1 2 9 0

UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Bernardo Rafael Gomes Gonçalves

MEDIÇÃO EXPERIMENTAL DO ARRASTO AERODINÂMICO E DA POTÊNCIA DE CICLISTAS DE COMPETIÇÃO PARA OTIMIZAÇÃO DO SEU DESEMPENHO

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica com especialidade na área de Energia e Ambiente orientada pelo Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira

Julho de 2021

1 2 9 0

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE D COIMBRA

MEDIÇÃO EXPERIMENTAL DO ARRASTO AERODINÂMICO E DA POTÊNCIA DE CICLISTAS DE COMPETIÇÃO PARA OTIMIZAÇÃO DO SEU DESEMPENHO

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

MEDIÇÃO EXPERIMENTAL DO ARRASTO AERODINÂMICO E DA POTÊNCIA DE CICLISTAS DE COMPETIÇÃO PARA OTIMIZAÇÃO DO SEU DESEMPENHO

Autor

Bernardo Rafael Gomes Gonçalves

Orientador

Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira

Júri

Presidente	**Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes** **Professor Associado da Universidade de Coimbra**
Vogais	**Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira** **Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra**
Orientador	**Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira** **Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra**

Coimbra, Julho, 2021

‘Probable impossibilities are to be preferred over improbable possibilities.'

Aristotles

Aos meus pais.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio do meu Orientador Pedro Carvalheira, que me auxiliou em todas as etapas do projeto, permitindo o desenvolvimento de um trabalho consistente a todos os níveis. Agradecer ao Professor Octávio Cardoso, por se disponibilizar para a realização de ensaios e por emprestar diferentes equipamentos para a sua avaliação. Por fim, agradecer à minha família, e em especial, à minha mãe que me deu todo o apoio, não só ao longo do decurso deste projeto, mas também de todo o apoio durante a realização do curso.

Resumo

O objetivo do projeto apresentado consistiu em desenvolver e aplicar uma metodologia para avaliação, em condições reais, do arrasto aerodinâmico e a potência produzida por ciclistas de competição. A intenção é permitir selecionar os melhores componentes da bicicleta para cada ciclista e obter a melhor posição possível em cima desta, de modo a otimizar o seu desempenho em competição. Para isso, algoritmos foram desenvolvidos para determinar o arrasto aerodinâmico e a potência produzida por ciclistas. A metodologia foi depois aplicada a ciclistas já com mais de 5 anos de treino na modalidade, em que foi realizada uma otimização com vista à melhoria do desempenho em esforços individuais (contrarrelógios). Verifica-se que não existe uma posição ótima que o ciclista deverá sempre adotar, pois esta dependerá da envolvente externa e da velocidade a que este se desloca. O uso de rodas lenticulares traseiras tem um grande impacto no arrasto aerodinâmico, com uma redução de 4.89 %, relativamente a rodas normais. A validação da metodologia foi feita avaliando diferentes posições numa bicicleta normal, sendo obtido variações de 10 a 15 % entre estas, o que está de acordo com os dados de estudos anteriores. Podemos assim garantir que a metodologia criada permite a avaliação do arrasto aerodinâmico e permite a realização de estudos para otimização da posição e do equipamento de ciclistas de alta competição.

Palavras-chave: Arrasto Aerodinâmico, Metodologia Experimental, Ciclismo de Alta Competição, Contrarrelógio Individual, Otimização da Posição de um Ciclista.

Abstract

The objective of the present work consisted in developing and applying a methodology to evaluate in real conditions the aerodynamic drag and the power produced by competitive cyclists. The intention is allowing the selection of the best bike components for each cyclist and get the most optimized position to improve performance. To do so, algorithms were developed to determine the aerodynamic drag and power of cyclists. The methodology was then applied to well-trained cyclists with more than 5 years of experience, with the focus of improving individual time trial performance. By the results, there is not an optimal position that a cyclist should always adopt, because this one will depend on the type of terrain and speed the cyclist faces. The use of back disc wheels reduces the aerodynamic drag in 4.89 %, compared to the use of normal wheels. The validation of the methodology was done, evaluating the different positions on a normal road bike. The results show a difference of 10 to 15 % between different positions, which is in line with results seen in previous studies. In that way, the methodology applied in this work allows the aerodynamic drag evaluation and the realization of studies to optimize position and equipment of competitive cyclists.

