

VELOCIDADE CRÍTICA, VO_{2MAX} E LIMITES DE O DOMÍNIO DE INTENSIDADE DE EXERCÍCIO SEVERO

CRITICAL SPEED, THRESHOLDS FOR VO_{2MAX} AND BOUNDARIES OF THE SEVERE EXERCISE INTENSITY DOMAIN

ARTIGO ORIGINAL
ORIGINAL ARTICLE
ARTÍCULO ORIGINAL

VELOCIDAD CRÍTICA, VO_{2MAX} Y LÍMITES DE EL DOMINIO DE LA INTENSIDAD DEL EJERCICIO SEVERO

David Wilfred Hill¹ 
(Professor Regente)

Linda Weaver Glass¹ 
(Nurse)

Jakob Langberg Vingren¹ 
(Professor)

1. University of North Texas,
Departamento de Cinesiologia,
Promoção da Saúde e Recreação,
Denton, TX, USA.

Correspondência:

David W. Hill
University of North Texas,
Departamento de Cinesiologia,
Promoção da Saúde e Recreação,
Union Circle, 1155, Denton, TX,
USA. 310769. david.hill@unt.edu

RESUMO

Introdução: O domínio de intensidade de exercício severo pode ser definido como a faixa de taxas de trabalho ou velocidades sobre as quais o VO_{2max} pode ser obtido. **Objetivos:** Nosso propósito foi determinar se a velocidade crítica (execução analógica da potência crítica) identifica o limite inferior do domínio severo e identificar o limite superior do domínio. **Métodos:** Vinte e cinco indivíduos realizaram cinco testes de corrida até a exaustão, cada um com duração > 2,5 min e < 16 min. A relação velocidade de dois parâmetros contra tempo até a exaustão gerou valores para a velocidade crítica e a relação velocidade de três parâmetros contra tempo para alcançar o VO_{2max} valores gerados para a velocidade limite acima da qual o VO_{2max} pode ser obtido. As relações foram resolvidas para calcular o tempo mínimo necessário para eliciar o VO_{2max} . **Resultados:** A velocidade crítica ($3,00 \pm 0,38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) e a velocidade limite acima da qual o VO_{2max} pode ser eliciado ($2,99 \pm 0,37 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) foram correlacionadas ($r = 0,83$, $p < 0,01$) e não diferiram ($p = 0,70$), confirmando a velocidade crítica como o limite inferior do domínio grave. O tempo mínimo necessário para eliciar o VO_{2max} ($103 \pm 7 \text{ s}$) e a maior velocidade associada na qual o VO_{2max} pode ser eliciado ($4,98 \pm 0,52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) identificou o limite superior do domínio severo para esses participantes. **Conclusão:** O conceito de potência crítica, que não requer medidas metabólicas, pode ser usado para identificar a velocidade mais baixa em que o VO_{2max} pode ser eliciado. Com a adição de medidas metabólicas, a modelagem matemática também pode identificar a velocidade mais alta e a duração mais curta do exercício em que o VO_{2max} pode ser obtido. **Nível de Evidência I; Estudo de coorte com alto padrão de referência.**

Descritores: Exercício Físico; Corrida; Capacidade Respiratória Máxima; Metabolismo Energético.

ABSTRACT

Introduction: The severe exercise intensity domain can be defined as the range of work rates or speeds over which VO_{2max} can be elicited. **Objectives:** Our purpose was to determine if critical speed (running analog of critical power) identifies the lower boundary of the severe domain and to identify the upper boundary of the domain. **Methods:** Twenty-five individuals performed five running tests to exhaustion, each lasting > 2.5 min and < 16 min. The two-parameter speed vs time-to-exhaustion relationship generated values for critical speed and the three-parameter speed vs time-to-reach- VO_{2max} relationship generated values for the threshold speed above which VO_{2max} can be elicited. The relationships were solved to calculate the minimum time needed to elicit VO_{2max} . **Results:** Critical speed ($3.00 \pm 0.38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) and the threshold speed above which VO_{2max} can be elicited ($2.99 \pm 0.37 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) were correlated ($r = 0.83$, $p < 0.01$) and did not differ ($p = 0.70$), confirming critical speed as the lower boundary of the severe domain. The minimum time needed to elicit VO_{2max} ($103 \pm 7 \text{ s}$) and the associated highest speed at which VO_{2max} can be elicited ($4.98 \pm 0.52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) identified the upper boundary of the severe domain for these participants. **Conclusion:** The critical power concept, which requires no metabolic measurements, can be used to identify the lowest speed at which VO_{2max} can be elicited. With addition of metabolic measurements, mathematical modeling can also identify the highest speed and shortest exercise duration at which VO_{2max} can be elicited. **Evidence Level I; Validating cohort study with good reference standards.**

Keywords: Exercise; Running; Maximal Voluntary Ventilation; Energy Metabolism.

RESUMEN

Introducción: El dominio de la intensidad del ejercicio severo se puede definir como el rango de ritmos o velocidades de trabajo sobre las que se puede obtener el VO_{2max} . **Objetivos:** Nuestro propósito fue determinar si la velocidad crítica (funcionamiento analógico de potencia crítica) identifica el límite inferior del dominio severo e identificar el límite superior del dominio. **Métodos:** Veinticinco personas realizaron cinco pruebas de carrera hasta el agotamiento, cada una con una duración de > 2,5 min y < 16 min. La relación de dos parámetros de velocidad frente a tiempo de agotamiento generó valores para la velocidad crítica y la relación de tres parámetros de velocidad frente a tiempo de alcance de VO_{2max} generó valores para la velocidad umbral por encima del cual se puede obtener el VO_{2max} . Las relaciones se resolvieron para calcular el tiempo mínimo necesario para obtener el VO_{2max} . **Resultados:** La velocidad crítica ($3,00 \pm 0,38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) y la velocidad umbral por encima de la cual se puede obtener el VO_{2max} ($2,99 \pm 0,37 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)



