
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO HUMANO E TECNOLOGIAS**

**Determinantes da tolerância ao exercício nos domínios de
intensidade severo ao extremo: Insights sobre o
metabolismo energético e modelos de predição da
performance**

Rubens Correa Junior

**Rio Claro - SP
2026**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO HUMANO E TECNOLOGIAS**

**Determinantes da tolerância ao exercício nos domínios de
intensidade severo ao extremo: Insights sobre o
metabolismo energético e modelos de predição da
performance**

Rubens Correa Junior

Dissertação apresentada ao Instituto de
Biociências do Câmpus de Rio Claro,
Universidade Estadual Paulista, como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Desenvolvimento Humano e
Tecnologias

.....

Orientadora: Prof. Dra. Camila Coelho Greco

**Rio Claro - SP
2026**

C824d	Correa Junior, Rubens Determinantes da tolerância ao exercício nos domínios de intensidade severo ao extremo: Insights sobre o metabolismo energético e modelos de predição da performance / Rubens Correa Junior. -- Rio Claro, 2026 85 p. : tabs. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Rio Claro Orientadora: Camila Coelho Greco 1. potência crítica. 2. consumo máximo de oxigênio. 3. metabolismo energético. 4. exercício de alta intensidade. 5. performance. I. Título.
-------	---

Impacto potencial desta pesquisa

Apesar dos recentes avanços na compreensão dos fatores determinantes da tolerância ao exercício no domínio de intensidade severo (~ 2 a 15 minutos), ainda muito se discute sobre se esses mesmos mecanismos também são capazes de determinar a tolerância ao exercício no domínio de intensidade extremo (*i.e.*, intensidades acima da potência crítica que não permitem o atingimento do consumo máximo de oxigênio). Neste sentido, o presente estudo buscou, por meio dos parâmetros da relação hiperbólica potência-tempo (*i.e.*, potência crítica e trabalho acima da potência crítica), explicar a tolerância ao exercício no domínio de intensidade extremo. Além disso, visou, de forma abrangente, caracterizar as respostas fisiológicas e os perfis de contribuição energética durante estes exercícios. Desta maneira, as informações obtidas nesta pesquisa podem contribuir significativamente para o entendimento dos aspectos determinantes da tolerância humana em condições de exercício nas quais a exaustão ocorre em períodos muito curtos (< 2 min), antecedendo o atingimento do consumo máximo de oxigênio. Além disso, do ponto de vista prático, essas informações podem auxiliar atletas, treinadores e cientistas na prescrição de treinamentos intervalados de alta intensidade, visando à maximização do desempenho atlético, bem como na adoção de estratégias mais eficazes durante competições.

Potential impact of this research

Despite recent advances in our understanding of the determinants of exercise tolerance in the severe-intensity domain (~ 2 to 15 min), there is still debate over whether these mechanisms are also capable of determining exercise tolerance in the extreme-intensity domain (*i.e.*, intensities above critical power that do not allow the attainment of maximal oxygen uptake). In this sense, the current study aimed to explain exercise tolerance in the extreme-intensity domain through the hyperbolic power-duration relationship (*i.e.*, critical power and work above critical power). Moreover, aimed to comprehensively characterize the physiological responses and energy system profiles within these exercises. Therefore, the findings of this research may significantly contribute to our understanding of the factors that determine human tolerance during exercise conditions in which exhaustion occurs within very short periods (< 2 min), before the attainment of maximal oxygen uptake. Furthermore, from a practical perspective, these insights can help athletes, coaches, and scientists in the interval training prescription, aiming to maximize athletic performance, as well as the adoption of more efficient strategies during competitions.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Determinantes da tolerância ao exercício nos domínios de intensidade severo ao extremo: Insights sobre o metabolismo energético e modelos de predição da performance

AUTOR: RUBENS CORREA JÚNIOR

ORIENTADORA: CAMILA COELHO GRECO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Desenvolvimento Humano e Tecnologias, área: Tecnologias nas Dinâmicas Corporais pela Comissão Examinadora:



Profa. Dra. CAMILA COELHO GRECO (Participação Presencial)
Departamento de Educação Física / UNESP / Câmpus de Rio Claro - IB

Prof. Dr. FABRIZIO CAPUTO (Participação Virtual)
UDESC / Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Dr. RICARDO DANTAS DE LUCAS (Participação Virtual)
UFSC / Universidade Federal de Santa Catarina

Rio Claro, 04 de agosto de 2026.

Dedico este trabalho a minha mãe, *Cristiane Celeste de Oliveira*
Correa, por sempre me incentivar em todas as minhas decisões.

Agradecimentos

Gostaria de iniciar esta seção expressando minha profunda gratidão à minha mãe, Cristiane Celeste de Oliveira Correa, e ao meu pai, Rubens Correa, por serem, em todos os momentos, pilares fundamentais em minha vida e incansáveis apoiadores das minhas decisões.

Aos meus familiares, em especial à minha avó Tereza e aos meus tios Reginaldo e Rafael, agradeço por estarem sempre presentes, compartilhando comigo tanto os momentos de alegria quanto os desafios. Aos demais familiares e amigos, deixo também o meu sincero reconhecimento e gratidão, vocês são essenciais e tornam essa trajetória muito mais significativa.

À professora Camila Coelho Greco, expresso minha gratidão por todos os ensinamentos e pelas oportunidades proporcionadas ao longo desses anos de laboratório. Em especial, durante o período de mestrado, agradeço pelo empenho constante em tornar esta pesquisa viável e pela dedicação em cada etapa do processo. De forma semelhante, gostaria de agradecer a todas as pessoas com quem compartilhei estes anos de laboratório e que foram fundamentais nesta jornada de crescimento, pelas horas valiosas de trocas de conhecimentos e por todo companheirismo no cotidiano. Nesse sentido, incluo meus grandes amigos Renan Vieira Barreto e Gabriel Fontanetti; o Renato Caritá (Bola) por ter sido um pilar durante as longas coletas de dados, a técnica do laboratório, Renata Tardivo; o professor Benedito Sergio Denadai; e os amigos Leonardo Coelho Rabello de Lima, Lucas Duran e Leonardo Palaro.

Ao professor Bruno Grassi, expresso minha profunda gratidão por todos os ensinamentos e pelas oportunidades vivenciadas durante o estágio de pesquisa no

exterior. Foi uma honra poder vivenciar essa experiência na belíssima cidade de Udine, Itália, assim como participar do grandioso projeto de *bed rest* conduzido pela Agência Espacial Italiana. De forma semelhante, gostaria de agradecer a todas as pessoas com quem compartilhei estes meses de laboratório e que foram fundamentais nesta jornada. Neste sentido, incluo meus grandes amigos Paulo Cesar Nascimento Salvador, Giovani Baldassarre, e Lucrezia Zucarelli. Em especial, estendo meus agradecimentos à família Nascimento Salvador, por ter me acolhido em território italiano e por tornar os dias mais leves e especiais durante todo o estágio.

Nesta seção, gostaria de agradecer à **Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo (FAPESP)** (*nº 2024/09303-0; nº 2025/01037-2; nº 2025/20036-7*) por tornar viável toda essa jornada de mestrado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (**FAPESP**), Brasil. Processos nº **2024/09303-0** e **2025/01037-2**. As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do(s) autor(es) e não necessariamente refletem a visão da **FAPESP**. Por fim, agradeço a todos os voluntários pelo valioso empenho e dedicação ao longo de todas as sessões de coleta experimental.

RESUMO

O tempo até a exaustão durante esforços realizados no domínio de intensidade severo (~ 2 a 15 min) pode ser predito com acurácia utilizando os parâmetros da relação hiperbólica entre a potência e a duração (potência crítica, PC; e o trabalho acima da potência crítica, W'). Contudo, existe um debate considerável em relação à sua capacidade de predição durante esforços mais curtos, tais como aqueles realizados no domínio de intensidade extremo. **Objetivo:** (1) Determinar se o W' na exaustão seria totalmente depletado; (2) Verificar se a tolerância ao exercício no domínio de intensidade extremo seria predita acuradamente utilizando a PC e o W' . **Métodos:** Onze ciclistas bem treinados realizaram: (1) Quatro testes de carga constantes no domínio de intensidade severo para estimar a PC e o W' ; (2) Um a dois testes de carga constante para determinar a mais alta intensidade na qual o consumo máximo de oxigênio pode ser atingido (I_{HIGH}); e (3) Dois testes de carga constante no domínio de intensidade extremo ($I_{HIGH}+10\%$ e $I_{HIGH}+15\%$). **Resultados:** Não foram observadas diferenças significantes entre a tolerância ao exercício realizada x tolerância ao exercício predita para a I_{HIGH} (~ 112 s x ~ 110 s), extremo₁ (~ 82 s x ~ 86 s), e extremo₂ (~ 72 s x ~ 79 s) ($p > 0,05$). Correlações muito fortes e fortes foram observadas entre a tolerância ao exercício realizada x tolerância ao exercício predita para a I_{HIGH} ($r = 0,92$, $p < 0,001$) e extremo₁ ($r = 0,73$, $p = 0,005$), respectivamente, enquanto uma correlação moderada, mas não significativa foi observada para extremo₂ ($r = 0,47$, $p = 0,072$). Uma depleção similar do W' foi observada entre as intensidades (variando entre $18,6 \pm 3,27$ kJ e $16,4 \pm 3,91$ kJ) ($p = 0,09$). **Conclusão:** Em ciclistas bem treinados, o W' se mantém como um fator determinante da tolerância ao exercício dentro do domínio de intensidade extremo, particularmente em seu limite

inferior. Além disso, a tolerância ao exercício pode ser predita com forte a moderada acurácia nestas condições.

Palavras-chave: potência crítica, consumo máximo de oxigênio, metabolismo energético, exercício de alta intensidade, performance.

ABSTRACT

The time to task-failure during severe-intensity efforts (~ 2 to 15 min) can be predicted with accuracy using the parameters of the hyperbolic power-duration relationship (CP, critical power; and W' , work done above CP). However, there is considerable debate regarding its predictability during shorter efforts, such as those performed within the extreme-intensity domain. **Purpose:** (1) To determine whether W' would be fully depleted, and (2) To verify whether the exercise tolerance within the extreme-intensity domain would be accurately predicted using CP and W' . **Methods:** Eleven well-trained cyclists performed: (1) Four severe constant work-rate trials to estimate CP and W' ; (2) One to two constant work-rate trials to determine the highest intensity at which maximal oxygen uptake can be achieved (I_{HIGH}); and (3) Two extreme constant work-rate trials ($I_{HIGH} +10\%$ and $I_{HIGH} +15\%$). **Results:** No significant differences were observed between actual exercise tolerance $\times$ predicted exercise tolerance for I_{HIGH} (~112 s $\times$ ~110s), extreme₁ (~82 s $\times$ ~86 s), and extreme₂ (~72 s $\times$ ~79 s) ($p > 0.05$). Very strong and strong correlations were observed between actual exercise tolerance $\times$ predicted exercise tolerance for I_{HIGH} ($r = 0.92$, $p < 0.001$) and extreme₁ ($r = 0.73$, $p = 0.005$), respectively; while a moderate but non-significant correlation was observed for extreme₂ ($r = 0.47$, $p = 0.072$). In addition, a similar W' depletion was observed across intensities (Ranging from 18.6 ± 3.27 kJ to 16.4 ± 3.91 kJ) ($p = 0.09$). **Conclusions:** In well-trained cyclists, W' remains a key determinant of exercise tolerance within the extreme-intensity domain, particularly at its lower limits. Moreover, exercise tolerance can be predicted with strong to moderate accuracy across intensities.

Keywords: critical power, maximal oxygen uptake, skeletal-muscle bioenergetics, high-intensity exercise, performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Desenho experimental.....	33
Figura 2. Correlações entre a tolerância ao exercício atual x tolerância ao exercício predita.....	51
Figura 3. Depleção do W' para diferentes taxas de trabalho mecânico.....	54
Figura 4. Contribuição energética do metabolismo aeróbio e anaeróbio.....	56
Figura 5. O espectro de intensidade do exercício.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Respostas fisiológicas máximas nas diferentes condições experimentais. **44**

Tabela 2. Valores individuais de potência crítica (PC) e trabalho acima da potência crítica (W') **45**

Tabela 3. Perfis de potência, torque e cadência entre os domínios de intensidade severo e extremo..... **47**

Tabela 4. Tolerância ao exercício real e tolerância ao exercício predita..... **50**

LISTA DE ABREVIATURAS

PC - Potência crítica

$\dot{V}O_2$ - Consumo de oxigênio

$\dot{V}O_{2max}$ - Consumo máximo de oxigênio

T_{LIM} - Tolerância ao exercício

I_{HIGH} - A mais alta intensidade na qual o $\dot{V}O_{2max}$ ainda pode ser atingido

pH - Potencial hidrogeniônico

ATP - Adenosina trifosfato

PCr - Fosfocreatina

[La⁻] – Lactato sanguíneo

O₂ – Oxigênio

All-out – Esforço máximo sem controle de *pacing* durante toda a duração do teste, ou seja, “*tudo que dá*”

H⁺ - Íons de hidrogênio

[Pi] – Fosfato inorgânico

ADP – Adenosina difosfato

W' – W *prime*, trabalho acima da potência crítica

LV₁ – Limiar ventilatório 1

FC – Frequência cardíaca

$\dot{V}_E$ – Ventilação pulmonar

$i\dot{V}O_{2max}$ – Intensidade associada ao $\dot{V}O_{2max}$

FCmax - Frequência cardíaca máxima

$\dot{V}CO_2$ – Volume de dióxido de carbono expirado

CO₂ – Dióxido de carbono

R - Coeficiente respiratório

$\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ – Equivalente respiratório de $\dot{V}O_2$

$\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ – Equivalente respiratório de $\dot{V}CO_2$

PetO₂ – Pressões parciais expiratórias de O₂

PetCO₂ - Pressões parciais expiratórias de CO₂

SIM – A potência máxima durante o sprint isocinético máximo

RPA – Reserva de potência anaeróbia

ETM – Erro típico de medida

A – Amplitude da curvatura exponencial

τ – Constante de tempo

TD – Tempo de atraso

V_T – Volume Corrente

f_R – Frequência respiratória

PSE – Percepção subjetiva de esforço

HIIT – Treinamento intervalado de alta intensidade

SIT – Treinamento de sprints-intervalados

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	21
2.1 Objetivos secundários	21
3. HIPÓTESES	21
4. REVISÃO DE LITERATURA	22
4.1 <i>Os limiares fisiológicos e a capacidade de tolerância ao exercício em altas intensidades</i>	22
4.2 <i>Potência crítica e a ineficiência muscular em exercícios de alta intensidade: bases fisiológicas</i>	23
4.3 <i>Limitações centrais e periféricas nos sistemas cardiovascular, respiratório e muscular durante o exercício extremo</i>	26
4.4 <i>Fadiga neuromuscular e metabolismo energético entre os domínios de intensidade</i>	28
5. MATERIAIS E MÉTODOS	32
5.1 Participantes	32
5.2 Desenho experimental	32
5.3 Equipamentos	34
5.4 Teste incremental	34
5.5 Sprint isocinético máximo de 5 s	35
5.6 Teste de carga constante	36
5.7 Parâmetros da relação hiperbólica potência-duração	37
5.8 Limite superior do domínio severo	38
5.9 Captação de O ₂ e modelagem da cinética de consumo	38

5.10 Contribuição energética do metabolismo aeróbio e anaeróbio.....	41
5.11 Análise de dados.....	42
5.12 Análise estatística.....	42
6. RESULTADOS.....	43
7. DISCUSSÃO.....	57
8. APLICAÇÕES PRÁTICAS.....	64
9. LIMITAÇÕES.....	67
10. PERSPECTIVAS FUTURAS.....	67
11. CONCLUSÃO.....	68
12. AGRADECIMENTOS.....	69
13. CONFLITO DE INTERESSE.....	69
14. REFERÊNCIAS.....	70
15. APÊNDICE A – TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (TCLE) (Conselho Nacional de Saúde, Resoluções 466/12 e 510/16)	76

1. INTRODUÇÃO

As intensidades de um exercício comumente são classificadas por diferentes terminologias (e.g., zonas e domínios de intensidades), estabelecidas a partir de respostas fisiológicas específicas às alterações na demanda do exercício (Jamnick et al., 2020). Neste contexto, os domínios de intensidade são limites estabelecidos com base em comportamentos fisiológicos específicos, como respostas respiratórias, metabólicas e de fadiga neuromuscular. A partir desses critérios, os domínios são classificados como moderado (i.e., intensidades abaixo do limiar de troca gasosa [LTG]), pesado (i.e., intensidades entre o LTG e a potência crítica [PC]), severo (i.e., intensidades entre a PC e a I_{HIGH} , descrita posteriormente) e extremo (i.e., intensidades acima da I_{HIGH}) (Burnley & Jones, 2018).

A habilidade humana de tolerar esforços em intensidades elevadas é limitada a períodos curtos, os quais tipicamente duram menos de 15 minutos (i.e., intensidades acima da potência crítica, PC) (POOLE et al., 1988; GRECO et al., 2012). Sob estas condições de exercício, o consumo de oxigênio ($\dot{V}O_2$) aumenta progressivamente até o atingimento de seu máximo (i.e., $\dot{V}O_{2max}$). Entretanto, quando a intensidade se torna extremamente elevada, o tempo até a falha da tarefa pode ocorrer mesmo antes do atingimento do $\dot{V}O_{2max}$, assim, demarcando uma característica única do domínio de intensidade extremo (CAPUTO e DENADAI, 2008; HILL et al., 2002).

