



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE DESPORTOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO FÍSICA

Thiago Pereira Ventura

**Comparação entre os índices fisiológicos aeróbios obtidos em testes incrementais na  
corrida com e sem inclinação**

Florianópolis  
2023

Thiago Pereira Ventura

**Comparação entre os índices fisiológicos aeróbios obtidos em testes incrementais na  
corrida com e sem inclinação**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Educação Física da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Educação Física.

Orientador: Prof. Tiago Turnes, Dr.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra

Ventura, Thiago Pereira

Comparação entre os índices fisiológicos aeróbios obtidos em testes incrementais na corrida com e sem inclinação / Thiago Pereira Ventura ; orientador, Tiago Turnes, 2023.

72 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Desportos, Programa de Pós-Graduação em Educação Física, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Educação Física. 2. Corrida em montanha. 3. Índices fisiológicos. 4. Consumo máximo de oxigênio. 5. Oxigenação muscular. I. Turnes, Tiago. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Educação Física. III. Título.

Thiago Pereira Ventura

**Comparação entre os índices fisiológicos aeróbios obtidos em testes incrementais na corrida com e sem inclinação**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 14 de setembro de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Tiago Turnes, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Ricardo Dantas de Lucas, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fabrizio Caputo, Dr.  
Universidade do Estado de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Educação Física.

Insira neste espaço a  
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a  
assinatura digital

Prof. Tiago Turnes, Dr.  
Orientador

Florianópolis, 2023.

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer primeiramente a minha família. Claudia, Marcelo, Arthur, vocês são os pilares da minha vida, estiveram sempre ao meu lado e nunca me deixaram faltar nada. Se hoje estou concluindo mais uma importante etapa na minha vida, isso é graças às vocês.

Outro agradecimento muito especial para a minha namorada Maria Luiza, que nunca deixou de me incentivar, principalmente nos momentos mais difíceis. Obrigado por sempre me apoiar e ficar ao meu lado durante tantos anos.

Também agradeço imensamente ao meu orientador, professor Tiago Turnes, por todo o suporte desde a graduação. Professor, você é uma inspiração para mim! Se um dia eu for ao menos 1% do que você é, tenho certeza que serei um excelente profissional.

Gostaria de agradecer aos amigos do LAEF pela convivência ao longo desses quase três anos, foram muitos momentos de trocas de experiência e descontrações que facilitaram o caminho até chegar aqui. Um agradecimento especial ao meu amigo e colega de laboratório Fernando que, mesmo que informalmente, foi meu coorientador durante toda essa jornada. Essa pesquisa certamente não aconteceria sem a sua ajuda!

Um agradecimento a todos os voluntários que participaram da pesquisa, em especial a acessória WR Trail, que compôs a maioria dos participantes nas coletas de dados.

Por fim, gostaria de agradecer ao PPGEF-UFSC, a FAPESC e ao CNPq por todo o amparo, financeiro e institucional, que possibilitaram a conclusão de um importante ciclo acadêmico e profissional na minha vida. Espero retornar em breve.

## RESUMO

A corrida em subida altera parâmetros biomecânicos que implicam em alterações fisiológicas comparadas à corrida no plano. Tem-se observado aumento no consumo de oxigênio pico ( $\dot{V}O_{2PICO}$ ) e reduções na frequência cardíaca pico ( $FC_{PICO}$ ) em teste incremental inclinado comparado ao plano. Essas alterações parecem estar relacionadas ao maior trabalho concêntrico dos membros inferiores e maior eficiência cardíaca com o aumento do volume sistólico. Desta forma, o objetivo desta dissertação foi comparar os índices fisiológicos máximos e submáximos em dois testes incrementais de corrida, sendo um com aumento de velocidade e outro com aumento de inclinação. Para isso, quinze corredores (idade:  $37,5 \pm 9,0$  anos;  $\dot{V}O_{2max}$ :  $57,3 \pm 6,5$  ml/kg/min; homens = 11) realizaram em duas visitas: I) teste incremental em esteira com aumento progressivo de velocidade (TI-V) e inclinação fixa (1%) para determinar a velocidade pico ( $V_{pico}$ ); II) teste incremental em esteira com aumento progressivo de inclinação (TI-I) e velocidade fixa (50% da  $V_{pico}$ ) para determinar a inclinação pico ( $I_{pico}$ ). O protocolo incremental consistiu em estágios de 3 min e intervalo de 30 seg. Para determinação da capacidade oxidativa muscular ( $CO_{Xm}$ ) foi realizado um protocolo de oclusões arteriais repetidas. Foi determinado o ponto de deflexão da FC (PDFC) através do método DMAX. O primeiro ( $LL_1$ ) e segundo limiar ( $LL_2$ ) de lactato e a amplitude dos domínios de intensidade foram determinados a partir das concentrações de lactato sanguíneo. O ponto de quebra da deoxihemoglobina ( $deoxy[Hb + Mb]BP$ ) foi determinado por meio da espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS). A diferença do valor final para o pré-teste ( $\Delta deoxy[Hb + Mb]$ ) e o valor final dos testes relativo a amplitude fisiológica ( $deoxy[Hb + Mb]\%CF$ ) realizada em repouso antes dos testes incrementais foram determinados para estimar a extração máxima de oxigênio. O teste t de *Student* para dados pareados foi realizado para comparar as variáveis entre os testes. A ANOVA *one-way* foi utilizada para comparar os índices submáximos dentro de cada teste. O nível de significância estatística para todas as análises foi de  $p < 0,05$ . Na comparação dos índices máximos, a  $FC_{PICO}$  foi menor no TI-I ( $180 \pm 10$  bpm) comparado ao TI-V ( $184 \pm 13$  bpm;  $p = 0,03$ ). Não houve diferença significativa para o  $\dot{V}O_{2PICO}$  entre os testes (TI-V:  $3,9 \pm 0,8$  L/min. vs TI-I:  $3,9 \pm 0,7$  L/min.;  $p > 0,05$ ). Para os índices submáximos, o  $LL_1$  e o  $LL_2$  ocorreram em percentual do  $\dot{V}O_{2PICO}$  maior no TI-I ( $LL_1$ :  $75,1\% \pm 3,5\%$ ;  $LL_2$ :  $89,6\% \pm 3,9\%$ ) comparado ao TI-V ( $LL_1$ :  $68,9\% \pm 5,9\%$ ;  $LL_2$ :  $85,8\% \pm 4,3\%$ ;  $p < 0,05$ ), sem diferença para os outros índices. A amplitude do domínio moderado foi maior e do domínio severo foi menor no TI-I comparado ao TI-V. Entre os índices submáximos do TI-I, o  $LL_2$  ocorreu num percentual do  $\dot{V}O_{2PICO}$  maior ( $89,9\% \pm 4,2\%$ ) do que o PDFC ( $82,5\% \pm 5,6\%$ ;  $p = 0,04$ ). A  $CO_{Xm}$  apresentou correlações significativas com a  $V_{pico}$  ( $r = 0,70$ ),  $\dot{V}O_{2PICO}$  no TI-I ( $r = 0,62$ ) e  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$  no TI-V ( $r = 0,62$ ), porém, não foram diferentes das correlações com  $I_{pico}$ ,  $\dot{V}O_{2PICO}$  no TI-V e  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$  no TI-I, respectivamente. Em conclusão, apesar do  $\dot{V}O_{2PICO}$  similar e  $FC_{PICO}$  menor no TI-I comparado ao TI-V, essa diferença não pode ser explicada por alterações em  $deoxy[Hb + Mb]\%CF$  e  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$ , indicando uma extração microvascular de oxigênio similar entre as condições. Além disso, o maior  $\dot{V}O_2$  observado no  $LL_1$  e  $LL_2$  no TI-I indica que os domínios de intensidade do exercício podem ser alterados nesta condição, devendo ser considerado na prescrição do treinamento em terrenos com inclinação positiva. Por fim, deve-se ter cautela na interpretação desses resultados, uma vez a confiabilidade do  $deoxy[Hb + Mb]\%CF$  e  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$  para estimar a extração microvascular de oxigênio precisa ser melhor investigada.

**Palavras-chave:** corrida em montanhas; consumo máximo de oxigênio; limiares fisiológicos; oxigenação muscular.

## ABSTRACT

The uphill running alters biomechanical parameters that imply physiological changes compared to flat running. An increase in peak oxygen uptake ( $\dot{V}O_{2PEAK}$ ) and reductions in peak heart rate ( $HR_{PEAK}$ ) has been observed in inclined compared to flat incremental test. These changes seem to be linked to the greater concentric work of the lower limbs and greater cardiac efficiency by increase in stroke volume. Thus, the aim of this master thesis was to compare the maximum and submaximal physiological index in two incremental running tests, one based in speed increase and the other based in slope increase. For this, fifteen runners (age:  $37.5 \pm 9.0$ ;  $\dot{V}O_{2max}$ :  $57.3 \pm 6.5$  ml/kg/min; men = 11) performed in two visits: I) treadmill incremental test based in speed increase ( $IT_{speed}$ ) and fixed slope (1%) to determine the peak speed ( $Speak$ ); II) treadmill incremental test based in slope increase ( $IT_{slope}$ ) and fixed speed (50% of the  $Speak$ ) to determine the peak slope. The incremental protocol consisted of 3-min stages and a 30-sec interval. To determine the muscular oxidative capacity (MOC) a protocol of repeated arterial occlusions was performed. The HR deflection point (HRDP) was determined using the DMAX method. The first ( $LT_1$ ) and second ( $LT_2$ ) lactate thresholds and the amplitude of the intensity domains were determined by the blood lactate concentration. The deoxyhemoglobin breakpoint (deoxy[Hb + Mb]BP) was determined by the near-infrared spectroscopy (NIRS). The difference between the peak and baseline deoxy [Hb + Mb] values ( $\Delta deoxy[Hb + Mb]$ ) and the peak value relative to the physiological range (deoxy[Hb + Mb]%PR) performed at rest before the incremental tests were determined to predict maximal oxygen extraction. Paired Student t test was performed to compare variables between tests. The ANOVA one-way was used to compare submaximal index within each test. The statistical significance level for all analyzes was  $p < 0.05$ . When comparing the maximum index, the  $HR_{PEAK}$  was lower in  $IT_{slope}$  ( $180 \pm 10$  bpm) compared to  $IT_{speed}$  ( $184 \pm 13$  bpm;  $p = 0.03$ ). There was no significant difference in  $\dot{V}O_{2PEAK}$  between tests ( $IT_{speed}$ :  $3.9 \pm 0.8$  L/min. vs  $IT_{slope}$ :  $3.9 \pm 0.7$  L/min.;  $p > 0.05$ ). For the submaximal index,  $LT_1$  and  $LT_2$  occurred in a higher percentage of  $\dot{V}O_{2PEAK}$  in  $IT_{slope}$  ( $LT_1$ :  $75.1\% \pm 3.5\%$ ;  $LT_2$ :  $89.6\% \pm 3.9\%$ ) compared to  $IT_{speed}$  ( $LT_1$ :  $68.9\% \pm 5.9\%$ ;  $LT_2$ :  $85.8\% \pm 4.3\%$ ;  $p < 0.05$ ), with no difference for the other index. The amplitude of the moderate domain was greater and the severe domain was smaller in  $IT_{slope}$  compared to  $IT_{speed}$ . Among the  $IT_{slope}$  submaximal index,  $LT_2$  occurred at a higher % $\dot{V}O_{2PEAK}$  ( $89.9\% \pm 4.2\%$ ) than HRDP ( $82.5\% \pm 5.6\%$ ;  $p = 0.04$ ). The MOC showed significant correlations with  $Speak$  ( $r = 0.70$ ),  $\dot{V}O_{2PEAK}$  in  $IT_{slope}$  ( $r = 0.62$ ) and  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$  in  $IT_{speed}$  ( $r = 0.62$ ), however, no were different from the correlations with peak slope,  $\dot{V}O_{2PEAK}$  in  $IT_{speed}$  and  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$  in  $IT_{slope}$ , respectively. In conclusion, despite the similar  $\dot{V}O_{2PEAK}$  and lower  $HR_{PEAK}$  in  $IT_{slope}$  compared to  $IT_{speed}$ , this difference cannot be explained by changes in deoxy[Hb + Mb]%PR and  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$ , indicating a similar microvascular oxygen extraction between conditions. In addition, the higher  $\dot{V}O_2$  observed in  $LT_1$  and  $LT_2$  in  $IT_{slope}$  indicates that the exercise intensity domains can be altered in this condition, and should be considered when prescribing training in terrain with positive slope. Finally, caution should be taken when interpreting these results, since the reliability of deoxy[Hb + Mb]%PR and  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$  to estimate microvascular oxygen extraction needs to be further investigated.

**Keywords:** trail running; maximal oxygen uptake; physiological threshold; muscle oxygenation.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Representação esquemática dos limiares fisiológicos aeróbio e anaeróbio em diferentes variáveis fisiológicas durante teste incremental. ....  | 26 |
| Figura 2 – Ilustração da resposta dos sinais derivados de NIRS para hemoglobina e mioglobina oxigenada (a) e desoxigenada (b), em unidades arbitraria, durante um teste incremental e associação dos pontos de quebra com outros índices fisiológicos..... | 27 |
| Figura 3 – Ilustração esquemática do delineamento experimental da pesquisa. ....   | 33 |
| Figura 4 – Resposta do lactato sanguíneo durante o teste incremental horizontal em um participante representativo.....   | 35 |
| Figura 5 – Determinação do ponto de quebra da hemoglobina e mioglobina desoxigenada. ..  | 36 |
| Figura 6 – Ilustração dos protocolos de calibração fisiológica e oclusões arteriais repetidas de um participante representativo.....   | 38 |
| Figura 7 – Análise de concordância entre os índices submáximos no teste incremental com aumento de velocidade. ....  | 46 |
| Figura 8 – Análise de concordância entre os índices submáximos no teste incremental com aumento de inclinação. ....  | 47 |
| Figura 9 – Amplitude dos domínios de intensidade do exercício obtidos nos testes incrementais.....   | 48 |
| Figura 10 – Resposta da medida de consumo de oxigênio muscular ( $\dot{V}O_{2m}$ ) de repouso de dois participantes representativos.....   | 50 |
| Figura 11 – Relação da capacidade oxidativa muscular com índices fisiológicos no teste incremental com aumento de velocidade. ....   | 52 |
| Figura 12 – Relação da capacidade oxidativa muscular com índices fisiológicos no teste incremental com aumento de inclinação. ....   | 53 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Comparações individuais e média dos índices fisiológicos máximos entre os testes incrementais (n = 15).....                   | 43 |
| Tabela 2 – Comparação dos índices fisiológicos submáximos entre os testes incrementais. ..   | 44 |
| Tabela 3 – Correlação entre medidas de pico de extração de oxigênio muscular com os índices máximos obtidos nos testes incrementais..... | 44 |
| Tabela 4 – Comparação entre os índices submáximos em cada teste incremental (n = 10).....  | 45 |
| Tabela 5 – Correlação da capacidade oxidativa muscular com os índices máximos e submáximos obtidos nos testes incrementais. ....         | 51 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| [La]                             | Concentrações de lactato sanguíneo  |
| A-VO <sub>2</sub> dif            | Diferença arteriovenosa de oxigênio   |
| CO <sub>2</sub>                  | Gás carbônico   |
| CV                               | Coefficiente de variação  |
| CO <sub>xm</sub>                 | Capacidade oxidativa muscular   |
| $\Delta$ deoxy[Hb + Mb]          | Diferença entre o valor máximo de hemoglobina desoxigenada para o pré teste incremental |
| deoxy[Hb + Mb]                   | Hemoglobina e mioglobina desoxigenada   |
| deoxy[Hb + Mb]BP                 | Ponto de quebra da hemoglobina e mioglobina desoxigenada                                |
| deoxy[Hb + Mb]%CF                | Valor máximo de hemoglobina desoxigenada relativo a calibração fisiológica              |
| EMG                              | Eletromiografia   |
| FC                               | Frequência cardíaca   |
| FCmax                            | Frequência cardíaca máxima  |
| FC <sub>PICO</sub>               | Maior valor de frequência cardíaca no teste incremental                                 |
| GCmed                            | Gastrocnêmio medial   |
| H <sup>+</sup>                   | Íon de hidrogênio   |
| IC                               | Intervalo de confiança  |
| Ipico                            | Inclinação pico atingida no teste incremental   |
| IST                              | Índice de saturação tecidual  |
| k-min                            | Constante de recuperação do consumo de oxigênio muscular                                |
| LdC                              | Limite de concordância  |
| LL                               | Limiar de lactato   |
| LAn                              | Limiar anaeróbio  |
| LL <sub>1</sub>                  | Primeiro limiar de lactato  |
| LL <sub>2</sub>                  | Segundo limiar de lactato   |
| LME                              | Lactato mínimo equivalente  |
| LV <sub>1</sub>                  | Primeiro limiar ventilatório  |
| LV <sub>2</sub>                  | Segundo limiar ventilatório   |
| MFEL                             | Máxima fase estável de lactato sanguíneo  |
| NIRS                             | Espectroscopia por infravermelho próximo  |
| O <sub>2</sub>                   | Oxigênio  |
| O <sub>2</sub> P <sub>PICO</sub> | Maior valor de pulso de oxigênio no teste incremental                                   |
| oxy[Hb + Mb]                     | Hemoglobina e mioglobina oxigenada  |
| PC                               | Potência crítica  |
| PCR                              | Ponto de compensação respiratório   |
| PDFC                             | Ponto de deflexão da frequência cardíaca  |
| Pmax                             | Potência máxima atingida no teste incremental   |
| P <sub>i</sub>                   | Fosfato inorgânico  |
| tHb                              | Total de hemoglobina  |
| TI-V                             | Teste incremental com aumento de velocidade inclinação fixa                             |
| TI-I                             | Teste incremental com aumento de inclinação e velocidade fixa                           |
| V̇CO <sub>2</sub>                | Produção de gás carbônico   |

|                     |  |
|---------------------|--|
| VC                  | Volume corrente  |
| VE                  | Ventilação pulmonar  |
| V <sub>pico</sub>   | Velocidade pico atingida no teste incremental                  |
| $\dot{V}O_2$        | Consumo de oxigênio  |
| $\dot{V}O_{2m}$     | Consumo de oxigênio muscular                                   |
| $\dot{V}O_{2max}$   | Consumo máximo de oxigênio                                     |
| v $\dot{V}O_{2max}$ | Velocidade do em que foi atingido o consumo máximo de oxigênio |
| $\dot{V}O_{2PICO}$  | Maior valor de consumo de oxigênio no teste incremental        |
| VS                  | Volume sistólico   |

## SUMÁRIO

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>14</b> |
| 1.1          | O PROBLEMA E JUSTIFICATIVA .....   | 14        |
| 1.2          | OBJETIVOS .....  | 18        |
| <b>1.2.1</b> | <b>Objetivo geral.....</b>   | <b>18</b> |
| <b>1.2.2</b> | <b>Objetivos específicos.....</b>  | <b>18</b> |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>  | <b>19</b> |
| 2.1          | RESPOSTAS FISIOLÓGICAS NA CORRIDA COM DIFERENTES INCLINAÇÕES.....        | 19        |
| 2.2          | LIMIARES FISIOLÓGICOS .....  | 23        |
| <b>2.2.1</b> | <b>Índices de oxigenação muscular .....</b>                              | <b>27</b> |
| <b>3</b>     | <b>FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA .....</b>                                  | <b>30</b> |
| 3.1          | CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA .....   | 30        |
| 3.2          | PARTICIPANTES.....   | 30        |
| 3.3          | ASPECTOS ÉTICOS .....  | 31        |
| 3.4          | MATERIAIS.....   | 31        |
| 3.5          | PROCEDIMENTOS.....   | 32        |
| <b>3.5.1</b> | <b>Delineamento experimental .....</b>                                   | <b>32</b> |
| <b>3.5.2</b> | <b>Testes Incrementais .....</b>   | <b>33</b> |
| <b>3.5.3</b> | <b>Capacidade oxidativa muscular .....</b>                               | <b>36</b> |
| 3.6          | ANÁLISE ESTATÍSTICA.....   | 39        |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS .....</b>  | <b>41</b> |
| 4.1          | COMPARAÇÃO DOS INDICES FISIOLÓGICOS ENTRE OS TESTES INCREMENTAIS.....    | 41        |
| 4.2          | COMPARAÇÃO ENTRE OS LIMIARES FISIOLÓGICOS EM CADA TESTE INCREMENTAL..... | 45        |
| 4.3          | DOMÍNIOS DE INTENSIDADE DO EXERCÍCIO .....                               | 48        |

|     |                                    |           |
|-----|------------------------------------|-----------|
| 4.4 | CAPACIDADE OXIDATIVA MUSCULAR..... | 48        |
| 5   | <b>DISCUSSÃO .....</b>             | <b>54</b> |
| 6   | <b>CONCLUSÃO.....</b>              | <b>64</b> |
|     | <b>REFERÊNCIAS.....</b>            | <b>65</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 O PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

Nas últimas décadas, os esportes cíclicos como atletismo, ciclismo, natação e remo receberam grande atenção no campo científico. Dada tal relevância, a avaliação de diferentes respostas fisiológicas durante o exercício tem sido objeto de estudo frequente de médicos e fisiologistas do esporte, uma vez que cada esporte possui características físicas particulares. Como exemplo, a predominância do regime de contração muscular difere entre alguns esportes, em que no ciclismo e no remo, por exemplo, observa-se grande predominância do regime concêntrico de contração muscular, enquanto durante a corrida em terreno plano há grande equilíbrio dos regimes concêntrico e excêntrico de contração muscular (VERNILLO et al., 2017). Portanto, em modalidades cujo êxito é determinado pelo desempenho em situações que contemplam essas características, torna-se importante a avaliação das respostas fisiológicas induzidas nessas demandas físicas específicas.

Uma modalidade esportiva que tem ganhado grande visibilidade ao longo dos anos é a corrida em montanhas, caracterizada por provas com grande variação de percursos em aclive e declive (EASTHOPE et al., 2014). Essas variações de terreno durante as provas impõem diferentes demandas fisiológicas aos corredores, influenciadas principalmente por características biomecânicas (VERNILLO et al., 2017). Particularmente na corrida em aclive há grande predominância do regime concêntrico de contração muscular, maior frequência e menor comprimento de passadas, assim como maior tempo em contato com o solo quando comparado a corrida em terreno plano (PADULO et al., 2012; VERNILLO et al., 2017). Devido a esses aspectos, há um aumento no custo energético na corrida com inclinação quando comparada a corrida no plano (LEMIRE et al., 2021), como também um aumento na demanda metabólica para uma mesma velocidade (MINETTI et al., 2002; VERNILLO et al., 2017). Essa maior demanda metabólica na corrida em subida pode ser explicada por um comprometimento do uso de energia elástica durante a tarefa, de modo que uma maior energia mecânica (ações musculares concêntricas) precisa ser gerada para vencer a inclinação (SNYDER; FARLEY, 2011).

Com base nessas descobertas, protocolos de avaliação física com manipulação de inclinação foram criados a fim de avaliar os parâmetros fisiológicos em corredores durante a corrida com subida e compara-los àqueles observados em testes incrementais horizontais

(PAAVOLAINEN et al., 2000; SCHEER et al., 2018; DE LUCAS et al., 2021). Estudos têm observado valores de consumo de oxigênio pico ( $\dot{V}O_{2PICO}$ ) maiores nos testes com inclinação comparado a testes horizontais (PAAVOLAINEN et al., 2000; PRINGLE et al., 2002; SCHEER et al., 2018; CASSIRAME et al., 2022), enquanto outros não observaram diferença (BALDUCCI et al., 2016; LEMIRE et al., 2020; DE LUCAS et al., 2021; HELD et al., 2023). Alguns desses achados na literatura reportam resultados intrigantes. Por exemplo, Cassirame et al. (2022) reportaram valores de  $\dot{V}O_{2PICO}$  maior em testes com 15%, 25% e 40% de inclinação comparado a condição de 0%. Scheer et al. (2018) também reportaram valores de  $\dot{V}O_{2PICO}$  maior em um teste com aumento simultâneo de velocidade e inclinação comparado a testes sem aumento de inclinação. No entanto, a frequência cardíaca pico ( $FC_{PICO}$ ) não foi diferente entre as condições em ambos os estudos (SCHEER et al., 2018; CASSIRAME et al., 2022). Por outro lado, de Lucas et al. (2021) reportaram valores de  $\dot{V}O_{2PICO}$  similares entre um teste com aumento gradual de inclinação e velocidade fixa *versus* aumento gradual de velocidade e inclinação de 1%, mas com valores de  $FC_{PICO}$  menores no teste com aumento de inclinação comparado ao teste com aumento de velocidade. Outros estudos reportaram maiores valores de  $\dot{V}O_{2PICO}$  para o teste com inclinação, mas não reportaram valores de  $FC_{PICO}$  (PAAVOLAINEN et al., 2000; PRINGLE et al., 2002).