se correlacionaron ($r = 0,83, p < 0,01$) y no difirieron ($p = 0,70$), lo que confirma la velocidad crítica como el límite inferior del dominio severo. El tiempo mínimo necesario para obtener el VO_{2max} (103 ± 7 s) y la velocidad más alta asociada a la que se puede obtener el VO_{2max} ($4,98 \pm 0,52$ m·s⁻¹) identificaron el límite superior del dominio severo para estos participantes. Conclusión: El concepto de potencia crítica, que no requiere mediciones metabólicas, se puede utilizar para identificar la velocidad más baja a la que se puede obtener el VO_{2max} . Con la adición de mediciones metabólicas, el modelado matemático también puede identificar la velocidad más alta y la duración más corta del ejercicio a la que se puede obtener VO_{2max} . **Nivel de Evidencia I; Estudio de cohortes con alto estándar de referencia.**

Descriptor: Ejercicio Físico; Carrera; Ventilación Voluntaria Máxima; Metabolismo Energético.

DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1517-8692202430012021_0311p

Artigo recebido em 02/07/2021 aprovado em 29/08/2022

INTRODUÇÃO

A assimetria da relação potência exponencial contra o tempo de exaustão é a potência crítica (PC).^{1,2} Na corrida, seu análogo é a velocidade crítica (VC).³ É amplamente aceito que a PC é a intensidade limite sobre a qual o VO_{2max} pode ser alcançado,^{4,7} com alguns estudos confirmando⁸⁻¹⁴ e outros contestando essa teoria.¹⁵⁻²² Como essa velocidade limite, a VC identifica o limite entre os domínios de intensidade de exercício pesado e severo, se este último for definido pela capacidade de atingir o VO_{2max} .⁵ Uma vez que deve haver algum tempo mínimo necessário para atingir o VO_{2max} , deve haver um limite superior para o domínio severo, sendo a intensidade mais alta (duração mais curta) em que o VO_{2max} pode ser atingido.^{10,11,23,24}

É importante atingir o VO_{2max} em muitas situações de pesquisa, treinamento e testes de exercício. Portanto, é de importância prática para os esportistas e pesquisadores serem capazes de identificar as intensidades que irão desencadear o VO_{2max} .^{25,26} Ainda assim, permanece incerto que a PC ou VC seja o limite para o VO_{2max} .⁸⁻²² e há escassos dados na literatura sobre um limite superior do domínio severo.^{10,11,23,24} O objetivo do presente estudo foi determinar se VC representa a velocidade limite para atingir o VO_{2max} (ou seja, o limite inferior do domínio severo) e identificar a maior velocidade e a menor duração do exercício em que o VO_{2max} pode ser obtido (ou seja, o limite superior do domínio).

MÉTODOS

Elaboração do estudo e aspectos éticos

O estudo foi aprovado pelo Comitê de Revisão Institucional da Universidade para Proteção de Seres Humanos nº 16.452 e foi conduzido de acordo com a Declaração de Helsinque. Os participantes expressaram seu consentimento informado por escrito antes de qualquer coleta de dados. Utilizando um planejamento dos sujeitos, 25 participantes realizaram cinco testes de exercício e relações modeladas de velocidade contra o tempo de exaustão, velocidade contra o tempo de reação - VO_{2max} e velocidade contra o tempo despendido - VO_{2max} . A validade da VC como limite inferior do domínio severo foi determinada por comparação com dois parâmetros derivados usando dados metabólicos. O limite superior do domínio também foi identificado de duas maneiras.

Sujeitos

Sete mulheres (idade 23 ± 2 anos, altura 164 ± 6 cm, peso 61 ± 6 kg) e 18 homens (24 ± 2 anos, 182 ± 7 cm, 90 ± 21 kg) participaram. Todos eram especialistas em Cinesiologia e praticavam esportes recreativos ou atividades físicas, quatro ou mais vezes por semana. Não houve alteração de hábitos de exercício, dieta ou sono durante o curso do estudo.

Testes exaustivos de corrida em velocidade constante

Os participantes realizaram cinco testes em esteira sem elevação, cada um em um dia diferente sendo todos no período de três semanas. As velocidades foram selecionadas individualmente pelo investigador

senior para provocar a exaustão entre 3 a 12 min (o tempo real de exaustão permaneceu entre 2,5 e 16 min). Os gases expirados foram analisados por ergoespirometria usando um espirômetro MedGraphics (St. Paul, MN, EUA), que foi calibrado antes de cada teste. Os testes foram programados na mesma hora do dia para evitar qualquer efeito conflitante relacionado ao ritmo circadiano nas respostas.²⁷

Velocidade versus tempo de exaustão e determinação da velocidade crítica (VC)

Para cada participante, os dados de velocidade e tempo de exaustão foram ajustados a três modelos matematicamente equivalentes² usando SPSSv22 (Armonk, NY, EUA) para determinar VC e D':

$$\begin{aligned} \text{tempo-para-exaustão} &= D' / (\text{velocidade} - VC) && \text{(Equação 1a)} \\ \text{distância} &= (\text{tempo-para-exaustão} \times VC) + D' && \text{(Equação 1b) e} \\ \text{velocidade} &= VC + (D' / \text{tempo-para-exaustão}) && \text{(Equação 1c)} \end{aligned}$$

O valor de VC foi derivado usando a Equação 1a, que define corretamente (no sentido fisiológico) o tempo até a exaustão como uma variável dependente,² sendo utilizado como critério de medida. Ver Figura 1.