É amplamente aceito que os mecanismos subjacentes à tolerância ao exercício (T_{LIM}) em intensidades no domínio extremo são os mesmos que limitam aqueles situados no domínio da intensidade severo (i.e., intensidades $> PC$, mas $<$ a mais alta intensidade na qual o $\dot{V}O_{2max}$ ainda pode ser atingido, I_{HIGH}) (BURNLEY e JONES, 2007). Um estudo recente investigando as respostas de fadiga neuromuscular entre

os domínios de intensidade severo e extremo demonstrou que a máxima capacidade de geração de força e fadiga periférica foram reduzidas de maneira similar entre estes domínios, no entanto, observou-se uma ausência de fadiga central para o exercício situado no domínio de intensidade extremo (IANETTA et al., 2022). Além disso, tem sido demonstrado que ao limite do exercício (*i.e.*, próximo à exaustão), diferentes intensidades dentro do domínio severo levam a distúrbios metabólicos similares, embora progridam a diferentes taxas; logo, estes exercícios são caracterizados por reduzido pH e concentrações de ATP e PCr, concomitantemente com o aumento da concentração de $[La^-]$ sanguíneo (BLACK et al., 2017).

Ainda que exercícios situados nos domínios de intensidade severo e extremo demandem de substancial contribuição anaeróbia para o provisionamento de energia, o metabolismo aeróbio ainda exerce um papel fundamental de tolerar estes esforços (MURGATROYD et al., 2011). Neste contexto, a complexa integração entre a captação de O_2 , seu transporte através dos sistemas respiratório e cardiovascular, e sua utilização pelas mitocôndrias musculares determina o quão eficiente é o metabolismo aeróbio no provisionamento de energia durante estes exercícios (POOLE e JONES, 2012). Embora o limite da capacidade do metabolismo aeróbio em suprir a demanda energética coincida com o atingimento do $\dot{V}O_{2max}$ (ROSSITER, 2011), a PC caracteriza-se como um importante determinante da T_{LIM} , por representar a maior intensidade na qual a captação de O_2 e o equilíbrio metabólico intramuscular ainda podem atingir um estado estável (POOLE et al., 1988).

Acima dessa intensidade, ocorre uma rápida depleção das reservas energéticas finitas (*e.g.*, PCr e glicogênio muscular) e ocorre o acúmulo de seus subprodutos (*e.g.*, H^+ , $[Pi]$, ADP), os quais coincidem com a exaustão e a depleção

completa do W' (JONES et al., 2008). Evidências recentes têm demonstrado que maiores proporções de fibras oxidativas (*i.e.*, fibras do tipo I), juntamente com uma elevada capilarização muscular, são fatores determinantes da PC (VANHATALO et al., 2016; MITCHEL et al., 2018). Isto é consistente com os achados demonstrando uma relação forte entre a PC e a cinética de consumo do $\dot{V}O_2$ (MURGATROYD et al., 2011), deste modo, enfatizando que a PC é um parâmetro dependente dos mecanismos governantes do metabolismo aeróbio muscular (VANHATALO et al., 2016; MITCHEL et al., 2018; MURGATROYD et al., 2011). Por outro lado, o W' tem sido demonstrado estar relacionado com a magnitude de fadiga acumulada (*i.e.*, fadiga periférica) (BROXTERMAN et al., 2015). Na verdade, evidências recentes têm demonstrado que, ao gastar a mesma quantidade de W' , mas a diferentes taxas de trabalho mecânico, não resultam em diferenças significativas nas respostas de fadiga muscular (de SOUZA et al., 2013).

Ao longo de décadas, a robustez da relação hiperbólica entre a potência e a duração do exercício tem demonstrado ser capaz de prever a performance durante exercícios intermitentes ou de carga constante situados no domínio de intensidade severo. Neste contexto, foi demonstrado experimentalmente que a depleção do W' ocorre de forma semelhante entre diferentes tipos de exercício, desde que realizados sob condições com duração comparável (*All-out* x *Self-Paced* x Carga Constante) (CHIDNOK et al., 2013). Ademais, a PC e o W' foram capazes de acuradamente prever a T_{LIM} sob condições de carga constante ($r = 0.99$, $p < 0.01$) (CHIDNOK et al., 2013). Além disso, evidências recentes indicam que a T_{LIM} pode ser predita mesmo em intensidades situadas no limiar entre os domínios de intensidade severo e extremo (*i.e.*, I_{HIGH}) (VENTURA et al., 2023). Entretanto, pouco se sabe sobre os perfis de

contribuição energética, as dinâmicas do W' e a sua habilidade de prever a T_{LIM} sob diferentes taxas de trabalho no domínio de intensidade extremo.

Baseados nos pressupostos matemáticos da relação hiperbólica entre a potência e a duração do exercício, bem como na extensa literatura em relação à ocorrência concomitante da depleção total do W' e à exaustão durante exercícios situados no domínio severo (*i.e.*, $> PC$) (BROXTERMAN et al., 2015; de SOUZA et al., 2013; CHIDNOK et al., 2013), dessa forma, espera-se que, durante exercícios de carga constante situados em intensidades na I_{HIGH} ou superiores, a depleção de W' coincidiria com a exaustão, deste modo, possibilitando previsões precisas da T_{LIM} para estas intensidades. No entanto, não há estudos que investiguem concomitantemente as dinâmicas do W' e a previsão da T_{LIM} nestas intensidades.

2. OBJETIVOS PRINCIPAIS

Os objetivos centrais deste estudo são determinar se o W' na exaustão é totalmente depletado no domínio extremo, e verificar se a T_{LIM} neste domínio pode ser predita acuradamente utilizando a PC e o W' .

2.1. Objetivos específicos

- Comparar o W' estimado com o W' acumulado nas diferentes intensidades investigadas.
- Comparar a T_{LIM} realizada com a T_{LIM} predita nas diferentes intensidades investigadas.
- Avaliar a concordância entre a T_{LIM} realizada e a T_{LIM} predita nas diferentes intensidades investigadas.

3. HIPÓTESES

Foi hipotetizado que o W' na exaustão seria totalmente depletado e que a T_{LIM} ao domínio de intensidade extremo seria acuradamente predita utilizando a PC e o W' .

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Os limiares fisiológicos e a capacidade de tolerância ao exercício em altas intensidades

Em seres humanos, a capacidade de tolerar exercícios em alta intensidade é limitada a curtas durações, constituindo uma área de interesse da fisiologia humana desde o início do século XX, com o advento do trabalho intitulado “*The physiological basis of athletic records*” do brilhante Archibald Vivian Hill [1886 – 1977] e posteriormente ao trabalho intitulado “The work capacity of a synergic muscular group” de Monod e Scherrer (1965).

Estes estudos pioneiros descreveram a relação hiperbólica entre a intensidade e a duração tolerável do exercício, explorando como a capacidade de sustentar esforços físicos é reduzida à medida que a intensidade aumenta (HILL, 1925; MONOD e SCHERRER, 1965). Essa relação matemática permite a determinação da PC (*i.e.*, assíntota da hipérbole), que representa a maior intensidade do exercício em que as respostas oxidativas e metabólicas são capazes de ainda se estabilizarem, bem como o limiar entre os domínios de intensidade pesado e severo. Em conjunto, determina-se a constante de curvatura da hipérbole (*i.e.*, W'), que representa uma quantidade finita de trabalho que pode ser realizado em intensidades acima deste limite (JONES et al., 2008; 2010; POOLE et al., 2016). A extensão do domínio de intensidade severo é delimitada pela maior intensidade de exercício na qual o $\dot{V}O_{2max}$ ainda pode ser alcançado. Nesse sentido, Hill et al. (2002) propuseram identificar o limite superior do domínio de intensidade severo através de uma relação linear inversa, assim,

determinando a maior intensidade (I_{HIGH}) e a menor duração do exercício em que o $\dot{V}O_2max$ pode ser atingido. Dessa forma, caracteriza o domínio de intensidade extremo, que se refere a todas as intensidades em que a exaustão antecede o atingimento do $\dot{V}O_2max$ (HILL et al., 2002; CAPUTO e DENADAI, 2008).

4.2. Potência crítica e a ineficiência muscular em exercícios de alta intensidade: bases fisiológicas

O conceito de PC apresenta robustez ao determinar o limite entre intensidades de exercícios que podem ser sustentadas com estabilidade prolongada (e.g., domínio de intensidade pesado, $< PC$, ~ 40 min a 2 h) e aquelas que não permitem a estabilização das respostas fisiológicas (e.g., domínio de intensidade severo e extremo, $> PC$, < 30 min) (BURNLEY e JONES, 2018).

Sob essa lógica, a cinética de consumo de $\dot{V}O_2$ durante o exercício é caracterizada por três fases: 1) fase cardiodinâmica; 2) fase fundamental (*primária*); e 3) estado estável. A fase cardiodinâmica representa um aumento repentino do $\dot{V}O_2$ que antecede a fase fundamental, sendo assim, caracterizada por um aumento transitório do retorno venoso devido ao consumo imediato das moléculas de O_2 armazenadas em suas proteínas carreadoras nos músculos (*i.e.*, mioglobinas) (ROSSITER, 2011). A fase fundamental representa o aumento exponencial do $\dot{V}O_2$, refletindo o momento real do aumento da taxa de utilização de O_2 pelos músculos ativos (HUGHSON, 2009). O estado estável é atingido apenas para aquelas intensidades situadas abaixo do LV_1 e/ou da PC (*i.e.*, domínio de intensidade moderado e pesado). Por outro lado, em intensidades acima da PC, não há estabilidade do $\dot{V}O_2$ durante o exercício, uma vez que o mesmo aumenta

progressivamente até o atingimento do máximo de sua resposta ($\dot{V}O_{2\max}$) (ROSSITER, 2011; POOLE e JONES, 2012).

Ao término de um exercício (fase de recuperação), a cinética de consumo de $\dot{V}O_2$ demonstra uma trajetória descendente lenta para seus níveis basais, uma vez que tais ajustes demonstraram serem influenciados concomitantemente pelas características e extensão do exercício (GAESSER e BROOKS, 1984; OZYENER et al., 2001). Assim como são impactados diretamente pelas dinâmicas circulatórias, de aporte de O_2 e aspectos metabólicos do exercício (POOLE e JONES, 2012). Neste contexto, durante exercícios de alta intensidade, a cinética de consumo de $\dot{V}O_2$ durante a recuperação é demarcada por duas fases (*i.e.*, fase rápida e lenta) (ROSSITER, 2011). A fase rápida representa um aumento e/ou manutenção do $\dot{V}O_2$ que é necessário para a restauração dos níveis de ATP e PCr depletados durante o exercício (ROSSITER et al., 2002; 2011; POOLE e JONES, 2012). Por outro lado, a fase lenta representa um contínuo excesso de $\dot{V}O_2$ acima dos níveis basais após o exercício, a fim de restaurar os níveis de ATP e O_2 nos tecidos, bem como para a remoção dos metabólitos acumulados durante o exercício (*e.g.*, H^+ , $[Pi]$, ADP) (ROSSITER, 2011).

Em síntese, uma cinética de consumo de $\dot{V}O_2$ eficiente é o reflexo de uma maior adaptabilidade à demanda de trabalho exigida aos músculos ativos, o que é responsável pela redução do estresse metabólico causado pela disponibilidade limitada de O_2 e pela elevada dependência do metabolismo anaeróbio ao início do exercício ou para aquelas intensidades em que não há estabilização das respostas fisiológicas. Consequentemente, a ausência de estabilidade fisiológica e atingimento

do $\dot{V}O_{2\max}$ indicam que o suprimento energético decorrente de vias aeróbias atingiu o seu limite.

Durante exercícios de intensidade submáxima excedendo o limiar ventilatório (LV_1) e a PC, dois fenômenos interessantes relacionados com o início da ineficiência muscular se tornam evidentes à medida que o exercício avança: o componente lento do $\dot{V}O_2$ e a fadiga muscular (GRASSI et al., 2015; CANNON et al., 2011). Considerando a sua concorrência dependente do tempo e da intensidade e possíveis mecanismos fisiológicos similares, diversos estudos buscaram ao longo dos anos entender se a ocorrência de um depende estritamente da outra.

Embora os mecanismos fisiológicos determinantes do desenvolvimento do componente lento do $\dot{V}O_2$ estejam atualmente sob debate, estudos pioneiros tais como Poole et al. (1991) apresentaram evidências importantes de que 85% do componente lento do $\dot{V}O_2$ está associado a processos bioquímicos que ocorrem nos músculos esqueléticos. No início da descoberta do componente lento do $\dot{V}O_2$, diversos mecanismos fisiológicos foram propostos, como os discutidos abaixo, incluindo o aumento da temperatura corporal (KOGA et al., 1997), liberação de catecolaminas (e.g., adrenalina e noradrenalina) (GAESSER et al., 1994), e a concentração de [La-] (POOLE et al., 1988). Entretanto, estes posteriormente foram refutados. Nos dias atuais, é amplamente aceito que esta ineficiência metabólica, evidenciada pelo componente lento do $\dot{V}O_2$, é, em primeiro lugar, explicada pelo recrutamento adicional de fibras musculares do tipo II, bem como pelo desenvolvimento da fadiga periférica. No entanto, ao longo dos anos, achados contrastantes têm desafiado a relação causa-efeito entre a fadiga muscular e o componente lento do $\dot{V}O_2$.

Especificamente, durante exercícios no domínio de intensidade severo de durações superiores a 3 min, a trajetória de aumento do $\dot{V}O_2$ frequentemente demonstra a presença do componente lento do $\dot{V}O_2$, no entanto, exercícios mais curtos sejam estes no domínio de intensidade severo ou extremo não apresentam estas mesmas respostas, mas apresentam uma considerável perda de função muscular em decorrência da fadiga periférica elevada (BLACK et al., 2017; IANETTA et al., 2022).

4.3. Limitações centrais e periféricas nos sistemas cardiovascular, respiratório e muscular durante o exercício extremo

Os mecanismos responsáveis por essa exaustão abrupta nessas intensidades de exercício estão associados a múltiplos fatores fisiológicos, como a depleção das reservas energéticas (e.g., glicogênio e PCr) (BUENLRY e JONES, 2007), o acúmulo de metabólitos (e.g., H^+ , $[Pi]$, ADP) (JONES et al., 2008) e o desenvolvimento da fadiga neuromuscular (BURNLEY et al., 2012). Embora exercícios situados no domínio severo e extremo apresentem características bioenergéticas e neuromusculares semelhantes, estes diferenciam-se pelo fato de que, no domínio extremo, o $\dot{V}O_{2max}$ não é atingido ao limite do exercício (BROXTERMAN et al., 2017; VANHATALO et al., 2011).

Sob estas condições de exercício, limitações no transporte (*i.e.*, convectivo e/ou difusivo) e na utilização de O_2 pelas mitocondriais musculares se apresentam como fatores determinantes para o atingimento do $\dot{V}O_{2max}$ e consequentemente o limite do metabolismo aeróbio no fornecimento de energia (POOLE e JONES, 2012). Contudo, durante exercícios situados no domínio de intensidade extremo, a falha no

atingimento do $\dot{V}O_{2\max}$ potencialmente está associada à exaustão extremamente curta (HILL et al., 2002; CAPUTO e DENADAI, 2008). Com o objetivo de investigar essa característica específica, estudos pioneiros têm analisado a linearidade dos sistemas relacionados à cinética de consumo de $\dot{V}O_2$ em intensidade próxima à transição entre os domínios de intensidade severo e extremo. Esses estudos demonstraram que são necessários aproximadamente $4 \cdot \tau$ para que a cinética de consumo atinja cerca de 95% da resposta, isto é, aproximadamente 95% do $\dot{V}O_{2\max}$ (HUGHSON, 2009). Neste contexto, baseando-se nos pressupostos matemáticos da função exponencial, diversos pesquisadores propuseram que aproximadamente $4,6 \cdot \tau$ seriam necessários para que a cinética de consumo atinja 99% da resposta, permitindo, conseqüentemente, a identificação do tempo mínimo necessário para o atingimento do $\dot{V}O_{2\max}$, demarcando assim o limite superior do domínio de intensidade severo (*i.e.*, I_{HIGH}) (HILL et al., 2002; CAPUTO e DENADAI, 2008). Foi demonstrado que este tempo mínimo costuma ser > 100 s. No entanto, evidências recentes demonstram que, ao mensurar diretamente o tempo para o atingimento do $\dot{V}O_{2\max}$ durante exercícios em intensidades extremamente elevadas (*e.g.*, esforços *All-out*), o $\dot{V}O_{2\max}$ pode ser atingido em aproximadamente 54 s (VANHATALO et al., 2016), o que desafia a lógica de que a incapacidade de atingir o $\dot{V}O_{2\max}$ em exercícios situados no domínio de intensidade extremo resulta exclusivamente da insuficiência de tempo.

Em síntese, o $\dot{V}O_2$, que é modulado por fatores centrais e periféricos do sistema cardiovascular, bem como pela eficiência dos processos associados à fosforilação oxidativa (POOLE e JONES, 2012), representa o resultado integrado destas dinâmicas. Neste contexto, ainda que a cinética do $\dot{V}O_2$ apresente um aumento mais

gradual, as respostas de frequência cardíaca (FC) e a ventilação pulmonar ($\dot{V}_E$) ajustam-se de forma mais rápida ao início do exercício, uma vez que estes são regulados por mecanismos neurais (e.g., retirada parassimpática, comando central e feedback de quimiorreceptores) (VOLIANITIS E SECHER, 2016; SIETSEMA e ROSSITER, 2023). Desta maneira, poderia se esperar que, de forma concomitante, as respostas cardiovasculares fossem atenuadas, ocasionando menor aporte de O_2 aos músculos ativos e, conseqüentemente, uma permuta gasosa menos eficiente. Contudo, até onde sabemos, são escassos os estudos que avaliem estas velocidades de ajuste isoladamente, a eficiência das respostas ventilatórias e a contribuição das diferentes vias energéticas a fim de investigar a abrupta TLIM observada à medida que se eleva a intensidade na transição entre os domínios de intensidade severo-extremo.

4.4. Fadiga neuromuscular e metabolismo energético entre os domínios de intensidade.

Notoriamente, a transição entre os domínios de intensidade pesada-severo (i.e., a PC) representa um ponto fisiológico no qual o metabolismo anaeróbio passa a contribuir em maior escala para o fornecimento energético durante o exercício (GASTIN, 2001), assim como resulta em maior acúmulo de seus produtos finais (JONES et al., 2008; BLACK et al., 2017).

