

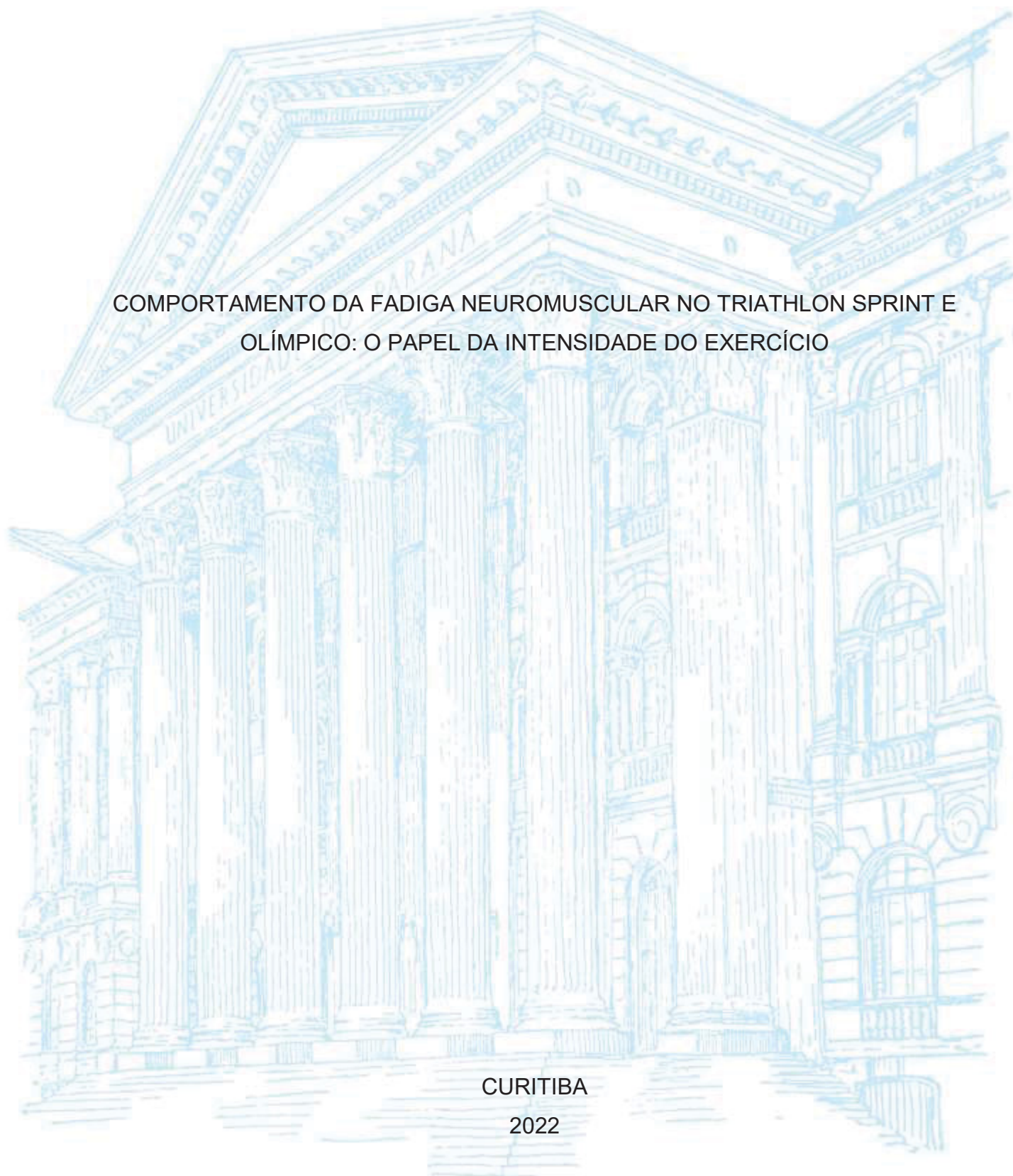
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VINICIUS FERREIRA DOS SANTOS ANDRADE

COMPORTAMENTO DA FADIGA NEUROMUSCULAR NO TRIATHLON SPRINT E  
OLÍMPICO: O PAPEL DA INTENSIDADE DO EXERCÍCIO

CURITIBA

2022



VINICIUS FERREIRA DOS SANTOS ANDRADE

COMPORTAMENTO DA FADIGA NEUROMUSCULAR NO *TRIATHLON SPRINT* E  
OLÍMPICO: O PAPEL DA INTENSIDADE DO EXERCÍCIO

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Educação Física, Setor de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Educação Física.

Orientador: Prof. Dr. Gleber Pereira

CURITIBA

2022

**DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**  
**SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**

Andrade, Vinicius Ferreira dos Santos

Comportamento da fadiga neuromuscular no *Triathlon Sprint* e olímpico : o papel da intensidade do exercício / Vinicius Ferreira dos Santos Andrade. – Curitiba, 2022.  
1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Biológicas, Programa de Pós-Graduação em Educação Física.

Orientador: Prof. Dr. Gleber Pereira.

1. Fadiga. 2. Natação. 3. Ciclismo. 4. Corridas (Atletismo). I. Pereira, Gleber, 1976-. II. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Biológicas. Programa de Pós-Graduação em Educação Física. III. Título.

Bibliotecária: Giana Mara Seniski Silva. CRB-9/1406



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EDUCAÇÃO FÍSICA -  
40001016047P0

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação EDUCAÇÃO FÍSICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de VINICIUS FERREIRA DOS SANTOS ANDRADE intitulada: **COMPORTAMENTO DA FADIGA NEUROMUSCULAR NO TRIATHLON SPRINT E OLÍMPICO: O PAPEL DA INTENSIDADE DO EXERCÍCIO**, sob orientação do Prof. Dr. GLEBER PEREIRA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo Colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 24 de Junho de 2022.

Assinatura Eletrônica  
27/06/2022 16:49:45.0  
GLEBER PEREIRA  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
27/06/2022 16:26:06.0  
ADRIANO EDUARDO LIMA DA SILVA  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO  
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
27/06/2022 18:55:37.0  
ROMULO CÁSSIO DE MORAES BERTUZZI  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

Assinatura Eletrônica  
28/06/2022 08:44:27.0  
FABIANA ANDRADE MACHADO  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ)

---

Novo Edifício do Departamento de Educação Física - Campus Centro Politécnico - Curitiba - Paraná - Brasil  
CEP 81531-960 - Tel: (41) 3361-3072 - E-mail: pgedt@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 199876

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prrpg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>  
e insira o código 199876

Dedico este trabalho ao meus pais, esposa e filho,  
pessoas especiais que fazem toda diferença na minha vida.

## **Agradecimentos**

A Deus, meu agradecimento eterno, por colocar em meu caminho tantas pessoas preciosas.

Aos familiares e amigos, pelo apoio, compreensão e carinho.

Aos atletas que participaram do estudo, por todo esforço e comprometimento com as ações propostas.

Aos colegas do grupo de pesquisa, por terem cedido parte do seu tempo, auxiliando no desenvolvimento do trabalho.

Especialmente ao Prof. Dr. Gleber Pereira, por sua orientação, competência, compreensão e confiança.

Aos membros da banca, nas pessoas do Prof. Dr. Adriano Eduardo Lima da Silva, Profa. Dra. Fabiana Andrade Machado, Prof. Dr. Rômulo Cássio de Moraes Bertuzzi, por aceitarem o convite e apresentarem valiosas contribuições.

À Universidade Federal do Paraná, especialmente ao Centro de Educação Física e Desportos, por incentivar a capacitação dos servidores.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram e estiveram comigo nessa trajetória.

## RESUMO

Apesar do crescente interesse na fadiga gerada por exercícios de *endurance*, a dinâmica dos componentes centrais e periféricos da fadiga neuromuscular durante o *Triathlon* é desconhecida. Este estudo comparou o comportamento da fadiga central e periférica, e o tempo gasto em diferentes domínios de intensidade do exercício entre provas de *Triathlon Sprint* e Olímpico. Quinze triatletas homens realizaram simulações de *Triathlon Sprint* e Olímpico em ordem randomizada e contrabalanceada. A intensidade do exercício foi selecionada de acordo com a velocidade crítica (VC), o limiar de trocas gasosas (LTG) e o ponto de compensação respiratória (PCR). A fadiga central e periférica foi avaliada no *baseline*, após a natação, após o ciclismo e após a corrida, através de alterações na ativação voluntária (AV) e nas respostas de contração do músculo quadríceps ( $Q_{tw,pot}$ ), respectivamente. O  $Q_{tw,pot}$  reduziu do *baseline* até após a natação de maneira similar entre as simulações de *Triathlon (Sprint,  $-17 \pm 11\%$ ; Olímpico,  $-13 \pm 9\%$ )*. O tempo gasto no domínio severo durante a fase de natação também foi similar entre o *Triathlon Sprint (09min52s  $\pm$  03min34s)* e o Olímpico (*14min53s  $\pm$  10min39s*). Após o ciclismo, o  $Q_{tw,pot}$  diminuiu ainda mais e em extensão similar entre as distâncias de *Triathlon (Sprint,  $-31 \pm 15\%$ ; Olímpico,  $-28 \pm 11\%$ )*. Novamente o tempo gasto no domínio severo foi similar entre o *Triathlon Sprint (01min54s  $\pm$  02min00s)* e o Olímpico (*03min02s  $\pm$  04min22s*). Após a corrida, o  $Q_{tw,pot}$  recuperou completamente no *Triathlon Olímpico ( $-4 \pm 10\%$ )*, enquanto no *Triathlon Sprint* ocorreu apenas uma recuperação parcial ( $-20 \pm 11\%$ ). O tempo gasto no domínio pesado durante a fase de corrida foi maior no *Triathlon Olímpico (31min16s  $\pm$  15min37s)* do que no *Sprint (08min38s  $\pm$  08min47s)*. A AV não reduziu após a natação, porém a redução foi similar entre as distâncias de *Triathlon* após o ciclismo (*Sprint,  $-10 \pm 9\%$ ; Olímpico,  $-8 \pm 8\%$ )* e após a corrida (*Sprint,  $-15 \pm 14\%$ ; Olímpico,  $-16 \pm 8\%$ )*. No *Triathlon Sprint*, a velocidade de natação ( $1,07 \pm 0,13$ m/s) foi acima ( $p < 0,001$ ) da velocidade crítica ( $1,01 \pm 0,14$ m/s), a potência do ciclismo ( $179,7 \pm 27,2$ W) foi abaixo do ponto de compensação respiratória ( $216,3 \pm 27,8$ W,  $p < 0,001$ ) e a velocidade de corrida ( $13,7 \pm 1,05$ km/h) foi similar ao ponto de compensação respiratória ( $13,2 \pm 0,70$ km/h,  $p = 0,124$ ). No *Triathlon Olímpico*, a velocidade de natação ( $1,03 \pm 0,13$ m/s) foi similar a velocidade crítica ( $p = 0,392$ ), e tanto a potência do ciclismo ( $165,3 \pm 27,3$ W) quanto a velocidade de corrida ( $12,6 \pm 1,05$ km/h) foram abaixo do ponto de compensação respiratória ( $p \leq 0,007$ ). Conclusão, a fadiga periférica aumenta progressivamente até após o ciclismo, independentemente da distância do *Triathlon*. No entanto, a fadiga periférica recupera completamente apenas após a corrida no *Triathlon Olímpico* e não no *Sprint*. O tempo gasto nos domínios de intensidade do exercício e a intensidade média de cada fase do *Triathlon* impactam no comportamento da fadiga periférica. A fadiga central inicia após o ciclismo e aumenta progressivamente até após a corrida independentemente da distância do *Triathlon*.

Palavras-chave: fadiga central; fadiga periférica; natação; ciclismo; corrida.

## ABSTRACT

Despite the growing interest in endurance exercise fatigue, the dynamic of central and peripheral components of neuromuscular fatigue during triathlon is unknown. This study compared central and peripheral fatigue development and time spent in different exercise intensities domains between Sprint and Olympic distance triathlon. Fifteen male triathletes performed Sprint and Olympic Triathlon simulations in a randomized and counterbalanced order. Exercise intensities were set according to the critical speed (CS), gas exchange threshold (GET) and respiratory compensation point (RCP). Central and peripheral fatigue was evaluated in baseline, post-swimming, post-cycling, and post-running events through changes in voluntary activation level (VAL) and twitch responses of quadriceps muscle ( $Q_{tw,pot}$ ), respectively.  $Q_{tw,pot}$  reduced from baseline to post-swimming similarly between Triathlon simulations (Sprint,  $-17\pm 11\%$ ; Olympic,  $-13\pm 9\%$ ). The time spent in the severe domain during the swimming phase was also similar between Sprint ( $09\text{min}52\text{s}\pm 03\text{min}34\text{s}$ ) and Olympic Triathlon ( $14\text{min}53\text{s}\pm 10\text{min}39\text{s}$ ). In post-cycling,  $Q_{tw,pot}$  further declined to a similar extent between Triathlon distances (Sprint,  $-31\pm 15\%$ ; Olympic,  $-28\pm 11\%$ ). Again, the time spent in the severe domain was similar between Sprint ( $01\text{min}54\text{s}\pm 02\text{min}00\text{s}$ ) and Olympic Triathlon ( $03\text{min}02\text{s}\pm 04\text{min}22\text{s}$ ). In post-running,  $Q_{tw,pot}$  was fully recovered in Olympic Triathlon ( $-4\pm 10\%$ ), whereas there was only a partial recovery of  $Q_{tw,pot}$  in Sprint Triathlon ( $-20\pm 11\%$ ). The time spent in the heavy domain during the running phase was longer in the Olympic ( $31\text{min}16\text{s}\pm 15\text{min}37\text{s}$ ) than in the Sprint Triathlon ( $08\text{min}38\text{s}\pm 08\text{min}47\text{s}$ ). VAL was not reduced in post-swimming, but reduction was similar between Triathlon distances in post-cycling (Sprint,  $-10\pm 9\%$ ; Olympic,  $-8\pm 8\%$ ) and post-running (Sprint,  $-15\pm 14\%$ ; Olympic,  $-16\pm 8\%$ ). In Sprint Triathlon, the swimming speed ( $1.07\pm 0.13\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) was above ( $p<.001$ ) critical speed ( $1.01\pm 0.14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), the cycling power ( $179.7\pm 27.2\text{W}$ ) was below the respiratory compensation point ( $216.3\pm 27.8\text{W}$ ,  $p<.001$ ) and running speed ( $13.7\pm 1.05\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) similar to the respiratory compensation point ( $13.2\pm 0.70\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $p=.124$ ). In Olympic Triathlon, swimming speed ( $1.03\pm 0.13\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) was similar to critical speed ( $p=.392$ ), and both cycling power ( $165.3\pm 27.3\text{W}$ ) and running speed ( $12.6\pm 1.05\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) were below the respiratory compensation point ( $p\leq.007$ ). In conclusion, peripheral fatigue progressed until post-cycling regardless of Triathlon distances. However, peripheral fatigue was fully recovered after running in Olympic but not in Sprint Triathlon. The time spent in the exercise intensity domains and the average intensity of each Triathlon phase impact the behavior of peripheral fatigue. The central fatigue started in post-cycling and progressed until post-running regardless of Triathlon distances.

Keywords: central fatigue; peripheral fatigue; swimming; cycling; running.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA ANÁLISE DA FADIGA CENTRAL ATRAVÉS DA <i>INTERPOLATED TWITCH TECHNIQUE</i> .....	26
FIGURA 2 – CINÉTICA DO CÁLCIO EM REPOSTA A ESTÍMULOS ELÉTRICOS COM INTENSIDADES VARIADAS PARA AVALIAÇÃO DOS MECANISMOS ENVOLVIDOS NA FADIGA PERIFÉRICA .....	29
FIGURA 3 – RELAÇÃO ENTRE A INTENSIDADE E A DURAÇÃO DO EXERCÍCIO .....	34
FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO COMPORTAMENTO DO $\dot{V}O_2$ E DAS CONCENTRAÇÕES DE LACTATO SANGUÍNEO NOS DIFERENTES DOMÍNIOS DE INTENSIDADE DO EXERCÍCIO .....	36
FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E DE FADIGA NEUROMUSCULAR APÓS EXERCÍCIOS COM CARGA CONSTANTE NOS DIFERENTES DOMÍNIOS DE INTENSIDADE DO EXERCÍCIO .....	37
FIGURA 6 – DESENHO EXPERIMENTAL.....	42
FIGURA 7 – DINÂMICA DA AVALIAÇÃO DA FUNÇÃO NEUROMUSCULAR DURANTE O <i>TRIATHLON SPRINT</i> E OLÍMPICO.....	46
FIGURA 8 – COMPORTAMENTO DA CVIM NO <i>TRIATHLON SPRINT</i> E OLÍMPICO .....	52
FIGURA 9 – COMPORTAMENTO DO $Q_{tw,pot}$ NO <i>TRIATHLON SPRINT</i> E OLÍMPICO .....	53
FIGURA 10 – COMPORTAMENTO DO $D_{p100}$ NO <i>TRIATHLON SPRINT</i> E OLÍMPICO.....	54
FIGURA 11 – COMPORTAMENTO DA $D_{p10:100}$ NO <i>TRIATHLON SPRINT</i> E OLÍMPICO.....	55
FIGURA 12 – COMPORTAMENTO DA AV NO <i>TRIATHLON SPRINT</i> E OLÍMPICO ...	56
FIGURA 13 – COMPORTAMENTO DA ONDA M NO <i>TRIATHLON SPRINT</i> E OLÍMPICO.....	56
FIGURA 14 – VELOCIDADE CRÍTICA E VELOCIDADE MÉDIA DURANTE A FASE DE NATAÇÃO NO <i>TRIATHLON SPRINT</i> E OLÍMPICO .....	60

FIGURA 15 – PONTO DE COMPENSAÇÃO RESPIRATÓRIA E POTÊNCIA MÉDIA DURANTE A FASE DE CICLISMO NO <i>TRIATHLON SPRINT</i> E OLÍMPICO.....	61
FIGURA 16 – PONTO DE COMPENSAÇÃO RESPIRATÓRIA E VELOCIDADE MÉDIA DURANTE A FASE DE CORRIDA NO <i>TRIATHLON SPRINT</i> E OLÍMPICO.....	62
FIGURA 17 – TEMPO GASTO EM CADA DOMÍNIO DE INTENSIDADE DO EXERCÍCIO DURANTE A FASE DE NATAÇÃO NO <i>TRIATHLON SPRINT</i> E OLÍMPICO .....	63
FIGURA 18 – TEMPO GASTO EM CADA DOMÍNIO DE INTENSIDADE DO EXERCÍCIO DURANTE A FASE DE CICLISMO NO <i>TRIATHLON SPRINT</i> E OLÍMPICO .....	64
FIGURA 19 – TEMPO GASTO EM CADA DOMÍNIO DE INTENSIDADE DO EXERCÍCIO DURANTE A FASE DE CORRIDA NO <i>TRIATHLON SPRINT</i> E OLÍMPICO .....	65
FIGURA 20 – PERFIL DA INTENSIDADE DURANTE A FASE DE NATAÇÃO NO <i>TRIATHLON SPRINT</i> E OLÍMPICO .....	66
FIGURA 21 – PERFIL DA INTENSIDADE DURANTE A FASE DE CICLISMO NO <i>TRIATHLON SPRINT</i> E OLÍMPICO .....	67
FIGURA 22 – PERFIL DA INTENSIDADE DURANTE A FASE DE CORRIDA NO <i>TRIATHLON SPRINT</i> E OLÍMPICO .....	68

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DISTÂNCIAS DO <i>TRIATHLON</i> .....	21
TABELA 2 – TEMPO MÉDIO PARA A REALIZAÇÃO DE CADA UMA DAS FASES DO <i>TRIATHLON</i> .....	24
TABELA 3 – FUNÇÃO NEUROMUSCULAR DURANTE O <i>TRIATHLON SPRINT</i> E OLÍMPICO.....	57
TABELA 4 – VELOCIDADE CRÍTICA NA NATAÇÃO, LIMAR DE TROCAS RESPIRATÓRIAS, PONTO DE COMPENSAÇÃO RESPIRATÓRIA E $VO_{2PICO}$ DURANTE O CICLISMO E A CORRIDA EM TESTES INCREMENTAIS MÁXIMOS .....	58
TABELA 5 – TEMPO TOTAL, TEMPO DAS FASES E DAS TRANSIÇÕES NO <i>TRIATHLON SPRINT</i> E OLÍMPICO .....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

AV	- Ativação voluntária
Ca <sup>2+</sup>	- Cálcio
CVIM	- Contração voluntária isométrica máxima
Dp <sub>100</sub>	- torque evocado eletricamente através de estímulo duplo de alta frequência
Dp <sub>10:100</sub>	- razão entre o torque evocado eletricamente por estímulos de baixa e alta frequência
EMG	- Eletromiografia
h	- Hora
Hz	- Hertz
H <sup>+</sup>	- Hidrogênio
kg	- Quilograma
km	- Quilômetro
km/h	- Quilômetros por hora
K <sup>+</sup>	- Potássio
LTG	- Limiar de trocas gasosas
m	- Metro
mA	- Miliampère
min	- Minutos
ml/kg/min	- Mililitro por quilograma pro minuto
ms	- Milissegundo
mV	- Milivolt
m/s	- Metros por segundo
N/m	- Newton por metro
$n_p^2$	- <i>Partial eta squared</i>
PC	- Potência crítica
PCr	- Fosfocreatina
PCR	- Ponto de compensação respiratória
P <sub>ETCO<sub>2</sub></sub>	- Pressão parcial expirada do dióxido de carbono
pH	- Potencial hidrogeniônico
P <sub>i</sub>	- Fosfato inorgânico
Q <sub>tw,pot</sub>	- Torque do quadríceps evocado eletricamente

rpm	- Rotações por minuto
s	- Segundo
SENIAM	- <i>Surface EMG for a non-invasive assessment of muscles</i>
SIT	- Contração superposta
SNC	- Sistema nervoso central
VC	- Velocidade crítica
$\dot{V}E$	- Ventilação pulmonar
$\dot{V}E/\dot{V}CO_2$	- Equivalente ventilatório do dióxido de carbono
$\dot{V}E/\dot{V}O_2$	- Equivalente ventilatório de oxigênio
$\dot{V}O_2$	- Consumo de oxigênio
$\dot{V}O_{2max}$	- Consumo máximo de oxigênio
$\dot{V}O_{2pico}$	- Pico do consumo de oxigênio
W	- Watts
$\mu M$	- Micromolar

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	OBJETIVOS .....	19
1.1.1	Objetivo geral .....	19
1.1.2	Objetivos específicos.....	19
1.2	HIPÓTESES .....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>21</b>
2.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS DO <i>TRIATHLON</i> .....	21
2.2	ORIGENS DA FADIGA NEUROMUSCULAR.....	24
2.3	FADIGA NEUROMUSCULAR DURANTE O CICLISMO E A CORRIDA .....	30
2.4	DOMÍNIOS DE INTENSIDADE DO EXERCÍCIO E A FADIGA NEUROMUSCULAR .....	33
2.5	CONCLUSÕES DA REVISÃO DE LITERATURA.....	40
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
3.1	PARTICIPANTES .....	41
3.2	DESENHO EXPERIMENTAL .....	41
3.2.1	Determinação do limiar de trocas gasosas, ponto de compensação respiratória e do $\dot{V}O_{2\text{pico}}$ na corrida e no ciclismo.....	43
3.2.2	Determinação da velocidade crítica na natação .....	44
3.2.3	Simulações de <i>Triathlon Sprint</i> e Olímpico.....	44
3.2.4	Classificação dos domínios de intensidade do exercício durante as fases de natação, ciclismo e corrida .....	46
3.2.5	Avaliação da função neuromuscular.....	47
3.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	50
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>52</b>
4.1	FADIGA NEUROMUSCULAR .....	52
4.2	VELOCIDADE CRÍTICA NA NATAÇÃO, LIMIAR DE TROCAS GASOSAS, PONTO DE COMPENSAÇÃO RESPIRATÓRIA E $VO_{2\text{PICO}}$ NO CICLISMO E NA CORRIDA.....	58
4.3	DESEMPENHO GERAL E EM CADA FASE DO <i>TRIATHLON</i> .....	58
4.4	VELOCIDADE/POTÊNCIA MÉDIA DAS FASES DO <i>TRIATHLON</i> .....	59
4.5	TEMPO GASTO NOS DIFERENTES DOMÍNIOS DE INTENSIDADE DO EXERCÍCIO DURANTE AS PROVAS DE <i>TRIATHLON</i> .....	62

4.6	PERFIL DE INTENSIDADE DURANTE AS PROVAS DE <i>TRIATHLON</i> .....	65
5	<b>DISCUSSÃO</b> .....	<b>69</b>
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>78</b>
	<b>ANEXO 1 – TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO</b> .....	<b>87</b>
	<b>ANEXO 2 – VISÃO PANORÂMICA DO ESPAÇO FÍSICO EM QUE OCORRERAM AS SIMULAÇÕES DE <i>TRIATHLON</i></b> .....	<b>90</b>
	<b>ANEXO 3 – PERCENTUAL DO TEMPO GASTO EM CADA DOMÍNIO DE INTENSIDADE DO EXERCÍCIO DURANTE A FASE DE NATAÇÃO NO TRIATHLON SPRINT</b> .....	<b>91</b>
	<b>ANEXO 4 – ARTIGO PUBLICADO</b> .....	<b>92</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A realização sequencial da natação, ciclismo e corrida em um único evento impõe diferentes demandas musculares ao *Triathlon*. Por exemplo, a natação demanda o recrutamento de braços e pernas para propulsão (FIGUEIREDO et al., 2013; GOURGOULIS et al., 2014). Diferentemente, o ciclismo demanda contrações concêntricas prolongadas do quadríceps durante grande parte da rotação dos pedais (BIJKER; DE GROOT; HOLLANDER, 2002; BROWNSTEIN et al., 2022). Já a corrida demanda a sustentação do peso corporal ao longo de repetidos ciclos de marcha utilizando ações musculares do ciclo alongamento-encurtamento (BIJKER; DE GROOT; HOLLANDER, 2002; HAMNER; SETH; DELP, 2010). Em virtude dos diferentes padrões de movimento, a fadiga neuromuscular deve variar ao longo de uma prova de *Triathlon*. Entretanto, até o momento não temos dados experimentais demonstrando sua dinâmica.

