

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

Igor Martins Barbosa

**EFEITOS DA FADIGA SOBRE A ECONOMIA DE PEDALADA E  
ATIVAÇÃO MUSCULAR EM CICLISTAS TREINADOS DURANTE  
TESTE E RETESTE DE EXAUSTÃO**

Santa Maria, RS  
2021

**Igor Martins Barbosa**

**EFEITOS DA FADIGA SOBRE A ECONOMIA DE PEDALADA E ATIVAÇÃO  
MUSCULAR EM CICLISTAS TREINADOS DURANTE TESTE E RETESTE DE  
EXAUSTÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Educação Física, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Educação Física**

Orientador: Prof. Dr. Carlos Bolli Mota  
Coorientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Cuozzo Lemos

Santa Maria, RS

2021

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Barbosa, Igor Martins

EFEITOS DA FADIGA SOBRE A ECONOMIA DE PEDALADA E  
ATIVÇÃO MUSCULAR EM CICLISTAS TREINADOS DURANTE TESTE E  
RETESTE DE EXAUSTÃO / Igor Martins Barbosa.- 2021.  
40 p.; 30 cm

Orientador: Carlos Bolli Mota

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Educação Física e desportos, Programa de  
Pós-Graduação em Educação Física, RS, 2021

1. Desempenho atlético 2. Ciclismo 3. Fadiga muscular  
I. Bolli Mota, Carlos II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

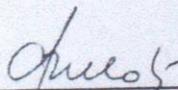
Declaro, IGOR MARTINS BARBOSA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Igor Martins Barbosa

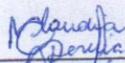
**EFEITOS DA FADIGA SOBRE A ECONOMIA DE PEDALADA E ATIVAÇÃO MUSCULAR EM CICLISTAS TREINADOS DURANTE TESTE E RETESTE DE EXAUSTÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Educação Física, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Educação Física**

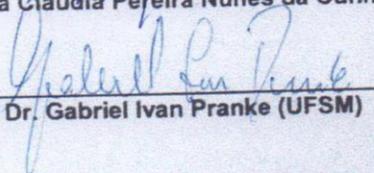
Aprovado em 28 de janeiro de 2021



Prof. Dr. Carlos Bolli Mota (UFSM)  
(Presidente/Orientador)



Prof. Dra. Maria Claudia Pereira Nunes da Cunha (CMB)



Prof. Dr. Gabriel Ivan Pranke (UFSM)

Santa Maria, RS  
2021

## RESUMO

### EFEITOS DA FADIGA SOBRE A ECONOMIA DE PEDALADA E ATIVAÇÃO MUSCULAR EM CICLISTAS TREINADOS DURANTE TESTE E RETESTE DE EXAUSTÃO

AUTOR: Igor Martins Barbosa  
ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Bolli Mota

A fadiga é um processo inevitável durante a realização de exercícios intensos e/ou extensos, a qual reduz o desempenho e a eficiência de atletas de grande parte das modalidades esportivas, tal como o ciclismo. Além disso, a medida que os mecanismos de fadiga se tornam mais atuantes, podem ocorrer alterações no padrão de ativação muscular, especialmente nos músculos que apresentam ação primária para realizar o movimento, neste caso a pedalada. Entretanto, essas reduções e alterações ainda não são bem compreendidas, de modo que estudá-las ao longo do tempo em atividade pode auxiliar na compreensão dos mecanismos de fadiga que acarretam na intolerância ao exercício. A partir disso, o objetivo do presente trabalho foi verificar o efeito da fadiga na economia de pedalada e ativação muscular em ciclistas treinados durante teste e reteste de exaustão. Foram avaliados dezesseis ciclistas competitivos do sexo masculino (idade  $23 \pm 7$  anos, massa corporal:  $67 \pm 7$  kg e estatura:  $177 \pm 6$  cm). Os atletas tinham uma experiência de treinamento de  $\sim 6,5$  anos, um volume de treinamento usual de  $\sim 6$  dias/semana e  $\sim 460$  km/semana. Os ciclistas realizaram duas visitas ao laboratório, sendo que na primeira visita foi executada a avaliação antropométrica e, posteriormente, um teste incremental (aquecimento a 100W por 10 minutos, seguido do acréscimo de 25W a cada minuto até a exaustão) com a finalidade de determinar a potência máxima. Na segunda visita, os ciclistas realizaram um aquecimento similar a primeira visita, em seguida desempenharam os dois testes de tempo até a exaustão em potência máxima e constante, com um período de 10 minutos de recuperação entre testes. Durante os testes foi mensurada a ativação mioelétrica do reto femoral (RF), vasto lateral (VL) e vasto medial (VM), e também as trocas gasosas respiração por respiração. A partir disso, a atividade mioelétrica foi submetida a técnica de bandas de frequência, sendo representados valores de ativação total, alta e baixa frequência para cada músculo. Os dados de trocas gasosas foram utilizados para calcular a demanda energética (PM) e eficiência (GE) dos ciclistas. Os resultados encontrados indicam reduções no GE e aumento da PM em ambos os testes até momento intermediários, a partir dos quais se estabeleceu um platô. Quanto aos resultados de EMG, foram constatadas reduções na ativação das bandas de alta frequência para o músculo VL no decorrer dos testes, o VM apresentou redução apenas no segundo teste, mantendo-se estável no primeiro enquanto para o RF houve um aumento na ativação ao longo do primeiro teste e se manteve estável no segundo. Em relação as bandas de baixa frequência, foi verificado aumento na ativação para todos os músculos avaliados no decorrer de ambos os testes. Por fim, a ativação total não foi alterada tanto no VL quanto no VM, apenas para o RF foi registrado aumento ao longo dos testes.

**Palavras-chave:** Desempenho atlético; Ciclismo; Fadiga muscular.

## ABSTRACT

### EFFECTS OF FATIGUE ON PEDALING ECONOMY AND MUSCLE ACTIVATION IN TRAINED CYCLISTS DURING EXHAUSTION TEST AND RETEST

AUTHOR: Igor Martins Barbosa  
ADVISOR: Prof. Dr. Carlos Bolli Mota

Fatigue is an inevitable process during intense and/or extensive exercises, which reduces the performance and efficiency of athletes in most sports, such as cycling. In addition, as the mechanisms of fatigue become more active, changes in the pattern of muscle activation may occur, especially in the muscles that have primary action to perform the movement, in this case the cycling. However, these reductions and alterations are not yet well understood, so that studying them over time in activity can help in understanding the mechanisms of fatigue that lead to exercise intolerance. From this, the objective of the present work was to verify the effect of fatigue on pedaling economy and muscle activation in trained cyclists during exhaustion test and retest. Sixteen competitive male cyclists were evaluated (age  $23 \pm 7$  years, body mass:  $67 \pm 7$  kg and height:  $177 \pm 6$  cm). The athletes had a training experience of  $\sim 6.5$  years, a usual training volume of  $\sim 6$  days/week and  $\sim 460$  km/week. The cyclists made two visits to the laboratory, with the first visit performed an anthropometric evaluation and then an incremental test (heating to 100W for 10 minutes, followed by the addition of 25W every minute until exhaustion) in order to determine the maximum power. In the second visit, the cyclists performed a heating similar to the first visit, then performed the two tests of time until exhaustion at maximum and constant power, with a period of 10 minutes of recovery between tests. During the tests the myoelectric activation of RF, VL and MV was measured, as well as the gas exchange breath by breath. From this, the myoelectric activity was submitted to a frequency band technique, being represented values of total activation, high and low frequency for each muscle. While the gas exchange data were used to calculate the energy demand (PM) and efficiency (GE) of cyclists. The results found indicate reductions in GE and increase of PM in both tests until now intermediate, from which a plateau was established. As for EMG results, reductions in activation of the high frequency bands for the VL muscle were found during the tests, the MV showed reduction only in the second test, remaining stable in the first. While for RF there was an increase in activation throughout the first test and remained stable in the second test. For the low frequency bands, there was an increase in activation for all muscles evaluated during both tests. Finally, the full activation was not changed in both LV and MV, only for RF was there an increase throughout the tests.

**Keywords:** Athletic performance; Bicycling; Muscle fatigue.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desenho experimental do estudo.....	12
Figura 2 – Valores de potência metabólica dos ciclistas estudados durante os dois testes máximos sucessivos de exaustão (T1-T2).....	14
Figura 3 – Valores de Gross Efficiency dos ciclistas estudados durante os dois testes máximos sucessivos de exaustão (T1-T2) .....	15

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados de ativação muscular (bandas de frequência) em dois testes sucessivos de exaustão de ciclismo. Percentual do total de ativação muscular do reto femoral inicial (10%), no início, meio e final de cada um dos testes máximos de exaustão para as bandas de baixa e alta frequência, bem como o total de ativação.....16

Tabela 2 – Resultados de ativação muscular (bandas de frequência) em dois testes sucessivos de exaustão de ciclismo. Percentual do total de ativação muscular do vasto lateral inicial (10%), no início, meio e final de cada um dos testes máximos de exaustão para as bandas de baixa e alta frequência, bem como o total de ativação.....17

Tabela 3 – Resultados de ativação muscular (bandas de frequência) em dois testes sucessivos de exaustão de ciclismo. Percentual do total de ativação muscular do vasto medial inicial (10%), no início, meio e final de cada um dos testes máximos de exaustão para as bandas de baixa e alta frequência, bem como o total de ativação.....18

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADP	Adenosina difosfato
ATP	Adenosina trifosfato
EMG	Eletromiografia de superfície
GE	<i>Gross efficiency</i>
M	Momento
PCr	Fosfocreatina
Pi	Fosfato inorgânico
PM	Potência metabólica
POMAX	Potência máxima
RF	Reto femoral
T1	Teste 1
T2	Teste 2
VL	Vasto lateral
VM	Vasto medial
VO2	Volume de oxigênio
VO2MAX	Consumo máximo de oxigênio
W	Watts

## SUMÁRIO

1. <b>APRESENTAÇÃO</b> .....	1
2. <b>OBJETIVOS</b> .....	2
2.1 Objetivo geral .....	2
2.2 Objetivos específicos .....	2
3. <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	2
3.1 Conceitos e mecanismos relacionados ao processo de instauração da fadiga	2
3.2 Avaliação da fadiga por meio da ativação muscular em ciclistas .....	5
3.3 Implicações da fadiga na eficiência de ciclistas .....	8
4. <b>ARTIGO</b> .....	11
5. <b>REFERÊNCIAS</b> .....	27

## 1. APRESENTAÇÃO

A presente dissertação tem como temática principal os mecanismos relacionados ao processo de instauração da fadiga durante o ciclismo, bem como suas implicações sobre a ativação elétrica muscular de membros inferiores e eficiência no ciclismo, durante dois sucessivos testes máximos de exaustão. Logo, sua elaboração tem por finalidade responder à seguinte pergunta de pesquisa: “Quais os efeitos da fadiga sobre ativação muscular e economia de pedalada durante teste e reteste de exaustão em ciclistas?”. Os resultados introduzidos, descritos e discutidos neste trabalho, derivam de experimentos realizados nos setores de fisiologia do exercício e plasticidade neuromuscular do Laboratório de Pesquisa do Exercício (LAPEX) da Escola de Educação Física, Fisioterapia e Dança (ESEFID) nas dependências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Diante da pergunta de pesquisa exposta, o conteúdo desta dissertação é apresentado em dois capítulos.

O primeiro capítulo é composto pelo referencial teórico, o qual aborda os conceitos da fadiga em áreas pertinentes à educação física, como, por exemplo, a biomecânica e a fisiologia. Além disso, também é exposta a função da fadiga e seus possíveis mecanismos causais, dividindo-a em dois sítios: fadiga a nível central e/ou periférico, pois ambos os sítios podem conter mecanismos que atuam de forma concomitante, os quais colaboram para a intolerância ao exercício. Somando-se a estes conceitos, são reportados estudos com avaliações de fadiga a partir da ativação elétrica de músculos dos membros inferiores, assim como reflexões e problematizações derivadas destes e que justificam o desenvolvimento do presente trabalho. Por fim, é abordado o conceito de eficiência no ciclismo, que foi definido para esta dissertação como o *gross efficiency* (GE), além de estudos que reportam possíveis efeitos da fadiga no GE, em conjunto com reflexões e problematizações, as quais também justificam o desenvolvimento deste trabalho e a avaliação do GE.

No segundo capítulo está documentado o artigo científico, no qual são apresentadas as discussões acerca dos mecanismos de fadiga muscular que podem ter afetado os ciclistas, tanto no desempenho quanto na ativação elétrica de músculos do quadríceps e medidas de eficiência. A ativação elétrica é descrita em bandas de frequência (altas e baixas) e ativação total, nos momentos definidos como inicial, meio e final dos testes máximos de exaustão. Enquanto que a potência metabólica (PM) e GE são apresentados a partir de médias a cada 10% do tempo de exaustão dos testes. De modo que o acompanhamento das medidas mencionadas no decorrer do tempo, podem fornecer informações mais detalhadas para auxiliar na compreensão de possíveis mecanismos de fadiga atuantes ao longo do tempo de

exaustão.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar os efeitos da fadiga na economia metabólica e ativação muscular de músculos do quadríceps durante a pedalada em ciclistas treinados durante teste e reteste de exaustão.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar o efeito da fadiga no GE e PM em ciclistas competitivos;
- Avaliar o efeito da fadiga na ativação muscular a partir das bandas de baixa e alta frequência nos músculos VL, VM e RF em ciclistas competitivos;
- Avaliar o efeito da fadiga na ativação muscular total dos músculos VL, VM e RF em ciclistas competitivos;
- Comparar o GE e PM entre testes máximos de exaustão em ciclistas competitivos;
- Comparar a ativação muscular total e de bandas de frequência entre testes máximos de exaustão em ciclistas competitivos.

