

Avaliação da performance de um ciclista de estrada com recurso a simulações numéricas e modelos analíticos em três posições diferentes

Autores

Pedro Forte¹; Daniel A Marinho¹; Pedro Morouço²; Beat Knechtle³; Tiago M Barbosa¹; Jorge E Morais¹

pedromiguel.forte@iscedouro.pt

Resumo

O objetivo deste estudo foi avaliar o arrasto, a potência mecânica e a performance de um ciclista de elite na posição vertical, dropes e de cotovelos com um capacete normal com recurso a simulações numéricas e modelos analíticos. O FD variou entre 19,67 N e 25,15 N, a potência mecânica total variou entre 308,12 W e 370,49, o custo energético entre 123,19 J/m e 150,15 J/m e o tempo estimado de chegada entre 74,92 s e 90,01 s por quilometro (Figura 5). A posição de cotovelos deve ser adotada para minimizar o arrasto, potência mecânica total, custo energético e tempo estimado de chegada, seguida da posição de dropes e vertical.

Palavras-chave: Ciclismo; Posições; CFD; Potência; Performance

Introdução

Provas de ciclismo em estrada são das mais intensas no desporto, atingindo cerca de 5000 km^{1, 2, 3}. Para mais, fatores intrínsecos associados ao ciclista como a antropometria, fisiologia e genética contribuem para imprimir nos pedais a potência mecânica necessária para superar as forças resistivas^{1, 2, 4-6}. As principais forças resistivas são o arrasto e a resistência de rolamento^{7, 8}. Para velocidades superiores a 8,33 m/s o arrasto apresenta um contributo de cerca de 90% das forças resistivas⁹. O tempo para a vitória pode ser reduzido através de técnicas e métodos de treino, estratégias para a prova e a utilização de equipamentos/assessórios.

¹ Centro de Investigação em Desporto, Saúde e Desenvolvimento Humano, Portugal

² Centre for the Study of Human Performance, Universidade de Lisboa, Portugal

³ Institute of Primary Care, University of Zurich, Zurich, Switzerland

O arrasto tem sido apontado como a principal força resistiva no ciclismo e a posição do corpo parece ter uma influência próxima de 15%¹⁰⁻¹³. Entre as diferentes posições, pode-se identificar: (i) a posição vertical (VP); (ii) mãos nos dropes (DP) (iii) e cotovelos (EP)^{12, 14}. A posição que apresentar menor a área de superfície, à priori, causará menor arrasto. Assim, a área efetiva (ACd) é um dos parâmetros mais utilizados para avaliação aerodinâmica. A ACd é a área que se encontra em oposição ao deslocamento do fluido e é calculada pelo produto da área de superfície com o coeficiente de arrasto. Um dos objetivos dos ciclistas é minimizar o arrasto para diminuir as forças resistivas. Contudo, o arrasto é dependente da forma corporal, da rugosidade do corpo e dos materiais que possam influenciar o escoamento do fluido. Quanto menores as forças resistivas, menor a potência mecânica exigida para atingir determinada velocidade¹⁵.

As simulações numéricas com recurso à dinâmica computacional de fluidos (CFD), os procedimentos analíticos e as técnicas de desaceleração são algumas das formas utilizadas para avaliar o arrasto e as forças resistivas¹⁶. No entanto, a CFD permite avaliar o arrasto, a área de superfície e o coeficiente de arrasto em condições pré-definidas e controladas. Esta metodologia minimiza fatores que possam influenciar os resultados como a intravariabilidade do sujeito, a temperatura, pressão e velocidade. Mais ainda, é possível obter dados como o arrasto e coeficiente de arrasto total, de viscosidade e de pressão¹⁷.

É possível encontrar alguns estudos de avaliação aerodinâmica com recurso à CFD em diferentes posições dos ciclistas. Beaumont et al.¹⁸, avaliaram o efeito do uso de um capacete do tipo cronometro em diferentes posições da cabeça. Blocken et al.¹¹, avaliaram o efeito do drafting em dois ciclistas e Griffith et al.¹⁹, apresentaram a variação do arrasto em diferentes posições dos membros inferiores do ciclista. Já Defraeye et al.¹², avaliaram um ciclista com um capacete do tipo cronómetro na VP, DP e de EP. Contudo, tanto quanto sabemos, nenhum estudo analisou o efeito das diferentes posições corporais com um capacete do tipo estrada (normal) na performance do ciclista. Os capacetes normais com aberturas de ar, são frequentemente utilizados nas provas de longa distância. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o arrasto, a potência mecânica e a performance de um ciclista de elite na posição vertical, dropes e de cotovelos com um capacete normal. Foi colocado

como hipótese de que o arrasto, a potência mecânica e a performance variam em função das diferentes posições corporais de um ciclista de elite com um capacete normal.

