{V}O_{2\text{peak}}$	> 84% predicted
Anaerobic threshold	> 40% $\dot{V}O_{2\max}$ predicted; wide range of normal (40–80%)
Heart rate (HR)	HRmax > 90% age predicted ▲
Heart rate reserve (HRR)	HRR < 15 beats/min
Blood pressure	< 220/90
O ₂ pulse ($\dot{V}O_2/\text{HR}$)	> 80%
Ventilatory reserve (VR)	MVV – $\dot{V}E_{\max}$: > 11 L or $\dot{V}E_{\max}/\text{MVV} \times 100$: < 85%. Wide normal range: 72 ± 15% ▲
Respiratory frequency (fr)	< 60 breaths/min
$\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ (at AT)	< 34
V_D/V_T	< 0.28; < 0.30 for age > 40 years
Pa_{O_2}	> 80 mm Hg
$P(A-a)O_2$	< 35 mm Hg

* Maximum or peak cardiopulmonary responses except for anaerobic threshold and $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ at AT. ATS / AARC, 2003

$\Delta VO_2/\Delta WR$

- adultos – 10.3 ml/min/W (teste incremental progressivo de 6 – 12 min)
SD – 1.0 ml/min/W
- limite inferior da normalidade – 8.6 ml/min/W



Impossível concluir com base nas respostas individuais

Importante apreciar a evolução durante o teste

Questionar a adequação dos valores de referência