## **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **3.1 Conceitos e mecanismos relacionados ao processo de instauração da fadiga**

O sistema neuromuscular apresenta uma alta capacidade adaptativa, seja para estímulos agudos (exemplo: testes máximos de exaustão) ou crônicos (exemplos: treinamento físico e envelhecimento) (ENOKA; STUART, 1992). Dentre os estímulos agudos, estão presentes tarefas em que há necessidade da sustentação de uma alta carga de trabalho por um determinado período de tempo. Este tipo de estímulo ocasiona uma adaptação denominada de fadiga, a qual é conceituada por alguns autores como um mecanismo preventivo de lesões e de processos subsequentes que podem até mesmo induzir o indivíduo ao óbito (NOAKES; GIBSON, 2004; ABBISS; LAURSEN, 2005). Entretanto, a fadiga não apresenta apenas um conceito universal, sendo vistas distinções de área para área. Na biomecânica, por exemplo, o referido processo é descrito como um conjunto de alterações em função do trabalho realizado e da demanda prolongada de atividade física, que acaba por diminuir a capacidade funcional de manutenção ou sustentação de um determinado nível de força (ROSSI; TIRAPEGUI, 2000; DIMITROVA; DIMITROV, 2003). Enquanto na área fisiológica, a fadiga pode ser

conceituada como a sensação de cansaço relacionada a incapacidade de um sistema fisiológico, o qual se faz responsável pelo declínio do rendimento físico (ABBISS; LAURSEN, 2005).

O fato é que a fadiga é um processo inevitável e complexo, que pode ocorrer devido a mecanismos centrais e/ou periféricos (BIGLAND-RITCHIE et al., 1978; NOAKES, 2000). É bem compreendido que a capacidade de realizar e sustentar atividades físicas é controlada pelos sistemas de órgãos que regulam e prestam suporte ao corpo (KEYSER, 2010). Sendo que os sistemas reguladores são responsáveis por permitir ou restringir as atividades metabólicas. Enquanto os sistemas de suporte apresentam a função de fornecer nutrientes e substratos para a manutenção da função tecidual, bem como remover/eliminar os resíduos produzidos pelo metabolismo e células avariadas, as quais se tornam incapazes de realizar suas funções (KEYSER, 2010). O processo de fadiga periférica é iniciado quando algum dos sistemas demonstra um funcionamento inadequado para realizar ou permitir que a contração muscular ocorra, ou comprometa o fornecimento de energia e a remoção/eliminação dos resíduos necessários para a manutenção da tarefa (FITTS, 2008). Dentre estes, podem ser mencionados a depleção de substratos, declínio na capacidade de transporte de oxigênio e o aumento da concentração de íons de hidrogênio ( $H^+$ ), lactato, fosfato inorgânico (Pi) e da adenosina difosfato (ADP) (DAWSON; GADIAN; WILKIE, 1978; COYLE et al., 1988).

No ciclismo, o processo de instauração da fadiga pode ser atribuído ao excesso de lactato sanguíneo, em intensidades acima de 90% do volume máximo de oxigênio (COYLE et al., 1988). Entretanto, estudos reportam que a concentração de íons de  $H^+$  é mais relevante para a instauração da fadiga, comparado a produção de lactato e a não dissociação do ácido láctico (LANNERGREN; WESTERBLAD, 1991; FITTS; METZGER, 1988). Um dos papéis do  $H^+$  no processo de fadiga apresenta relação com a diminuição do pH intracelular, em virtude do aumento do  $CO_2$  no meio extracelular (DAWSON et al. 1978; EDMAN; MATTIAZZI, 1981). De modo que a ocorrência dessa acidose demonstra associação com a redução do percentual de pontes cruzadas conectadas e, conseqüentemente, da produção e manutenção da força (DAWSON et al. 1978; EDMAN; MATTIAZZI, 1981). O  $H^+$  também atua inibindo a atuação da enzima fosfofrutoquinase (enzima reguladora da glicólise), o que pode prejudicar o fornecimento de energia durante o exercício e contribuir para a intolerância ao mesmo (EDMAN; MATTIAZZI, 1981). Além disso, o  $H^+$  juntamente com o Pi, podem interagir ou concorrer com o cálcio ( $Ca^+$ ) em alguma das etapas do processo de contração muscular, limitando ou não permitindo que o  $Ca^+$  exerça plenamente sua função (FUCHS; REDDY; BRIGGS, 1970; FITTS, 1994; CÈ et al., 2020).

Outro fator associado ao processo de fadiga é a depleção de glicogênio, pois a glicose, que é liberada a partir do glicogênio, é a fonte primordial e principal de energia para a contração muscular (ADEVA-ANDANY et al., 2016). No entanto, em exercícios intensos as reservas de glicogênio são amplamente diminuídas, o que resulta na impossibilidade de se manter a intensidade esperada (ADEVA-ANDANY et al., 2016). A partir de biópsias de músculos de indivíduos saudáveis, pesquisadores verificaram níveis de glicogênio bastante reduzidos nos músculos atuantes após a realização de protocolos de ciclismo, enquanto o conteúdo de glicogênio não se alterou nos músculos que não foram exigidos (BERGSTROM; HULTMAN; ROCH-NORLUND, 1972; KOCHAN et al., 1979). Kochan et al. (1979) ainda reforçam que a capacidade resistiva do músculo esquelético ao exercício, apresenta relação com o conteúdo de glicogênio disponível no mesmo. De modo que o processo de instauração da fadiga se desenvolve a partir do esgotamento das reservas de glicogênio nos músculos que são ativados, para realizar o exercício em questão.

A depleção do nível de fosfocreatina (PCr) também é reportada como colaboradora para a instauração da fadiga (VANHATALO et al., 2010). A PCr tem como função o processo de ressíntese do ATP, todavia, em exercícios intensos (ex: ciclismo em alta intensidade) os níveis de PCr são rapidamente reduzidos, o que torna a ressíntese do ATP mais lenta e assim tende a incapacitar a manutenção da alta intensidade (VANHATALO et al., 2010). Contudo, a recuperação da PCr entre exercícios intensos também é rápida e se apresenta como um fator determinante na retomada de níveis de potência. Ao observar a literatura, alguns estudos têm corroborado com as afirmações supracitadas, a partir de protocolos com repetições de testes máximos de ciclismo separados por breves intervalos (MENDEZ-VILLANUEVA et al., 2012; BOGDANIS et al., 1995). Ademais, também é reportado que o principal momento de atuação da PCr, no exercício intenso, ocorre nos instantes iniciais da tarefa, devido a manutenção da intensidade ao longo do tempo resultar em alternâncias no predomínio da utilização de vias metabólicas (MENDEZ-VILLANUEVA et al., 2012; BOGDANIS et al., 1995; BOGDANIS et al., 1996).

Apesar da atuação substancial de mecanismos de fadiga periférica, em tarefas que requeiram o esforço máximo dos músculos dos membros inferiores, como, por exemplo, o ciclismo, os mecanismos de fadiga central podem declinar significativamente o desempenho (GANDEVIA, 2001). Isso ocorre devido a mecanismos que ocasionam falhas na transmissão de impulsos nervosos até as junções neuromusculares e regiões proximais ou distais desta (BIGLAND-RITCHIE et al. 1978). A falha em localidades próximas à junção neuromuscular pode ocorrer devido a diminuição do esforço de maneira voluntária, mudança direta na

excitabilidade do neurônio motor ou em função da inibição de estímulos aferentes do músculo, ou ainda por bloqueio pré-sináptico (BIGLAND-RITCHIE et al. 1978). Enquanto as falhas da transmissão do impulso elétrico na junção neuromuscular, podem ocorrer através de uma perda de excitabilidade da membrana pós-sináptica ou depleção das reservas do neurotransmissor acetilcolina (BIGLAND-RITCHIE et al. 1978). Por fim, a falha distal pode acontecer caso os potenciais de ação não sejam propagados, se houver falha na interação do potencial de ação com a liberação do cálcio dentro da fibra e/ou se os elementos contráteis não funcionarem de forma correta (BIGLAND-RITCHIE et al. 1978).

É possível que o processo de instauração da fadiga a partir de fatores centrais possa fazer parte da evolução humana (GANDEVIA, 2001). As limitações no impulso nervoso tem uma função protetora, pois a continuidade do envio de impulsos nervosos para o músculo poderia causar resultados catastróficos na junção neuromuscular, nos processos intracelulares relacionados a contração muscular e nas interações dos filamentos contráteis (GANDEVIA, 2001; NOAKES; GIBSON, 2004; ABBISS; LAURSEN, 2005). Em adição a isso, também poderia causar danos nos demais mecanismos homeostáticos vitais, tal como a manutenção da temperatura corporal, pressão arterial e ventilação (GANDEVIA, 2001).

Devido a estes distintos fatores causais, a fadiga é amplamente estudada dentro das ciências do esporte em uma gama de modalidades, tal como o ciclismo (HOPKER et al. 2016; COYLE et al., 1988; LEES et al., 2001; KUPA et al., 1995). Pois a compreensão da cascata de processos que levam um indivíduo a fadiga, pode auxiliar na elaboração de estratégias para evitar ou minimizar a perda de desempenho durante competições. Em suma, o processo de instauração da fadiga durante exercícios físicos é considerado complexo e multifatorial. A compreensão da cascata de motivadores que acarreta na incapacidade de tolerar o exercício ainda é desconhecida e pode variar em função do sítio pelo qual a fadiga se inicia (central ou periférico) e pelo motivo primordial da falha nesses sítios. Desta forma, estudos que analisem parâmetros associados ou influenciados pela fadiga ao longo do tempo até a exaustão e em ambos os sítios que ela se manifesta, podem auxiliar no esclarecimento dos motivadores da fadiga. Além disso, amostras compostas por atletas bem treinados, tal como ciclistas competitivos, podem atenuar possíveis fatores de confusão e fornecer informações mais precisas e relevantes, para que possam ser aplicadas tanto na prática quanto para auxiliar futuros estudos sobre a temática.

### 3.2 Avaliação da fadiga por meio da ativação muscular em ciclistas

Ademais, a fadiga no ciclismo é amplamente estudada através da técnica de

eletromiografia de superfície (EMG) (HUG et al., 2003; CLEUZIQU et al., 2004; HUG et al., 2006; CAMATA et al., 2009; DIEFENTHAELER; BINI; VAZ, 2012; PRIEGO-QUESADA et al., 2014; BINI; COSTA; DIEFENTHAELER, 2017). Este método é considerado aceitável para verificar a ativação total dos músculos atuantes na execução de tarefas e obter estimativas quanto a fadiga muscular, sem a necessidade de procedimentos invasivos (MORITANI; DEVRIES, 1978; LUCIA et al., 1999). É visto, que o aumento na ativação mioelétrica, ocorre em função do recrutamento adicional de unidades motoras (MORITANI; DEVRIES, 1978). Isso acontece diante da necessidade do aumento de força para realizar uma tarefa, ou a medida em que fibras musculares entram no estado de fadiga. Assim, torna-se indispensável o aumento no recrutamento de unidades motoras para compensar o déficit contrátil, causado pelas unidades motoras fatigadas (MORITANI; DEVRIES, 1978; LUCIA et al., 1999).

No ciclismo, o principal músculo avaliado através da EMG é o VL (KORDI et al. 2019). O músculo VL, é tido como o principal responsável pela produção de força para a propulsão na pedalada (KORDI et al., 2019), e considerado o mais adequado para monitorar possíveis causas da fadiga nos membros inferiores em testes de ciclismo (HEETINGA et al., 2006). Desta forma, o VL é avaliado tanto em protocolos incrementais (PRIEGO-QUESADA et al., 2014; BINI et al., 2017), quanto com cargas de trabalho constantes (CLEUZIQU et al., 2004; DIEFENTHAELER et al., 2012). Como é visto no estudo de Villerius, Duc e Grappe (2008), o qual avaliou a ativação mioelétrica (expressa em %RMS) do VL e VM, este que é sinergista do VL, de 12 ciclistas de nível competitivo. Os autores avaliaram a ativação a partir de três testes de 10 minutos no melhor desempenho possível, com intervalos de 15 minutos de recuperação ativa, e não verificaram diferenças entre testes na ativação do VL ( $p = 0,369$ ), e VM ( $p = 0,869$ ). Outro estudo de Cleuziou et al. (2004), avaliou a ativação mioelétrica (expressa em mediana da frequência) dos mesmos músculos em dois testes de 6 minutos de pedalada, com cargas de 80 e 50% do correspondente ao consumo máximo de oxigênio (VO2MAX). Neste estudo, foi verificado um aumento de 2-4% na ativação em ambas as cargas. Entretanto, os tipos de análises supracitados fornecem poucas informações para a realização de inferências sobre o recrutamento de tipos de unidades motoras. Assim como para compreender mudanças no padrão de ativação para sustentar a carga de trabalho ao longo do tempo.