Métodos

Modelo

Um ciclista de elite que participa em competições nacionais voluntariou-se para este estudo. O sistema bicicleta-ciclista tinha uma massa de 62 kg, a bicicleta tinha uma massa de 7 kg e o sujeito 55 kg. Todos os procedimentos foram de acordo com a declaração de Helsínquia com investigação em seres humanos. Foi obtido um consentimento escrito, livre e esclarecido por parte do sujeito.

Digitalização

Foi obtido um modelo 3D através de um Scanner 3D (3D Systems, Inc., Canada) e do respetivo software (Sense, 3D Systems, Inc., Canada) para criar uma geometria do sistema bicicleta-ciclista. O sujeito utilizou a sua bicicleta de competição, vestuário e capacete. Os modelos 3D foram digitalizados nas três posições: VP; (ii) DP (iii) EP^{12, 13}. As geometrias foram editadas e convertidas para modelos CAD no Geomagic studio (figura 1) (3D Systems, USA)¹⁷.

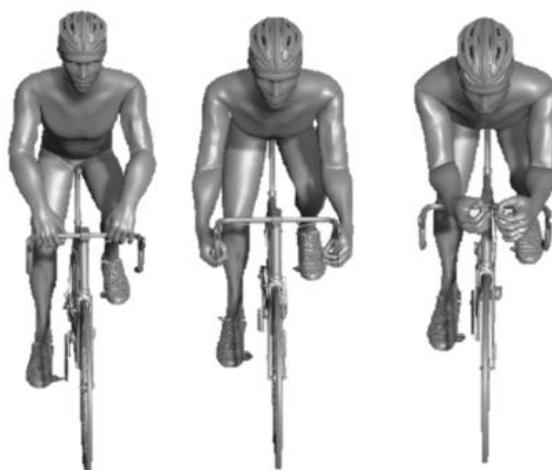


Figura 1. Modelos CAD nas três posições: vertical (esquerda), mãos nos drops (meio) e cotovelos (direita).

Fronteiras e limites

No módulo de geometrias do Ansys Workbench software (Ansys Fluent 16.0, Ansys Inc., Pennsylvania, USA), foram criadas as fronteiras tridimensionais (domínio) em torno do modelo e uma malha com mais de 42 milhões de elementos prismáticos e tetraedrais, representativos do escoamento do fluido em direção oposta ao sistema bicicleta-ciclista. O domínio tinha 7 m de comprimento, 2,5 m de largura e 2,5 metros de altura. O modelo foi colocado a 2,5 metros de distância da entrada do fluido¹¹.

A velocidade média em provas de longa distância é próxima de 11,11 m/s (~40 km/h)³. Assim, a mesma velocidade foi selecionada na porção definida como entrada do fluido (direção -z) a uma velocidade constante de 11,11 m/s (~40 km/h) em direção oposta à orientação do modelo. A intensidade de turbulência foi definida nas simulações numéricas de $1 \times 10^{-6}\%$. Foi estabelecido que o sistema teria uma rugosidade de zero e as paredes eram antiderrapantes e escaláveis.

Simulações numéricas

O código numérico Fluent CFD (Ansys Fluent 16,0, Ansys Inc., Pennsylvania, USA) utiliza o método de volumes finitos para resolver as equações de *Reynolds-averaged Navier–Stokes* (RANS). Para tal, o modelo de turbulência *Realizable k-e* foi selecionado. Este modelo apresenta histogramas de velocidade similares aos modelos *standard k-e*, *RST* e *RNG k-e* e apresenta uma maior economia de computação²⁰.

Para a acoplagem de pressão e velocidade foi utilizado o algoritmo SIMPLE. Os esquemas de discretização para interpolação da pressão e termos de convecção e viscosidade foram definidos como segundos. Os gradientes foram calculados com recurso ao método de *least-squares cell-based*. A pressão e o momento foram definidos como segunda e primeira ordem ascendente. A energia cinética de turbulência e a taxa de dissipação foram definidas como primeira ordem ascendente. A convergência da simulação ocorreu automaticamente pelo Fluent CFD antes de 1404 interações.