A fadiga neuromuscular pode ser definida como uma redução transitória na capacidade do sistema neuromuscular em gerar força e potência induzida pelo exercício (GANDEVIA, 2001; WEAVID; AMANN, 2019). Essa redução na capacidade de produção de força pode ser causada por uma diminuição na capacidade máxima do sistema nervoso central em recrutar os músculos que estão sendo contraídos (fadiga central) e/ou por alterações a partir da junção neuromuscular que impactam nas propriedades contráteis dos músculos exercitados (fadiga periférica) (GANDEVIA, 2001; WEAVID; AMANN, 2019). Entretanto, os componentes envolvidos no desenvolvimento da fadiga neuromuscular durante o *Triathlon* foram apenas parcialmente investigados. Considerando apenas a combinação de ciclismo e corrida (1 h de ciclismo em um ciclo ergômetro eletromagnético seguido por 10 km de corrida em esteira), a ativação voluntária (AV) do músculo quadríceps, comumente utilizada

como marcador de fadiga central (MILLET et al., 2011), diminuiu  $\cong 6\%$  após o ciclismo e teve um acréscimo de mais  $\cong 2\%$  após a corrida (PAGEAUX; THEUREL; LEPERS, 2017). Esses resultados sugerem que ocorre uma acentuada fadiga central após o ciclismo seguida de uma pequena redução adicional após a corrida. O torque do quadríceps evocado eletricamente ( $Q_{tw,pot}$ ), comumente utilizado como marcador de fadiga periférica (MILLET et al., 2011), também reduziu significativamente após o ciclismo ( $\cong 20\%$ ), porém retornou a valores superiores ao *baseline* após a corrida, sugerindo uma recuperação completa da fadiga periférica ao término do *Triathlon* (PAGEAUX; THEUREL; LEPERS, 2017). Esse grau de recuperação da fadiga periférica está em contraste com estudos prévios que demonstraram a indução de fadiga periférica após a corrida em situações em que não ocorre a realização prévia do ciclismo (ŠKOF; STROJNIK, 2006; WÜTHRICH; EBERLE; SPENGLER, 2014). Desta forma, esses achados sugerem que a realização sequencial de ciclismo e corrida em condições laboratoriais modificam a dinâmica do componente periférico da fadiga neuromuscular do quadríceps durante a corrida. No entanto, permanece desconhecido se esse padrão de comportamento da fadiga periférica do músculo quadríceps também é identificado durante o *Triathlon*. Estudos envolvendo a simulação de competições de *Triathlon* são importantes pois pequenas diferenças entre as configurações do ambiente laboratorial e da prova podem interferir na fadiga neuromuscular. Por exemplo, a maior absorção de impacto da corrida realizada em esteira comparada a corrida em solo, reduz o stress muscular (YAO et al., 2019) e pode influenciar nos níveis de fadiga neuromuscular. Além disso, o efeito da natação na fadiga neuromuscular dos músculos locomotores, bem como a potencial influência em adicionar a fase de natação no comportamento e nos níveis de fadiga neuromuscular após o ciclismo e a corrida também permanecem desconhecidos.

A existência de diferentes distâncias nas provas de *Triathlon* pode constituir um fator de confusão em potencial que afeta o comportamento da fadiga central e periférica. Por exemplo, o ritmo auto selecionado difere consideravelmente entre a distância *Sprint* (750 m de natação, 20 km de ciclismo e 5 km de corrida) e a distância Olímpica (1,5 km de natação, 40 km de ciclismo e 10 km de corrida) (WU et al., 2015). Desta forma, as diferenças de velocidade/potência ao longo do *Triathlon Sprint* e Olímpico, e o tempo gasto em cada domínio de intensidade do exercício, podem produzir diferentes níveis de fadiga central e periférica após cada modalidade de exercício, entretanto até o momento não existem dados experimentais sustentando essas suposições. Devido à distância mais curta do *Triathlon Sprint*, a velocidade/potência média da prova pode ocorrer acima da velocidade crítica (VC) ou do ponto de compensação respiratória (PCR) – que é um marcador indireto e aproximado do limite entre os domínios de intensidade do exercício pesado e severo (AZEVEDO et al., 2019, 2021a; THOMAS et al., 2016), o que pode aumentar a fadiga periférica (BLACK et al., 2017; BURNLEY; JONES, 2018; THOMAS et al., 2016). Por outro lado, devido a distância mais longa do *Triathlon* Olímpico, a velocidade/potência da prova pode ocorrer abaixo da VC/PCR ou do limiar de trocas gasosas (LTG) – que é um marcador direto do limite entre os domínios de intensidade do exercício moderado e pesado (AOYAGI; ISHIKURA; NABEKURA, 2021; BURNLEY; JONES, 2018; POOLE et al., 2021), em que a fadiga central é maior e a fadiga periférica é menor do que a observada em exercícios realizados no domínio severo (KRÜGER et al., 2019; THOMAS et al., 2016). Além disso, como a corrida pode ser realizada em maior intensidade no *Triathlon Sprint* do que no Olímpico, a recuperação da fadiga periférica observada quando a corrida é realizada após o ciclismo (PAGEAUX; THEUREL; LEPERS, 2017) pode ser menor no *Triathlon Sprint* do que no Olímpico,

uma vez que a magnitude de recuperação é inversamente proporcional a intensidade de realização do exercício (CAEN et al., 2019). A recuperação completa da fadiga periférica no *Triathlon* Olímpico pode ocorrer ainda em virtude do maior tempo disponível para a recuperação (CAEN et al., 2021), principalmente no domínio pesado e moderado. Um melhor entendimento do potencial de influência da intensidade média da natação, ciclismo e corrida, e do tempo gasto em cada domínio de intensidade do exercício, na fadiga central e periférica após cada modalidade de exercício no *Triathlon Sprint* e Olímpico pode fornecer suporte para treinadores e atletas planejarem seus treinamentos e as estratégias nutricionais utilizadas para retardar a fadiga neuromuscular e aumentar o desempenho final.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Comparar o comportamento da fadiga neuromuscular entre as provas de *Triathlon Sprint* e Olímpico.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Comparar a magnitude da fadiga central e periférica após a natação, o ciclismo e a corrida entre o *Triathlon Sprint* e Olímpico;

Determinar a velocidade/potência média durante a natação, o ciclismo e a corrida em relação a VC/PCR no *Triathlon Sprint* e Olímpico;

Comparar o tempo gasto em cada domínio de intensidade do exercício (moderado, pesado e severo) durante a natação, o ciclismo e a corrida no *Triathlon Sprint* e Olímpico.

## 1.2 HIPÓTESES

O *Triathlon Sprint* apresentará maiores níveis de fadiga periférica quando comparado ao Olímpico;

A velocidade/potência média durante a natação, o ciclismo e a corrida serão superiores à VC/PCR no *Triathlon Sprint*;

O tempo gasto no domínio severo durante as fases de natação, ciclismo e corrida será maior no *Triathlon Sprint*.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO TRIATHLON

O *Triathlon* é composto pela realização sequencial de natação, ciclismo e corrida em um único evento (BENTLEY et al., 2008). Desde sua inserção nos Jogos Olímpicos de Sydney, no ano 2000, é uma das modalidades esportivas que mais ganha adeptos (FIGUEIREDO; MARQUES; LEPERS, 2016). Essa popularidade atinge tanto atletas de alto nível quanto recreacionais. Um dos motivos para essa aderência talvez seja o desafio aos limites físicos e psicológicos impostos durante a sua realização (TAYLOR; SMITH, 2017). Outro detalhe que auxilia a explicar esse fenômeno é a variedade de configurações que a modalidade apresenta (TABELA 1), atendendo interessados tanto em provas curtas (*Sprint* e Olímpico) quanto em provas longas (*Meio-Ironman* e *Ironman*) (SOUSA et al., 2021).

TABELA 1 – DISTÂNCIAS DO TRIATHLON

Triathlon	Natação (km)	Ciclismo (km)	Corrida (km)
<i>Sprint</i>	0,75	20	5
Olímpico	1,5	40	10
<i>Meio-Ironman</i>	1,9	90	21,1
<i>Ironman</i>	3,8	180	42,2

FONTE: Adaptado de Sousa (2022)

A realização sequencial de disciplinas com características tão diferentes alterna o predomínio das ações musculares, conferindo grande demanda neuromuscular ao longo de uma prova de *Triathlon* (HAUSSWIRTH; BRISSWALTER, 2008; WU et al., 2014). Por exemplo, a fase de natação é realizada em posição pronada, com o corpo imerso em água, e a propulsão é realizada através de movimentos rítmicos dos braços e das pernas (MARTENS; FIGUEIREDO; DALY, 2015). A fase de ciclismo, embora limitada pela trajetória circular dos pedais, requer um padrão de ativação muscular

complexo para a produção ótima de força, com o predomínio de ações musculares concêntricas (HUG; DOREL, 2009). A fase de corrida é realizada através de repetidos ciclos de marcha, com a propulsão do corpo ocorrendo para frente e para cima através de ações musculares do ciclo alongamento-encurtamento (NOVACHECK, 1998). Em virtude desses diferentes padrões de movimento é plausível supor que a fadiga neuromuscular varie ao longo da prova de *Triathlon*.

Outro detalhe que merece atenção é complexidade do gerenciamento da intensidade em cada uma das fases do *Triathlon*. Além de apresentar uma demanda neuromuscular específica, cada fase difere na parcela de contribuição para o tempo total da prova e apresenta um objetivo estratégico (WU et al., 2014). Com relação aos objetivos estratégicos, ocupar uma boa posição ao sair da água é crucial para o desempenho no *Triathlon Sprint* e Olímpico, tendo em vista que os triatletas terão a possibilidade de formar o primeiro grupo de ciclistas e que a presença no primeiro pelotão é determinante para o sucesso (VLECK et al., 2008). Neste sentido, estudos anteriores sugerem que nadar em uma intensidade próxima de 100% (parâmetro obtido com base na realização da distância da fase de natação do *Triathlon* de maneira isolada e contra o relógio) poderá resultar em um bom desempenho geral no *Triathlon* (PEELING; BISHOP; LANDERS, 2005; PEELING; LANDERS, 2009; WU et al., 2014). Tal possibilidade aliada a curta duração da fase (~17% do tempo total do *Triathlon*) fazem com que a natação ocorra em uma intensidade próxima da máxima no *Triathlon Sprint* (PEELING; LANDERS, 2009; TAYLOR; SMITH, 2017). A fase de ciclismo, por sua vez, contribui em maior proporção para o tempo total do *Triathlon* (~51%) e é realizada geralmente em pelotões (WU et al., 2014). A utilização dessa tática ocasiona uma redução na intensidade relativa, devido a uma diminuição na resistência do ar em virtude da realização do pedal atrás de outro ciclista, o que

possibilita ao triatleta “poupar as pernas” para a corrida subsequente (BERNARD et al., 2009; ETXEBARRIA et al., 2021). A estabilização da concentração de lactato sanguíneo (TAYLOR; SMITH, 2017) e do consumo de oxigênio ( $VO_2$ ) (SURIANO; BISHOP, 2010), aliados ao objetivo estratégico da formação de pelotões demonstra que a fase de ciclismo no *Triathlon Sprint* e Olímpico ocorre em intensidade submáxima. Já a fase de corrida (~27% do tempo total) é decisiva para o resultado final, com vários estudos correlacionando positivamente a velocidade a posição geral (LE MEUR et al., 2009; SHARMA; PÉRIARD, 2020; VLECK; BÜRGI; BENTLEY, 2006). Neste sentido, era de se esperar uma intensidade próxima da máxima no *Triathlon Sprint* e Olímpico (HAUSSWIRTH et al., 2010), entretanto a fase de corrida é realizada após uma considerável demanda neuromuscular gerada pelas fases de natação e ciclismo. Consequentemente, o que ocorre é um aumento da velocidade nos momentos finais, conhecido como *sprint* final (GIBSON et al., 2006; NOAKES, 2011; RENFREE et al., 2012; SHARMA; PÉRIARD, 2020). Esse aumento de velocidade ocorre próximo ao término da corrida, no momento em que supostamente os triatletas estariam mais cansados, e é atribuído a um aumento do comando central (GIBSON et al., 2006). Toda essa complexidade no gerenciamento da intensidade ao longo das fases confere ao *Triathlon* um modelo interessante para investigação do comportamento da fadiga neuromuscular.

Entre as configurações do *Triathlon*, principalmente em função do tempo médio para realização de cada uma das fases (TABELA 2) e da intensidade, as distâncias *Sprint* e Olímpico merecem destaque, pois possibilitam a comparação de ações realizadas em diferentes domínios de intensidade do exercício (verificar Seção 2.3). Consequentemente, as distâncias *Sprint* e Olímpico podem apresentar diferentes

comportamentos de fadiga neuromuscular após cada fase do *Triathlon*. Entretanto até o momento não existem investigações envolvendo essas provas.

TABELA 2 – TEMPO MÉDIO PARA REALIZAÇÃO DE CADA UMA DAS FASES DO TRIATHLON

<b>Fase</b>	<b><i>Sprint</i> (min)</b>	<b>Olímpico (min)</b>	<b><i>Meio-Ironman</i> (min)</b>
Natação	11	23	30
Ciclismo	33	67	155
Corrida	20	45	104

FONTE: Adaptado de Wu *et al* (2015)

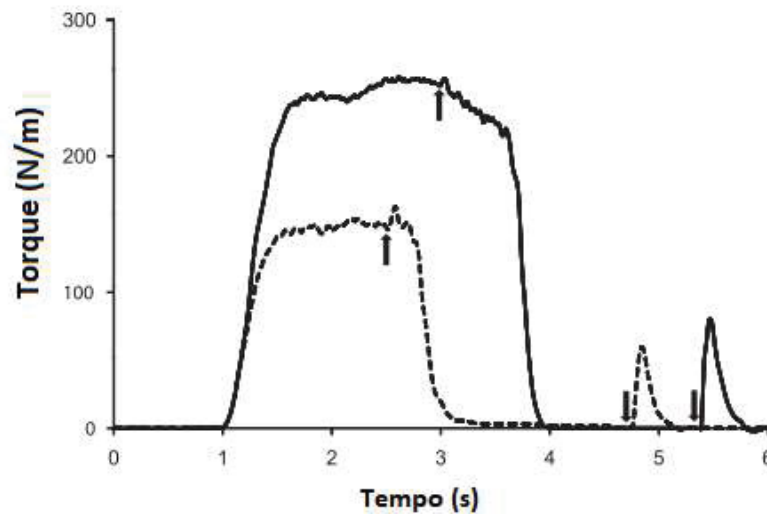
## 2.2 ORIGENS DA FADIGA NEUROMUSCULAR

Na ciência do exercício, a fadiga neuromuscular é definida como uma redução transitória na capacidade máxima do sistema neuromuscular em gerar força e potência, reversível através do descanso (GANDEVIA, 2001; TWOMEY et al., 2017; WEAVID; AMANN, 2019). Com base nessa definição, o protocolo clássico utilizado para avaliar a fadiga consiste na verificação da queda da força voluntária máxima, durante uma contração isométrica realizada após uma tarefa física (MILLET et al., 2011). A contração voluntária isométrica máxima (CVIM) é uma contração breve e de esforço máximo, realizada com feedback e incentivo contínuo (MILLET et al., 2011; TWOMEY et al., 2017). Por estar relacionada aos vários processos que ocorrem ao longo da via motora, desde a geração do impulso elétrico até a contração muscular, a fadiga neuromuscular pode apresentar origem central e periférica (ALLEN; LAMB; WESTERBLAD, 2008; GANDEVIA, 2001; WEAVID; AMANN, 2019). Tais processos são mutuamente dependentes, uma vez que o recrutamento dos motoneurônios depende de comandos descendentes de locais supraespinhais e que esses comandos são controlados pelo feedback aferente dos grupos musculares III/IV induzidos pela

contração muscular (AMANN et al., 2020; HUREAU; ROMER; AMANN, 2018; MILLET et al., 2012).

A fadiga central é representada por uma redução progressiva na ativação voluntária dos músculos durante o exercício e está relacionada aos múltiplos processos que se originam na parte proximal da junção neuromuscular, ou seja, no sistema nervoso central (SNC) (MILLET et al., 2011; TWOMEY et al., 2017). A técnica padrão utilizada para mensurar a AV é a *interpolated twitch technique* (FIGURA 1), a qual consiste na aplicação de um estímulo elétrico supramáximo (simples ou duplos de alta frequência) durante uma CVIM (MERTON, 1954; SHIELD; ZHOU, 2004). Caso ocorra um incremento de força acima da produzida voluntariamente a AV é considerada incompleta (MILLET et al., 2011). Isto indica que algumas unidades motoras não foram recrutadas ou não dispararam rápido o suficiente para produzirem contrações no momento da estimulação (MILLET et al., 2011; TWOMEY et al., 2017). Para quantificar a AV através da *interpolated twitch technique*, a amplitude da contração superimposta é normalizada pela amplitude da contração provocada pelo mesmo tipo de estímulo aplicado no músculo relaxado, logo após a CVIM (MILLET et al., 2011; SHIELD; ZHOU, 2004). A limitação da utilização da *interpolated twitch technique* consiste no fato do comprometimento da AV estar situado em qualquer lugar do SNC, sem a possibilidade de distinção (MILLET et al., 2011; TWOMEY et al., 2017).

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA ANÁLISE DA FADIGA CENTRAL ATRAVÉS DA INTERPOLATED TWITCH TECHNIQUE



FONTE: Adaptado de Martin (2010).

LEGENDA: Traços típicos de torque durante uma contração voluntária isométrica máxima dos extensores do joelho, com aplicação de estímulo elétrico durante a contração (seta para cima) e imediatamente após com a musculatura relaxada (seta para baixo), utilizados para determinar a ativação voluntária no *baseline* (linha contínua) e após o exercício (linha tracejada).

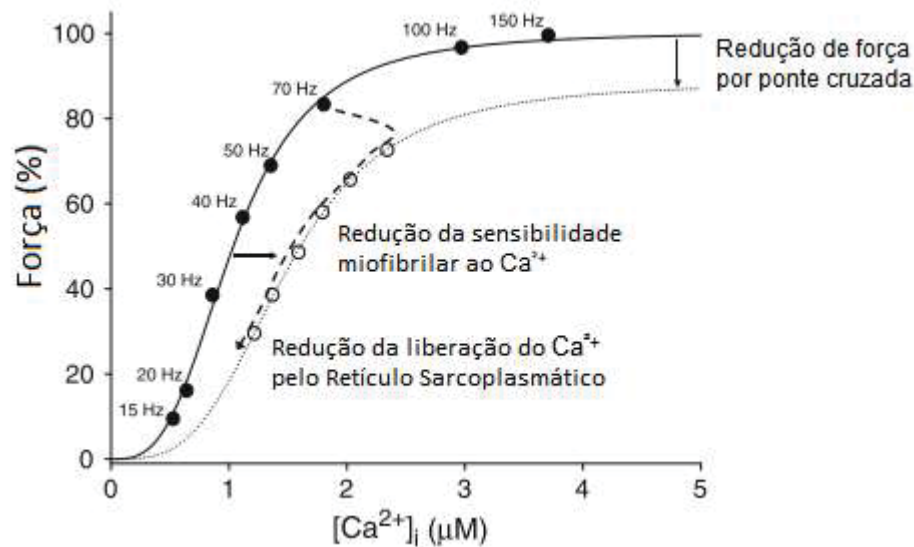
A fadiga periférica, por sua vez, é definida como uma redução na força máxima devido aos processos que ocorrem na porção distal da junção neuromuscular (MILLET et al., 2011; TWOMEY et al., 2017). A técnica padrão utilizada consiste na verificação das respostas de torque ao longo do exercício após a aplicação de estímulos elétricos no nervo motor com a musculatura relaxada (MILLET et al., 2011, 2012). Tal procedimento visa a remoção da influência do SNC, de modo que o estímulo elétrico substitua a ação do cérebro e da medula espinal na contração muscular (MILLET et al., 2012; TWOMEY et al., 2017). Uma diminuição na amplitude da resposta de torque evocada eletricamente (neste estudo representada pelo  $Q_{tw,pot}$ ) ao longo do exercício é utilizada como indicador de fadiga periférica (MILLET et al., 2011). Para a execução do método, primeiramente deve ocorrer a identificação do nervo motor da musculatura investigada (MILLET et al., 2011). Após isso, a intensidade ótima do estímulo elétrico deve ser determinada através de um aumento progressivo na intensidade até que

ocorra uma estabilização das respostas mecânicas e elétricas (MILLET et al., 2012; TWOMEY et al., 2017). Ao atingir a estabilização, deve ocorrer um acréscimo de 20-50% na intensidade ótima para que o máximo recrutamento muscular seja garantido (intensidade supramáxima) mesmo que ocorram pequenas mudanças na posição do eletrodo (MILLET et al., 2012). Entretanto, a intensidade supramáxima deve ser estabelecida com cautela, pois pode ocasionar grande desconforto ao participante e induzir a coativação de outros grupos musculares (MILLET et al., 2012). Neste sentido, Neyroud *et al.* (2014) sugerem a utilização de um acréscimo de 20%, em virtude da boa relação entre a confiabilidade dos parâmetros obtidos e o desconforto gerado (NEYROUD et al., 2014).

Entre os benefícios da utilização da estimulação elétrica para a investigação da fadiga periférica estão o fato de ser uma técnica não invasiva, sensível o suficiente para detectar os limitadores da capacidade contrátil, em virtude da relação entre os mecanismos envolvidos na fadiga periférica e as respostas mecânicas apresentadas após estímulos simples e duplos, de alta (acima da frequência de fusão, por exemplo, 100 Hz) e baixa frequência (abaixo da frequência de fusão, por exemplo, 10 Hz) (JONES, 1996; MILLET et al., 2011). Uma redução na resposta de torque a estímulos duplos de alta frequência é atribuída ao acúmulo de  $K^+$  extracelular (ALLEN; LAMB; WESTERBLAD, 2008; JONES, 1996; MILLET et al., 2011). Nesse tipo de fadiga, após o término da tarefa, ocorre uma rápida recuperação do torque (CARROLL; TAYLOR; GANDEVIA, 2017), como demonstrado após a realização de exercícios de ciclismo (DUCROCQ et al., 2021; KRÜGER et al., 2019). Já uma redução na resposta de torque a estímulos duplos de baixa frequência está relacionada a uma falha no acoplamento excitação-contração, principalmente em virtude de uma redução da liberação de  $Ca^{2+}$  do retículo sarcoplasmático (HILL et al., 2001; MACINTOSH; HOLASH; RENAUD,

2012) e de uma diminuição da sensibilidade miofibrilar ao  $\text{Ca}^{2+}$  (JONES, 1996; PLACE et al., 2010). Esse tipo de fadiga é verificada principalmente após a realização de exercícios excêntricos e possui uma recuperação mais lenta (CARROLL; TAYLOR; GANDEVIA, 2017; JONES, 1996). Cabe destacar, que o torque e as concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  apresentam uma relação sigmoide (FIGURA 2), e os estímulos de baixa frequência atingem a parte íngreme da curva (ALLEN; LAMB; WESTERBLAD, 2008; PLACE et al., 2010). Desta forma, quando a curva se desloca para a direita em função da fadiga, a verdadeira extensão da relação entre o torque e as concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  é deturpada (PLACE et al., 2010). Para solucionar essa desfiguração, os processos relacionados ao  $\text{Ca}^{2+}$  devem ser avaliados através das repostas a estímulos duplos de baixa frequência (por exemplo, 10 Hz) normalizadas por respostas a estímulos duplos de alta frequência (por exemplo, 100 Hz) (MILLET et al., 2011; PLACE et al., 2010). Para completar a análise da fadiga periférica, um estímulo simples permite a investigação da propagação dos potenciais de ação ao longo do sarcolema (onda M) através das repostas de eletromiografia (EMG) (MILLET et al., 2011).

FIGURA 2 – CINÉTICA DO CÁLCIO EM REPOSTA A ESTÍMULOS ELÉTRICOS COM INTENSIDADES VARIADAS PARA AVALIAÇÃO DOS MECANISMOS ENVOLVIDOS NA FADIGA PÉRIFÉRICA



FONTE: Adaptado de Place (2010).

LEGENDA: Relação entre a força e a cinética das concentrações de cálcio ( $[Ca^{2+}]_i$ ) em repouso (círculos pretos) e em fadiga (círculos brancos). Durante a fadiga a força pode reduzir de maneira proporcional as  $[Ca^{2+}]_i$  devido a uma redução de força por ponte cruzada (seta vertical) e/ou a relação entre a força e as  $[Ca^{2+}]_i$  pode ser deslocada para a direita devido a uma redução na sensibilidade miofibrilar ao  $Ca^{2+}$  (seta horizontal). A linha tracejada ilustra o padrão típico da fadiga, que envolve também uma redução da relação entre força e as  $[Ca^{2+}]_i$  devido a uma redução da liberação de  $Ca^{2+}$  pelo retículo sarcoplasmático.