A partir dessas limitações, alguns autores têm desenvolvido estudos com técnicas de análise que podem fornecer informações adicionais sobre o padrão de recrutamento de unidades motoras, tal como a análise de bandas de frequência. Em síntese, essa técnica divide

o sinal em nove bandas de frequência, que após cálculos finais divide-se em bandas de baixa e altas frequências. De modo que as baixas frequências apresentam associação com a ativação de pequenas unidades motoras, enquanto as altas frequências se relacionam com as grandes unidades motoras (DIEFENTHAELER et al., 2012; HOLT; WAKELING; BIEWENER, 2014). Contudo, estudos que utilizam análises através das bandas de frequência ainda são escassos na literatura e apresentam divergências entre protocolos de avaliação. Por exemplo, no estudo de Diefenthaeler et al. (2012), no qual nove ciclistas de elite compareceram ao laboratório para a realização de um teste incremental até a exaustão, com o intuito de estimar a potência máxima (POMAX). Na segunda visita ao laboratório, os ciclistas executaram um teste de tempo até a exaustão nas suas respectivas potências máximas e constantes, juntamente com a mensuração da atividade mioelétrica do VL, tibial anterior (TA), gastrocnêmio lateral (GL) e bíceps femoral (BF). Posteriormente, os dados de ativação mioelétrica de cada músculo foram submetidos a técnica de bandas de frequência (altas, baixas e ativação total a cada 10% do tempo de teste) e comparados entre momentos dentro do teste de tempo até a exaustão (10 vs 40%; 10 vs 70%; 10 vs 90%; 40 vs 70%; 40 vs 90%; e 70 vs 90% do tempo total do teste). A partir destas comparações, foram encontradas reduções apenas nas bandas de alta frequência dos músculos VL e BF do momento inicial para o final do teste (10 x 90%), sem distinções entre as demais. Assim, é possível inferir que para os músculos VL e BF pode ter ocorrido um declínio, associado a fadiga, no recrutamento de grandes unidades motoras no final do teste, contribuindo para a intolerância ao exercício (teste máximo de exaustão) dentro da intensidade esperada.

Um outro estudo de Priego-Quesada et al. (2014), avaliou 12 ciclistas de nível competitivo, de maneira distinta ao estudo de Diefenthaeler et al. (2012), os autores executaram a avaliação dos ciclistas em uma única visita ao laboratório, a partir de um teste com carga incremental máximo até a exaustão. Neste estudo, a exaustão foi definida como o momento em que os ciclistas atingissem a incapacidade de manter a cadência de pedalada acima de 70 revoluções por minuto. O protocolo incremental iniciou com uma carga de trabalho de 50 W e contou com incrementos progressivos de 25 W a cada minuto até a exaustão, em conjunto com o teste foi mensurada a ativação mioelétrica dos músculos VL, gastrocnêmio medial (GM) e BF. Os autores compararam os valores de ativação total, alta e baixa frequência entre os momentos correspondentes a 40%, 70% e 90% do tempo de teste e verificaram aumento na ativação total para os músculos VL e BF, bem como maior contribuição dos componentes de baixa frequência (relação com maior recrutamento de pequenas unidades motoras) do BF ao longo do tempo até a exaustão. Quanto ao GM, não

foram constatadas alterações na ativação total e nas bandas de frequência.

Em adição a esses, Bini et al. (2017) avaliou 8 ciclistas de nível competitivo em 4 sessões divididas minimamente por 24 horas. Nessas sessões foram efetuados 2 testes distintos e em ordem randomizada, duas sessões com testes de rampa iniciando a 100 W e sendo acrescido 1 W a cada 2 segundos (30 W por minuto) até a exaustão. Enquanto o teste de *step* também iniciou a 100 W, no entanto, o acréscimo na carga de trabalho foi de 30 W a cada 3 minutos até a exaustão. Durante todos os testes foi mensurada a ativação EMG dos músculos VL e RF bilateralmente e, para comparar a ativação muscular entre testes, foram utilizados os momentos 40%, 70% e 90% do tempo até a exaustão. De modo que foi encontrada maior ativação total apenas dos VL no teste de *step* comparado ao teste de rampa. Além disso, os autores relatam que a presença de alterações significativas somente no teste de *step* podem ser atribuídas às suas características, sendo essa uma das justificativas para a maior ativação dos VL neste teste.

Diante do exposto, é possível diagnosticar uma escassez de estudos com ciclistas bem treinados, a partir de análises da ativação mioelétrica com a técnica de bandas de frequência. Além disso, os estudos encontrados na literatura apresentam heterogeneidade entre os protocolos utilizados, isso pode justificar as distinções nos resultados reportados de ativação muscular para um mesmo músculo (DIEFENTHAERLER et al., 2012; PRIEGO-QUESADA et al., 2014; BINI et al., 2017), visto que a variação de estímulos pode acarretar em respostas neuromusculares divergentes (ENOKA; STUART, 1992). Ademais, a técnica de bandas de frequência parece ser um método de análise interessante para auxiliar na compreensão de estratégias de recrutamento de unidades motoras, no decorrer de testes de exaustão no ciclismo. Por fim, pesquisas futuras com a avaliação da atividade mioelétrica simultânea, através da análise de bandas de frequência, dos músculos que compõem o quadríceps (principais responsáveis pela produção de força na pedalada), podem contribuir para a compreensão de alterações nos padrões de ativação, relacionados a sustentação da carga de trabalho à medida que a fadiga se instaura.

### 3.3 Implicações da fadiga na eficiência de ciclistas

Outro parâmetro amplamente avaliado e entendido como determinante para o desempenho no ciclismo, está relacionado ao nível de eficiência apresentado pelo ciclista (COYLE, 1995; HOPKER et al., 2013). A eficiência de ciclistas é comumente avaliada através do GE, pois este é considerado o método de mensuração mais adequado para estimar o

quão eficiente é um determinado ciclista (HOPKER et al., 2010). O GE pode ser conceituado como a quantidade de potência que pode ser produzida para um determinado custo de oxigênio e nível de dispêndio de energia (COYLE, 1995), ou ainda pela relação entre o trabalho realizado e a energia despendida (GAESSER; BROOKS, 1975). Além disso, é visto que a redução no GE apresenta relação com o declínio no desempenho de ciclistas. Conforme é reportado no estudo de Heetinga et al. (2007), o qual constatou, a partir do modelo de fluxo de energia proposto por De Koning et al. (1999), que uma redução de 0,9% no GE, pode resultar em 25,6 segundos de acréscimo no tempo final ao percorrer uma distância de 20 quilômetros.

Os fatores responsáveis pela diminuição do GE ainda não são bem compreendidos. Conforme exposto no primeiro subcapítulo deste referencial, sabe-se que falhas nos sistemas (reguladores ou de suporte) ocasionadas pela instauração da fadiga, podem estar associadas com a eficiência reduzida e a demanda energética aumentada ao longo do tempo em atividade. Alguns estudos têm tentado verificar alterações no GE com o passar do tempo, como o estudo desenvolvido por Hopker et al. (2016), o qual avaliou o GE de 14 ciclistas bem treinados em um teste com duas horas de duração com intensidade constante a 60% da POMAX. Os autores selecionaram para comparação ao longo do tempo as medidas nos minutos 5, 30, 60, 90 e 120 do teste, sendo constatadas reduções no GE nos minutos 90 e 120 comparados ao minuto 5. Um outro estudo elaborado por Passfield e Doust (2000), avaliou 10 ciclistas competitivos em duas sessões distintas. Em ambas foram utilizados dois protocolos de teste de desempenho máximo por 5 minutos, antes e depois da condição “intervenção” ou controle. Na sessão de intervenção, os ciclistas desempenharam 60 minutos de pedalada a 60% do pico de VO2MAX. Enquanto na sessão em condição de controle, os 60 minutos entre testes foram somente de descanso. Para calcular o GE, foram utilizadas as medidas coletadas no último minuto de cada teste de 5 minutos. Os autores encontraram maiores reduções do GE na condição intervenção (-1,8%) comparado a condição controle (-0,6%). Isso demonstra que o esforço realizado entre testes foi determinante na redução do GE, em função do aumento da demanda energética no decorrer do tempo em atividade, o que pode significar uma maior atuação de mecanismos relacionados à fadiga.

No entanto, os referidos trabalhos utilizam grandes intervalos entre medidas de GE (HOPKER et al., 2016), ou apenas uma medida por teste (PASSFIELD; DOUST, 2000). Assim, em função do pequeno recorte de informações obtido ao longo dos testes, a compreensão de possíveis mecanismos associados ao processo de fadiga nos ciclistas é dificultada. Desta forma, estudos que acompanhem o comportamento do GE ao longo do

tempo, podem fornecer um maior detalhamento nas informações e, conseqüentemente, permitir que se façam inferências mais precisas sobre possíveis mecanismos atuantes para a redução da eficiência.

## 4. ARTIGO

### EFEITOS DA FADIGA SOBRE A ECONOMIA DE PEDALADA E ATIVAÇÃO MUSCULAR EM CICLISTAS TREINADOS DURANTE TESTE E RETESTE DE EXAUSTÃO

#### RESUMO

O objetivo do presente estudo é Avaliar os efeitos da fadiga na economia metabólica e ativação muscular de músculos do quadríceps durante a pedalada em ciclistas treinados durante teste e reteste de exaustão. Foram avaliados 16 ciclistas competitivos, os quais realizaram dois testes até a exaustão na potência máxima, repousando 10 minutos entre testes. Foram mensurados o tempo de exaustão, potência, troca de gases respiratórios e a ativação muscular do reto femoral (RF), vasto lateral (VL) e vasto medial (VM), bilateralmente. Estas variáveis foram utilizadas posteriormente para calcular a potência metabólica (PM), gross efficiency (GE) e ativação muscular de bandas de frequência. Foi encontrada uma redução de 20% do desempenho no segundo teste (T2) ( $117 \pm 20$  segundos) comparado ao primeiro (T1) ( $139 \pm 24$  segundos). A ativação de baixa frequência aumentou para o músculo VM no segundo teste, nos momentos inicial ( $p = 0,019$ ) e intermediário ( $p = 0,018$ ). No decorrer dos testes o GE reduziu e a PM aumentou até momentos intermediários, a partir dos quais foi estabelecido um platô. Todos os músculos demonstraram aumento na ativação da banda de baixa frequência. Entretanto, a ativação da banda de alta frequência reduziu apenas no VL (T1 e T2) e VM (T2), enquanto para o VM permaneceu inalterada no T1, assim como para o RF no T2. Por fim, o RF aumentou sua ativação nesta banda no T1. Para a ativação total, o RF foi o único músculo que apresentou aumento e em ambos os testes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ciclismo; Desempenho esportivo; Eficiência; Eletromiografia.

#### INTRODUÇÃO

O processo de instauração da fadiga pode ser conceituado como a sensação de cansaço associada a redução do desempenho muscular<sup>1</sup>. Este processo é inevitável durante a realização de exercícios intensos e declina significativamente a eficiência dos atletas à medida que o tempo de prática avança, tal como ocorre no ciclismo<sup>2</sup>. Em ciclistas, essa eficiência é comumente avaliada por meio do cálculo de *gross efficiency* (GE), que é um método amplamente utilizado e talvez o mais apropriado para mensurar a eficiência de pedalada<sup>3</sup>. Além disso, o GE é tido como um dos parâmetros mais importantes em um ciclista<sup>4</sup>, pois estima a quantidade de potência que pode ser produzida para um determinado custo de oxigênio e nível de dispêndio de energia ou, mais especificamente, a relação entre o trabalho realizado e a energia despendida<sup>3,5</sup>. Entretanto, avaliações ao longo do tempo para exaustão são pouco vistas e apresentam grandes intervalos entre as medidas consideradas. Como é reportado no estudo de Hopker et al. (2016), no qual avaliaram o GE em ciclistas bem treinados em um teste com 2 horas de duração a 60% da potência máxima (POMAX), sendo considerados apenas os valores encontrados em 5, 30, 60, 90 e 120 minutos de teste. Os autores encontraram reduções no GE nos minutos 90 e 120 ao compará-los com o minuto 5. Desta forma, as informações obtidas ao longo do teste, podem não apresentar o detalhamento necessário para compreender possíveis mecanismos de fadiga atuantes nos ciclistas.