Resultados obtidos

Arrasto

Com recurso à CFD é possível obter o coeficiente de arrasto total e a área efetiva (AC_d). O arrasto é calculado com recurso à equação 1:

$$F_D = 0.5\rho AC_d v^2 \quad (1)$$

F_D é a força de arrasto, C_d é o coeficiente de arrasto, v é a velocidade, A é a área de superfície e ρ é a densidade do ar (1,292 kg/m³).

Potência Mecânica

A potência mecânica total foi estimada a 11,11 m/s nas diferentes posições. A potência total líquida (P_{NET}, equação 7) foi assumida como a soma da potência para superar o arrasto (equação 2), potência da resistência de atrito (P_{WB}, equação 3), potência da resistência de rolamento (P_{RR}, equação 4), alterações na energia potencial (P_{PE}, equação 5) e alterações na energia cinética (equação 6)⁹.

$$P_d = F_d \cdot v \quad (2)$$

$$P_{WB} = v (91 + 87v)10^{-3} \quad (3)$$

$$P_{RR} = CR \cdot m \cdot v \cdot g \quad (4)$$

$$P_{PE} = v \cdot m \cdot v \cdot g \quad (5)$$

$$P_{KE} = \frac{\Delta KE}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left(m + \frac{I}{r^2} \right) (V_f - V_i) / (t_i - t_f) \quad (6)$$

$$P_{NET} = P_d + P_{WB} + P_{RR} + P_{PE} + P_{KE} \quad (7)$$

$$P_{TOT} = (P_d + P_{WB} + P_{RR} + P_{PE} + P_{KE}) / E_c \quad (8)$$

A potência total (P_{TOT}) é calculada com recurso à equação 8, em que E_c é o fator de eficiência da corrente, assumido como 0,976⁹.

O custo energético (C) pode ser calculado com recurso à equação 9:

$$C = \frac{CR \cdot m \cdot g + \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot C_d \cdot v^2}{n} \quad (9)$$

Performance

O tempo estimado de chegada (ETA) para cada potencia mecânica total e velocidade foi estimado através de:

$$ETA = \frac{d}{v} \quad (13)$$

Onde v é:

$$v = \left(SUM \left(\frac{\sqrt{2 \cdot P_{TOT}}}{g \cdot m \cdot 0.0053} + 0.185 \right) * 60 * \frac{60}{1000} * 0.621 \right) * 1.609 \quad (14)$$

Foi considerada a distância para os jogos olímpicos de Tokyo 2020, na prova de estrada com a distância de 234 km.

Resultados

O F_D variou entre 19,67 N e 25,15 N, o F_D de pressão e de viscosidade variou entre 8,21 N e 11,25 N e 11,46 N e 17,7 N respetivamente (Figura 2). A EP apresentou menos 35% e 16% de F_D de pressão em comparação com a VP e com a DP respetivamente. A DP apresentou menos 23% de F_D de pressão em relação à VP. O F_D de viscosidade na DP apresentou menos 8% e 22% do que a VP e a de EP, respetivamente. A EP apresentou menos 28% de F_D em comparação com a VP. A VP apresentou mais 22% de F_D do que a EP e 13% do que a DP. A DP diferiu da EP em 11% no F_D total.

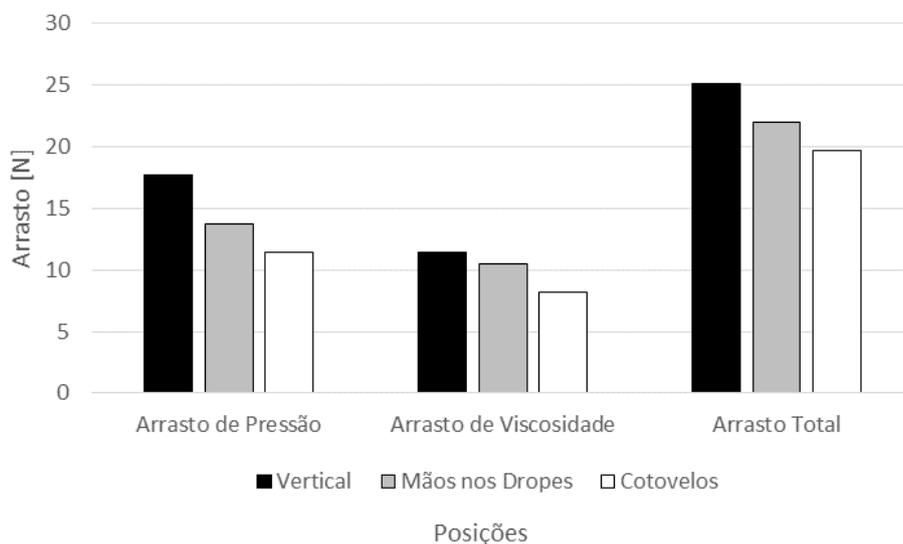


Figura 2. Arrasto nas diferentes posições a 11,11 m/s.