Neste sentido, com o advento de técnicas inovadoras e não invasivas, como a espectroscopia por ressonância magnética de fósforo-31, tornou-se possível investigar de forma detalhada o metabolismo energético intramuscular (e.g., PCr, ATP, [Pi], pH, entre outros) durante o exercício. Estudos pioneiros, como o de Jones

et al. (2008), demonstraram que, enquanto estes metabólitos atingem estabilidade após alguns minutos de exercício no domínio de intensidade pesado, exercícios realizados no domínio de intensidade severo (*i.e.*, acima da PC) resultam em distúrbios na homeostase intramuscular e, conseqüentemente, em maior fadiga neuromuscular. Ao final do exercício, exercícios situados no domínio de intensidade severo demonstraram maiores distúrbios metabólicos quando comparados ao domínio de intensidade pesado, visto que, a redução da PCr ocorreu progressivamente e mais rapidamente, apresentando uma taxa de queda aproximadamente duas vezes maior (JONES et al., 2008). Durante o exercício abaixo da PC, [Pi] aumentou, porém se estabilizou rapidamente (1 min). Em contrapartida, acima da PC, o [Pi] aumentou mais rapidamente, estabilizando-se apenas após 3 min de exercício. Contudo, ao final do exercício, os valores de [Pi] foram maiores para o exercício realizado acima da PC quando comparados ao exercício abaixo da PC (JONES et al., 2008). De forma similar, o pH diminuiu progressivamente até o 3º min de exercício, apresentando ao final do exercício valores menores quando comparados aos do exercício realizado abaixo da PC (JONES et al., 2008).

Recentemente, empregando análises de biópsias musculares, Black et al. (2017) demonstraram que ATP, PCr, pH, [La⁻], glicogênio muscular apresentaram magnitudes de alteração semelhantes entre diferentes intensidades situadas no domínio de intensidade severo. Esses achados indicam que, embora os distúrbios metabólicos e a fadiga neuromuscular ocorram em diferentes taxas de desenvolvimento, ao final do exercício tais distúrbios atingem níveis críticos semelhantes. Similarmente, a excitabilidade muscular, ativação voluntária e o drive neural apresentaram diferenças entre as diferentes intensidades situadas no domínio

severo (BLACK et al., 2017). Por outro lado, Ianetta et al. (2022) demonstraram que exercícios situados no domínio de intensidade extremo apresentam reduções na capacidade máxima de geração de força e níveis de fadiga periférica semelhantes aos observados durante exercícios realizados no domínio de intensidade severo. Em contraste, exercícios situados no domínio de intensidade severo apresentam maior desenvolvimento de fadiga central quando comparados aos exercícios realizados no domínio de intensidade extremo, efeitos estes que foram ausentes no domínio de intensidade extremo (IANETTA et al., 2022).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Participantes

Onze ciclistas masculinos bem treinados (idade: 30 ± 10 anos, massa corporal: $78,2 \pm 6,76$ kg, estatura: $1,77 \pm 0,06$ m) participaram deste estudo. Todos os participantes eram atletas competitivos, regularmente engajados em provas de longa distância em estrada (4), provas de *mountain-bike* (5) ou em ambas as modalidades (2). Estes tinham um volume de treinamento semanal de 265 ± 107 km/semana (~ 7 a 10 h semanais) e experiência na modalidade por mais de 3 anos. Além disso, todos os participantes foram instruídos a manter seus hábitos alimentares durante todo o experimento.

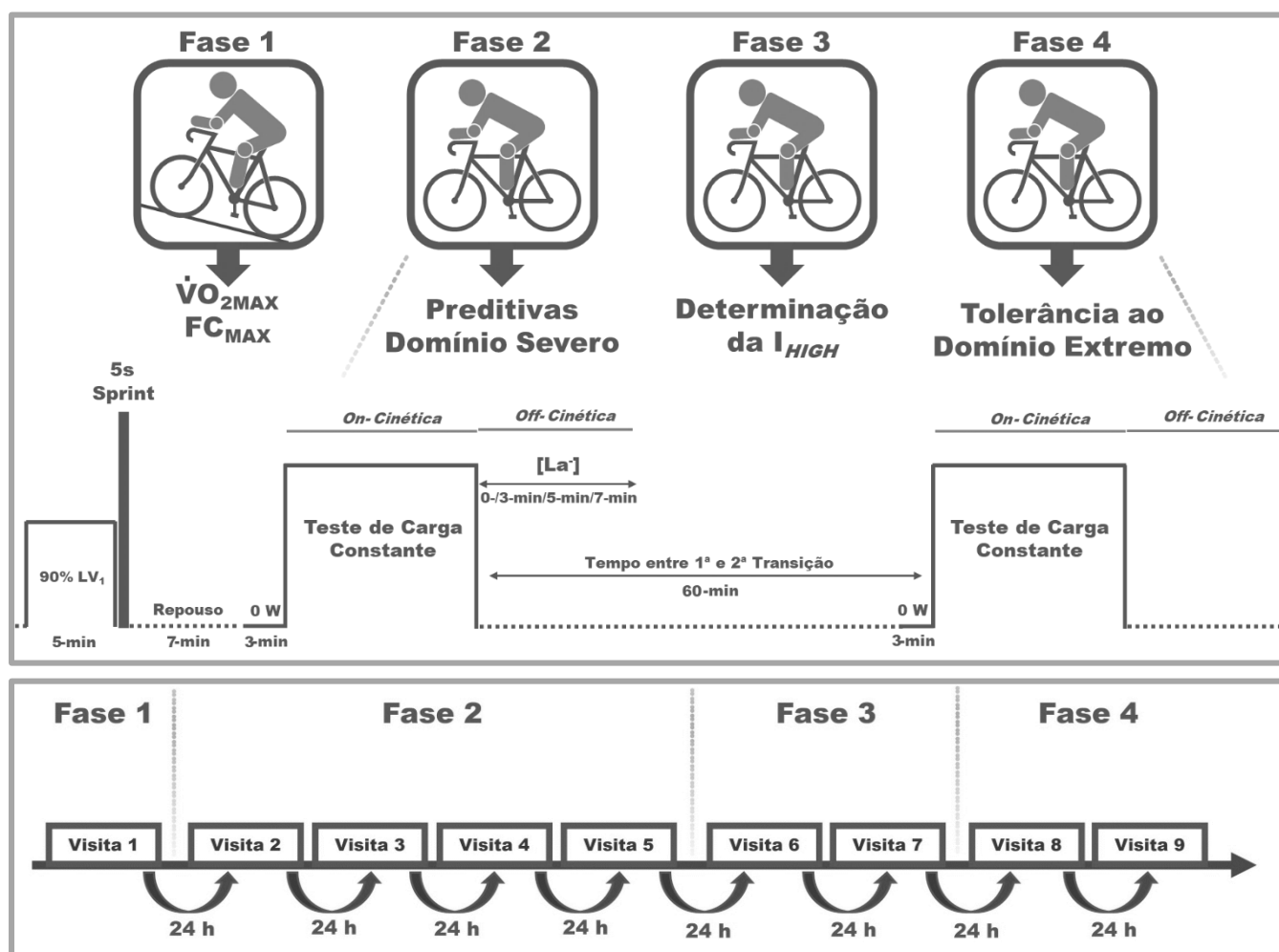
Os participantes foram instruídos a evitar atividades intensas nas 24 h que antecederam os experimentos e a abster-se do consumo de cafeína por pelo menos 8 h. O presente estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética da Instituição (CAAE: 85076724.6.0000.5465). Todos os procedimentos experimentais foram conduzidos de acordo com a Declaração de Helsinque para pesquisas envolvendo seres humanos. Todos os participantes forneceram consentimento informado por escrito após receberem uma explicação detalhada sobre os riscos e benefícios antes do início do experimento.

5.2. Desenho Experimental

Todas as sessões experimentais foram realizadas em um ambiente laboratorial com temperatura controlada ($21\text{--}23$ °C), sempre realizadas no mesmo horário do dia (± 1 h). Todos os participantes compareceram ao laboratório para a realização de nove

a dez sessões experimentais, com intervalo mínimo de 24 h entre cada uma das sessões experimentais. O experimento foi dividido em quatro fases, conforme descrito a seguir: 1) Determinação do LV_1 , $\dot{V}O_{2\max}$ e a intensidade associada ao $\dot{V}O_{2\max}$ ($i\dot{V}O_{2\max}$) através de um teste incremental em rampa; 2) 4 testes de carga constante realizados no domínio de intensidade severo, conduzidos em ordem randomizada, para estimar a PC e o W' ; 3) Determinação da I_{HIGH} ; e 4) 2 testes de carga constante realizados no domínio de intensidade extremo ($I_{HIGH} + 10\%$ e $I_{HIGH} + 15\%$), conduzidos em ordem randomizada, para determinar o T_{LIM} .

Figura 1. Desenho experimental.



Abreviações: LV_1 , limiar ventilatório 1; $\dot{V}O_{2max}$, consumo máximo de oxigênio; FC_{max} , frequência cardíaca máxima; $[La^-]$, lactato sanguíneo; *On*-cinética, cinética de consumo de oxigênio durante o exercício; *Off*-cinética, cinética de consumo de oxigênio durante o repouso; I_{HIGH} , a mais alta intensidade na qual o $\dot{V}O_{2max}$ ainda pode ser atingido.

5.3. Equipamentos

Todos os testes experimentais foram realizados em um cicloergômetro com frenagem eletromagnética (Excalibur Sport®, Lode BV, Groningen, Holanda). As análises de permuta gasosa foram adquiridas utilizando um analisador de gases respiração a respiração (Quark CPET, Cosmed, Roma, Itália). Antes do início de cada teste experimental, os analisadores de O_2 e CO_2 foram calibrados utilizando o ar ambiente (20,94% O_2 e 0,03% CO_2) e um gás de calibração com concentrações conhecidas (16,0% O_2 e 5,00% CO_2), conforme as instruções do fabricante. Similarmente, o medidor de fluxo foi calibrado utilizando uma seringa de 3 L (Quark CPET). Amostras capilares de sangue (25 μ L) foram coletadas do lóbulo da orelha de cada participante em repouso e em tempos predeterminados após a exaustão (0 min, 3 min, 5 min, 7 min) durante todas as sessões experimentais a fim de avaliar o acúmulo da concentração de $[La^-]$ (YSI 2700 Stat, YSI Life Sciences, Yellow Springs, EUA). A FC foi adquirida utilizando um sensor óptico de braço (Polar Verity Sense, Polar Electro Oy, Kempele, Finlândia).

5.4. Teste Incremental

Um teste incremental em rampa ($30 \text{ W} \cdot \text{min}^{-1}$) foi realizado até a exaustão voluntária para determinar LV_1 , $\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$ e $\text{i}\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$, seguido por um teste de verificação do $\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$ (*i.e.*, teste de carga constante a 105% do $\text{i}\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$) após um intervalo de 10 minutos (POOLE e JONES, 2017). Durante todo o teste, os participantes foram instruídos a manter sua cadência preferida e foram encorajados verbalmente a realizar o seu máximo esforço durante todo o período de teste. O teste foi interrompido quando a cadência caiu mais de 10 *rpm* abaixo da cadência preferida do participante por 5 s, apesar de forte incentivo verbal (do Nascimento Salvador et al., 2023). Os valores de $\dot{\text{V}}\text{O}_2$ e FC foram expressos como médias de intervalos de 10 s. O $\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$ e a FC_{max} foram identificados como os valores mais altos obtidos após uma estabilização superior a 10 s. Adicionalmente, foi utilizado um segundo critério para identificação do momento de exaustão no teste incremental, considerando concentrações de $[\text{La}^-]$ superiores a 8,0 mM/L e o coeficiente respiratório (R) $> 1,10$ (do NASCIMENTO SALVADOR et al., 2023). A $\text{i}\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$ foi definida como a intensidade correspondente ao momento de atingimento do $\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$, ou seja, a primeira intensidade que atingiu o $\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$. O LV_1 foi determinado utilizando o método *V-slope*, complementado pelas análises dos equivalentes respiratórios ($\dot{\text{V}}_{\text{E}}/\dot{\text{V}}\text{O}_2$ e $\dot{\text{V}}_{\text{E}}/\dot{\text{V}}\text{CO}_2$) e das pressões parciais expiratórias de O_2 e CO_2 (PetO_2 e PetCO_2) (BEAVER et al., 1986).

5.5. Sprint isocinético máximo de 5-s

A fim de avaliar o estado de prontidão dos participantes, ou seja, a capacidade máxima de geração de potência, foram realizados sprints isocinéticos máximos (SIM)

de 5 s em todas as sessões nas fases 2, 3 e 4 (Figura 1). Os sprints foram realizados na posição sentada imediatamente após o protocolo de aquecimento, no modo isocinético do cicloergômetro durante um período de 5 s a 90 rpm (do NASCIMENTO SALVADOR et al., 2023). Os dados de potência foram mensurados continuamente durante todo o SIM. A potência pico durante os sprints foi considerada como a média correspondente a um período de 3 s, determinada como a janela de 1,5 s antes e 1,5 s após o pico instantâneo de potência. Adicionalmente, a reserva de potência anaeróbia (RPA) (WEYAND et al., 2006) foi calculada conforme a equação 1:

$$RPA = SIM - \dot{V}O_{2max} \text{ (1)}$$

5.6. Testes de carga constante

Múltiplos testes de carga constante foram realizados até a exaustão voluntária para determinar a T_{LIM} a exercícios situados nos domínios de intensidade severo e extremo. Antes do início de cada teste experimental, foi realizado um aquecimento por 5 minutos a 90% do LV_1 , seguido por 7 minutos de repouso. Durante todo o teste, os participantes foram instruídos a manter sua cadência preferida e foram encorajados verbalmente a realizar o seu máximo esforço durante todo o período de teste. O teste foi interrompido quando a cadência caiu mais de 10 *rpm* abaixo da cadência preferida do participante por 5 s, apesar de forte incentivo verbal (do Nascimento Salvador et al., 2023). A T_{LIM} (s) foi considerada como o tempo total sustentado na intensidade correspondente ao teste de carga constante. Os valores de $\dot{V}O_2$ e FC foram expressos como médias em intervalos de 10 s. O $\dot{V}O_{2pico}$ foi considerado como o maior valor médio obtido durante um período de 10 s. Adicionalmente, os picos das variáveis

secundárias ($\dot{V}CO_2$, $\dot{V}E$, R , entre outras) foram considerados como a média dos 10 s finais do teste de carga constante.

Ao final de cada teste experimental, a percepção subjetiva de esforço (PSE) (escala de Borg 0-10) foi coletada (BORG e BORG, 2001). Neste contexto, imediatamente após a exaustão, foi questionado aos participantes que classificassem o exercício em termos de dificuldade, com base na sua PSE. Durante a primeira sessão, a escala foi explicada, e reforços sobre o seu uso foram empregados durante o início de cada sessão. Adicionalmente, a taxa de aumento do $[La^-]$ foi quantificada como $\Delta[La^-]/TLIM$.

5.7. Parâmetros da relação hiperbólica potência-duração

A PC e o W' foram estimados para a potência, o trabalho total e o tempo até a exaustão (*i.e.*, T_{LIM}) individuais para cada teste experimental conduzido durante a segunda fase do estudo. As intensidades de cada teste experimental foram selecionadas para induzir a exaustão para tempos entre 2 e 15 minutos (*e.g.*, ~80 a 100% do $i\dot{V}O_{2max}$) (POOLE et al., 1988). O modelamento matemático adotado para estimar a PC e o W' foi baseado nas seguintes equações (2) Relação linear Potência $\times 1/Tempo$; (3) Relação linear Trabalho $\times Tempo$; e (4) Relação hiperbólica Potência $\times Tempo$.

$$P = W' / T_{LIM} + PC \quad (2)$$

$$T = W' + PC \cdot T_{LIM} \quad (3)$$

$$T_{LIM} = W' / (P - PC) \quad (4)$$

$$W' = (P - PC) \times T_{LIM} \quad (4 - Inversa)$$

Onde T_{LIM} é a tolerância ao exercício, T é trabalho, P é potência, W' é o trabalho acima da potência crítica, e PC é potência crítica.

O modelamento matemático com o menor erro padrão foi considerado individualmente para cada participante. *Scripts* personalizados escritos no MATLAB R2025a (MathWorks Inc., Natick, MA, EUA) foram utilizados para estimar a CP e o W' .

5.8. Limite superior do domínio severo

A I_{HIGH} foi determinada diretamente utilizando o $\dot{V}O_{2pico}$ obtido durante os testes experimentais na terceira fase do estudo. O critério adotado para a determinação da I_{HIGH} foi definido como a maior intensidade na qual o $\dot{V}O_{2max}$ ainda pode ser alcançado (CAPUTO e DENADAI, 2008). Caso o primeiro teste de carga constante resultasse em atingimento do $\dot{V}O_{2max}$, testes subsequentes eram realizados em uma intensidade 5% maior a fim de identificar a intensidade na qual o $\dot{V}O_{2max}$ não seria atingido. Por outro lado, caso o primeiro teste de carga constante não resultasse em atingimento do $\dot{V}O_{2max}$, os testes subsequentes eram realizados em uma intensidade 5% menor, até identificar a intensidade na qual o $\dot{V}O_{2max}$ seria atingido. Para validar a determinação da I_{HIGH} , calculou-se o erro típico de medida

(ETM) (HOPKINS, 2000). O ETM foi calculado como o desvio padrão (DP) do $\dot{V}O_{2\max}$ obtido durante a primeira e a segunda fase do estudo dividido pela $\sqrt{2}$ (*i.e.*, $\dot{V}O_{2\max} < \dot{V}O_{2\max} - \text{ETM}$) (HOPKINS, 2000).