Apesar das diferenças metodológicas na determinação do  $\dot{V}O_{2PICO}$  nos estudos mencionados anteriormente, baseado na equação de Fick, é possível que esses resultados sejam mediados por alterações no volume sistólico máximo e/ou na extração microvascular de  $O_2$  máxima, o que explicaria em partes um maior  $\dot{V}O_{2PICO}$  com uma  $FC_{PICO}$  similar (SCHEER et al., 2018; CASSIRAME et al., 2022) ou  $\dot{V}O_{2PICO}$  similar e  $FC_{PICO}$  menor (DE LUCAS et al., 2021) em testes com manipulação de inclinação comparado a testes em condição plana. Interessantemente, de Lucas et al. (2021) reportaram valores de  $O_2$  de pulso pico ( $O_{2PICO}$ ) (medida utilizada como estimativa do volume sistólico) maiores no teste com aumento de inclinação comparado ao teste horizontal, que foi atribuído a um maior retorno venoso oriundo do maior regime concêntrico de contração em corridas com subida dos músculos do tríceps sural, resultando em um maior enchimento ventricular e, conseqüentemente, maior força de contração miocárdica. No entanto, até a idealização do presente estudo, não foram encontrados estudos que tenham investigado parâmetros fisiológicos que pudessem explicar a dinâmica microvascular de extração de  $O_2$  pelos tecidos durante testes com aumento de inclinação e compara-los com protocolos convencionais de corrida no plano.

A espectroscopia por infravermelho próximo (NIRS) é uma técnica não invasiva que permite avaliar as respostas de hemoglobina e mioglobina oxigenada ( $oxy[Hb + Mb]$ ) e desoxigenada ( $deoxy[Hb + Mb]$ ), inferir o fluxo sanguíneo local ( $tHb = oxy[Hb + Mb] + deoxy[Hb + Mb]$ ) e calcular o índice de saturação tecidual ( $IST = oxy[Hb + Mb] / tHb$ ) de diferentes tecidos, e tem sido utilizada como ferramenta para avaliar o padrão de oxigenação muscular durante o exercício (SNYDER, PARMENTER, 2009; BOONE et al., 2016a; BOONE et al., 2016b; IANNETA et al., 2017; BONILLA et al., 2023). Mais especificamente, a resposta da  $deoxy[Hb + Mb]$  tem sido considerada um reflexo da diferença arteriovenosa de  $O_2$  ( $A-VO_{2dif}$ ) e, portanto, da extração microvascular de  $O_2$  (DELOREY et al. 2003; GRASSI et al. 2003). Foi sugerido que  $deoxy[Hb + Mb]$  pode fornecer informações sobre o equilíbrio dinâmico entre a entrega e a utilização de  $O_2$  nos tecidos (BOONE et al., 2016b). Além disso, a resposta da  $deoxy[Hb + Mb]$  parece apresentar um ponto de quebra ( $deoxy[Hb + Mb]BP$ ) durante testes com aumento de carga progressiva, que refletiria um platô de extração de  $O_2$  mesmo com o aumento da intensidade do exercício (BOONE et al., 2016b; IANNETA et al., 2017; CAEN et al., 2018). Esse comportamento tem sido associado a alguns índices fisiológicos de corpo inteiro, em especial aqueles que são considerados indicadores do máximo estado estável metabólico e que delimitam os domínios pesado e severo do exercício (BELLOTI et al., 2013; KEIR et al., 2015). Dessa forma, foi sugerido que o  $deoxy[Hb + Mb]BP$  representasse um limiar fisiológico local que refletisse alterações a nível sistêmico (BOONE et al., 2016).

A relação entre  $deoxy[Hb + Mb]BP$  e os limiares fisiológicos de corpo inteiro foi investigada em estudos anteriores (BOONE et al., 2016). Comparado pelo percentual do  $\dot{V}O_{2max}$  ( $\% \dot{V}O_{2max}$ ), o  $deoxy[Hb + Mb]BP$  não apresentou diferença média frente ao ponto de compensação respiratório (PCR) (OSAWA et al., 2011; MURIAS et al., 2013; FONTANA et al., 2015; KEIR et al., 2015; BOONE et al., 2015, BOONE et al., 2016), a máxima fase estável de lactato sanguíneo (MFEL) (BELLOTI et al., 2013; KEIR et al., 2015), a potência crítica (PC) (KEIR et al., 2015) e ao limiar anaeróbio determinado pela concentração de lactato sanguíneo ( $[La]$ ) (TURNES et al., 2019), situados em uma faixa de 75% a 90% do  $\dot{V}O_{2max}$  e uma amplitude de correlação ( $r$ ) de 0,80 a 0,98. No entanto, carece na literatura estudos que tenham observado o comportamento da  $deoxy[Hb + Mb]$  durante a corrida com o objetivo de identificar o  $deoxy[Hb + Mb]BP$  e compara-lo com outros índices fisiológicos de corpo inteiro, uma vez que os estudos mencionados anteriormente foram conduzidos em sua maioria no ciclismo (OSAWA et al., 2011; BELLOTI et al., 2013; MURIAS et al., 2013;

FONTANA et al., 2015; KEIR et al., 2015; BOONE et al., 2015, BOONE et al., 2016) e no remo (TURNES et al., 2019; POSSAMAI et al., 2023).

Avaliar e comparar as respostas da oxigenação muscular durante um protocolo incremental com aumento de velocidade *versus* aumento de inclinação pode fornecer informações interessantes. Sugere-se que há um padrão de ativação da musculatura mais alto dos membros inferiores durante a corrida com inclinação comparada a corrida no plano, indicando um maior recrutamento de unidades motoras (SLONIGER et al., 1997; CAI et al., 2010; VERNILLO et al., 2020). No entanto, não foram encontrados estudos que tenham comparado as respostas de oxigenação muscular entre a corrida com subida e a corrida no plano. Born et al. (2016) reportaram maiores valores de consumo de oxigênio ( $\dot{V}O_2$ ) e  $O_2P$  com menor IST nos percursos de subida comparado aos percursos de descida em corredores durante uma corrida de trilha, sem diferença estatística na frequência cardíaca (FC). Ainda, as mudanças no  $\dot{V}O_2$  nos trechos de subida e descida foram fortemente correlacionadas com as mudanças em IST (média de  $r = -0,66$  entre as voltas). Uma vez que IST representa um equilíbrio entre a oferta e a extração de  $O_2$  na musculatura (BOONE et al., 2016), esses resultados indicam que o exercício realizado com maior demanda energética, proveniente de um maior tempo sob contrações concêntricas durante a corrida com subida pode refletir uma extração de  $O_2$  aumentada quando comparado ao exercício realizado em terreno plano.

Dessa forma, avaliar e comparar as repostas fisiológicas sistêmicas ( $\dot{V}O_2$ , FC,  $O_2P$  e [La]) e locais (*deoxy*[Hb + Mb]) máximas e submáximas poderia fornecer informações importantes para auxiliar na compreensão de quais mecanismos fisiológicos estariam influenciando nas diferentes respostas encontradas na corrida com subida comparado a corrida no plano. Portanto, a presente dissertação teve como principal objetivo determinar e comparar os índices fisiológicos máximos ( $\dot{V}O_{2PICO}$ ,  $FC_{PICO}$ ,  $O_{2PICO}$  e *deoxy*[Hb + Mb]) e submáximos (*deoxy*[Hb + Mb]BP, ponto de deflexão da FC [PDFC] e segundo limiar de lactato [LL<sub>2</sub>]) em dois testes incrementais de corrida, sendo um com aumento de velocidade e outro com aumento de inclinação. Nesse sentido, a principal hipótese do estudo é de que os valores de  $\dot{V}O_{2PICO}$  serão similares entre os testes, mas a  $FC_{PICO}$  será menor no TI-I comparado ao TI-V. Ainda, essas respostas serão acompanhadas por maiores valores de  $O_{2PICO}$  e *deoxy*[Hb + Mb] no TI-I comparado ao TI-V, refletindo uma maior eficiência cardíaca e maior extração de  $O_2$  pela musculatura avaliada.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Comparar os índices fisiológicos máximos ( $\dot{V}O_{2PICO}$ ,  $FC_{PICO}$ ,  $O_{2PICO}$  e *deoxy*[Hb + Mb]) e submáximos (*deoxy*[Hb + Mb]BP, PDFC e  $LL_2$ ) em dois testes incrementais de corrida, um com aumento de velocidade e outro com aumento de inclinação.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- I) Verificar a concordância entre os índices aeróbios submáximos (*deoxy*[Hb + Mb]BP, PDFC e  $LL_2$ ) dentro de cada teste incremental;
- II) Correlacionar o pico de *deoxy*[Hb + Mb] com os índices aeróbios máximos obtidos nos dois testes incrementais;
- III) Comparar a amplitude dos domínios da intensidade do exercício baseado nos limiares de [La] entre o teste incremental no plano e inclinado;
- IV) Associar a capacidade oxidativa muscular com índices aeróbios máximos e submáximos obtidos nos dois testes incrementais.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 RESPOSTAS FISIOLÓGICAS NA CORRIDA COM DIFERENTES INCLINAÇÕES

A corrida em montanhas é uma modalidade que tem se popularizado nos últimos anos e aderido diversos praticantes ao redor do mundo (HOFFMAN, ONG, WANG, 2010; VERNILLO et al., 2017). Essa modalidade é caracterizada por provas com longos percursos e variações do terreno com trechos em aclave (subida) e declive (descida). Essas variações impõem aos corredores diferentes demandas físicas, resultando em alterações biomecânicas e fisiológicas (CAI et al., 2010; MACIEJCZYK et al., 2013; VERNILLO et al., 2017; LEMIRE et al., 2021).

De modo geral, durante a corrida em aclave, a cada 1% de aumento da inclinação do terreno há uma redução de 0,1 a 0,3 km/h na velocidade e está associada a um aumento da frequência de passada, menor duração da fase de balanço e maior proporção do ciclo de passada gasto em apoio ao solo. Por outro lado, um maior grau de inclinação negativa (declive) está associado a um maior tempo de voo, menor frequência de passadas e maior comprimento de passada comparado a corrida em subida (SWANSON, CALDWELL, 2000; DEVITA et al., 2008; PADULO et al., 2012<sup>a,b</sup>; PADULO et al., 2013; LUSSIANA et al., 2013; VERNILLO et al., 2017). Especialmente para a corrida em aclave, as alterações biomecânicas resultam em um aumento da atividade eletromiográficas (EMG) nos músculos dos membros inferiores para uma mesma velocidade, principalmente nos músculos iliopsoas, glúteo máximo, adutores, isquiotibiais, quadríceps, tibial anterior e gastrocnêmio (VERNILLO et al., 2017). Esta maior atividade muscular está provavelmente associada a uma maior produção de força (MERO, KOMI, 1986), principalmente para contrações musculares concêntricas durante a fase de propulsão (MINETTI, ARDIGO, SAIBENE, 1994).

A predominância do regime concêntrico de contração muscular durante a corrida em aclave é um dos principais fatores responsáveis pelo aumento do custo energético comparado a corrida no plano, quando considerada uma mesma velocidade. Isso porque a energia potencial elástica, que é um dos principais determinantes do custo energético (CAVAGNA, 1977), parece ser comprometida durante a corrida em subida, o que demanda um maior trabalho mecânico líquido da musculatura durante a fase de propulsão para compensar um maior deslocamento vertical imposto pela inclinação do terreno (MINETTI, ARDIGO, SAIBENE, 1994; ROBERTS, BELLIVEAU, 2005; SNYDER, KRAM, GOTTSCHALL,

2012). Nesse sentido, Maciejczyk et al (2013) conduziram um estudo com homens ativos onde foram submetidos a 2 testes de 45 minutos. Em ambos os testes, os participantes realizaram 30 minutos de exercício em uma intensidade de 50% do  $\dot{V}O_{2max}$  ( $6,92 \pm 0,7$  km/h) em esteira com 0% de inclinação e, em seguida, 15 minutos na mesma velocidade, mas com inclinação de +7% (+4,5°; protocolo concêntrico) e -7% (-4,5°; protocolo excêntrico) em dias separados. Os autores observaram que o protocolo concêntrico resultou em valores significativamente maiores de  $\dot{V}O_2$ , % $\dot{V}O_{2max}$ , FC, %FCmax, ventilação (VE) e volume corrente (VC) comparado aos protocolos sem inclinação e com inclinação negativa. Em outro estudo, Cai et al. (2010) observaram que, além de valores maiores de %FCmax e percepção subjetiva de esforço, o exercício em uma velocidade a 55% da velocidade do  $\dot{V}O_{2max}$  ( $v\dot{V}O_{2max}$ ) com 9,5% de inclinação positiva resultou em uma maior ativação dos músculos reto femoral e gastrocnêmio quando comparado ao mesmo protocolo sem inclinação (0°) e com inclinação negativa de 9,5%.

Corroborando com essa maior ativação muscular de membros inferiores durante a corrida com inclinação comparada a corrida no plano, Gostill et al. (1974) avaliaram, através de biópsia muscular, a depleção de glicogênio nos músculos vasto lateral, gastrocnêmio e sóleo após 2h de corrida com inclinação (+9,5%) comparado a corrida no plano em uma intensidade de  $\sim 75\% \dot{V}O_{2max}$ . Os autores observaram uma depleção de  $\sim 30\%$  maior nos músculos gastrocnêmio e sóleo e três vezes maior no músculo vasto lateral na corrida com inclinação comparado a corrida no plano. Dado o mesmo tempo de trabalho, esses dados sugerem um maior recrutamento de fibras musculares e maior demanda anaeróbia de fornecimento de energia em corrida com inclinação comparada à corrida em nível plano. Em outro estudo, Staab et al. (1991) observaram que, mesmo diminuindo o ritmo (*pace*) abaixo daquele realizado sem variação de inclinação, o exercício em nível plano após um trecho com +5% de inclinação realizado por 6 min manteve a [La] sustentadamente maior comparada a [La] da condição onde não houve variação de inclinação. Ainda, mesmo com a diminuição do *pace*, o  $\dot{V}O_2$  não permaneceu estável com a mudança de inclinação do percurso, aumentando cerca de 40% na subida e diminuindo cerca de 25% na descida. Ou seja, a maior demanda metabólica induzida durante a corrida em aclive não pode ser compensada pela menor demanda metabólica inerente à corrida em declive.

No âmbito das pesquisas em ciências do esporte e fisiologia do exercício, sabe-se que a intensidade em que o exercício é realizado é determinante no tempo de duração do mesmo (BURNLEY, JONES, 2007). Particularmente, o exercício realizado no domínio de

intensidade severo leva a alterações fisiológicas agudas responsáveis pela interrupção precoce do exercício por exaustão, dentre elas o atingimento do  $\dot{V}O_{2max}$ , acúmulo de metabólitos (íon de hidrogênio, adenosina difosfato, fosfato inorgânico, lactato), degradação de substratos energéticos (fosfocreatina, glicogênio muscular), entre outros (BURNLEY, JONES, 2007; BLACK et al., 2017). Portanto, dada a influência da inclinação do terreno no aumento da demanda energética e suas implicações em variáveis fisiológicas determinantes para o desempenho na corrida, é digno de nota a importância de uma avaliação física mais específica que leve em consideração essas características da corrida em montanha.

Desta forma, muitos pesquisadores se interessaram em avaliar e comparar as respostas fisiológicas em testes incrementais com diferentes protocolos de manipulação de velocidade e/ou inclinação da esteira. Quando comparado as variáveis fisiológicas nos testes em condição horizontal, os protocolos com manipulação da inclinação divergem entre alguns estudos. Enquanto alguns estudos não observaram diferença do  $\dot{V}O_{2PICO}$  entre os testes (KASCH et al., 1976; BALDUCCI et al., 2016; LEMIRE et al., 2019; DE LUCAS et al., 2021; HELD et al., 2023) outros relataram um  $\dot{V}O_{2PICO}$  maior no teste com inclinação comparado ao teste no plano (PAAVOLAINEN et al., 2000; PRINGLE et al., 2002; SCHEER et al., 2018; CASSIRAME et al., 2022). Essas discordâncias nos valores de  $\dot{V}O_{2PICO}$  entre os estudos provavelmente está relacionada aos diferentes testes incrementais, em que os protocolos realizados variam desde incrementos na velocidade e inclinação fixa (PAAVOLAINEN et al., 2000; PRINGLE et al., 2002; BALDUCCI et al., 2016; LEMIRE et al., 2019; CASSIRAME et al., 2022), incremento na inclinação e velocidade fixa (KASCH et al., 1976; DE LUCAS et al., 2021; HELD et al., 2023) e até mesmo incrementos na velocidade e na inclinação (SCHEER et al., 2018), sendo os critérios, em sua maioria, escolhidos de forma arbitrária. No entanto, aumentar a velocidade de corrida durante uma inclinação fixa, ou até mesmo aumentar a velocidade e inclinação de forma simultânea, não reflete exatamente a dinâmica da corrida em subida, onde os corredores tendem a realizar o percurso em velocidades mais baixas em inclinações mais acentuadas. Nesse sentido, de Lucas et al. (2021) propuseram um teste incremental de velocidade fixa (baixa intensidade) e aumento gradual da inclinação, permitindo assim uma maior semelhança com as condições encontradas durante a corrida em subida, o que foi chamado de IIRT (*incline incremental running test*).

Interessantemente, em alguns estudos, nota-se que quando a  $FC_{PICO}$  foi semelhante entre os testes, o  $\dot{V}O_{2PICO}$  foi maior no teste com inclinação comparado ao teste horizontal

(SCHEER et al., 2018; CASSIRAME et al., 2022), e quando o  $\dot{V}O_{2PICO}$  foi semelhante entre os testes, a  $FC_{PICO}$  foi menor no teste com inclinação comparado ao teste no plano (LEMIRE et al., 2021; DE LUCAS et al., 2021;). Por conseguinte, dados não publicados de uma meta-análise do nosso grupo de pesquisa observaram maiores valores de  $\dot{V}O_{2PICO}$  (diferença média = 2,79%) e pico de [La] (diferença média = 6,08%) e menores valores de  $FC_{PICO}$  (diferença média = -1,06%) nos protocolos com manipulação de inclinação da esteira comparado aos protocolos sem inclinação (horizontal). Dada as variáveis fisiológicas que determinam o  $\dot{V}O_{2max}$  (equação de Fick), esses resultados teriam que ser explicados por um aumento do volume sistólico (VS) e/ou uma maior diferença arterio-venosa de  $O_2$  ( $A-VO_{2dif}$ ) durante a corrida com inclinação. No estudo de De Lucas et al. (2021) foi observado que o  $O_{2PICO}$ , que representa uma medida indireta do VS, foi maior no teste com inclinação comparado ao plano. A partir disso, os autores especularam que há um maior retorno venoso devido a uma maior demanda de contração concêntrica dos músculos do tríceps sural durante a corrida com inclinação, que teria resultado em uma maior pré-carga miocárdica e, conseqüentemente, maior força de contração ventricular (i.e., maior VS). Essa hipótese auxilia em partes, a explicar essas diferenças encontradas no  $\dot{V}O_{2PICO}$  e  $FC_{PICO}$  durante a corrida com inclinação. Por outro lado, carece na literatura evidências sobre possíveis alterações relacionadas ao consumo de  $O_2$  muscular ( $\dot{V}O_{2m}$ ) durante a corrida com inclinação comparada a corrida no plano.

Nos últimos anos, os avanços tecnológicos permitiram a avaliação dos padrões de oxigenação muscular por meio de técnicas não invasivas. A espectroscopia por infravermelho próximo (*NIRS*) é uma técnica que permite avaliar de forma não invasiva a oxigenação dos tecidos e alterações do volume sanguíneo durante o exercício em diferentes locais do corpo humano. Essa técnica consiste em medir a concentração de *oxy*[Hb + Mb] e *deoxy*[Hb + Mb] no local avaliado. A partir da resposta de *oxy*[Hb + Mb] e *deoxy*[Hb + Mb], é possível estimar o fluxo sanguíneo local pelo total de hemoproteínas ( $tHb = oxy[Hb + Mb] + deoxy[Hb + Mb]$ ) e calcular o IST ( $oxy[Hb + Mb] / tHb$ ) (FERRARI, MOTTOLA, QUARESIMA, 2004). No entanto, uma maior atenção tem sido depositada na resposta da *deoxy*[Hb + Mb] durante o exercício, pois tem sido considerado um parâmetro que reflete a  $A-VO_{2dif}$  e, portanto, a extração microvascular de  $O_2$  (GRASSI et al. 2003). Neste caso, dada a maior demanda energética durante a corrida com inclinação comparado a corrida no plano, é possível que ocorra uma redistribuição do fluxo sanguíneo para a musculatura em exercício, de modo a sustentar a um maior recrutamento de unidades motoras e aumentar a extração fracionada de

O<sub>2</sub>, que pode ser refletida por um aumento dos valores de *deoxy*[Hb + Mb]. Contudo, até o presente momento, não foram encontrados estudos que tenham avaliado a resposta da *deoxy*[Hb + Mb] durante um teste incremental com aumento de inclinação, tão pouco comparando essas medidas com um teste incremental sem inclinação. Dadas as informações discutidas nessa revisão, isso seria importante para compreender o grau de relação dessa variável tanto com o protocolo incremental horizontal quanto com o protocolo com aumento de inclinação, além de auxiliar na investigação dos fatores que determinam o desempenho nessas diferentes condições.

## 2.2 LIMIARES FISIOLÓGICOS

O exercício físico realizado em diferentes intensidades provoca, de forma aguda, alterações em diversos parâmetros fisiológicos (BURNLEY, JONES, 2007; BLACK et al., 2017). Alguns desses parâmetros assumem um comportamento característico que demarcam os domínios de intensidade do exercício, e são denominados de limiares fisiológicos, os quais são comumente identificados por variáveis pulmonares ou metabólicas (BINDER et al., 2008). Geralmente esses índices são obtidos durante um teste com incremento de carga progressiva até a exaustão voluntária, em que o organismo tende a se ajustar conforme a demanda externa de esforço imposta. Desta forma, as identificações desses limiares historicamente apontam dois principais pontos de alterações na demanda energética durante o exercício, denominados de primeiro e segundo limiar, conhecidos também como limiar aeróbio e anaeróbio, respectivamente.

A identificação desses limiares pode ser feita de diferentes formas através da análise do comportamento das variáveis fisiológicas durante o teste incremental. Quando considerada a resposta da concentração de lactato sanguíneo ([La]), é possível observar um primeiro aumento abrupto acima dos níveis de repouso em uma determinada intensidade de exercício, em que normalmente se fixa uma concentração aproximada de 2 mmol/l caracterizando o primeiro limiar de lactato (LL<sub>1</sub>) ou apenas limiar de lactato (LL) (YOSHIDA et al., 1987; KINDERMANN, SIMON, KEUL, 1979). Com o contínuo aumento de carga após o LL, observa-se um segundo ponto de inflexão na curva de [La], que se aproxima dos valores de 4 mmol/l, que foi fortemente relacionado a MFEL (AUNOLA, RUSKO, 1992), a qual indicaria a maior intensidade em que há um equilíbrio entre a produção e a remoção de [La] (HECK et al., 1985). Esse ponto foi chamado de LL<sub>2</sub> ou limiar anaeróbio (LAn). No entanto, esse valor

fixo de 4 mmol/l pode não refletir esse mesmo ponto de equilíbrio para todos os indivíduos, sendo mais apropriado a identificação de um LAn individual para cada sujeito (STEGMANN, KINDERMANN, SCHNABEL, 1981). Portanto, de fato, é possível observar a existência de dois pontos transitórios na cinética do lactato sanguíneo durante um teste incremental (MORTON et al., 1994).