Com todas essas ferramentas à disposição o comportamento da fadiga neuromuscular durante o *Triathlon* pode ser investigado. No entanto, algumas questões metodológicas devem ser levadas em consideração ao se realizar a coleta de dados. Entre elas a característica sequencial das disciplinas que compõe o *Triathlon* e a rápida recuperação dos parâmetros de fadiga periférica (CARROLL; TAYLOR; GANDEVIA, 2017; KRÜGER et al., 2019). Tais fatores são determinantes para a escolha das técnicas que serão utilizadas e do grupo muscular que será investigado. Neste sentido, as transições entre as fases de natação para o ciclismo e do ciclismo para a corrida devem ocorrer em um curto espaço de tempo para preservar a validade ecológica do estudo, o que limita a investigação a um grupo muscular. Além disso, a investigação da fadiga central através da utilização da *interpolated twitch*

*technique*, mesmo sendo incapaz de detectar o local exato do SNC responsável pela diminuição dos níveis de força, apresenta uma medida reprodutível e de rápida realização. Por fim, a utilização de estímulos elétricos de alta e baixa frequência indicam os mecanismos envolvidos na limitação da capacidade contrátil de maneira não invasiva, garantindo a validade dos parâmetros de fadiga periférica sem gerar um desconforto excessivo ao participante.

### 2.3 FADIGA NEUROMUSCULAR DURANTE O CICLISMO E A CORRIDA

A fadiga neuromuscular é dependente da tarefa realizada (BROWNSTEIN et al., 2022; BROWNSTEIN; MILLET; THOMAS, 2021; WÜTHRICH; EBERLE; SPENGLER, 2014). Neste sentido, a magnitude e os mecanismos responsáveis por seu desenvolvimento são determinados pelas características da atividade contrátil, incluindo o modo de contração, a intensidade e a duração da tarefa (BROWNSTEIN; MILLET; THOMAS, 2021; TWOMEY et al., 2017). Consequentemente, a cinética da fadiga é influenciada pelo exercício realizado. Um bom exemplo disso pode ser verificado ao comparar modalidades distintas desenvolvidas sob as mesmas condições. Brownstein *et al.* (2022) submeteram os mesmos participantes, em visitas separadas, a uma tarefa de longa duração envolvendo o ciclismo e a corrida. O volume e a intensidade dos exercícios foram idênticos, 3h a 105% do limiar de trocas gasosas, e ambos resultaram em reduções semelhantes na CVIM, entretanto o ciclismo gerou maiores níveis de fadiga periférica enquanto a corrida gerou maiores níveis de fadiga central, demonstrando a diferença nos mecanismos responsáveis pela redução da força (BROWNSTEIN et al., 2022). O ciclismo e a corrida apresentam características distintas de contração muscular, impondo demandas mecânicas e metabólicas diferenciadas nas musculaturas exercitadas (BIJKER; DE GROOT; HOLLANDER,

2002; MILLET; VLECK; BENTLEY, 2009; WÜTHRICH; EBERLE; SPENGLER, 2014). Por exemplo, o vasto lateral realiza uma ação concêntrica durante a propulsão do pedal no ciclismo, enquanto durante a corrida a aplicação de força ocorre na fase de apoio através de ações do ciclo de alongamento-encurtamento muscular (HOWARD; CONWAY; HARRISON, 2018; HUG; DOREL, 2009; MILLET; LEPERS, 2004). Outros músculos, como o tríceps sural e o bíceps femoral, realizam as mesmas ações do ciclo alongamento-encurtamento (observadas na corrida) durante a saída mecânica do ciclismo, embora com forças de alongamento menores, com menor duração e com menor velocidade de alongamento (HOWARD; CONWAY; HARRISON, 2018; HUG; DOREL, 2009; TOMAZIN; MORIN; MILLET, 2017). Conseqüentemente, a produção de força durante a fase concêntrica do ciclismo apresenta contribuição mínima dos componentes elásticos, o que leva a uma maior dependência dos elementos contráteis (BROWNSTEIN et al., 2022; HUG; DOREL, 2009). Em contraste, a produção de força durante a fase concêntrica da corrida é dependente da reutilização de energia elástica previamente armazenada (BROWNSTEIN et al., 2022; KOMI, 2000). Assim, a eficiência mecânica é maior na corrida do que no ciclismo (CARTER et al., 2000). Neste sentido, uma maior carga metabólica, e conseqüentemente uma maior fadiga periférica, é verificada no ciclismo (BROWNSTEIN et al., 2022; CARTER et al., 2000). Por outro lado, os repetidos ciclos de alongamento-encurtamento durante a corrida aumentam a taxa de disparos dos aferentes musculares do grupo III/IV, diminuindo a excitabilidade do motoneurônio  $\alpha$ , e resultando em maiores prejuízos à função do sistema nervoso, identificados através de uma maior fadiga central na corrida quando comparada ao ciclismo (BROWNSTEIN et al., 2022). Com base nesses mecanismos, ficam justificados os motivos das diferentes etiologias de fadiga

originadas pelo ciclismo e corrida (BROWNSTEIN et al., 2022; TOMAZIN; MORIN; MILLET, 2017; WÜTHRICH; EBERLE; SPENGLER, 2014).

Até o momento a literatura apresenta uma série de evidências sobre o comportamento neuromuscular durante exercícios isolados com diferentes padrões de contração muscular (BROWNSTEIN; MILLET; THOMAS, 2021). Entretanto, vale destacar que não foram encontrados estudos sobre o comportamento da fadiga neuromuscular durante a natação. As investigações encontradas analisaram principalmente o ciclismo (AZEVEDO et al., 2019; DUCROCQ et al., 2021; KRÜGER et al., 2019; LEPERS et al., 2002; THOMAS et al., 2015) e a corrida (BESSON et al., 2020; BOCCIA et al., 2018; MARTIN et al., 2010; PLACE et al., 2004; ROSS et al., 2010), realizados em intensidades variadas e com durações distintas (BROWNSTEIN; MILLET; THOMAS, 2021). No entanto, a análise desses dois exercícios realizados em sequência é limitada. Apenas Pageaux *et al.* (2017) verificaram o comportamento neuromuscular durante a realização sequencial de ciclismo e corrida. Os autores identificaram uma acentuada fadiga central após o ciclismo ( $\cong 6\%$ ), seguida por uma pequena redução adicional após a corrida ( $\cong 2\%$ ), totalizando uma redução de  $\sim 8\%$  na AV após a tarefa completa. Já a fadiga periférica foi expressiva após o ciclismo ( $\cong 20\%$ ), e apresentou uma recuperação após a corrida, de modo que o  $Q_{tw,pot}$  atingiu valores superiores ao *baseline* (PAGEAUX; THEUREL; LEPERS, 2017). Essa recuperação da fadiga periférica após a corrida está em contraste com estudos prévios que demonstraram a indução da fadiga após a corrida em situações em que não ocorre a realização prévia do ciclismo (ŠKOF; STROJNIK, 2006; WÜTHRICH; EBERLE; SPENGLER, 2014). Desta forma, a realização sequencial de ciclismo e corrida sugere uma modificação na dinâmica do componente periférico da fadiga neuromuscular durante a corrida. No entanto, a influência da duração e da intensidade

da corrida na magnitude da recuperação permanece desconhecida. Caen *et al.* (2019) demonstraram que a magnitude de recuperação da capacidade de trabalho é inversamente proporcional ao percentual de potência crítica utilizado no exercício durante a fase de recuperação. Desta forma, podemos supor que a intensidade da corrida deve influenciar na magnitude de recuperação da fadiga periférica. Além disso, a intensidade do exercício determina a perturbação metabólica, tal como as concentrações de lactato sanguíneo, a concentração de fosfocreatina e o pH muscular (BLACK *et al.*, 2017), reforçando a suposição de que a recuperação da fadiga periférica deve ser determinada pela intensidade da corrida realizada após o ciclismo.

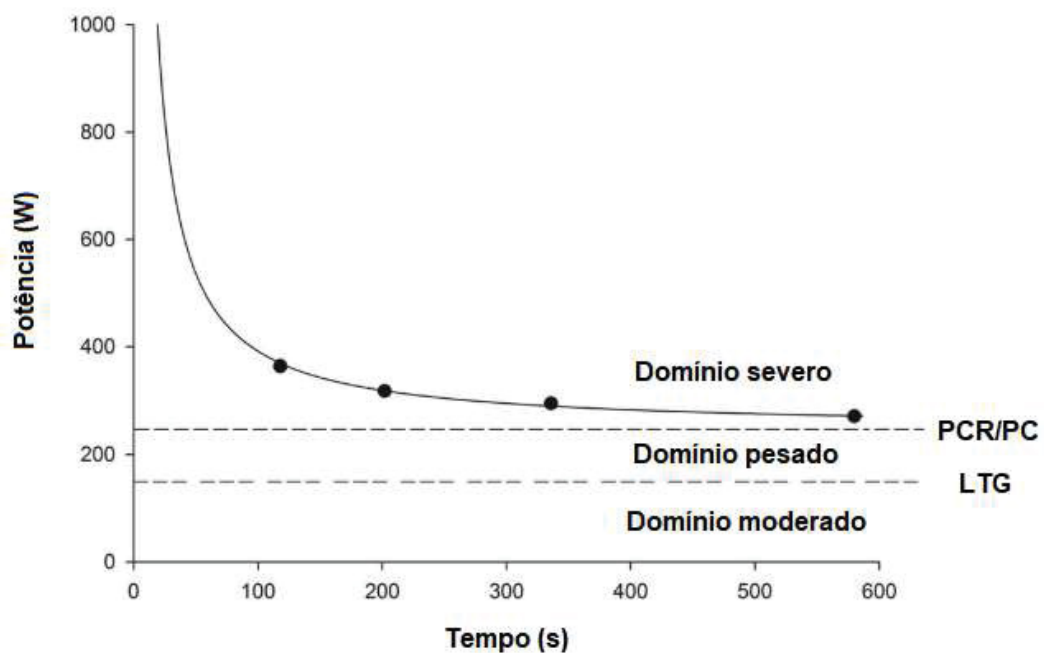
Após analisar as características do *Triathlon*, as origens da fadiga neuromuscular e o comportamento do componente periférico durante a realização sequencial de ciclismo e corrida, identificamos o *Triathlon* como um campo de pesquisa extremamente relevante para ser investigado, pois suas configurações naturalmente modificam o padrão de contração muscular, alteram a intensidade e a duração das tarefas, bem como apresentam a realização sequencial de ciclismo e corrida. Além disso, o *Triathlon* apresenta a distância *Sprint* e Olímpica, que em virtude das durações de suas fases devem modificar o tempo gasto nos diferentes domínios de intensidade do exercício (conforme discutiremos a seguir na seção 2.4), o que possivelmente impactará no comportamento da fadiga neuromuscular.

## 2.4 DOMÍNIOS DE INTENSIDADE DO EXERCÍCIO E A FADIGA NEUROMUSCULAR

Durante exercícios exaustivos com potência/velocidade constante, a tolerância ao exercício aumenta hiperbolicamente em função da diminuição da intensidade (BURNLEY; JONES, 2018; JONES *et al.*, 2019). Essa relação entre a potência/velocidade e a duração do exercício constitui um conceito importante na

fisiologia do exercício, pois fornece uma estrutura sistemática para o entendimento das bases mecanicistas que resultam na fadiga neuromuscular, além de constituir uma ferramenta para o diagnóstico do condicionamento físico, monitoramento do treinamento e compreensão das respostas metabólicas ao exercício (BURNLEY; JONES, 2018; GALÁN-RIOJA et al., 2020; JAMNICK et al., 2020). Com base nos padrões de respostas fisiológicas e metabólicas, a intensidade do exercício é frequentemente categorizada em três domínios distintos (moderado, pesado e severo), delimitados por limiares de transição (FIGURA 3) (BLACK et al., 2017; GALÁN-RIOJA et al., 2020; JONES et al., 2008).

FIGURA 3 – RELAÇÃO ENTRE A INTENSIDADE E A DURAÇÃO DO EXERCÍCIO



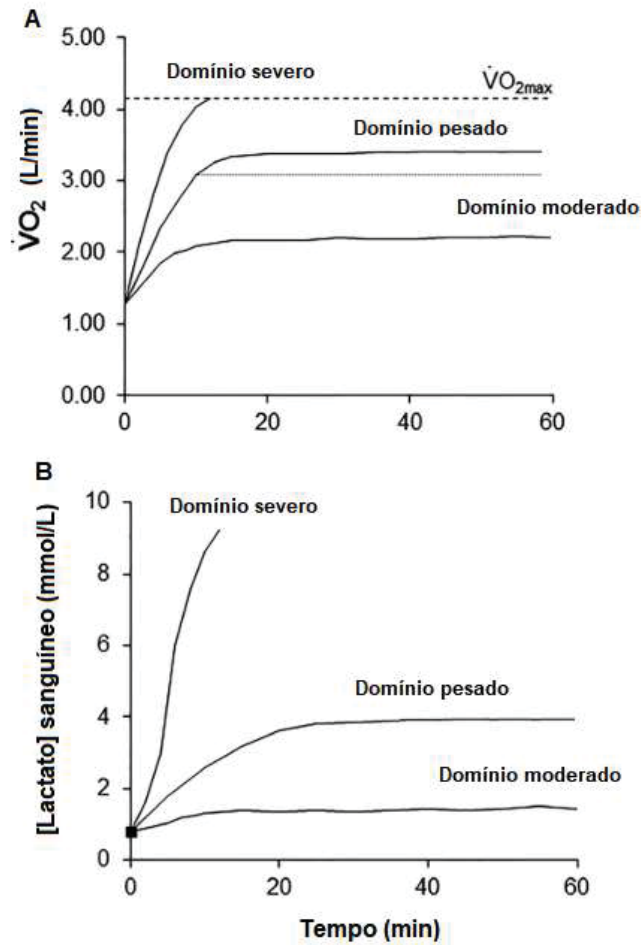
FONTE: Adaptado de Burnley (2018).

LEGENDA: PCR: ponto de compensação respiratória; PC: potência crítica; LTG: limiar de trocas gasosas

O domínio moderado engloba as intensidades abaixo do limiar de trocas gasosas (BLACK et al., 2017; POOLE et al., 2021) e é caracterizado por apresentar

uma estabilização no  $\dot{V}O_2$  após  $\cong 2-3$  min do início exercício (BURNLEY; JONES, 2018; POOLE et al., 2021). Após esse curto período de tempo ocorre também uma estabilização nas concentrações de lactato sanguíneo, com valores próximos aos identificados em repouso, e nos níveis de metabólitos intramusculares (por exemplo,  $[P_i]$  e  $[H^+]$ ) (BLACK et al., 2017). Já o domínio pesado (intensidades acima do LTG e abaixo do PCR/VC) apresenta um componente lento na cinética do  $\dot{V}O_2$  que retarda a obtenção do estado de equilíbrio em  $\cong 10-20$  minutos (JONES et al., 2011). As concentrações de lactato sanguíneo também são estabilizadas, porém em valores superiores aos identificados no domínio moderado (BURNLEY; JONES, 2018; JAMNICK et al., 2020). Em comum e como principal característica, os domínios de intensidade moderado e pesado apresentam um estado de equilíbrio metabólico (GALÁN-RIOJA et al., 2020). De maneira contrária, o domínio de intensidade severo (intensidades acima do PCR/VC) é caracterizado por não apresentar um equilíbrio metabólico e resultar na exaustão ao se atingirem níveis críticos de metabólitos intramusculares e o consumo máximo de oxigênio ( $\dot{V}O_{2max}$ ) (BLACK et al., 2017; GALÁN-RIOJA et al., 2020; JONES et al., 2008). Consequentemente, os padrões fisiológicos e metabólicos apresentados em cada domínio de intensidade do exercício determinam o tempo que o exercício poderá ser sustentado, a magnitude e os mecanismos envolvidos no desenvolvimento da fadiga neuromuscular (BURNLEY; JONES, 2018; JONES; VANHATALO, 2017). A FIGURA 4 apresenta uma representação esquemática do comportamento do  $\dot{V}O_2$  e das concentrações de lactato sanguíneo nos diferentes domínios de intensidade do exercício.

FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO COMPORTAMENTO DO  $\dot{V}O_2$  E DAS CONCENTRAÇÕES DE LACTATO SANGUÍNEO NOS DIFERENTES DOMÍNIOS DE INTENSIDADE DO EXERCÍCIO



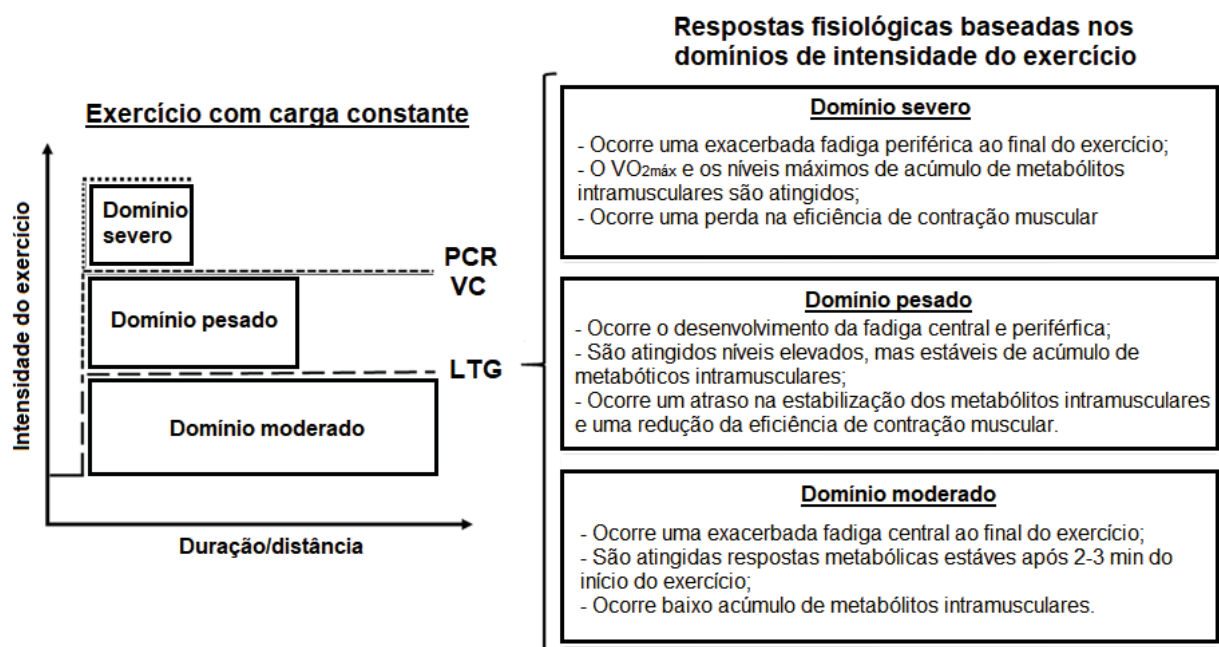
FONTE: Adaptado de Jones (2019).

LEGENDA:  $\dot{V}O_2$ : consumo de oxigênio;  $\dot{V}O_{2max}$ : consumo máximo de oxigênio

Por apresentarem um platô no  $\dot{V}O_2$ , nas concentrações de lactato sanguíneo (JAMNICK et al., 2020; JONES et al., 2019; NIXON et al., 2021) e uma estabilização nas concentrações de fosfocreatina (PCr),  $P_i$  e no pH muscular (JONES et al., 2008), exercícios no domínio moderado e pesado podem ser sustentados por um longo tempo (> 40 min), resultando em maior fadiga central e em menor fadiga periférica quando comparados a exercícios realizados no domínio severo (BURNLEY; JONES, 2018; KRÜGER et al., 2019; THOMAS et al., 2016). Por outro lado, em virtude de não

apresentarem estabilização no  $\dot{V}O_2$ , nas concentrações de lactato sanguíneo (JAMNICK et al., 2020; JONES et al., 2019; NIXON et al., 2021), e por ocasionarem uma redução no pH e na concentração de PCr (BLACK et al., 2017), exercícios realizados no domínio severo, são sustentados por um menor tempo (em média abaixo de 40 min, com a tolerância sendo inversamente proporcional à intensidade) e resultam em maior fadiga periférica e em menor fadiga central quando comparados a exercícios realizados nos domínios moderado e pesado (BURNLEY; JONES, 2018; KRÜGER et al., 2019; THOMAS et al., 2016). Um resumo com os principais impactos de cada um dos domínios de intensidade do exercício nas respostas fisiológicas e na fadiga neuromuscular será apresentado na FIGURA 5.

FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E DE FADIGA NEUROMUSCULAR APÓS EXERCÍCIOS COM CARGA CONSTANTE NOS DIFERENTES DOMÍNIOS DE INTENSIDADE DO EXERCÍCIO



FONTE: Adaptado de Azevedo (2021).

LEGENDA: PCR: ponto de compensação respiratória; VC: velocidade crítica; LTG: limiar de trocas gasosas

Vale ressaltar que o limiar de transição entre os domínios pesado e severo pode ser estimado por métodos distintos, como o ponto de compensação respiratória e a potência/velocidade crítica (AZEVEDO et al., 2021b; GALÁN-RIOJA et al., 2020). A precisão e similaridade de cada um desses métodos para delimitar a transição de um estado estável para um estado de desequilíbrio metabólico é amplamente debatida (GALÁN-RIOJA et al., 2020; JONES et al., 2019), com evidências apontando similaridades (BERGSTROM et al., 2013; CEREUZUELA-ESPEJO et al., 2018; KEIR et al., 2015) e distinções (CAEN et al., 2018; LEO et al., 2017). Entre os benefícios da utilização do PCR destacamos a necessidade de uma única visita ao laboratório e a possibilidade do teste ser submáximo, caso não tenha por objetivo a determinação do  $\dot{V}O_{2\text{máx}}$  (GALÁN-RIOJA et al., 2020). Contudo, em virtude de um atraso acumulado na cinética de  $\dot{V}O_2$  durante o teste incremental ao se transferir a intensidade obtida no teste para um exercício com intensidade constante é necessária a realização de um ajuste na potência/velocidade associada ao PCR (THOMAS et al., 2016; WHIPP et al., 1981). Já a potência/velocidade crítica apresenta como benefício a aplicação direta no exercício para a demarcação da zona de transição metabólica entre os domínios de intensidade pesado e severo (GALÁN-RIOJA et al., 2020). Entretanto, a exigência da realização de esforços máximos em diferentes distâncias para o cálculo da potência/velocidade crítica (JONES et al., 2019; TOUBEKIS; TOKMAKIDIS, 2013) aumenta o número de visitas ao laboratório, o que pode dificultar sua utilização em estudos envolvendo atletas (em virtude da necessidade de alterações na rotina de treinos), principalmente no *Triathlon* que requer o cálculo da potência/velocidade crítica em cada modalidade. Na determinação da potência crítica, a literatura sugere a utilização de distâncias que possibilitem a realização de esforços máximos com duração entre 3 e 15 min (JONES et al., 2019; TOUBEKIS; TOKMAKIDIS, 2013). Além

disso, para um aumento na precisão do cálculo é aconselhada a realização do teste em três distâncias e que o intervalo de tempo entre a distância menor e a maior seja de mínimo 5 min (JONES et al., 2019). Sendo assim, para uma maior aderência a estudos em que há um elevado número de visitas ao laboratório para a realização dos testes, a utilização do PCR parece ser mais atraente quando se trabalha com atletas profissionais ou amadores (JAMNICK et al., 2020).

Gostaríamos de destacar também que o comportamento fisiológico, metabólico e neuromuscular discutido até então, foi identificado através de exercícios com carga constante. No entanto, exercícios com carga autosselecionada, como o *Triathlon*, irão resultar na transição entre os domínios de intensidade do exercício (AZEVEDO et al., 2021b). Conseqüentemente, a transição entre os domínios poderá impactar no comportamento da fadiga central e periférica. Por exemplo, perturbações intramusculares nas concentrações de  $P_i$  e no pH, decorrentes de um exercício no domínio severo com carga constante até a exaustão, podem apresentar recuperação parcial se durante a fase de recuperação a intensidade do exercício for reduzida para o domínio pesado (CHIDNOK et al., 2013b). De fato, dependendo da duração do exercício, a intensidade autosselecionada irá transitar do domínio severo para o domínio pesado (BLACK et al., 2015; CHIDNOK et al., 2013a), o que pode resultar em uma recuperação parcial da perturbação metabólica provocada pelo domínio severo na parte inicial do exercício, prevenindo assim o desenvolvimento prematuro da fadiga periférica. Interessantemente, algumas descobertas demonstram que a distribuição da intensidade durante um exercício autosselecionado (*pace*) não interfere nos níveis de fadiga periférica ao final da tarefa (AZEVEDO et al., 2021a; LEPERS et al., 2008). No entanto, mais evidências analisando principalmente o impacto do tempo gasto em cada domínio de intensidade do exercício (AZEVEDO et al., 2021b) e da intensidade

média do exercício no comportamento da fadiga neuromuscular são necessárias para esclarecer essa questão, principalmente no *Triathlon*.

Com base no que foi apresentado, fica evidente a importância dos domínios de intensidade do exercício para o comportamento da fadiga neuromuscular. No entanto, as principais evidências sobre o tema são baseadas em exercícios com carga constante. Desta forma, a investigação da influência da intensidade (através da intensidade média, do tempo gasto em cada domínio do exercício e do perfil de distribuição ao longo do exercício) durante tarefas auto selecionadas, como nas fases de natação, ciclismo e corrida do *Triathlon Sprint* e Olímpico merece atenção.