A PTOT variou entre 308,12 W e 370,49 W (Figura 3). A VP apresentou uma PTOT superior, seguida da DP e pela EP. A DP teve menos 9% em relação à VP e mais 8% do que a de EP. As diferenças entre a VP e a de EP foram de 17%.

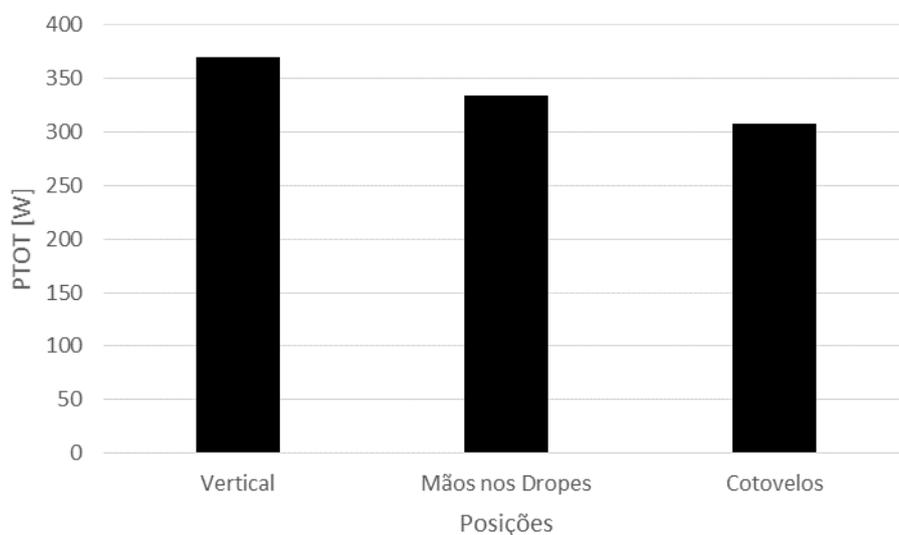


Figura 3. Potência total nas diferentes posições a 11,11 m/s.

O C variou entre 123,19 J/m e 150,15 J/m entre as diferentes posições a 11,11 m/s (Figura 4). A DP (148,26 J/m) teve um C 1% inferior à VP (150,15 J/m) e 20% superior à EP (123,19 J/m). A VP impôs um C 22% superior à EP. Assim, a EP requer um menor C em comparação à posição DP e VP a 11,11 m/s.

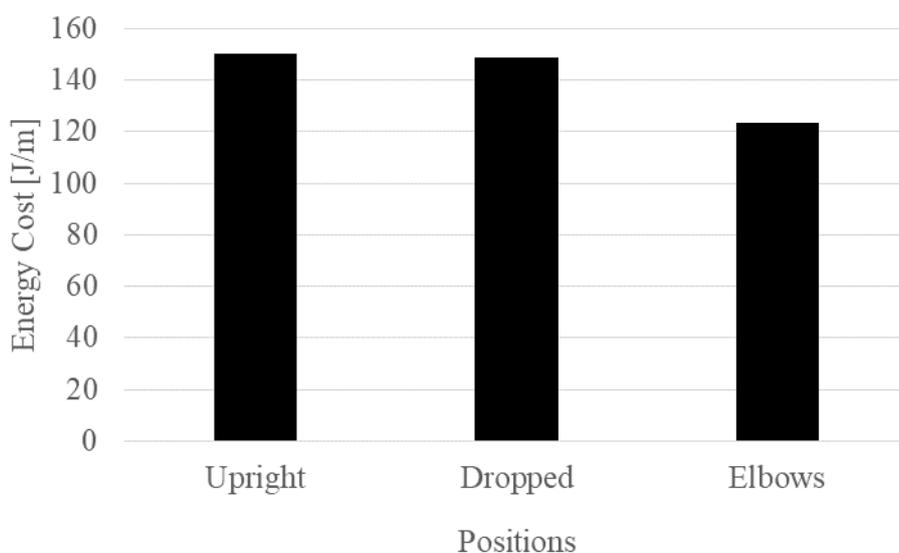


Figura 4. Custo energético nas diferentes posições a 11,11 m/s.