Contudo, apenas a avaliação de eficiência e de dispêndio de energia, também podem não fornecer parâmetros suficientes para se alcançar possíveis respostas sobre os mecanismos

de fadiga. A fadiga pode ser caracterizada como periférica (depleção de substratos de energia e acúmulo de metabólitos) e central, a qual pode ser resultante da falha na transmissão de impulsos nervosos nas junções neuromusculares, na ativação do sarcolema e na condução dos potenciais de ação nos túbulos transversos, por exemplo<sup>6,7</sup>. Assim, os mecanismos limitantes da manutenção de cargas de trabalho podem ser dependentes de fatores periféricos e/ou centrais. Alguns estudos têm estudado a fadiga central em ciclistas com a utilização de eletromiografia de superfície (EMG), a partir de análises da amplitude de ativação total<sup>8-10</sup>. Entretanto, esse tipo de análise, a qual é frequentemente realizada, pode reduzir as propriedades espectrais altas do sinal de ativação muscular em função de atenuar mudanças rápidas na ativação muscular<sup>11</sup>, o que pode minimizar os efeitos da fadiga nas alterações espectrais mais altas<sup>12</sup>.

Isso dá margem para uma outra vertente na avaliação da fadiga a partir de cálculos da ativação muscular por meio das bandas de frequência. Esse método de avaliação pode fornecer, de forma indireta, informações adicionais sobre o padrão de recrutamento de pequenas e grandes unidades motoras<sup>11</sup>. Todavia, ao observar a literatura, estudos têm se utilizado de protocolos incrementais<sup>13,14</sup>, os quais reportam alterações somente na ativação total, mas não nas bandas de frequência para o músculo vasto lateral (VL), este que é o músculo mais avaliado, possivelmente, por ser o principal propulsor no ciclo de pedalada<sup>15</sup>. Enquanto é visto apenas um estudo com a utilização da POMAX constante, o qual demonstrou aumento na ativação da banda de alta frequência para o mesmo músculo, sem mudanças nas demais<sup>11</sup>. Essa distinção de protocolos pode justificar os padrões divergentes de ativação muscular<sup>16</sup>. Desta forma, é visto que as alterações ocasionadas pela fadiga na ativação muscular de ciclistas bem treinados ao longo do tempo até a exaustão, não são bem compreendidas, especialmente com a utilização de bandas de frequência.

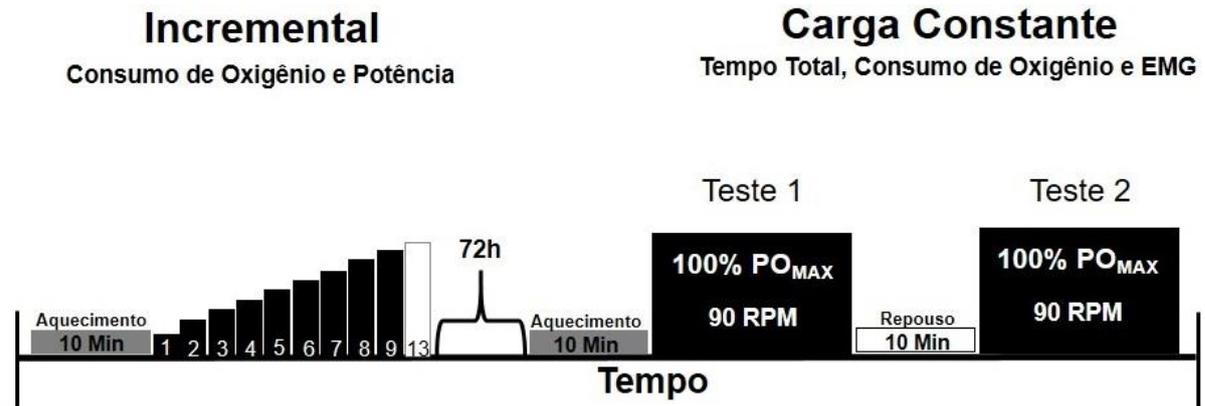
A partir do exposto, acompanhar o comportamento da ativação muscular, a demanda energética e a eficiência no ciclismo ao longo de testes de exaustão, podem fornecer maiores informações sobre os possíveis mecanismos de fadiga atuantes no decorrer do tempo. Ademais, a avaliação mioelétrica com bandas de frequência, especificamente em músculos extensores do joelho, podem auxiliar no entendimento das estratégias neuromusculares dos ciclistas para sustentar a carga de trabalho ao longo do tempo de exaustão. Portanto, o objetivo do presente estudo foi avaliar os efeitos da fadiga na economia metabólica e ativação muscular de músculos do quadríceps durante a pedalada em ciclistas treinados durante teste e reteste de exaustão.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### **Desenho Experimental**

Este estudo foi caracterizado como um estudo ex post facto de corte transversal. Cada ciclista visitou o laboratório em duas ocasiões com 72 horas de intervalo entre as visitas (Figura 1). Na primeira visita, os ciclistas realizaram um teste incremental máximo e familiarização com dois testes sucessivos de exaustão (idem ao protocolo de avaliação do segundo dia de visitas). Na visita subsequente, os participantes realizaram um protocolo padrão de dois testes sucessivos até a exaustão na POMAX. Durante os testes sucessivos de exaustão foram mensurados além do tempo de exaustão, a potência, troca de gases respiratórios e a ativação muscular dos músculos RF, VL e VM de ambos os quadríceps. Estas variáveis foram mensuradas para posterior cálculo de potência metabólica (PM), GE, bem como da ativação muscular de bandas de frequência em todos os músculos investigados. Previamente às intervenções, todos os procedimentos foram apresentados aos participantes que assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido para participação no estudo, o qual foi aprovado pela Comissão de Ética em Pesquisa em Seres Humanos, onde o estudo foi

realizado (número 708.362).



**Figura 1.** Desenho experimental do estudo. POMAX = potência máxima; RPM = rotações por minuto; EMG = eletromiografia de superfície.

### Participantes

Dezesseis ciclistas treinados do sexo masculino (idade  $23 \pm 7$  anos, massa corporal:  $67 \pm 7$  kg e estatura:  $177 \pm 6$  cm) participaram deste estudo. Os atletas tiveram uma experiência de treinamento de  $\sim 6,5$  anos; um volume de treinamento usual de  $\sim 6$  dias/semana e  $\sim 460$  km/semana. O software G \* Power (Kiel University, Alemanha) foi utilizado para calcular o tamanho mínimo de amostra de 16 indivíduos (tamanho do efeito = 0,65; nível de significância = 0,05; poder observado = 0,80) com um teste ANOVA de medidas repetidas de dois fatores como um teste estatístico utilizado para comparar os dois testes sucessivos de exaustão e ao longo do tempo em cada um dos testes.

### Procedimentos

Na primeira sessão, foi avaliada a antropometria (estatura e massa corporal). Posteriormente, os ciclistas realizaram um aquecimento com potência de 150 W por 10 minutos. Os ciclistas foram testados em cicloergômetro (Excalibur Sport, Lode Medical Technology, Holanda) com a configuração do guidão e da posição do assento de acordo com as configurações da bicicleta, a fim de determinar a POMAX em Watts. Aumentos de carga no teste de rampa foram realizados em etapas de 25 W a cada minuto ( $\sim 0,42$  W/s) até a exaustão. A cadência preferida dos ciclistas foi mantida próxima a  $95 \pm 5$  rpm, fornecendo feedback visual através do visor do cicloergômetro. Após o teste incremental, os ciclistas pedalarão  $\sim 30$  min a 50 W para fins de recuperação e, por fim, realizaram uma familiarização nos dois testes sucessivos de testes de exaustão de ciclismo na POMAX e cadência ajustada em  $95 \pm 5$  rpm. Durante o teste incremental, simultaneamente com a aquisição da POMAX, o volume de oxigênio ( $VO_2$ ) foi mensurado respiração por respiração utilizando um analisador de gases de circuito aberto (Quark CPET, Cosmed, Itália). Previamente ao teste incremental, os analisadores de  $O_2$  e  $CO_2$  foram calibrados usando gases de grau médico de concentração conhecida que abrangeram o ar na faixa fisiológica.

A resposta do  $VO_2$  obtida durante o teste incremental máximo foi analisada por meio de inspeção visual respiração à respiração. Os valores de  $VO_2$  foram plotados para excluir valores com quatro desvios-padrão acima ou abaixo da média da janela móvel (três respirações) de toda a curva-média<sup>17</sup>. A partir do teste incremental máximo, foram obtidos os valores de POMAX e volume máximo de oxigênio ( $VO_{2MAX}$ ). O  $VO_{2MAX}$  foi determinado como o valor médio observado durante um período de 30 segundos a partir da última etapa do teste.

### Potência Metabólica e Gross Efficiency

Na segunda sessão, os ciclistas realizaram dois sucessivos testes de exaustão na POMAX e com cadência de pedalada preferencial. A exaustão foi definida como o tempo em que o ciclista não conseguia manter a cadência acima de 70 rpm. A partir da redução da cadência estipulada no primeiro teste, os ciclistas realizaram 10 minutos de repouso antes de iniciar o segundo teste. Durante os sucessivos testes de exaustão, a cadência e a potência foram mensuradas por meio do *software* do cicloergômetro. O VO<sub>2</sub> foi mensurado respiração por respiração utilizando um analisador de gases de circuito aberto (Quark CPET, Cosmed, Itália), seguindo procedimentos semelhantes aos utilizados durante o teste incremental máximo.

Para estimar a PM e o GE foram seguidos os procedimentos apresentados no estudo de Heetinga et al. 2007<sup>18</sup>. O qual utilizaram a multiplicação do VO<sub>2</sub> com o equivalente de oxigênio para determinar a PM, através da equação:  $PM (W) = VO_2 \cdot [(4,940 \cdot RER + 16,040)/60]$ <sup>19</sup>, sendo a relação de troca respiratória determinada pelo quociente da divisão de VCO<sub>2</sub> pelo VO<sub>2</sub><sup>19</sup>. Posteriormente, a PM foi utilizada para calcular o GE:  $GE = Potência\ mecânica/PM \cdot 100^5$ .

### Bandas de Frequência

Durante os sucessivos testes de exaustão também foi avaliada a ativação muscular dos músculos extensores do joelho por meio da técnica de EMG (RF, VL e VM) de ambos os membros inferiores com frequência de aquisição de 2 kHz com um sistema de EMG (Delsys Trigno, Hancock, EUA). Pares de eletrodos Ag/AgCl (Medi-Trace 100, Kendall, Chicopee, Canadá; 22 mm diâmetro) em configuração bipolar foram posicionados na pele após a área ser cuidadosamente raspada e limpa com um limpador abrasivo e compressas com álcool para reduzir a impedância da pele, conforme recomendado pela Sociedade Internacional de Eletrofisiologia e Cinesiologia<sup>20</sup>. Os eletrodos foram posicionados sobre o terço distal do ventre dos músculos (um terço do comprimento do músculo do ponto médio para evitar o junção miotendinosa) em paralelo ao arranjo das fibras musculares e fixados à pele com fita micropore (3M Co, St Paul, EUA). Os sinais de EMG foram adquiridos continuamente durante os dois testes de exaustão.

Os valores de EMG foram calculados a partir de médias do início (10%), meio (50%) e final dos testes de exaustão (100%), utilizando scripts escritos em ambiente MATLAB® (MathWorks, Natick, MA). A frequência dos sinais EMG dos músculos RF, VL e VM, de ambos os membros inferiores foi calculada por meio da análise de frequência-conteúdo dos sinais EMG que envolvem vários filtros passa-banda, conforme descrito em mais detalhes por Diefenthaler et al. (2012). O sinal de EMG em cada músculo foi filtrado utilizando filtros digitais Butterworth passa-bandas de quinta ordem em 9 faixas de frequências. Cada um dos 9 sinais EMG filtrados foi então retificado e calculada a média para cada 10% do tempo de teste. A soma das 9 bandas de frequência foi calculada para a ativação total geral em cada músculo (ou seja, ativação de todas as bandas de frequência do sinal EMG). A quinta, sexta e sétima bandas (193,45-300,80 Hz) foram utilizadas para calcular os componentes de alta frequência dos sinais para representar potencialmente a resposta de grandes unidades motoras<sup>21</sup> (WAKELING, 2008). A primeira e a segunda bandas (26,95-48,45 Hz) foram utilizadas para calcular os componentes de baixa frequência dos sinais que representam a resposta de pequenas unidades motoras<sup>21</sup> (WAKELING, 2008). Os valores retificados médios da alta e baixa frequência foram normalizados pelo valor retificado médio de início da ativação muscular total, para cada músculo dos ciclistas durante cada teste de tempo de exaustão. O valor retificado médio de total de ativação muscular em cada teste de tempo de exaustão foi então normalizado pelas respostas individuais do ciclista no início do teste de exaustão, onde o efeito da fadiga é mínimo. Todos os sinais foram processados utilizando

scripts personalizados escritos em MATLAB. Frequências médias dos membros inferiores (direito e esquerdo) das bandas de frequência foram calculados para cada músculo investigado e em cada um dos testes de exaustão no início, meio e fim dos testes, para comparar os efeitos do tempo em cada teste, bem como entre os testes.

### **Análise e Estatística**

A normalidade e a esfericidade dos dados foram avaliadas pelos testes de Shapiro-Wilk e Mauchly, respectivamente. O teste t para amostras dependentes foi utilizado para comparar as diferenças de desempenho entre os testes de exaustão 1 e 2. O teste ANOVA de medidas repetidas de dois fatores foi utilizado para comparar as variáveis (PM, GE e Ativação das Bandas de Frequência) entre os testes e ao longo do tempo em cada teste. O post-hoc de Bonferroni foi utilizado para encontrar os efeitos principais. A análise estatística foi realizada com SPSS 20.0 for Windows, com nível de significância  $\alpha = 0,05$ , além de apresentar os valores de T ou F para todas as comparações.