## 2.5 CONCLUSÕES DA REVISÃO DE LITERATURA

A realização sequencial de três modalidades de exercício em um único evento confere grande demanda neuromuscular ao *Triathlon*. No entanto, o comportamento dos componentes centrais e periféricos da fadiga neuromuscular durante o *Triathlon* é desconhecido, apenas temos a evidência de que a realização sequencial de ciclismo e corrida modificam a dinâmica do componente periférico durante a corrida. Além disso, a dinâmica do comportamento da fadiga neuromuscular é influenciada pelos domínios de intensidade do exercício, o que requer a realização de tarefas com durações e intensidades distintas, como o *Triathlon Sprint* e Olímpico, para uma identificação mais ampla dos mecanismos neuromusculares que limitam o desempenho físico.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 PARTICIPANTES

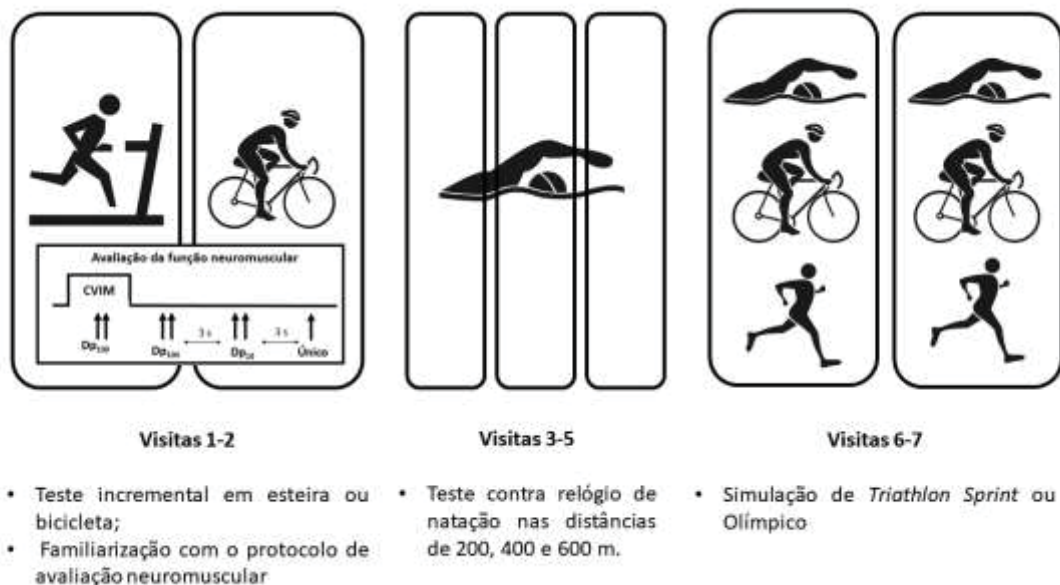
O tamanho da amostra foi estimado utilizando o software G\*Power (version 3.1.9.2). Para que o  $Q_{tw,pot}$  após a realização sequencial de ciclismo e corrida (PAGEAUX; THEUREL; LEPERS, 2017), resulte em um tamanho de efeito grande, um alpha de 0,05 e um poder de 0,80, seriam necessários 10 participantes. Desta forma, buscando minimizar a influência de possíveis desistências, 15 triatletas homens (média±desvio-padrão; idade=30,9±6,2 anos; massa corporal=75,3±7,2 kg; estatura=177,7±5,8 cm), com classificação de *performance* nível 3 (DE PAUW et al., 2013), participaram voluntariamente do estudo. Todos competiam a nível regional no *Triathlon Sprint* e Olímpico, seguiam um programa de treinos regular (5–6 dias por semana, 2–4 h por dia, 4,9±2,4 anos de experiência no treinamento de *Triathlon*), e estavam no período pré-competitivo do treinamento. Antes de iniciar no estudo, os participantes assinaram um termo de consentimento livre e esclarecido (ANEXO 1) e foram informados que estavam livres para desistir a qualquer momento. O estudo foi realizado de acordo com a Declaração de Helsinki e aprovado pelo comitê de ética da Universidade Federal do Paraná (processo número 11059219.8.0000.0102).

#### 3.2 DESENHO EXPERIMENTAL

Os participantes foram avaliados em 7 dias diferentes. Nas visitas 1 e 2 (ordem randomizada, 72 h de intervalo entre as visitas), os participantes realizaram um teste incremental em esteira ou bicicleta para a determinação do LTG, PCR e do  $\dot{V}O_{2pico}$ . Em ambas as visitas, 30 min após o teste incremental, os participantes foram familiarizados com os procedimentos do protocolo de avaliação neuromuscular. Nas

visitas 3, 4 e 5 (24 h de intervalo entre as visitas), os participantes realizaram testes contra relógio de natação no estilo crawl nas distâncias de 200, 400, e 600 m (ordem randomizada) para a determinação da velocidade crítica de natação (TOUBEKIS; TOKMAKIDIS, 2013). Nas últimas duas visitas, utilizando um desenho randomizado e contrabalanceado, os participantes realizaram a simulação de *Triathlon Sprint* ou Olímpico. A ordem aleatória e contrabalanceada foi determinada utilizando um website livre (<http://www.jerrydallal.com/random/permute.htm>). As simulações de *Triathlon* foram realizadas na mesma hora do dia ( $\pm 1$  h) para evitar efeitos do ciclo circadiano (FERNANDES et al., 2014) e separadas por 7 dias. Os participantes foram orientados a evitar exercícios extenuantes, a replicar sua dieta nas 48 h antecedentes ao teste (baseada em recordatório alimentar preenchido na visita 1) e abster-se da ingestão de cafeína nas últimas 24 h. O desenho experimental está representado na FIGURA 6.

FIGURA 6 – DESENHO EXPERIMENTAL



FONTE: O autor (2022).

LEGENDA: CVIM: contração voluntária isométrica máxima;  $Dp_{100}$ : aplicação de estímulo elétrico duplo de alta frequência;  $Dp_{10}$ : aplicação de estímulo elétrico duplo de baixa frequência.

### 3.2.1 Determinação do limiar de trocas gasosas, ponto de compensação respiratória e do $\dot{V}O_{2\text{pico}}$ na corrida e no ciclismo

Os participantes realizaram um teste incremental máximo (KEIR et al., 2018) em esteira multiprogramável (Inbramed<sup>®</sup>, Super ATL Model) e em sua própria bicicleta atada ao *CompuTrainer* (RacerMate Pro<sup>®</sup>). No teste de esteira, os participantes aqueceram por 5 min a 8 km/h; após isso, mantendo 1% de inclinação, a velocidade foi aumentada para 10 km/h e recebeu acréscimos de 1 km/h a cada minuto até a exaustão voluntária (PUCCINELLI et al., 2020). No teste de bicicleta, após 5 min a 50 W, a potência recebeu acréscimos de 25 W a cada minuto até a exaustão. Os participantes foram orientados a manter uma cadência entre 70 e 80 rpm. A exaustão foi definida ao ser observada uma rotação abaixo de 70 rpm por mais de 5 segundos mesmo com forte encorajamento verbal (FELIPPE et al., 2020).

Durante ambos os testes incrementais, a troca gasosa foi determinada respiração a respiração utilizando um sistema metabólico portátil (K4b<sup>2</sup>, Cosmed<sup>®</sup>), calibrado antes de cada teste seguindo as recomendações do fabricante. Foram determinados o  $\dot{V}O_2$ , a ventilação pulmonar ( $\dot{V}E$ ), os equivalentes ventilatórios de oxigênio ( $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ ) e dióxido de carbono ( $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ ), e a pressão parcial expirada para oxigênio ( $P_{ET}O_2$ ) e dióxido de carbono ( $P_{ET}CO_2$ ). Os dados brutos foram processados para exclusão de *outliers* (valores maiores que três desvios padrões da média local), interpolados linearmente segundo a segundo e agrupados em média a cada 20 segundos, utilizando rotina sob medida do software Matlab (version 2019a). O LTG foi determinado a partir de um aumento de  $\dot{V}E/\dot{V}O_2$  sem um aumento simultâneo de  $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ , e do primeiro aumento da  $P_{ET}O_2$ . O PCR foi determinado no momento em que o  $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$  apresentou um aumento e a  $P_{ET}CO_2$  apresentou uma deflexão (MEYER et al., 2005). Dois avaliadores independentes identificaram o LTG e o PCR

utilizando inspeção visual, e um terceiro avaliador foi solicitado quando necessário. O  $\dot{V}O_{2\text{pico}}$  foi considerado como a maior média de 20 segundos ao longo do teste incremental (THOMAS et al., 2016). Em virtude do atraso acumulado na cinética de  $\dot{V}O_2$  durante um teste incremental, a potência/velocidade do LTG, PCR e  $\dot{V}O_{2\text{pico}}$  foi corrigida em 2/3 do incremento de carga (16,6 W para o ciclismo e 0,66 km/h para a corrida) para todos os participantes, conforme sugerido previamente (THOMAS et al., 2016; WHIPP et al., 1981).

### 3.2.2 Determinação da velocidade crítica na natação

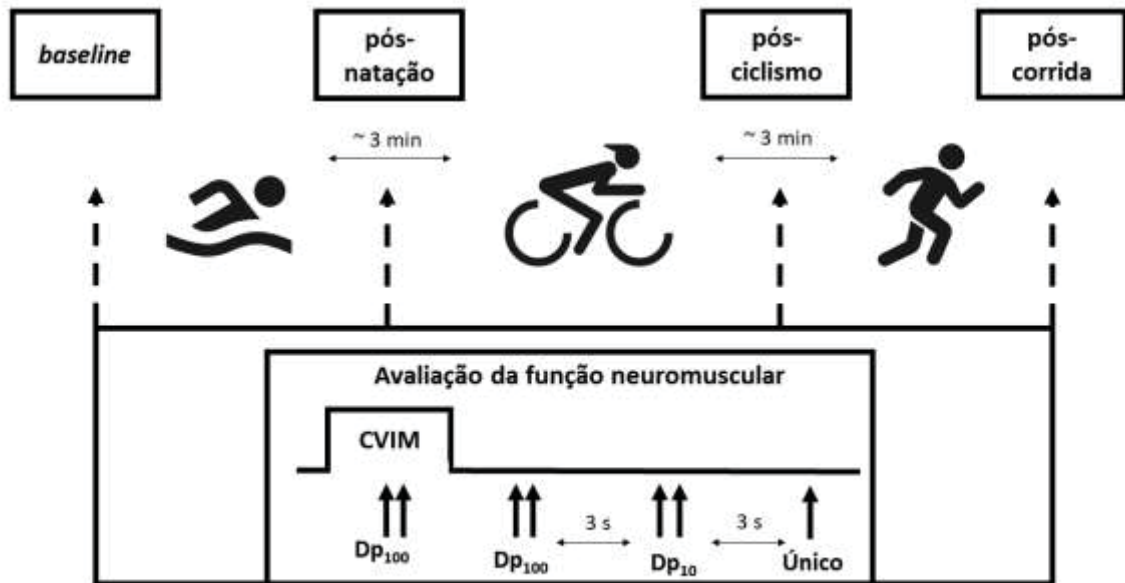
Os participantes realizaram três testes contra relógio em diferentes distâncias (200, 400, e 600 m) e em diferentes dias, para determinação da VC na natação (TOUBEKIS; TOKMAKIDIS, 2013). Os testes contra relógio eram precedidos por 400 m de aquecimento em intensidade autosselecionada, seguidos por 5 min de repouso dentro da água. A VC foi determinada através da inclinação da reta de regressão linear entre a distância e o tempo obtido em cada teste (TOUBEKIS; TOKMAKIDIS, 2013).

### 3.2.3 Simulações de *Triathlon Sprint* e Olímpico

Os participantes realizaram o *Triathlon Sprint* e Olímpico, o mais rápido possível, de maneira individual, e em condições simuladas: 1) natação em uma piscina coberta, com 25 m de comprimento e 5 raias; 2) ciclismo em sua própria bicicleta atada ao *CompuTrainer*; e 3) corrida em uma pista de atletismo de 400 m, aberta e sintética. Como em uma competição real, os participantes receberam feedback contínuo da distância, tempo, potência e velocidade. Além disso, utilizaram as estratégias de hidratação e nutrição que estavam habituados. A primeira avaliação da função

neuromuscular foi realizada antes da natação (*baseline*). Após isso, os participantes realizaram um aquecimento de 400 m de natação em ritmo autosselecionado, seguido por 5 min de repouso dentro da água, para então iniciar a fase de natação do *Triathlon*. Ao completar a fase de natação, os participantes saíram da piscina e realizaram novamente a avaliação da função neuromuscular (pós-natação). A cadeira de avaliação neuromuscular estava posicionada  $\cong 10$  m da piscina. Depois disso, os participantes realizaram a fase de ciclismo utilizando sua própria bicicleta. As configurações utilizadas no teste incremental, tais como a altura do banco da bicicleta, foram mantidas. A função neuromuscular foi reavaliada imediatamente após o participante completar a fase de ciclismo (pós-ciclismo). A cadeira de avaliação neuromuscular estava posicionada  $\cong 2$  m da bicicleta. Logo após, os participantes correram  $\cong 30$  m até a pista de atletismo e realizaram a fase de corrida. Imediatamente após completar a fase de corrida, os participantes retornaram para a última avaliação da função neuromuscular (pós-corrida). As fases de transição, incluindo a avaliação da função neuromuscular, não levaram mais que 3 min para serem realizadas, e tiveram duração similar a outros estudos que simularam provas de *Triathlon* (HAUSSWIRTH et al., 2010; TAYLOR; SMITH, 2013). Além disso, o início da avaliação neuromuscular foi padronizado em 30 s após cada fase de exercício na tentativa de capturar a magnitude da fadiga o mais rápido possível (CARROLL; TAYLOR; GANDEVIA, 2017; KRÜGER et al., 2019). A FIGURA 7 ilustra a dinâmica da avaliação neuromuscular durante as simulações de *Triathlon Sprint* e Olímpico. Já o ANEXO 2 apresenta uma visão panorâmica do espaço físico em que ocorreram as simulações de *Triathlon*.

FIGURA 7 – DINÂMICA DA AVALIAÇÃO DA FUNÇÃO NEUROMUSCULAR DURANTE O TRIAHTLON SPRINT É OLÍMPICO



FONTE: O autor (2022).

LEGENDA: CVIM: contração voluntária isométrica máxima;  $Dp_{100}$ : aplicação de estímulo elétrico duplo de alta frequência;  $Dp_{10}$ : aplicação de estímulo elétrico duplo de baixa frequência.

### 3.2.4 Classificação dos domínios de intensidade do exercício durante as fases de natação, ciclismo e corrida

Os tempos parciais durante a natação e a corrida foram registrados a cada 25 m e 200 m, respectivamente, utilizando cronômetro. A potência durante o ciclismo foi registrada a cada segundo através da interface do *CompuTrainer* conectada ao computador. A partir da velocidade e potência foi determinado o tempo gasto em cada domínio de intensidade do exercício durante a natação (ANEXO 3), ciclismo e corrida. Durante a fase de natação, a VC foi considerada o limite entre os domínios pesado e severo (JONES et al., 2019; TOUBEKIS; TOKMAKIDIS, 2013). Durante as fases de ciclismo e corrida, o domínio moderado foi definido em velocidade/potência  $\leq$  LTG, o domínio pesado em velocidade/potência  $>$  LTG e  $<$  PCR, e o domínio severo em velocidade/potência  $\geq$  PCR (ESTEVE-LANAO et al., 2017; POOLE et al., 2021). O

tempo absoluto e relativo gasto em cada domínio de intensidade do exercício foi registrado para todas as fases do exercício.

### 3.2.5 Avaliação da função neuromuscular

A função neuromuscular foi avaliada utilizando estímulos elétricos no nervo femoral direito e respostas de torque dos extensores de joelho da perna direita. Os participantes sentaram-se em uma cadeira feita sob medida, com o ângulo da articulação do quadril ajustado a 120°, o ângulo da articulação do joelho a 90° e o tornozelo direito fixado a uma célula de carga (dinamômetro de tração/compressão, amplitude de 200 kgf), como descrito previamente (SANTOS et al., 2020). O torque foi determinado através da multiplicação da resultante de força com a medida de comprimento entre o joelho e as articulações do tornozelo e com a gravidade.

Antes da fixação dos eletrodos nos pontos de interesse, a pele dos participantes era raspada e limpa com álcool para reduzir a impedância para menos de 5 k $\Omega$ . Para estimulação elétrica do nervo femoral foram fixados eletrodos monopolares de superfície (Ambu Neuroline® 715) no triângulo inguinal (cátodo) e na prega glútea oposta ao triângulo inguinal (ânodo). Para medir a atividade eletromiográfica do músculo vasto lateral foram fixados eletrodos bipolares de superfície de 10 mm de diâmetro, contendo hidrogel adesivo sólido de superfície total (Kendall®, Medi-trace), com distância intereletrodos de 20 mm, já o eletrodo de referência foi fixado na patela. A colocação de todos os eletrodos seguiu as diretrizes do SENIAM (HERMENS et al., 2000). Para facilitar a replicação do local dos eletrodos entre as simulações de *Triathlon*, a coxa de cada participante foi mapeada usando pontos de referência anatômicos (por exemplo, a borda da patela), bem como marcas na pele (por exemplo, sardas e cicatrizes) (AZEVEDO et al., 2019). Além disso, a

localização dos eletrodos de EMG foi marcada na pele do participante com tinta permanente. Para evitar deslocamentos nos eletrodos fixos de estimulação elétrica foi colocada uma fita cirúrgica hipoalergênica à prova d'água (TransporeMR, 3M do Brasil Ltda<sup>®</sup>). Todos os eletrodos de EMG foram substituídos após cada momento de avaliação. Os sinais de torque e EMG foram registrados usando um sistema EMG de 8 canais com taxa de amostragem de 2 kHz e conversor A/D de 16 bits (EMG System do Brasil<sup>®</sup>/Modelo 830C).

Os estímulos elétricos foram aplicados usando um único canal de um estimulador elétrico (Neuro-IOM 9-channel, Neurosoft<sup>®</sup>). O ponto motor ótimo para estimulação do nervo femoral foi identificado a aproximadamente 2 cm do pulso femoral (BLACK et al., 2017). A localização do cátodo foi movida ao redor do triângulo inguinal (vertical e horizontalmente) e foram aplicados estímulos elétricos percutâneos de 30 mA até que fosse possível detectar o maior pico de torque de contração do quadríceps ( $Q_{tw,pot}$ ) e a maior amplitude pico a pico do potencial de ação (onda M) do músculo vasto lateral. Em seguida, a intensidade ótima de estimulação foi identificada por meio de estímulos únicos (duração de 1000  $\mu$ s), iniciando em 30 mA e aumentando 5 mA a cada 30 s até atingir um platô tanto na amplitude  $Q_{tw,pot}$  quanto na amplitude da onda M. A intensidade de estimulação ( $68 \pm 13$  mA) foi fixada em 120% do platô (NEYROUD et al., 2014) para garantir a estimulação máxima durante as sessões experimentais. Esse processo foi realizado na sessão de familiarização e verificado antes de cada simulação de *Triathlon*.

Antes da avaliação inicial (*baseline*), foi realizado um aquecimento padronizado que consistia em 5 s de contrações do músculo extensor do joelho a 50%, 60%, 70%, 80% e 100% da CIVM (30 s de descanso entre as contrações). Em seguida, os participantes realizaram três CVIMs de 5 s, intercaladas por um período de descanso

de 30 s (SANTOS et al., 2020). Após 3 minutos de repouso, os participantes realizaram uma CVIM de 5 s com estimulação elétrica dupla de alta frequência ( $Dp_{100}$ , intervalo entre estímulos de 10 ms) aplicada no platô de torque. Durante a CVIM foram fornecidos *feedback* visual do torque e encorajamento verbal (AZEVEDO et al., 2019). Após a CVIM, com o músculo relaxado, foram aplicados estímulos elétricos duplos de alta frequência ( $Dp_{100}$ ), duplos de baixa frequência ( $Dp_{10}$ , intervalo entre estímulos de 100 ms) e um estímulo único ( $Q_{tw,pot}$ ). Os estímulos no músculo relaxado iniciaram 2 s após a CVIM, com intervalo de 3 s entre os estímulos (KRÜGER et al., 2019). Todos os estímulos tiveram duração de pulso de 1000  $\mu$ s. O protocolo de avaliação neuromuscular pode ser verificado na FIGURA 7. Esse procedimento (CVIM + estímulos elétricos) foi realizado duas vezes (30 s de descanso entre uma sequência e outra) no *baseline*, pós-natação, pós-ciclismo e pós-corrida. O pico de torque durante a CVIM não variou mais de 5% tanto intra como inter-dia.

A ativação voluntária foi mensurada utilizando a *interpolated twitch technique*, através da seguinte equação (MERTON, 1954):

$$AV (\%) = 1 - (SIT / Dp_{100}) \times 100$$

sendo a contração superposta (SIT) é a amplitude do aumento do torque com  $Dp_{100}$  durante a CVIM. A magnitude da AV foi corrigida, sempre que o SIT não foi aplicado em um platô de torque durante a CVIM, usando a seguinte equação (STROJNIK; KOMI, 1998):

$$AV (\%) = 100 - D \times (SIT / CVIM) / Dp_{100} \times 100$$

sendo  $D$  é a diferença entre o nível de torque imediatamente antes do SIT e o torque máximo durante o SIT.

A maior CVIM, AV,  $Dp_{100}$ ,  $Dp_{10}$ ,  $Q_{tw,pot}$  e onda M em cada momento de avaliação foi considerada para análise (KRÜGER et al., 2019). A redução da CVIM durante o *Triathlon* foi assumida como fadiga neuromuscular (GANDEVIA, 2001). A fadiga central foi caracterizada por uma redução na AV (GANDEVIA, 2001; MILLET et al., 2011), enquanto a fadiga periférica foi representada por reduções no  $Q_{tw,pot}$ ,  $Dp_{100}$ , e  $Dp_{10:100}$  (KRÜGER et al., 2019; MILLET et al., 2011). A amplitude pico a pico da onda M foi usada para detectar mudanças na propagação e transmissão do potencial de ação em resposta a estímulos únicos (KRÜGER et al., 2019; MILLET et al., 2011). Todas as análises de dados foram realizadas usando a *Neuromuscular Tool* (<https://github.com/JohnVillarejo/Neuromuscular-Tool>), uma rotina específica desenvolvida no software Matlab.

### 3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A normalidade dos dados foi verificada através do teste de Shapiro-Wilk. Uma ANOVA de medidas repetidas com duas vias foi realizada para avaliar as mudanças nos valores absolutos de CVIM, AV,  $Q_{tw,pot}$ ,  $Dp_{100}$ ,  $Dp_{10:100}$  e onda M, tendo *Triathlon* (*Sprint* e Olímpico) e tempo (*baseline*, pós- natação, pós-ciclismo e pós-corrída) como fatores. Uma ANOVA de medidas repetidas com duas vias também foi usada para comparar o perfil da distribuição da intensidade em cada fase do exercício, tendo o *Triathlon* (*Sprint* e Olímpico) e a distância relativa (divisões a cada 10%) como fatores. Uma ANOVA de medidas repetidas com uma via foi utilizada para comparar a VC/PCR e a velocidade/potência média no *Triathlon Sprint* e Olímpico para cada modalidade de exercício. A esfericidade foi verificada através do teste de Mauchly e sempre que

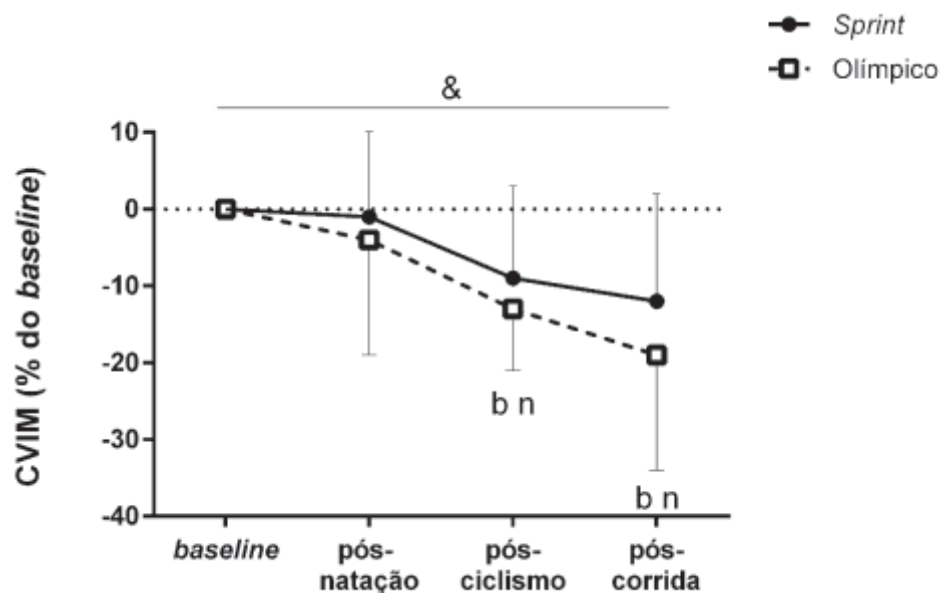
ocorreu violação a correção de Greenhouse Geisser foi aplicada. O teste *post hoc* de Bonferroni foi utilizado para determinar onde ocorreram as diferenças. O *partial eta squared* ( $\eta_p^2$ ) para comparações da ANOVA foi calculado, assumindo tamanho de efeito pequeno ( $<0,01$ ), médio ( $0,06$ ) e grande ( $>0,14$ ) (COHEN, 1988). O poder da ANOVA foi determinado e valores  $\geq 0,8$  indicaram que o tamanho da amostra foi suficiente para evitar o erro do tipo II (COHEN, 1988). Os desempenhos em tempos gerais e parciais foram comparados entre o *Triathlon Sprint* e Olímpico por meio do teste t pareado. Como o tempo gasto em diferentes domínios de intensidade do exercício durante as fases de natação, ciclismo e corrida não tiveram uma distribuição normal, o teste de postos sinalizados de Wilcoxon foi utilizado para determinar as diferenças entre o *Triathlon Sprint* e Olímpico. O nível de significância foi estabelecido em  $p < 0,05$ . Os dados foram reportados como média  $\pm$  desvio padrão.