5.9. Captação de O₂ e modelagem da cinética de consumo em exercício e repouso

Os dados respiração a respiração obtidos durante todas as sessões experimentais, adquiridos por meio do analisador de gases Quark CPET (Cosmed, Roma, Itália) a fim de investigar a modulação das variáveis respiratórias durante o exercício de alta intensidade. Os dados *outliers* foram inicialmente excluídos baseando-se no modelo proposto por Jones e Poole (2005), em que valores > 2 DP referentes à média dos dados em amostras de 4 a 5 respirações, uma vez que estes representam respostas atípicas (*i.e.*, artefatos fisiológicos), como ruídos provenientes de suspiros, engolir em seco e tosses. Adicionalmente, para as análises de cinética do consumo, os dados foram suavizados utilizando um filtro do tipo *time moving average* com janelamento de 5 segundos. Para uma adequada investigação da cinética de consumo foram realizadas duas transições para cada intensidade no domínio de intensidade severo e extremo (Figura 1). Isoladamente para cada transição, os dados respiratórios foram linearmente interpolados para intervalos de 1 s, seguidos pelo alinhamento ao início do exercício das duas transições e agrupados em médias para gerar uma única caracterização da resposta ao exercício para cada participante (do NASCIMENTO SALVADOR et al., 2023). Esta única resposta foi segmentada em períodos de 5 s.

Técnicas de regressão não linear foram usadas para ajustar os dados respiratórios com uma função exponencial (equação 5) (ROSSITER, 2011). Os 20 s iniciais do exercício (fase cardiodinâmica) foram excluídos da análise. Dessa maneira, um processo iterativo garantiu que a soma dos erros quadrados fosse minimizada. A descrição matemática do modelo monoexponencial foi empregada conforme os pressupostos de Barstow et al. (1996); assim, o modelo foi restringido ao $\dot{V}O_2$ basal para auxiliar na identificação dos parâmetros, conforme a equação 5:

$$\dot{V}O_2(t) = \dot{V}O_{2basal} + A \left[1 - e^{-\left(t - \frac{TD}{\tau}\right)} \right] \quad (5)$$

Onde $\dot{V}O_2(t)$ = representa o consumo de O_2 ($L \cdot \text{min}^{-1}$) em um determinado tempo; $\dot{V}O_{2basal}$ = é a linha de base do $\dot{V}O_2$ ($L \cdot \text{min}^{-1}$); A = é a amplitude da curvatura exponencial ($L \cdot \text{min}^{-1}$); τ = é a constante de tempo em segundos (ou, o tempo em segundos necessário para o atingimento de 63% da assíntota da resposta do $\dot{V}O_2$); TD = é o tempo de atraso (s); t = é o tempo de exercício; e e = é a base dos logaritmos naturais (BARSTOW et al., 1996).

A fase fundamental da cinética de consumo do $\dot{V}O_2$ foi isolada seguindo o método iterativo proposto por Rossiter et al. (2002) e Murgatroyd et al. (2011) para identificar a região exponencial. Neste contexto, a identificação do fim da fase fundamental foi realizada a partir de ajustes no comprimento da janela de análise ao início do exercício, inicialmente definido como 60 s. Posteriormente, o janelamento foi ampliado iterativamente em 10 s até o momento onde o modelamento exponencial

demonstrasse um aumento discernível e consistente dos valores de $\dot{V}O_2$ mensurados, considerando os seguintes critérios: 1) o intervalo de confiança mais estreito para τ ; 2) um ponto de inflexão (*breakpoint*) e um aumento sistemático tanto em τ quanto em A, com uma redução em TD; 3) um ponto de inflexão e um aumento sistemático no *Chi-Square* do modelo ajustado; e 4) um desvio em relação à distribuição uniforme dos resíduos ao redor de zero (ROSSITER et al., 2002; MURGATROYD et al., 2011). Dessa forma, a análise foi limitada ao ponto respectivo onde estes comportamentos ocorreram, nos quais os parâmetros que caracterizam a cinética de consumo do $\dot{V}O_2$ foram derivados. Estes mesmos procedimentos foram reproduzidos para a identificação dos parâmetros da cinética de $\dot{V}O_2$ durante o repouso (*i.e.*, cinética *off*) (ROSSITER et al., 2002). Adicionalmente, durante o exercício, a identificação do componente lento do $\dot{V}O_2$ para as intensidades no domínio severo foi realizada individualmente conforme a equação 6 (MURGATROYD et al., 2011).

$$\text{Componente lento do } \dot{V}O_2 = \dot{V}O_{2\text{final}} - (\dot{V}O_{2\text{basal}} + A) \quad (6)$$

Onde $\dot{V}O_{2\text{final}}$ é a média do $\dot{V}O_2$ nos últimos 15 s de exercício.

5.10. Contribuição energética do metabolismo aeróbio e anaeróbio

A contribuição das vias metabólicas (aeróbia, anaeróbia láctica e aláctica) para a produção energética total foi estimada segundo os pressupostos de Di Prampero (1981) e Di Prampero & Ferreti (1999). A contribuição aeróbia foi estimada assumindo a área do $\dot{V}O_2$ acima da curva durante os testes de carga constante, adotando-se o método trapezoidal, desconsiderando a área respectiva ao $\dot{V}O_{2\text{basal}}$ (ARTIOLI et al.,

2012). Para isto, foi adotado o equivalente energético de O_2 , em que 1 L de O_2 é equivalente a 21,1 kJ (BENEKE et al., 2002). A contribuição anaeróbia láctica foi estimada a partir da multiplicação do acúmulo de $[La^-]$ (*i.e.*, diferença entre o basal e o pico), da massa corporal e do equivalente de $O_2 - [La^-]$ (ARTIOLI et al., 2012). O equivalente energético de $[La^-]$ foi assumido como $3 \text{ ml } O_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ (ou seja, $1 \text{ mmol de } [La^-] = 3 \text{ ml } O_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$) (di PRAMPERO, 1981). A contribuição anaeróbia aláctica foi estimada através do componente fundamental (A e τ) da cinética em repouso (cinética *off*, a qual demonstrou ser adequadamente descrita por um modelo mono-exponencial) e do equivalente de O_2 , os quais foram calculados a partir da multiplicação da A pelo τ , ambos da cinética em repouso (ARTIOLI et al., 2012).

5.11. Análise de Dados

Os dados obtidos pelo software Lode® LEM (Lode BV, Groningen, Netherlands) sincronizado com o cicloergômetro Lode Excalibur Sport® foram processados e analisados usando *scripts* personalizados no software MatLab® 2023a (MathWorks Inc., Natick, MA, U.S.A). Neste sentido, o torque foi calculado a partir da potência mecânica e da cadência, utilizando a relação entre potência e velocidade angular ($T = P/\omega$), sendo a velocidade angular (ω) derivada da cadência (rpm).

Os dados respiração a respiração adquiridos através do analisador de gases Quark CPET (Cosmed, Rome, Italy) e de FC adquiridos pelo sensor óptico de FC (Polar Verity Sense, Polar Electro Oy, Kempele, Finland) foram também processados e analisados usando *scripts* personalizados no software MatLab® 2023a (MathWorks

Inc., Natick, MA, U.S.A). Todos os dados foram interpolados para fornecer valores alinhados pelo tempo a cada segundo, para cada sujeito em cada fase do estudo.

5.12. Análise Estatística

Os dados estão apresentados como média $\pm$ DP. O teste de *Shapiro-Wilk* foi empregado para avaliar a normalidade dos dados; quando a normalidade não era confirmada, procedimentos estatísticos não paramétricos foram aplicados. Para comparações entre condições de intensidade, foram empregadas as análises de ANOVA de uma via com medidas repetidas, seguidas pelos testes de *post-hoc* de *Tukey* e *Dunnett*. A análise de *Bland–Altman*, com limites de concordância de 95% (LoA), foi utilizada para avaliar a concordância entre o T_{LIM} atual e o T_{LIM} predito para os testes de carga constante respectivos a I_{HIGH} , extremo₁ e extremo₂. O coeficiente de correlação de *Pearson* foi empregado para avaliar a associação entre T_{LIM} atual e T_{LIM} predito. Os resultados foram interpretados como: Insignificante: 0,00–0,10; Fraca: 0,10–0,39; Moderada: 0,40–0,69; Forte: 0,70–0,89; Muito forte: 0,90–1,00 (Schober et al., 2018). O nível de significância adotado foi $p < 0,05$. Os dados foram analisados utilizando o software GraphPad Prism (GraphPad Software, Boston, EUA).

6. RESULTADOS

6.1. Esforço incremental

O $\dot{V}O_{2max}$, $\dot{V}CO_2$, R , $\dot{V}_E$, V_T , f_R , $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$, $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$, FC_{max} , $\Delta[La^-]$, PSE durante o teste incremental, assim como seus valores picos durante os testes de carga constante estão apresentados na tabela 1. Todos os participantes atenderam aos

critérios estabelecidos para a determinação do $\dot{V}O_2\text{max}$ durante o teste incremental, apresentando concentrações de $[La^-] > 8,0 \text{ mMol/L}$, $FC > 97,5\%$ da FC_{predita} e o $R > 1,10$ ao final do teste

. Consideravelmente, apenas um participante apresentou um valor de $\dot{V}O_2$ maior durante o teste de verificação. O $\dot{V}O_2\text{max}$ foi de $4,55 \pm 0,28 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ($58,4 \pm 6,69 \text{ mL}\cdot\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$), a $i\dot{V}O_2\text{max}$ foi de $415 \pm 34 \text{ watts}$, enquanto a FC_{max} foi de $183 \pm 14 \text{ bpm}$ ($97,7 \pm 5,57\% FC_{\text{predita}}$). O R ao final do esforço incremental foi de $1,18 \pm 0,10$. Ademais, o LV_1 foi de $2,60 \pm 0,42 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ($224 \pm 21 \text{ watts}$), enquanto isso, o segundo limiar caracterizado pela PC, ocorreu em $3,28 \pm 0,42 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ($298 \pm 27 \text{ watts}$).

Tabela 1. Respostas fisiológicas máximas nas diferentes condições experimentais

	Incremental	Severo	I_{HIGH}	Extremo₁	Extremo₂
$\dot{V}O_2$ Pico ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	$4,55 \pm 0,28$	$4,56 \pm 0,37$	$4,51 \pm 0,25$	$4,13 \pm 0,27^{\#}$	$4,21 \pm 0,35^{**}$
$\dot{V}CO_2$ Pico ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	$5,18 \pm 0,44$	$5,07 \pm 0,38$	$5,04 \pm 0,42$	$5,03 \pm 0,53$	$4,79 \pm 0,53$
R Pico	$1,18 \pm 0,10$	$1,12 \pm 0,06$	$1,16 \pm 0,10$	$1,23 \pm 0,08$	$1,16 \pm 0,10$
$\dot{V}_E$ Pico ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	$172,1 \pm 24,0$	$162,4 \pm 27,3$	$160,1 \pm 25,7$	$152,4 \pm 26,9^{**}$	$155,8 \pm 28,5^*$
V_T Pico (L)	$2,88 \pm 0,47$	$2,75 \pm 0,37$	$2,80 \pm 0,55$	$2,70 \pm 0,52$	$2,73 \pm 0,54$
f_R Pico (resp$\cdot\text{min}^{-1}$)	$60,1 \pm 6,26$	$59,5 \pm 6,64$	$58,3 \pm 9,00$	$57,2 \pm 7,15$	$58,1 \pm 7,50$
$\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ Pico	$38,0 \pm 5,81$	$36,5 \pm 6,64$	$36,6 \pm 6,40$	$36,8 \pm 5,66$	$37,1 \pm 7,08$
$\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ Pico	$32,4 \pm 5,45$	$32,8 \pm 6,13$	$31,5 \pm 4,38$	$30,1 \pm 5,02$	$32,1 \pm 4,45$
FC_{pico} (bpm)	183 ± 14	178 ± 12	173 ± 16	$167 \pm 15^{**}$	$169 \pm 15^{**}$

$\Delta[\text{La}^-]$ (mMol·L ⁻¹)	6,37 ± 2,01	5,82 ± 2,16	4,92 ± 2,41	4,20 ± 1,89**	4,28 ± 1,79*
PSE (0-10)	8,64 ± 1,12	8,18 ± 1,17	8,00 ± 1,79	8,36 ± 1,69	7,73 ± 2,28

Os valores são apresentados como média ± DP. Abreviações: $\dot{V}\text{O}_2$ pico, consumo pico de oxigênio; $\dot{V}\text{CO}_2$, volume de dióxido de carbono expirado; R, coeficiente respiratório; $\dot{V}_E$, ventilação pulmonar; V_T , volume Corrente; f_R , frequência respiratória; $\dot{V}_E/\dot{V}\text{O}_2$, equivalente respiratório de $\dot{V}\text{O}_2$; $\dot{V}_E/\dot{V}\text{CO}_2$, equivalente respiratório de $\dot{V}\text{CO}_2$; P_{etO_2} , pressões parciais expiratórias de O_2 ; P_{etCO_2} , pressões parciais expiratórias de CO_2 ; FC_{pico} - Frequência cardíaca pico; $[\text{La}^-]$, lactato sanguíneo; PSE, percepção subjetiva de esforço; I_{HIGH} , a mais alta intensidade na qual o $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ ainda pode ser atingido. # = $p < 0,001$, ** = $p < 0,01$, * = $p < 0,05$ em relação aos valores máximos obtidos durante o esforço incremental.

6.2. *Sprint* isocinético máximo de 3 s e reserva de potência anaeróbia

A potência e o torque máximos produzidos durante o SIM de 3 s foram de 1367 ± 196 *watts* e 137 ± 15 N·m, respectivamente. A RPA foi de 952 ± 200 *watts* (Figura 5a).

6.3. Potência crítica e trabalho acima da potência crítica

Quatro testes de carga constante até a exaustão no domínio de intensidade severo foram utilizados para estimar a PC e o W' . Os tempos de T_{LIM} variaram de 176,1 ± 40,1 s a 743,1 ± 239,0 s. A modelagem matemática utilizando a equação com o menor EPE apresentou um excelente ajuste ($R^2 = 0,998$). O EPE para o W' foi de 2,94 ± 1,59 kJ. Os valores individuais estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores Individuais de potência crítica (PC) e trabalho acima da potência crítica (W').

	PC (watts)	PC (% $\dot{V}O_{2\max}$)	W' (kJ)	R^2	EPE (watts)	Melhor-Ajuste
1	257,9	69,3	14,7	0,998	15,2	<i>Trabalho-Tempo</i>
2	275,3	71,0	20,8	0,999	15,6	<i>Hiperbólica</i>
3	324,4	72,4	21,6	0,999	16,6	<i>Trabalho-Tempo</i>
4	268,6	72,4	18,4	0,997	6,60	<i>Trabalho-Tempo</i>
5	283,8	72,6	16,3	0,997	15,5	<i>Trabalho-Tempo</i>
6	339,8	72,8	21,8	0,999	16,9	<i>Trabalho-Tempo</i>
7	304,6	71,5	18,7	0,997	16,2	<i>Trabalho-Tempo</i>
8	303,2	74,0	18,2	1,000	15,9	<i>Trabalho-Tempo</i>
9	277,2	69,3	18,1	1,000	15,7	<i>Trabalho-Tempo</i>
10	321,8	72,6	14,1	0,989	15,5	<i>Trabalho-Tempo</i>
11	325,1	72,1	16,5	0,999	4,90	<i>Hiperbólica</i>
Média	298,3	71,8	18,1	0,998	14,1	
DP	27,3	1,44	2,59	0,003	4,20	

Os valores são apresentados como média $\pm$ DP. Abreviações: PC, potência crítica; $\dot{V}O_{2\max}$, intensidade associada ao consumo máximo de oxigênio; W' , trabalho realizado acima da PC; EPE, erro padrão da estimativa.

6.4. Cinética de consumo do consumo de oxigênio

Para a caracterização da cinética de consumo, adotou-se a intensidade do domínio severo de maior duração (75% $\dot{V}O_{2max}$). O $\dot{V}O_{2basal}$ foi de $0,94 \pm 0,13$ L·min⁻¹ [IC95%: 0,86-1,03 L·min⁻¹], enquanto a A da trajetória do $\dot{V}O_2$ foi de $3,10 \pm 0,30$ L·min⁻¹ [IC95%: 2,90-3,30 L·min⁻¹]. A A_{total} ($\dot{V}O_{2basal}$ + A) da resposta foi de $4,04 \pm 0,27$ L·min⁻¹ [IC95%: 3,86-4,23 L·min⁻¹], com o atingimento de valores de $\dot{V}O_2$ ao final do exercício de $4,40 \pm 0,35$ L·min⁻¹ [IC95%: 4,16-4,63 L·min⁻¹]. O τ foi de $25,8 \pm 4,36$ s [IC95%: 22,9-28,7 s], enquanto o TD foi de $15,0 \pm 4,39$ s [IC95%: 12,0-17,9 s]. Adicionalmente, o componente lento do $\dot{V}O_2$ teve um valor de $0,39 \pm 0,17$ L·min⁻¹ [IC95%: 0,27-0,51 L·min⁻¹], o que corresponde a $9,74 \pm 3,85\%$ [IC95%: 6,99-12,5 L·min⁻¹] da A_{total} . O aparecimento do componente lento ocorreu em 137 ± 20 s [IC95%: 122,7-151,3 s].

6.5. Respostas fisiológicas entre os domínios de intensidade

Com o objetivo de caracterizar as respostas fisiológicas ao domínio de intensidade severo, uma das intensidades da fase 2 foi selecionada para a análise. Esta intensidade correspondeu a aproximadamente 88% da $\dot{V}O_{2max}$, tendo os resultados apresentados na Tabela 3. A potência e o torque aumentaram progressivamente entre as condições ($p < 0,001$). No entanto, as análises de *post-hoc* revelaram não haver diferenças significantes nas respostas de torque entre a I_{HIGH} e $extremo_1$ ($p = 0,10$), bem como entre $extremo_1$ e $extremo_2$ ($p = 0,33$) (Tabela 3). Por outro lado, a cadência se manteve inalterada entre as condições experimentais ($p = 0,18$).

Tabela 3. Perfis de potência, torque e cadência entre os domínios de intensidade severo e extremo.