É expectável que na prova de Tóquio (234 km) o ciclista na EP tenha um C de 28826460 J (≈ 6885.08 Kcal). Na DP o ciclista terá um C de 34692840 J (≈ 8286.24 Kcal) e na VP de 35135100 J (≈ 8391.87 Kcal)

O ETA/km variou entre 74,92 s e 90,01 s (Figura 5). Na VP é expectável que um ciclista demore 90,01 s a perfazer 1 km de distância. Na DP deverá demorar 81,25 s e 74,93 s na EP. Em suma, a EP parece melhorar o ETA entre 9% e 17%.

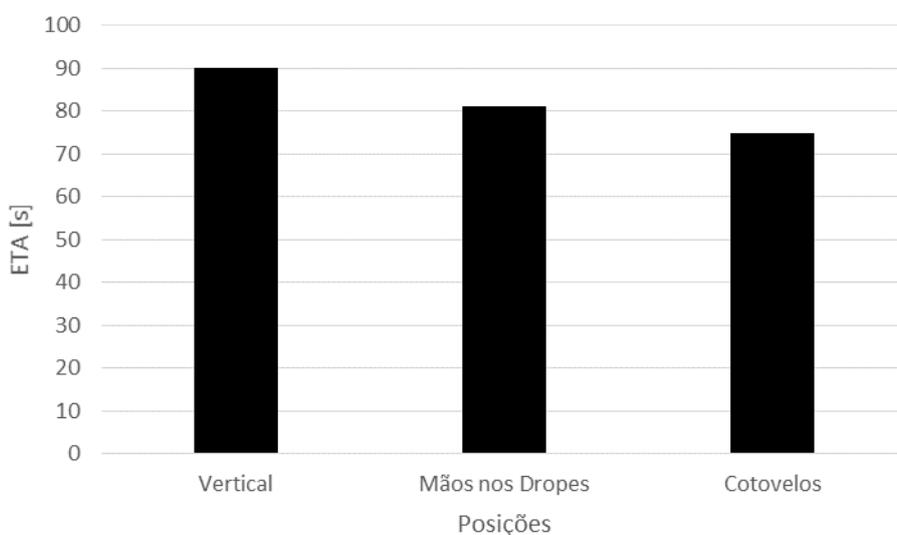


Figura 5. ETA nas diferentes posições a 370,79 W.

Na prova dos jogos olímpicos de Tóquio 2020, o ciclista na EP demorará cerca de 17531,28 s (4 h, 52 min e 11.28 s). Na DP e VP demorará cerca de 19012,50 s (5 h, 16 min e 52.5 s) e 21062,34 s (5 h e 51 min), respetivamente.

Discussão

O objetivo deste estudo foi avaliar a aerodinâmica e a performance do ciclista na VP, DP e EP. A posição mais eficiente foi a EP.

Neste estudo foi avaliado o ETA, PTOT, C e F_D para aceder a performance de um ciclista de elite. Tanto quanto sabemos, esta foi a primeira tentativa de avaliar o F_D com recurso à CFD e estimar a PTOT e o ETA do sistema bicicleta-ciclista com um capacete normal em três posições diferentes com recurso a modelos analíticos. As principais conclusões foram que: (i) a EP é a que impõe menor F_D em comparação à

VP e à DP. (ii) a EP requer menos PTOT e C a 11,11 m/s; (iii) para a mesma PTOT, um ciclista na EP melhorará o tempo de chegada em cerca de 15 s/km.

O F_D variou de 19,67 N a 25,15 N a 11,11 m/s. Foi assumida uma densidade do ar de 1,292 kg/m³ e a temperatura de 15°C. A velocidade média assumida teve por base as velocidades médias típicas do *Tour de France* e provas olímpicas de estrada³. Para as mesmas posições avaliadas por nós, Defraeye e colaboradores¹², apresentaram com recurso à CFD, uma ACd entre 0,211m² e 0,270m² para as posições corporais do ciclista (sem a bicicleta). As diferenças foram de cerca de 21% entre posições. No nosso estudo as diferenças na ACd variaram entre 2% e 22% e os valores de 0,26 m² a 0,33 m². Sendo suportados pela literatura^{11, 14}, contudo: (i) a nossa análise incluiu a bicicleta; (ii) ACd foi avaliada com recurso à CFD; (iii) as velocidades avaliadas noutros estudos foram diferentes de 11,11m/s; (iv) o sujeito do nosso estudo utilizou um capacete normal. Grappe¹¹ apresentou valores de ACd entre 0,38 m² e 0,44 m² a diferentes velocidades na posição time trial. Mais ainda, Olds & Olive²¹ apresentaram áreas de superfície de 0,61 m² para a VP. Em suma, foi verificado na literatura^{8, 14, 23} que com na DP a ACd parece variar entre 0,30 m² e 0,41m², na VP entre 0,37 m² e 0,42 m² e na time trial (similar à EP) entre 0,22 m² e 0,30 m². Mais ainda, no nosso estudo, as diferenças no F_D foram de 16% a 35% entre as posições. Defraeye et al.¹⁴, mostraram que a posição do ciclista é responsável pelo arrasto em cerca de 60% a 70%. No referido estudo, as diferenças na ACd entre posições foram de 18% a 31%.