## 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 FADIGA NEUROMUSCULAR

As medidas de *baseline* não apresentaram diferença significativa entre o *Triathlon Sprint* e Olímpico ( $p \geq 0,073$ ; TABELA 3). Não houve interação entre o *Triathlon* e o tempo para a CVIM ( $F_{3,42} = 1,43$ ;  $p = 0,25$ ). No entanto, a média da CVIM no *Triathlon Sprint* foi maior do que Olímpico (efeito principal do *Triathlon*,  $F_{1,14} = 9,16$ ;  $p = 0,009$ ;  $\eta_p^2 = 0,40$ ; poder = 0,80). Houve também efeito principal do tempo ( $F_{3,42} = 16,15$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta_p^2 = 0,54$ ; poder = 0,99), sendo que a CVIM não reduziu do *baseline* para o pós-natação ( $-3 \pm 11\%$ ;  $p = 0,99$ ), mas reduziu no pós-ciclismo ( $-11 \pm 9\%$ ;  $p = 0,003$ ) sem redução adicional no pós-corrida ( $-16 \pm 13\%$ ;  $p = 0,619$ ; FIG.8).

FIGURA 8 – COMPORTAMENTO DA CVIM NO TRIATHLON SPRINT E OLÍMPICO

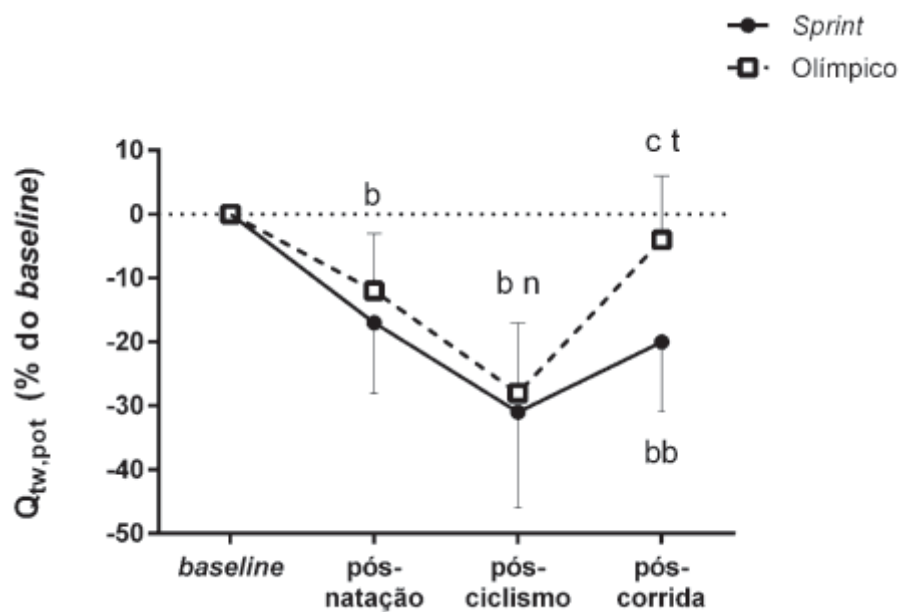


FONTE: O autor (2022).

LEGENDA: CVIM: contração voluntária isométrica máxima; & Efeito principal do *Triathlon* ( $p = 0,009$ ); <sup>b</sup> Diferente do *baseline* ( $p \leq 0,002$ ). <sup>n</sup> Diferente do pós-natação ( $p \leq 0,003$ ).

Houve interação entre o *Triathlon* e o tempo para o  $Q_{tw,pot}$  ( $F_{3\ 42}=8,61$ ;  $p<0,001$ ;  $n_p^2=0,38$ ; poder=0,99; FIG.9). O  $Q_{tw,pot}$  reduziu desde o *baseline* até o pós-natação ( $-15\pm 10\%$ ;  $p\leq 0,005$ ), com uma redução ainda maior no pós-ciclismo ( $-30\pm 12\%$ ;  $p\leq 0,004$ ), de maneira semelhante entre as distâncias de *Triathlon*. No entanto, o  $Q_{tw,pot}$  pós-corrída voltou a valores semelhantes ao *baseline* no *Triathlon* Olímpico ( $-4\pm 10\%$ ;  $p=0,718$ ), enquanto no *Triathlon* *Sprint* manteve-se reduzido ( $-20\pm 11\%$ ;  $p<0,001$ ). Conseqüentemente, o  $Q_{tw,pot}$  pós-corrída foi menor no *Triathlon* *Sprint* do que no Olímpico ( $p=0,007$ ).

FIGURA 9 – COMPORTAMENTO DO  $Q_{tw,pot}$  NO TRIATHLON SPRINT E OLÍMPICO



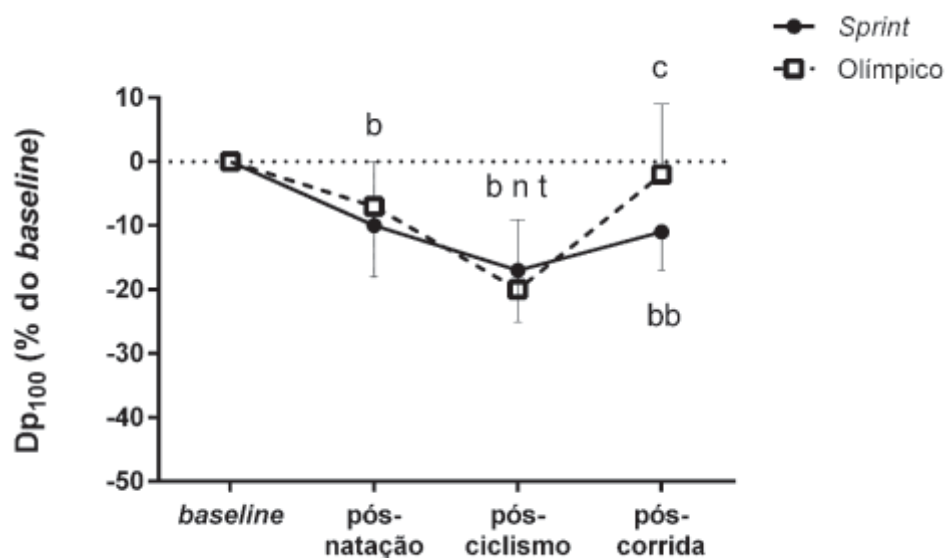
FONTE: O autor (2022).

LEGENDA:  $Q_{tw,pot}$ : torque do quadríceps evocado eletricamente através de estímulo único; <sup>b</sup> Diferente do *baseline* ( $p\leq 0,001$ ). <sup>n</sup> Diferente do pós-natação ( $p\leq 0,005$ ). <sup>c</sup> Diferente do pós-ciclismo ( $p\leq 0,008$ ). <sup>t</sup> Diferença entre as distâncias de *Triathlon* no mesmo instante ( $p=0,007$ ). <sup>bb</sup> Diferente do *baseline* apenas para o *Triathlon* *Sprint* ( $p<0,001$ ).

Houve também interação entre o *Triathlon* e o tempo no  $Dp_{100}$  ( $F_{3\ 42}=4,16$ ;  $p=0,011$ ;  $n_p^2=0,23$ ; poder=0,82; FIG.10). Em ambas as distâncias de *Triathlon*, o

$Dp_{100}$  diminuiu do *baseline* até o pós-natação ( $-8\pm 6\%$ ;  $p\leq 0,007$ ), entretanto no pós-ciclismo o decréscimo no *Triathlon* Olímpico ( $-20\pm 11\%$ ) foi maior do que no *Sprint* ( $-17\pm 8\%$ ). Conseqüentemente, o  $Dp_{100}$  no pós-ciclismo foi menor no *Triathlon* Olímpico do que no *Sprint* ( $p=0,005$ ). Além disso, o  $Dp_{100}$  no pós-corrida se recuperou ao nível do *baseline* no *Triathlon* Olímpico ( $-2\pm 11\%$ ;  $p=0,99$ ), enquanto no *Sprint* recuperou para o nível do pós-natação ( $-11\pm 6\%$ ;  $p=0,99$ ), permanecendo significativamente menor do que o *baseline* ( $p<0,001$ ).

FIGURA 10 – COMPORTAMENTO DO  $Dp_{100}$  NO TRIATHLON SPRINT E OLÍMPICO



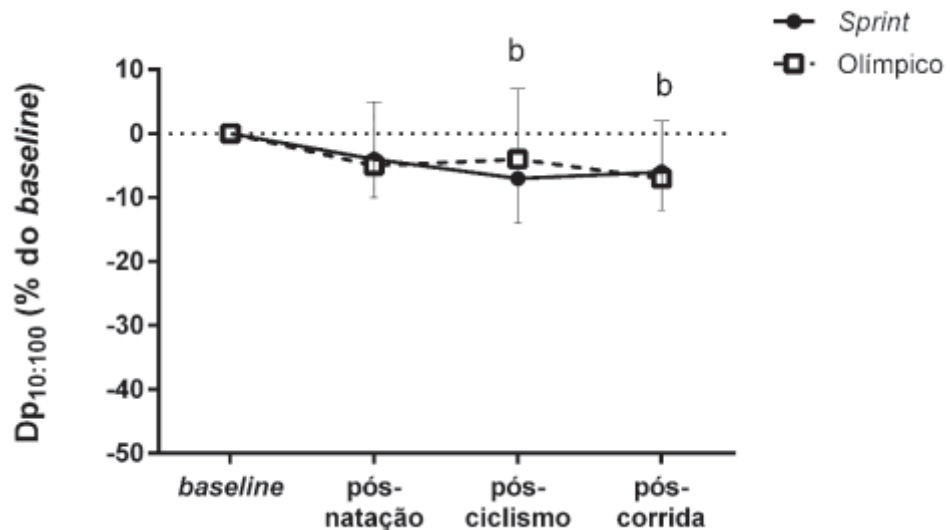
FONTE: O autor (2022).

LEGENDA:  $Dp_{100}$ : torque evocado eletricamente através de estímulo duplo de alta frequência; <sup>b</sup> Diferente do *baseline* ( $p\leq 0,007$ ). <sup>n</sup> Diferente do pós-natação ( $p\leq 0,007$ ). <sup>t</sup> Diferença entre as distâncias de *Triathlon* no mesmo instante ( $p=0,005$ ). <sup>c</sup> Diferente do pós-ciclismo ( $p\leq 0,028$ ). <sup>bb</sup> Diferente do *baseline* apenas para o *Triathlon Sprint* ( $p=0,028$ ).

Não houve interação entre o *Triathlon* e o tempo ( $F_{3\ 42}=1,63$ ;  $p=0,197$ ), nem efeito principal do *Triathlon* ( $F_{1\ 14}=0,07$ ;  $p=0,793$ ) para a  $Dp_{10:100}$ . No entanto, houve efeito principal do tempo ( $F_{3\ 42}=8,30$ ;  $p<0,001$ ;  $n_p^2=0,37$ ; poder=0,99; FIG.11), em que a  $Dp_{10:100}$  não mudou do *baseline* para o pós-natação ( $-5\pm 6\%$ ;  $p=0,107$ ), mas

reduziu no pós-ciclismo ( $-6\pm 6\%$ ;  $p=0,026$ ), sem diminuição adicional no pós-corrida ( $-6\pm 4\%$ ;  $p=0,952$ ).

FIGURA 11 – COMPORTAMENTO DA  $Dp_{10:100}$  NO TRIATHLON SPRINT E OLÍMPICO

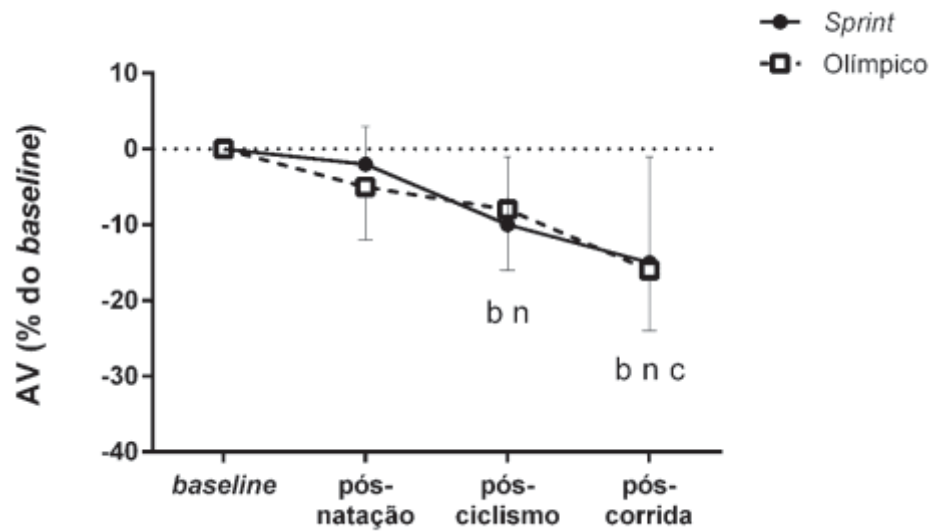


FONTE: O autor (2022).

LEGENDA:  $Dp_{10:100}$ : razão entre o torque evocado eletricamente por estímulos de baixa e alta frequência; <sup>b</sup> Diferente do *baseline* ( $p\leq 0,002$ ).

Não houve interação entre o *Triathlon* e o tempo ( $F_{3\ 39}=1,04$ ;  $p=0,38$ ), nem efeito principal do *Triathlon* ( $F_{1\ 13}=0,02$ ;  $p=0,09$ ) para a AV. No entanto, houve efeito principal do tempo ( $F_{2\ 22}=25,15$ ;  $p<0,001$ ;  $\eta_p^2=0,66$ ;  $\text{poder}=0,99$ ), em que a AV foi mantido do *baseline* até o pós-natação ( $-4\pm 5\%$ ;  $p=0,058$ ), mas reduziu no pós-ciclismo ( $-9\pm 6\%$ ;  $p=0,024$ ), com uma redução adicional no pós-corrida ( $-16\pm 10\%$ ;  $p=0,009$ ; FIG.12).

FIGURA 12 – COMPORTAMENTO DA AV NO TRIATHLON SPRINT E OLÍMPICO

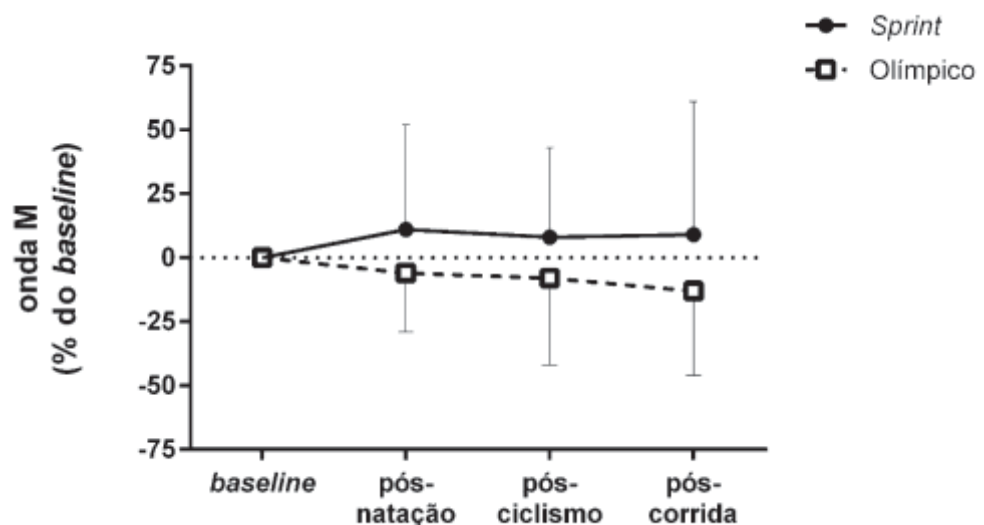


FONTE: O autor (2022).

LEGENDA: AV: ativação voluntária; <sup>b</sup> Diferente do *baseline* ( $p < 0,001$ ). <sup>n</sup> Diferente do pós-natação ( $p \leq 0,024$ ). <sup>c</sup> Diferente do pós-ciclismo ( $p \leq 0,029$ )

Não houve efeito principal do *Triathlon* ( $F_{1\ 12} = 0,86$ ;  $p = 0,371$ ), tempo ( $F_{3\ 36} = 0,87$ ;  $p = 0,467$ ), nem interação entre o *Triathlon* e o tempo ( $F_{3\ 36} = 0,49$ ;  $p = 0,690$ ) para a onda M (FIG.13).

FIGURA 13 – COMPORTAMENTO DA ONDA M NO TRIATHLON SPRINT E OLÍMPICO



FONTE: O autor (2022).

TABELA 3 – FUNÇÃO NEUROMUSCULAR DURANTE O TRIATHLON SPRINT E OLÍMPICO

	Sprint				Olímpico			
	baseline	pós-natação	pós-ciclismo	pós-corrida	baseline	pós-natação	pós-ciclismo	pós-corrida
CVIM (N/m) &	224±49	221±57	206±46b <sup>n</sup>	197±53 <sup>b n</sup>	216±44	210±58	187±42 <sup>b n</sup>	174±49 <sup>b n</sup>
Q <sub>tw,pot</sub> (N/m)	69±11	56±9 <sup>b</sup>	46±9b <sup>n</sup>	55±8b <sup>ct</sup>	64±11	56±11 <sup>b</sup>	46±10 <sup>b n</sup>	61±11 <sup>ct</sup>
Dp <sub>100</sub> (N/m)	113±16	102±18 <sup>b</sup>	93±15b <sup>n t</sup>	101±16 <sup>b c</sup>	106±20	98±17 <sup>b</sup>	85±18 <sup>b n t</sup>	103±19 <sup>c</sup>
Dp <sub>10:100</sub>	1,09±0,06	1,04±0,06	1,01±0,08 <sup>b</sup>	1,02±0,06 <sup>b</sup>	1,08±0,10	1,03±0,07	1,04±0,08 <sup>b</sup>	1,01±0,07 <sup>b</sup>
onda M (mV)	5,3±2,3	5,5±2,1	5,4±2,3	5,2±2	5±1,7	4,6±1,8	4,4±1,7	4,1±1,8
NAV (%)	92±4	90±5	83±9 <sup>b n</sup>	78±14b <sup>n c</sup>	92±5	88±8	86±10 <sup>b n</sup>	78±11 <sup>b n c</sup>

FONTE: O autor (2022).

LEGENDA: CVIM: contração voluntária isométrica máxima; Q<sub>tw,pot</sub>: torque do quadríceps evocado eletricamente através de estímulo único; Dp<sub>100</sub>: torque evocado eletricamente através de estímulo duplo de alta frequência; Dp<sub>10:100</sub>: razão entre o torque evocado eletricamente por estímulos de baixa e alta frequência; onda M: amplitude pico a pico; NAV: nível de ativação voluntária; & Efeito principal do *Triathlon* (p=0,009); <sup>b</sup> Diferente do *baseline* (p≤0,007). <sup>n</sup> Diferente do pós-natação (p≤0,007). <sup>c</sup> Diferente do pós-ciclismo (p≤0,03). <sup>t</sup> Diferença entre as distâncias de *Triathlon* no mesmo instante (p≤0,007).

#### 4.2 VELOCIDADE CRÍTICA NA NATAÇÃO, LIMIAR DE TROCAS GASOSAS, PONTO DE COMPENSAÇÃO RESPIRATÓRIA E $\dot{V}O_{2PICO}$ NO CICLISMO E NA CORRIDA

Os resultados da VC, LTG e PCR estão descritos na TABELA 4. No ciclismo, o LTG e o PCR foram determinados, respectivamente, a  $60,6 \pm 4,3\%$  e a  $83 \pm 2,4\%$  do  $\dot{V}O_{2pico}$ . Na corrida, o LTG e o PCR foram determinados a  $72,3 \pm 3,7\%$  e a  $84,5 \pm 4,5\%$  do  $\dot{V}O_{2pico}$ .

TABELA 4 – VELOCIDADE CRÍTICA NA NATAÇÃO, LIMIAR DE TROCAS RESPIRATÓRIAS, PONTO DE COMPENSAÇÃO RESPIRATÓRIA E  $\dot{V}O_{2PICO}$  DURANTE O CICLISMO E A CORRIDA EM TESTES INCREMENTAIS MÁXIMOS

Velocidade crítica na natação (m/s)	$1,01 \pm 0,14$
LTG no ciclismo (W)	$130 \pm 25$
PCR no ciclismo (W)	$216 \pm 28$
$p\dot{V}O_{2pico}$ no ciclismo (W)	$335 \pm 36$
$\dot{V}O_{2pico}$ no ciclismo (ml/kg/min)	$55,7 \pm 6,5$
LTG na corrida (km/h)	$10,7 \pm 0,6$
PCR na corrida (km/h)	$13,2 \pm 0,7$
$v\dot{V}O_{2pico}$ na corrida (km/h)	$18,1 \pm 0,9$
$\dot{V}O_{2pico}$ na corrida (ml/kg/min)	$59,1 \pm 6,9$

FONTE: O autor (2022).

LEGENDA: LTG, limiar de trocas gasosas; PCR, ponto de compensação respiratória;  $p\dot{V}O_{2pico}$ , potência no pico de consumo de oxigênio;  $\dot{V}O_{2pico}$ , pico do consumo de oxigênio;  $v\dot{V}O_{2pico}$ , velocidade no pico de consumo de oxigênio.

#### 4.3 DESEMPENHO GERAL E EM CADA FASE DO TRIATHLON

Como esperado, a duração de cada fase do *Triathlon* foi maior ( $p < 0,001$ ) no *Triathlon* Olímpico do que no *Sprint* (TABELA 5).

TABELA 5 – TEMPO TOTAL, TEMPO DAS FASES E DAS TRANSIÇÕES NO *TRIATHLON SPRINT* E OLÍMPICO

	<i>Sprint</i> (h:min:s)	Olímpico (h:min:s)
Total	01:11:07 ± 00:05:57	02:29:46 ± 00:09:14*
Fase de natação	00:11:53 ± 00:01:38	00:24:43 ± 00:03:24*
Primeira transição	00:02:40 ± 00:00:12	00:02:41 ± 00:00:11
Fase de ciclismo	00:37:02 ± 00:04:04	01:16:21 ± 00:05:17*
Segunda transição	00:02:37 ± 00:00:10	00:02:38 ± 00:00:12
Fase de corrida	00:22:11 ± 00:01:38	00:48:07 ± 00:03:52*

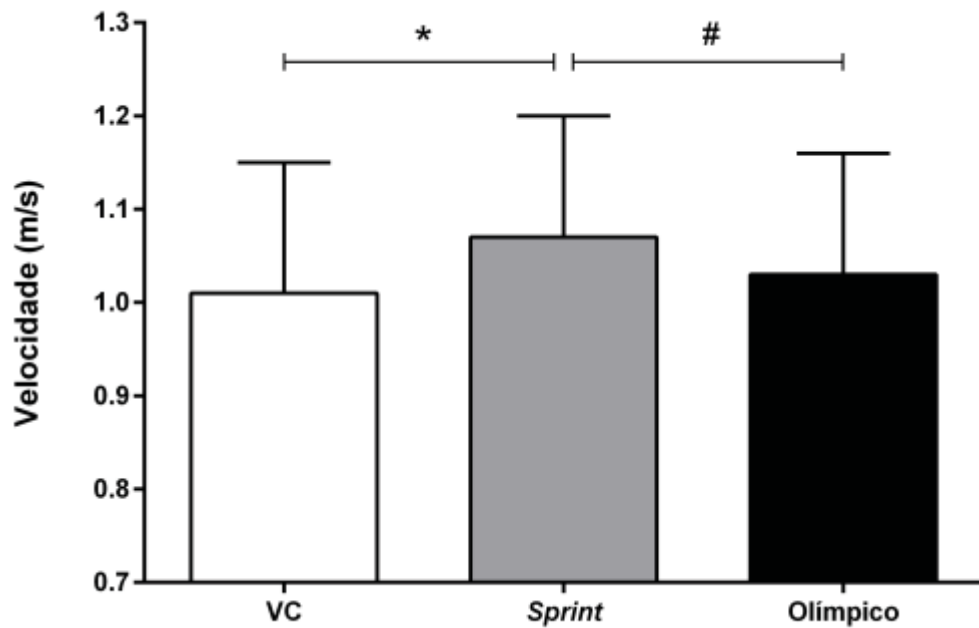
FONTE: O autor (2022).

LEGENDA: \* Maior duração que o *Triathlon Sprint*;  $p < 0,001$ .

#### 4.4 VELOCIDADE/POTÊNCIA MÉDIA DAS FASES DO *TRIATHLON*

A ANOVA detectou um efeito significativo para a velocidade de natação ( $F_{2,28} = 20,12$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta_p^2 = 0,59$ ; poder = 0,99; FIG.14). A velocidade média de natação no *Triathlon Sprint* ( $1,07 \pm 0,13$  m/s) foi maior ( $p < 0,001$ ) do que no Olímpico ( $1,03 \pm 0,13$  m/s) e do que a VC ( $1,01 \pm 0,14$  m/s). No entanto, a velocidade de natação durante o Olímpico foi semelhante à VC ( $p = 0,39$ ).