	Severo	I_{HIGH}	Extremo₁	Extremo₂
Potência (watts)	368 ± 26 ^a	468 ± 35 ^b	509 ± 39 ^c	526 ± 38 ^d
Potência relativa (% i$\dot{V}O_2$max)	88,6 ± 1,62 ^a	112,9 ± 5,74 ^b	122,7 ± 2,65 ^c	126,8 ± 2,62 ^d
Cadência média (rpm)	91,1 ± 11,4 ^a	96,0 ± 9,61 ^a	96,9 ± 9,41 ^a	96,4 ± 13,6 ^a
Torque médio (N·m)	39,3 ± 7,13 ^a	47,1 ± 6,41 ^b	50,7 ± 6,65 ^{bc}	53,3 ± 10,4 ^c

Os valores são apresentados como média ± DP. Abreviações: i $\dot{V}O_2$ max, intensidade associada ao consumo máximo de oxigênio; I_{HIGH}, a mais alta intensidade na qual o $\dot{V}O_2$ max ainda pode ser atingido. Letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significantes entre as condições experimentais ($p < 0,05$), conforme analisados por meio da ANOVA de uma via com *post-hoc* de Tukey.

O $\dot{V}O_2$ pico atingido durante os exercícios situados nas intensidades de extremo₁ ($p < 0,001$) e extremo₂ ($p < 0,01$) foi menor do que o $\dot{V}O_2$ max obtido durante o esforço incremental (Tabela 1). Por outro lado, não foram observadas diferenças significantes entre o $\dot{V}O_2$ pico atingido durante os exercícios situados nas intensidades severo ($p = 1,00$) e I_{HIGH} ($p = 0,96$) e o $\dot{V}O_2$ max obtido durante o esforço incremental. Notavelmente, não foram observadas diferenças significantes nas respostas de $\dot{V}CO_2$ pico entre as condições experimentais ($p = 0,27$) (Tabela 1). Em contrapartida, a ANOVA de uma via demonstrou efeito de intensidade para o R ($p = 0,01$), entretanto,

as comparações *post-hoc* não identificaram diferenças significantes entre as condições experimentais ($p > 0,05$) (Tabela 1).

A $\dot{V}_E$ pico atingida durante os exercícios situados nas intensidades de extremo₁ ($p < 0,01$) e extremo₂ ($p = 0,02$) foi menor do que o $\dot{V}_{E\max}$ obtido durante o esforço incremental (Tabela 1). Por outro lado, não foram observadas diferenças significantes entre o $\dot{V}_E$ pico atingido durante os exercícios situados nas intensidades severa ($p = 0,27$) e I_{HIGH} ($p = 0,12$) e o $\dot{V}_{E\max}$ obtido durante o esforço incremental. É importante destacar que não foram observadas diferenças significantes nas respostas de V_T entre as condições experimentais ($p = 0,36$) (Tabela 1). Assim como, a fR , em que não foram observadas diferenças significantes entre as condições experimentais ($p = 0,58$). Adicionalmente, os índices de eficiência ventilatória, ou seja, $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ ($p = 0,63$) e $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ ($p = 0,051$) não diferiram entre as condições experimentais (Tabela 1).

A PSE atingida ao final do exercício para as diferentes condições experimentais não se diferiu entre si ($p = 0,48$) (Tabela 1). Por outro lado, o $\Delta[La^-]$ atingido durante os exercícios situados nas intensidades de extremo₁ ($p < 0,01$) e extremo₂ ($p = 0,01$) foi menor do que o $\Delta[La^-]$ obtido durante o esforço incremental (Tabela 1). Por outro lado, não foram observadas diferenças significativas entre o $\Delta[La^-]$ atingido durante os exercícios situados nas intensidades severo ($p = 0,82$) e I_{HIGH} ($p = 0,12$) e o $\Delta[La^-]$ obtido durante o esforço incremental (Tabela 1). De forma semelhante, a taxa de aumento do $\Delta[La^-]$ (*i.e.*, $\Delta[La^-]/T_{LIM}$) diferiu significantemente entre as intensidades experimentais ($p < 0,001$). Neste sentido, as análises de *post-hoc* revelaram que a taxa de aumento do $\Delta[La^-]$ ocorreu de forma mais lenta para a intensidade severo ($1,33 \pm 0,48 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) quando comparada a I_{HIGH} ($2,67 \pm 1,09 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$; $p = 0,01$), extremo₁ ($2,85 \pm 1,03 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$; $p = 0,003$) e extremo₂ ($3,25 \pm 1,36$

mmol·L⁻¹·min⁻¹; $p < 0,001$). Contudo, não foram observadas diferenças significantes entre as intensidades I_{HIGH} , extremo₁ e extremo₂ ($p > 0,05$).

A FC pico atingida durante os exercícios situados nas intensidades de extremo₁ ($p < 0,01$) e extremo₂ ($p < 0,01$) foi menor do que a FCmax obtida durante o esforço incremental (Tabela 1). Por outro lado, não foram observadas diferenças significantes entre a FC pico atingida durante os exercícios situados nas intensidades severo ($p = 0,52$) e I_{HIGH} ($p = 0,06$) e o FCmax obtido durante o esforço incremental (Tabela 1).

6.6. Tolerância ao exercício

Não foram encontradas diferenças significantes entre o T_{LIM} atual e o T_{LIM} predito para as intensidades I_{HIGH} ($p = 0,51$), extremo₁ ($p = 0,40$) e extremo₂ ($p = 0,11$) (Tabela 4). Adicionalmente, o viés e os limites de concordância (LoA) de cada teste são apresentados na Tabela 4. Para todas as intensidades, os gráficos de *Bland-Altman* são apresentados na Figura 2.

TABELA 4. Tolerância ao exercício real e tolerância ao exercício predita.

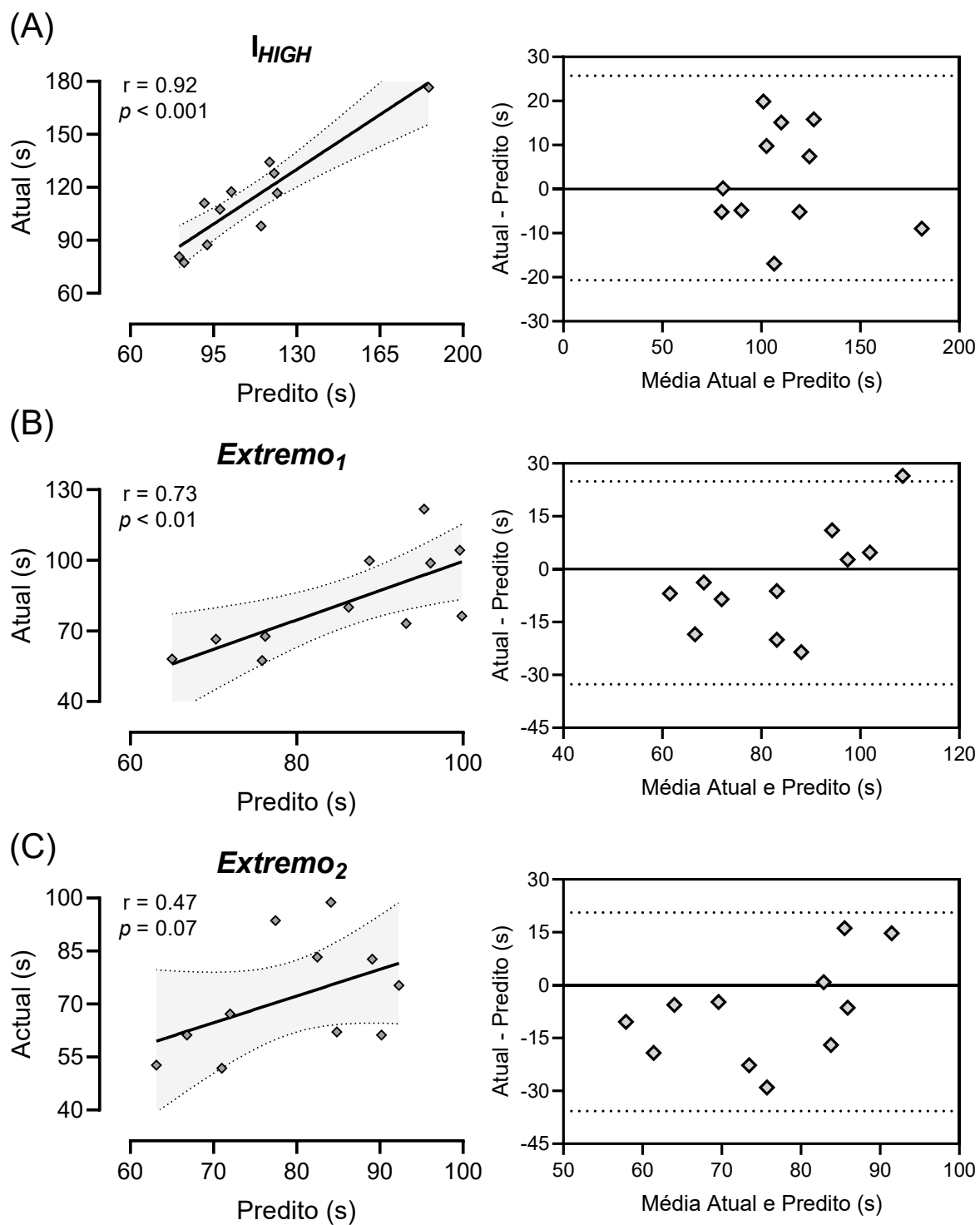
	Real (s)	Predita (s)	Viés (s)	[LoA] (s)
I_{HIGH}	112,3 ± 28,2	109,9 ± 29,2	-2,46 ± 11,8	[-20,7 to 25,7]
Extremo ₁	82,2 ± 21,0	86,0 ± 12,3	3,87 ± 14,7	[-32,7 to 24,9]
Extremo ₂	71,8 ± 16,0	79,4 ± 9,95	7,59 ± 14,4	[-35,7 to 20,6]

Os valores são apresentados como média ± DP. Abreviações: I_{HIGH} , a mais alta intensidade na qual o $\dot{V}O_{2max}$ ainda pode ser atingido. Observações: Não foram

observadas diferenças significativas entre a T_{LIM} atual e a T_{LIM} predita utilizando o modelamento matemático com o menor erro padrão.

A correlação de *Pearson* demonstrou que, para as intensidades I_{HIGH} e extremo₁, foram observadas correlações muito fortes e fortes entre a T_{LIM} atual e a T_{LIM} predita, respectivamente. Contudo, para a intensidade extremo₂ foi observada uma correlação moderada, porém não significativa (Figura 2).

Figura 2. Correlações entre a tolerância ao exercício atual x tolerância ao exercício predita



O coeficiente de correlação de *Pearson* com IC de 95% entre a T_{LIM} atual x T_{LIM} predita para a I_{HIGH} (Figura 2a), $extremo_1$ (Figura 2b) e $extremo_2$ (Figura 2c). *Plots de Bland-*

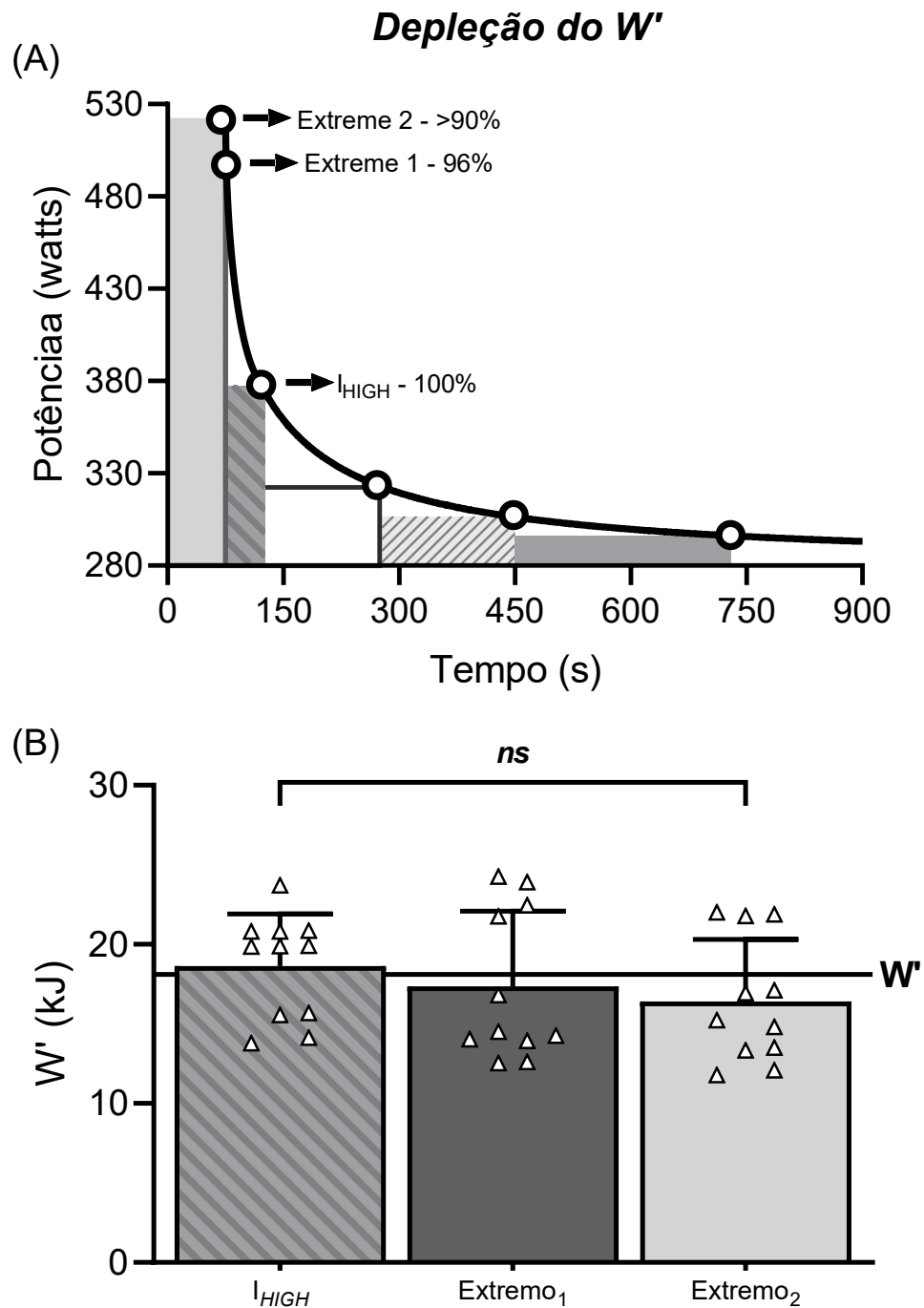
Altman com limites de concordância para a T_{LIM} atual x T_{LIM} predita são apresentados no lado direito das figuras 2a, 2b e 2c. Na figura representativa das análises de *Bland-Altman*, as linhas pontilhadas indicam os limites inferior e superior do intervalo de concordância. Abreviações: I_{HIGH} , a mais alta intensidade na qual o $\dot{V}O_{2max}$ ainda pode ser atingido; T_{LIM} , tolerância ao exercício.

6.7. Depleção do trabalho acima da potência crítica

Adotando a forma inversa da Equação 4, a depleção do W' foi calculada para as intensidades I_{HIGH} , $extremo_1$ e $extremo_2$. Não foram observadas diferenças significantes para a depleção do W' entre as condições ($p = 0,09$) ($I_{HIGH} = 18,6 \pm 3,27$ kJ; $extremo_1 = 17,4 \pm 4,72$ kJ e $extremo_2 = 16,4 \pm 3,91$ kJ). Adicionalmente, esses valores não diferiram do W' estimado pelo modelo matemático com o menor erro padrão (Figura 3). Entretanto, a taxa na qual o W' foi depletado aumentou significativamente entre as condições ($p < 0,001$) ($I_{HIGH} = 0,17 \pm 0,02$ kJ·s⁻¹; $extremo_1 = 0,21 \pm 0,02$ kJ·s⁻¹; e $extremo_2 = 0,2 \pm 0,01$ kJ·s⁻¹).

À medida que a intensidade se eleva entre os domínios de intensidade severo e extremo, o trabalho total realizado é diminuído ($p < 0,001$). Contudo, as análises de *post-hoc* demonstraram que o trabalho total foi superior para a intensidade severo ($103,6 \pm 28,5$ kJ) comparado às intensidades na I_{HIGH} ($52,3 \pm 12,3$ kJ, $p < 0,001$), $extremo_1$ ($41,9 \pm 11,6$ kJ, $p < 0,001$) e $extremo_2$ ($37,7 \pm 8,44$ kJ, $p < 0,001$). Por outro lado, o trabalho total na I_{HIGH} foi superior ao realizado na $extremo_2$ ($p = 0,04$), enquanto não houve diferenças no trabalho total entre as intensidades I_{HIGH} e $extremo_1$ ($p = 0,22$), assim como entre $extremo_1$ e $extremo_2$ ($p = 0,85$).