## **RESULTADOS**

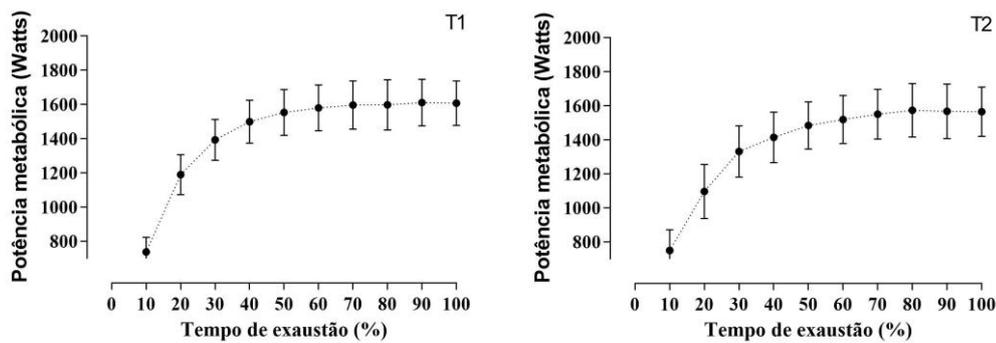
### **Desempenho**

Os resultados do presente estudo demonstram que houve redução significativa do desempenho no primeiro ( $139 \pm 24$  segundos) para o segundo ( $117 \pm 20$  segundos) teste máximo de exaustão de ciclistas competitivos ( $P < 0,001$ ;  $T = 5,818$ ).

### **Potência Metabólica (PM)**

Os resultados de PM demonstraram que os ciclistas utilizaram uma menor demanda energética no segundo teste ( $T1 = 1436 \pm 115,51$  W;  $T2 = 1385,01 \pm 133,62$  W;  $p = 0,003$ ;  $T = 3,566$ ) (figura 2). Na comparação dos momentos entre testes, foi verificada igualdade na demanda energética nos momentos M1(M = momento) e M8 ( $p \geq 0,189$ ). Enquanto nos momentos M2, M3, M4, M5, M6, M7, M9 e M10 foi constatada uma maior demanda no primeiro teste ( $p \leq 0,017$ ).

Quanto a comparação entre momentos no primeiro teste, foi observada uma menor demanda de PM no M1 em relação aos demais ( $p \leq 0,001$ ). Nos momentos M2, M3 e M4, menores demandas de PM foram observadas em relação a todos os momentos que os sucediam ( $p \leq 0,018$ ) e M5 apresentou menor demanda somente quando comparado ao M9 ( $p = 0,034$ ). Sendo os momentos M6, M7, M8, M9 e M10 iguais entre si ( $p \geq 0,639$ ). O segundo teste de exaustão apresentou resultados similares ao primeiro na comparação entre os diferentes momentos ao longo do teste. No momento M1, foi verificado menor demanda de PM em relação aos demais momentos ( $p \leq 0,001$ ). Nos momentos M2, M3 e M4 menores demandas foram vistas comparado aos momentos que os sucediam ( $p \leq 0,008$ ). Enquanto no momento M5 foi constatada menor demanda em relação a M7 e M8 ( $p \leq 0,030$ ), e o momento M6 possui menor PM comparado ao momento M7 ( $p = 0,034$ ). Os momentos M7, M8, M9 e M10 foram iguais entre si ( $p = 1,000$ ).

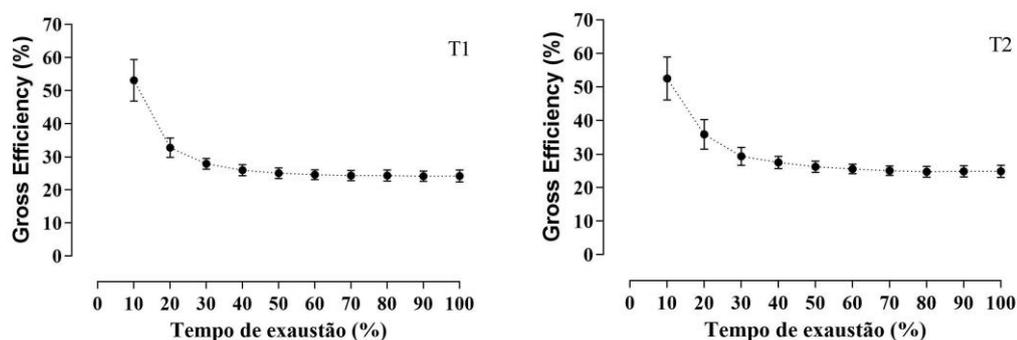


**Figura 2.** Valores de potência metabólica dos ciclistas estudados durante os dois testes máximos sucessivos de exaustão (T1 -T2).

### Gross Efficiency (GE)

Os resultados de GE, demonstraram que os ciclistas obtiveram maior eficiência no segundo ( $29,65 \pm 1,92\%$ ) comparado ao primeiro ( $28,63 \pm 1,77\%$ ) teste de exaustão ( $p = 0,024$ ;  $T = -2,527$ ) (figura 3). Na comparação dos momentos entre testes, foi observada igualdade nos momentos M1 e M8 do primeiro e segundo teste de exaustão ( $p \geq 0,22$ ). Enquanto nos momentos M2, M3, M4, M5, M6, M7, M9 e M10 os valores de GE foram maiores para o segundo teste de exaustão ( $p \leq 0,026$ ).

No que se refere a comparação dentro de cada teste de exaustão, no primeiro teste foi observado que o M1 possui maiores valores de GE comparado aos demais momentos ( $p \leq 0,001$ ). Os momentos M2, M3 e M4 apresentaram valores maiores de GE comparado aos demais a posteriori ( $p \leq 0,025$ ) e o M5 apresentou apenas maiores valores comparados ao M9 ( $p = 0,041$ ). Enquanto, que os momentos M6, M7, M8, M9 e M10 apresentam igualdade entre si para os valores de GE ( $p \geq 0,236$ ). O segundo teste de exaustão apresentou resultados similares ao primeiro na comparação entre os diferentes momentos ao longo do teste. O momento M1, possui maiores valores de GE, comparado a todos os demais momentos ( $p \leq 0,001$ ). Os momentos M2, M3 e M4 também apresentaram maiores valores de GE comparados a todos os demais momentos que os sucedem ( $p \leq 0,011$ ). Já o momento M5 apresentou maiores valores de GE comparados aos momentos M7 e M8 ( $p \leq 0,033$ ). Enquanto, que os momentos M7, M8, M9 e M10 foram iguais entre si para os valores de GE ( $p = 1$ ).



**Figura 3.** Valores de Gross Efficiency dos ciclistas estudados durante os dois testes máximos sucessivos de exaustão (T1-T2).

### Ativação Muscular (Bandas de Frequência)

Os resultados de ativação muscular da banda de baixa frequência, demonstraram uma maior ativação para o músculo RF no final do primeiro e segundo teste de exaustão, comparado aos demais momentos, respectivamente (Tabela 1).

Além disso, para os resultados de ativação da alta frequência, no primeiro teste de exaustão foi encontrado maior ativação no final do teste, comparados ao início e meio. A ativação de alta frequência do segundo teste apresentou maior ativação no meio do teste, quando comparado ao início (Tabela 1).

Os resultados de ativação total para o músculo RF, demonstraram que o final do teste de exaustão teve maior ativação total, comparado ao início e meio, bem como o meio do teste de exaustão apresentou maior ativação total que o início. Além do mais, no segundo teste, foi observada maior ativação no final e meio do teste comparadas ao início (Tabela 1). Entretanto, não foram encontradas diferenças significativas para a banda de alta frequência ( $p = 0,688$ ;  $F = 0,164$ ), baixa frequência ( $p = 0,059$ ;  $F = 3,857$ ) e ativação total ( $p = 0,524$ ;  $F = 0,416$ ) do músculo RF entre o primeiro e segundo teste máximo de exaustão (Tabela 1).

**Tabela 1.** Resultados de ativação muscular (bandas de frequência) em dois testes sucessivos de exaustão de ciclismo. Percentual do total de ativação muscular do RF inicial (10%), no início, meio e final de cada um dos testes máximos de exaustão para as bandas de baixa e alta frequência, bem como o total de ativação.

Banda de frequência	Teste	Média ± DP Início	Média ± DP Meio	Média ± DP Final	IC 95%	p-valor	F
Baixa (% do total inicial)	Teste 1	149,71 ±22,09 <sup>ab</sup>	169,97 ±40,08 <sup>c</sup>	205,17 ±55,30	a = -0,076- -0,023 b = -0,173- -0,083 c = -0,118- -0,038	a < 0,001 b < 0,001 c < 0,001	9,77
	Teste 2	145,81 ±22,74 <sup>ab</sup>	166,33 ±33,57	187,93 ±61,41	a = -0,080- -0,028 b = -0,157- -0,030 c = -0,087-0,008	a < 0,001 b = 0,002 c = 0,134	13,89
Alta (% do total inicial)	Teste 1	80,17 ±11,24 <sup>b</sup>	84,40 ±16 <sup>c</sup>	100,16 ±27,25	a = -0,052-0,015 b = -0,135- -0,035 c = -0,109- -0,025	a = 0,513 b < 0,001 c = 0,001	25,77
	Teste 2	81,74 ±12,75 <sup>a</sup>	89,27 ±19,11	99,03 ±33,87	a = -0,065- -0,002 b = -0,128- 0,006 c = -0,073-0,018	a = 0,037 b = 0,085 c = 0,411	3,47
Total (% do total inicial)	Teste 1	100 ±0 <sup>ab</sup>	108,69 ±16,90 <sup>c</sup>	131,53 ±31,30	a = -0,061- -0,002 b = -0,155- -0,059 c = -0,115- -0,036	a = 0,037 b < 0,001 c < 0,001	15,64
	Teste 2	100 ±0 <sup>ab</sup>	110,85 ±15,69	125,17 ±37,99	a = -0,070- -0,015 b = -0,141- -0,014 c = -0,081-0,011	a = 0,001 b = 0,013 c = 0,193	7,59

a = diferença entre Início e Meio; b = diferença entre Início e Final; c = diferença entre Meio e Final.

A ativação de baixa frequência do músculo VL foi maior no meio e final do primeiro e segundo testes de exaustão, comparado ao início de cada teste, respectivamente. Além disso, no primeiro teste de exaustão também foi observada maior ativação no final do teste, comparada ao meio (Tabela 2).

A ativação de alta frequência do músculo vasto lateral apresentou maiores valores no

meio e final do primeiro e segundo testes de exaustão, comparado ao início de cada teste, respectivamente. Não foram encontradas diferenças significativas entre o meio e final em ambos os testes de exaustão (Tabela 2).

Entretanto, a ativação muscular total do músculo vasto lateral não sofreu qualquer alteração ao longo dos dois sucessivos testes de exaustão (Tabela 2). Assim como, não foram encontradas diferenças significativas para a banda de alta frequência ( $p = 0,646$ ;  $F = 0,215$ ), baixa frequência ( $p = 0,745$ ;  $F = 0,108$ ) e ativação total ( $p = 0,844$ ;  $F = 0,039$ ) do músculo VL entre o primeiro e segundo teste máximo de exaustão (Tabela 2).

**Tabela 2.** Resultados de ativação muscular (bandas de frequência) em dois testes sucessivos de exaustão de ciclismo. Percentual do total de ativação muscular do VL inicial (10%), no início, meio e final de cada um dos testes máximos de exaustão para as bandas de baixa e alta frequência, bem como o total de ativação.

Banda de frequência	Teste	Média ± DP Início	Média ± DP Meio	Média ± DP Final	IC 95%	p-valor	F
Baixa (% do total inicial)	Teste 1	145,94 ±19,14 <sup>ab</sup>	156,34 ±25,49 <sup>c</sup>	167,36 ±23,83	a = -0,053- -0,004 b = -0,081- -0,037 c = -0,047- -0,015	a = 0,021 b < 0,001 c < 0,001	29,91
	Teste 2	148,27 ±24,62 <sup>ab</sup>	158,92 ±28,41	162,49 ±32,51	a = -0,045- -0,014 b = -0,074- -0,001 c = -0,036-0,020	a < 0,001 b = 0,045 c = 1,000	12,22
Alta (% do total inicial)	Teste 1	85,43 ±9,23 <sup>ab</sup>	81,05 ±9,75	79,93 ±9,75	a = 0,008-0,039 b = 0,014-0,045 c = -0,004-0,016	a = 0,002 b < 0,001 c = 0,399	10,90
	Teste 2	84,43 ±11,35 <sup>ab</sup>	81,39 ±10,12 <sup>c</sup>	78,65 ±14,17	a = 0,001-0,030 b = 0,007-0,062 c = 0,001-0,038	a = 0,035 b = 0,011 c = 0,048	4,90
Total (% do total inicial)	Teste 1	100 ±0	99,92 ±8,84	103,22 ±7,37	a = -0,012-0,008 b = -0,022-0,007 c = -0,018-0,006	a = 1,000 b = 0,590 c = 0,693	0,92
	Teste 2	100 ±0	101,34 ±5,93	101,24 ±12,90	a = -0,012-0,008 b = -0,022-0,007 c = -0,018-0,006	a = 1,000 b = 0,590 c = 0,693	0,92

a = diferença entre Início e Meio; b = diferença entre Início e Final; c = diferença entre Meio e Final.