FIGURA 14 – VELOCIDADE CRÍTICA E VELOCIDADE MÉDIA DURANTE A FASE DE NATAÇÃO NO TRIATHLON SPRINT E OLÍMPICO

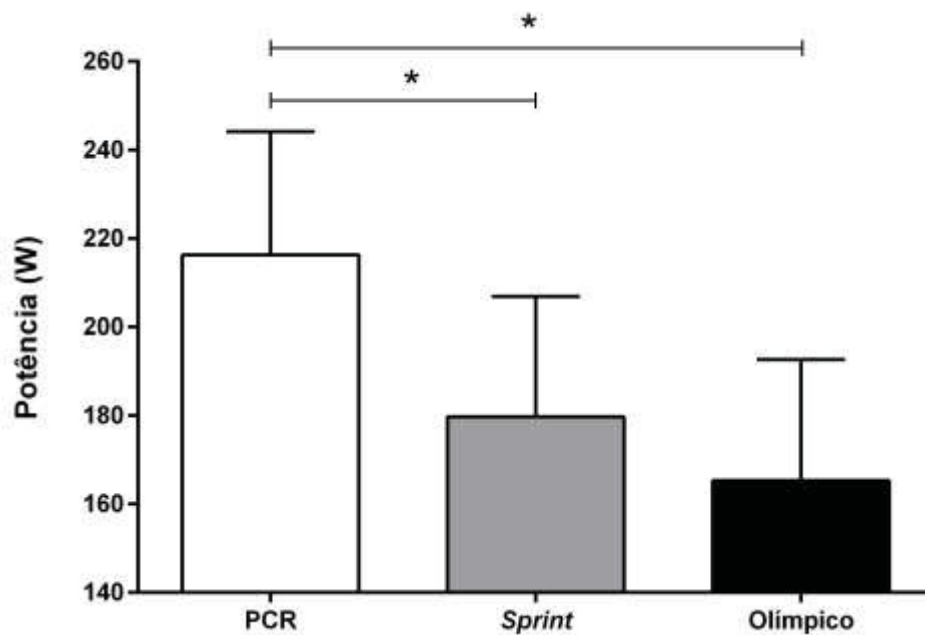


FONTE: O autor (2022).

LEGENDA: VC: velocidade crítica. \* Diferente da VC ( $p < 0,001$ ). # Diferente do *Triathlon* Olímpico ( $p < 0,001$ ).

A ANOVA detectou um efeito significativo para a potência do ciclismo ( $F_{2, 28} = 54,08$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta_p^2 = 0,79$ ; poder = 0,99; FIG.15). A potência média do ciclismo foi semelhante ( $p = 0,071$ ) entre o *Triathlon Sprint* ( $179,7 \pm 27,2W$ ) e o Olímpico ( $165,3 \pm 27,3W$ ), e ambas foram menores ( $p < 0,001$ ) do que a potência do PCR ( $216,3 \pm 27,8W$ ).

FIGURA 15 – PONTO DE COMPENSAÇÃO RESPIRATÓRIA E POTÊNCIA MÉDIA DURANTE A FASE DE CICLISMO NO TRIATHLON SPRINT E OLÍMPICO

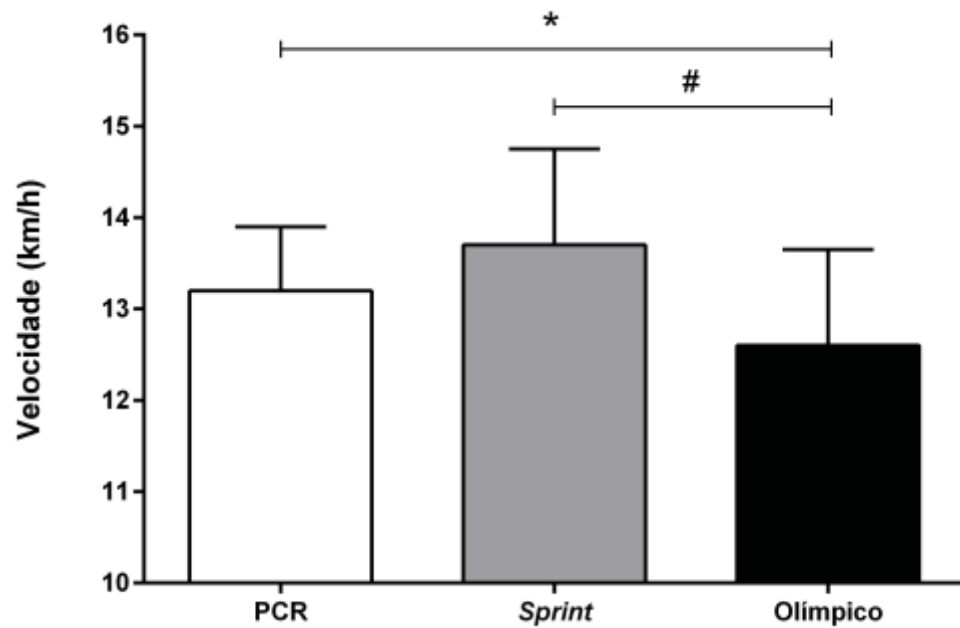


FONTE: O autor (2022).

LEGENDA: PCR: ponto de compensação respiratória. \* Diferente do PCR ( $p < 0,001$ ).

A ANOVA detectou um efeito significativo para a velocidade de corrida ( $F_{2,28} = 17,53$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta_p^2 = 0,99$ ; poder = 0,56; FIG.16). A velocidade média de corrida no *Triathlon* Olímpico ( $12,6 \pm 1,05$  km/h) foi menor ( $p = 0,007$ ) do que no *Sprint* ( $13,7 \pm 1,05$  km/h) e do que a velocidade do PCR ( $13,2 \pm 0,70$  km/h), entretanto a velocidade média de corrida no *Sprint* foi semelhante ( $p = 0,124$ ) à velocidade do PCR.

FIGURA 16 – PONTO DE COMPENSAÇÃO RESPIRATÓRIA E VELOCIDADE MÉDIA DURANTE A FASE DE CORRIDA NO TRIATHLON SPRINT E OLÍMPICO



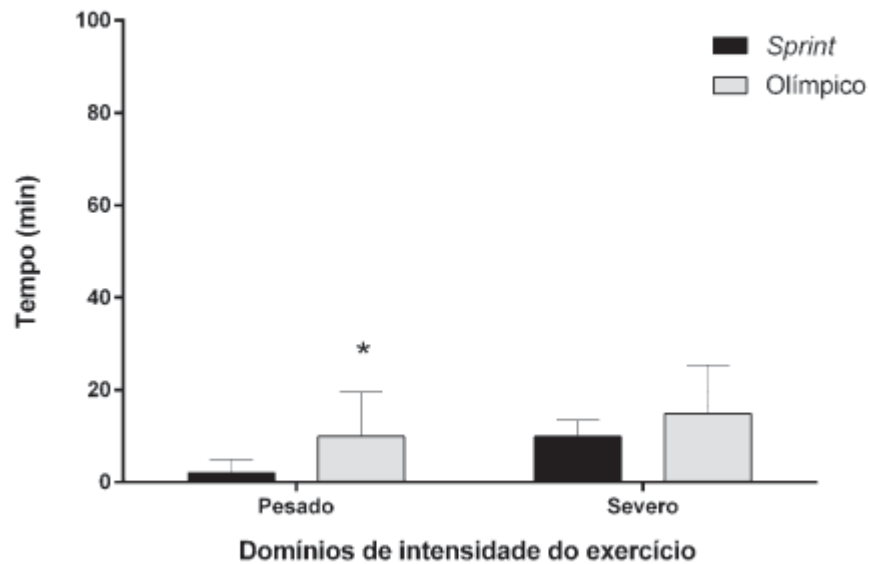
FONTE: O autor (2022).

LEGENDA: PCR: ponto de compensação respiratória. \* Diferente do PCR ( $p=0,007$ ). # Diferente do *Triathlon* Olímpico ( $p<0,001$ ).

#### 4.5 TEMPO GASTO NOS DIFERENTES DOMÍNIOS DE INTENSIDADE DO EXERCÍCIO DURANTE AS PROVAS DE *TRIATHLON*

Durante a natação, o tempo gasto no domínio severo foi semelhante entre a distância *Sprint* ( $09\text{min}52\text{s} \pm 03\text{min}34\text{s}$ ) e a Olímpica ( $14\text{min}53\text{s} \pm 10\text{min}39\text{s}$ ;  $Z=-1,93$ ;  $p=0,053$ ; FIG.17). No entanto, o tempo gasto no domínio pesado foi menor no *Triathlon Sprint* ( $02\text{min}01\text{s} \pm 02\text{min}55\text{s}$ ) do que no *Triathlon* Olímpico ( $09\text{min}54\text{s} \pm 09\text{min}38\text{s}$ ;  $Z=-2,93$ ;  $p=0,003$ ).

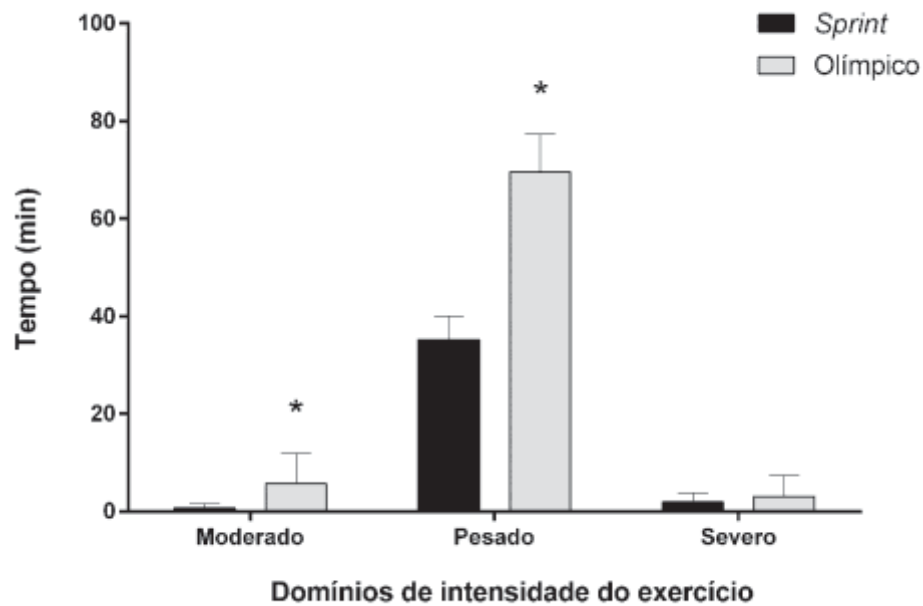
FIGURA 17 – TEMPO GASTO EM CADA DOMÍNIO DE INTENSIDADE DO EXERCÍCIO DURANTE A FASE DE NATAÇÃO NO TRIATHLON SPRINT E OLÍMPICO



LEGENDA: \* Diferente do *Triathlon Sprint* ( $p=0,003$ ).

Durante o ciclismo, o tempo gasto no domínio severo foi semelhante entre o *Triathlon Sprint* ( $01\text{min}54\text{s} \pm 02\text{min}00\text{s}$ ) e o Olímpico ( $03\text{min}02\text{s} \pm 04\text{min}22\text{s}$ ;  $Z=-0,70$ ;  $p=0,485$ ; FIG.18). O tempo gasto no domínio pesado foi menor na distância Sprint ( $35\text{min}10\text{s} \pm 04\text{min}48\text{s}$ ) do que na Olímpica ( $01\text{h}06\text{min}55\text{s} \pm 13\text{min}18\text{s}$ ;  $Z=-3,41$ ;  $p=0,001$ ), enquanto o tempo gasto no domínio moderado foi maior no *Triathlon* Olímpico ( $08\text{min}20\text{s} \pm 13\text{min}40\text{s}$ ) do que no Sprint ( $45\text{s} \pm 55\text{s}$ ;  $Z=-3,11$ ;  $p=0,002$ ).

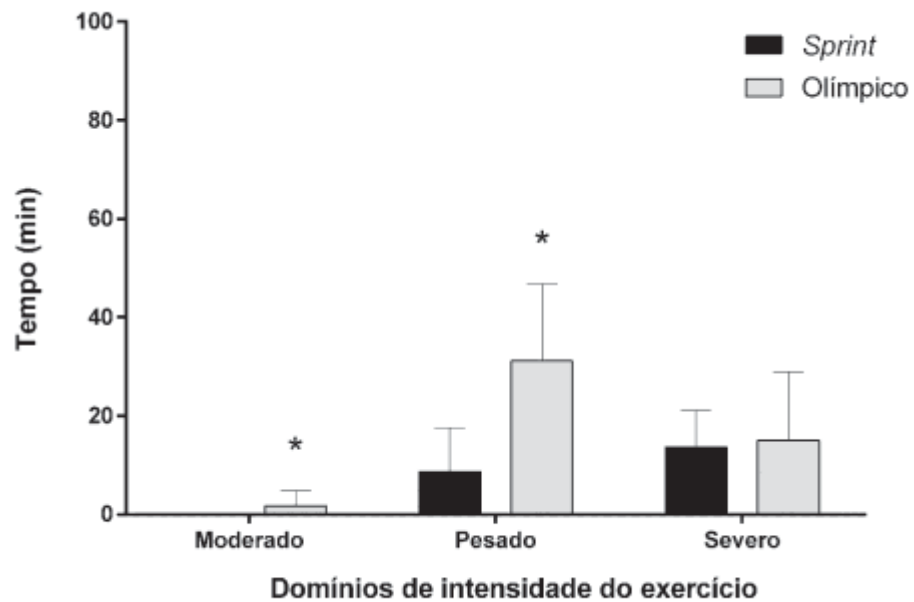
FIGURA 18 – TEMPO GASTO EM CADA DOMÍNIO DE INTENSIDADE DO EXERCÍCIO DURANTE A FASE DE CICLISMO NO TRIATHLON SPRINT E OLÍMPICO



LEGENDA: \* Diferente do *Triathlon Sprint* ( $p \leq 0,002$ ).

Durante a corrida, o tempo gasto no domínio severo foi semelhante entre o *Triathlon Sprint* ( $13\text{min}33\text{s} \pm 07\text{min}35\text{s}$ ) e o Olímpico ( $15\text{min}09\text{s} \pm 13\text{min}52\text{s}$ ;  $Z = -0,40$ ;  $p = 0,691$ ; FIG. 19). No entanto, os triatletas passaram mais tempo correndo no domínio pesado durante a distância Olímpica ( $31\text{min}16 \pm 15\text{min}37\text{s}$ ) do que na distância *Sprint* ( $08\text{min}38\text{s} \pm 08\text{min}47\text{s}$ ;  $Z = -3,41$ ;  $p = 0,001$ ). Os triatletas correram no domínio moderado apenas no Triathlon Olímpico ( $01\text{min}42\text{s} \pm 03\text{min}13\text{s}$ ,  $Z = -2,02$ ;  $p = 0,043$ ).

FIGURA 19 – TEMPO GASTO EM CADA DOMÍNIO DE INTENSIDADE DO EXERCÍCIO DURANTE A FASE DE CORRIDA NO TRIATHLON SPRINT E OLÍMPICO

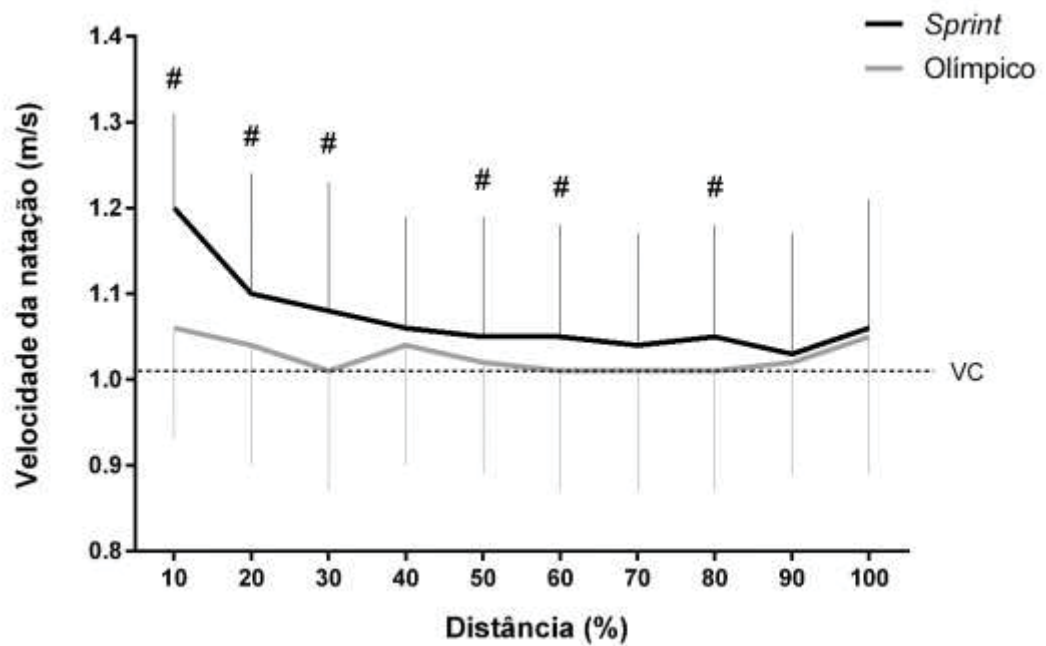


LEGENDA: \* Diferente do *Triathlon Sprint* ( $p < 0,043$ ).

#### 4.6 PERFIL DA INTENSIDADE DURANTE AS PROVAS DE TRIATHLON

Houve interação entre o *Triathlon* e a distância relativa para velocidade de natação ( $F_{9, 126} = 8,79$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta_p^2 = 0,39$ ; poder = 0,99; FIG.20). A velocidade a 10%, 20%, 30%, 50%, 60% e 80% da distância da fase de natação foi maior ( $p \leq 0,029$ ) no *Triathlon Sprint* do que no Olímpico.

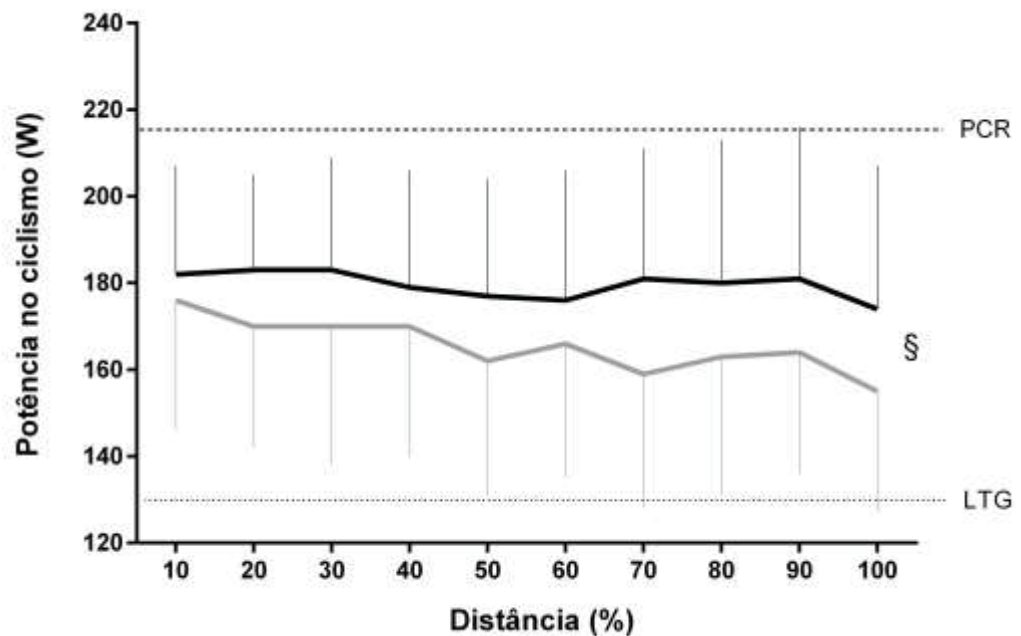
FIGURA 20 – PERFIL DA INTENSIDADE DURANTE A FASE DE NATAÇÃO NO TRIATHLON SPRINT E OLÍMPICO



LEGENDA: VC: velocidade crítica. # Diferença entre o *Triathlon Sprint* e Olímpico na mesma distância relativa ( $p \leq 0,029$ ).

Não houve interação entre o *Triathlon* e a distância relativa para a potência do ciclismo ( $F_{4 \ 54} = 1,4$ ;  $p = 0,247$ ; FIG.21), nem efeito principal do *Triathlon* ( $F_{1 \ 14} = 6,21$ ;  $p = 0,086$ ). No entanto, houve efeito principal da distância relativa ( $F_{3 \ 43} = 3,48$ ;  $p = 0,023$ ;  $\eta_p^2 = 0,19$ ; power = 0,75).

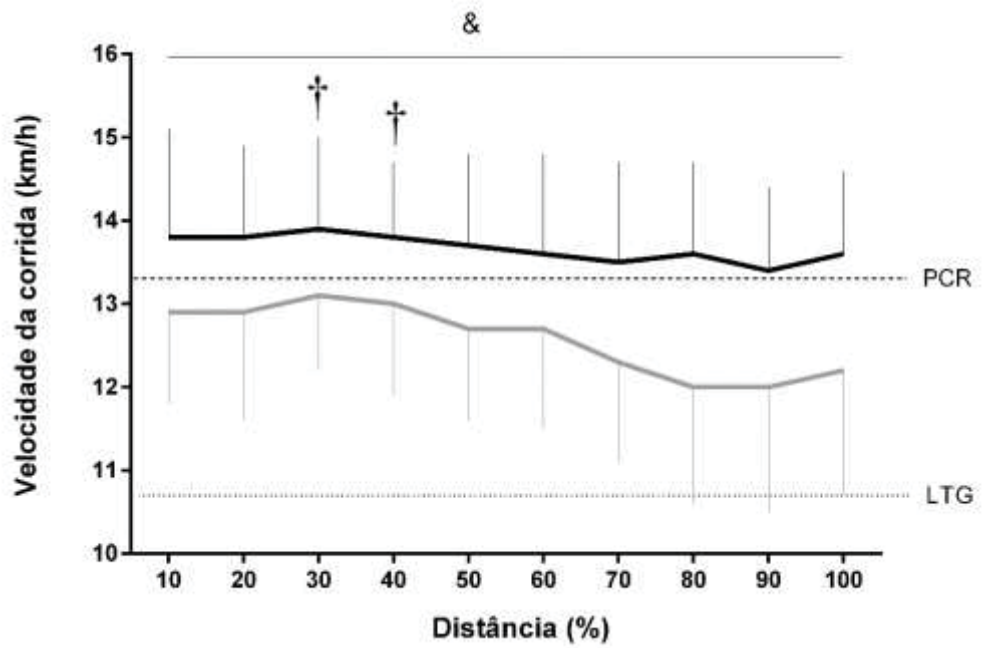
FIGURA 21 – PERFIL DA INTENSIDADE DURANTE A FASE DE CICLISMO NO TRIATHLON SPRINT E OLÍMPICO



LEGENDA: PCR: ponto de compensação respiratória. LTG: limiar de trocas gasosas. § Efeito principal do tempo ( $p=0,023$ ).

Não houve interação entre o *Triathlon* e a distância relativa para velocidade de corrida ( $F_{3,38}=2,41$ ;  $p=0,09$ ; FIG.22). No entanto, a velocidade média de corrida foi maior no *Triathlon Sprint* do que no Olímpico (efeito principal do *Triathlon*;  $F_{1,14}=35,75$ ;  $p<0,001$ ;  $\eta_p^2=0,72$ ; poder=0,99). Houve também efeito principal da distância ( $F_{2,30}=5,73$ ;  $p=0,007$ ;  $\eta_p^2=0,29$ ; poder=0,85), sendo que a velocidade a 30 e a 40% da distância da fase de corrida foi maior do que a 70 e a 80% ( $p\leq 0,012$ ).

FIGURA 22 – PERFIL DA INTENSIDADE DURANTE A FASE DE CORRIDA NO TRIATHLON SPRINT E OLÍMPICO



LEGENDA: PCR: ponto de compensação respiratória. LTG: limiar de trocas gasosas. & Efeito principal do *Triathlon* ( $p < 0,001$ ). † Diferente do percentual de distância 70 e 80 ( $p \leq 0,012$ ).

## 5 DISCUSSÃO

A realização sequencial de natação, ciclismo e corrida durante o *Triathlon* impõe uma demanda neuromuscular considerável aos atletas. No entanto, o comportamento da fadiga neuromuscular após cada modalidade de exercício executado em sequência é pouco compreendido. Assim, no presente estudo, comparamos os componentes centrais e periféricos da fadiga neuromuscular após cada modalidade de exercício em diferentes distâncias de *Triathlon*, e verificamos a influência da intensidade média de cada fase, e do tempo gasto em cada domínio de intensidade do exercício no comportamento da fadiga neuromuscular apresentado. Nossos resultados indicam que a fadiga periférica progrediu de maneira semelhante até o pós-ciclismo, e que as fases de natação e ciclismo apresentaram similaridades no tempo gasto no domínio severo. No entanto, a fadiga periférica se recuperou totalmente após a corrida no *Triathlon* Olímpico, que foi precedida por uma velocidade média de corrida abaixo da velocidade do PCR e por um maior tempo gasto nos domínios pesado e moderado. Por outro lado, a fadiga periférica foi parcialmente recuperada após a corrida no *Triathlon Sprint*, com velocidade média de corrida semelhante à velocidade do PCR e maior do que a velocidade do *Triathlon* Olímpico. O perfil da intensidade ao longo das fases de ciclismo e corrida não apresentou diferença. A fadiga central começou no pós-ciclismo e progrediu até o pós-corrida sem apresentar diferença entre as distâncias de *Triathlon*.