A PTOT foi estimada de acordo com o modelo proposto por Martin et al⁹. Neste estudo, a PTOT variou de 308,12 W a 370,49 W a 11,11 m/s. Estes valores parecem estar de acordo com a literatura. González-Haro et al.²², mostraram valores do pico de potência de 355 W a 14,53 m/s em laboratório. Vogt et al.²⁴, avaliaram a potência média de 6 ciclistas a 11,41m/s e apresentaram resultados entre 190 W e 392 W. O protocolo iniciou com uma resistência de 100 W e incrementos de 20 W a cada 3 minutos. Mais ainda, Grappe²⁵ avaliou a potência média imprimida de um velódromo próximo de 11,11m/s e mostraram-se próximos de 250 W. Os dados apresentados mostram-se menores do que os do nosso estudo, tal fato pode ser explicado por: (i) no nosso estudo o arrasto foi avaliado com recurso à CFD; (ii) a bicicleta não era do tipo de velódromo; (iii) o ciclista utilizou um capacete normal em vez de um capacete do tipo cronometro.

As diferentes posições influenciam o custo energético, explicado essencialmente pelas variações da ACd^{26} . No nosso estudo, a VP teve o maior custo energético (150,15 J/m), seguida pela DP (148,26 J/m) e EP (123,19 J/m). Para a estimativa do C, foi assumida uma eficiência bruta de 20%^{27, 28}. Belli & Hintzy²⁹ numa bicicleta ergométrica e em laboratório avaliaram o C com diferentes cadências e potências e apresentaram um C entre 1,11 J/m/kg e 2,39 J/m/kg. Considerando o sujeito do nosso estudo, o C seria de 61,05 J/m e 131,45 J/m. Estes resultados parecem sustentar os dados do nosso estudo a 11,11 m / s. No entanto, Belli & Hintzy²⁹ não avaliaram o custo energético em diferentes velocidades. Além disso, durante o Tour de France, o gasto médio por dia foi de $25,4 \pm 1,40$ MJ (25400000 J / $6066,69$ Kcal)³⁰. Pese embora, o Tour de França tem cerca de 150 km/etapa e a prova olímpica cerca de 220 km. Assim, espera-se que no Tour de França o C seja menor que na corrida olímpica. Saris et al.³⁰, apresentaram uma distância média percorrida por dia de 155,59 km, expectando-se um C de 163,25 J/m. As diferenças podem ser explicadas por: (i) os autores avaliaram o C de todas as atividades diárias; enquanto, no nosso estudo, o C foi estimado para a distância percorrida durante uma corrida. O C de 11,11 m/s numa prova olímpica (≈ 220 km - 250 km) varia entre 27100722 J e 37537536 J ($\approx 6472,9$ Kcal e 8965,69 Kcal). Estes valores são sustentados por Sari et al.³⁰, na estimativa de custo energético no Tour de France.

O ETA na VP foi superior (i.e. levaria mais tempo a percorrer uma unidade de distância) em comparação com a EP. Para atingir 11,11m/s, o sujeito teria de imprimir 370,49 W na VP; por outro lado, na EP apenas necessitaria de 308,12 W. Assim, a 370,49 W na VP o ciclista necessitaria de 90,01 s para atingir 1 km, 82,25 s na DP e 74,93 s na EP. Tanto quanto sabemos, esta foi a primeira tentativa de se estimar o ETA considerando três posições diferentes do ciclista com recurso à CFD e equações. A PTOT é influenciada pela posição e forma corporal, F_D , geometria da bicicleta e a cadência³¹. Grappe et al.²³, avaliaram a resistência entre a VP, DP e a posição de Obree com recurso a modelos analíticos e a posição de Obree impunha menos arrasto, seguida da posição time trial, DP e VP. Estes resultados sustentam os do nosso estudo, embora Grappe et al.²³ não avaliaram a PTOT a 11,11m/s. Em desportos similares, as diferentes posições parecem influenciar o arrasto, a PTOT e o custo energético^{5, 17}. O ETA pode ser minimizado através de posições em que o

ciclista apresente maior economia e eficiência, necessitando de menor PTOT para atingir determinada velocidade. Considerando a prova dos jogos olímpicos de Tóquio 2020 com 234 km, se possível um ciclista adotar a posição de cotovelos demoraria cerca de 4 horas, 52 minutos e 11.28 segundos. Com as mãos dos drops 5 horas, 16 minutos e 52.5 segundos e na posição vertical 5 horas e 51 minutos.