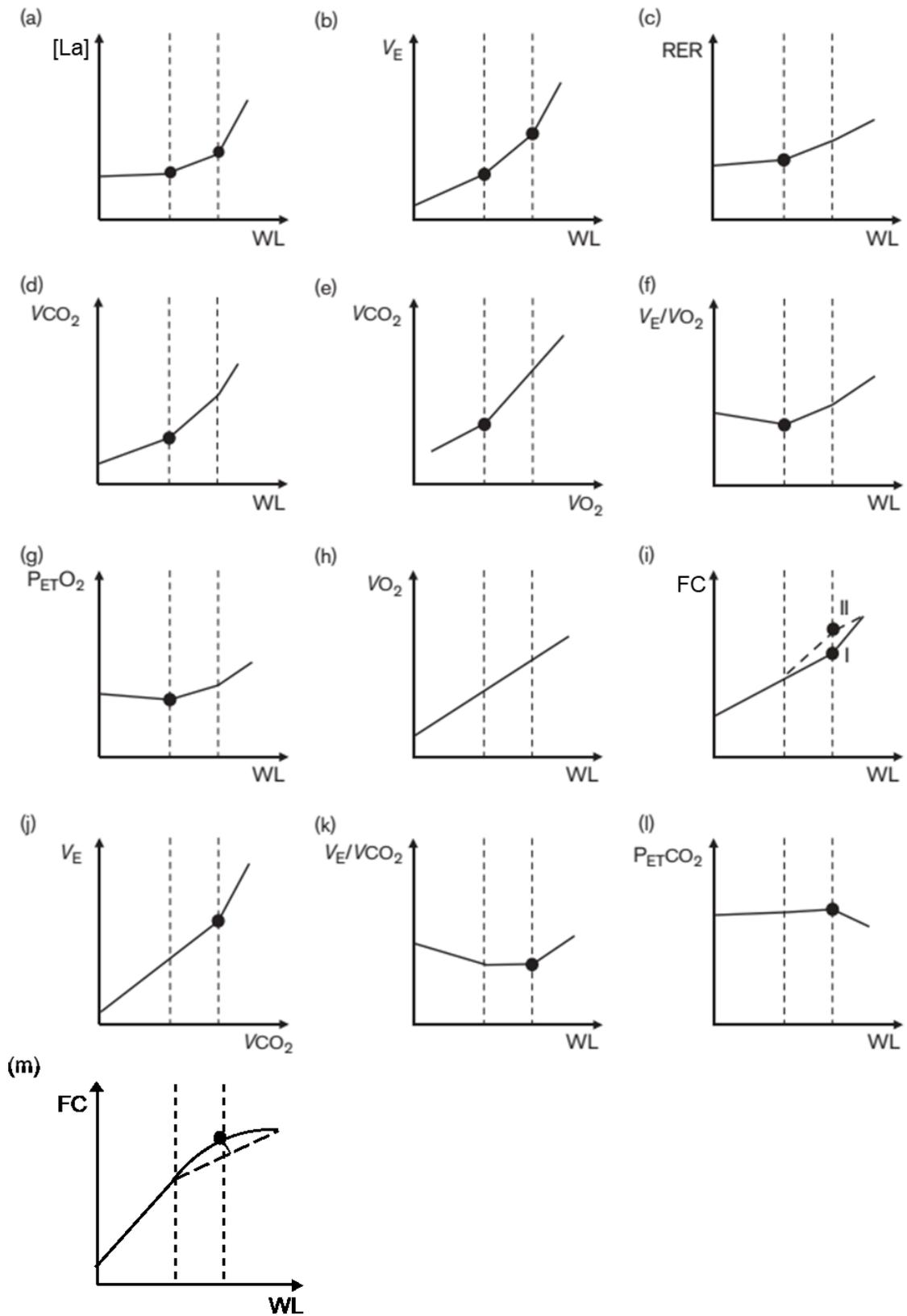
Assim como observado na cinética de resposta do lactato sanguíneo durante o teste incremental, a VE apresenta dois pontos de inflexão com o aumento da intensidade do exercício (SKINNER, MCLELLAN, 1980; SIMONTON, HIGGINBOTHAM, COBB, 1988). Esses eventos ocorrem devido ao fato de que, com o aumento da intensidade, há um impulso ventilatório crescente devido a um aumento na produção de gás carbônico ( $\dot{V}CO_2$ ) decorrente do tamponamento da acidose pelo bicarbonato de sódio (BINDER et al., 2008). Deste modo, o primeiro aumento curvilíneo da VE é chamado de primeiro limiar ventilatório ( $LV_1$ ) e o segundo aumento é chamado de segundo limiar ventilatório ( $LV_2$ ), observados pelo primeiro e segundo ponto de quebra na regressão de três linhas da relação entre VE e carga, respectivamente (ORR et al., 1982).

Além desses, outros dois métodos são muito utilizados para a identificação dos limiares fisiológicos a partir das respostas cardiorrespiratórias. Para a identificação do primeiro limiar, ou limiar aeróbio, o método “*V-slope*” tem sido amplamente utilizado (BINDER et al., 2008). Este método consiste em identificar um ponto de intersecção entre duas linhas de um gráfico plotando  $\dot{V}CO_2$  por  $\dot{V}O_2$  (BEAVER, WASSERMAN, WHIPP, 1986). Isso porque, durante o aumento de carga inicial em um teste incremental, há um aumento linear entre  $\dot{V}CO_2$  e  $\dot{V}O_2$ , até um ponto onde, com o aumento da intensidade, há um aumento da inclinação na função linear entre essas variáveis, sendo possível detectar esse ponto através da intersecção das duas retas com inclinações distintas. Por outro lado, o segundo limiar, ou limiar anaeróbio, tem sido frequentemente associado a um ponto de inflexão na relação entre VE e  $\dot{V}CO_2$ , conhecido como ponto de compensação respiratória (BEAVER, WASSERMAN, WHIPP, 1986). Esse evento leva como premissa a ocorrência de uma hiperventilação relativa devido a acidose metabólica causada com o aumento da intensidade, o que refletiria na mudança de inclinação entre a relação dessas variáveis (BINDER et al., 2008).

Além das respostas dos gases respiratórios, estudos demonstraram a possibilidade de detectar o segundo limiar a partir da análise da FC através de um ponto de deflexão no aumento linear da FC em relação a intensidade (Figura 1 – i) (CONCONI et al., 1982). No

entanto, esse ponto de deflexão da FC nem sempre é observado em todos os indivíduos (KARA et al., 1996). A partir disso, uma abordagem matemática conhecida como DMAX, tem sido utilizada na determinação dos limiares fisiológicos (CHENG et al., 1992). O método DMAX tem sido aplicado em parâmetros da resposta da FC (KARA et al., 1996; NASCIMENTO et al., 2019) e consiste em um ajuste polinomial dos sinais originais de FC durante um teste incremental (Figura 1 – m). A partir do primeiro e do último ponto analisado, é traçada uma linha formando uma espécie de arco entre com os pontos, em que o ponto de maior distância da linha traçada indica o PDFC (KARA et al., 1996). No geral, os limiares fisiológicos mencionados a partir das variáveis supracitadas (e outras) estão ilustrados na figura 1.

Figura 1 – Representação esquemática dos limiares fisiológicos aeróbio e anaeróbio em diferentes variáveis fisiológicas durante teste incremental.



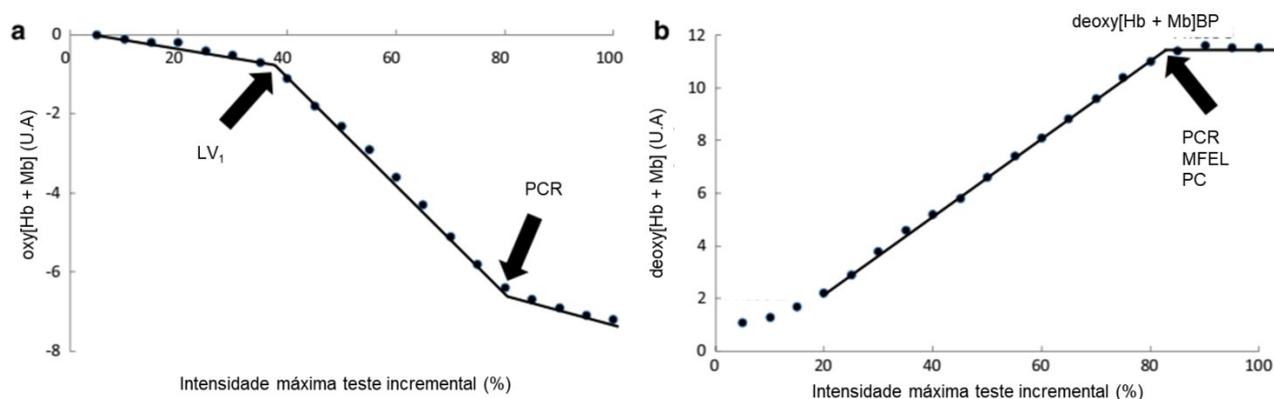
Fonte: adaptado de BINDER, R. K. et al. Methodological approach to the first and second lactate threshold in incremental cardiopulmonary exercise testing. *European Journal of Cardiovascular Prevention & Rehabilitation*, v. 15, n. 6, p. 726–734, 2008.

Legenda: [La] = concentração de lactato sanguíneo; VE = ventilação pulmonar;  $VE/\dot{V}O_2$  = equivalente respiratório de ventilação e consumo de oxigênio;  $VE/\dot{V}CO_2$  = equivalente respiratório de ventilação e produção de gás carbônico; FC = frequência cardíaca;  $\dot{V}O_2$  = consumo de oxigênio;  $\dot{V}CO_2$  = produção de gás carbônico;  $PETO_2$  = pressão parcial de oxigênio;  $PETCO_2$  = pressão parcial de gás carbônico; RER = razão de trocas gasosas respiratórias (do inglês *respiratory gas exchange ratio*); WL = carga de trabalho (do inglês *work load*)

## 2.2.1 Índices de oxigenação muscular

Uma abordagem alternativa que tem sido utilizada como método para determinar os limiares fisiológicos a partir de uma análise periférica e não invasiva é através das respostas de oxigenação muscular. Geralmente, a identificação dos limiares fisiológicos através dos sinais de NIRS são feitos pela análise da  $oxy[Hb + Mb]$  e  $deoxy[Hb + Mb]$ , que apresentam mudanças de comportamento durante um teste incremental (BOONE et al., 2016), conforme ilustrado na Figura 2. A primeira diminuição mais acentuada na  $oxy[Hb + Mb]$  estaria relacionada a dissociação de  $O_2$  das hemoproteínas devido a diminuição do pH e aumento de  $CO_2$  sanguíneo, ocorrendo próximo a 40-65% do  $\dot{V}O_{2max}$ , que foi fortemente relacionada ao  $LV_1$  ( $r > 0,86$ ) (BHAMBHANI, BUCKLEY, SUSAKI, 1997) e ao LL ( $r^2 = 0,95$ ) (GRASSI et al., 1999).

Figura 2 – Ilustração da resposta dos sinais derivados de NIRS para hemoglobina e mioglobina oxigenada (a) e desoxigenada (b), em unidades arbitraria, durante um teste incremental e associação dos pontos de quebra com outros índices fisiológicos.



Fonte: adaptado de BOONE, J. et al. An integrated view on the oxygenation responses to incremental exercise at the brain, the locomotor and respiratory muscles. *European Journal of Applied Physiology*, v. 116, n. 11, p. 2085-2102, 2016.

Legenda:  $oxy[Hb + Mb]$  = hemoglobina e mioglobina oxigenada;  $deoxy[Hb + Mb]$  = hemoglobina e mioglobina desoxigenada;  $deoxy[Hb + Mb]BP$  = ponto de quebra da hemoglobina e mioglobina desoxigenada;  $LV_1$  = primeiro limiar ventilatório; PCR = ponto de compensação respiratório; MFEL = máxima fase estável de lactato; PC = potência crítica.

Já a identificação de um segundo limiar a partir dos sinais de NIRS tem sido geralmente feita a partir da análise da *deoxy*[Hb + Mb], uma vez que um segundo ponto de quebra na *oxy*[Hb + Mb] dificilmente é observado em todos os indivíduos (MIURA et al., 1998; LEGRAND et al., 2007). A resposta da *deoxy*[Hb + Mb] apresenta uma inflexão próximo ao final do teste incremental, denominado de ponto de quebra da *deoxy*[Hb + Mb] (*deoxy*[Hb + Mb]BP). Isso porque, durante o aumento de carga em um teste incremental, a cinética da *deoxy*[Hb + Mb] reflete uma demanda progressiva de O<sub>2</sub> até atingir um “platô”, que indicaria um limite da capacidade de extração de O<sub>2</sub> pela musculatura em exercício (GRASSI, QUARESIMA, 2016). Essa ponto de inflexão na cinética de *deoxy*[Hb + Mb], ou seja, *deoxy*[Hb + Mb]BP (Figura 2 – b), tem sido comparada com outros índices fisiológicos obtidos durante teste incremental na tentativa de associar uma medida de oxigenação muscular com alterações metabólicas (BELLOTTI et al., 2013; KEIR et al., 2015), pulmonares (OSAWA et al., 2011; MURIAS et al., 2013; RACINAIS et al., 2014; FONTANA et al., 2015; BOONE et al., 2015, 2016a) e neuromusculares (OSAWA et al., 2011; RACINAIS et al., 2014; BOONE et al., 2015, 2016a). No entanto, alguns estudos apontam que esses eventos fisiológicos acontecem em forma de cascata, ou seja, um em sequência do outro, ainda que a ordem dos diferentes limiares não esteja sequencialmente estabelecida (BOONE et al., 2015; 2016a; OSAWA et al., 2011; RACINAIS et al., 2014).

A comparação do *deoxy*[Hb + Mb]BP com outros índices fisiológicos de corpo inteiro foi amplamente realizada no ciclismo (OSAWA et al., 2011; MURIAS et al., 2013; RACINAIS et al., 2014; FONTANA et al., 2015; KEIR et al., 2015; BOONE et al., 2015, 2016a) e dois estudos no remo (TURNES et al., 2019; POSSAMAI et al., 2023). Na corrida, sabe-se da existência de apenas um estudo que tenha comparado o *deoxy*[Hb + Mb]BP com algum índice fisiológico de corpo inteiro. Bellotti et al. (2013) observaram que a intensidade em que ocorreu o *deoxy*[Hb + Mb]BP não foi diferente da MFEL ( $76 \pm 9 \text{ \%}\dot{V}O_{2\text{max}}$ ). Desta forma, carece na literatura estudos que tenham avaliado o comportamento da *deoxy*[Hb + Mb] na corrida, sendo necessário estudos que verifiquem a relação desta medida com outros índices fisiológicos de corpo inteiro. Além disso, a intensidade relativa em que os limiares fisiológicos ocorrem pode ser influenciada, dentre outros fatores, pela modalidade de exercício realizada. Por exemplo, no remo, Possamai et al. (2023) observaram que o *deoxy*[Hb + Mb]BP ocorreu em uma intensidade de  $\sim 82\% \dot{V}O_{2\text{max}}$ , enquanto no estudo de Turnes et al. (2019) foi em  $87,7 \pm 6,0 \text{ \%}\dot{V}O_{2\text{max}}$ . No ciclismo, Boone et al. (2016) demonstraram que esse percentual ocorreu em  $88,2 \pm 4,7 \text{ \%}\dot{V}O_{2\text{max}}$ , enquanto no estudo de Spencer, Murias e

Paterson (2012) ocorreu em uma intensidade relativa de  $77,0 \pm 9,0 \%$   $\dot{V}O_2\text{max}$ . Já na corrida, o *deoxy*[Hb + Mb]BP ocorreu em uma intensidade relativa a  $76 \pm 6 \%$   $\dot{V}O_2\text{max}$  (BELLOTTI et al., 2013), com uma diferença  $>11\%$  comparado ao remo (TURNES et al., 2019) e ao ciclismo (BOONE et al., 2016). Portanto, é possível que a proporção do regime de contração muscular possa influenciar na intensidade em que ocorre o *deoxy*[Hb + Mb]BP, visto que no remo e no ciclismo há uma maior predominância de contrações concêntricas comparado a corrida. Sendo assim, a avaliação da oxigenação muscular durante a corrida com inclinação, que demanda um maior componente concêntrico comparado a corrida no plano, poderia ajudar a explicar se a predominância do regime concêntrico de contração muscular, de fato, alteraria o padrão da resposta da *deoxy*[Hb + Mb] e, portanto, afetaria o *deoxy*[Hb + Mb]BP.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa é caracterizada por uma abordagem quantitativa e de natureza aplicada, pois teve como objetivo analisar e comparar os valores expressos em números das variáveis obtidas e solucionar problemas a fim de gerar novos conhecimentos dentro da temática (PRODANOV; FREITAS, 2013). Quanto aos objetivos da pesquisa, de acordo com Prodanov e Freitas (2013), trata-se de um estudo explicativo, pois procurou esclarecer a influência do aumento da intensidade do exercício em um teste incremental, por meio da velocidade ou inclinação, nos índices fisiológicos obtidos por diferentes respostas fisiológicas. Quanto a seus procedimentos metodológicos, trata-se de uma pesquisa experimental, uma vez que as variáveis independentes foram manipuladas a fim de observar possíveis alterações nas variáveis dependentes, estabelecendo uma relação de causa e efeito dos fenômenos estudados (PRODANOV; FREITAS, 2013). Ainda, considera-se um estudo de corte transversal em razão de um único momento de coleta, sem acompanhamento posterior (PRODANOV; FREITAS, 2013).

#### 3.2 PARTICIPANTES

Participaram da pesquisa, por seleção de amostragem intencional não-probabilística, 19 corredores que treinavam para provas de montanha (12 homens e 7 mulheres). Os critérios de inclusão adotados foram: I) faixa etária entre 18 e 55 anos; II) mínimo de 2 anos de experiência com a modalidade; III) volume semanal mínimo de 40 km de corrida; e IV) realização de ao menos uma sessão de treinamento de corrida com inclinação por semana. Dos 19 participantes, três não retornaram após a primeira visita, e foram excluídos das análises. Ainda, outro participante foi excluído das análises devido a um erro de aquisição de dados que foi percebido após o período de coletas. Ao final, um total de 15 participantes (média  $\pm$  desvio padrão; idade:  $37,5 \pm 9,0$  anos; massa corporal:  $67,7 \pm 7,5$  kg; estatura:  $172,2 \pm 8,5$  cm) completaram todos os procedimentos da pesquisa.

### 3.3 ASPECTOS ÉTICOS

O projeto foi enviado e aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa envolvendo Seres Humanos da Universidade Federal de Santa Catarina conforme o parecer n. 5.121.903. Antes de iniciarem os procedimentos, os participantes foram esclarecidos sobre os objetivos da pesquisa e assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, devidamente aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Instituição proponente.

### 3.4 MATERIAIS

Todos os testes incrementais foram realizados em uma esteira ergométrica motorizada (Imbramed Millenium Super ATL, Imbrasport, Porto Alegre, Brasil). A frequência cardíaca foi registrada ao longo dos testes por uma fita contendo um frequencímetro acoplado (Polar, Kempele, Finlândia).

As trocas gasosas pulmonares foram medidas a cada respiração usando um sistema automatizado de análise de gases em circuito aberto (Quark CPET, COSMED, Roma, Itália). Antes de cada teste, o analisador de gases foi calibrado com o ar ambiente e gases contendo 16% de oxigênio e 5% de dióxido de carbono. O medidor de fluxo da turbina utilizado para a determinação da ventilação foi calibrado com uma seringa de 3 litros (COSMED, Roma, Itália).

Para a análise do lactato sanguíneo, foram coletadas amostras de 25 µl de sangue capilar do lóbulo da orelha utilizando um capilar heparinizado, imediatamente transferidas para microtubos de polietileno com tampa do tipo Eppendorff, contendo 50 µL de solução de fluoreto de sódio. A análise das concentrações de lactato sanguíneo foi realizada utilizando um analisador eletroquímico (YSI 2300 STAT, Yellow Spring, Ohio, EUA).

A massa corporal foi medida através de uma balança com resolução de 0,1 kg (Soehnle, Alemanha) e a estatura foi medida utilizando um estadiômetro de parede.

As respostas de oxigenação muscular durante os protocolos foram coletadas utilizando um equipamento portátil através da técnica de espectroscopia por infravermelho próximo (PortaLite, Artinis, Medical System, Zetten, Holanda). Esse equipamento permite avaliar alterações nas concentrações de *oxy*[Hb + Mb] e *deoxy*[Hb + Mb]. Os sinais são detectados por meio de uma sonda posicionada no tecido de interesse, usando as diferenças nas características de absorção de luz numa faixa de comprimento de onda de 750 e 850 nm,

adotando uma forma curva (“*banana shape*”) entre as fontes emissoras e receptoras de luz (LIMA, BAKKER, 2011). Em todos os testes, a avaliação da oxigenação muscular foi realizada no músculo gastrocnêmio medial (GCmed) da perna direita através de uma sonda posicionada no ponto de maior circunferência do tríceps sural na direção das fibras musculares. O músculo GCmed foi escolhido por ser uma das musculaturas mais ativadas durante a corrida com inclinação (CAI et al., 2010) e utilizada para avaliar a resposta da oxigenação muscular na corrida (SNYDER, PARMENTER, 2009; DE AGUIAR et al., 2022).

Anteriormente ao posicionamento da sonda na pele, foi pedido para que os participantes limpassem a pele com uma lâmina de barbear para retirar o excesso de pelos na região avaliada para reduzir a refração de luz indesejada. A sonda foi protegida com um plástico filme e coberto com uma bandagem elástica para fixação na perna, seguido de uma faixa tipo atadura para isolar qualquer incidência de luz ambiente no local avaliado. A espessura do tecido adiposo adjacente ao GCmed foi medida com um adipômetro científico (CESFORF, Porto Alegre, Brasil) e posteriormente dividido por 2 para determinar o valor de dobra cutânea (gordura subcutânea + pele). Na média, a dobra cutânea dos participantes foi menor ( $3,4 \pm 1,7$  mm, amplitude: 1,5 a 7,4 mm) do que a metade da distância entre a fonte e o detector (ou seja, distâncias entre optodos de 30 a 40 mm), o que indica um valor aceitável para a medida (BEEKVELT et al., 2001). Os sinais extraídos através da sonda são transmitidos via Bluetooth para um computador que exibe o conteúdo mensurado em tempo real. A aquisição dos sinais foi coletada em uma frequência de 5 Hz.

### 3.5 PROCEDIMENTOS

#### 3.5.1 Delineamento experimental

Cada participante realizou duas visitas ao Laboratório do Esforço Físico na Universidade Federal de Santa Catarina (LAEF-UFSC), localizado no Centro de Desportos (CDS). Na primeira visita foram realizadas as avaliações antropométricas de massa corporal e medida de dobra cutânea na região do músculo GCmed. Em seguida, foi realizado um teste incremental com inclinação fixa (1%) e incrementos de intensidade por meio do aumento da velocidade (DE LUCAS et al., 2021).

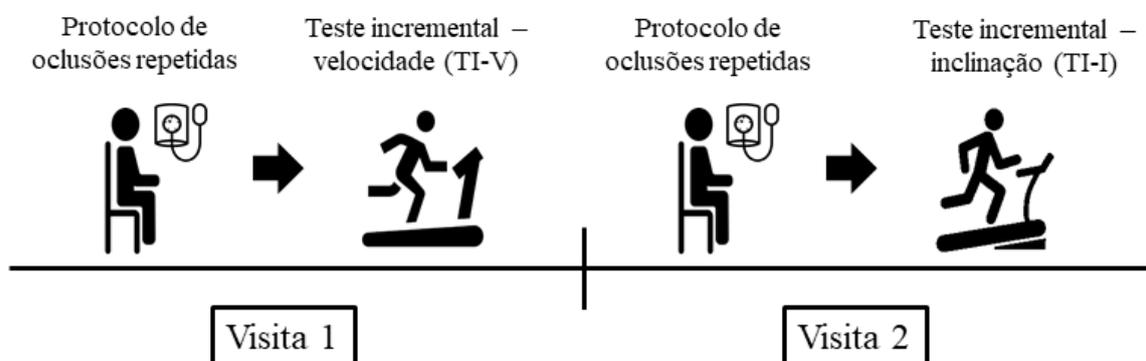
Na segunda visita foi realizado um teste incremental em que a velocidade foi fixada a 50% da velocidade pico ( $V_{pico}$ ) atingida no teste incremental da primeira visita, enquanto o

incremento de carga se deu através do aumento da inclinação da esteira em cada estágio (DE LUCAS et al., 2021). As descrições detalhadas dos testes estão inseridas na seção abaixo.