Figura 3. A depleção do W' para diferentes taxas de trabalho mecânico



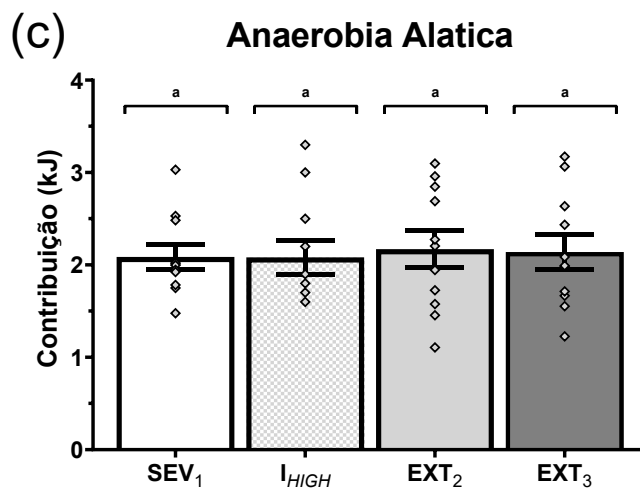
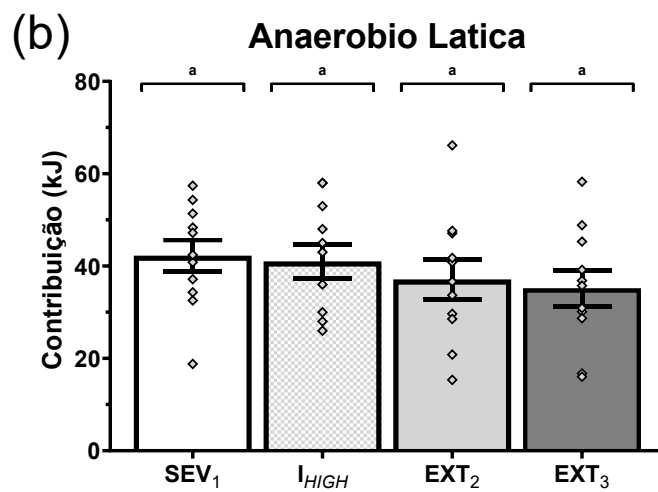
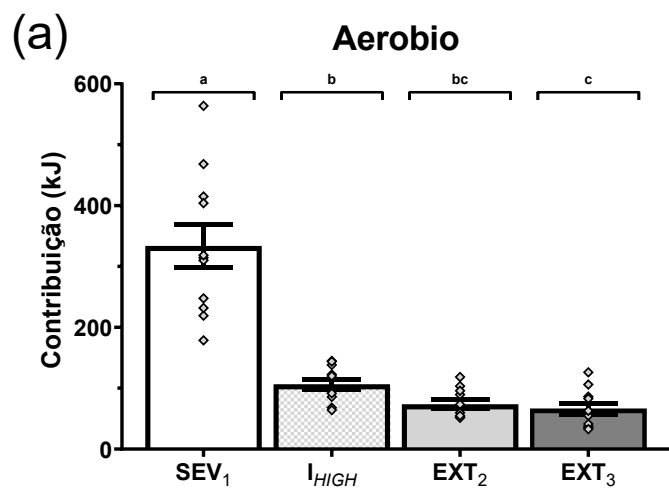
a. Ilustra a relação hiperbólica potência-tempo e a sua associação com a completa depleção do W' . *Nota:* embora nenhuma diferença significativa tenha sido encontrada

entre o W' para I_{HIGH} , extremo₁ e extremo₂ em comparação ao W' estimado, sob uma perspectiva percentual, exercícios realizados na I_{HIGH} e em intensidades extremas, ao menos em seus limites inferiores, demonstram uma depleção média de W' superior a 90%. **b.** A coluna cinza hachurada representa a depleção de W' na I_{HIGH} , enquanto a coluna cinza escura representa o extremo₁ e a cinza clara representa o extremo₂. A linha horizontal representa o W' estimado utilizando quatro testes de carga constante no domínio de intensidade severo e o modelamento matemático com o menor erro padrão. Os valores são apresentados como média $\pm$ DP. Abreviações: W' , trabalho realizado acima da potência crítica; I_{HIGH} , a mais alta intensidade na qual o $\dot{V}O_{2max}$ ainda pode ser atingido; e *ns*, não significativo.

6.8. Contribuição energética do metabolismo aeróbio e anaeróbio

À medida que a intensidade se eleva entre os domínios de intensidade severo e extremo a contribuição aeróbia declina progressivamente ($p < 0,001$), enquanto não foram observadas reduções na contribuição anaeróbia láctica ($p < 0,001$) e aláctica ($p < 0,001$) (Figura 4). Contudo, as análises de *post-hoc* demonstraram que para a contribuição aeróbia não foram observadas diferenças significantes entre as intensidades I_{HIGH} e extremo₁ ($p = 0,15$), bem como entre extremo₁ e extremo₂ ($p = 0,69$).

Figura 4. Contribuição energética do metabolismo aeróbio e anaeróbio



Os valores são apresentados como média $\pm$ erro padrão da média. Abreviações: I_{HIGH} , a mais alta intensidade na qual o $\dot{V}O_{2max}$ ainda pode ser atingido; SEV, severo; e EXT, extremo. Letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significantes entre as condições experimentais ($p < 0,05$), conforme analisadas por meio da ANOVA de uma via com *post-hoc* de Tukey.

7. DISCUSSÃO

Os achados do presente estudo reforçam ainda mais a robustez da relação potência-duração como um importante parâmetro para se estudar as respostas fisiológicas durante o exercício de alta intensidade. Foi demonstrado que o $\dot{V}O_{2max}$ não é atingido no domínio extremo, porém o W' é completamente utilizado em intensidades ligeiramente acima da I_{HIGH} (i.e., situadas nas regiões inferiores do domínio extremo). Além disso, a T_{LIM} pode ser predita com alta a moderada acurácia nos domínios severo e extremo.

Em exercícios situados no domínio de intensidade extremo, o tempo até a exaustão ocorre de forma abrupta e precede o atingimento do $\dot{V}O_{2max}$ (CAPUTO e DENADAI, 2008; HILL et al., 2002). Neste contexto, diversos estudos demonstraram valores inferiores de $\dot{V}O_2$ pico em condições de intensidade extrema, variando aproximadamente de -6% a -11% entre indivíduos com diferentes estados de treinamento (CAPUTO e DENADAI, 2008; VENTURA et al., 2023). As intensidades extremo₁ e extremo₂ levaram a valores de $\dot{V}O_2$ pico de aproximadamente -9% e -7% menores que o $\dot{V}O_{2max}$, respectivamente. Estas respostas fisiológicas podem ser explicadas por um débito cardíaco reduzido (LAUGHLIN et al., 2012).

Considerando que o débito cardíaco é o produto da FC pelo volume sistólico, as dinâmicas da FC demonstram ser o principal fator determinante nessas intensidades, dado que o volume sistólico atinge um platô em intensidades próximas a 80% do $\dot{V}O_2\text{max}$ (LAUGHLIN et al., 2012). Os achados do presente estudo demonstram que as intensidades extremo₁ e extremo₂ induziram respostas de FC reduzidas, sendo aproximadamente -8,74% e -7,65% menores que a FC_{max}, respectivamente. De fato, a redução do fluxo sanguíneo e da oferta de O₂ tem sido demonstrada a exercer um impacto significativo no desempenho humano em intensidades elevadas, o que resulta em maior dependência do metabolismo anaeróbio para o fornecimento de energia e o acúmulo de seus subprodutos (*i.e.*, metabólitos) (BROXTERMAN et al., 2015). Portanto, poder-se-ia esperar um maior acúmulo de metabólitos sob condições de intensidade extrema (BLACK et al., 2017; JONES et al., 2008), o que de fato ocorreu, visto que o $\Delta[\text{La-}]$ aumentou mais rapidamente entre as intensidades I_{HIGH}, extremo₁ e extremo₂ quando comparadas a intensidade severa. Entretanto, a variação absoluta do $\Delta[\text{La-}]$ na exaustão foi menor para as intensidades extremo₁ e extremo₂ quando comparadas àquelas obtidas durante o esforço incremental. Embora uma maior taxa de aumento do $\Delta[\text{La-}]$ indique uma maior ativação da via glicolítica para as intensidades extremas, o menor $\Delta[\text{La-}]$ ao final do exercício pode refletir o menor tempo de TLIM, assim, limitando o seu acúmulo. Entretanto, não se pode descartar a possibilidade de alterações na cinética de transporte entre o meio intramuscular e a corrente sanguínea, embora os dados do presente estudo limitem as inferências em relação a estes mecanismos propostos.

Embora exercícios situados no domínio de intensidade extremo não resultem no atingimento do $\dot{V}O_2\text{max}$, respostas similares de $\dot{V}CO_2$ e do R ao final do exercício

sugerem manutenção de elevada demanda metabólica (*i.e.*, elevada acidose metabólica e atividade do sistema tampão bicarbonato) entre as intensidades investigadas (CAIRNS e LINDINGER, 2025). Dado que o controle dos mecanismos ventilatórios é mediado pelo feedback dos quimiorreceptores (SIETSEMA e ROSSITER, 2023), era esperado que elevadas demandas respiratórias também fossem observadas, evidenciadas pelas respostas de V_T e f_R entre as condições experimentais. No entanto, a $\dot{V}_E$ pico, que é o resultado do V_T multiplicado pela f_R , demonstrou respostas atenuadas para intensidades situadas no domínio extremo quando comparada à $\dot{V}_E$ máxima obtida durante o esforço incremental, sugerindo que a exaustão antecede até mesmo o atingimento da máxima capacidade do sistema pulmonar de captar o O_2 , podendo sugerir que nestas condições limitações adicionais podem coexistir junto à oferta de O_2 por parte do sistema cardiovascular e consumo de O_2 pelas mitocôndrias musculares. Adicionalmente, a eficiência ventilatória manteve-se inalterada entre as condições experimentais, assim como a PSE, que apresentou valores semelhantes na exaustão mesmo diante de exercícios situados em diferentes domínios de intensidade.

A relação hiperbólica potência-duração, derivada a partir de quatro testes de carga constante no domínio de intensidade severo prediz a T_{LIM} com precisão na I_{HIGH} e em intensidades próximas ao limite inferior do domínio de intensidade extremo. Por exemplo, na I_{HIGH} , a diferença entre a T_{LIM} atual e a T_{LIM} predita é trivial (isto é, < 2,5 s), com um relativamente baixo viés médio (2,20%). Achados semelhantes foram reportados recentemente, demonstrando que a T_{LIM} nas intensidades I_{HIGH} e levemente acima da I_{HIGH} pode ser predita utilizando os parâmetros da relação potência-duração (PC e o W'), mesmo quando se determina pelas diferentes

equações (VENTURA et al., 2023). Adicionalmente, adotando esta abordagem, foram observados relativamente baixos vieses médios variando de -2,8 s a -5,8 s (VENTURA et al., 2023). Por outro lado, nas intensidades extremo_1 e extremo_2 , os achados do presente estudo sugerem que o viés médio tende a modificar seu padrão, visto que o mesmo se eleva e tende a superestimar a T_{LIM} (viés médio variando de 3,87 s a 7,59 s) em maiores intensidades. Mesmo assim, a T_{LIM} atual e a predita não diferiram estatisticamente para as intensidades situadas no domínio de intensidade extrema ($p > 0,05$). Apesar do baixo viés médio observado e da maior parte dos participantes estarem situados dentro dos limites de concordância, é importante ressaltar que, à medida que a intensidade é elevada, os limites tornam-se mais amplos, indicando maior variabilidade individual e, conseqüentemente, menor precisão preditiva do modelo hiperbólico.

Consistentemente, demonstrou-se uma forte relação entre a T_{LIM} atual e a T_{LIM} predita para algumas condições experimentais; desta maneira, observou-se uma associação muito forte ($r = 0,92$) e forte ($r = 0,73$) para I_{HIGH} e extremo_1 , respectivamente. Estes achados são consistentes com os pressupostos da relação hiperbólica potência-duração, uma vez que a predição da T_{LIM} é estritamente determinada pela taxa na qual o W' será depletado, assim como por sua magnitude (MORITANI et al., 1981). Dessa forma, a predição acurada em altas intensidades têm sido consistente entre diferentes modalidades de exercício quando a intensidade excede a PC (e.g., carga constante, $r = 0,99$; incremental, $r = 0,92$; *self-paced*, $r = 0,91$; todos $p < 0,01$) (CHIDNOK et al., 2013). Em contrapartida, observou-se uma correlação moderada ($r = 0,47$), porém não significativa, para a intensidade extremo_2 , que pode ser explicada pela maior variabilidade encontrada entre os sujeitos durante

esta condição experimental, bem como por um erro significativo do modelo hiperbólico para intensidades que levam à exaustão em períodos extremamente curtos, os quais tendem a ser melhor ajustados por outros modelos matemáticos (e.g., função de leis de potência) (DRAKE et al., 2023).

Vale ressaltar que, durante a intensidade extremo₂ (~526 *watts*), foram requeridos maiores níveis de torque (46,3–60,3 N·m; IC 95%) em vez de maiores níveis de cadência. Nesse sentido, os atletas foram instruídos a auto selecionarem a sua cadência preferida, sem padronização entre as intensidades, sendo observadas cadências similares entre as intensidades I_{HIGH}, extremo₁ e extremo₂. Considerando que a potência é o produto entre o torque e a velocidade angular, a manutenção de cadências similares entre as condições investigadas implica em maiores demandas de torque para atingimento da potência desejada. Em nosso ponto de vista, intensidades muito elevadas em comparação a I_{HIGH} tendem a apresentar menor concordância entre a T_{LIM} atual e a T_{LIM} predita também devido a fatores intrínsecos e relacionados à tarefa que podem influenciar o desempenho humano (WEYAND et al., 2006), incluindo a maior demanda de controle neuromuscular para a manutenção de uma cadência constante sob condições de alta demanda de produção de potências extremamente elevadas a partir de uma posição sentada, bem como o equilíbrio entre a cadência e o torque. Assim, para compensar maiores exigências de produção de torque, os atletas podem optar por uma cadência muito elevada (> 120 *rpm*); caso contrário, maiores exigências de torque podem aumentar as sensações percebidas de fadiga (e.g., desconforto e dores), considerando que, partindo de uma posição sentada, os músculos do quadríceps tendem a ser sobrecarregados, o que pode levar a uma exaustão precoce e à depleção incompleta do *W'*.

Mesmo assim, pela primeira vez, foi demonstrado que ocorre a depleção completa do W' na intensidade correspondente a I_{HIGH} e em intensidades situadas no limite inferior do domínio extremo. Esses achados fornecem informações relevantes sobre as dinâmicas do W' , dado que exercícios com duração superior a 60 s no domínio de intensidade extremo podem depletar totalmente o W' , e consequentemente, resultar em predições acuradas da T_{LIM} para essas intensidades. Ao longo dos anos, análises compreensivas foram conduzidas a fim de avaliar as dinâmicas do W' sob diferentes condições experimentais (CHIDNOK et al., 2012; 2013). Neste contexto, o W' demonstrou ser completamente depletado no momento correspondente à exaustão durante diferentes tipos de exercícios, como, por exemplo, carga constante, *all-out*, *self-paced* e incremental (CHIDNOK et al., 2013). Adicionalmente, o W' tem sido demonstrado ser consistente mesmo sob condições de exercícios intermitentes, ou seja, bloco de exercícios com períodos de repouso ativo ou passivo (CHIDNOK et al., 2012). Dessa maneira, quando os períodos de repouso são realizados acima da PC, não ocorre a reconstituição do W' . Por outro lado, quando os períodos de repouso ocorrem em intensidades situadas nos domínios de intensidade pesado ou moderado há tempo suficiente para a reconstituição do W' , e consequentemente, o atingimento de maior tempo até a exaustão (CHIDNOK et al., 2012). Baseado nos achados do presente estudo, é possível sugerir que exercícios situados no limite inferior do domínio de intensidade extremo compartilham os mesmos mecanismos governantes da T_{LIM} daqueles situados no domínio de intensidade severo.

Durante exercícios situados no domínio de intensidade extremo, ou seja, aqueles caracterizados por exercícios com duração inferior a 2 min, o metabolismo

aeróbio tende a se manter como o sistema energético predominante para a maior parte das intensidades (GASTIN, 2001). Neste contexto, estudos clássicos têm demonstrado que exercícios com duração superior a 75 s resultam em mais de 50% de contribuição aeróbia para a contribuição energética total (GASTIN, 2001). Os achados do presente estudo demonstraram que, em ciclistas bem treinados, mesmo na intensidade mais elevada do domínio de intensidade extremo, cuja T_{LIM} foi de ~72 s, o metabolismo aeróbio foi responsável por mais de 60% da contribuição energética total. Conforme esperado, a contribuição aeróbia diminuiu progressivamente à medida que a intensidade do exercício foi elevada entre os domínios severo e extremo, enquanto as contribuições anaeróbias láctica e aláctica permaneceram similares. Embora tenham sido observadas alterações progressivas na participação do metabolismo aeróbio, a ausência de diferenças nas contribuições dos metabolismos anaeróbios láctico e alático sugere que exercícios realizados nos domínios severo e extremo compartilham, ao menos em parte, mecanismos fisiológicos semelhantes relacionados ao metabolismo energético.

Dentro dessa faixa de intensidade, mesmo com o aumento progressivo da intensidade e a redução da T_{LIM} , a contribuição do metabolismo aeróbio se manteve predominante e, em parte, relativamente estável, sugerindo que exercícios situados no limite inferior do domínio de intensidade extremo ainda compartilham aspectos fisiológicos semelhantes aos observados no domínio de intensidade severo. Comportamentos semelhantes foram observados para o trabalho total realizado, que apresentou redução progressiva à medida que a intensidade foi elevada entre os domínios de intensidade. Contudo, não foram observadas diferenças significantes entre as intensidades I_{HIGH} e extremo₁, bem como entre extremo₁ e extremo₂.

Dessa maneira, diferentes aspectos associados ao exercício, incluindo fatores energéticos, neuromusculares e de percepção de dor, tornam os exercícios realizados nas regiões médias e superiores do domínio de intensidade extremo praticamente insustentáveis, refletindo-se em redução progressiva da T_{LIM} e do trabalho total realizado. Como mencionado anteriormente, é possível sugerir que, nas regiões médias e superiores do domínio de intensidade extremo, a exaustão possa ocorrer mesmo antes da depleção completa do W' . Corroborando a perspectiva de que intensidades situadas nessas regiões são praticamente insustentáveis de forma constante, Weyand et al. (2005) demonstraram experimentalmente que o desempenho humano durante esforços *all-out* diminui exponencialmente à medida que a duração do exercício aumenta, em esforços variando entre 5 s e 350 s. De forma semelhante, a relação entre intensidade e duração do exercício foi estabelecida no início do século passado por Hill (1925), para a qual uma descrição matemática foi empregada para caracterizar o desempenho esportivo entre diferentes modalidades esportivas, sexos e até espécies a partir de recordes mundiais. Posteriormente, essa relação passou a ser descrita matematicamente por um modelo hiperbólico quando consideradas intensidades que levem à exaustão entre 2 e 15 minutos (MONOD & SCHERRER, 1965).

8. APLICAÇÕES PRÁTICAS

Em nosso entendimento, a PC e o W' demonstraram ser excelentes ferramentas para a predição do desempenho humano em exercícios realizados em altas intensidades, particularmente no domínio de intensidade severo e levemente acima da I_{HIGH} , que representa o limite superior do domínio de intensidade severo.