Velocidade versus tempo de reação - VO_{2max} e o limite inferior do domínio de intensidade severa

Os dados de VO_2 de ventilação por respiração foram reduzidos a médias de 8 e 30 respirações consecutivas. O VO_{2max} foi a média mais alta de 30 respirações em cada teste, e o período de retorno para o VO_{2max} foi o tempo desde o início do exercício até o ponto médio em que um VO_2 de 8 respirações foi igual ou superior ao VO_{2max} daquele teste.^{10,14,24,28} Este método aborda a variabilidade diária do VO_{2max} calculando o tempo para atingir o VO_{2max} mais alto atingido no teste. A velocidade e o tempo de retorno dos dados de VO_{2max} foram ajustados à Equação 2:

$$\text{tempo-para-atingir-}VO_{2max} = D'' / (\text{velocidade} - \text{velocidade-máxima-estável}) + \alpha \quad \text{(Equação 2)}$$

A velocidade máxima em estado de equilíbrio (a assíntota vertical) é a maior velocidade associada a uma resposta de VO_2 em estado estável e, por definição, a velocidade limite acima da qual o VO_{2max} possa ser atingido. O parâmetro α é a assíntota horizontal. Ver Figura 1.

Velocidade versus tempo gasto em- VO_{2max} e os limites inferior e superior do domínio de intensidade severa

Existe uma relação hiperbólica entre velocidade e tempo consumido no VO_{2max} .^{10,14,19,20,24} (tempo para a exaustão subtraindo o tempo para o VO_{2max}). A velocidade e o tempo gasto no VO_{2max} foram ajustados à Equação 3:

$$\text{período-gasto-em-VO}_{2\text{max}} = \frac{D'''}{\text{velocidade} - \text{mínima-VO}_{2\text{max}} - \text{velocidade}} + \frac{D'''}{\text{velocidade-limite-superior} - \text{velocidade-mínima-VO}_{2\text{max}}} \quad (\text{Equação 3})$$

A velocidade mínima- $\text{VO}_{2\text{max}}$ (a assíntota vertical) define a velocidade mais baixa na qual o $\text{VO}_{2\text{max}}$ pode ser alcançado. A velocidade limite superior (o conceito x) é a maior velocidade associada à obtenção do $\text{VO}_{2\text{max}}$. O tempo associado a esta velocidade (tempo mínimo de retorno - $\text{VO}_{2\text{max}}$) foi determinado usando esta velocidade e a equação 1a. Ver Figura 1.

Equação 1a, Equação 2 e o limite superior do domínio de intensidade severa

A interseção das curvas descritas pelas Equações 1a e 2 identifica o tempo mínimo de retorno do $\text{VO}_{2\text{max}}$ (ou seja, o tempo de exaustão igual ao tempo de retorno do $\text{VO}_{2\text{max}}$) e a maior velocidade associada à obtenção do $\text{VO}_{2\text{max}}$. Esta velocidade foi calculada equalizando os lados direitos destas duas equações, usando os valores individuais para os parâmetros e resolvendo para a velocidade:

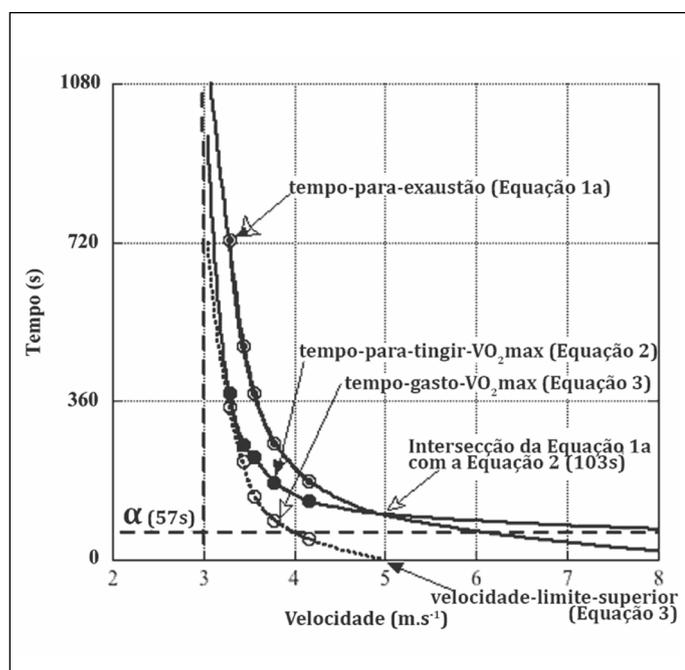


Figura 1. Dados médios adequados à Equação 1a, Equação 2, e Equação 3. A Equação 1a (pequenos círculos fechados dentro de círculos abertos, linha sólida) corresponde à velocidade versus tempo de exaustão; a Equação 2 (círculos fechados, linha sólida) corresponde à velocidade versus tempo de retorno $\text{VO}_{2\text{max}}$; e a Equação 3 (círculos abertos, linha pontilhada) corresponde à velocidade versus tempo de retorno $\text{VO}_{2\text{max}}$. Os pontos de dados são os valores médios para os 25 participantes. As assíntotas verticais (linhas tracejadas sobrepostas) representam a VC (3,00 0,38 m.s⁻¹ da Equação 1a), a velocidade máxima em estado estabilizado (2,99 0,37 m.s⁻¹ da Equação 2), e a velocidade mínima- $\text{VO}_{2\text{max}}$ (2,98 0,34 m.s⁻¹ da Equação 3). Também são identificadas no gráfico a assíntota horizontal (57 s da Equação 2), o ponto de interseção da Equação 1a e da Equação 2 (calculado usando a Equação 4) (5,01 0,49 m.s⁻¹, 102,7 s), e a velocidade limite superior (4,98 ± 0,52 m.s⁻¹) da Equação 3.

Tabela 1. Respostas médias (± DP) durante os cinco testes de exaustão, executados em esteira. Diferentes sobrescritos são utilizados para identificar as médias que diferem, quando revelado um efeito significativo pela ANOVA.