Nas duas visitas, anteriormente aos testes incrementais, foi realizado um protocolo para medir a capacidade oxidativa muscular ( $CO_{x_m}$ ) dos participantes através do consumo de oxigênio muscular ( $\dot{V}O_{2m}$ ), medido pelo NIRS. O  $\dot{V}O_{2m}$  foi estimado pela taxa de caimento do IST durante um protocolo de oclusões arteriais repetidas. Esse protocolo foi repetido duas vezes em cada visita, totalizando quatro medidas para determinar a  $CO_{x_m}$  de cada participante.

As visitas foram realizadas com intervalo superior às 48 h entre cada teste e no mesmo horário do dia ( $\pm 2$  h). Todos os participantes foram orientados a chegarem ao laboratório alimentados e hidratados. Também foi orientado aos participantes para evitarem exercício extenuante 24 h antes dos testes e o consumo de cafeína 2 h anterior aos testes. Uma ilustração do delineamento da pesquisa pode ser vista na figura 3.

Figura 3 – Ilustração esquemática do delineamento experimental da pesquisa.



Fonte: Produção do próprio autor.

### 3.5.2 Testes Incrementais

O teste incremental com aumento de velocidade (TI-V) foi realizado com uma velocidade inicial de 7 km/h para onze participantes, 10 km/h para três participantes e 9 km/h para um participante. A velocidade inicial foi selecionada baseado nos relatos dos desempenhos em provas no plano. Para os participantes que não sabiam relatar especificamente o desempenho, foi adotado como critério mais conservador e iniciado os testes a 7 km/h para garantir a identificação do  $LL_1$ . Os incrementos na velocidade da esteira foram de 1 km/h a cada estágio de 3 min, com a inclinação da esteira fixada em 1% para

simular as condições da corrida de rua (JONES, DOUST, 1996). A  $V_{pico}$  foi considerada a velocidade final atingida, se o último estágio de 3 min não fosse completado a  $V_{pico}$  foi determinada utilizando uma interpolação linear para correção da velocidade (BENTLEY; NEWELL; BISHOP, 2007).

O teste incremental de inclinação progressiva (TI-I) iniciou com uma inclinação de 1% para onze participantes e 3% para quatro participantes, também baseado nos critérios de desempenhos similar aos adotados no TI-V. Os incrementos a cada estágio de 3 min foram de 2%. Neste teste, a velocidade foi fixada em 50% da  $V_{pico}$  obtida no teste incremental com aumento de velocidade (DE LUCAS et al. 2021). Por este motivo, os testes não foram realizados em ordem aleatória. A inclinação pico ( $I_{pico}$ ) foi considerada a inclinação atingida no final do teste, se o último estágio de 3 min não fosse completado a  $I_{pico}$  foi determinada utilizando uma interpolação linear para correção da inclinação.

Ao longo dos testes, o  $\dot{V}O_2$ , oxigenação muscular e a FC foram monitorados continuamente e a  $[La]$  foi obtida ao final de cada estágio. Ao final de cada estágio para ambos os testes, um intervalo de 30 s foi realizado para coleta de sangue capilar do lóbulo da orelha com o participante parado e apoiado nas bordas da esteira fora do tapete rolante, para determinação da  $[La]$ .

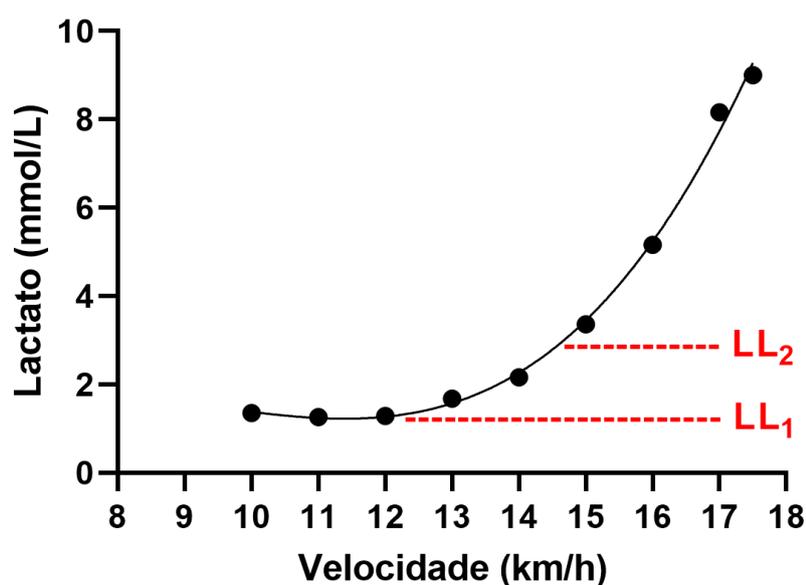
Os valores de  $\dot{V}O_2$  foram analisados respiração a respiração e posteriormente filtrados para eliminar os sinais ruidosos. Após isso, os dados foram reduzidos a uma média móvel de 3 seg e posteriormente a uma média fixa de 15 seg. O  $\dot{V}O_2$  para cada estágio foi definido pela média do minuto final de cada estágio e o  $\dot{V}O_{2PICO}$  foi definido como o maior valor entre as médias fixas de 15 seg (ROBERGS, DWYER, ASTORINO, 2010).

A FC foi registrada durante todo o teste por uma cinta cardíaca fixada no tórax dos participantes. Para a FC de cada estágio foi considerada a média dos últimos 5 batimentos. A  $FC_{PICO}$  foi determinada a partir do maior valor obtido durante o teste. Os valores de FC de cada estágio foram utilizados para identificar o PDFC, que foi determinado a partir da maior distância (DMAX) entre uma regressão linear e um ajuste polinomial de segunda ordem da FC de cada estágio (CHENG et al., 1992). Para fins de comparação, foi considerado o  $\dot{V}O_2$  da carga referente ao PDFC e calculado o percentual do  $\dot{V}O_{2PICO}$  em ambos os testes.

A partir da análise do  $[La]$  foram determinados o primeiro e o segundo limiar de lactato ( $LL_1$  e  $LL_2$ , respectivamente) (figura 4). O  $LL_1$  representa a maior intensidade em que os valores de  $[La]$  são mantidos próximos ao nível de repouso. Sendo assim, o  $LL_1$  foi considerado a intensidade do lactato mínimo equivalente (LME), que corresponde a menor

razão entre a relação  $[La]/\text{carga}$  (DICKHUTH et al., 1999). Para a determinação do  $LL_2$  foi utilizado o método “*individual anaerobic threshold*” de Dickhuth et al. (1999), sendo caracterizado pelo acréscimo de um valor arbitrário de  $[La]$  sobre o LME, com variadas concentrações já publicadas na literatura, i.e., 0,5 à 3 mmol/L (DICKHUTH et al., 1999; GARCIA-TABAR; GOROSTIAGA, 2018; PALLARÉS et al., 2016; PRETTIN et al., 2011). No presente estudo foi utilizado o valor de 1,8 mmol/L acima do valor de  $[La]$  do LME (BORSZCZ, 2023). A escolha desse método para a identificação do  $LL_2$  se deu a partir da predição via uma equação derivada de uma meta-regressão, em que dadas as características do teste incremental plano e das características dos sujeitos do presente estudo (idade e  $\dot{V}O_{2\max}$ ) apresentou uma diferença média predita de 0% para a máxima fase estável de lactato sanguíneo (teste padrão do  $LL_2$ ) (BORSZCZ, 2023). Neste caso, o  $LL_1$  foi considerado como a intensidade que divide os domínios moderado e pesado, enquanto o  $LL_2$  considerado como a intensidade que divide os domínios pesado e severo do exercício. Para fins de comparação, foi considerado o  $\dot{V}O_2$  da carga referente ao  $LL_1$  e  $LL_2$  e calculado o percentual do  $\dot{V}O_{2\text{PICO}}$  em ambos os testes. Estes índices também foram selecionados para determinação da amplitude dos domínios fisiológicos na corrida com inclinação e no plano.

Figura 4 – Resposta do lactato sanguíneo durante o teste incremental horizontal em um participante representativo.



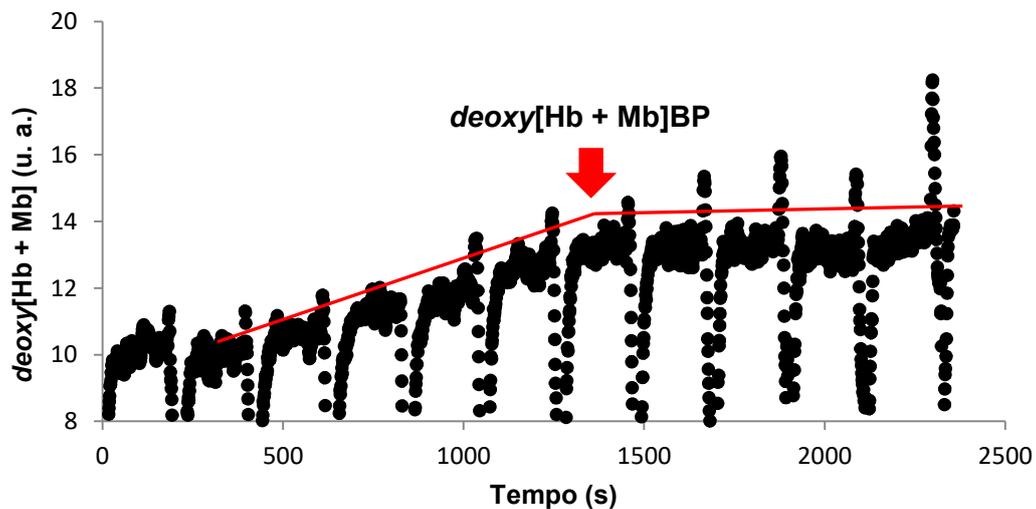
Fonte: produção do próprio autor.

Legenda:  $LL_1$ : primeiro limiar de lactato.  $LL_2$ : segundo limiar de lactato.

Durante os testes incrementais, os sinais da oxigenação muscular através do NIRS foram coletados em uma frequência de 5 Hz e posteriormente analisados em 1 Hz para determinação dos sinais referente a  $deoxy[Hb + Mb]$ . Para inferir o pico de extração de  $O_2$  durante os testes incrementais, foram realizadas duas análises: I) Maior média de 10 seg dos testes incrementais em percentual da calibração fisiológica ( $deoxy[Hb + Mb]\%CF$ ) realizada durante o protocolo de oclusão arterial em repouso, em que menor valor de  $deoxy[Hb + Mb]$  durante a oclusão foi considerado 0% e o maior valor após a liberação da oclusão foi considerado 100%; II) Diferença entre a maior média de 10 seg durante os testes incrementais e a média de 30 seg de linha de base em repouso ( $\Delta deoxy[Hb + Mb]$ ).

Para identificar o  $deoxy[Hb + Mb]BP$  foram considerados também os valores brutos de  $deoxy[Hb + Mb]$ , em que foi considerado como o ponto de deflexão na resposta ao longo dos testes e atribuído a carga relativa a esse ponto (figura 5). Para fins de comparação, foi considerado o  $\dot{V}O_2$  da carga referente ao  $deoxy[Hb + Mb]BP$  e calculado o percentual do  $\dot{V}O_{2PICO}$  em ambos os testes.

Figura 5 – Determinação do ponto de quebra da hemoglobina e mioglobina desoxigenada.



Fonte: produção do próprio autor.

### 3.5.3 Capacidade oxidativa muscular

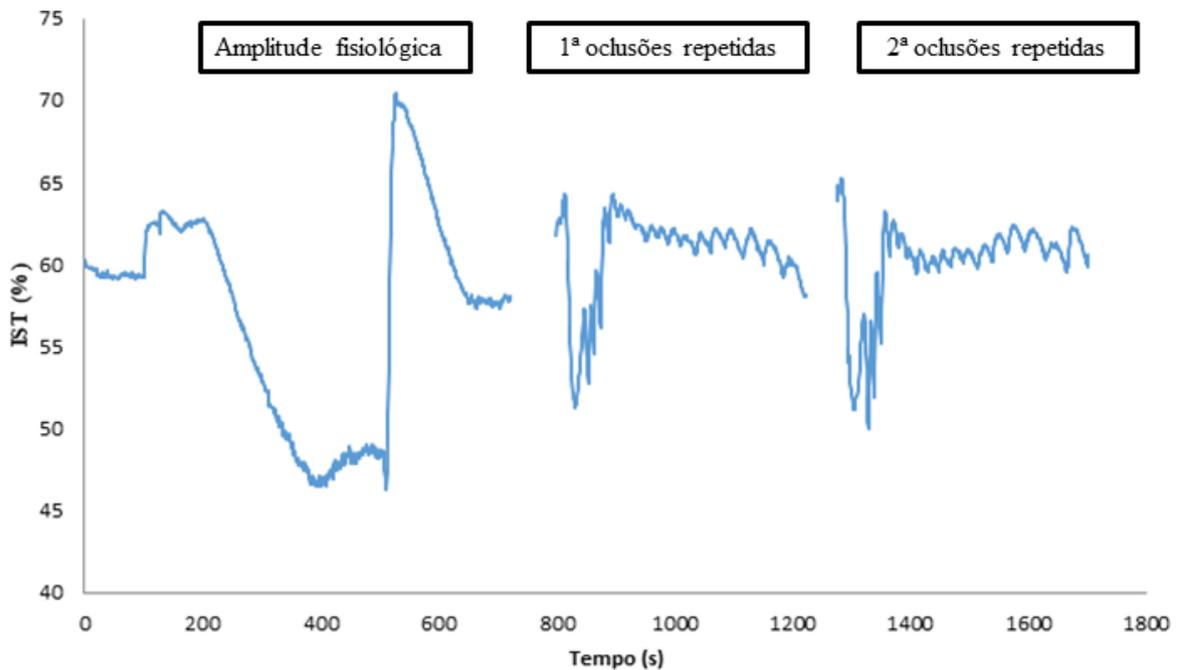
A  $CO_{x_m}$  foi determinada utilizando um protocolo de oclusões arteriais intermitentes após um breve exercício e o sinal de IST obtido por meio do NIRS. O IST foi utilizado pois permite calcular o  $\dot{V}O_{2m}$  sem a necessidade de um método de correção para mudanças no

volume de hemoglobina (ADAMI, ROSSITER, 2018). A localização da sonda e os procedimentos para aquisição dos sinais já foram descritos na sessão “3.4 MATERIAIS”.

Para a realização do protocolo, todos os participantes foram colocados sentados em uma cadeira com a perna direita apoiada em um banco na posição horizontal. Um manguito de pressão foi posicionado na parte distal do quadríceps para a realização de oclusões arteriais a uma pressão de 250 mmHg, o qual era insuflado e liberado automaticamente por um *software* pré-programado. Foi orientado aos participantes para manterem a perna totalmente relaxada durante todo o protocolo. Após 2 minutos de repouso absoluto, foi realizada uma oclusão arterial durante 5 minutos e liberado imediatamente em seguida para registrar os valores mínimo (0%) e máximo (100%), respectivamente, do IST em repouso. Esse intervalo representa uma amplitude fisiológica de saturação muscular (ADAMI et al., 2020).

Após isso, com o objetivo de acelerar a resposta do  $\dot{V}O_{2m}$ , foi realizado um exercício dinâmico de flexão plantar contra uma resistência de um elástico tipo *super band* até que os valores de IST alcançassem aproximadamente 50% da amplitude fisiológica (entre 10 a 15 repetições). Em seguida, com o participante já em repouso, foi realizado um protocolo de 18 oclusões arteriais intermitentes conforme descrito a seguir: ciclo 1-2 (3 seg ocluído, 3 seg desinflado), ciclo 3-6 (5 seg ocluído, 5 seg desinflado), ciclo 7-10 (7 seg ocluído, 7 seg desinflado), ciclo 11-14 (10 seg ocluído, 10 seg desinflado), ciclo 15-18 (15 seg ocluído, 15 seg desinflado). Esses protocolos foram realizados duas vezes em cada dia de visita, previamente aos testes incrementais, com um espaço de 2 minutos entre eles, totalizando quatro medidas. Os protocolos descritos acima estão ilustrados na Figura 6.

Figura 6 – Ilustração dos protocolos de calibração fisiológica e oclusões arteriais repetidas de um participante representativo.



Fonte: Produção do próprio autor.  
 Legenda: IST: índice de saturação tecidual.

Para cada protocolo, o  $\dot{V}O_{2m}$  foi calculado pela taxa de diminuição do IST durante cada oclusão arterial a partir de uma regressão linear simples. A taxa de diminuição do IST foi apresentada em valores positivos, uma vez que é inversamente proporcional ao  $\dot{V}O_{2m}$ . Os valores de cada regressão foram plotados em função do tempo e ajustados pela seguinte equação mono-exponencial:

$$\dot{V}O_{2m}(t) = \dot{V}O_{2m} \text{ final} - A \times e^{-kt}$$

Em que  $\dot{V}O_{2m}(t)$  representa  $\dot{V}O_{2m}$  relativo a um dado momento,  $\dot{V}O_{2m} \text{ final}$  é o  $\dot{V}O_{2m}$  imediatamente ao final do exercício de flexão plantar,  $A$  é a amplitude da resposta,  $k$  é a constante de recuperação mono-exponencial ( $k = 1/\tau$ ; expresso em min) e  $t$  é o tempo.

Ao final, a constante de recuperação exponencial ( $k$ -min) foi utilizada como medida da  $CO_{xm}$  para associação com os índices aeróbios máximos e submáximos dos testes incrementais. Foi considerada a média de  $k$  entre os ajustes que apresentaram: I) valor de  $R^2 > 0,95$ ; II) foram excluídas transições *outliers* que apresentaram valores de  $k$  maiores que  $\pm 27\%$  em relação da média de todas as 4 transições. O valor de  $\pm 27\%$  representa 95% da variação

aleatória do  $k$  e foi calculado a partir do coeficiente de variação (CV) da medida previamente reportado (SOUTHERN et al., 2014).

### 3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados descritivos estão apresentados em média  $\pm$  desvio padrão (DP) e os parâmetros estatísticos como ponto médio estimado com intervalos de confiança (IC) de 95%. A normalidade dos resíduos dos testes estatísticos foi verificada através do teste de Shapiro-Wilk.

Para responder ao objetivo central da pesquisa, foi utilizado o teste  $t$  de *Student* para dados pareados para inferir a diferença dos índices máximos ( $\dot{V}O_{2PICO}$ ,  $FC_{PICO}$ ,  $O_{2PICO}$ ,  $deoxy[Hb + Mb]\%CF$ ,  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$ ) e submáximos ( $deoxy[Hb + Mb]BP$ ,  $PDFC$ ,  $LL1$  e  $LL2$ ) entre TI-V e TI-I. Ainda, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) de uma via para medidas repetidas entre as médias dos índices submáximos ( $deoxy[Hb + Mb]BP$ ,  $PDFC$  e  $LL2$ ) dentro de cada protocolo incremental (TI-V e TI-I). Em caso de efeito principal detectado, foi realizado um teste de *post-hoc* de *Tukey* para identificar em qual comparação aconteceu a diferença entre as médias.

Para responder os objetivos específicos da pesquisa foram realizadas as seguintes análises:

I) Análise de concordância para cada teste incremental entre  $deoxy[Hb + Mb]BP$  e  $PDFC$ ,  $LL2$  e  $PDFC$  e  $deoxy[Hb + Mb]BP$  e  $LL2$  pelo gráfico de Bland e Altman (1999), em que o erro sistemático foi descrito pela média das diferenças (*bias*) e os erros aleatórios como limites de concordância (LdC) de  $\pm 95\%$ .

II) Análise de correlação entre  $deoxy[Hb + Mb]\%CF$  e  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$  com  $\dot{V}O_{2PICO}$ ,  $FC_{PICO}$  e  $O_{2PICO}$  de cada teste incremental.

III) Teste  $t$  de *Student* para comparar a amplitude dos domínios de intensidade do exercício entre os testes incrementais, expressos em percentual do  $\dot{V}O_{2PICO}$ .

IV) Análise de correlação entre  $CO_{xm}$  e  $V_{pico}$ ,  $I_{pico}$ ,  $\dot{V}O_{2PICO}$ ,  $FC_{PICO}$ ,  $O_{2PICO}$ ,  $deoxy[Hb + Mb]\%CF$ ,  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$ ,  $deoxy[Hb + Mb]BP$ ,  $PDFC$  e  $LL2$  obtidos em cada teste incremental. Foi realizada uma análise de comparação entre as correlações da  $CO_{xm}$  com os índices obtidos nos testes incrementais a fim de avaliar se as correlações foram diferentes entre os testes (EID, GOLLWITZER, SCHMITT, 2017).

As análises de correlação foram realizadas pelo coeficiente de correlação de *Pearson* ( $r$ ), e as magnitudes foram classificadas de acordo com os seguintes critérios:  $|0,00|$  a  $|0,10|$  = trivial;  $|0,10|$  a  $|0,30|$  = pequeno;  $|0,30|$  a  $|0,50|$  = médio;  $|0,50|$  a  $|0,70|$  = grande;  $|0,70|$  a  $|0,90|$  = muito grande e  $|0,90|$  a  $|0,99|$  = quase perfeito;  $|1,00|$  = perfeito (HOPKINS, 2002).

Todas as análises, bem como os gráficos gerados a partir das análises, foram realizadas no software GraphPad Prism 8.1.2 (GraphPad Software, La Jolla, CA, EUA). O nível de significância estatística para todas as análises foi de  $p < 0,05$ .

## 4 RESULTADOS

Do total de 15 participantes, não foi possível realizar a coleta de sangue para análise do [La] em um participante durante os testes incrementais. Para 2 participantes não foram consideradas as análises de oxigenação muscular derivada do NIRS devido às limitações inerentes ao NIRS, *e.g.* espessura do tecido adiposo no músculo investigado e melanina da pele (ADAMI; ROSSITER, 2018). Dos 13 participantes em que foram analisadas as respostas de *deoxy*[Hb + Mb], dois não apresentaram ponto de deflexão durante os testes incrementais, o que impossibilitou a identificação do *deoxy*[Hb + Mb]BP, e em 1 participante não foi possível extrair os valores de *deoxy*[Hb + Mb]%CF e  $\Delta$ *deoxy*[Hb + Mb] uma vez que os sinais observados entre o protocolo para determinação da amplitude fisiológica e os testes incrementais apresentaram grande discrepância.

### 4.1 COMPARAÇÃO DOS INDICES FISIOLÓGICOS ENTRE OS TESTES INCREMENTAIS

No TI-V, a  $V_{pico}$  foi de  $16,4 \pm 1,9$  km/h, enquanto a  $I_{pico}$  no TI-I foi de  $15,9 \pm 0,9\%$ . O número total de estágios completos no TI-V foi significativamente maior ( $9,5 \pm 2,3$ ) comparado ao TI-I ( $8,0 \pm 0,8$ ;  $p = 0,02$ ). No entanto, os valores de linha de base do  $\dot{V}O_2$  não foram diferentes entre as condições (TI-V:  $6,2 \pm 2,0$  mL/kg/min; TI-I:  $6,0 \pm 1,5$  mL/kg/min;  $p = 0,78$ ), assim como os valores de  $\dot{V}O_2$  no final do primeiro estágio (TI-V:  $30,8 \pm 4,4$  mL/kg/min; TI-I:  $32,5 \pm 4,6$  mL/kg/min;  $p = 0,10$ ), que resultou em uma taxa de aumento similar entre essas condições (TI-V:  $5,4 \pm 1,8$ ; TI-I:  $5,6 \pm 1,3$ ;  $p = 0,68$ ). Não houve diferença significativa nas [La] no LL<sub>1</sub> (TI-V:  $1,3 \pm 0,5$  mmol/L; TI-I:  $1,6 \pm 0,4$  mmol/L;  $p = 0,07$ ) e no valor pico ao final dos testes incrementais (TI-V:  $8,9 \pm 2,7$  mmol/L; TI-I:  $8,4 \pm 2,7$  mmol/L;  $p = 0,37$ ) entre as condições. No entanto, as [La] no LL<sub>2</sub> foram maiores no TI-I ( $3,4 \pm 0,6$  mmol/L) comparado ao TI-V ( $3,1 \pm 0,5$  mmol/L;  $p = 0,03$ ). Dentre as comparações pareadas de  $\dot{V}O_{2PICO}$ ,  $FC_{PICO}$ ,  $O_{2PICO}$ , *deoxy*[Hb + Mb]%CF e  $\Delta$ *deoxy*[Hb + Mb], apenas a  $FC_{PICO}$  foi menor no TI-I comparado ao TI-V ( $p = 0,03$ ; tabela 1). Referente às comparações dos limiares fisiológicos, o LL<sub>1</sub> e o LL<sub>2</sub> foram significativamente maiores no TI-I comparado ao TI-V ( $p < 0,01$ ), porém sem diferenças para *deoxy*[Hb + Mb]BP e PDFC entre testes ( $p > 0,05$ ; tabela 2).