Por fim, para os resultados de ativação do músculo VM. A ativação de baixa frequência apresentou maior ativação no final de ambos os testes de exaustão, comparados ao início de cada teste, respectivamente. Além disso, o final do segundo teste de exaustão também teve maior ativação de baixa frequência, comparado ao meio do mesmo teste (Tabela 3).

A ativação muscular de alta frequência do músculo VM apresentou menor ativação no meio do primeiro teste de exaustão, comparado ao início do mesmo teste, sem diferenças significativas entre o início e final do teste. Além do mais, o segundo teste de exaustão apresentou menores valores de ativação de alta frequência no meio e final, comparados ao início do mesmo teste (Tabela 3).

Para a ativação total do VM, foi observado menor ativação no meio do primeiro teste de exaustão, comparado ao início. Além disso, o final do primeiro teste de exaustão apresentou maior ativação que o meio do mesmo teste, sem diferenças entre o final do teste e o início. Entretanto, não foram encontradas diferenças significativas ao longo do tempo para o segundo teste máximo de exaustão (Tabela 3).

Por outro lado, às comparações entre testes, o início e meio do segundo teste apresentaram maiores valores de ativação na banda de baixa frequência comparadas ao primeiro teste máximo de exaustão ( $p \leq 0,019$ ;  $T = -2,490$ ). Entretanto, não foram encontradas diferenças significativas para a banda de alta frequência ( $p = 0,074$ ;  $F = 0,106$ ) e ativação total ( $p = 0,579$ ;  $F = 0,315$ ) do músculo VM entre o primeiro e segundo teste máximo de exaustão (Tabela 3).

**Tabela 3.** Resultados de ativação muscular (bandas de frequência) em dois testes sucessivos de exaustão de ciclismo. Percentual do total de ativação muscular do vasto medial inicial (10%), no início, meio e final de cada um dos testes máximos de exaustão para as bandas de baixa e alta frequência, bem como o total de ativação.

Banda de frequência	Teste	Média $\pm$ DP Início	Média $\pm$ DP Meio	Média $\pm$ DP Final	IC 95%	p-valor	F
Baixa (% do total inicial)	Teste 1	135,79 $\pm$ 21,75 <sup>b*</sup>	138,03 $\pm$ 24,92 <sup>c#</sup>	151,44 $\pm$ 31,55	a = -0,020-0,008 b = -0,062- -0,025 c = -0,058- -0,017	a = 0,840 b < 0,001 c < 0,001	17,11
	Teste 2	142,38 $\pm$ 23,44 <sup>b</sup>	145,23 $\pm$ 26,28 <sup>c</sup>	155,89 $\pm$ 32,93	a = -0,028-0,013 b = -0,064- -0,008 c = -0,047- -0,010	a = 1,000 b = 0,008 c = 0,001	7,78
Alta (% do total inicial)	Teste 1	84,23 $\pm$ 13,56 <sup>a</sup>	78,60 $\pm$ 13,11	87,80 $\pm$ 29,20	a = 0,016-0,045 b = -0,053-0,036 c = -0,089-0,011	a < 0,001 b = 1,000 c = 0,169	14,37
	Teste 2	82,57 $\pm$ 13,81 <sup>ab</sup>	78,17 $\pm$ 13,44	76,45 $\pm$ 15,23	a = 0,007-0,042 b = 0,005-0,069 c = -0,005-0,030	a = 0,005 b = 0,021 c = 0,259	6,07
Total (% do total inicial)	Teste 1	100 $\pm$ 0 <sup>a</sup>	96,28 $\pm$ 6,27 <sup>c</sup>	103,76 $\pm$ 12,15	a = 0,004-0,030 b = -0,035-0,008 c = -0,056- -0,006	a = 0,006 b = 0,353 c = 0,011	6,87
	Teste 2	100 $\pm$ 0	98,17 $\pm$ 7,53	100 $\pm$ 12,87	a = -0,007-0,026 b = -0,022-0,029 c = -0,021-0,009	a = 0,495 b = 1,000 c = 0,962	2,15

a = diferença entre 10 e 50%; b = diferença entre 10 e 100%; c = diferença entre 50 e 100%; \* = diferença entre testes no momento inicial ( $p = 0,019$ ; IC95% = -0,036- -0,003); # = diferença entre testes no momento intermediário ( $p = 0,018$ ; IC95% = -0,039- -0,003).

## DISCUSSÃO

De acordo com nossos resultados, dez minutos de recuperação entre dois sucessivos testes máximos de exaustão não foram suficientes para manter o tempo de exaustão, PM, GE e ativação da banda de baixa frequência do músculo VM. Entretanto, não foram encontradas diferenças significativas na ativação das bandas de frequência para os músculos RF e VL. Portanto, com o aumento da demanda energética (PM), ativação de baixa frequência do músculo VM, e redução da eficiência (GE) o tempo de exaustão do segundo teste foi prejudicado pelo primeiro teste de exaustão com redução de 20% no desempenho.

Os resultados demonstraram que em ambos os testes de exaustão houve aumento da demanda energética e redução da eficiência. Isso pode ter ocorrido devido aos produtos resultantes da hidrólise da adenosina trifosfato (ATP), dividindo-se em adenosina difosfato (ADP), fosfato inorgânico (Pi) e hidrogênio ( $H^+$ ), e da sua depleção ao longo do tempo para exaustão. Esse processo pode acarretar em uma elevação na concentração de íons de  $H^+$  em função do aumento de  $CO_2$  no meio extracelular, o que pode resultar no aumento da acidose e, conseqüentemente, na redução do pH intracelular nas fibras musculares<sup>22</sup>. É reportado na

literatura que a acidificação intracelular resulta em um declínio moderado no percentual de acoplamento das pontes cruzadas, de modo a reduzir a capacidade de força exercida por cada ponte cruzada e a velocidade de contração<sup>22,23</sup>. A ocorrência deste mecanismo foi descrita pela atuação do H<sup>+</sup> em três situações distintas: competição com cálcio (Ca<sup>2+</sup>) para ligação na troponina, interferência na liberação de Ca<sup>2+</sup> do retículo sarcoplasmático e inibição da fosfofrutoquinase<sup>24-26</sup>. Além disso, o Pi também tem apresentado relação com a instauração da fadiga em ciclistas. Esta molécula pode ter atuado no retículo sarcoplasmático no decorrer do tempo para exaustão e se precipitado junto ao Ca<sup>+</sup>, o que pode ter reduzido o Ca<sup>+</sup> livre para a realização da contração<sup>27</sup>.

Outro possível mecanismo que explica a redução do desempenho do primeiro para o segundo teste de exaustão e ao longo de cada teste, está relacionado à redução dos níveis de glicogênio ao longo do exercício. O glicogênio armazenado no músculo esquelético tem a função de fornecer glicose para as fibras musculares realizarem a contração<sup>28</sup>. Contudo, exercícios intensos (exemplo: teste de exaustão máximo) tem o potencial de esgotar as reservas de glicogênio muscular, sendo a sua depleção relacionada com a incapacidade da manutenção do exercício devido a instauração dos processos de fadiga muscular<sup>28</sup>. Esse modelo foi verificado em um estudo de Bergstrom et al. (1972)<sup>29</sup>, no qual encontraram uma depleção total das reservas de glicogênio do VL após um protocolo de fadiga induzida em cicloergômetro. Assim como a fosfocreatina (PCr), que é reportada como um fator determinante na intolerância ao exercício devido a sua depleção em exercícios intensos<sup>30</sup>. De modo que a ressíntese do ATP se torna mais lenta e a manutenção de cargas máximas de trabalho se tornam insustentáveis<sup>30</sup>. Entretanto, a atuação da PCr é reportada como significativa apenas nos segundos iniciais, inclusive sendo mais importante do que o efeito do H<sup>+</sup> no mecanismo de contração muscular neste período<sup>31-33</sup>, pois com o avançar do tempo do teste de exaustão ocorre alteração na predominância de via metabólica. Com isso, tanto a recuperação do glicogênio quanto da PCr podem estar relacionados aos altos níveis de eficiência e a baixa demanda energética nos momentos iniciais do segundo teste de exaustão. Portanto, apesar do processo de instauração da fadiga ser multifacetado, a maior demanda energética e o declínio na eficiência possivelmente estão relacionados a todos ou a maioria dos processos mencionados. De modo a incapacitar os ciclistas de realizarem a manutenção da cadência de pedalada mínima (70 rpm) em suas respectivas POMAX.

Quanto aos resultados de ativação muscular do VL, estes vão parcialmente ao encontro do mecanismo de fadiga descrito por De Luca (1997)<sup>34</sup> e Lucia et al. (1999)<sup>35</sup>. Estes propõem um aumento do recrutamento de pequenas e médias unidades motoras (de contração mais lenta e menos fatigáveis) ao longo do tempo para exaustão em intensidades submáximas, enquanto o uso das grandes unidades é reduzido em função da sua baixa resistência à fadiga. Ademais, ao considerar a especificidade da tarefa, o VL é tido como um dos principais responsáveis pela produção de potência no ciclismo<sup>15</sup>. Devido a esse papel, o VL é amplamente exigido, o que pode explicar a redução na ativação das frequências de grandes unidades motoras ao longo do teste, em função da grande demanda de trabalho e da baixa resistência à fadiga dessas unidades. A partir disso, as pequenas unidades motoras apresentam maior nível de recrutamento, com a finalidade de compensar a baixa ou manutenção da ativação das grandes unidades motoras e, desta forma, manter a carga de trabalho por maior tempo.

Além disso, é reportado na literatura que músculos com maior percentual de fibras do tipo II apresentam maiores manifestações mioelétricas de fadiga, associado assim a reduções significativas no recrutamento ao longo do tempo para exaustão<sup>36-38</sup>. Tendo em vista as características histoquímicas do músculo VL, o qual possui grande percentual de fibras do

tipo II<sup>39,40</sup>, e sua função primordial na produção de potência no ciclismo<sup>15</sup>, pode ser considerado um músculo mais sensível para a detecção de fadiga das grandes unidades motoras em testes máximos<sup>35</sup>. O estudo de Diefenthaler et al. (2012) utilizou, assim como em nosso estudo, um protocolo de exaustão na POMAX constante e também reportou redução da ativação das bandas de alta frequência no final do teste de exaustão para os músculos VL e bíceps femoral. Todavia, sem diferenças na ativação das bandas de baixa frequência, bem como sem alterações significativas na ativação das bandas de frequência do músculos gastrocnêmio medial e tibial anterior. Estes resultados podem estar associados a redução do recrutamento de grandes unidades motoras, em vez de uma maior ativação de pequenas unidades motoras devido a quaisquer mudanças substanciais em componentes de baixa frequência, ou ainda uma diminuição na frequência de ativação de grandes unidades motoras com fadiga. Além disso, outra explicação poderia estar relacionada às alterações do recrutamento inter-muscular e, assim, músculos sinergistas podem estar sendo ativados para executar a tarefa, conjuntamente<sup>12,41</sup>. Entretanto, resultados divergentes são vistos no estudo desenvolvido por Priego-Quesada et al. (2014), em que foi encontrado aumento apenas na ativação total, sem mudanças na ativação das bandas de alta e baixa frequência, quando comparado a ativação muscular entre as potências submáximas correspondentes ao primeiro e segundo limiares ventilatórios durante um protocolo incremental. Essas discrepâncias entre os dois estudos, podem estar relacionadas ao fato do primeiro ser um protocolo de exaustão máximo, enquanto que o segundo, apesar de ser um protocolo máximo, a ativação foi avaliada em condições submáximas, ou seja, sem instauração dos processos de fadiga exacerbados. Além disso, esses resultados heterogêneos podem estar associados a divergências nas estratégias adotadas pelos atletas para sustentar a carga de trabalho e pela diferença entre protocolos escolhidos, respectivamente<sup>16</sup>.

Para o RF, foram constatadas distinções nos padrões de ativação das bandas de alta frequência e na ativação total, em relação aos vastos. Esses achados vão de encontro a estudos prévios que relatam a possibilidade de um mesmo padrão de ativação entre músculos sinergistas<sup>42,43</sup>. Apesar do RF apresentar percentual de fibras do tipo II tão grande quanto o VL, o que poderia significar uma maior sensibilidade para detecção de fadiga<sup>44</sup>, foi constatado um aumento na ativação das bandas de alta frequência no final do primeiro teste (aumento no recrutamento de grandes unidades motoras). Isso possivelmente ocorreu em virtude dos ciclistas utilizarem primariamente o VL para produção de potência, de modo que o RF pode ter sido mais exigido de forma tardia. Alinhado ao comportamento observado, é descrito na literatura que ciclistas bem treinados (como a amostra presente em nosso estudo) podem desenvolver mecanismos para a redução do estresse localizado para manter a carga de trabalho, a partir da diversificação de ações musculares ao longo do processo de instauração da fadiga<sup>4</sup>. Neste caso, o comportamento reportado em nosso estudo pode estar associado a esse mecanismo compensatório. Além disso, essa exigência tardia pode ter refletido na ativação das bandas de alta frequência no segundo teste. Enquanto a ativação das bandas de baixa frequência seguiram padrões semelhantes ao primeiro teste.