	Testes de exaustão (do mais curto para o mais longo, da esquerda para a direita)					ANOVA
Velocidade (m.s ⁻¹)	4,15 ± 0,43 ^a	3,78 ± 0,50 ^b	3,55 ± 0,52 ^c	3,43 ± 0,56 ^d	3,28 ± 0,57 ^e	p < 0,01
tempo para exaustão (s)	180 ± 21 ^a	265 ± 38 ^b	378 ± 45 ^c	485 ± 69 ^d	726 ± 102 ^e	p < 0,01
tempo alcançar $\text{VO}_{2\text{max}}$ (s)	133 ± 24 ^a	175 ± 31 ^b	233 ± 45 ^c	262 ± 77 ^d	380 ± 104 ^e	p < 0,01
tempo gasto no $\text{VO}_{2\text{max}}$ (s)	47 ± 22 ^a	90 ± 35 ^b	145 ± 46 ^c	223 ± 73 ^d	346 ± 102 ^e	p < 0,01
$\text{VO}_{2\text{max}}$ (L.min ⁻¹)	3,60 ± 0,73	3,59 ± 0,74	3,60 ± 0,70	3,61 ± 0,71	3,60 ± 0,79	p = 0,68

$$\frac{D'}{\text{velocidade} - \text{VC}} = \frac{D''}{\text{velocidade} - \text{velocidade-máxima-estável}} + \alpha \quad (\text{Equação 4})$$

O tempo associado a esta velocidade (tempo mínimo de retorno - $\text{VO}_{2\text{max}}$) foi determinado usando esta velocidade e equação 1a.

Análises estatísticas

Para avaliar a precisão da medida de VC, os valores de VC e D' nas Equações 1a, 1b e 1c foram comparados usando uma análise de variância de medidas repetidas (rANOVA). As estimativas da velocidade que demarcam os domínios pesados e severos (VC da Equação 1a, velocidade máxima em estado estacionário da Equação 2, e velocidade mínima- $\text{VO}_{2\text{max}}$ da Equação 3) foram comparadas usando rANOVA. As estimativas do limite superior do domínio de intensidade severa (velocidade limite superior da Equação 3 e a velocidade calculada a partir da interseção das Equações 1a e 2, usando a Equação 4) foram comparadas usando um teste-t pareado. A significância foi definida em p < 0,05. Todas as análises foram realizadas usando o SPSSv22. Os dados são apresentados como média ± SD.

RESULTADOS

As respostas nos testes na esteira são exibidas na Tabela 1. Os valores para VC e D' das equações 1a, 1b e 1c encontram-se na Tabela 2. Os valores para os parâmetros das Equações 2 e 3 foram dispostos na Tabela 3. Não houve qualquer diferença (p = 0,49) entre a velocidade limite superior (4,98 ± 0,52 m.s⁻¹ da Equação 3) e a velocidade mais alta capaz de obter o $\text{VO}_{2\text{max}}$ (5,01 ± 0,49 m.s⁻¹, obtida usando a Equação 4; r = 0,94, p < 0,001). O gráfico 29 de Bland-Altman é apresentado na Figura 2. A substituição destas velocidades pela Equação 1a demonstrou que o tempo mínimo de retorno do $\text{VO}_{2\text{max}}$ foi de 102 ± 7 s (baseado na Equação 4) ou 103 ± 7 s (baseado na Equação 3).

Os resultados do rANOVA não revelaram diferenças significativas (p = 0,89) entre as três estimativas da velocidade que delimitam os domínios intensos e severos (VC da Equação 1a, velocidade máxima em estado estacionário da Equação 2, e velocidade mínima- $\text{VO}_{2\text{max}}$ da Equação 3). A correlação intraclasse foi de 0,96 (p < 0,001). Os gráficos de Bland-Altman²⁹ estão nas Figuras 3, 4, e 5.

Tabela 2. Valores médios (± DP) para CS e D' gerados usando a Equação 1a (que relaciona o tempo até a exaustão e a velocidade), a Equação 1b (que relaciona a distância e o tempo até a exaustão) e a Equação 1c (que relaciona a velocidade e o inverso do tempo até a exaustão). O SEE das estimativas também é fornecido, tanto nas unidades de medida (em itálico, entre colchetes) quanto como uma porcentagem da estimativa do parâmetro (em itálico). O coeficiente de variação (CV) descreve a variabilidade entre os valores das três equações.

	Equação 1a	Equação 1b	Equação 1c	ANOVA	CV
CS (m/s)	3,00 ± 0,38	3,00 ± 0,40	3,01 ± 0,43	p = 0,89	0,6 ± 0,5%
	<i>[0,08 ± 0,08]</i>	<i>[2 ± 3]</i>	<i>[5 ± 5]</i>		
	3 ± 1%	1 ± 0%	3 ± 0%		
D' (m)	205 ± 63	205 ± 63	205 ± 59	p = 0,93	0,7 ± 0,6%
	<i>[12 ± 6]</i>	<i>[11 ± 7]</i>	<i>[14 ± 8]</i>		
	6 ± 1%	5 ± 1%	7 ± 2%		
R ² ajustado	0,997 ± 0,001	0,999 ± 0,001	0,992 ± 0,007		

Tabela 3. Valores médios (\pm DP) dos parâmetros da Equação 2 (que relaciona a velocidade e o tempo para alcançar o VO₂max) e da Equação 3 (que relaciona a velocidade e o tempo gasto no VO₂max). O SEE das estimativas também é fornecido, tanto nas unidades de medida (em *itálico*, entre colchetes) quanto como porcentagem da estimativa do parâmetro (em *itálico*). O símbolo † identifica as variáveis que são exclusivas da Equação 2 e o símbolo ‡ identifica as variáveis que são exclusivas da Equação 3.