Os valores do coeficiente de correlação de Pearson das análises entre *deoxy*[Hb + Mb]%CF e  $\Delta$ *deoxy*[Hb + Mb] com  $\dot{V}O_{2PICO}$ ,  $FC_{PICO}$  e  $O_{2PICO}$  estão apresentados na Tabela 3.

No que diz respeito as correlações para as variáveis obtidas no TI-V, tanto  $deoxy[Hb + Mb]\%CF$  quanto  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$  apresentaram uma correlação moderada com o  $\dot{V}O_{2PICO}$  e  $FC_{PICO}$  e uma correlação pequena com o  $O_{2PICO}$ . Já no TI-I, a  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$  apresentou correlação pequena com  $\dot{V}O_{2PICO}$ ,  $FC_{PICO}$  e  $O_{2PICO}$ , enquanto a  $deoxy[Hb + Mb]\%CF$  apresentou uma correlação pequena com o  $\dot{V}O_{2PICO}$ , moderada com a  $FC_{PICO}$  e trivial com o  $O_{2PICO}$ .

Tabela 1 – Comparações individuais e média dos índices fisiológicos máximos entre os testes incrementais (n = 15).

|            | $\dot{V}O_{2PICO}$<br>(L/min) |           | FC <sub>PICO</sub><br>(bpm) |           | O <sub>2</sub> P <sub>PICO</sub><br>(ml/bpm) |            | deoxy[Hb + Mb]%CF |          | $\Delta$ deoxy[Hb + Mb] |            |
|------------|-------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|--|------------|-------------------|----------|-------------------------|------------|
|            | TI-V                          | TI-I      | TI-V                        | TI-I      | TI-V   | TI-I       | TI-V              | TI-I     | TI-V                    | TI-I       |
| 1          | 4,0                           | 4,2       | 203                         | 197       | 19,8   | 21,4       | 120               | 120      | 20,3                    | 19,6       |
| 2          | 3,7                           | 3,7       | 188                         | 188       | 19,5   | 19,9       | 98                | 76       | 11,8                    | 7,9        |
| 3          | 4,0                           | 4,4       | 187                         | 178       | 21,5   | 25,0       | 125               | 142      | 18,3                    | 16,8       |
| 4          | 2,9                           | 3,3       | 173                         | 170       | 16,9   | 19,7       | -                 | -        | -                       | -          |
| 5          | 4,8                           | 4,8       | 209                         | 188       | 23,1   | 25,4       | 76                | 99       | 11,2                    | 8,2        |
| 6          | 2,9                           | 3,0       | 168                         | 167       | 17,5   | 17,7       | 57                | 100      | 5,3                     | 7,2        |
| 7          | 3,8                           | 4,2       | 190                         | 192       | 20,1   | 21,9       | 112               | 70       | 10,3                    | 6,9        |
| 8          | 4,5                           | 3,9       | 188                         | 186       | 24,0   | 21,0       | 108               | 125      | 13,7                    | 14,7       |
| 9          | 3,6                           | 3,5       | 191                         | 185       | 18,9   | 18,9       | 142               | 159      | 19,8                    | 20,0       |
| 10         | 2,6                           | 2,7       | 181                         | 180       | 14,2   | 15,2       | -                 | -        | -                       | -          |
| 11         | 4,1                           | 4,3       | 165                         | 164       | 25,1   | 26,3       | 93                | 85       | 17,8                    | 25,0       |
| 12         | 4,0                           | 3,5       | 172                         | 170       | 23,5   | 20,8       | 108               | 99       | 14,0                    | 13,8       |
| 13         | 4,5                           | 4,2       | 191                         | 193       | 23,4   | 21,7       | 177               | 204      | 26,6                    | 36,1       |
| 14         | 3,8                           | 3,7       | 177                         | 176       | 21,5   | 21,1       | 48                | 51       | 2,5                     | 1,6        |
| 15         | 5,5                           | 5,5       | 175                         | 172       | 31,4   | 32,0       | -                 | -        | -                       | -          |
| Média ± DP | 3,9 ± 0,8                     | 3,9 ± 0,7 | 184 ± 13                    | 180 ± 10* | 21,4 ± 4,1                                   | 21,9 ± 4,0 | 105 ± 36          | 111 ± 43 | 14,3 ± 6,7              | 14,8 ± 9,5 |

Fonte: Produção do próprio autor.

Legenda: TI-V: teste incremental com aumento de velocidade. TI-I: teste incremental com aumento de inclinação.  $\dot{V}O_{2PICO}$ : consumo de oxigênio pico atingido no teste incremental. FC<sub>PICO</sub>: frequência cardíaca pico atingida no teste incremental. O<sub>2</sub>P<sub>PICO</sub>: pulso de oxigênio pico atingido no teste incremental. deoxy[Hb + Mb]%CF: pico de hemoglobina desoxigenada atingido no teste incremental em percentual da calibração fisiológica.  $\Delta$ deoxy[Hb + Mb]: diferença entre o pico de hemoglobina desoxigenada do teste incremental e os valores de linha de base.

\* Diferença significativa em relação a FC<sub>PICO</sub> no TI-V (p = 0,03)

Tabela 2 – Comparação dos índices fisiológicos submáximos entre os testes incrementais.

| Variáveis                         | TI-V       | TI-I       | p-valor |
|-----------------------------------|------------|------------|---------|
| LL <sub>1</sub> (n = 14)          |            |            |         |
| $\dot{V}O_2$ (mL/kg/min)          | 40,0 ± 5,5 | 43,8 ± 4,6 | 0,004*  |
| % $\dot{V}O_{2PICO}$              | 68,9 ± 5,9 | 75,1 ± 3,5 | 0,002*  |
| FC (bpm)                          | 146 ± 11   | 150 ± 11   | 0,10    |
| LL <sub>2</sub> (n = 14)          |            |            |         |
| $\dot{V}O_2$ (mL/kg/min)          | 49,8 ± 5,8 | 52,6 ± 6,0 | 0,04*   |
| % $\dot{V}O_{2PICO}$              | 85,8 ± 4,3 | 89,6 ± 3,9 | 0,001*  |
| FC (bpm)                          | 167 ± 11   | 166 ± 11   | 0,55    |
| PDFC (n = 15)                     |            |            |         |
| $\dot{V}O_2$ (mL/kg/min)          | 46,7 ± 6,4 | 47,9 ± 6,5 | 0,34    |
| % $\dot{V}O_{2PICO}$              | 81,4 ± 4,9 | 82,7 ± 5,6 | 0,76    |
| FC (bpm)                          | 160 ± 11   | 158 ± 11   | 0,09    |
| <i>deoxy</i> [Hb + Mb]BP (n = 11) |            |            |         |
| $\dot{V}O_2$ (mL/kg/min)          | 47,5 ± 4,9 | 48,3 ± 6,7 | 0,67    |
| % $\dot{V}O_{2PICO}$              | 83,2 ± 7,5 | 86,3 ± 7,5 | 0,39    |
| FC (bpm)                          | 161 ± 13   | 160 ± 11   | 0,63    |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Legenda: TI-V: teste incremental com aumento de velocidade. TI-I: teste incremental com aumento de inclinação.  $\dot{V}O_2$ : consumo de oxigênio. FC: frequência cardíaca. % $\dot{V}O_{2PICO}$ : valor relativo ao consumo de oxigênio pico. LL<sub>1</sub>: primeiro limiar de lactato. LL<sub>2</sub>: segundo limiar de lactato. PDFC: ponto de deflexão da frequência cardíaca. *deoxy*[Hb + Mb]BP: ponto de quebra da deoxihemoglobina. \*diferença significativa.

Tabela 3 – Correlação entre medidas de pico de extração de oxigênio muscular com os índices máximos obtidos nos testes incrementais.

| Variáveis                       | TI-V               |                    |                                  | TI-I               |                    |                                  |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------|
|                                 | $\dot{V}O_{2PICO}$ | FC <sub>PICO</sub> | O <sub>2</sub> P <sub>PICO</sub> | $\dot{V}O_{2PICO}$ | FC <sub>PICO</sub> | O <sub>2</sub> P <sub>PICO</sub> |
| <i>deoxy</i> [Hb + Mb]%CF       | 0,31               | 0,34               | 0,15                             | 0,11               | 0,33               | 0,05                             |
| $\Delta$ <i>deoxy</i> [Hb + Mb] | 0,41               | 0,31               | 0,29                             | 0,26               | 0,15               | 0,29                             |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Legenda: TI-V: teste incremental com aumento de velocidade. TI-I: teste incremental com aumento de inclinação.  $\dot{V}O_{2PICO}$ : consumo de oxigênio pico atingido no teste incremental. FC<sub>PICO</sub>: frequência cardíaca pico atingida no teste incremental. O<sub>2</sub>P<sub>PICO</sub>: pulso de oxigênio pico atingido no teste incremental. *deoxy*[Hb + Mb]%CF: pico da deoxihemoglobina atingido no teste incremental relativo a calibração fisiológica.  $\Delta$ *deoxy*[Hb + Mb]: diferença entre o pico da deoxihemoglobina no teste incremental e os valores de linha de base.

## 4.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS LIMIARES FISIOLÓGICOS EM CADA TESTE INCREMENTAL

A análise de variância realizada entre os índices submáximos não revelou diferença significativa entre *deoxy*[Hb + Mb]BP, LL<sub>2</sub> e PDFC tanto para o TI-V ( $F_{(1.6, 14.8)} = 2,3$ ;  $p = 0,147$ ) quanto para o TI-I ( $F_{(2.0, 17.6)} = 1,9$ ;  $p = 0,175$ ) quando analisados pela carga externa absoluta. No entanto, quando analisados pelo  $\% \dot{V}O_{2PICO}$ , foi detectado efeito principal significativo para os índices submáximos no TI-I ( $F_{(1.7, 15.2)} = 4,5$ ;  $p = 0,035$ ), mas não no TI-V ( $F_{(1.7, 15.0)} = 2,8$ ;  $p = 0,098$ ). As comparações pareadas demonstraram que o LL<sub>2</sub> ocorreu em uma intensidade metabólica maior que o PDFC no TI-I ( $p = 0,04$ ; tabela 4). As figuras 7 e 8 ilustram a análise de concordância a partir dos gráficos de Bland e Altman entre os índices submáximos para TI-V e TI-I, respectivamente.

Tabela 4 – Comparação entre os índices submáximos em cada teste incremental (n = 10).

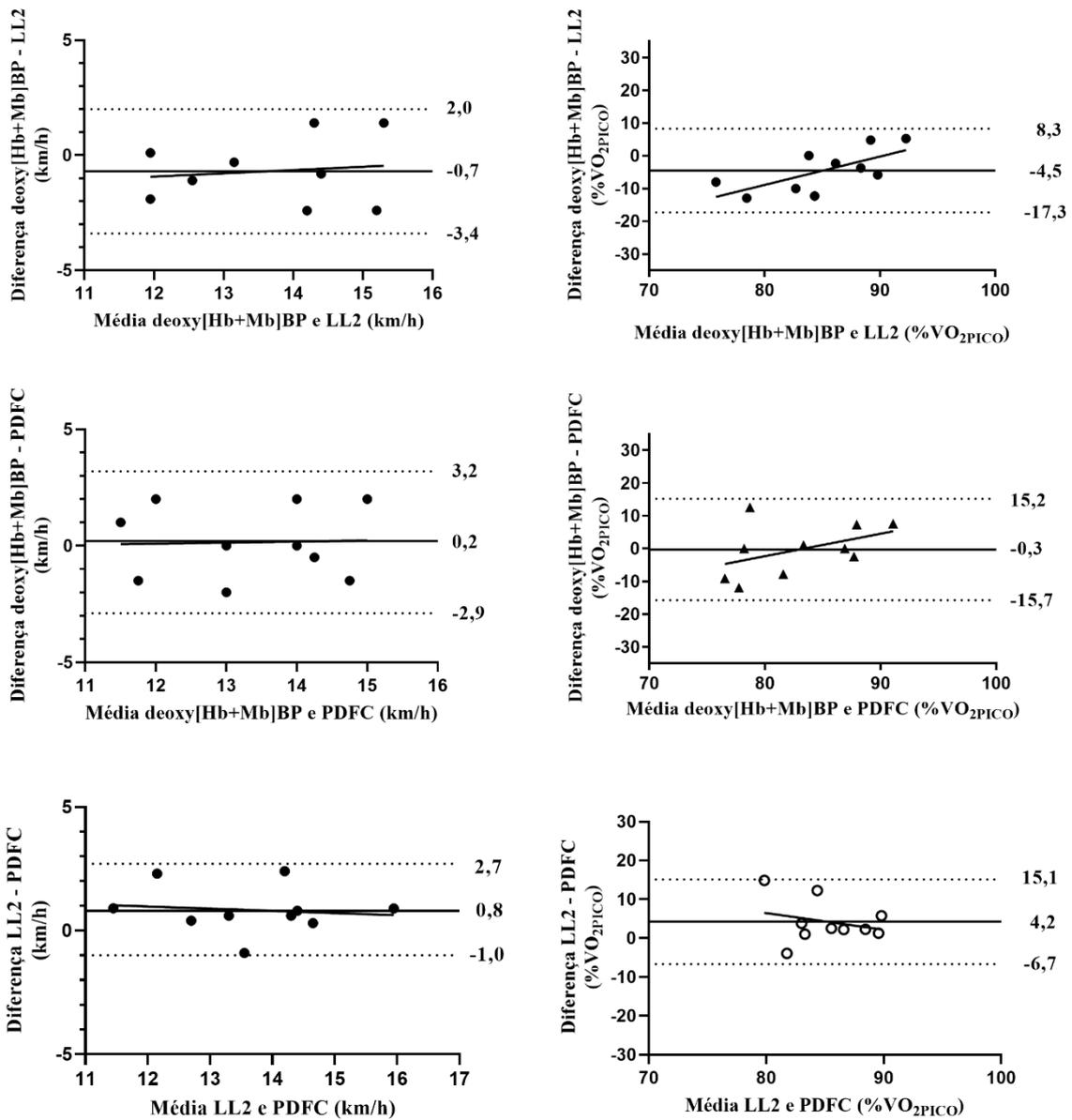
|                       | LL <sub>2</sub> | PDFC       | <i>deoxy</i> [Hb + Mb]BP |
|-----------------------|-----------------|------------|--------------------------|
| <b>TI-V</b>           |                 |            |                          |
| km/h                  | 14,1 ± 1,3      | 13,3 ± 1,5 | 13,4 ± 1,5               |
| $\% \dot{V}O_{2PICO}$ | 87,3 ± 3,8      | 83,1 ± 4,9 | 82,8 ± 7,8               |
| <b>TI-I</b>           |                 |            |                          |
| %inc                  | 11,2 ± 1,2      | 10,2 ± 1,2 | 10,8 ± 1,7               |
| $\% \dot{V}O_{2PICO}$ | 89,9 ± 4,2*     | 82,5 ± 5,6 | 86,1 ± 7,9               |

Fonte: Produção do próprio autor.

Legenda: TI-V: teste incremental com aumento de velocidade. TI-I: teste incremental com aumento de inclinação. LL<sub>2</sub>: segundo limiar de lactato. PDFC: ponto de deflexão da frequência cardíaca. *deoxy*[Hb + Mb]BP: ponto de quebra da deoxihemoglobina.

\*Diferença significativa em relação ao PDFC ( $p = 0,04$ ).

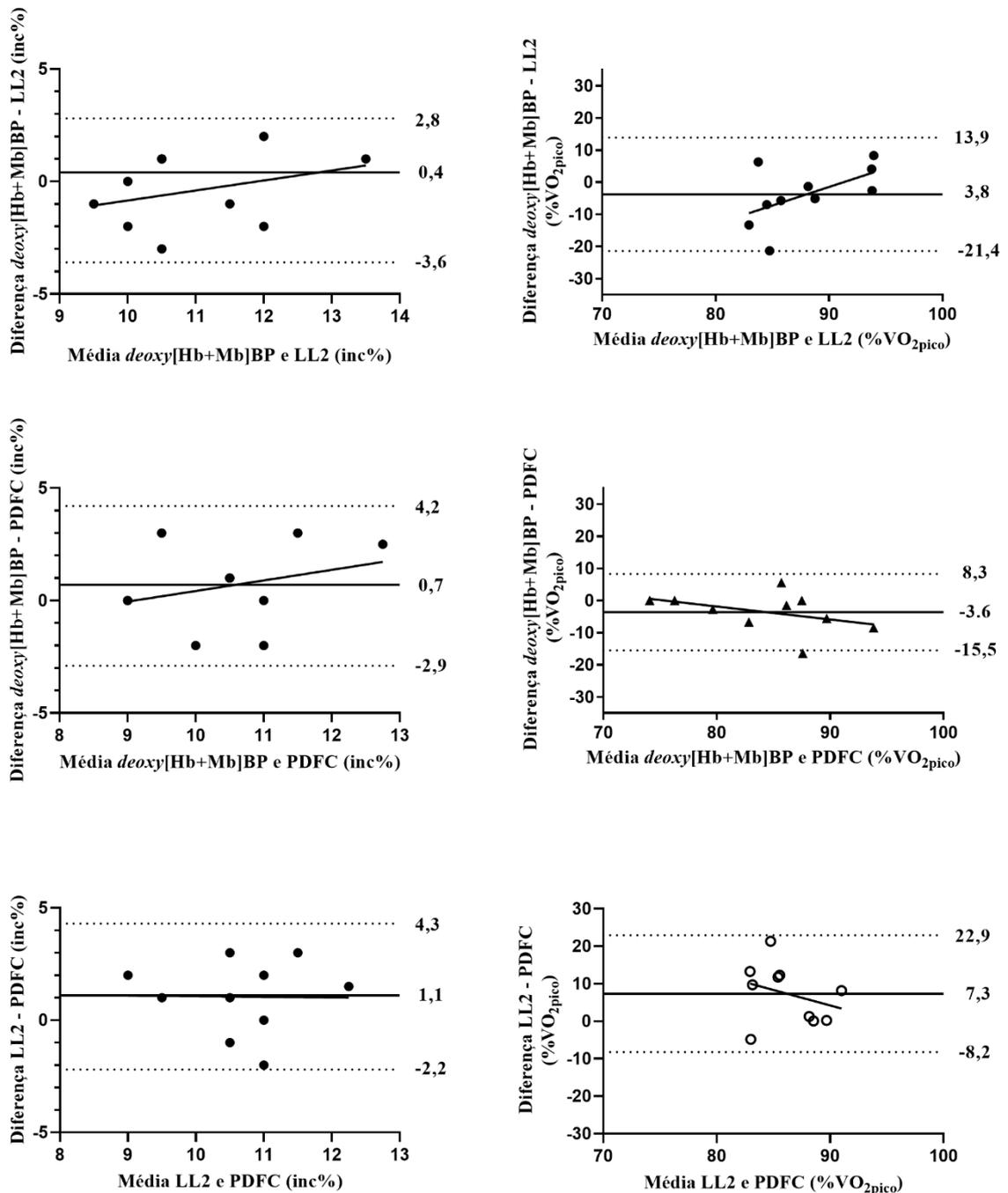
Figura 7 – Análise de concordância entre os índices submáximos no teste incremental com aumento de velocidade.



Fonte: Produção do próprio autor.

Legenda: A linha sólida nos gráficos indica a diferença média. As linhas tracejadas indicam  $\pm 95\%$  dos limites de concordância. LL<sub>2</sub>: segundo limiar de lactato. PDFC: ponto de deflexão da frequência cardíaca. deoxy[Hb + Mb]BP: ponto de quebra da deoxihemoglobina.

Figura 8 – Análise de concordância entre os índices submáximos no teste incremental com aumento de inclinação.



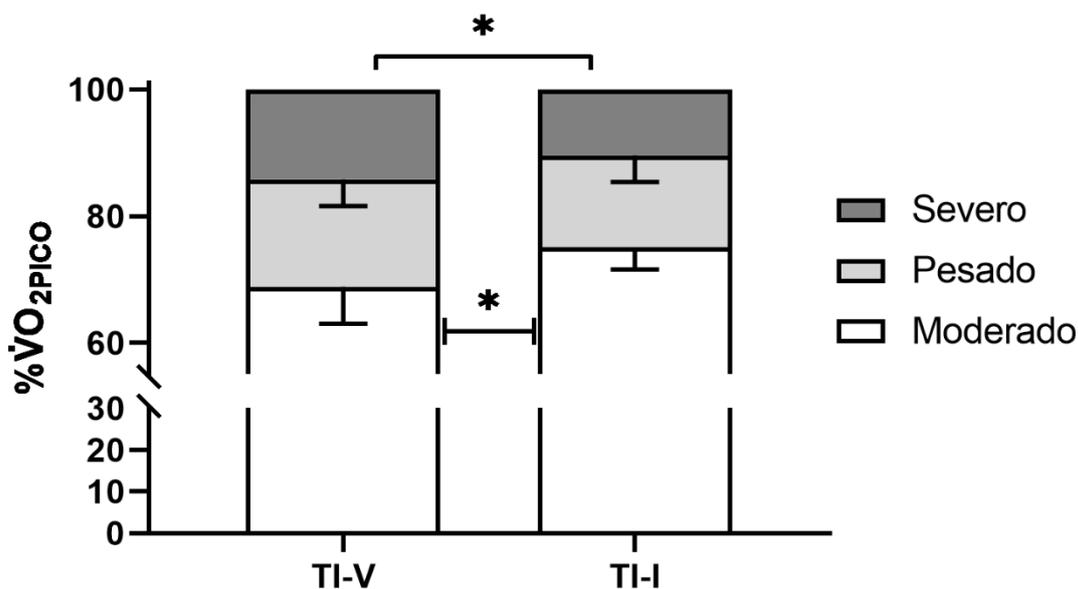
Fonte: Produção do próprio autor.

Legenda: A linha sólida nos gráficos indica a diferença média. As linhas tracejadas indicam  $\pm 95\%$  dos limites de concordância. LL<sub>2</sub>: segundo limiar de lactato. PDFC: ponto de deflexão da frequência cardíaca. *deoxy*[Hb + Mb]BP: ponto de quebra da deoxihemoglobina.

### 4.3 DOMÍNIOS DE INTENSIDADE DO EXERCÍCIO

A Figura 9 ilustra a média da amplitude dos domínios de intensidade para 14 participantes. Quando comparado ao TI-V, o TI-I apresentou uma magnitude significativamente maior para o domínio moderado ( $75,1 \pm 3,5$  vs.  $68,9 \pm 5,9$   $\% \dot{V}O_{2PICO}$ ;  $p = 0,002$ ) e menor para o domínio severo ( $10,4 \pm 3,9$  vs.  $14,2 \pm 4,3$   $\% \dot{V}O_{2PICO}$ ;  $p = 0,001$ ), sem diferenças para a magnitude do domínio pesado entre testes ( $14,5 \pm 4,2$  vs.  $16,9 \pm 4,2$   $\% \dot{V}O_{2PICO}$ ;  $p > 0,05$ ).