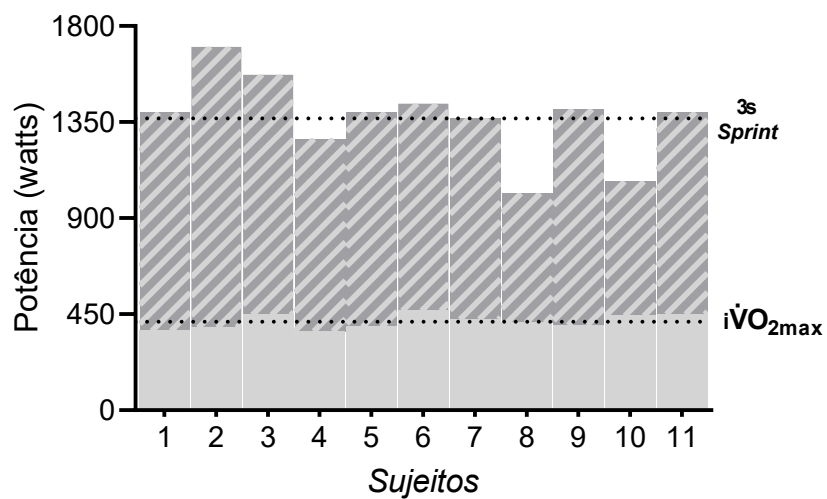
Desta maneira, com base nos pressupostos da relação hiperbólica entre a potência e a duração do exercício, as decisões relacionadas às estratégias de *pacing* durante provas de alta intensidade (*i.e.*, variando de 60 s a 30 min), como provas de ciclismo em pista, corridas de meio-fundo e contrarrelógios, bem como a prescrição do treinamento intervalado, por meio da manipulação da intensidade, da duração e dos esforços e dos intervalos de recuperação, podem ser potencializadas.

Os achados do presente estudo demonstram que a PC e o W' predizem com elevada acurácia as intensidades próximas a I_{HIGH} , evidenciando seu potencial como uma excelente ferramenta para o controle e a prescrição do treinamento intervalado. De fato, estes aspectos se tornam relevantes, à medida que programas de treinamento realizados nessas intensidades têm demonstrado a promover adaptações significativas em curtos períodos, ou seja, sendo estratégias tempo-eficientes. Neste contexto, as sessões de treinamento intervalado de alta intensidade (*HIIT*) realizadas na I_{HIGH} têm sido demonstradas a induzir um maior tempo gasto no $\dot{V}O_{2max}$ do que levemente acima da PC (TURNES et al., 2016), as quais têm contribuído para maiores aumentos no $\dot{V}O_{2max}$ após 4 semanas de treinamento. Entretanto, num cenário real, a determinação da PC e do W' consome tempo demais, assim, treinadores que regularmente prescrevem sessões de *HIIT/SIT* baseadas na RPA ou $i\dot{V}O_{2max}$ deveriam considerar que a I_{HIGH} , $Extremo_1$ e $Extremo_2$ seriam intensidades entre 113-127% da $i\dot{V}O_{2max}$ e ~6-12% da RPA (Figura 5b).

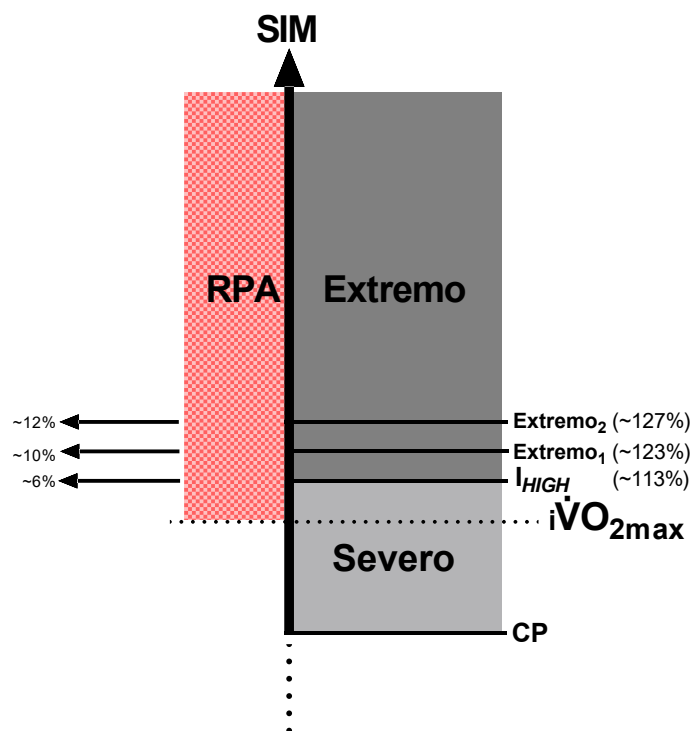
Figura 5. O espectro de intensidade do exercício

(A)

Reserva de Potência Anaerobia



(B)



a. Cada coluna numerada indica a potência máxima atingida durante os sprints isocinéticos de cada sujeito. As partes cinza-claro e cinza-tracejado de cada coluna representam o tamanho da $i\dot{V}O_{2max}$ e da RPA, respectivamente, de cada sujeito.

Além disso, a linha sólida horizontal indica a média da $\dot{V}O_{2\max}$ e da RPA. **b.** Esquema ilustrativo do espectro de intensidade do exercício, englobando a potência média para os limiares do domínio de intensidade severo ($> PC$, mas $< I_{\text{HIGH}}$), do domínio de intensidade extremo ($> I_{\text{HIGH}}$) e a potência máxima durante o SIM. Os blocos de diferentes tonalidades de cinza representam o tamanho dos domínios de intensidade do exercício. Em conjunto, o bloco traçado vermelho representa o tamanho da RPA. *Nota:* Está também ilustrado o ponto médio respectivo da I_{HIGH} , Extremo₁ e Extremo₂ em relação a RPA. Abreviações: $\dot{V}O_{2\max}$, intensidade associada ao $\dot{V}O_{2\max}$; PC, potência crítica; I_{HIGH} , a mais alta intensidade na qual o $\dot{V}O_{2\max}$ ainda pode ser atingido; RPA, reserva de potência anaeróbia; SIM, a máxima potência durante o sprint isocinético máximo

9. LIMITAÇÕES

Algumas limitações devem ser consideradas ao interpretar os achados do presente estudo. Embora esta investigação tenha buscado investigar os determinantes da T_{LIM} no exercício no domínio de intensidade extremo, bem como avaliar a capacidade preditiva do modelo de PC nessas intensidades, uma abordagem abrangente foi empregada visando caracterizar a perda de eficiência na integração entre a captação, transporte e utilização de O_2 nessas intensidades e a sua relação com o metabolismo energético. Neste contexto, a ausência de informações acerca das propriedades do sistema cardiovascular (e.g., volume sistólico e débito cardíaco) e da extração de O_2 a nível muscular (e.g., oxiemoglobina e deoxiemoglobina), bem como da coleta de amostras de tecido muscular para a caracterização da depleção dos substratos energéticos ao fim do exercício, limita as inferências em relação aos

mecanismos fisiológicos que determinam a T_{LIM} sob estas condições. Adicionalmente, o tamanho amostral relativamente reduzido deve ser considerado, uma vez que pode ter limitado o poder estatístico para a identificação de associações e diferenças de menor magnitude entre as condições experimentais. Por fim, as coletas de lactato sanguíneo utilizadas para a estimativa da contribuição energética anaeróbia láctica poderiam ter sido realizadas em intervalos menores durante o período de recuperação (e.g., a cada 1 min), aumentando a probabilidade de identificação do pico da concentração de lactato sanguíneo e, conseqüentemente, a precisão dessa estimativa.

10. PERSPECTIVAS FUTURAS

Futuros estudos devem investigar os mecanismos fisiológicos associados à T_{LIM} e ao exercício no domínio de intensidade extremo em diferentes sexos (e.g., homem x mulher), especialmente implementando a adoção de técnicas adicionais, como a mensuração da oxigenação muscular, da função neuromuscular e do metabolismo energético, poderá contribuir para uma maior compreensão desses fatores.

11. CONCLUSÃO

Em ciclistas bem treinados, o W' se mantém como um dos fatores determinantes da T_{LIM} dentro do domínio de intensidade extremo, particularmente em seu limite inferior. Adicionalmente, a T_{LIM} pode ser predita com acurácia forte a moderada entre as intensidades investigadas, utilizando-se o modelo da potência

crítica. Portanto, pode ser sugerido que exercícios situados no limite inferior do domínio de intensidade extremo compartilham, ao menos em parte, os mesmos mecanismos fisiológicos que regem a T_{LIM} em exercícios situados no domínio de intensidade severo.

14. REFERÊNCIAS

ARTIOLI, G. G., BERTUZZI, R. C., ROSCHEL, H., MENDES, S. H., LANCH JR., A. H., FRANCHINI, E. Determining the contribution of the energy systems during exercise. *J. Vis. Exp.* V. 61, e. 3413, 2012. Disponível em: doi:10.3791/3413. Acesso em: 19 abr. 2026.

BARSTOW T.J., JONES A.M., NGUYEN P.H., CASABURI R. Influence of muscle fiber type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise. *Journal of Applied Physiology*. Rockville, v. 81, n. 4, p. 1642-50, 1996. Disponível em: doi:10.1152/jappl.1996.81.4.1642. Acesso em: 19 abr. 2026.

BEAVER W.L., WASSERMAN K., WHIPP B.J. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *Journal of Applied Physiology*. Rockville, v. 60, n. 6, p. 2020-27, 1986. Disponível em: doi:10.1152/jappl.1986.60.6.2020. Acesso em: 19 abr. 2026.

BENEKE R., POLLMANN C., BLEIF I., LEITHÄUSER R.M., HÜTLER M. How anaerobic is the wingate anaerobic test for humans? *European Journal of Applied Physiology*. Berlin, v. 87, n. 4, p. 388-92, 2002. Disponível em: doi:10.1007/s00421-002-0622-4. Acesso em: 19 abr. 2026.

BLACK M.I., JONES A.M., BLACKWELL J.R., et al. Muscle metabolic and neuromuscular determinants of fatigue during cycling in different exercise intensity domains. *Journal of Applied Physiology*. Rockville, v. 122, n.3, p. 446-59, 2017. Disponível em: doi:10.1152/japplphysiol.00942.2016. Acesso em: 19 abr. 2026

BORG, G.; BORG, E. A new generation of scaling methods: Level-anchored ratio scaling. *Psychologica*, v.28, p.15–45, 2001. Acesso em: 19 abr. 2026.

BROXTERMAN R.M., CRAIG J.C., SMITH J.R., et al. Influence of blood flow occlusion on the development of peripheral and central fatigue during small muscle mass handgrip exercise. *Journal of Physiology*. Londres, v. 593, n. 17, p. 4043-54, 2015. Disponível em: doi:10.1113/JP270424. Acesso em: 19 abr. 2026

BROXTERMAN R.M., LAYEC G., HUREAU T.J., AMANN M., RICHARDSON R.S. Skeletal muscle bioenergetics during all-out exercise: mechanistic insight into the oxygen uptake slow component and neuromuscular fatigue. *Journal of Applied Physiology*. Rockville, v. 122, n. 5, p. 1208-17, 2017. Disponível em: doi:10.1152/japplphysiol.01093.2016. Acesso em: 19 abr. 2026

BURNLEY M., JONES A.M. Oxygen uptake kinetics as a determinant of sports performance. *European Journal of Sport Science*. Cologne, v. 7, n. 2, p. 63-79, 2007. Disponível em: doi:10.1080/17461390701456148. Acesso em: 19 abr. 2026

BURNLEY M., VANHATALO A., JONES A.M. Distinct profiles of neuromuscular fatigue during muscle contractions below and above the critical torque in humans.

Journal of Applied Physiology. Rockville, v. 113, n. 2, p. 215-23, 2012. Disponível em: doi:10.1152/jappphysiol.00022.2012. Acesso em: 19 abr. 2026

BURNLEY, M.; JONES, A.M. Power-duration relationship: Physiology, fatigue, and the limits of human performance. *European Journal of Sport Science*; vol.18, n.1; p.1-12; 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1249524>. Acesso em: 19 abr. 2026

CAIRNS, S. P., & LINDINGER, M. I. (2025). Lactic acidosis: implications for human exercise performance. *European Journal of Applied Physiology*. Berlin, v. 125, n. 7, p. 1761-95, 2025. Disponível em: doi: 10.1007/s00421-025-05750-0. Acesso em: 19 abr. 2026.

CANNON D.T., WHITE A.C., ANDRIANO M.F., KOLKHORST F.W., ROSSITER H.B. Skeletal muscle fatigue precedes the slow component of oxygen uptake kinetics during exercise in humans. *The Journal of Physiology*. Londres, v. 589, p. 727-39, 2011. Disponível em: doi:10.1113/jphysiol.2010.197723. Acesso em: 19 abr. 2026

CAPUTO F., DENADAI B.S. The highest intensity and the shortest duration permitting attainment of maximal oxygen uptake during cycling: effects of different methods and aerobic fitness level. *European Journal of Applied Physiology*. Berlin, v. 103, n.1, p. 47-57, 2008. Disponível em: doi:10.1007/s00421-008-0670-5. Acesso em: 19 abr. 2026

CHIDNOK W., DIMENNA F.J., BAILEY S.J. et al. Exercise tolerance in intermittent cycling: application of the critical power concept. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. Indianapolis, v. 44, n. 5, p. 966-76, 2012. Disponível em: doi:10.1249/MSS.0b013e31823ea28a. Acesso em: 19 abr. 2026.

CHIDNOK W., DIMENNA F.J., BAILEY S.J., WILKERSON D.P., VANHATALO A., JONES A.M. Effects of pacing strategy on work done above critical power during high-intensity exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. Indianapolis, v. 45, n. 7, p. 1377-85, 2013. Disponível em: doi:10.1249/MSS.0b013e3182860325. Acesso em: 19 abr. 2026

de SOUZA K.M., DEKERLE J., SALVADOR P.C., et al. Rate of utilization of a given fraction of W' (the curvature constant of the power-duration relationship) does not affect fatigue during severe-intensity exercise. *Experimental Physiology*. Londres, v. 101, n.4, p. 540-48, 2016. Disponível em: doi:10.1113/EP085451. Acesso em: 19 abr. 2026

Di PRAMPERO P.E., FERRETTI G. The energetics of anaerobic muscle metabolism: a reappraisal of older and recent concepts. *Respiratory Physiology*. Amsterdam, v. 118, n. 2-3, p. 103-05. Disponível em: doi:10.1016/s0034-5687(99)00083-3. Acesso em: 19 abr. 2026.

Di PRAMPERO, P.E. Energetics of muscular exercise. *Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology*. Berlin, v. 89, p. 143-222, 1981. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BFb0035266>. Acesso em: 19 abr. 2026.

do Nascimento Salvador P.C., Nascimento E.M.F., Antunes D., Guglielmo L.G.A.,

DENADAI B.S. Energy metabolism and muscle activation heterogeneity explain $\dot{V}O_2$ slow component and muscle fatigue of cycling at different intensities. *Experimental Physiology*. Londres, v. 108, n. 3, p. 503-17, 2023. Disponível em: [doi:10.1113/EP090444](https://doi.org/10.1113/EP090444). Acesso em: 19 abr. 2026.

DRAKE JP, FINKE A, FERGUSON RA. Modelling human endurance: power laws vs critical power. *European Journal of Applied Physiology*. Berlin, v. 124, n.2, p. 507-26, 2024. Disponível em: [doi:10.1007/s00421-023-05274-5](https://doi.org/10.1007/s00421-023-05274-5). Acesso em: 19 abr. 2026.

GAESSER GA, WARD SA, BAUM VC, WHIPP BJ. Effects of infused epinephrine on slow phase of O_2 uptake kinetics during heavy exercise in humans. *Journal of Applied Physiology*. Rockville, v. 77, n. 5, p. 2413-19, 1994. Disponível em: [doi:10.1152/jappl.1994.77.5.2413](https://doi.org/10.1152/jappl.1994.77.5.2413). Acesso em: 19 abr. 2026

GAESSER, G.A.; BROOKS, G.A. Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption: a review. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. Indianapolis, v. 16, n.1, p. 29-43; 1984. Acesso em: 19 abr. 2026

GASTIN P. B. Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Medicine*. Auckland, v. 31, n.10, p. 725-41, 2001. Disponível em: [doi: 10.2165/00007256-200131100-00003](https://doi.org/10.2165/00007256-200131100-00003). Acesso em: 19 abr. 2026.

GRASSI, B., ROSSITER, H. B., & ZOLADZ, J. A. Skeletal muscle fatigue and decreased efficiency: two sides of the same coin? *Exercise and sport sciences reviews*, v.43, n.2, p.75–83; 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000043>. Acesso em: 19 abr. 2026

GRECO C.C., CARITÁ R.A., DEKERLE J., DENADAI B.S. Effect of aerobic training status on both maximal lactate steady state and critical power. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism*. Ottawa, v. 37, n. 4, p. 734-43, 2012. Disponível em: [doi:10.1139/h2012-047](https://doi.org/10.1139/h2012-047). Acesso em: 19 abr. 2026

HILL D.W., POOLE D.C., SMITH J.C. The relationship between power and the time to achieve $\dot{V}O_{2max}$. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. Indianapolis, v. 34, n. 4, p. 709-14, 2002. Disponível em: [doi:10.1097/00005768-200204000-00023](https://doi.org/10.1097/00005768-200204000-00023). Acesso em: 19 abr. 2026

HILL, A. V. Athletic records. *Lancet*. Amsterdam, v. 206, n. 5623, p. 481-86, 1925. Disponível em: [doi:10.1016/S0140-6736\(01\)15546-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(01)15546-7). Acesso em: 19 abr. 2026

HOPKINS WG. Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Medicine*. Auckland, v. 30, n. 1, p. 1-15, 2000. Disponível em: doi:10.2165/00007256-200030010-00001. Acesso em: 19 abr. 2026.