	†velocidade máxima em estado estacionário	†D''	†a		
	‡velocidade mínima de VO ₂ max	‡D'''		‡velocidade-limite-superior	R ²
	(m/s)	(m)	(s)	(m/s)	
†Equação 2	2,99 ± 0,37	90 ± 25	57 ± 6		
	[0,11 ± 0,10]	[7 ± 7]	[5 ± 7]		0,979 ± 0,012
	4 ± 1%	8 ± 2%	9 ± 2%		
‡Equação 3	2,98 ± 0,34	125 ± 23		4,98 ± 0,52	
	[0,12 ± 0,11]	[10 ± 8]		[0,17 ± 0,11]	0,983 ± 0,010
	4 ± 1%	8 ± 2%		3 ± 2%	

Observe que a velocidade máxima de estado estacionário da Equação 2 identifica a velocidade acima da qual o VO₂max pode ser obtido, enquanto a velocidade mínima de VO₂max da Equação 3 é a menor velocidade na qual o VO₂max pode ser obtido.

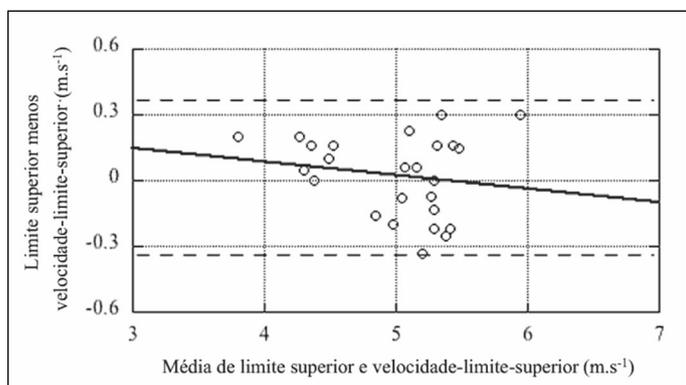


Figura 2. O gráfico de Bland-Altman²⁹ demonstra a similaridade das duas medidas diretamente determinadas do limite superior do domínio de intensidade de exercício severo (ou seja, a maior velocidade associada ao alcançar o VO₂max). A primeira medida representa a intersecção da Equação 1a e Equação 2 usando a Equação 4 e a segunda medida representa a velocidade limite superior (da Equação 3). A equação de regressão descrevendo a relação (linha sólida) foi $Y = 0,338 - 0,062 X$ ($R^2 = 0,003$). Os limites de tolerância (média \pm 1,96 DP) são apresentados como linhas tracejadas.

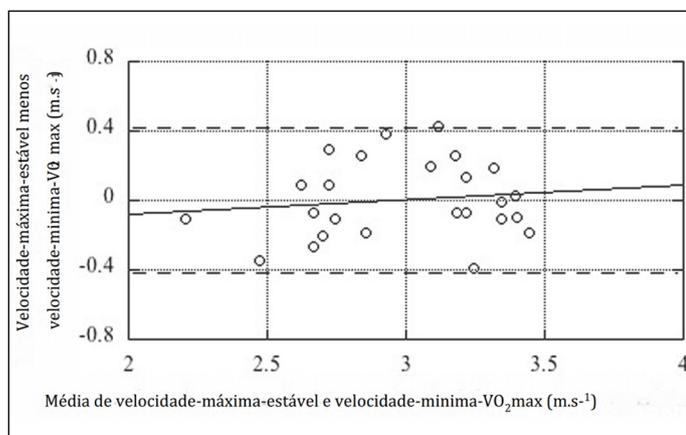


Figura 3. O gráfico de Bland-Altman²⁹ comprova a similaridade dos dois identificadores diretamente determinados ao limite inferior do domínio de intensidade severa do exercício. A primeira medida representa a velocidade máxima em estado estacionário (da Equação 2) e a segunda medida representa a velocidade mínima-VO₂max (da Equação 3). A equação de regressão descrevendo a relação (linha sólida) foi $Y = 0,238 + 0,081 X$ ($R^2 = 0,002$). Os limites de tolerância (média \pm 1,96 SD) são apresentados como linhas tracejadas. Este resultado verificou a adequação da Equação 2 e da Equação 3 para descrever as relações entre a cinética do VO₂ (ou seja, tempo de retorno VO₂max e tempo gasto no VO₂max) e a velocidade de execução e, portanto, para calcular diretamente o limite inferior do domínio severo.

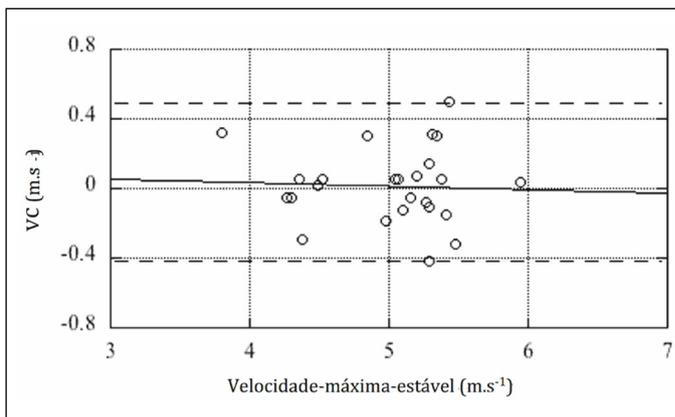


Figura 4. O gráfico de Bland-Altman²⁹ evidencia a semelhança da VC (da Equação 1a) e dos identificadores diretamente determinados do limite inferior do domínio de intensidade de exercício severa, ou seja, a velocidade máxima em estado estacionário (da Equação 2). Como proposto por Krouwer³² a medida critério ("padrão ouro") é usada como eixo X (ao invés da média das duas medidas). A equação de regressão que descreve a relação (linha sólida) foi $Y = 0,428 - 0,138 X$ ($R^2 = 0,055$). Os limites de tolerância (média \pm 1,96 x DP) são apresentados como linhas tracejadas. Este resultado verificou o postulado de que a VC é o limite de intensidade acima do qual o VO₂max pode ser eliciado e que ele identifica o limite inferior do domínio de intensidade de exercício severa.