O  $Q_{tw,pot}$  diminuiu de forma semelhante no *Triathlon Sprint* ( $-17 \pm 11\%$ ) e Olímpico ( $-13 \pm 9\%$ ) após a fase de natação. A semelhança entre tempo gasto no domínio severo durante o *Triathlon Sprint* ( $09\text{min}52\text{s} \pm 03\text{min}34\text{s}$ ) e Olímpico ( $14\text{min}53\text{s} \pm 10\text{min}39\text{s}$ ) pode ser uma possível causa. De fato, a similaridade no tempo

de exposição ao domínio severo é uma das características em comum de testes contra relógio de ciclismo que utilizaram diferentes padrões de *pacing* e apresentaram a mesma magnitude de fadiga periférica (AZEVEDO et al., 2021a). Neste sentido, a semelhança no tempo de exposição a um domínio de intensidade do exercício caracterizado por não apresentar uma estabilidade metabólica (JONES et al., 2008) pode ser o suficiente para gerar a mesma fadiga periférica em tarefas com o dobro da distância, nesse caso 750 m de natação no *Triathlon Sprint* e 1,5 km no *Triathlon Olímpico*. No entanto, a velocidade média de natação foi  $\cong 6\%$  acima da VC no *Triathlon Sprint* e semelhante à VC no Olímpico. Como após a realização de um exercício acima da VC é esperada maior fadiga periférica (THOMAS et al., 2016) a ausência de diferenças entre o *Triathlon Sprint* e Olímpico, pode ser explicada também pela contribuição dos membros do corpo na propulsão do nado. Os membros superiores e inferiores respondem, respectivamente, por  $\cong 88\%$  e  $\cong 12\%$  da propulsão no nado *crawl* (GOURGOULIS et al., 2014). Essa menor demanda imposta aos membros inferiores durante a natação pode explicar os menores níveis de fadiga periférica pós-natação do músculo quadríceps, quando comparado com tarefas que exigem mais do quadríceps, como o ciclismo com duração semelhante (THOMAS et al., 2015). Além disso, essa suposição de contribuição dos membros do corpo também foi respaldada por respostas de EMG de vários músculos dos membros superiores e inferiores durante um teste de nado *crawl*, as quais relatam fadiga nos membros superiores, mas não nos inferiores (FIGUEIREDO et al., 2013). Assim, os membros superiores podem ter sido responsáveis pela maior velocidade de natação no *Triathlon Sprint*, o que pode ter resultado em mínima influência na fadiga periférica do músculo quadríceps. Essa hipótese, aliada à similaridade de tempo gasto no domínio severo,

pode explicar os níveis semelhantes de fadiga periférica da musculatura locomotora pós-natação entre as distâncias de *Triathlon*.

Houve uma diminuição adicional no  $Q_{tw,pot}$  do pós-natação para o pós-ciclismo, de maneira semelhante entre o *Triathlon Sprint* ( $-31\pm 15\%$ ) e Olímpico ( $-28\pm 11\%$ ). Embora os triatletas tenham iniciado o ciclismo com algum nível de fadiga periférica resultante da fase de natação, a fase de ciclismo causou ainda mais fadiga periférica. Estudos anteriores demonstraram níveis semelhantes de fadiga periférica do músculo quadríceps (de  $-24\%$  a  $-31\%$ ) após a realização de contra relógios de ciclismo sem a realização prévia da natação (BROWNSTEIN et al., 2022; THOMAS et al., 2015). O ciclismo envolve contrações concêntricas repetidas e prolongadas do quadríceps durante grande parte da rotação do pedal (BIJKER; DE GROOT; HOLLANDER, 2002), contribuindo para um grande comprometimento da função contrátil do músculo quadríceps (BROWNSTEIN et al., 2022). A mudança de uma dependência do membro superior durante a natação para uma dependência do membro inferior (principalmente músculo quadríceps) durante o ciclismo explica um maior nível de fadiga do músculo quadríceps no pós-ciclismo quando comparado ao pós-natação. Além disso, os níveis de fadiga periférica pós-ciclismo foram semelhantes entre as distâncias de *Triathlon*, embora a fase de ciclismo tenha sido duas vezes mais longa no *Triathlon* Olímpico do que no *Sprint*. A potência média do ciclismo também foi semelhante entre o *Triathlon Sprint* e Olímpico, e ambos ficaram abaixo da potência do PCR. Outro ponto importante foi a baixa exposição ao domínio severo que ocorreu de maneira semelhante entre a distância *Sprint* ( $01\text{min}54\text{s}\pm 02\text{min}00\text{s}$ ) e Olímpica ( $03\text{min}02\text{s}\pm 04\text{min}22\text{s}$ ). Esses achados podem indicar que, ao definir a potência do ciclismo abaixo da potência do PCR, os níveis de fadiga periférica pós-ciclismo

tornam-se independentes da duração do exercício e reforçam a dependência da intensidade da fadiga periférica (KRÜGER et al., 2019; THOMAS et al., 2016).

Como hipotetizado, o  $Q_{tw,pot}$  no pós-corrída foi totalmente recuperado ao nível basal no *Triathlon* Olímpico, enquanto no *Sprint* o  $Q_{tw,pot}$  foi recuperado apenas parcialmente. Estudo anterior observou recuperação de  $Q_{tw,pot}$  até o *baseline*, ou um pouco acima dos níveis basais, após uma corrida de 10 km precedida por 1 h de ciclismo (uma simulação próxima ao *Triathlon* Olímpico, mas sem fase de natação) (PAGEAUX; THEUREL; LEPERS, 2017). Vários fatores podem explicar a recuperação do  $Q_{tw,pot}$  no pós-corrída. Primeiramente, a corrida e o ciclismo apresentam ativação muscular diferente com maior atividade muscular do quadríceps no ciclismo e maior atividade muscular do tríceps sural na corrida (BIJKER; DE GROOT; HOLLANDER, 2002). De fato, algumas evidências sugerem que a redução no  $Q_{tw,pot}$  do músculo quadríceps é mais pronunciada após o ciclismo do que após a corrida (BROWNSTEIN et al., 2022; WÜTHRICH; EBERLE; SPENGLER, 2014). Assim, uma mudança no padrão de ativação muscular do exercício, de mais “ativado pelo quadríceps” para mais “ativado pelo tríceps sural”, pode explicar a recuperação do  $Q_{tw,pot}$  no músculo quadríceps após a corrida. Em segundo lugar, a corrida tem um custo metabólico menor em relação ao ciclismo devido à contração muscular excêntrica na fase de suporte (CARTER et al., 2000) e a subsequente contração concêntrica assistida pelos componentes elástico e reflexo (KOMI, 2000). Assim, a presença de um ciclo alongamento-encurtamento durante a corrida pode reduzir o distúrbio metabólico no músculo quadríceps, o que pode ter permitido a recuperação do  $Q_{tw,pot}$  após a fase de corrida. Terceiro, estudos anteriores relataram uma potencialização da contração muscular após corrida prolongada (PLACE et al., 2004) e após corrida precedida de ciclismo (PAGEAUX; THEUREL; LEPERS, 2017). Ciclos

repetidos de alongamento-encurtamento durante a corrida aumentam a rigidez do complexo músculo-tendão (KOMI, 2000), e o aumento da rigidez pode aumentar a resposta mecânica de contração, aumentando, portanto, a recuperação do  $Q_{tw,pot}$  após a fase de corrida (HOWELL; CHLEBOUN; CONATSER, 1993). Portanto, a recuperação  $Q_{tw,pot}$  no pós-corrida pode ser causada por uma combinação de fatores presentes na mudança do ciclismo para a corrida, como mudanças no padrão de ativação muscular, custo metabólico e potencialização. O fato do  $Q_{tw,pot}$  ter sido totalmente recuperado ao nível basal no *Triathlon* Olímpico, mas não no *Sprint*, pode estar associado a diferenças de intensidade, já que a corrida no *Triathlon* Olímpico foi realizada abaixo da velocidade do PCR e foi  $\cong 8\%$  mais lenta que a velocidade do *Sprint*. Além disso, o tempo gasto no domínio pesado foi maior no *Triathlon* Olímpico ( $31\text{min}16\text{s} \pm 15\text{min}37\text{s}$ ) do que no *Sprint* ( $08\text{min}38\text{s} \pm 08\text{min}47\text{s}$ ), e apenas no *Triathlon* Olímpico os triatletas correram no domínio moderado ( $01\text{min}42\text{s} \pm 03\text{min}13\text{s}$ ). Neste sentido, tem sido demonstrado que a magnitude da recuperação da capacidade de trabalho é inversamente proporcional ao percentual de potência crítica durante a recuperação ativa (CAEN et al., 2019) e também é impactada pelo tempo disponível para a recuperação (CAEN et al., 2021). Além disso, a perturbação metabólica muscular aumenta à medida que o exercício progride para um domínio de maior intensidade (BLACK et al., 2017). Assim, uma menor perturbação metabólica muscular e uma maior taxa de recuperação podem ser esperadas no *Triathlon* Olímpico, explicando uma maior recuperação do  $Q_{tw,pot}$  no pós-corrida do *Triathlon* Olímpico do que no *Sprint*.

A relação  $Dp_{10:100}$  reduziu do pós-natação para o pós-ciclismo e permaneceu reduzida no pós-corrida, sem diferenças entre as distâncias do *Triathlon*. A redução da relação  $Dp_{10:100}$  é um indicativo de fadiga de baixa frequência, que tem sido

associada à redução da liberação de  $\text{Ca}^{2+}$  do retículo sarcoplasmático (MACINTOSH; HOLASH; RENAUD, 2012). Assim, a ausência de recuperação da razão  $\text{Dp}_{10:100}$  do pós-ciclismo para o pós-corrida pode indicar que os processos relacionados à liberação de  $\text{Ca}^{2+}$  permaneceram deprimidos no pós-corrida em ambas as distâncias do *Triathlon*. No entanto, a redução de  $\text{Dp}_{100}$  do pós-natação para o pós-ciclismo foi mais expressiva no *Triathlon* Olímpico do que no *Sprint*, e mesmo assim retornou ao nível basal após a corrida no *Triathlon* Olímpico. Além disso, o  $\text{Dp}_{100}$  permaneceu ligeiramente deprimido após a corrida no *Triathlon Sprint*, e retornou ao nível pós-natação, mas não atingiu o nível basal. Uma redução na  $\text{Dp}_{100}$  é um indicativo de fadiga de alta frequência e tem sido atribuída ao acúmulo de  $\text{K}^+$  extracelular (MILLET et al., 2011). Um acúmulo extracelular de  $\text{K}^+$  tem sido considerado dependente tanto da intensidade quanto da duração do exercício (BLACK et al., 2017; PIRES et al., 2011). Assim, uma maior redução do  $\text{Dp}_{100}$  no pós-ciclismo do *Triathlon* Olímpico pode ter sido decorrência da fase mais longa de ciclismo, enquanto a maior recuperação na  $\text{Dp}_{100}$  após a corrida no *Triathlon* Olímpico pode ter sido associada à menor velocidade de corrida. Esses achados sugerem diferenças no desenvolvimento de fadiga de alta, mas não de baixa frequência, entre o *Triathlon* Olímpico e *Sprint*.

Embora não tenha ocorrido uma redução na AV desde o *baseline* até o pós-natação, a fase de ciclismo induziu reduções semelhantes na AV em ambas as distâncias de *Triathlon* (*Sprint*,  $-10 \pm 9\%$ ; Olímpico,  $-8 \pm 8\%$ ). Um estudo anterior relatou níveis semelhantes de redução na AV após 20 km ( $-11\%$ ) e 40 km ( $-10\%$ ) de ciclismo sem natação anterior (THOMAS et al., 2015). Diferente dos marcadores de fadiga periférica que se recuperaram total (Olímpico) ou parcialmente (*Sprint*) após a corrida, a AV reduziu ainda mais do pós-ciclismo para o pós-corrida em ambas as distâncias de *Triathlon* (*Sprint*,  $-15 \pm 14\%$ ; Olímpico,  $-16 \pm 8\%$ ). A redução da AV do

pós-ciclismo para o pós-corrida quando realizado em sequência já havia sido relatada previamente (PAGEAUX; THEUREL; LEPERS, 2017). Embora o presente estudo não permita distinguir a origem da fadiga central, os mecanismos fisiológicos do aumento da fadiga central podem ser distintos no ciclismo e na corrida (BROWNSTEIN et al., 2022). A excitabilidade do motoneurônio  $\alpha$  reduz em maior extensão após a corrida do que após o ciclismo (BROWNSTEIN et al., 2022). O mecanismo proposto para essa maior redução na excitabilidade do motoneurônio  $\alpha$  após a corrida é que os repetidos ciclos de alongamento-encurtamento durante a corrida aumentam a taxa de disparo dos aferentes musculares do grupo III/IV, diminuindo a ativação do motoneurônio  $\alpha$  (BROWNSTEIN et al., 2022). Curiosamente, uma maior redução na excitabilidade do motoneurônio  $\alpha$  coincidiu com uma maior redução na AV após a corrida (BROWNSTEIN et al., 2022), sugerindo que a corrida tem sido associada a maiores prejuízos na função do sistema nervoso, particularmente no nível espinhal. Assim, como os marcadores de fadiga periférica foram recuperados após a corrida, enquanto a AV foi mantida deprimida, a redução pós-corrida na CVIM pode ser atribuída principalmente a mecanismos centrais.

Sabemos que muitos grupos musculares são recrutados durante o *Triathlon* e apresentam graus variados de contribuição por modalidade esportiva. Nosso estudo investigou apenas a fadiga do grupo muscular quadríceps. Assim, a dinâmica de fadiga de outros músculos recrutados (por exemplo, tríceps braquial na natação e tríceps sural na corrida) deve ser avaliada em um estudo mais aprofundado. No entanto, nossos achados fornecem informações importantes sobre a fadiga de um grupo muscular locomotor recrutado em grande parte durante o *Triathlon*. A presença de outros competidores, a condição de vácuo, e a topografia também podem influenciar a intensidade do exercício durante o *Triathlon* (WU et al., 2014), o que pode

influenciar na fadiga neuromuscular. Assim, mais estudos simulando diferentes ambientes forneceriam mais informações sobre a importância desses fatores na fadiga neuromuscular durante o *Triathlon*. Permitir que os participantes pratiquem seu próprio cronograma de nutrição/hidratação é uma limitação do estudo. Embora esta estratégia proporcione uma simulação mais próxima de um *Triathlon* real, não podemos desconsiderar a potencial influência do esquema de nutrição/hidratação no desenvolvimento da fadiga neuromuscular. Assim, estudos controlando nutrição/hidratação fornecerão mais informações sobre sua influência no desenvolvimento da fadiga neuromuscular. Também determinamos a transição do domínio pesado para o severo através de métodos distintos entre as diferentes modalidades envolvidas no *Triathlon*. Optamos por utilizar o PCR durante o ciclismo e a corrida ao invés de seguir calculando a potência/velocidade crítica para evitar muitas visitas ao laboratório, o que é um desafio em estudos que recrutam atletas mesmo que sendo amadores. Embora o PCR seja bem aceito como um substituto da potência/velocidade crítica (AZEVEDO et al., 2021a; THOMAS et al., 2016), estudos adicionais que determinam a potência crítica para ciclismo e velocidade crítica para corrida podem fornecer mais informações. Outro aspecto importante é que nossos participantes eram competidores de nível regional; assim, não se sabe se nossos achados podem ser expandidos para triatletas profissionais. Atletas bem treinados são frequentemente submetidos a maiores cargas de treinamento e podem tolerar maiores níveis de esforço (DUCROCQ et al., 2021), o que poderia alterar os componentes centrais e periféricos da fadiga neuromuscular. No entanto, nossas descobertas fornecem novos *insights* sobre o desenvolvimento da fadiga central e periférica durante as duas principais competições de *Triathlon*.

## 6 CONCLUSÃO

A fadiga periférica desenvolveu-se progressivamente e de maneira semelhante entre as distâncias do *Triathlon* até o pós-ciclismo. Esse comportamento foi acompanhado por uma similaridade no tempo gasto no domínio severo durante as fases de natação e ciclismo nas diferentes distâncias do *Triathlon*. Após a fase de corrida, a fadiga periférica se recuperou totalmente no *Triathlon* Olímpico e parcialmente no *Sprint*. A intensidade média da corrida abaixo do PCR e o maior tempo gasto nos domínios pesado e moderado no *Triathlon* Olímpico auxiliam a explicar essa diferença de recuperação da fadiga periférica, destacando a importância da intensidade do exercício no comportamento da fadiga neuromuscular no *Triathlon*. A fadiga central começou no pós-ciclismo e progrediu até o pós-corrida independente da distância do *Triathlon*.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, D. G.; LAMB, G. D.; WESTERBLAD, H. Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. **Physiological Reviews**, v. 88, n. 1, p. 287–332, 2008.

AMANN, M. et al. On the influence of group III/IV muscle afferent feedback on endurance exercise performance. **Exercise and Sport Sciences Reviews**, v. 48, n. 4, p. 209–216, 2020.

AOYAGI, A.; ISHIKURA, K.; NABEKURA, Y. Exercise Intensity during Olympic-Distance Triathlon in Well-Trained Age-Group Athletes: An Observational Study. **Sports**, v. 9, n. 2, p. 1–17, 2021.

AZEVEDO, R. DE A. et al. Characterization of performance fatigability during a self-paced exercise. **Journal of Applied Physiology**, v. 127, n. 3, p. 838–846, 2019.

AZEVEDO, R. DE A. et al. Distinct pacing profiles result in similar perceptual responses and neuromuscular fatigue development: Why different “roads” finish at the same line? **European Journal of Sport Science**, p. 1–11, 2021a.

AZEVEDO, R. DE A. et al. Fatigue development and perceived response during self-paced endurance exercise: state-of-the-art review. **European Journal of Applied Physiology**, v. 121, n. 3, p. 687-696, 2021b.

BENTLEY, D. J. et al. Maximising performance in triathlon: Applied physiological and nutritional aspects of elite and non-elite competitions. **Journal of Science and Medicine in Sport**, v. 11, n. 4, p.407-416, 2008.

BERGSTROM, H. C. et al. The relationships among critical power determined from a 3-min all-out test, respiratory compensation point, gas exchange threshold, and ventilatory threshold. **Research Quarterly for Exercise and Sport**, v. 84, n. 2, p. 232–238, 2013.

BERNARD, T. et al. Distribution of power output during the cycling stage of a triathlon world cup. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 41, n. 6, p. 1296–1302, 2009.

BESSION, T. et al. Fatigue and Recovery following Single- versus Multistage Ultramarathon Running. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 52, n. 8, p. 1691–1698, 2020.

BIJKER, K. E.; DE GROOT, G.; HOLLANDER, A. P. Differences in leg muscle activity during running and cycling in humans. **European Journal of Applied Physiology**, v. 87, n. 6, p. 556–561, 2002.

BLACK, M. I. et al. Self-pacing increases critical power and improves performance during severe-intensity exercise. **Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism**, v. 40, n. 7, p. 662–670, 2015.

BLACK, M. 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, 2017.

BOCCIA, G. et al. Women show similar central and peripheral fatigue to men after half-marathon. **European Journal of Sport Science**, v. 18, n. 5, p. 695–704, 2018.

BROWNSTEIN, C. G. et al. Disparate Mechanisms of Fatigability in Response to Prolonged Running versus Cycling of Matched Intensity and Duration. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, 2022.

BROWNSTEIN, C. G.; MILLET, G. Y.; THOMAS, K. Neuromuscular responses to fatiguing locomotor exercise. **Acta Physiologica**, v. 231, n. 2, 2021.

BURNLEY, M.; JONES, A. M. Power–duration relationship: Physiology, fatigue, and the limits of human performance. **European Journal of Sport Science**, v. 18, n. 1, p. 1–12, 2018.

CAEN, K. 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.

CAEN, K. et al. The Reconstitution of  $W'$  Depends on Both Work and Recovery Characteristics. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 51, n. 8, p. 1745–1751, 2019.

CAEN, K. et al.  $W'$  Recovery Kinetics after Exhaustion: A Two-Phase Exponential Process Influenced by Aerobic Fitness. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 53, n. 9, p. 1911–1921, 2021.

CARROLL, T. J.; TAYLOR, J. L.; GANDEVIA, S. C. Recovery of central and peripheral neuromuscular fatigue after exercise. **Journal of Applied Physiology**, v. 122, n. 5, p. 1068–1076, 2017.

CARTER, H. et al. Oxygen uptake kinetics in treadmill running and cycle ergometry: A comparison. **Journal of Applied Physiology**, v. 89, n. 3, p. 899–907, 2000.

CEREZUELA-ESPEJO, V. et al. The relationship between lactate and ventilatory thresholds in runners: Validity and reliability of exercise test performance parameters. **Frontiers in Physiology**, v. 9, 2018.

CHIDNOK, W. et al. Effects of pacing strategy on work done above critical power during high-intensity exercise. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 45, n. 7, p. 1377–1385, 2013a.

CHIDNOK, W. et al. Muscle metabolic determinants of exercise tolerance following exhaustion: Relationship to the "critical power. **Journal of Applied Physiology**, v. 115, n. 2, p. 243–250, 2013b.

COHEN, J. **Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences**. Second Edition. Hillsdale (NJ): Lawrence Erlbaum Associates, 1988.

DE PAUW, K. et al. Guidelines to classify subject groups in sport-science research. **International Journal of Sports Physiology and Performance**, v. 8, n. 2, p. 111-122, 2022.

DUCROCQ, G. P. et al. Recovery from Fatigue after Cycling Time Trials in Elite Endurance Athletes. **Medicine and science in sports and exercise**, v. 53, n. 5, p. 904–917, 2021.

ESTEVE-LANAO, J. et al. Is marathon training harder than the Ironman training? An ECO-method comparison. **Frontiers in Physiology**, v. 8, 2017.

ETXEBARRIA, N. et al. Running your best triathlon race. **International Journal of Sports Physiology and Performance**, v. 16, n. 5, p. 744–747, 2021.

FELIPPE, L. C. et al. Relationship between recovery of neuromuscular function and subsequent capacity to work above critical power. **European Journal of Applied Physiology**, v. 120, n. 6, p. 1237–1249, 2020.

FERNANDES, A. L. et al. Effect of time of day on performance, hormonal and metabolic response during a 1000-M cycling time trial. **PLoS ONE**, v. 9, n. 10, p. 1–8, 2014.

FIGUEIREDO, P. et al. Upper- and lower-limb muscular fatigue during the 200-m front crawl. **Applied Physiology, Nutrition and Metabolism**, v. 38, n. 7, p. 716–724, 2013.

FIGUEIREDO, P.; MARQUES, E. A.; LEPERS, R. Changes in contributions of swimming, cycling, and running performances on overall triathlon performance over a 26-year period. **Journal of Strength and Conditioning Research**, v. 30, n. 9, p. 2406–2415, 2016.

GALÁN-RIOJA, M. Á. et al. Relative Proximity of Critical Power and Metabolic/Ventilatory Thresholds: Systematic Review and Meta-Analysis. **Sports Medicine**, v. 50, n. 10, p. 1771-1783, 2020.

GANDEVIA, S. C. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. **Physiological Reviews**, v. 81, n. 4, p. 1725-1789, 2001.

GIBSON, A. S. C. et al. The role of information processing between the brain and peripheral physiological systems in pacing and perception of effort. **Sports Medicine**, v. 36, n. 8, p. 705–722, 2006.

GOURGOULIS, V. et al. The effect of leg kick on sprint front crawl swimming. **Journal of Sports Sciences**, v. 32, n. 3, p. 278–289, 2014.

HAMNER, S. R.; SETH, A.; DELP, S. L. Muscle contributions to propulsion and support during running. **Journal of Biomechanics**, v. 43, n. 14, p. 2709–2716, 2010.

HAUSSWIRTH, C. et al. Pacing strategy during the initial phase of the run in triathlon: Influence on overall performance. **European Journal of Applied Physiology**, v. 108, n. 6, p. 1115–1123, 2010.

HAUSSWIRTH, C.; BRISSWALTER, J. Strategies for improving performance in long duration events: Olympic distance triathlon. **Sports Medicine**, v. 38, n. 11, p. 881–891, 2008.

HERMENS, H. J. et al. Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. **Journal of Electromyography and Kinesiology**, v. 10, n. 5, p. 361–374, 2000.

HILL, C. A. et al. Sarcoplasmic reticulum function and muscle contractile character following fatiguing exercise in humans. **Journal of Physiology**, v. 531, n. 3, p. 871–878, 2001.

HOWARD, R. M.; CONWAY, R.; HARRISON, A. J. Muscle activity in sprinting: a review. **Sports Biomechanics**, v. 17, n. 1, p. 1–17, 2018.

HOWELL, J. N.; CHLEBOUN, G.; CONATSER, R. Muscle stiffness, strength loss, swelling and soreness following exercise-induced injury in humans. **The Journal of Physiology**, v. 464, n. 1, p. 183–196, 1993.

HUG, F.; DOREL, S. Electromyographic analysis of pedaling: A review. **Journal of Electromyography and Kinesiology**, v. 19, n. 2, p. 182–198, 2009.

HUREAU, T. J.; ROMER, L. M.; AMANN, M. The ‘sensory tolerance limit’: A hypothetical construct determining exercise performance? **European Journal of Sport Science**, v. 18, n. 1, p. 13–24, 2018.