Por fim, a ativação do músculo VM apresentou comportamento similar ao VL, com o aumento da ativação das bandas de baixa frequência ao longo dos testes de exaustão. No entanto, nossos resultados demonstraram redução da ativação das bandas de alta frequência apenas ao longo do segundo teste máximo de exaustão. O comportamento similar na ativação das bandas de frequência entre os dois músculos vastos, pode estar associado ao fato de ambos os músculos serem monoarticulares e terem função a produção de força para a realização de extensão do joelho, sendo o principal grupo muscular propulsor da pedalada<sup>45</sup>. Inclusive, Ryan e Gregor (1992)<sup>46</sup> verificaram uma correlação muito alta da ativação do VL e

VM durante o ciclo de pedalada ( $R = 0,993$ ), o que indica que os dois músculos são ativados de forma sincronizada. Além disso, ambos os músculos vastos apresentaram aumento da ativação das bandas de baixa frequência ao longo dos dois sucessivos testes de exaustão, que podem estar relacionados à instauração dos processos de fadiga muscular com as cargas de trabalho elevadas desde o início dos respectivos testes. Entretanto, somente o músculo RF apresentou aumento da ativação das bandas de alta frequência ao longo dos testes de exaustão, que pode estar relacionado às diferenças nas exigências sobre este músculo e entre testes, devido ao RF ser um músculo biarticular, enquanto que os vastos são músculos monoarticulares. Além disso, a partir da atuação primária do VL para produção de força na pedalada e do aumento da ativação tanto das bandas de baixa e alta frequência do músculo RF no primeiro teste de exaustão, podem estar associados ao resultado encontrado para o VM, que por sua vez pode ter sido recrutado sub-maximamente ao longo do primeiro teste de exaustão. Portanto, o VM foi mais exigido no segundo teste de exaustão para auxiliar na manutenção do movimento, o que pode justificar a maior ativação das bandas de baixa frequência (aumento do recrutamento das pequenas unidades motoras) desde o início do segundo teste, bem como a maior manifestação de fadiga muscular nesta musculatura.

### **Limitações**

As limitações do nosso estudo estão associadas às limitações previamente descritas da EMG de superfície<sup>11</sup>, como por exemplo: influência do tecido adiposo subcutâneo no sinal de EMG, *cross-talk* de músculos próximos, efeitos da temperatura muscular sobre os componentes de ativação das bandas de frequência do sinal<sup>34</sup>, os quais podem ser fatores intervenientes para a aquisição e assim mascarar os reais efeitos da fadiga sobre a ativação muscular<sup>47</sup>. Além disso, a ativação muscular avaliada por meio de EMG em configuração bipolar, somente avalia a ativação de uma determinada região muscular, representando o total de ativação daquele músculo, o que pode ser um fator limitante na investigação dos processos de fadiga muscular sobre a ativação de um determinado músculo<sup>48</sup>. Portanto, em estudos futuros, sugere-se a investigação dos processos de fadiga sobre a ativação muscular com o uso de matrizes de eletrodos multicanal, o que possibilitará averiguar a ativação em todo o ventre muscular, bem como avaliar a velocidade de condução das unidades motoras e assim detectar os reais efeitos deletérios de protocolos de fadiga sobre a ativação muscular, apesar de que esta técnica também apresenta suas limitações para a avaliação de contrações muscular em movimento dinâmicos, como no ciclismo<sup>48</sup>.

### **APLICAÇÕES PRÁTICAS**

A partir dos resultados do presente estudo, as variáveis neuromusculares e fisiológicas avaliadas foram afetadas pelo processo de instauração da fadiga ao longo do tempo de exaustão em ambos os testes máximos realizados. Portanto, tais resultados podem ser indícios sobre as consequências dos processos de fadiga muscular, fornecendo informações adicionais para a compreensão da cascata de motivadores que acarretam na intolerância ao exercício. Além disso, os procedimentos metodológicos do nosso estudo também podem ser utilizados para monitorar adaptações do treinamento, e/ou detectar possíveis déficits no desempenho de ciclistas competitivos, um exemplo disso, se refere a realização de dois ou mais testes máximos seguidos para averiguar o nível de fadiga muscular em cada atleta, ou seja, provavelmente um atleta com melhor condicionamento físico terá uma menor perda de desempenho no segundo e terceiro teste de exaustão, comparado ao primeiro teste. Por outro lado, um atleta com baixo condicionamento físico terá uma perda exacerbada de desempenho nos sucessivos testes de exaustão, em virtude dos processos de fadiga instaurados.

## CONCLUSÃO

Em conclusão, os resultados do presente estudo demonstram menor PM, maior GE e aumento na ativação da banda de baixa frequência do VM no segundo teste máximo de exaustão. No decorrer dos testes o GE reduziu e a PM aumentou até momentos intermediários, a partir dos quais foi estabelecido um platô. Além disso, houve maior ativação da banda de baixa frequência ao longo do tempo de exaustão para todos os músculos e em ambos os testes. Entretanto, a ativação da banda de alta frequência foi reduzida apenas no VL (T1 e T2) e VM (T2), já que a ativação elétrica do VM permaneceu inalterada no primeiro teste, bem como a ativação do RF no segundo teste. De modo que somente o RF aumentou sua ativação ao longo do primeiro teste para esta banda. Por fim, o RF foi o único músculo que apresentou aumento da ativação total ao longo do tempo de exaustão, tanto no primeiro quanto no segundo teste.

## REFERÊNCIAS

- 1 – Abbiss CR, Laursen PB. Models to explain fatigue during prolonged endurance cycling. *Sports Med.* 2005; 35 (10): 865-98.
- 2 – Hopker JG, Grady CO, Pageoux B. Prolonged constant load cycling exercise is associated with reduced gross efficiency and increased muscle oxygen uptake. *Scand J Med Sci Sports.* 2016;1-10.
- 3 – Hopker J, Jobson S, Carter H, Passfield L. Cycling efficiency in trained male and female competitive cyclists. *J. Sports Sci. Med.* 2010; 9: 332-337.
- 4 – Coyle EF. Integration of the physiological factors determining endurance performance ability. *Exerc Sport Sci Rev.* 1995; 23: 25-63.
- 5 – Gaesser GA, Brooks GA. Muscular efficiency during steady-state exercise: effects of speed and work rate. *J appl physiol.* 1975; 38: 1132-1139.
- 6 – Noakes TD. Physiological models to understand exercise fatigue and the adaptations that predict or enhance athletic performance. *Scand J Med Sci Sports.* 2000; 10(3): 123-45.
- 7 - Bigland-Ritchie B, Jones DA, Hosking GP, Edwards RH. Central and peripheral fatigue in sustained maximum voluntary contractions of human quadriceps muscle. *Clin Sci Mol Med.* 1978; 54(6): 609-14.
- 8 – Hug F, Laplaud D, Savin B, Grélot L. Occurrence of electromyographic and ventilatory threshold in professional road cyclists. *Eur J Appl Physiol.* 2003; 90: 643-646.
- 9 – Hug F, Laplaud D, Lucia A, Grélot L. EMG Threshold Determination in Eight Lower Limb Muscles During Cycling Exercise: A Pilot Study. *Int J Sports Med.* 2006; 27(6): 456-462.
- 10 – Camata TV, Lacerda TR, Altimari LR, Bortolotti H, Fontes EB, Dantas JL, Nakamura FY, Abrão T, Chacon-Mikahil MPT, Moraes AC. Associations between the electromyographic fatigue threshold and ventilatory threshold. *Electromyogr Clin*

*Neurophysiol.* 2009; 49 (6-7): 305-310.

11 - Diefenthaler F, Bini RR, Vaz MA. Frequency band analysis of muscle activation during cycling to exhaustion. *Rev Bras Cineantropom Desempenho Hum.* 2012; 14 (3): 243–253.

12 – Wakeling JM, Horn T. Neuromechanics of muscle synergies during cycling. *J. Neurophysiol.* 2009; 101 (2): 843-54.

13 – Bini, RR, Costa VP, Diefenthaler F. Reproducibility of upper leg EMG frequency content during cycling. *J Sports Sci*, 2017.

14 - Priego-Quesada JI, Bini, RR, Diefenthaler F, Carpes FP. Spectral properties of muscle activation during incremental cycling test. *J Sci Cycling.* 2014; 4 (1):7-13.

15 – Kordi M, Folland J, Goodall S, Haralabidis N, Maden-Wilkinson T, Patel TS, Leeder J, Barratt P, Howatson G. Mechanical and morphological determinants of peak power output in elite cyclists. *Scand J Med Sci Sports.*2019: 1–11.

16 – Enoka RM, Stuart DG. Neurobiology of muscle fatigue. *J. Appl. Physiol.* 1992: 1631-1648.

17 – Fernandes RJ, Jesus K, Baldari C, Sousa AC, Vilas-Boas JP, Guidetti L. Different VO<sub>2</sub>max time-averaging intervals in swimming. *Int J Sports Med.* 2012; 33 (12): 1010-1015.

18 – Hettinga FJ, De Koning JJ, de Vrijer A, Wust RCI, Daanen HAM, Foster C. The effect of ambient temperature on gross-efficiency in cycling. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2007; 101: 465–471.

19 – Garby L, Astrup A. The relationship between the respiratory quotient and the energy equivalent of oxygen during simultaneous glucose and lipid oxidation and lipogenesis. *Acta Physiol. Scand.* 1987; 129: 443–444.

20 – Merletti R, Botter A, Troiano A, Merlo E, Minetto MA. Technology and instrumentation for detection and conditioning of the surface electromyographic signal: state of the art. *Clin Biomech.* 2009; 24 (2): 122–134.

21 – Wakeling JM. Spectral properties of the surface EMG can characterize motor unit recruitment strategies. *J. Appl. Physiol.* 2008; 105 (5): 1676–1677.

22 - Edman KAP, Mattiazzi A. Effects of fatigue and altered pH on isometric force and velocity of shortening at zero load in frog muscle fibres. *J Muscle Res Cell M.* 1981; 2: 321-334.

23 – Edman KAP, LOU F. Changes in force and stiffness induced by fatigue and intracellular acidification in frog muscle fibres. *J. Physiol.* 1990; 424: 133-149.

24 – Trivedi B, Danforth WH. Effect of pH on the kinetics of frog muscle phosphofructokinase. *J. Biol. Chem.* 1996; 241: 4110–4112.

- 25 – Fuchs F, Reddy Y, Briggs FN. The interaction of cations with the calcium-binding site of troponin. *BBA*. 1970; 221: 407–409.
- 26 – Fitts RH. Cellular mechanisms of muscle fatigue. *Physiology Rev*, 1994; 74: 49–94, 1994.
- 27 – Westerblad H, Allen DG. The effects of intracellular injections of phosphate on intracellular calcium and force in single fibres of mouse skeletal muscle. *Pflug Arch Eur J Phy*. 1996; 431 (6): 964–970.
- 28 - Adeva-Andany MM, González-Lucán M, Donapetry-García C, Fernández-Fernández C, Ameneiros-Rodríguez E. Glycogen metabolism in humans. *BBA Clin*. 2016; 5: 85-100.
- 29 - Bergstrom J, Hultman E, Roch-Norlund AE. Muscle glycogen synthetase in normal subjects. Basal values, effect of glycogen depletion by exercise and of a carbohydrate-rich diet following exercise. *Scand. J. Clin. Lab. Invest*. 1972; 29 (2): 231–236.
- 30 – Vanhatalo A, Fulford J, DiMenna FJ, Jones AM. Influence of hyperoxia on muscle metabolic responses and the power–duration relationship during severe-intensity exercise in humans: a <sup>31</sup>P magnetic resonance spectroscopy study. *Exp. Physiol*. 2010; 95 (4): 528–540.
- 31 - Mendez-Villanueva A, Edge J, Suriano R, Hamer P, Bishop D. The Recovery of Repeated-Sprint Exercise Is Associated with PCr Resynthesis, while Muscle pH and EMG Amplitude Remain Depressed. *PLoS ONE*. 2012; 7 (12): e51977.
- 32 – Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, Lakomy HK. Contribution of phosphocreatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise. *J. Appl. Physiol*. 1996; 80: 876–884.
- 33 – Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, Lakomy HK, Nevill AM. Recovery of power output and muscle metabolites following 30 s of maximal sprint cycling in man. *J Physiol*. 1995; 482: 467–480.
- 34 - De Luca CJ. The Use of Surface Electromyography in Biomechanics. *J. Appl. Physiol*. 1997; 13: 135-163.
- 35 – Lucia A, Sanchez O, Carvajal A, Chicharro JL. Analysis of the aerobic-anaerobic transition in elite cyclists during incremental exercise with the use of electromyography. *Br. J. Sports Med*. 1999; 33: 178–185.
- 36 – Brody LR, Pollock MT, Roy SH, De Luca CJ, Celli B. pH-induced effects on median frequency and conduction velocity of the myoelectric signal. *J. Appl. Physiol*. 1991; 71 (5): 1878–85.
- 37 – Kupa EJ, Roy SH, Kandarian SC, De Luca CJ. Effects of muscle fiber type and size on EMG median frequency and conduction velocity. *J. Appl. Physiol*. 1995; 79 (1): 23–32.
- 38 – Sadoyama, T, Masuda T, Miyata H, Katsuta S. Fibre conduction velocity and fibre composition in human vastus lateralis. *Eur. J. Appl. Physiol*. 1998; 57: 767–71.