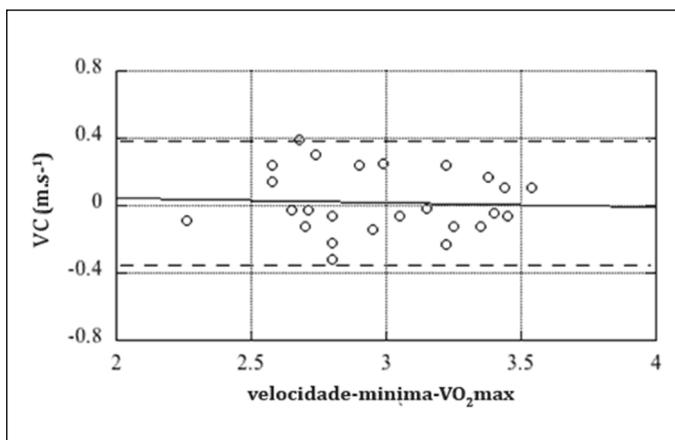


Figura 5. O gráfico de Bland-Altman²⁹ exibe a similaridade da VC (da Equação 1a) e um dos identificadores diretamente determinados do limite inferior do domínio de intensidade de exercício severa, nomeado velocidade-mínima-VO₂max (da Equação 3). Como proposto por Krouwer,³² a medida critério ("padrão ouro") é usada como eixo X (ao invés da média das duas medidas). A equação de regressão que descreve a relação (linha sólida) foi $Y = 0,104 - 0,028 X$ ($R^2 = 0,003$). Os limites de tolerância (média \pm 1,96 x DP) são apresentados como linhas tracejadas. Este resultado verificou o postulado de que a VC é o limite de intensidade acima do qual o VO₂max pode ser atingido e que ele identifica o limite inferior do domínio de intensidade de exercício severa.

DISCUSSÃO

A primeira descoberta importante no presente estudo é que a VC, análoga em funcionamento à PC, pode identificar a velocidade limite sobre a qual obtém-se o VO₂max. Assim, o limite inferior do domínio de intensidade severa do exercício pode ser identificado usando a Equação 1a, dispensando a realização de medições metabólicas. O segundo resultado importante foi que o limite superior do domínio de intensidade severa (ou seja, a maior velocidade de corrida associada à obtenção do VO₂max) pôde ser identificado calculando a intersecção das curvas descritas pelas Equações 1a e 2, ou, alternativamente, usando a Equação 3.

A evidência mais amplamente citada apoiando a afirmação de que o VO₂max só pode ser alcançado durante o exercício acima da PC ou VC é de um estudo de referência no qual oito homens foram testados sob PC e PC + 8% onde o valor final do VO₂max no grupo de exercício PC + 8% (97 \pm 6% VO₂max) não diferiu-se do VO₂max do grupo complementar.¹² Após o treinamento, os mesmos homens foram testados em sua nova

PC e na PC + 11% e o VO_{2max} do exercício final ($95 \pm 5\% VO_{2max}$) também não diferiu do VO_{2max} .¹³ A aceitação generalizada deste postulado (por referência direta a estes estudos^{12,13} ou indiretamente a revisões⁴⁻⁷) demonstra a força dos autores, embora obscureça a escassez de uma confirmação direta e incontestável. Nossos resultados apoiam a alegação de que a PC ou VC é a intensidade limite acima da qual o VO_{2max} é atingido e são consistentes com os resultados de estudos que utilizaram a modelagem matemática^{10,11,14} ou a medição direta do VO_2 na PC ou VC,^{8,9,12,13} ou acima dela, porém devem ser pesados contra resultados equivocados²⁴ e contra os resultados contraditórios obtidos em estudos bem executados por Billat et al.¹⁸⁻²¹ e outros.^{15-17,22}

O segundo resultado importante do presente estudo foi a identificação do limite superior do domínio de intensidade severa. Embora seja necessário algum tempo mínimo para atingir o VO_{2max} em exercício,^{8,10,11,14,18,19,23,24,30} poucos estudos procuraram calcular esse período.^{10,11,23,24} Hill e Ferguson¹⁰ sugeriram que a interseção da potência curvilínea versus o tempo de exaustão e relações de potência versus o tempo de retorno do VO_{2max} identificariam o menor tempo de retorno do VO_{2max} . O presente estudo é o primeiro a fazê-lo, utilizando um modelo de três parâmetros da relação velocidade versus o tempo de retorno VO_{2max} (Equação 2). A Equação 2 é teoricamente sólida e se encaixa bem nos dados, gerando estimativas de parâmetros com SEE pequeno e R^2 elevado (ver Tabela 3). Também foi utilizado um modelo hiperbólico de três parâmetros da relação entre velocidade e tempo gasto no VO_{2max} (Equação 3). A Equação 3 também é teoricamente sólida, encaixando-se nos dados (ver Tabela 3). Assim, os resultados validaram que esses modelos identificam diretamente o limite inferior do domínio de intensidade severa.