Os treinadores devem aconselhar os ciclistas a adotar a EP tanto quanto possível durante uma prova. Esta aspeto poderá contribuir para minimizar o F_D , a PTOT, C e o ETA. Treinadores podem prescrever intensidades de treino e baseadas na PTOT a determinada velocidade, cadência e posição corporal.

Este estudo apresenta as seguintes limitações: (i) o sujeito é meramente representativo da sua categoria; (ii) apenas três posições foram avaliadas; (iii) apenas um capacete foi avaliado; (iv) foram assumidos um conjunto de valores para estimar as forças resistivas (coeficiente da resistência de rolamento, temperatura, densidade do ar e eficiência bruta); (v) não foi controlado o efeito de diferentes vestuários; (vi) apenas foi avaliada uma velocidade.

Conclusão

A ação da resistência num ciclista variou nas diferentes posições. A PTOT, C, F_D e ETA foram superiores na VP, seguida da DP e EP. Na EP o ciclista poderá reduzir o tempo por quilómetro em 17%. Os ciclistas devem estar cientes de que a EP requer menor PTOT e C para atingir 11,11 m/s. A EP deve ser adotada para minimizar o arrasto, PTOT, C e ETA.

Bibliografia

- 1 - Jeukendrup, A. E., Craig, N. P., & Hawley, J. A. (2000). The bioenergetics of world class cycling. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 3, 414–433.
- 2 - Jeukendrup, A. E., & Martin, J. (2001). Improving cycling performances, how should we spend our time and money. *Sports Medicine*, 31, 559–569.
- 3 - El Helou, N., Berthelot, G., Thibault, V., Tafflet, M., Nassif, H., Campion, F., ... & Toussaint, J. F. (2010). Tour de France, Giro, Vuelta, and classic European races show a unique progression of road cycling speed in the last 20 years. *Journal of sports sciences*, 28(7), 789-796.
- 4 - Faria, E. W., Parker, D. L., & Faria, I. E. (2005). The science of cycling: Factors affecting performance – Part 2. *Sports Medicine*, 35, 313–337.
- 5 - Lucia, A., Hoyos, J., & Chicharro, J. L. (2001). Physiology of professional road cycling. *Sports Medicine*, 31, 325–337.
- 6 - Padilla, S., Mujika, I., Orbananos, J., & Angulo, F. (2000). Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32, 850–856.
- 7 - Candau, R. B., Grappe, F., Menard, M., Barbier, B., Millet, G. Y., Hoffman, M. D., ... & Rouillon, J. D. (1999). Simplified deceleration method for assessment of resistive forces in cycling. *Medicine and science in sports and exercise*, 31, 1441-1447.
- 8 - Martin, J. C., Milliken, D. L., Cobb, J. E., McFadden, K. L., & Coggan, A. R. (1998). Validation of a mathematical model for road cycling power. *Journal of applied biomechanics*, 14(3), 276-291.
- 9 - Alam, F., Chowdhury, H., Wei, H. Z., Mustary, I., & Zimmer, G. (2014). Aerodynamics of ribbed bicycle racing helmets. *Procedia engineering*, 72, 691-696.
- 10 - Grappe, F. (2009). Total resistive forces opposed to the motion in cycling. Cycling and optimisation of the performance. Collection Science et Pratique du Sport, De Boeck Université, Paris, France