Figura 9 – Amplitude dos domínios de intensidade do exercício obtidos nos testes incrementais.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Legenda: TI-V: teste incremental com aumento de velocidade. TI-I: teste incremental com aumento de inclinação.  $\% \dot{V}O_{2PICO}$ : percentual do consumo de oxigênio pico atingido no teste incremental.

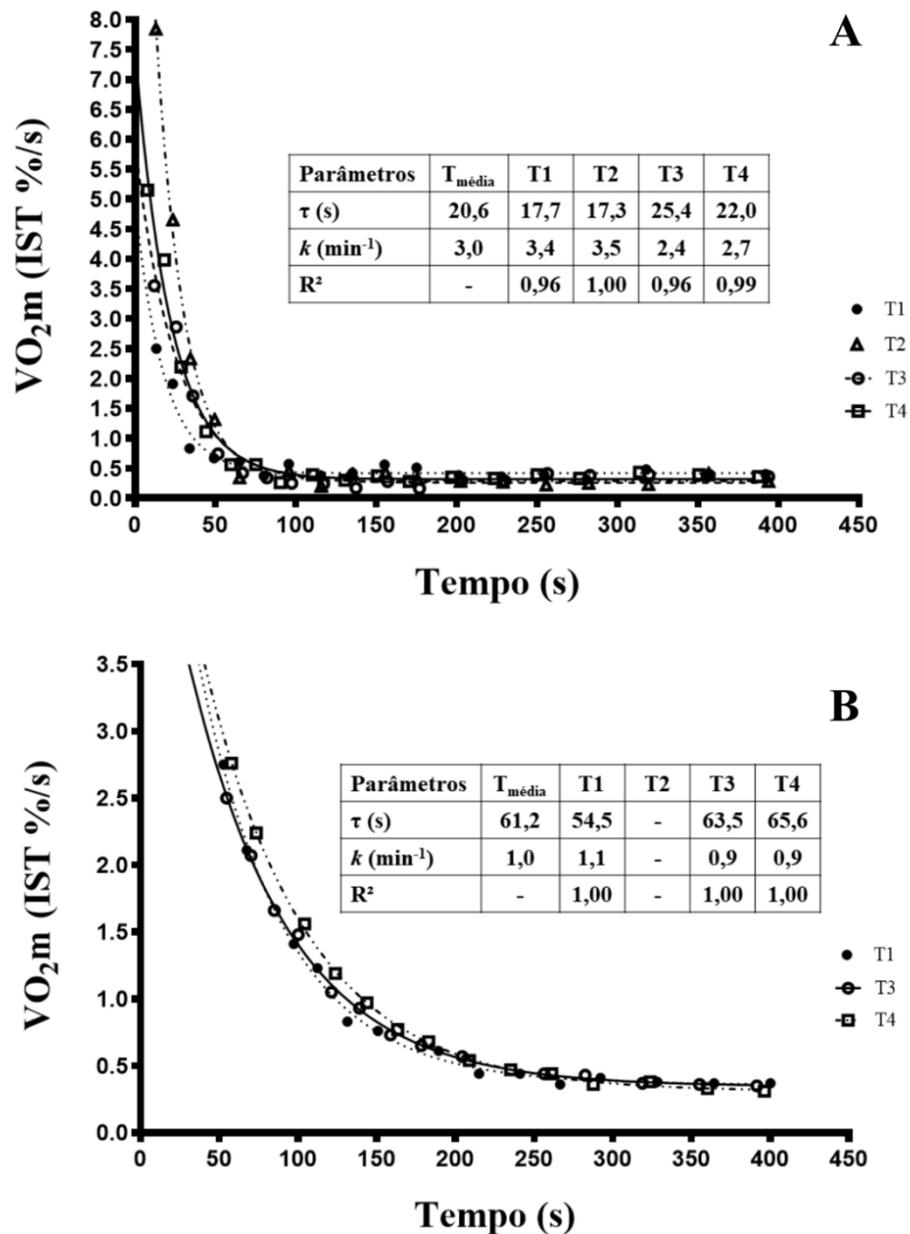
\* Diferença significativa entre os testes incrementais ( $p < 0,05$ )

### 4.4 CAPACIDADE OXIDATIVA MUSCULAR

O valor médio de  $k$  para os 13 participantes em que foi possível fazer a medida foi de  $2,1 \pm 0,5 \text{ min}^{-1}$ . A Figura 9 ilustra a análise da medida durante o protocolo de oclusões repetidas, assim como os parâmetros derivados da função mono-exponencial para dois sujeitos com valores de  $k$  alto (figura 10A) e baixo (figura 10B). Os valores do coeficiente de correlação de *Pearson* das análises entre  $CO_{X_m}$  e todas as variáveis obtidas nos testes

incrementais estão expostos na Tabela 6. As magnitudes das correlações da  $CO_{x_m}$  com os índices fisiológicos no TI-V foram: muito grande para  $V_{pico}$ ; grande para  $\dot{V}O_{2PICO}$ ,  $FC_{PICO}$  e  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$ ; média para  $O_{2PICO}$  e  $deoxy[Hb + Mb]\%CF$ ; e trivial para  $LL_2$  ( $\% \dot{V}O_{2PICO}$ ),  $PDFC$  ( $\% \dot{V}O_{2PICO}$ ) e  $deoxy[Hb + Mb]BP$  ( $\% \dot{V}O_{2PICO}$ ). As correlações com os índices no TI-I foram: grande para  $\dot{V}O_{2PICO}$ ,  $O_{2PICO}$ ,  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$  e  $LL_2$  ( $\% \dot{V}O_{2PICO}$ ); média para  $FC_{PICO}$  e  $deoxy[Hb + Mb]\%CF$ ; pequena para  $PDFC$  ( $\% \dot{V}O_{2PICO}$ ) e  $deoxy[Hb + Mb]BP$  ( $\% \dot{V}O_{2PICO}$ ); e trivial para  $I_{pico}$ . Os gráficos de regressão linear com o coeficiente  $r$  e intervalo de confiança de 95% da  $CO_{x_m}$  com o  $\dot{V}O_{2PICO}$ ,  $V_{pico}$ ,  $I_{pico}$ ,  $LL_2$  ( $\% \dot{V}O_{2PICO}$ ),  $deoxy[Hb + Mb]\%CF$ ,  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$  e  $deoxy[Hb + Mb]BP$  ( $\% \dot{V}O_{2PICO}$ ) no TI-V e no TI-I podem ser visualizados nas Figuras 11 e 12, respectivamente.

Figura 10 – Resposta da medida de consumo de oxigênio muscular ( $\dot{V}O_{2m}$ ) de repouso de dois participantes representativos.



Fonte: Produção do próprio autor.

Legenda: Os pontos nos gráficos representam a taxa de diminuição do IST para cada oclusão arterial durante as transições realizadas, plotado em uma função mono-exponencial pelo tempo.  $\dot{V}O_{2m}$ : consumo de oxigênio muscular. IST: índice de saturação tecidual. T1: primeira transição. T2: segunda transição. T3: terceira transição.

T4: quarta transição.  $T_{média}$ : média das transições.  $k$ : constante da taxa de recuperação do  $\dot{V}O_{2m}$  ( $1/\tau$ ).  $\tau$ : constante de tempo da recuperação do  $\dot{V}O_{2m}$ . A T2 do participante B foi excluída seguindo os critérios adotados para determinação da  $CO_{x,m}$ .

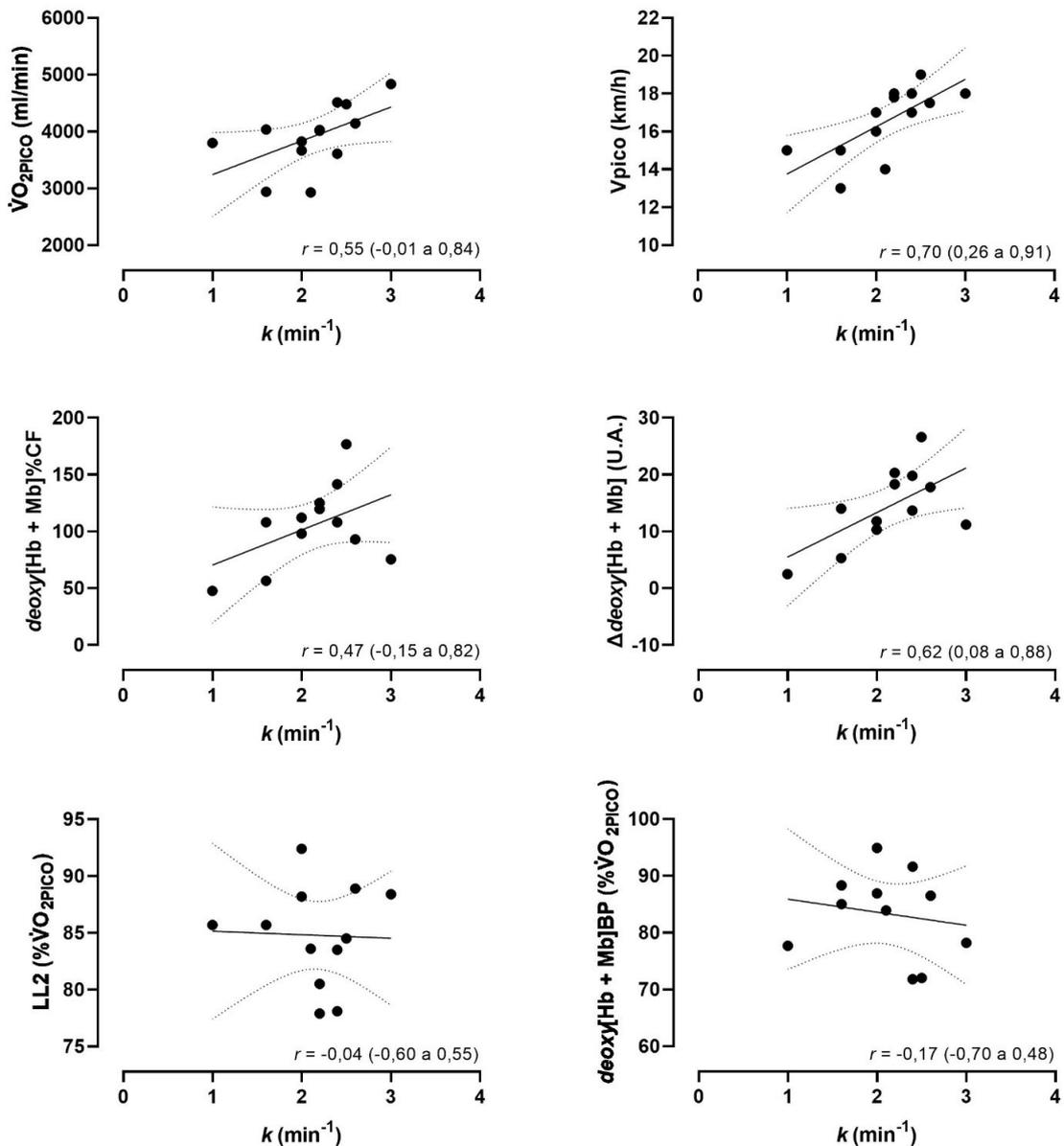
Tabela 5 – Correlação da capacidade oxidativa muscular com os índices máximos e submáximos obtidos nos testes incrementais.

| Variáveis  | Coeficiente r (95% IC) com $k$ ( $\text{min}^{-1}$ ) |                           |
|--|--|---------------------------|
|  | TI-V   | TI-I                      |
| Vpico (km/h) / Ipico (%inc) [n = 13]                     | <b>0,70 (0,26 a 0,91)</b>                            | 0,09 (-0,49 a 0,61)       |
| $\dot{V}O_{2\text{PICO}}$ (ml/min) [n = 13]              | 0,55 (-0,01 a 0,84)                                  | <b>0,62 (0,10 a 0,87)</b> |
| FC <sub>PICO</sub> (bpm) [n = 13]                        | 0,52 (-0,05 a 0,83)                                  | 0,34 (-0,26 a 0,75)       |
| O <sub>2</sub> P <sub>PICO</sub> (ml/bpm) [n = 13]       | 0,34 (-0,26 a 0,75)                                  | 0,52 (-0,04 a 0,83)       |
| deoxy[Hb + Mb]%CF [n = 12]                               | 0,47 (-0,15 a 0,82)                                  | 0,49 (-0,12 a 0,83)       |
| $\Delta$ deoxy[Hb + Mb] [n = 12]                         | <b>0,62 (0,08 a 0,88)</b>                            | 0,54 (-0,05 a 0,85)       |
| LL <sub>2</sub> (% $\dot{V}O_{2\text{PICO}}$ ) [n = 12]  | -0,04 (-0,60 a 0,55)                                 | 0,56 (-0,02 a 0,86)       |
| PDFC (% $\dot{V}O_{2\text{PICO}}$ ) [n = 13]             | 0,02 (-0,54 a 0,57)                                  | -0,14 (-0,64 a 0,44)      |
| deoxy[Hb + Mb]BP (% $\dot{V}O_{2\text{PICO}}$ ) [n = 11] | -0,17 (-0,70 a 0,48)                                 | 0,14 (-0,50 a 0,69)       |

Fonte: Produção do próprio autor.

Legenda: 95%IC: intervalo de confiança de 95%.  $k$  ( $\text{min}^{-1}$ ): constante da taxa de recuperação do consumo de oxigênio muscular. TI-V: teste incremental com aumento de velocidade. TI-I: teste incremental com aumento de inclinação.  $\dot{V}O_{2\text{PICO}}$ : consumo de oxigênio pico atingido no teste incremental. FC<sub>PICO</sub>: frequência cardíaca pico atingida no teste incremental. O<sub>2</sub>P<sub>PICO</sub>: pulso de oxigênio pico atingido no teste incremental. deoxy[Hb + Mb]%CF: pico de hemoglobina desoxigenada atingido no teste incremental em percentual da calibração fisiológica.  $\Delta$ deoxy[Hb + Mb]: diferença entre o pico de hemoglobina desoxigenada do teste incremental e os valores de linha de base. LL<sub>2</sub>: segundo limiar de lactato. PDFC: ponto de flexão da frequência cardíaca. deoxy[Hb + Mb]BP: ponto de quebra da deoxihemoglobina. Valores em negrito representam  $p < 0,05$ .

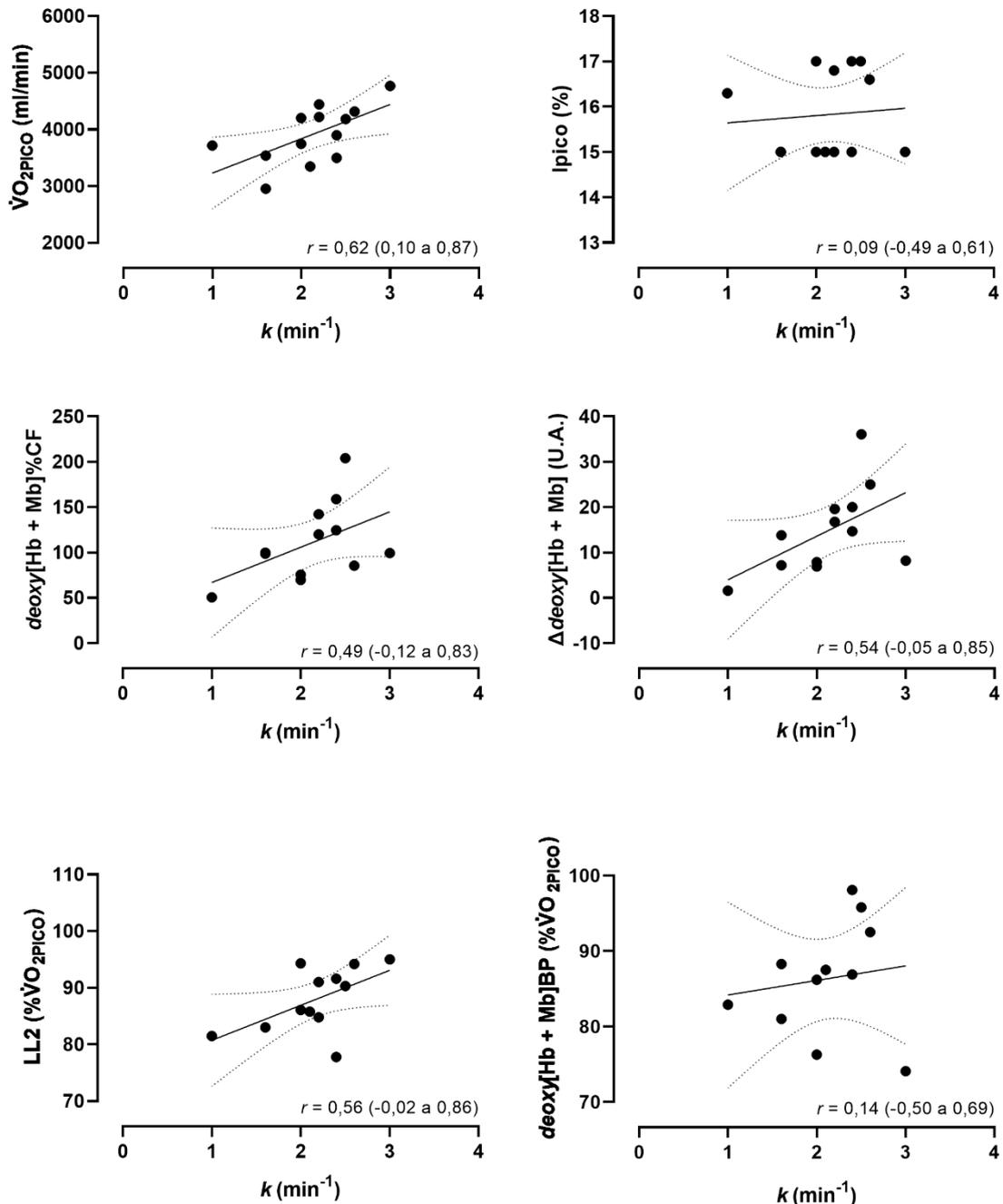
Figura 11 – Relação da capacidade oxidativa muscular com índices fisiológicos no teste incremental com aumento de velocidade.



Fonte: Produção do próprio autor

Legenda:  $k$  ( $\text{min}^{-1}$ ): constante da taxa de recuperação do consumo de oxigênio muscular.  $\dot{V}O_{2\text{PICO}}$ : consumo de oxigênio pico atingido no teste incremental.  $V_{\text{pico}}$ : velocidade final atingida no teste incremental.  $\text{deoxy[Hb + Mb]\%CF}$ : pico de hemoglobina desoxigenada atingido no teste incremental em percentual da calibração fisiológica.  $\Delta\text{deoxy[Hb + Mb]}$ : diferença entre o pico de hemoglobina desoxigenada do teste incremental e os valores de linha de base.  $\text{LL}_2$ : segundo limiar de lactato.  $\text{deoxy[Hb + Mb]BP}$ : ponto de quebra da deoxihemoglobina.

Figura 12 – Relação da capacidade oxidativa muscular com índices fisiológicos no teste incremental com aumento de inclinação.



Fonte: Produção do próprio autor

Legenda:  $k$  ( $\text{min}^{-1}$ ): constante da taxa de recuperação do consumo de oxigênio muscular.  $\dot{V}O_{2\text{pico}}$ : consumo de oxigênio pico atingido no teste incremental. Ipico: inclinação pico atingida no teste incremental.  $\text{deoxy[Hb + Mb]}\%CF$ : pico de hemoglobina desoxigenada atingido no teste incremental em percentual da calibração fisiológica.  $\Delta\text{deoxy[Hb + Mb]}$ : diferença entre o pico de hemoglobina desoxigenada do teste incremental e os valores de linha de base. LL<sub>2</sub>: segundo limiar de lactato.  $\text{deoxy[Hb + Mb]BP}$ : ponto de quebra da deoxihemoglobina.

## 5 DISCUSSÃO

O principal objetivo deste estudo foi determinar e comparar os índices fisiológicos aeróbios máximos e submáximos entre dois testes incrementais de corrida, um com aumento de velocidade e outro com aumento de inclinação. Devido às diferenças biomecânicas, neuromusculares e fisiológicas inerentes à corrida com inclinação e no plano, foi hipotetizado que haveria uma maior extração de  $O_2$  do músculo GCmed durante o TI-I comparado ao TI-V. Embora não tenha sido possível testar esta hipótese por métodos mais invasivos, derivado dos valores de  $deoxy[Hb + Mb]\%CF$  e  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$ , especulou-se que a extração de  $O_2$  no músculo GCmed seria maior no exercício inclinado, que resultaria em um  $\dot{V}O_{2PICO}$  similar e uma  $FC_{PICO}$  menor comparado ao teste incremental no plano.

Sabe-se que o custo energético na corrida com inclinação positiva é maior quando comparado à corrida no plano para uma mesma velocidade (VERNILLO et al., 2017). Foi proposto que o custo energético elevado devido ao aumento da inclinação pode ser explicado por um aumento da energia mecânica necessária para compensar um maior deslocamento vertical (ROBERTS; BELLIVEAU, 2005; SNYDER; FARLEY, 2011). Além disso, durante a corrida no plano, a energia potencial elástica acumulada em unidades musculo-tendíneas contribui para um dos mecanismos de economia de energia, que auxilia na aceleração do corpo para cima durante a fase propulsiva e reduz a produção de energia necessária durante a fase concêntrica (CAVANGA, 1977; ABE et al., 2011). No entanto, a corrida com inclinação parece comprometer o armazenamento de energia elástica durante a aterrissagem e a utilização dessa energia na fase de decolagem (SNYDER; FARLEY, 2011), que acarretaria em um aumento da atividade muscular para gerar uma quantidade alta de trabalho concêntrico durante a fase de impulso, compensando a redução do armazenamento e utilização de energia elástica (SNYDER; FARLEY, 2011; VERNILLO et al., 2017). A partir desses fatores, somados a uma maior atividade eletromiográfica do músculo gastrocnêmio medial (SWANSON; CALDWELL, 2000), maior  $\dot{V}O_{2PICO}$  (PAAVOLAINEN et al., 2000; PRINGLE et al., 2002; SCHEER et al., 2018; CASSIRAME et al., 2022) e menor  $FC_{PICO}$  (DE LUCAS et al., 2021) durante a corrida com inclinação comparado a corrida no plano, foi estabelecida a hipótese de que haveria uma maior extração de  $O_2$  (estimada por  $deoxy[Hb + Mb]\%CF$  e/ou  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$ ) ao final do teste incremental com aumento de inclinação comparado ao teste incremental com aumento de velocidade. Esta hipótese foi parcialmente refutada, uma

vez que não foi observado diferença significativa nos valores de  $deoxy[Hb + Mb]\%CF$  e  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$  no músculo GCmed entre os testes incrementais. No entanto, a análise da oxigenação muscular derivada do NIRS no presente estudo se limitou apenas ao músculo GCmed por ser uma das musculaturas mais ativadas (CAI et al., 2010) e mais utilizada para a avaliação da oxigenação muscular durante a corrida (SNYDER, PARMENTER, 2009; DE AGUIAR et al., 2022). Sendo assim, a avaliação da oxigenação muscular de outros grupamentos musculares que são tão ativados quanto o GCmed durante a corrida com inclinação (iliopsoas, glúteo máximo, adutores de quadril, isquiotibiais, músculos do quadríceps e tibial anterior; VERNILLO et al., 2017) poderia responder se, de fato, ocorre ou não uma maior extração de  $O_2$  das musculaturas envolvidas no exercício com inclinação comparado ao plano.