Os resultados da Equação 3 mostraram que o VO_{2max} pode ser alcançado na corrida a uma velocidade de $4,98 \pm 0,52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, uma velocidade associada a uma duração tolerável de $103 \pm 7 \text{ s}$; e os resultados da Equação 4 apresentaram $5,01 \pm 0,49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $102 \pm 7 \text{ s}$. As estimativas anteriores do tempo mínimo de retorno do VO_{2max} no ciclismo foram $136 \pm 17 \text{ s}$,¹¹ aproximadamente 151 s ,²⁴ aproximadamente 152 s ,²⁴ ou $159 \pm 38 \text{ s}$ para estudantes de cinesiologia,²³ $103 \pm 51 \text{ s}$ para ciclistas treinados de resistência,²³ e $153 \pm 50 \text{ s}$ para corredores treinados.²³ Juntos, estes resultados sugerem que o limite superior do domínio severo está associado a durações toleráveis de aproximadamente 1,5 a 2,5 min sendo afetado pelo modo de exercício e talvez pelo nível de aptidão física. O limite superior pode ser estimado utilizando as (a) relações lineares entre o tempo até a exaustão e o tempo até o VO_{2max} ,^{11,23,24} (b) relação hiperbólica entre o tempo até a exaustão e a amplitude do componente lento,²³ (c) ponto de interseção da Equação 1a e da Equação 2 (presente estudo), ou (d) relação assintótica entre tempo gasto no VO_{2max} e velocidade (Equação 3, presente estudo).

Uma consideração importante em estudos como este é a precisão do cálculo da PC ou VC. Os valores são precisos se as estimativas das Equações 1a, 1b e 1c forem semelhantes³¹ e, no presente estudo, foram: o coeficiente médio de variação entre as três estimativas de PC, bem como entre as três estimativas de D', foi inferior a 1%. Além disso, as SEE associadas com VC e D' foram $3 \pm 1\%$ e $6 \pm 1\%$ das respectivas estimativas de parâmetros, bem dentro de diretrizes validadas para a precisão.³¹

Um novo parâmetro, α , foi introduzido. Assim como a velocidade mínima- VO_{2max} (assíntota vertical) na Equação 2 é a velocidade acima da qual o VO_{2max} pode ser alcançado, assim (assíntota horizontal) é o tempo acima do qual o VO_{2max} pode ser alcançado. Na Figura 1, a curva da Equação 2 sugere que, à medida que a velocidade aumenta, o tempo de retorno do VO_{2max} diminui e se aproxima dos 57 s: este deve ser o tempo mínimo de retorno do VO_{2max} para nossos participantes. Entretanto, quando a

curva da Equação 1a é sobreposta à curva da Equação 2, fica claro que o VO_{2max} não será desencadeado no exercício a velocidades acima de aproximadamente $5,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (para os participantes desse estudo) porque a exaustão ocorre enquanto o VO_2 ainda está aumentando, projetando-se para o seu máximo.^{24,30} Para esses participantes, o tempo mínimo real de retorno do VO_{2max} foi de $102 \pm 7 \text{ s}$ ou $103 \pm 7 \text{ s}$, e não $57 \pm 6 \text{ s}$. Há hipóteses de que α possa fornecer uma medida da cinética potencialmente (ou, pelo menos, teoricamente) mais rápida possível, na forma de um tempo teórico mínimo de retorno do VO_{2max} . É um parâmetro virtual, porque o VO_{2max} não pode ser realmente alcançado devido ao exercício no domínio de intensidade extrema ser finalizado por fadiga antes da realização do VO_{2max} . No entanto, o parâmetro α é um descritor importante da resposta global do VO_2 que dita a dependência das reservas anaeróbicas, e assim influencia a tolerância tanto no exercício de intensidade severa quanto no de intensidade extrema, e cujo cálculo não envolve as complicações associadas à modelagem da cinética do VO_2 .

O conhecimento dos limites do domínio severo é de importância prática para os cientistas e praticantes do esporte que elaboram protocolos para testes e treinamento de VO_{2max} . Obviamente, muitos treinadores e atletas não terão acesso aos equipamentos necessários para medir as respostas metabólicas. Entretanto, a maioria deles sabe o que é VO_{2max} por que ele é importante e que o treinamento no VO_{2max} é importante para os atletas de alto nível. Para treinar no VO_{2max} é necessário saber quais velocidades ou taxas de trabalho irão gera-lo. Mesmo sem acesso ao teste de VO_2 , os treinadores podem determinar individualmente para seus atletas a taxa mínima de trabalho ou velocidade para alcançá-lo, calculando sua PC ou VC e usando dados de teste de tempo ou de competição. Os treinadores que não têm acesso ao teste de VO_2 e não podem determinar a velocidade máxima de seus atletas para atingir o VO_{2max} em uma base individual, podem se beneficiar da constatação de que é necessária uma duração mínima tolerável de aproximadamente 1,5 min para obter o VO_{2max} na corrida, provavelmente um pouco menos em atletas com melhor aptidão. Isto significa que as velocidades de treinamento devem ser sustentáveis e sustentadas por pelo menos 1,5 min para que o VO_{2max} possa ser atingido.

CONCLUSÃO

Conclui-se que dois modelos hiperbólicos de três parâmetros (Equação 2 e Equação 3) fornecem descrições válidas das relações entre velocidade e tempo de retorno do VO_{2max} e entre velocidade e tempo gasto no VO_{2max} , respectivamente. Foi confirmado que a VC é o limiar para atingir o VO_{2max} sem a necessidade de medir o VO_2 diretamente. Adicionalmente, pode-se identificar o limite superior do domínio severo para corrida, primeiro usando a relação entre velocidade e tempo gasto no VO_{2max} (Equação 3) ou usando a Equação 4 para calcular a interseção da curva velocidade versus o tempo de exaustão (Equação 1a) e a curva velocidade versus o tempo de retorno do VO_{2max} (Equação 2). O limite superior foi associado a um tempo até a exaustão de aproximadamente 103 s nos participantes, o menor tempo em que o VO_{2max} pode ser alcançado. Finalmente, o modelo velocidade versus o tempo de retorno do VO_{2max} (Equação 2) gera um parâmetro α que pode descrever uma característica importante do sistema aeróbico.

Todos os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.