- 11 - Blocken, B., Defraeye, T., Koninckx, E., Carmeliet, J., Hespel, P. 2013. CFD simulations of the aerodynamic drag of two drafting cyclists. *Computers & Fluids*, 71, 435-445.
- 12 - Defraeye, T., Blocken, B., Koninckx, E., Hespel, P., & Carmeliet, J. (2010). Aerodynamic study of different cyclist positions: CFD analysis and full-scale wind-tunnel tests. *Journal of biomechanics*, 43(7), 1262-1268.
- 13 - Defraeye, T., Blocken, B., Koninckx, E., Hespel, P., & Carmeliet, J. (2011). Computational fluid dynamics analysis of drag and convective heat transfer of individual body segments for different cyclist positions. *Journal of biomechanics*, 44(9), 1695-1701
- 14 - Blocken, B., van Druenen, T., Toparlar, Y., & Andrianne, T. (2018b). Aerodynamic analysis of different cyclist hill descent positions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 181, 27-45.
- 15 - Forte, P., Marinho, D. A., Morais, J. E., Morouço, P. G., & Barbosa, T. M. (2018). Estimation of mechanical power and energy cost in elite wheelchair racing by analytical procedures and numerical simulations. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 21(10), 585-592.
- 16 - Forte, Pedro., Barbosa, T. M., & Marinho, D. A. (2015). Technologic Appliance and Performance Concerns in Wheelchair Racing – Helping Paralympic Athletes to Excel. *New Perspectives in Fluid Dynamics*, 101–121. Chaoqun Liu (Ed.), IntechOpen, Rijeka, Croatia.
- 17 - Forte, P., Marinho, D. A., Morais, J. E., Morouço, P. G., & Barbosa, T. M. (2018a). The variations on the aerodynamics of a world-ranked wheelchair sprinter in the key-moments of the stroke cycle: A numerical simulation analysis. *PloS one*, 13(2), e0193658.
- 18 - Beaumont, F., Taiar, R., Polidori, G., Trenchard, H., & Grappe, F. (2018). Aerodynamic study of time-trial helmets in cycling racing using CFD analysis. *Journal of biomechanics*, 67, 1-8.

- 19 - Griffith, M. D., Crouch, T., Thompson, M. C., Burton, D., Sheridan, J., & Brown, N. A. (2014). Computational fluid dynamics study of the effect of leg position on cyclist aerodynamic drag. *Journal of Fluids Engineering*, 136(10), 101105.
- 20 - Aroussi, A., Kucukgokoglan, S., Pickering, S. J., & Menacer, M. (2001). Evaluation of four turbulence models in the interaction of multi burners swirling flows. 9.
- 21 - Olds, T. S., & Olive, S. (1999). Methodological considerations in the determination of projected frontal area in cyclists. *Journal of Sports Sciences*, 17, 335–345
- 22 - González-Haro, C., Ballarini, P. A. G., Soria, M., Drobnic, F., & Escanero, J. F. (2007). Comparison of nine theoretical models for estimating the mechanical power output in cycling. *British Journal of Sports Medicine*, 41(8), 506–509. <https://doi.org/10.1136/bjism.2006.034934>
- 23 - Grappe, F., Candau, R., Belli, A., & Rouillon, J. D. (1997). Aerodynamic drag in field cycling with special reference to the Obree's position. *Ergonomics*, 40(12), 1299-1311.
- 24 - Vogt, S., Heinrich, L., Schumacher, Y. O., Blum, A., Roecker, K., Dickhuth, H. H., & Schmid, A. (2006). Power output during stage racing in professional road cycling. *Medicine and science in sports and exercise*, 38(1), 147.
- 25 - Grappe, F. (2009). *Cyclisme et optimisation de la performance: Science et méthodologie de l'entraînement*. De Boeck Supérieur. 2ème édition. Ed. De Boeck.
- 26 - Ryschon, T. W., & Stray-Gundersen, J. (1993). The effect of tyre pressure on the economy of cycling. *Ergonomics*, 36(6), 661–666. <https://doi.org/10.1080/00140139308967927>
- 27 - Bertucci, W. M., Betik, A. C., Duc, S., & Grappe, F. (2012). Gross efficiency and cycling economy are higher in the field as compared with on an Axiom stationary ergometer. *Journal of Applied Biomechanics*, 28(6), 636–644.
- 28 - Ettema, G., & Lorås, H. W. (2009). Efficiency in cycling: a review. *European Journal of Applied Physiology*, 106(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00421-009-1008-7>.

29 - Belli, A., & Hintzy, F. (2002). Influence of pedalling rate on the energy cost of cycling in humans. *European journal of applied physiology*, 88(1-2), 158-162.

30 - Saris, W. H. M., Erp-Baart, M. A. van, Brouns, F., Westerterp, K. R., & Hoor, F. ten. (1989). Study on Food Intake and Energy Expenditure During Extreme Sustained Exercise: The Tour de France. *International Journal of Sports Medicine*, 10(S 1), S26–S31. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1024951>.

31 - De Groot, G., Welbergen, E., Clusen, L., Clarus, J., Cabri, J., & Antonis, J. (1994). Power, muscular work, and external forces in cycling. *Ergonomics*, 37(1), 31-42.