Em relação ao  $\dot{V}O_{2PICO}$ , os resultados vão ao encontro de estudos que reportaram valores similares entre o teste incremental com inclinação comparado ao teste no plano (KASCH et al., 1976; BALDUCCI et al., 2016; LEMIRE et al., 2019; DE LUCAS et al., 2021; HELD et al., 2023). Ainda, os resultados encontrados para  $FC_{PICO}$  no presente estudo corroboram com os achados de de Lucas et al. (2021), em que foram reportados valores menores durante o teste com aumento de inclinação ( $178 \pm 9$  bpm) comparado ao teste no plano ( $183 \pm 9$  bpm;  $p < 0,001$ ). Na mesma linha, Cassirame et al. (2022) observaram que o  $\dot{V}O_2$  aumentava conforme a inclinação dos testes era maior (0%, 15%, 25% e 40% de inclinação), mas não alterava a FC nas intensidades do  $LV_1$ ,  $LV_2$  e  $V_{pico}$ . De Lucas et al. (2021) hipotetizaram que a maior ativação dos músculos da panturrilha durante a corrida com inclinação aumentaria o retorno venoso via bomba muscular periférica (SMITH et al., 1976), resultando em um maior estiramento das fibras do miocárdio e, conseqüentemente, maior força de contração ventricular (lei de Frank-Starling). Dessa forma, haveria um aumento do VS para manter o mesmo débito cardíaco e, portanto, um mesmo  $\dot{V}O_{2PICO}$ . Curiosamente, os autores observaram maiores valores de  $O_{2PICO}$ , uma medida indireta do VS, no teste com inclinação ( $25,2 \pm 3,7$  ml/bpm) comparado ao plano ( $23,9 \pm 3,3$  ml/bpm;  $p < 0,01$ ). No entanto, o  $O_{2PICO}$  foi similar entre os testes (TI-V:  $21,5 \pm 2,4$  ml/bpm vs. TI-I:  $21,8 \pm 2,6$  ml/bpm;  $p = 0,66$ ), não sendo possível atribuir as diferenças encontradas na  $FC_{PICO}$  às alterações associadas ao volume sistólico no presente estudo

Um aspecto original desta pesquisa foi a avaliação da oxigenação muscular durante o exercício concomitantemente a análise do  $\dot{V}O_{2PICO}$  e/ou na  $FC_{PICO}$  entre testes incrementais com inclinação *versus* horizontal. Além da hipótese de um maior volume sistólico durante a

corrida com inclinação proposta por de Lucas et al. (2021), outros estudos sugerem um aumento da massa muscular ativa durante a corrida com inclinação (SLONIGER et al., 1997; PAAVOLAINEN et al., 2000) e as características específicas de corredores de montanha (SCHEER et al., 2018) para explicar tais diferenças. Sendo assim, a avaliação da oxigenação muscular possibilitaria explicar se, de fato, uma maior atividade de determinados grupamentos musculares de membros inferiores estaria associada a alterações na dinâmica de oferta e extração de O<sub>2</sub> pela musculatura em exercício e, portanto, contribuindo para um maior  $\dot{V}O_{2PICO}$  (PAAVOLAINEN et al., 2000; PRINGLE et al., 2002; SCHEER et al., 2018; CASSIRAME et al., 2022) ou menor  $FC_{PICO}$  (DE LUCAS et al., 2021) no teste com inclinação. No entanto, as medidas utilizadas como estimativa de extração máxima de O<sub>2</sub> no presente estudo (*i.e.*,  $deoxy[Hb + Mb]\%CF$  e  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$ ) não apresentaram diferença significativa entre os dois testes, além de uma correlação apenas moderada com o  $\dot{V}O_{2PICO}$  em ambos os testes. Cabe ressaltar que a comparação dos valores de  $deoxy[Hb + Mb]\%CF$  e  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$  entre os testes incrementais no presente estudo foram realizadas com uma amostra de 12 participantes. Isso difere da comparação da amostra completa (n = 15), em que a  $FC_{PICO}$  não apresentou diferença significativa entre os testes (TI-V:  $186 \pm 13$  bpm vs. TI-I:  $182 \pm 11$  bpm; p = 0,07).

Alguns fatores podem ter influenciado nos sinais de  $deoxy[Hb + Mb]$  para estimar a extração de O<sub>2</sub> da musculatura durante o exercício, e conseqüentemente nos resultados observados neste estudo. Primeiro, a posição dos participantes durante a calibração fisiológica dos sinais de NIRS (ou seja, sentados com a perna estendida na horizontal). A posição supina do corpo prejudica a pressão de perfusão muscular e diminui a cinética de entrega de O<sub>2</sub> devido à perda do efeito do gradiente hidrostático em comparação a posição ereta (GOULDING et al., 2020). Desta forma, a alteração da posição do corpo em supino durante a calibração fisiológica para a posição ereta durante a corrida pode ter comprometido a normalização dos sinais de  $deoxy[Hb + Mb]\%CF$  para alguns participantes durante os testes incrementais. Outra questão se refere à medida de amplitude da  $deoxy[Hb + Mb]$  calculada pelo  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$ . Em uma análise secundária dos dados do presente estudo foi observado uma correlação negativa muito grande da espessura das dobras cutâneas do GCmed com o  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$  no TI-V (r = -0,82) e TI-I (r = -0,74). Isso sugere que a quantidade de tecido adiposo adjacente ao NIRS pode ter prejudicado a amplitude nos sinais de  $deoxy[Hb + Mb]$  durante o exercício. Apesar dos valores de dobras cutâneas dos participantes ( $3,4 \pm 1,7$  mm; amplitude: 1,5 a 7,4 mm) apresentarem valores aceitáveis para a medida (BEEKVELT et

al., 2001), os valores de  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$  apresentaram grande variabilidade entre os sujeitos tanto no TI-V (2,5 a 26,6 u.a.) quanto no TI-I (1,6 a 36,1 u.a.).

A comparação dos limiares fisiológicos apontados como marcadores da transição do domínio pesado para o severo (*i.e.*, LL<sub>2</sub>, PDFC e  $deoxy[Hb + Mb]BP$ ) entre os testes incrementais demonstrou diferença apenas para o LL<sub>2</sub>, com uma demanda metabólica maior no TI-I ( $89,6 \pm 3,9 \text{ \%}\dot{V}O_{2PICO}$ ) comparado ao TI-V ( $85,8 \pm 4,3 \text{ \%}\dot{V}O_{2PICO}$ ;  $p = 0,001$ ). Isso foi acompanhado pela maior demanda metabólica do LL<sub>1</sub> no TI-I ( $75,1 \pm 3,5 \text{ \%}\dot{V}O_{2PICO}$ ) comparado ao TI-V ( $68,9 \pm 5,9 \text{ \%}\dot{V}O_{2PICO}$ ;  $p = 0,002$ ). Esses resultados conflitam com a demanda metabólica similar no LL<sub>1</sub> e LL<sub>2</sub> entre o teste com aumento de inclinação (LL<sub>1</sub>:  $72,7 \text{ \%}\dot{V}O_{2PICO}$ ; LL<sub>2</sub>:  $87,6 \text{ \%}\dot{V}O_{2PICO}$ ) e o teste no plano (LL<sub>1</sub>:  $73,6 \text{ \%}\dot{V}O_{2PICO}$ ; LL<sub>2</sub>:  $87,9 \text{ \%}\dot{V}O_{2PICO}$ ;  $p > 0,05$ ) observado previamente (DE LUCAS et al., 2021). O número de estágios dos testes incrementais pode ajudar a explicar estas diferenças, uma vez que de Lucas et al. (2021) observaram um número similar de estágios no teste com aumento de velocidade ( $8,7 \pm 0,8$ ) e inclinação ( $8,3 \pm 0,5$ ;  $p = 0,07$ ), diferentemente do observado no presente estudo (TI-V:  $9,5 \pm 2,3$  vs. TI-I:  $8,0 \pm 0,8$ ;  $p = 0,02$ ). Pode-se especular que, caso o número de estágios do TI-I fosse semelhante ao TI-V, o  $\dot{V}O_2$  continuaria aumentando até atingir um  $\dot{V}O_{2PICO}$  maior e, por consequência, diminuiria o  $\text{\%}\dot{V}O_{2PICO}$  no LL<sub>1</sub> e LL<sub>2</sub>. No entanto, os participantes do presente estudo realizaram os testes incrementais até a exaustão voluntária, acarretando no alcance de valores máximos para as respostas fisiológicas mensuradas. Desta forma, torna-se difícil explicar as divergências encontradas nas comparações dos limiares de lactato entre TI-V e TI-I, uma vez que foi utilizado o mesmo protocolo incremental, o mesmo método de determinação dos limiares e uma amostra similar de atletas nos dois estudos.

Tendo em vista que a determinação dos limiares de lactato impacta diretamente na amplitude dos domínios fisiológicos, as magnitudes dos domínios de intensidade diferiram entre os dois testes no presente estudo (figura 9). A partir desta análise, o teste incremental com inclinação resultou em uma amplitude do domínio moderado maior e do domínio severo menor do que o teste com aumento de velocidade. De encontro aos nossos achados, de Lucas et al. (2021) não observaram diferença para a amplitude do domínio moderado ( $\sim 73\%$ ), pesado ( $\sim 15\%$ ) e severo ( $\sim 12\%$ ) entre os testes incrementais plano e inclinado. Carter et al. (2000) observaram que, na corrida, o LL<sub>1</sub> ocorreu em um percentual do  $\dot{V}O_{2PICO}$  maior ( $73,4 \pm 5,8\%$ ) comparado ao ciclismo ( $54,7 \pm 6,7\%$ ). A comparação da amplitude dos domínios de intensidade entre a corrida e o ciclismo é interessante uma vez que o padrão de ações musculares predominantes durante o exercício nesses dois esportes é diferente. Curiosamente,

Caritá et al. (2013) observaram que o  $\dot{V}O_2$  na PC (índice que delimita os domínios pesado e severo) em ciclistas treinados representou  $\sim 90\%$  do  $\dot{V}O_{2PICO}$  do teste incremental em cicloergômetro, enquanto para corredores treinados e sujeitos fisicamente ativos o  $\dot{V}O_2$  na PC representou  $\sim 70\%$  e  $\sim 79\%$  do  $\dot{V}O_{2PICO}$ , respectivamente. Considerando que o LL<sub>2</sub> no presente estudo ocorreu em um percentual do  $\dot{V}O_{2PICO}$  maior no teste com inclinação comparado ao teste no plano, é possível que as características da tarefa realizada possam estar relacionadas com a especificidade dos sujeitos, uma vez que os participantes do presente estudo possuem maiores adaptações em corrida com subida, em que predomina as ações musculares concêntricas. Embora as explicações para tais discrepâncias permaneçam em aberto, esses resultados podem implicar no desempenho da modalidade, como na elaboração de estratégias de provas, especialmente com diferentes altimetrias. Baseado nestes achados supõe-se que o atleta suporte intensidades relativamente mais altas por um período de tempo maior (ainda abaixo do LL<sub>2</sub>), porém teria uma capacidade de trabalho menor acima do LL<sub>2</sub>, onde estaria muito próximo do seu  $\dot{V}O_{2PICO}$ .

Até o presente momento, além deste estudo, sabe-se da existência de apenas uma pesquisa que tenha avaliado e comparado a intensidade metabólica do LL<sub>2</sub> entre testes incrementais com inclinação *versus* plano (DE LUCAS et al., 2021). A maioria das comparações de limiares fisiológicos nestas condições utilizaram índices derivados de variáveis respiratórias ou desempenho. Por exemplo, Balducci et al. (2016) não observaram diferença significativa no  $\% \dot{V}O_{2PICO}$  do LV<sub>2</sub> em três testes incrementais com diferentes inclinações (0%:  $90,4 \pm 2,4$   $\% \dot{V}O_{2max}$ ; 12,5%:  $90,6 \pm 2,6$   $\% \dot{V}O_{2max}$ ; e 25%:  $91,3 \pm 2,3$   $\% \dot{V}O_{2max}$ ;  $p > 0,05$ ). Pringle et al. (2002) não reportaram diferença no  $\dot{V}O_2$  predito para a intensidade do  $\Delta 50$  (50% da diferença entre o LV<sub>1</sub> e o  $\dot{V}O_{2max}$ ) na corrida com 0% de inclinação (3,43 L/min) comparado a corrida com 10% de inclinação (3,41 L/min;  $p > 0,05$ ). Na mesma linha, Carter e Dekerle (2013) não observaram diferença entre o  $\dot{V}O_2$  final do teste até a exaustão na velocidade crítica sem inclinação ( $3,23 \pm 0,2$  [erro padrão da medida] L/min) comparado a inclinação de 10% ( $3,48 \pm 0,3$  L/min;  $p > 0,05$ ). Por outro lado, Cassirame et al. (2022) observaram que a demanda metabólica do LV<sub>1</sub> e LV<sub>2</sub> aumentou com a elevação da inclinação do teste incremental (inclinações de 0%, 15%, 25% e 40%). Outra medida analisada em nosso estudo, o PDFC, que é apontado como estimativa do segundo limiar fisiológico (CONCONI et al., 1982; KARA et al., 1996), não apresentou diferença estatística entre os testes incrementais. Apesar de nenhum outro estudo ter utilizado essa abordagem para avaliar e comparar a resposta da FC entre testes incrementais no plano e com

inclinação, de Lucas et al. (2021) observaram que a FC na intensidade do LL<sub>2</sub> foi maior no teste horizontal ( $166 \pm 6$  bpm) comparado ao teste com inclinação ( $160 \pm 7$  bpm;  $p < 0,01$ ), contrário aos resultados do presente estudo (TI-V:  $167 \pm 11$  vs TI-I:  $167 \pm 11$ ;  $p = 0,55$ ). Já no estudo de Cassirame et al. (2022), a FC na intensidade do LV<sub>2</sub> não diferiu para nenhuma condição (0%, 15%, 25% e 40% de inclinação), mesmo com um  $\dot{V}O_2$  maior com o aumento da inclinação. No caso do *deoxy*[Hb + Mb]BP, que não foi diferente entre testes (TI-V:  $83,2 \pm 7,5\%$  vs. TI-I:  $86,3 \pm 7,5\%$ ;  $p = 0,39$ ), não foi possível comparar com outros estudos pois, até o presente momento, não foram encontrados estudos que tenham avaliado o comportamento da oxigenação muscular durante um teste incremental com inclinação. Sendo assim, estes resultados sobre o comportamento da *deoxy*[Hb + Mb] indicam um padrão similar com o aumento da intensidade induzida tanto pelo aumento da velocidade como pelo aumento da inclinação, em que o *deoxy*[Hb + Mb]BP ocorre em uma taxa metabólica equivalente em ambas as condições.

A comparação entre os diferentes índices para estimar o segundo limiar fisiológico (LL<sub>2</sub>, PDFC e *deoxy*[Hb + Mb]BP) dentro de cada teste incremental demonstrou que não houve diferença significativa em ambos os testes quando considerada a carga externa absoluta (Tabela 4). Quando comparados esses índices relativo ao  $\dot{V}O_{2PICO}$  ( $\% \dot{V}O_{2PICO}$ ) de cada teste, houve diferença significativa apenas entre o LL<sub>2</sub> ( $89,9 \pm 4,2 \% \dot{V}O_{2PICO}$ ) e o PDFC ( $82,5 \pm 5,6 \% \dot{V}O_{2PICO}$ ;  $p = 0,04$ ) no TI-I, enquanto os outros índices representaram uma demanda metabólica similar. Em relação ao *deoxy*[Hb + Mb]BP, estes achados corroboram de certa forma com Belloti et al. (2013), que observaram uma demanda metabólica semelhante entre *deoxy*[Hb + Mb]BP do vasto lateral e a MFEL na corrida. Embora limitado em número de investigações na corrida, a semelhança do *deoxy*[Hb + Mb]BP com outros índices de corpo inteiro se estende para outras modalidades de exercício. Keir et al. (2015) verificaram demanda metabólica similar no *deoxy*[Hb + Mb]BP, PC, PCR e MFEL no ciclismo. No entanto, a carga externa do *deoxy*[Hb + Mb]BP ( $273 \pm 41$  W;  $p < 0,05$ ) foi maior do que a PC ( $226 \pm 45$  W) e a MFEL ( $223 \pm 39$  W). No remo, Turnes et al. (2019) não encontraram diferença entre o limiar anaeróbio de [La] fixa ( $88,4 \pm 3,7 \% \dot{V}O_{2PICO}$ ) e o *deoxy*[Hb + Mb]BP ( $87,7 \pm 6,0 \% \dot{V}O_{2PICO}$ ). Já no estudo de Possamai et al. (2023), o *deoxy*[Hb + Mb]BP superestimou a MFEL e subestimou a PC tanto para a carga externa relativa (% da potência pico no teste incremental) quanto para a carga interna relativa ( $\% \dot{V}O_{2PICO}$ ). No entanto, carecem na literatura estudos que tenham comparado o *deoxy*[Hb + Mb]BP com outros índices fisiológicos na corrida, principalmente na corrida com inclinação, o que torna difícil a

comparação dos resultados encontrados no presente estudo. Ainda, a diferença observada entre LL<sub>2</sub> e PDFC de 7,3% no TI-I deve ser interpretada com cautela, uma vez que a inclinação parece afetar a resposta geral dessas duas variáveis e, portanto, não parecem representar a mesma intensidade fisiológica nesta condição.

A relação entre a CO<sub>xm</sub> e os índices obtidos nos testes incrementais mostrou uma associação significativamente positiva apenas com a V<sub>pico</sub> e  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$  no TI-V e com o  $\dot{V}O_{2PICO}$  no TI-I. No entanto, a análise comparativa entre as correlações mostrou que a relação entre  $k$  (min<sup>-1</sup>) e LL<sub>2</sub> (% $\dot{V}O_{2PICO}$ ) foi significativamente maior no TI-I ( $r = 0,56$ ) comparado ao TI-V ( $r = -0,04$ ;  $p = 0,016$ ), assim como entre  $k$  (min<sup>-1</sup>) e V<sub>pico</sub> ( $r = 0,70$ ) comparado a  $k$  (min<sup>-1</sup>) e I<sub>pico</sub> ( $r = 0,09$ ;  $p = 0,03$ ). A correlação significativa da CO<sub>xm</sub> com V<sub>pico</sub> no TI-V corrobora com os achados de de Aguiar et al. (2022), que verificaram uma correlação negativa entre a V<sub>pico</sub> e a constante de tempo ( $\tau$ ) da cinética de recuperação do  $\dot{V}O_{2m}$  ( $\tau [s] = 1 \times k [min^{-1}] / 60$ ) na corrida. No entanto, o  $k$  (min<sup>-1</sup>) não apresentou associação com a I<sub>pico</sub>, que seria equivalente a V<sub>pico</sub> no TI-V. Isso poderia ser explicado pela velocidade em que foi realizado o TI-I (i.e., 50% da V<sub>pico</sub>). Uma análise de correlação entre a velocidade referente a 50% da V<sub>pico</sub> e a diferença de estágios entre TI-V e TI-I mostrou uma correlação positiva muito grande ( $r = 0,86$ ), indicando que o desempenho no TI-V afetou em 73,5% o desempenho no TI-I. Contudo, o  $\dot{V}O_{2PICO}$  no TI-I apresentou correlação significativa com o  $k$  (min<sup>-1</sup>), o que corrobora com estudos no ciclismo (BETTERSON et al., 2020; BEEVER et al., 2020; GUZMAN et al., 2020) e no remo (POSSAMAI et al., 2022). Os motivos para explicar as correlações observadas entre a CO<sub>xm</sub> com  $\dot{V}O_{2PICO}$  no TI-I ( $r = 0,62$  [0,10 a 0,87]), mas não em TI-V ( $r = 0,55$  [-0,01 a 0,84]), e com o  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$  no TI-V ( $r = 0,62$  [0,08 a 0,88]), mas não em TI-I ( $r = 0,54$  [-0,05 a 0,85]), não estão totalmente claros e podem não representar uma relação de causa e efeito, uma vez que não foram encontradas diferenças entre essas correlações ( $p > 0,05$ ). Já a diferença entre as correlações de  $k$  (min<sup>-1</sup>) com LL<sub>2</sub> (% $\dot{V}O_{2PICO}$ ) no TI-I ( $r = 0,56$ ) comparado ao TI-V ( $r = -0,04$ ;  $p = 0,016$ ) também é difícil de ser explicada, pois não existem na literatura estudos que tenham relacionado a CO<sub>xm</sub> com os índices baseados no comportamento do [La]. Desta forma, maiores investigações são necessárias para responder se a CO<sub>xm</sub> pode representar uma medida que, de fato, explica melhor as variações dos índices fisiológicos em testes incrementais com inclinação.

Algumas limitações no presente estudo podem ter afetado a determinação e a comparação das medidas fisiológicas avaliadas entre os testes incrementais. Normalmente, os estudos que avaliaram a resposta da *deoxy*[Hb + Mb] durante o teste incremental utilizaram

protocolos de rampa ou sem intervalos entre os estágios (BELLOTI et al., 2013; BOONE et al., 2015; INGLIS et al., 2020). Desta forma, as pausas entre os estágios podem ter influenciado a dinâmica de oxigenação muscular durante o protocolo incremental, que permite uma recuperação parcial da extração de O<sub>2</sub>. Por exemplo, Possamai et al. (2023) observaram um alto erro aleatório (LdC  $\pm$ 13,2%) entre o *deoxy*[Hb + Mb]BP determinado em um teste incremental com estágios de 1 minuto sem intervalo vs. estágios de 3 minutos e intervalo de 30 seg no remo, mesmo que sem diferença entre as médias. Portanto, é provável que esse erro tenha influenciado na diferença do % $\dot{V}O_{2PICO}$  entre *deoxy*[Hb + Mb]BP no estágio de 3 minutos ( $83,3 \pm 8,0\%$ ) e a MFEL ( $79,7 \pm 6,3\%$ ;  $p < 0,05$ ), uma vez que não houve diferença entre *deoxy*[Hb + Mb]BP no estágio de 1 minuto ( $80,9 \pm 11,3\%$ ) e a MFEL ( $79,7 \pm 6,3\%$ ;  $p > 0,05$ ). No entanto, como um dos objetivos do presente estudo era comparar o % $\dot{V}O_{2PICO}$  do *deoxy*[Hb + Mb]BP e do LL<sub>2</sub> a fim de responder se ambos compartilham um mesmo fenômeno fisiológico, foi necessário a utilização de um teste com pausas para a coleta do lactato sanguíneo.

Outra limitação se refere a abordagem utilizada para inferir a extração máxima de O<sub>2</sub> ao final dos testes incrementais (*i.e.*, *deoxy*[Hb + Mb]%CF e  $\Delta$ *deoxy*[Hb + Mb]), que não é a mais adequada para detectar possíveis diferenças entre condições. Nos últimos anos, foi proposto um protocolo para verificar a extração máxima de O<sub>2</sub> por meio dos sinais de *deoxy*[Hb + Mb] a partir de uma oclusão arterial imediatamente ao final do teste incremental no ciclismo (INGLIS, IANNETTA, MURIAS, 2017; INGLIS et al., 2020; IANNETTA et al., 2017), sendo observado um aumento em *deoxy*[Hb + Mb], denominado de extração de “reserva”. Dada as limitações aqui mencionadas sobre os sinais de *deoxy*[Hb + Mb]%CF e  $\Delta$ *deoxy*[Hb + Mb], a utilização desta abordagem poderia fornecer informações mais precisas sobre a amplitude de reserva de extração ao final dos testes incrementais. No entanto, trata-se de uma medida delicada de realizar devido à pressão exercida pelo manguito durante a oclusão arterial no membro avaliado após uma tarefa extenuante, o que causa uma sensação de desconforto considerável. Além disso, a oclusão arterial deve ser feita imediatamente após o término do exercício, portanto a logística para colocação do manguito no local da oclusão seria dificultosa e possivelmente demandaria um tempo maior para a realização da medida após a corrida (principalmente no TI-I), diferente do ciclismo onde os participantes podem pedalar com o manguito já posicionado no membro de avaliação. Mesmo assim, futuros estudos poderiam pensar em estratégias para utilizar essa abordagem e tentar explicar se, de fato, há diferença ou não na extração de O<sub>2</sub> no final do teste incremental com inclinação

comparado ao teste no plano, e se essa diferença está associada com as alterações centrais ( $\dot{V}O_{2PICO}$  e  $FC_{PICO}$ ) observadas entre os dois testes.

Apesar das limitações mencionadas, os resultados do presente estudo fornecem informações importantes sobre a influência da inclinação nas respostas fisiológicas durante os testes incrementais. Mesmo que as explicações para tais diferenças não tenham sido completamente respondidas, a presente pesquisa corrobora com outras que observaram diferenças nas repostas fisiológicas centrais máximas entre a corrida no plano comparado a corrida com inclinação (PAAVOLAINEN et al., 2000; PRINGLE et al., 2002; SCHEER et al., 2018; LEMIRE et al., 2021; DE LUCAS et al., 2021; CASSIRAME et al., 2022). Primeiro, esses resultados impactam de certa forma na escolha de um protocolo de avaliação dependendo da variável de interesse. Neste caso, quando o objetivo for avaliar a resposta cardíaca máxima, a escolha de um protocolo com aumento de inclinação não parece ser a mais adequada. Já quando o objetivo for a avaliação do  $\dot{V}O_{2max}$ , a utilização de um protocolo com velocidade fixa e aumento de inclinação pode ser uma alternativa válida, uma vez que essa resposta parece não diferir em relação à protocolos mais tradicionais realizados no plano, mesmo com um número de estágios menor e, conseqüentemente, um tempo menor.