- 39 – Masuda K, Masuda T, Sadoyama T, Inaki M, Katsuta S. Changes in surface EMG parameters during static and dynamic fatiguing contractions. *J Electromyogr Kinesiol.* 1999; 9 (1): 39–46.
- 40 – Travnik L, Pernus F, Erzen I. Histochemical and morphometric characteristics of the normal human vastus medialis longus and vastus medialis obliquus muscles. *J. Anat.* 1995; 187: 403–11.
- 41 - Von Tscharnner V. Time-frequency and principal-component methods for the analysis of EMGs recorded during a mildly fatiguing exercise on a cycle ergometer. *J Electromyogr Kinesiol.* 2002; 12 (6): 479-92.
- 42 - Sacco P, Newberry R, McFadden L, Brown T, McComas AJ. Depression of human electromyographic activity by fatigue in a synergistic muscle. *Muscle Nerve.* 1997; 7: 710-717.
- 43 – Kay D, Marino FE, Cannon J, Gibson ASC, Lambert MI, Noakes TD. Evidence for neuromuscular fatigue during high-intensity cycling in warm, humid conditions. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2001; 84: 115 – 121.
- 44 – Housh, TJ, deVries HA, Johnson GO, Housh DJ, Evans SA, Stout JR, Evetovich TK, Bradway RM. Electromyographic fatigue thresholds of the superficial muscles of the quadriceps femoris *Eur. J. Appl. Physiol.* 1995; 71: 131-136.
- 45 – Rainoldi, A, Falla D, Mellor R, Bennell K, Hodges P. Myoelectric manifestations of fatigue in vastus lateralis, medialis obliquus and medialis longus muscles. *J Electromyogr Kinesiol.* 2008; 18: 1032–1037.
- 46 – Ryan MM, Gregor RJ. EMG Profiles of lower extremity muscles during cycling at constant workload and cadence. *J Electromyogr Kinesiol.* 1992; 2 (2): 69-80.
- 47 – Dimitrova NA, Dimitrov GV. Interpretation of EMG changes with fatigue: Facts, pitfalls, and fallacies. *J Electromyogr Kinesiol.* 2003; 13 (1): 13-36.
- 48 – von Tscharnner V, Nigg BM. Last Word on Point: Counterpoint: Spectral properties of the surface EMG can characterize/do not provide information about motor unit recruitment strategies and muscle fiber type. *J Appl Physiol.* 2008; 105 (5): 1671-1673.

## 5. REFERÊNCIAS

- ABBISS, C.R.; LAURSEN, P.B. Models to explain fatigue during prolonged endurance cycling. **Sports Medicine**, v. 35, n. 10, p. 865-98, 2005.
- ADEVA-ANDANY, M.M. et al. Glycogen metabolism in humans. **BBA Clinical**. v. 5, p. 85-100, 2016.
- BERGSTROM, J.; HULTMAN, E.; ROCH-NORLUND, A.E. Muscle glycogen synthetase in normal subjects. Basal values, effect of glycogen depletion by exercise and of a carbohydrate-rich diet following exercise. **Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation**, v. 29, n. 2, p. 231–236, 1972.
- BIGLAND-RITCHIE, B. et al. Central and peripheral fatigue in sustained maximum voluntary contractions of human quadriceps muscle. **Clinical science and molecular medicine**, v. 54, n. 6, p. 609-14, 1978.
- BINI, R.R.; COSTA, V.P.; DIEFENTHAELER, F. Reproducibility of upper leg EMG frequency content during cycling. **Journal of Sports Sciences**. 2017.
- BOGDANIS, G.C, et al. Contribution of phosphocreatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise. **Journal of Applied Physiology**, v. 80, p. 876–884, 1996.
- BOGDANIS, G.C, et al. Recovery of power output and muscle metabolites following 30 s of maximal sprint cycling in man. **The Journal of Physiology**, v. 482, p. 467–480, 1995.
- BRODY, L.R. et al. pH-induced effects on median frequency and conduction velocity of the myoelectric signal. **Journal of Applied Physiology**, v. 71, n. 5, p.1878–85, 1991.
- CAMATA, T.V. et al. Associations between the electromyographic fatigue threshold and ventilatory threshold. **Electromyography and clinical neurophysiology**, v. 49, n. 6-7, p. 305-310, 2009.
- CÈ, E. et al. Peripheral fatigue: new mechanistic insights from recent technologies. **European Journal of Applied Physiology**, v. 120, n. 1, p. 17-39, 2020.
- CLEUZIQU, C. et al. VO<sub>2</sub> and EMG Activity Kinetics During Moderate and Severe Constant Work Rate Exercise in Trained Cyclists. **Canadian Journal of Applied Physiology**, v. 29, n. 6, p. 758–772, 2004.
- COYLE, E.F. et al. Determinants of endurance in well-trained cyclists. **Journal of Applied Physiology**, v. 64, n. 6, p. 2622-30, 1988.
- COYLE, E.F. Integration of the physiological factors determining endurance performance ability. **Exercise and Sports Science Reviews**, v. 23, p. 25-64, 1995.
- DAWSON, M. J.; GADIAN, D. G.; WILKIE, D. R. Muscular fatigue investigated by phosphorus nuclear magnetic resonance. **Nature**, v. 274, p. 861-866, 1978.

DIEFENTHAELER, F.; BINI, R. R.; VAZ, M. A. Frequency band analysis of muscle activation during cycling to exhaustion. **Brazilian Journal of Kineanthropometry and Human Performance**, v. 14, n. 3, p. 243–253, 2012.

DIMITROVA, N.A.; DIMITROV, G.V. Interpretation of EMG changes with fatigue: Facts, pitfalls, and fallacies. **Journal of Electromyography and Kinesiology**, v. 13, n. 1, p. 13-36, 2003.

EDMAN, K. A. P.; MATTIAZZI, A. Effects of fatigue and altered pH on isometric force and velocity of shortening at zero load in frog muscle fibres. **Journal of Muscle Research and Cell Motility**, v. 2, p. 321-334, 1981.

ENOKA, R.M.; STUART, D.G. Neurobiology of muscle fatigue. **Journal of Applied Physiology**, p. 1631-1648, 1992.

FITTS, R.H. Cellular mechanisms of muscle fatigue. **Physiological Reviews**, v. 74, n. 1, p. 49-94, 1994.

FITTS, R.H. The cross-bridge cycle and skeletal muscle fatigue. **Journal of Applied Physiology**, v. 104, p. 551-558, 2008.

FITTS, R. H.; METZGER, J. M. Mechanisms of muscular fatigue. In: Principles of Exercise Biochemistry. **Poortmans: Medicine & Sport Science**, p. 212-229, 1988.

FUCHS, F.; REDDY, Y.; BRIGGS, F.N. The interaction of cations with the calcium-binding site of troponin. **Biochimica et Biophysica Acta**, V. 221, p. 407–409, 1970.

GANDEVIA, S.C. Spinal and Supraspinal Factors in Human Muscle Fatigue. **Physiological Reviews**, v. 81, n. 4, p. 1726-1771, 2001.

HETTINGA, F.J. et al. The effect of ambient temperature on gross-efficiency in cycling. **Eur. Journal of Applied Physiology**, v. 101, p. 465–471, 2007.

HETTINGA, F.J. et al. Pacing strategy and the occurrence of fatigue in 4000-m cycling time trials. **Medicine & Science in Sports & Exercise**, v. 38, p. 1484–1491, 2006.

HOLT, N. C.; WAKELING, J. M.; BIEWENER, A. A. The effect of fast and slow motor unit activation on whole-muscle mechanical performance: The size principle may not pose a mechanical paradox. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 281, p. 1-6, 2014.

HOPKER, J.G. et al. The influence of training status, age, and muscle fiber type on cycling efficiency and endurance performance. **Journal of Applied Physiology**, v. 115, p. 723–729, 2013.

HOPKER, J.G.; GRADY, C.O.; PAGEOUX, B. Prolonged constant load cycling exercise is associated with reduced gross efficiency and increased muscle oxygen uptake. **Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports**, p. 1-10, 2016.

- HUG, F. et al. A comparison of visual and mathematical detection of the electromyographic threshold during incremental pedaling exercise: a pilot study. **Journal of strength and conditioning research**, V. 20, n. 3, p. 704-8, 2006.
- HUG, F. et al. Occurrence of electromyographic and ventilatory thresholds in professional road cyclists. **European Journal of Applied Physiology**, v. 90, n. 5–6, p. 643–646, 2003.
- KEYSER, R.E. Peripheral Fatigue: High-Energy Phosphates and Hydrogen Ions. **American Academy of Physical Medicine and Rehabilitation**, v. 2, n. 5, p. 347-58, 2010.
- KOCHAN, R.G. et al. Glycogen synthase activation in human skeletal muscle: effects of diet and exercise. **American Physiological Society Journal**, v. 236, n. 6, p. 660–666, 1979.
- KONING, J.J. de; et al. Determination of optimal pacing strategy in track cycling with an energy flow model. **Journal of Science and Medicine in Sport**, v. 2, n. 3, p. 266–277, 1999.
- KORDI, M. et al. Mechanical and morphological determinants of peak power output in elite cyclists. **Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports**, p. 1–11, 2019.
- KUPA, E.J. et al. Effects of muscle fiber type and size on EMG median frequency and conduction velocity. **Journal of Applied Physiology**, v. 79, n. 1, p. 23–32, 1995.
- LANNERGREN, J.; WESTERBLAD, H. Force decline due to fatigue and intracellular acidification in isolated fibres from mouse skeletal muscle. **The Journal of Physiology**, v. 434, p. 307-322, 1991.
- LEES, S.J. et al. Glycogen and glycogen phosphorylase associated with sarcoplasmic reticulum: effects of fatiguing activity. **Journal of Applied Physiology**, v. 91, n. 4, p. 1638-44, 2001.
- LUCIA, A. et al. Analysis of the aerobic-anaerobic transition in elite cyclists during incremental exercise with the use of electromyography. **British Journal of Sports Medicine**, v. 33, n. 3, p.178-185, 1999.
- MENDEZ-VILLANUEVA, A. et al. The Recovery of Repeated-Sprint Exercise Is Associated with PCr Resynthesis, while Muscle pH and EMG Amplitude Remain Depressed. **PLoS ONE**, v. 7, n. 12, p. e51977, 2012.
- MORITANI, T.; DEVRIES, H.A. Anaerobic threshold determination by surface electromyography. Re-examination of the relationship between the surface integrated electromyogram (iEMG) and force of isometric contraction. **American Journal of Physical Fitness**, v. 57, p. 263–77, 1978.
- NOAKES, T.D. Physiological models to understand exercise fatigue and the adaptations that predict or enhance athletic performance. **Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports**, v. 10, n. 3, p. 123-45, 2000.
- NOAKES, T.D.; GIBSON, A.S.C. Logical limitations to the “catastrophe” models of fatigue during exercise in humans. **British Journal of Sports Medicine**. v; 38, n.5, p. 648-9, 2004.

PASSFIELD, L.; DOUST, J.H. Changes in cycling efficiency and performance after endurance exercise. **Medicine & Science in Sports & Exercise**, v. 32, n. 11, p. 1935-41, 2000.

PRIEGO-QUESADA, J.I. et al. Spectral properties of muscle activation during incremental cycling test. **Journal of Science and Cycling**, v. 4, n. 1, p. 7-13, 2014.

ROSSI, L.; TIRAPÉGUI, J. Aminoácidos: bases atuais para sua suplementação na atividade física. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 36, p. 37-51, 2000.

TRIVEDI, B.; DANFORTH, W.H. Effect of pH on the kinetics of frog muscle phosphofructokinase. **Journal of Biological Chemistry**, v. 241, p. 4110–4112, 1966.

VANHATALO, A. et al. Influence of hyperoxia on muscle metabolic responses and the power–duration relationship during severe-intensity exercise in humans: a <sup>31</sup>P magnetic resonance spectroscopy study. **Experimental Physiology**, v. 95, n. 4, p. 528–540, 2010.

VILLERIUS, V.; DUC, S.; GRAPPE, F. Physiological and Neuromuscular Responses of Competitive Cyclists during a Simulated Self-Paced Interval Training Session. **International Journal of Sports Medicine**, v. 29, n. 9, p. 770–777, 2008.