HUGHSON R.L. Oxygen uptake kinetics: historical perspective and future directions. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism*. Ottawa, v. 34, n.5, p.840-50, 2009. Disponível em: doi:10.1139/H09-088. Acesso em: 19 abr. 2026

IANNETTA D., ZHANG J., MURIAS J.M., ABOODARDA S.J. Neuromuscular and perceptual mechanisms of fatigue accompanying task failure in response to moderate-, heavy-, severe-, and extreme-intensity cycling. *Journal of Applied Physiology*. Rockville, v. 133, n.2, p. 323-34, 2022. Disponível em: doi:10.1152/jappphysiol.00764.2021. Acesso em: 19 abr. 2026

JAMNICK, N.A.; PETTITT, R.W.; GRANATA, C.; PYNE, D.B.; BISHOP, D.J. An Examination and Critique of Current Methods to Determine Exercise Intensity. *Sports Med*; vol.50, n.10; p.1729-56; 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01322-8>. Acesso em: 19 abr. 2026

JONES A.M., POOLE D.C. Oxygen uptake dynamics: from muscle to mouth--an introduction to the symposium. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. Indianapolis, v. 37, n. 9, p. 1542-50, 2005. Disponível em: doi:10.1249/01.mss.0000177466.01232.7e. Acesso em: 19 abr. 2026.

JONES A.M., WILKERSON D.P., DIMENNA F., FULFORD J., POOLE D.C. Muscle metabolic responses to exercise above and below the "critical power" assessed using ³¹P-MRS. *American Journal of Physiology - Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. Rockville, v. 294, n.2, p. 585-93, 2008. Disponível em: doi:10.1152/ajpregu.00731.2007. Acesso em: 19 abr. 2026

JONES, A.M.; VANHATALO, A.; BURNLEY, M.; MORTON, R.H.; POOLE, D.C. Critical power: implications for determination of VO₂max and exercise tolerance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. Indianapolis, v.42, n. 10; p. 1876-90; 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181d9cf7f>. Acesso em: 19 abr. 2026

KOGA S., SHIOJIRI T., KONDO N., BARSTOW T.J. Effect of increased muscle temperature on oxygen uptake kinetics during exercise. *The Journal of Physiology*. Londres, v. 83, n. 4, p. 1333-38, 1997. Disponível em: doi:10.1152/jappl.1997.83.4.1333. Acesso em: 19 abr. 2026

LAUGHLIN M.H., DAVIS M.J., SECHER N.H., et al. Peripheral circulation. *Comprehensive Physiology*, Rockville, v. 2, n.1, p. 321-447, 2012. Disponível em: doi:10.1002/cphy.c100048. Acesso em: 19 abr. 2026.

MITCHELL E.A., MARTIN N.R.W., BAILEY S.J., Ferguson R.A. Critical power is positively related to skeletal muscle capillarity and type I muscle fibers in endurance-

trained individuals. *Journal of Applied Physiology*. Rockville, v. 125, n. 3, p. 737-45, 2018. Disponível em: doi:10.1152/jappphysiol.01126.2017. Acesso em: 19 abr. 2026

MONOD, H., & SCHERRER, J. the work capacity of a synergic muscular group. *Ergonomics*. Londres, v. 8, p. 329-38, 1965. Disponível em: doi:10.1080/00140136508930810. Acesso em: 19 abr. 2026

MORITANI T., NAGATA A., DEVRIES H.A., MURO M. Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics*. Londres, v. 24, n. 5, p. 339-50, 1981. Disponível em: doi:10.1080/00140138108924856. Acesso em: 19 abr. 2026.

MURGATROYD S.R., FERGUSON C., WARD S.A., WHIPP B.J., ROSSITER H.B. Pulmonary O₂ uptake kinetics as a determinant of high-intensity exercise tolerance in humans. *Journal of Applied Physiology*. Rockville, v. 110, n.6, p. 1598-1606, 2011. Disponível em: doi:10.1152/jappphysiol.01092.2010. Acesso em: 19 abr. 2026

OZYENER, F.; ROSSITER, H.B.; WARD, S.A.; WHIPP, B.J. Influence of exercise intensity on the on- and off-transient kinetics of pulmonary oxygen uptake in humans. *The Journal of Physiology*. Londres, v. 533, p. 891-902; 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2001.t01-1-00891.x>. Acesso em: 19 abr. 2026

POOLE D.C., SCHAFFARTZIK W., KNIGHT D.R., et al. Contribution of exercising legs to the slow component of oxygen uptake kinetics in humans. *The Journal of Physiology*. Londres, v. 71, n. 4, p. 1245-60, 1991. Disponível em: doi:10.1152/jappl.1991.71.4.1245. Acesso em: 19 abr. 2026

POOLE D.C., WARD S.A., GARDNER G.W., WHIPP B.J. Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics*. Londres, v.31, n.9, p. 1265-79, 1988. Disponível em: doi:10.1080/00140138808966766. Acesso em: 19 abr. 2026

POOLE DC, JONES AM. Measurement of the maximum oxygen uptake $\dot{V}O_{2max}$: $\dot{V}O_{2peak}$ is no longer acceptable. *Journal of Applied Physiology*. Rockville, v. 122, n. 4, p. 997-1002, 2017. Disponível em: doi:10.1152/jappphysiol.01063.2016. Acesso em: 19 abr. 2026.

POOLE, D.C., JONES, A.M. Oxygen uptake kinetics. *Comprehensive Physiology*, Rockville, v. 2, p. 933-996, 2012. Disponível em: doi:10.1002/j.20404603.2012.tb00419.x. Acesso em: 19 abr. 2026

POOLE, D.C.; BURNLEY, M.; VANHATALO, A.; ROSSITER, H.B.; JONES, A.M. Critical Power: An important fatigue threshold in exercise physiology. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. Indianapolis, v. 48, n.11; p. 2320-34; 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000939>. Acesso em: 19 abr. 2026

ROSSITER H.B. Exercise: Kinetic considerations for gas exchange. *Comprehensive Physiology*, Rockville, v. 1, n.1, p. 203-44. Disponível em: doi:10.1002/cphy.c090010. Acesso em: 19 abr. 2026

ROSSITER H.B., WARD S.A., KOWALCHUK J.M., HOWE F.A., GRIFFITHS J.R., WHIPP B.J. Dynamic asymmetry of phosphocreatine concentration and O₂ uptake between the on- and off-transients of moderate- and high-intensity exercise in humans. *The Journal of Physiology*. Londres, v. 541, n. 3, p. 991-1002, 2002. Disponível em: doi:10.1113/jphysiol.2001.012910. Acesso em: 19 abr. 2026.

SCHÖBER P, BOER C, SCHWARTZ LA. Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia and analgesia*. v. 126, n. 5, p. 1763-68, 2018. Disponível em: doi:10.1213/ANE.0000000000002864. Acesso em: 19 abr. 2026.

SIETSEMA K.E., ROSSITER H.B. Exercise physiology and cardiopulmonary exercise testing. *Seminars in Respiratory and Critical Care Medicine*. v. 44, n. 5, p. 661-80. Disponível em: doi:10.1055/s-0043-1770362. Acesso em: 19 abr. 2026.

TURNES T., DE AGUIAR R.A., CRUZ R.S., CAPUTO F. Interval training in the boundaries of severe domain: effects on aerobic parameters. *European Journal of Applied Physiology*. Berlin, v. 116, n. 1, p. 161-69, 2016. Disponível em: doi:10.1007/s00421-015-3263-0. Acesso em: 19 abr. 2026.

VANHATALO A., BLACK M.I., DIMENNA F.J., et al. The mechanistic bases of the power-time relationship: muscle metabolic responses and relationships to muscle fibre type. *Journal of Physiology*. Londres, v. 594, n. 15, p. 4407-23, 2016. Disponível em: doi:10.1113/JP271879. Acesso em: 19 abr. 2026

VANHATALO A., POOLE D.C., DIMENNA F.J., BAILEY S.J., JONES A.M. Muscle fiber recruitment and the slow component of O₂ uptake: constant work rate vs. all-out sprint exercise. *American Journal of Physiology - Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. Rockville, v. 300, n. 3, p. 700-7, 2011. Disponível em: doi:10.1152/ajpregu.00761.2010. Acesso em: 19 abr. 2026

VENTURA T.P., BORSZCZ F.K., ANTUNES D., CAPUTO F., TURNES T. Prediction of exercise tolerance in the severe and extreme intensity domains by a critical power model. *Journal of Human Kinetics*. Katowice, v. 89, p. 113-22, 2023. Disponível em: doi:10.5114/jhk/170101. Acesso em: 19 abr. 2026

VOLIANITIS S., SECHER N.H. Cardiovascular control during whole body exercise. *Journal of Applied Physiology*. Rockville, v. 121, n. 2, p. 376-90, 2016. Disponível em: doi:10.1152/japplphysiol.00674.2015. Acesso em: 19 abr. 2026

WEYAND P.G., LIN J.E., BUNDLE M.W. Sprint performance-duration relationships are set by the fractional duration of external force application. *American Journal of Physiology - Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. Rockville, v. 290,

n. 3, p. 758-65, 2006. Disponível em: doi:10.1152/ajpregu.00562.2005. Acesso em: 19 abr. 2026.

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (TCLE)
(Conselho Nacional de Saúde, Resolução 466/2012 e 510/16)

Eu, Rubens Correa Junior, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Humano e Tecnologias do Instituto de Biociências, UNESP, Campus Rio Claro - SP, sob a orientação da Prof. Dra. Camila Coelho Greco, venho por meio deste convidá-lo(a) a participar como voluntário(a) do projeto de pesquisa a nível de mestrado acadêmico abaixo:

Nome do Projeto de Pesquisa:

A Influência dos Mecanismos de Permuta Gasosa na Tolerância ao exercício nos domínios de intensidade severo e extremo

Objetivos e Justificativa:

À medida que a intensidade e a duração do exercício aumentam, os fatores limitantes a capacidade de tolerância também varia. Nos domínios de intensidade severo e extremo, os exercícios são caracterizados por demanda energética, cardiorrespiratória e metabólica elevada. Por conseguinte, essas características influenciam significativamente no tempo em que o indivíduo será capaz de manter tais intensidades. Embora seja de amplo conhecimento a relevância do metabolismo anaeróbico no fornecimento rápido de energia, especialmente nestas intensidades, evidências indicam que fatores associados com o metabolismo aeróbico são capazes de modular a amplitude dos domínios de intensidade e influenciar na capacidade de tolerar estes exercícios. Por outro lado, uma evidência recente indica que os mecanismos de fadiga neuromuscular por si só não explicam a redução da tolerância com o incremento da intensidade entre os domínios severo e extremo. Nesse sentido, pouco se sabe sobre como os mecanismos de permuta gasosa influenciam na diminuição da eficiência dos múltiplos mecanismos fisiológicos que determinam a tolerância ao exercício entre estes domínios. Portanto, o presente projeto de pesquisa tem como objetivo: Investigar a relação entre o incremento da intensidade e a

eficiência dos mecanismos de permuta gasosa durante o exercício, assim como a recuperação após esforços realizados nos domínios severo e extremo até a exaustão.

Caso o(a) Sr (a) aceite participar desta pesquisa deverá realizar as sessões e protocolos descritos abaixo:

1ª visita ao laboratório

Primeiramente você irá responder o Questionário Internacional de Atividade Física (IPAQ), para obter informações sobre a quantidade de horas que você realiza de atividade física, por semana. Em seguida, será realizada uma avaliação antropométrica, com a obtenção de medidas da massa corporal (kg) e estatura (cm). Posteriormente será explicado todos os procedimentos que serão executados ao longo da pesquisa. Por fim, será realizado um teste incremental em ciclo ergômetro até a exaustão voluntária.

2ª a 4ª visita ao laboratório

Durante essas visitas você realizará a determinação dos parâmetros do modelo de Potência Crítica e tolerância ao exercício severo ao realizar testes de carga constante até a exaustão voluntária em ordem randomizada nas intensidades de: 95%, 100% e 110% da Intensidade associada ao $\dot{V}O_{2max}$

5ª a 7ª visita ao laboratório

Durante essas visitas você realizará a determinação do I_{HIGH} , T_{LOW} e tolerância ao exercício severo com os participantes realizando os testes de carga constante até a exaustão nas intensidades de: 125 a 140% da Intensidade associada ao $\dot{V}O_{2max}$

8ª a 10ª visita ao laboratório

Durante essas visitas você realizará a determinação da tolerância ao exercício extremo com os participantes realizando os testes de carga constante até a exaustão

em ordem randomizada nas intensidades de: IHIGH + 5%, IHIGH + 10% e IHIGH + 15%

Observação

As visitas serão realizadas separadamente com um intervalo mínimo ≥ 24 h entre elas, sendo completas dentro de um período entre 3 e 4 semanas aproximadamente. Esse período é estabelecido para que não ocorrerá interferências de treinamento nos dados obtidos durante o estudo, assim evitando a formação de dados inconsistentes.

Benefícios da Pesquisa

A participação neste protocolo de pesquisa relacionado a fisiologia do exercício contribui para o avanço da ciência nesta área, uma vez que estes dados que serão coletados permitirão aos pesquisadores terem uma compreensão mais abrangente sobre os mecanismos fisiológicos que limitam a capacidade do corpo humano em resistir a exercícios realizados nos domínios severo e extremo, gerando informações que podem ser aplicados tanto na prática clínica quanto esportiva.

Desconforto e riscos dos testes:

Os desconfortos e riscos pertinentes deste protocolo são aqueles inerentes a qualquer prática de exercícios, como por exemplo: lesões musculoesqueléticas, inflamação e respostas atípicas respiratórias e da pressão arterial. Porém, além da baixa frequência com que estes eventos ocorrem nas condições laboratoriais, os riscos tendem a ser minimizados pela aplicação de um questionário (PAR-Q) e pelas condições de pronto-atendimento em caso de acidente. É possível a ocorrência de dores musculares 24 horas após o final dos exercícios. Este sintoma tende a diminuir espontaneamente. Durante toda a avaliação os participantes terão acompanhamento e assistência do profissional de Educação Física habilitado a prestar primeiros socorros (no caso de haver essa necessidade). Para as medidas de proteção ou para minimização de qualquer risco eventual, está previsto o apoio da equipe de resgate ou serviço móvel de emergência SAMU.

Direitos do participante:

A qualquer momento, antes, durante ou após sua participação coloco-me à disposição para esclarecimentos sobre eventuais dúvidas que possam surgir com a pesquisa, assim como a disponibilização dos seus resultados finais. Nenhum resultado será divulgado ou levado ao conhecimento de pessoas estranhas ao Laboratório de Avaliação da Performance Humana, sem a autorização expressa do participante submetido aos testes. Você poderá recusar a participação neste estudo ou poderá abandonar os testes a qualquer momento, sem prestar qualquer tipo de esclarecimento, mas devendo comunicar sua decisão ao responsável dos testes o quanto antes. Os resultados dos testes poderão ser utilizados para pesquisa, sendo assegurado o anonimato do participante, desde que autorizado expressamente neste termo de consentimento. Além disso, você não terá nenhum gasto ou será ressarcido financeiramente pela participação no estudo.

Se o Sr. se sentir suficientemente esclarecido sobre essa pesquisa, seus objetivos, eventuais riscos e benefícios, convido-o a assinar este Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, elaborado em duas vias, sendo que uma ficará com o Sr. e a outra com o pesquisador responsável.

Eu, _____,
portador do RG nº _____ e CPF nº: _____
concordo em participar neste projeto de pesquisa. Desta forma, autorizo a utilização dos dados destes testes para fins de pesquisa do Laboratório de Avaliação da Performance Humana, UNESP, Rio Claro, SP, bem como a divulgação dos resultados por meio de qualquer meio de divulgação, desde que seja assegurado o anonimato.

Rio Claro, ____/____/____

(Assinatura do pesquisador responsável)

(Assinatura do voluntário)

Dados sobre a Pesquisa:

Título do Projeto de Pesquisa:

A Influência dos Mecanismos de Permuta Gasosa na Tolerância ao exercício nos domínios de intensidade severo e extremo

Pesquisador Responsável: Rubens Correa Junior

Cargo/função: Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Humano e Tecnologias

Instituição: Universidade Estadual Paulista, UNESP, Instituto de Biociências, Campus Rio Claro – SP, Brasil.

Laboratório de Avaliação da Performance Humana.

Endereço:

Dados para Contato:

Orientadora: Camila Coelho Greco

Cargo/função: Professor Adjunto do Departamento de Educação Física

Instituição: Universidade Estadual Paulista, UNESP, Instituto de Biociências, Campus Rio Claro – SP, Brasil.

Laboratório de Avaliação da Performance Humana.

Endereço:

Dados para Contato:

CEP-IB/UNESP-CRC

Telefone:

Dados sobre o participante da Pesquisa:

Nome: _____

Documento de Identidade: _____

Sexo: _____ Data de Nascimento: ____/____/____

Endereço: _____

Telefone para contato: _____

Questionário PAR-Q

Este questionário tem como objetivo de identificar a necessidade de avaliação clínica antes do início da atividade física. Caso você marque mais de um sim, é aconselhável a realização da avaliação clínica. Contudo, qualquer pessoa pode participar de uma atividade física de esforço moderado, respeitando as restrições médicas.

Por favor, assinale “sim” ou “não” as seguintes perguntas:

- 1) Alguma vez seu médico disse que você possui algum problema de coração e recomendou que você só praticasse atividade física sob prescrição médica?
☐ sim ☐ não
 - 2) Você sente dor no peito causada pela prática de atividade física?
☐ sim ☐ não
 - 3) Você sentiu dor no peito no último mês?
☐ sim ☐ não
 - 4) Você tende a perder a consciência ou cair como resultado do treinamento?
☐ sim ☐ não
 - 5) Você tem algum problema ósseo ou muscular que poderia ser agravado com a prática de atividades físicas?
☐ sim ☐ não
 - 6) Seu médico já recomendou o uso de medicamentos para controle de sua pressão arterial ou condição cardiovascular?
☐ sim ☐ não
 - 7) Você tem consciência, através de sua própria experiência e/ou de aconselhamento médico, de alguma outra razão física que impeça a realização de atividades físicas?
☐ sim ☐ não
-

Gostaria de comentar algum outro problema de saúde seja de ordem física ou psicológica que impeça a sua participação na atividade proposta?

Assumo a veracidade das informações prestadas no questionário “PAR Q” e afirmo estar liberado pelo meu médico para participação na atividade citada acima.

Nome do participante:

Data

Assinatura