Outro ponto importante que deve ser considerado é a identificação dos domínios de intensidade baseado na resposta do [La] durante o teste incremental, que parece ser influenciado pela inclinação. Desta forma, em corredores adaptados a percursos irregulares com variações de altimetria (em especial com subida), recomenda-se a utilização de um teste mais específico que reflita a realidade dos treinos e provas da modalidade para um melhor planejamento das sessões de treinamento. No entanto, deve-se ter cautela na utilização de outros parâmetros fisiológicos para determinar os domínios de intensidade, tendo em vista que o aumento de intensidade induzido pelo aumento da inclinação parece afetar a relação entre [La] e FC, representando intensidades diferentes de exercício.

Por fim, a presente pesquisa dá início a exploração da resposta da oxigenação muscular através do NIRS durante teste incremental com inclinação, indicando um comportamento similar com o teste incremental no plano, questionando a relevância da sua utilização durante esses protocolos. Contudo, apesar da abordagem utilizada no presente estudo não conseguir detectar possíveis alterações na extração máxima de  $O_2$  estimada através de  $deoxy[Hb + Mb]\%CF$  e  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$  no GCmed, futuros estudos poderiam utilizar esta ferramenta para avaliar a oxigenação muscular ao final do exercício com inclinação em outros grupamentos musculares para tentar explicar se os mecanismos fisiológicos

responsáveis por alterações centrais ( $\dot{V}O_{2PICO}$  e  $FC_{PICO}$ ) ocorrem por alterações na dinâmica de fluxo e extração microvascular de  $O_2$  acompanhadas pelas mudanças no padrão de corrida.

## 6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados encontrados, pode-se concluir que, comparado ao TI-V a  $FC_{PICO}$  foi menor no TI-I, mas sem diferença no  $\dot{V}O_{2PICO}$ . No entanto, esta diferença não pode ser acompanhada por alterações nos valores de  $O_2P_{PICO}$ ,  $deoxy[Hb + Mb]\%CF$  e  $\Delta deoxy[Hb + Mb]$ , uma vez que não foram diferentes entre os testes incrementais. Além disso, o  $LL_1$  e  $LL_2$  ocorreram em uma intensidade relativa maior no TI-I comparado ao TI-V, que podem estar relacionados a dinâmica de contração muscular predominantes nos testes. Por fim, a identificação de diferentes limiares fisiológicos no TI-I mostrou uma diferença entre o  $LL_2$  e o PDFC, indicando que esses eventos fisiológicos ocorrem em intensidade diferentes durante a corrida com inclinação.

## REFERÊNCIAS

ABE, Daijiro *et al.* Effects of Load and Gradient on Energy Cost of Running. **Journal of Physiological Anthropology**, [S.L.], v. 30, n. 4, p. 153-160, 2011. Japan Society of Physiological Anthropology.

ADAMI, Alessandra; ROSSITER, Harry.B. Principles, insights, and potential pitfalls of the noninvasive determination of muscle oxidative capacity by near-infrared spectroscopy. **Journal of Applied Physiology**, v. 124, n. 1, p. 245-248, 2018.

ADAMI, Alessandra *et al.* Muscle oxidative capacity is reduced in both upper and lower limbs in COPD. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 52, n. 10, p. 2061, 2020.

AUNOLA, S.; RUSKO, H. Does anaerobic threshold correlate with maximal lactate steady-state?. **Journal of Sports Sciences**, v. 10, n. 4, p. 309-323, 1992

BALDUCCI, Pascal *et al.* Comparison of level and graded treadmill tests to evaluate endurance mountain runners. **Journal of Sports Science and Medicine**, v. 15, n. 2, p. 239–246, 2016.

BATTERSON, Philip M. *et al.* Improving biologic predictors of cycling endurance performance with near-infrared spectroscopy derived measures of skeletal muscle respiration: E pluribus unum. **Physiological Reports**, v. 8, n. 2, p. e14342, 2020.

BEAVER, William L.; WASSERMAN, Karlman; WHIPP, Brian J. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. **Journal of Applied Physiology**, v. 60, n. 6, p. 2020-2027, 1986.

BEEVER, Austin T. *et al.* NIRS-derived skeletal muscle oxidative capacity is correlated with aerobic fitness and independent of sex. **Journal of Applied Physiology**, v. 129, n. 3, p. 558-568, 2020.

BELLOTTI, Cecilia *et al.* Determination of maximal lactate steady state in healthy adults: can NIRS help. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 45, n. 6, p. 1208-1216, 2013.

BENTLEY, David J.; NEWELL, John.; BISHOP, David. Incremental Exercise Test Design and Analysis: Implications for performance Diagnostics in Endurance Athletes. **Sports Medicine**, v. 37, n. 7, p. 575–586, 2007.

BHAMBHANI, Yagesh N.; BUCKLEY, Shelley M.; SUSAKI, Toshio. Detection of ventilatory threshold using near infrared spectroscopy in men and women. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 29, n. 3, p. 402-409, 1997.

BINDER, Ronald K. *et al.* Methodological approach to the first and second lactate threshold in incremental cardiopulmonary exercise testing. **European Journal of Preventive Cardiology**, v. 15, n. 6, p. 726-734, 2008.

BLACK, Matthew I. *et al.* Muscle Metabolic and Neuromuscular Determinants of Fatigue

during Cycling in Different Exercise Intensity Domains. **Journal of Applied Physiology**, v. 122, n. 3, p. 446–459, 1 mar. 2017.

BLAND, Martin.; ALTMAN, Douglas G. Measuring Agreement in Method Comparison Studies. **Statistical Methods in Medical Research**, v. 8, n. 2, p. 135–160, abr. 1999.

BONILLA, Aldo Vasquez *et al.* Training zones through muscle oxygen saturation during a graded exercise test in cyclists and triathletes. **Biology of Sport**, v. 40, n. 2, p. 439-448, 2022.

BOONE, Jan *et al.* The impact of pedal rate on muscle oxygenation, muscle activation and whole-body VO<sub>2</sub> during ramp exercise in healthy subjects. **European Journal of Applied Physiology**, v. 115, n. 1, p. 57-70, 2015.

BOONE, Jan *et al.* An integrated view on the oxygenation responses to incremental exercise at the brain, the locomotor and respiratory muscles. **European Journal of Applied Physiology**, v. 116, n. 11, p. 2085-2102, 2016.

BOONE, Jan *et al.* The interrelationship between muscle oxygenation, muscle activation, and pulmonary oxygen uptake to incremental ramp exercise: influence of aerobic fitness. **Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism**, v. 41, n. 1, p. 55-62, 2016.

BORSZCZ, F. K. Concordância da máxima fase estável de lactato sanguíneo com diferentes abordagens de determinação de limiares de intensidade de exercício: Revisões sistemáticas com meta-análises bayesianas. Tese de doutorado—Florianópolis, Santa Catarina, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, 2023.

BURNLEY, Mark; JONES, Andrew M. Oxygen Uptake Kinetics as a Determinant of Sports Performance. **European Journal of Sport Science**, v. 7, n. 2, p. 63–79, jun. 2007.

CAEN, Kevin *et al.* Exercise thresholds on trial: are they really equivalent?. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 50, n. 6, p. 1277-1284, 2018.

CAI, Zong-Yan *et al.* Comparison of lower limb muscle activation during downhill, level and uphill running. **Isokinetics and Exercise Science**, v. 18, n. 3, p. 163-168, 2010.

CARTER, Helen; DEKERLE, Jeanne. Change in critical speed but not its associated metabolic rate when manipulating muscle contraction regimen: Horizontal vs. uphill treadmill running. **Science & Sports**, v. 28, n. 6, p. e179-e182, 2013.

CASSIRAME, Johan *et al.* Physiological implication of slope gradient during incremental running test. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 19, p. 12210, 2022.

CAVAGNA, Giovanni A. Storage and utilization of elastic energy in skeletal muscle. **Exercise and Sport Sciences Reviews**, v. 5, n. 1, p. 89-130, 1977.

CHENG, Boyle *et al.* A new approach for the determination of ventilatory and lactate thresholds. **International Journal of Sports Medicine**, v. 13, n. 07, p. 518-522, 1992.

CONCONI, Ferrari *et al.* Determination of the anaerobic threshold by a noninvasive field test in runners. **Journal of Applied physiology**, v. 52, n. 4, p. 869-873, 1982.

DELOREY, Darren S.; KOWALCHUK, John M.; PATERSON, Donald H. Relationship between pulmonary O<sub>2</sub> uptake kinetics and muscle deoxygenation during moderate-intensity exercise. **Journal of Applied Physiology**, v. 95, n. 1, p. 113-120, 2003.

DEVITA, Paul *et al.* Muscle work is biased toward energy generation over dissipation in non-level running. **Journal of Biomechanics**, v. 41, n. 16, p. 3354-3359, 2008.

DE AGUIAR, Rafael A. *et al.* Near-infrared spectroscopy-derived muscle  $\dot{V}O_2$  kinetics after moderate running exercise in healthy males: reliability and associations with parameters of aerobic fitness. **Experimental Physiology**, v. 107, n. 5, p. 476-488, 2022.

DE LUCAS, R. D. *et al.* A novel treadmill protocol for uphill running assessment: the incline incremental running test (IIRT). **Research in Sports Medicine**, v. 28, n. 04, p. 1–12, 2021.

DICKHUTH, H.-H. *et al.* Ventilatory, lactate-derived and catecholamine thresholds during incremental treadmill running: relationship and reproducibility. **International Journal of Sports Medicine**, v. 20, n. 02, p. 122-127, 1999.

EASTHOPE, Christopher S. *et al.* Reproducibility of performance and fatigue in trail running. **Journal of Science and Medicine in Sport**, v. 17, n. 2, p. 207-211, 2014.

EID, Michael; GOLLWITZER, Mario; SCHMITT, Manfred. **Statistik und forschungsmethoden**. 2017.

FERRARI, Marco; MOTTOLA, Leonardo; QUARESIMA, Valentina. Principles, techniques, and limitations of near infrared spectroscopy. **Canadian Journal of Applied Physiology**, v. 29, n. 4, p. 463-487, 2004.

FONTANA, Federico Y. *et al.* Determination of respiratory point compensation in healthy adults: Can non-invasive near-infrared spectroscopy help?. **Journal of Science and Medicine in Sport**, v. 18, n. 5, p. 590-595, 2015.

GARCIA-TABAR, Ibai; GOROSTIAGA, Esteban M. A “blood relationship” between the overlooked minimum lactate equivalent and maximal lactate steady state in trained runners. Back to the old days? **Frontiers in Physiology**, v. 9, p. 1034, 2018.

GOSTILL, D. L. *et al.* Glycogen utilization in leg muscles of men during level and uphill running. **Acta Physiologica Scandinavica**, v. 91, n. 4, p. 475-481, 1974.

GOULDING, Richie P. *et al.* Effect of priming exercise and body position on pulmonary oxygen uptake and muscle deoxygenation kinetics during cycle exercise. **Journal of Applied Physiology**, v. 129, n. 4, p. 810-822, 2020.

GRASSI, Bruno *et al.* Blood lactate accumulation and muscle deoxygenation during incremental exercise. **Journal of Applied Physiology**, v. 87, n. 1, p. 348-355, 1999.

GRASSI, Bruno *et al.* Muscle oxygenation and pulmonary gas exchange kinetics during cycling exercise on-transitions in humans. **Journal of Applied Physiology**, v. 95, n. 1, p. 149-158, 2003.

GRASSI, Bruno; QUARESIMA, Valentina. Near-infrared spectroscopy and skeletal muscle oxidative function in vivo in health and disease: a review from an exercise physiology perspective. **Journal of Biomedical Optics**, v. 21, n. 9, p. 091313, 2016.

GUZMAN, Steve *et al.* Association between muscle aerobic capacity and whole-body peak oxygen uptake. **European Journal of Applied Physiology**, v. 120, p. 2029-2036, 2020.

HECK, H. *et al.* Justification of the 4-mmol/l lactate threshold. **International Journal of Sports Medicine**, v. 6, n. 03, p. 117-130, 1985.

HELD, Steffen *et al.* Increased oxygen uptake in well-trained runners during uphill high intensity running intervals: A randomized crossover testing. **Frontiers in Physiology**, v. 14, p. 1117314, 2023.

HOFFMAN, Martin D.; ONG, June C.; WANG, Gary. Historical analysis of participation in 161 km ultramarathons in North America. **The International Journal of the History of Sport**, v. 27, n. 11, p. 1877-1891, 2010.

IANNETTA, Danilo *et al.* The near-infrared spectroscopy-derived deoxygenated haemoglobin breaking-point is a repeatable measure that demarcates exercise intensity domains. **Journal of Science and Medicine in Sport**, v. 20, n. 9, p. 873-877, 2017.

IANNETTA, Danilo *et al.* Blood flow occlusion-related O<sub>2</sub> extraction “reserve” is present in different muscles of the quadriceps but greater in deeper regions after ramp-incremental test. **Journal of Applied Physiology**, v. 125, n. 2, p. 313-319, 2018.

INGLIS, Erin Calaine; IANNETTA, Danilo; MURIAS, Juan M. The plateau in the NIRS-derived [HHb] signal near the end of a ramp incremental test does not indicate the upper limit of O<sub>2</sub> extraction in the vastus lateralis. **American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology**, v. 313, n. 6, p. R723-R729, 2017.

INGLIS, Erin Calaine *et al.* Training-induced changes in the respiratory compensation point, deoxyhemoglobin break point, and maximal lactate steady state: evidence of equivalence. **International Journal of Sports Physiology and Performance**, v. 15, n. 1, p. 119-125, 2020.

JONES, Andrew M.; DOUST, Jonathan H. A 1% treadmill grade most accurately reflects the energetic cost of outdoor running. **Journal of Sports Sciences**, v. 14, n. 4, p. 321-327, 1996.

KARA, Mehmet *et al.* Determination of the heart rate deflection point by the Dmax method. **Journal of Sports Sedicine and Physical Fitness**, v. 36, n. 1, p. 31-34, 1996.

KASCH, F. W. *et al.* VO<sub>2</sub>max during horizontal and inclined treadmill running. **Journal of Applied Physiology**, v. 40, n. 6, p. 982-983, 1976.

KEIR, Daniel A. *et al.* Exercise intensity thresholds: identifying the boundaries of sustainable performance. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 47, n. 9, p. 1932-1940, 2015.

KINDERMANN, W.; SIMON, G.; KEUL, J. The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. **European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology**, v. 42, n. 1, p. 25-34, 1979.

LEGRAND, Renaud *et al.* Related trends in locomotor and respiratory muscle oxygenation during exercise. **Medicine & Science in Sports & Exercise**, v. 39, n. 1, p. 91-100, 2007.

LEMIRE, Marcel *et al.* Trail runners cannot reach VO<sub>2</sub>max during a maximal incremental downhill test. **Medicine and Science in Sports Exercise**, v. 52, n. 5, p. 1135-1143, 2020.

LEMIRE, Marcel *et al.* Physiological factors determining downhill vs uphill running endurance performance. **Journal of Science and Medicine in Sport**, v. 24, n. 1, p. 85-91, 2021.

LIMA, Alexandre; BAKKER, Jan. Espectroscopia no infravermelho próximo para a monitorização da perfusão tecidual. **Revista Brasileira de Terapia Intensiva**, v. 23, p. 341-351, 2011.

LUSSIANA, T. *et al.* Effect of slope and footwear on running economy and kinematics. **Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports**, v. 23, n. 4, p. e246-e253, 2013.

MACIEJCZYK, Marcin *et al.* Comparison of physiological and acid-base balance response during uphill, level and downhill running performed at constant velocity. **Acta Physiologica Hungarica**, v. 100, n. 3, p. 347-354, 2013.

MERO, Antti; KOMI, Paavo V. Force-, EMG-, and elasticity-velocity relationships at submaximal, maximal and supramaximal running speeds in sprinters. **European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology**, v. 55, p. 553-561, 1986.

MINETTI, A. E.; ARDIGO, L. P.; SAIBENE, F. Mechanical determinants of the minimum energy cost of gradient running in humans. **Journal of Experimental Biology**, v. 195, n. 1, p. 211-225, 1994.

MINETTI, Alberto E. *et al.* Energy cost of walking and running at extreme uphill and downhill slopes. **Journal of Applied Physiology**, 2002.

MIURA, Takeshi *et al.* Skeletal muscle deoxygenation during exercise assessed by near-infrared spectroscopy and its relation to expired gas analysis parameters. **Japanese Circulation Journal**, v. 62, n. 9, p. 649-657, 1998.

MORTON, Richard H. *et al.* Statistical evidence consistent with two lactate turnpoints during ramp exercise. **European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology**, v. 69, n. 5, p. 445-449, 1994.

MURIAS, Juan M. *et al.* Sex-related differences in muscle deoxygenation during ramp

incremental exercise. **Respiratory Physiology & Neurobiology**, v. 189, n. 3, p. 530-536, 2013.

NASCIMENTO, Eduardo Marcel Fernandes *et al.* Applicability of Dmax method on heart rate variability to estimate the lactate thresholds in male runners. **Journal of Sports Medicine**, v. 2019, 2019.

ORR, George W. *et al.* A computer linear regression model to determine ventilatory anaerobic threshold. **Journal of Applied Physiology**, v. 52, n. 5, p. 1349-1352, 1982.

OSAWA, Takuya *et al.* Attenuation of muscle deoxygenation precedes EMG threshold in normoxia and hypoxia. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 43, n. 8, p. 1406-1413, 2011.

PAAVOLAINEN, Leena; NUMMELA, Ari; RUSKO, H. Muscle power factors and  $\dot{V}O_{2max}$  as determinants of horizontal and uphill running performance. **Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports**, v. 10, n. 5, p. 286–291, 2000.

PADULO, Johnny *et al.* Kinematics of running at different slopes and speeds. **The Journal of Strength & Conditioning Research**, v. 26, n. 5, p. 1331-1339, 2012a.

PADULO, Johnny *et al.* Uphill running at iso-efficiency speed. **International Journal of Sports Medicine**, p. 819-823, 2012b.

PADULO, Johnny *et al.* A paradigm of uphill running. **PloS One**, v. 8, n. 7, p. e69006, 2013.

PALLARÉS, Jesus G. *et al.* Validity and reliability of ventilatory and blood lactate thresholds in well-trained cyclists. **PloS One**, v. 11, n. 9, p. e0163389, 2016.

POSSAMAI, Leonardo Trevisol *et al.* Muscle Oxidative Capacity in Vivo Is Associated With Physiological Parameters in Trained Rowers. **Research Quarterly for Exercise and Sport**, p. 1-8, 2022.

POSSAMAI, Leonardo Trevisol *et al.* Comparison of NIRS exercise intensity thresholds with maximal lactate steady state, critical power and rowing performance. **Biology of Sport**, aceito para publicação, 2023.

PRETTIN, S. *et al.* Changes in blood lactate concentrations during different treadmill exercise test protocols. **The Journal of sports medicine and physical fitness**, v. 51, n. 2, p. 179-184, 2011.

PRINGLE, Jamie S. M. *et al.* Oxygen uptake kinetics during horizontal and uphill treadmill running in humans. **European Journal of Applied Physiology**, v. 88, n. 1–2, p. 163–169, 2002.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **METODOLOGIA DO TRABALHO CIENTÍFICO: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013. 277 p.

RACINAIS, Sebastien; BUCHHEIT, Martin; GIRARD, Olivier. Breakpoints in ventilation, cerebral and muscle oxygenation, and muscle activity during an incremental cycling exercise. **Frontiers in Physiology**, v. 5, p. 142, 2014.

ROBERGS, Robert A.; DWYER, Dan; ASTORINO, Todd. Recommendations for improved data processing from expired gas analysis indirect calorimetry. **Sports Medicine**, v. 40, n. 2, p. 95-111, 2010.

ROBERTS, Thomas J.; BELLIVEAU, Richard A. Sources of mechanical power for uphill running in humans. **Journal of Experimental Biology**, v. 208, n. 10, p. 1963-1970, 2005.

SCHEER, Volker. *et al.*  $\dot{V}O_{2\max}$  Testing in Trail Runners: Is There a Specific Exercise Test Protocol? **International Journal of Sports Medicine**, v. 39, n. 6, p. 456–461, 2018.

SIMONTON, Charles A.; HIGGINBOTHAM, Michael B.; COBB, Frederick R. The ventilatory threshold: quantitative analysis of reproducibility and relation to arterial lactate concentration in normal subjects and in patients with chronic congestive heart failure. **The American Journal of Cardiology**, v. 62, n. 1, p. 100-107, 1988.

SKINNER, James S.; MCLELLAN, Thomas H. The transition from aerobic to anaerobic metabolism. **Research Quarterly for Exercise and Sport**, v. 51, n. 1, p. 234-248, 1980.

SLONIGER, Mark A. *et al.* Lower extremity muscle activation during horizontal and uphill running. **Journal of Applied Physiology**, v. 83, n. 6, p. 2073-2079, 1997.

SNYDER, Ann C.; PARMENTER, Mark A. Using near-infrared spectroscopy to determine maximal steady state exercise intensity. **The Journal of Strength & Conditioning Research**, v. 23, n. 6, p. 1833-1840, 2009.

SNYDER, Kristine L.; FARLEY, Claire T. Energetically optimal stride frequency in running: the effects of incline and decline. **Journal of Experimental Biology**, v. 214, n. 12, p. 2089-2095, 2011.

SNYDER, Kristine L.; KRAM, Rodger; GOTTSCHALL, Jinger S. The role of elastic energy storage and recovery in downhill and uphill running. **Journal of Experimental Biology**, v. 215, n. 13, p. 2283-2287, 2012.

SOUTHERN, William M. *et al.* Reproducibility of near-infrared spectroscopy measurements of oxidative function and postexercise recovery kinetics in the medial gastrocnemius muscle. **Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism**, v. 39, n. 5, p. 521-529, 2014.

SPENCER, Matthew D.; MURIAS, Juan M.; PATERSON, Donald H. Characterizing the profile of muscle deoxygenation during ramp incremental exercise in young men. **European Journal of Applied Physiology**, v. 112, n. 9, p. 3349-3360, 2012.

STEGMANN, H.; KINDERMANN, W.; SCHNABEL, A. Lactate kinetics and individual anaerobic threshold. **International Journal of Sports Medicine**, v. 2, n. 03, p. 160-165, 1981.

STAAB, Jeffery; AGNEW, Jame; SICONOLFI, Steven. Metabolic and performance responses to uphill and downhill running in distance runners. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 24, p. 124–127, 1991.

SWANSON, Stephen C.; CALDWELL, Graham E. An integrated biomechanical analysis of high speed incline and level treadmill running. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 32, n. 6, p. 1146-1155, 2000.

TURNES, Tiago *et al.* Association between deoxygenated hemoglobin breaking point, anaerobic threshold, and rowing performance. **International Journal of Sports Physiology and Performance**, v. 14, n. 8, p. 1103-1109, 2019.

VAN BEEKVELT, Mireille C. P. *et al.* Adipose tissue thickness affects in vivo quantitative near-IR spectroscopy in human skeletal muscle. **Clinical Science**, v. 101, n. 1, p. 21-28, 2001.

VERNILLO, Gianluca. *et al.* Biomechanics and physiology of uphill and downhill running. **Sports Medicine**, v. 47, n. 4, p. 615-629, 2017.

VERNILLO, Gianluca. *et al.* Biomechanics of graded running: Part I - Stride parameters, external forces, muscle activations. **Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports**, v. 30, n. 9, p. 1632–1641, 2020.

YOSHIDA, Takayoshi *et al.* Blood lactate parameters related to aerobic capacity and endurance performance. **European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology**, v. 56, n. 1, p. 7-11, 1987.