REFERÊNCIAS

1. Monod H, Scherrer J. The work capacity of a synergic muscle group. *Ergonomics*. 1965;8(3):329-38.
2. Hill DW. The critical power concept: A review. *Sports Med*. 1993;16(4):237-54.
3. Hughson RL, Cook CJ, Staudt LE. A high speed treadmill running test to assess endurance running potential. *Int J Sports Med*. 1984;5(1):23-5.
4. Burnley M, Jones AM. Oxygen uptake kinetics as a determinant of sports performance. *Int J Sports Physiol Perform*. 2009;4(4):524-32.
5. Gaesser GA, Poole DC. The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. In: Holloszy JO, ed. *Exercise and Sport Sciences Reviews*. Baltimore, MD: Williams and Wilkins; 1996. p. 35-70.
6. Jones AM, Burnley M, Black MI, Poole DC, Vanhatalo A. The maximal metabolic steady state: redefining the 'gold standard'. *Physiol Rev*. 2019;7(10):e14098.
7. Jones AM, Vanhatalo A, Burnley M, Morton RH, Poole DC. Critical power: Implications for determination of VO_{2max} and exercise tolerance. *Med Sci Sports Exerc*. 2010;42(10):1876-90.
8. de Lucas RD, de Souza KM, Costa VP, Grossi T, Guglielmo LGA. Time to exhaustion at and above critical power in trained cyclists: The relationship between heavy and severe intensity domains. *Sci Sports*. 2013;28(1):e9-e11.
9. Francis TJ Jr, Quinn TJ, Amann M, Laroche DP. Defining intensity domains from end power of a 3-min all-out cycling test. *Med Sci Sports Exerc*. 2010;42(9):1769-75.
10. Hill DW, Ferguson CS. A physiological description of critical speed. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1999;79(3):290-3.
11. Hill DW, Poole DC, Smith JC. The relationship between power and the time to achieve VO_{2max} . *Med Sci Sports Exerc*. 2002;34(4):709-14.
12. Poole DC, Ward SA, Gardner GW, Whipp BJ. Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics*. 1988;31(9):1265-79.
13. Poole DC, Ward SA, Whipp BJ. The effects of training on the metabolic and respiratory profile of high-intensity cycle ergometer exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1990;59(6):421-9.
14. Hill DW, Smith JC. Determination of critical power by pulmonary gas exchange. *Can J Appl Physiol*. 1999;24(1):74-86.
15. Bergstrom HC, Housh TJ, Cochrane-Snyman KC, Jenkins NDM, Byrd MT, Switalla JR, et al. A model for identifying intensity zones above critical velocity. *J Strength Cond Res*. 2017;31(12):3260-5.
16. Bergstrom HC, Housh TJ, Zuniga JM, Traylor DA, Lewis RW, Camic CL, et al. Mechanographic and metabolic responses during continuous cycle ergometry at critical power from the 3-min all-out test. *J Electromyogr Kinesiol*. 2013;23(2):349-55.
17. Bergstrom HC, Housh TJ, Zuniga JM, Traylor DA, Lewis RW, Camic CL, et al. Metabolic and neuromuscular responses at critical power from the 3-min all-out test. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2013;38(1):7-13.
18. Billat V, Binsse V, Petit B, Koralsztein JP. High level runners are able to maintain a VO_{2e} steady state below VO_{2max} in an all-out run over their critical velocity. *Arch Physiol Biochem*. 1998;106(1):38-45.
19. Billat V, Blondel N, Berthoin S. Determination of the velocity associated with the longest time to fatigue at maximal oxygen uptake. *Eur J Appl Physiol*. 1999;80(2):159-61.
20. Billat VL, Morton RH, Blondel N, Berthoin S, Bocquet V, Koralsztein JP, et al. Oxygen kinetics and modeling of time to exhaustion whilst running at various velocities at maximal oxygen uptake. *Eur J Appl Physiol*. 2000;82(3):178-87.
21. Morton RH, Billat V. Maximal endurance time at VO_{2max} . *Med Sci Sports Exerc*. 2000;32(8):1496-504.
22. Sawyer BJ, Morton RH, Womack CJ, Gaesser GA. VO_{2max} may not be reached during exercise to exhaustion above critical power. *Med Sci Sports Exerc*. 2012;44(8):1533-8.
23. Caputo F, Denadai BS. The highest intensity and the shortest duration permitting attainment of maximal oxygen uptake during cycling: effects of different methods and aerobic fitness level. *Eur J Appl Physiol*. 2008;103(1):47-57.
24. Hill DW, Stevens EC. VO_{2e} response profiles in severe intensity exercise. *J Sports Med Phys Fitness*. 2005;45(3):239-47.
25. Dupond G, Berthoin S. Time spent at a high percentage of VO_{2max} for short intermittent runs: Active versus passive recovery. *Can J Appl Physiol*. 2004;29(5):53-56.
26. Midgley AW, McNaughton LR, Wilkinson M. Criteria and other methodological considerations in the evaluation of time at VO_{2max} . *J Sports Med Phys Fitness*. 2006;46(2):183-8.
27. Hill DW. Morning-evening differences in responses to exhaustive severe-intensity exercise. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2014;39(2):248-54.
28. Hill DW, Stephens LP, Blumoff SA, Poole DC, Smith JC. Effect of sampling strategy on measures of VO_{2peak} obtained using commercial breath-by-breath systems. *Eur J Appl Physiol*. 2003;89(6):564-9.
29. Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet*. 1986;1(8476):307-10.
30. Hughson RL, O'Leary DD, Betick AC, Hebestreit H. Kinetics of oxygen uptake at the onset of exercise near or above peak oxygen uptake. *J Appl Physiol* (1985). 2000;88(5):1812-9.
31. Hill DW, Smith JC. A method to ensure the accuracy of estimates of anaerobic capacity derived using the critical power concept. *J Sports Med Phys Fitness*. 1994;34(1):23-37.
32. Krouwer JS. Why Bland-Altman plots should use X, not (Y+X)/2, when X is a reference method. *Stat Med*. 2008;27(5):778-80.