JAMNICK, N. A. et al. An Examination and Critique of Current Methods to Determine Exercise Intensity. **Sports Medicine**, v. 50, n. 10, p. 1729–1756, 2020.

JONES, A. M. et al. Muscle metabolic responses to exercise above and below the “critical power” assessed using <sup>31</sup>P-MRS. **American Journal of Physiology - Regulatory Integrative and Comparative Physiology**, v. 294, n. 2, 2008.

JONES, A. M. et al. Slow component of  $\dot{V}O_2$  kinetics: Mechanistic bases and practical applications. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 43, n. 11, p. 2046–2062, 2011.

JONES, A. M. et al. The maximal metabolic steady state: redefining the ‘gold standard’. **Physiological Reports**, v. 7, n. 10, 2019.

JONES, A. M.; VANHATALO, A. The ‘Critical Power’ Concept: Applications to Sports Performance with a Focus on Intermittent High-Intensity Exercise. **Sports Medicine**, v. 47, p. 65–78, 2017.

JONES, D. A. High- and low-frequency fatigue revisited. **Acta Physiologica**

**Scandinavica**, v. 156, n. 3, p. 265–270, 1996.

KEIR, D. 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.

KEIR, D. A. et al. Using ramp-incremental  $\dot{V}O_2$  responses for constant-intensity exercise selection. **Applied Physiology, Nutrition and Metabolism**, v. 43, n. 9, p. 882-892, 2018.

KOMI, P. V. Stretch-shortening cycle: A powerful model to study normal and fatigued muscle. **Journal of Biomechanics**, v. 33, n. 10, p. 1197-1206, 2000.

KRÜGER, R. L. et al. Cycling performed on an innovative ergometer at different intensities–durations in men: Neuromuscular fatigue and recovery kinetics. **Applied Physiology, Nutrition and Metabolism**, v. 44, n. 12, p. 1320–1328, 2019.

LE MEUR, Y. et al. Influence of gender on pacing adopted by elite triathletes during a competition. **European Journal of Applied Physiology**, v. 106, n. 4, p. 535–545, 2009.

LEO, J. A. et al. The Respiratory Compensation Point is Not a Valid Surrogate for Critical Power. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 49, n. 7, p. 1452–1460, 2017.

LEPERS, R. et al. Neuromuscular fatigue during a long-duration cycling exercise. **Journal of Applied Physiology**, v. 92, n. 4, p. 1487–1493, 2002.

LEPERS, R. et al. Neuromuscular fatigue following constant versus variable-intensity endurance cycling in triathletes. **Journal of Science and Medicine in Sport**, v. 11, n. 4, p. 381–389, 2008.

MACINTOSH, B. R.; HOLASH, R. J.; RENAUD, J. M. Skeletal muscle fatigue-regulation of excitation-contraction coupling to avoid metabolic catastrophe. **Journal of Cell Science**, v. 125, n. 9, p. 2105–2114, 2012.

MARTENS, J.; FIGUEIREDO, P.; DALY, D. Electromyography in the four competitive swimming strokes: A systematic review. **Journal of Electromyography and Kinesiology**, v. 25, n. 2, p. 273-291, 2015.

MARTIN, V. et al. Central and peripheral contributions to neuromuscular fatigue induced by a 24-h treadmill run. **Journal of Applied Physiology**, v. 108, n. 5, p. 1224–1233, maio 2010.

MERTON, P. A. Voluntary strength and fatigue. **The Journal of physiology**, v. 123, n. 3, p. 553–64, 1954.

MEYER, T. et al. A conceptual framework for performance diagnosis and training prescription from submaximal gas exchange parameters - Theory and application. **International Journal of Sports Medicine**, v. 46, n. 1, 2005.

MILLET, G. P.; VLECK, V. E.; BENTLEY, D. J. Physiological differences between cycle and run training: lessons from triathletes. **Sports Medicine**, v. 39, n. 3, p. 179–206, 2009.

MILLET, G. Y. et al. Electrical stimulation for testing neuromuscular function: From sport to pathology. **European Journal of Applied Physiology**, v. 111, n. 10, p. 2489-2500, 2011.

MILLET, G. Y. et al. Potential interests and limits of magnetic and electrical stimulation techniques to assess neuromuscular fatigue. **Neuromuscular Disorders**, v. 22, n. SUPPL. 3, 1 dez. 2012.

MILLET, G. Y.; LEPEERS, R. Alterations of Neuromuscular Function after Prolonged Running, Cycling and Skiing Exercises. **Sports Medicine**, v. 34, n. 2, p. 105-116, 2004.

NEYROUD, D. et al. The effect of muscle fatigue on stimulus intensity requirements for central and peripheral fatigue quantification. **European Journal of Applied Physiology**, v. 114, n. 1, p. 205–215, 2014.

NIXON, R. J. et al. Steady-state  $\dot{V}O_2$  above MLSS: evidence that critical speed better represents maximal metabolic steady state in well-trained runners. **European Journal of Applied Physiology**, v. 121, n. 11, p. 3133–3144, 2021.

NOAKES, T. D. Time to move beyond a brainless exercise physiology: the evidence for complex regulation of human exercise performance. **Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism**, v. 36, n. 1, p. 23–35, 2011.

NOVACHEK, T. F. The biomechanics of running. **Gait and Posture**, v. 7, n. 1, p. 77-95, 1998.

PAGEAUX, B.; THEUREL, J.; LEPEERS, R. Cycling versus uphill walking: Impact on locomotor muscle fatigue and running exercise. **International Journal of Sports Physiology and Performance**, v. 12, n. 10, p. 1310–1318, 2017.

PEELING, P. D.; BISHOP, D. J.; LANDERS, G. J. Effect of swimming intensity on subsequent cycling and overall triathlon performance. **British Journal of Sports Medicine**, v. 39, n. 12, p. 960–964, 2005.

PEELING, P.; LANDERS, G. Swimming intensity during triathlon: A review of current research and strategies to enhance race performance. **Journal of Sports Sciences**, v. 27, n. 10, p. 1079–1085, 2009.

PIRES, F. O. et al. Cardiopulmonary, blood metabolite and rating of perceived exertion responses to constant exercises performed at different intensities until exhaustion. **British Journal of Sports Medicine**, v. 45, n. 14, p. 1119–1125, 2011.

PLACE, N. et al. Time course of neuromuscular alterations during a prolonged running exercise. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 36, n. 8, p. 1347–

1356, 2004.

PLACE, N. et al. Muscle fatigue: From observations in humans to underlying mechanisms studied in intact single muscle fibres. **European Journal of Applied Physiology**, v. 110, n. 1, p. 1–15, 2010.

POOLE, D. C. et al. The anaerobic threshold: 50+ years of controversy. **Journal of Physiology**, v. 599, n. 3, p. 737-767, 2021.

PUCCINELLI, P. J. et al. Predictors of performance in Amateur Olympic distance triathlon: Predictors in amateur triathlon. **Physiology and Behavior**, v. 225, 2020.

RENFREE, A. et al. Complex interplay between determinants of pacing and performance during 20-km cycle time trials. **International Journal of Sports Physiology and Performance**, v. 7, n. 2, p. 121–129, 2012.

ROSS, E. Z. et al. Time course of neuromuscular changes during running in well-trained subjects. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 42, n. 6, p. 1184–1190, 2010.

SANTOS, P. S. et al. Caffeine increases peripheral fatigue in low-but not in high-performing cyclists. **Applied Physiology, Nutrition and Metabolism**, v. 45, n. 11, p. 1208–1215, 2020.

SHARMA, A. P.; PÉRIARD, J. D. Physiological Requirements of the Different Distances of Triathlon. **Triathlon Medicine**, p. 5–17, 2020.

SHIELD, A.; ZHOU, S. Assessing Voluntary Muscle Activation with the Twitch Interpolation Technique. **Sports Medicine**, v. 34, n. 4, p. 253–267, 2004.

ŠKOF, B.; STROJNIK, V. Neuromuscular fatigue and recovery dynamics following prolonged continuous run at anaerobic threshold. **British Journal of Sports Medicine**, v. 40, n. 3, p. 219–222, 2006.

SOUSA, C. V. et al. What Is the Best Discipline to Predict Overall Triathlon Performance? An Analysis of Sprint, Olympic, Ironman® 70.3, and Ironman® 140.6. **Frontiers in Physiology**, v. 12, 2021.

STROJNIK, V.; KOMI, P. V. Neuromuscular fatigue after maximal stretch-shortening cycle exercise. **Journal of Applied Physiology**, v. 84, n. 1, p. 344–350, 1998.

SURIANO, R.; BISHOP, D. Physiological attributes of triathletes. **Journal of Science and Medicine in Sport**, v. 13, n. 3, p. 340–347, 2010.

TAYLOR, D.; SMITH, M. F. Scalar-linear increases in perceived exertion are dissociated from residual physiological responses during sprint-distance triathlon. **Physiology and Behavior**, v. 118, p. 178–184, 2013.

TAYLOR, D.; SMITH, M. F. The influence of mid-event deception on psychophysiological status and pacing can persist across consecutive disciplines and enhance self-paced multi-modal endurance performance. **Frontiers in Physiology**, v. 8, 2017.

THOMAS, K. et al. Central and peripheral fatigue in male cyclists after 4-, 20-, and 40-km time trials. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 47, n. 3, p. 537–546, 2015.

THOMAS, K. et al. Intensity-Dependent Contribution of Neuromuscular Fatigue after Constant-Load Cycling. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 48, n. 9, p. 1751–1760, 2016.

TOMAZIN, K.; MORIN, J.-B.; MILLET, G. Y. Etiology of Neuromuscular Fatigue After Repeated Sprints Depends on Exercise Modality. **International Journal of Sports Physiology and Performance**, v. 12, n. 7, p. 878–885, 2017.

TOUBEKIS, A. G.; TOKMAKIDIS, S. P. Metabolic responses at various intensities relative to critical swimming velocity. **Journal of Strength and Conditioning Research**, v. 27, n. 6, p. 1731-1741, 2013.

TWOMEY, R. et al. Neuromuscular fatigue during exercise: Methodological considerations, etiology and potential role in chronic fatigue. **Clinical Neurophysiology**, v. 47, n. 2, p. 95-110, 2017.

VLECK, V. E. et al. Pacing during an elite Olympic distance triathlon: Comparison between male and female competitors. **Journal of Science and Medicine in Sport**, v. 11, n. 4, p. 424–432, 2008.

VLECK, V. E.; BÜRGI, A.; BENTLEY, D. J. The consequences of swim, cycle, and run performance on overall result in elite olympic distance triathlon. **International Journal of Sports Medicine**, v. 27, n. 1, p. 43–48, jan. 2006.

WEAVIL, J. C.; AMANN, M. Neuromuscular fatigue during whole body exercise. **Current Opinion in Physiology**, v. 10, p. 128-136, 2019.

WHIPP, B. J. et al. A test to determine parameters of aerobic function during exercise. **Journal of Applied Physiology Respiratory Environmental and Exercise Physiology**, v. 50, n. 1, p. 217–221, 1981.

WU, S. S. X. et al. Factors influencing pacing in triathlon. **Open Access Journal of Sports Medicine**, v. 5, p. 223, 2014.

WU, S. S. X. et al. Pacing strategies during the swim, cycle and run disciplines of sprint, Olympic and half-Ironman triathlons. **European Journal of Applied Physiology**, v. 115, n. 5, p. 1147–1154, 2015.

WÜTHRICH, T. U.; EBERLE, E. C.; SPENGLER, C. M. Locomotor and diaphragm muscle fatigue in endurance athletes performing time-trials of different durations. **European Journal of Applied Physiology**, v. 114, n. 8, p. 1619–1633,

2014.

YAO, J. et al. Lower limb joint motion and muscle force in treadmill and over-ground exercise. **BioMedical Engineering Online**, v. 18, n. 1, 2019.

## ANEXO 1 – TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

### TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Nós, Gleber Pereira, pesquisador responsável e Vinicius Ferreira dos Santos Andrade, aluno de pós-graduação da Universidade Federal do Paraná, estamos convidando você, triatleta amador, com idade entre 20 e 45 anos, envolvido em treinamento regular, a participar de um estudo intitulado "COMPORTAMENTO DA FADIGA NEUROMUSCULAR NO TRIATHLON". Esta pesquisa irá investigar o envolvimento de mecanismos centrais (sistema nervoso central) e periféricos (músculo) no desenvolvimento da fadiga neuromuscular ao longo da prova de *Triathlon*. Esse tipo de investigação fornece subsídios para treinadores prescreverem exercícios específicos que atendam às exigências da modalidade praticada, tendo em vista que a fadiga neuromuscular impacta diretamente no desempenho.

- a) O objetivo desta pesquisa é comparar a fadiga neuromuscular (redução da força muscular por causa de alterações no sistema nervoso central e/ou no músculo) em provas de *Triathlon* envolvendo diferentes distâncias.
- b) Caso você participe da pesquisa, será necessário comparecer a esta Universidade 3 (três) vezes, com no mínimo 10 (dez) dias de intervalo, em um período máximo de 6 (seis) semanas, dependendo da sua disponibilidade. Cada visita terá a duração aproximada de 3 horas. Além disso, você deverá abster-se de qualquer tipo de alimento que contenha cafeína, bebidas alcóolicas e de treinamento intenso nas 24 horas que antecedem a coleta de dados.

Na primeira visita, você será submetido aos seguintes procedimentos: 1) você preencherá e assinará esse presente termo; 2) você será orientado a responder um questionário de avaliação de risco ao exercício, contendo perguntas referentes a possíveis sintomas que você sente quando pratica exercício; 3) você irá realizar uma avaliação antropométrica, com medidas de estatura, peso e dobras da pele, em determinados pontos específicos do seu corpo, para cálculo do seu percentual de gordura corporal; 4) você realizará um teste incremental em esteira rolante, no qual você realizará um aquecimento de 3 minutos a 6km/h, após isso a esteira será colocada a 8km/h e a velocidade será aumentada em 0,5km/h a cada 30 segundos até que você decida parar. Será fixada uma máscara em seu rosto para análise do seu consumo de oxigênio e da sua produção de dióxido de carbono. Posteriormente, você será familiarizado com os procedimentos de avaliação neuromuscular. Esta avaliação consiste na realização de duas contrações máximas de extensão de joelho para mensurar a força dos músculos da coxa, assim como, pequenos estímulos elétricos (choques) serão aplicados na musculatura da coxa, para estimar a força que seu músculo é capaz de produzir a partir de um estímulo elétrico.

Na segunda e na terceira visita você realizará uma prova de *Triathlon Sprint* ou uma prova de *Triathlon Olímpico*. O *Triathlon Sprint* é composto pela execução sequencial de 750m de natação, 20km de ciclismo e 5km de corrida. Já o *Triathlon Olímpico* contará com a execução de 1.500m de natação, 40km de ciclismo e 10km de corrida. Antes de iniciar a realização das provas será feita uma raspagem de uma pequena área da sua coxa para remoção dos pelos e posterior limpeza com álcool. Esse procedimento é necessário para fixação de dois eletrodos na sua coxa. Os eletrodos são fixados com cola aderente de fácil remoção e de forma indolor (sem dor). Todo material de coleta usado no seu procedimento é descartável e higienizado adequadamente. Nesses testes (visitas 2 e 3) você repetirá o procedimento descrito na visita um (1), que é a realização de duas contrações máximas de extensão da perna para mensurar a força dos músculos da coxa, assim como, pequenos estímulos elétricos (choques) que serão aplicados na musculatura da coxa, para estimar a força que seu músculo é capaz de produzir a partir de um estímulo elétrico. Esse procedimento será feito antes do *Triathlon*, durante as transições da natação para o ciclismo e do ciclismo para a corrida, e após a prova de *Triathlon*.

Durante os testes, os pesquisadores poderão realizar fotos e vídeos para fins de divulgação científica (palestras e congressos), mas sua identidade será preservada através da ofuscação de seu rosto nos vídeos e fotos via tecnologia computacional.

Aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa  
em Seres Humanos do Setor de Ciências da  
Saúde/UFPR.  
Parecer CEP/SD-PG nº 3312/18  
na data de 08/05/2019. OK

Participante da Pesquisa e/ou Responsável Legal:  
Pesquisador responsável ou quem aplicou o TCLE:

Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos do Setor de Ciências da Saúde da UFPR / CEP/SD  
Rua Padre Camargo, 285 / 1º andar / Alto da Glória / Curitiba / PR / CEP 80060-240 /  
cometica.saude@ufpr.br - telefone (41) 3360-7259

### TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Nós, Gleber Pereira, pesquisador responsável e Vinicius Ferreira dos Santos Andrade, aluno de pós-graduação da Universidade Federal do Paraná, estamos convidando você, triatleta amador, com idade entre 20 e 45 anos, envolvido em treinamento regular, a participar de um estudo intitulado "COMPORTAMENTO DA FADIGA NEUROMUSCULAR NO TRIATHLON". Esta pesquisa irá investigar o envolvimento de mecanismos centrais (sistema nervoso central) e periféricos (músculo) no desenvolvimento da fadiga neuromuscular ao longo da prova de *Triathlon*. Esse tipo de investigação fornece subsídios para treinadores prescreverem exercícios específicos que atendam às exigências da modalidade praticada, tendo em vista que a fadiga neuromuscular impacta diretamente no desempenho.

- a) O objetivo desta pesquisa é comparar a fadiga neuromuscular (redução da força muscular por causa de alterações no sistema nervoso central e/ou no músculo) em provas de *Triathlon* envolvendo diferentes distâncias.
- b) Caso você participe da pesquisa, será necessário comparecer a esta Universidade 3 (três) vezes, com no mínimo 10 (dez) dias de intervalo, em um período máximo de 6 (seis) semanas, dependendo da sua disponibilidade. Cada visita terá a duração aproximada de 3 horas. Além disso, você deverá abster-se de qualquer tipo de alimento que contenha cafeína, bebidas alcóolicas e de treinamento intenso nas 24 horas que antecedem a coleta de dados.

Na primeira visita, você será submetido aos seguintes procedimentos: 1) você preencherá e assinará esse presente termo; 2) você será orientado a responder um questionário de avaliação de risco ao exercício, contendo perguntas referentes a possíveis sintomas que você sente quando pratica exercício; 3) você irá realizar uma avaliação antropométrica, com medidas de estatura, peso e dobras da pele, em determinados pontos específicos do seu corpo, para cálculo do seu percentual de gordura corporal; 4) você realizará um teste incremental em esteira rolante, no qual você realizará um aquecimento de 3 minutos a 6km/h, após isso a esteira será colocada a 8km/h e a velocidade será aumentada em 0,5km/h a cada 30 segundos até que você decida parar. Será fixada uma máscara em seu rosto para análise do seu consumo de oxigênio e da sua produção de dióxido de carbono. Posteriormente, você será familiarizado com os procedimentos de avaliação neuromuscular. Esta avaliação consiste na realização de duas contrações máximas de extensão de joelho para mensurar a força dos músculos da coxa, assim como, pequenos estímulos elétricos (choques) serão aplicados na musculatura da coxa, para estimar a força que seu músculo é capaz de produzir a partir de um estímulo elétrico.

Na segunda e na terceira visita você realizará uma prova de *Triathlon Sprint* ou uma prova de *Triathlon Olímpico*. O *Triathlon Sprint* é composto pela execução sequencial de 750m de natação, 20km de ciclismo e 5km de corrida. Já o *Triathlon Olímpico* contará com a execução de 1.500m de natação, 40km de ciclismo e 10km de corrida. Antes de iniciar a realização das provas será feita uma raspagem de uma pequena área da sua coxa para remoção dos pelos e posterior limpeza com álcool. Esse procedimento é necessário para fixação de dois eletrodos na sua coxa. Os eletrodos são fixados com cola aderente de fácil remoção e de forma indolor (sem dor). Todo material de coleta usado no seu procedimento é descartável e higienizado adequadamente. Nesses testes (visitas 2 e 3) você repetirá o procedimento descrito na visita um (1), que é a realização de duas contrações máximas de extensão da perna para mensurar a força dos músculos da coxa, assim como, pequenos estímulos elétricos (choques) que serão aplicados na musculatura da coxa, para estimar a força que seu músculo é capaz de produzir a partir de um estímulo elétrico. Esse procedimento será feito antes do *Triathlon*, durante as transições da natação para o ciclismo e do ciclismo para a corrida, e após a prova de *Triathlon*.

Durante os testes, os pesquisadores poderão realizar fotos e vídeos para fins de divulgação científica (palestras e congressos), mas sua identidade será preservada através da ofuscação de seu rosto nos vídeos e fotos via tecnologia computacional.

Aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa  
 em Seres Humanos do Setor de Ciências da  
 Saúde/UFPR,  
 Parecer CEP/SD/PR nº 3362/18  
 na data de 08/05/2019. OK

Participante da Pesquisa e/ou Responsável Legal:  
 Pesquisador responsável ou quem aplicou o TCLE:

### TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Nós, Gleber Pereira, pesquisador responsável e Vinicius Ferreira dos Santos Andrade, aluno de pós-graduação da Universidade Federal do Paraná, estamos convidando você, triatleta amador, com idade entre 20 e 45 anos, envolvido em treinamento regular, a participar de um estudo intitulado "COMPORTAMENTO DA FADIGA NEUROMUSCULAR NO TRIATHLON". Esta pesquisa irá investigar o envolvimento de mecanismos centrais (sistema nervoso central) e periféricos (músculo) no desenvolvimento da fadiga neuromuscular ao longo da prova de *Triathlon*. Esse tipo de investigação fornece subsídios para treinadores prescreverem exercícios específicos que atendam às exigências da modalidade praticada, tendo em vista que a fadiga neuromuscular impacta diretamente no desempenho.

- a) O objetivo desta pesquisa é comparar a fadiga neuromuscular (redução da força muscular por causa de alterações no sistema nervoso central e/ou no músculo) em provas de *Triathlon* envolvendo diferentes distâncias.
- b) Caso você participe da pesquisa, será necessário comparecer a esta Universidade 3 (três) vezes, com no mínimo 10 (dez) dias de intervalo, em um período máximo de 6 (seis) semanas, dependendo da sua disponibilidade. Cada visita terá a duração aproximada de 3 horas. Além disso, você deverá abster-se de qualquer tipo de alimento que contenha cafeína, bebidas alcóolicas e de treinamento intenso nas 24 horas que antecedem a coleta de dados.

Na primeira visita, você será submetido aos seguintes procedimentos: 1) você preencherá e assinará esse presente termo; 2) você será orientado a responder um questionário de avaliação de risco ao exercício, contendo perguntas referentes a possíveis sintomas que você sente quando pratica exercício; 3) você irá realizar uma avaliação antropométrica, com medidas de estatura, peso e dobras da pele, em determinados pontos específicos do seu corpo, para cálculo do seu percentual de gordura corporal; 4) você realizará um teste incremental em esteira rolante, no qual você realizará um aquecimento de 3 minutos a 6km/h, após isso a esteira será colocada a 8km/h e a velocidade será aumentada em 0,5km/h a cada 30 segundos até que você decida parar. Será fixada uma máscara em seu rosto para análise do seu consumo de oxigênio e da sua produção de dióxido de carbono. Posteriormente, você será familiarizado com os procedimentos de avaliação neuromuscular. Esta avaliação consiste na realização de duas contrações máximas de extensão de joelho para mensurar a força dos músculos da coxa, assim como, pequenos estímulos elétricos (choques) serão aplicados na musculatura da coxa, para estimar a força que seu músculo é capaz de produzir a partir de um estímulo elétrico.

Na segunda e na terceira visita você realizará uma prova de *Triathlon Sprint* ou uma prova de *Triathlon Olímpico*. O *Triathlon Sprint* é composto pela execução sequencial de 750m de natação, 20km de ciclismo e 5km de corrida. Já o *Triathlon Olímpico* contará com a execução de 1.500m de natação, 40km de ciclismo e 10km de corrida. Antes de iniciar a realização das provas será feita uma raspagem de uma pequena área da sua coxa para remoção dos pelos e posterior limpeza com álcool. Esse procedimento é necessário para fixação de dois eletrodos na sua coxa. Os eletrodos são fixados com cola aderente de fácil remoção e de forma indolor (sem dor). Todo material de coleta usado no seu procedimento é descartável e higienizado adequadamente. Nesses testes (visitas 2 e 3) você repetirá o procedimento descrito na visita um (1), que é a realização de duas contrações máximas de extensão da perna para mensurar a força dos músculos da coxa, assim como, pequenos estímulos elétricos (choques) que serão aplicados na musculatura da coxa, para estimar a força que seu músculo é capaz de produzir a partir de um estímulo elétrico. Esse procedimento será feito antes do *Triathlon*, durante as transições da natação para o ciclismo e do ciclismo para a corrida, e após a prova de *Triathlon*.

Durante os testes, os pesquisadores poderão realizar fotos e vídeos para fins de divulgação científica (palestras e congressos), mas sua identidade será preservada através da ofuscação de seu rosto nos vídeos e fotos via tecnologia computacional.

Aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa  
 em Seres Humanos do Setor de Ciências da  
 Saúde/UFPR,  
 Parecer CEP/SD/Pa nº 3362/18  
 na data de 08/05/2019. OK

Participante da Pesquisa e/ou Responsável Legal:  
 Pesquisador responsável ou quem aplicou o TCLE:

**ANEXO 2 – VISÃO PANORÂMICA DO ESPAÇO FÍSICO EM QUE  
OCORRERAM AS SIMULAÇÕES DE TRIAHTLON**





## ANEXO 4 – ARTIGO PUBLICADO

ANDRADE, V. F. D. S. et al. Complete recovery of quadriceps muscle peripheral fatigue after running in Olympic, but not Sprint, triathlon. **European journal of sport science**, 3 maio 2022.