Keywords Aerodynamic Drag, Experimental Methodology, Cyclist Position Optimization, Individual Time Trial, Competitive Cycling.

Índice

ÍNDICE

Simbologia e Siglas vi
Simbologia vi
Símbolos Gregos vii
Siglas vii
1. Introdução 8
2. Revisão Bibliográfica 12
3. Testes 19
3.1. Levantamento topográfico 21
3.1.1. Procedimento 22
4. Metodologia 24
4.1. Ensaio de descida para cálculo da área efetiva de arrasto aerodinâmico 24
4.1.1. Modelação para medição da área efetiva de arrasto aerodinâmico 25
4.2. Metodologia para cálculo da potência produzida pelo ciclista em movimento 30
5. Equipamento e Posição de Controlo 31
5.1. Especificações da posição e geometria da bicicleta 32
5.2. Resultados da avaliação da posição de controlo 33
6. Otimização 36
6.1. Otimização no equipamento utilizado nos ensaios 36
6.2. Otimização da posição 39
6.2.1. Avaliação da potência 40
6.2.1. Posição ótima em função da inclinação da estrada 42
7. Resultados Após as Alterações 43
8. Validação do Método Escolhido 46
9. Avaliação da Posição de Travagem 47
10. Discussão 49
11. Conclusões 50
11.1. Área efetiva de arrasto aerodinâmico 50
11.2. Otimização da posição em termos da potência produzida 51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 53
Apêndice A: Material usado no levantamento topográfico 56
Apêndice B: Coeficiente de atrito de rolamento nas configurações usadas para os diferentes ensaios 57
Apêndice C: Equipamento de controlo e parâmetros corporais dos ciclistas 58

Apêndice D – Comparação dos resultados obtidos com os de estudos anteriores 61

Apêndice E – Otimização da posição do ciclista A para qualquer declive da estrada..... 62

Apêndice F – Equipamento, geometria da bicicleta e resultados do estudo aerodinâmico do ciclista B 63

Anexo A – Comparação do uso de câmaras em latex e de câmaras em butil (normais) 66

Anexo B– Geometria da bicicleta de contrarrelógio Giant Trinity Advanced Pro TT 68

Anexo C– Dados relativos à bicicleta de estrada usada pelo ciclista A e da bicicleta usada pelo ciclista B 69

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A_f – Área frontal do conjunto (ciclista + bicicleta);

BM – Massa corporal;

BSA – Área Superficial Corporal;

C_x – Coeficiente da componente da força aerodinâmica segundo x;

$C_{R,i}$ – Coeficiente de atrito de rolamento;

$C_{r,RF,eq}$ – Coeficiente de atrito de rolamento equivalente da roda da frente;

$C_{r,RT,eq}$ – Coeficiente de atrito de rolamento equivalente da roda de trás;

D_{RF} – Diâmetro da roda da frente;

D_{RT} – Diâmetro da roda de trás;

$E_{P,i}$ – Energia introduzida pela força de propulsão;

E_i – Energia total do sistema no ponto i;

E_{i+1} – Energia total do sistema no ponto $i+1$;

$\vec{F}_{\mathrm{TCD},i}$ – Força de arrasto do pneu ao curvar;

$\vec{F}_{Ax,i}$ – Componente da força aerodinâmica segundo x, a atuar no ponto i;

$\vec{F}_{P,i}$ – Força de propulsão;

$\vec{F}_{R,i}$ – Força de atrito de rolamento das rodas;

$\vec{F}_{b,i}$ – Força de travagem devido aos travões;

$\vec{F}_j$ – Forças não conservativas;

$\vec{F}_{\gamma,i}$ – Força radial dos pneus no plano da roda;

g – Aceleração normal da gravidade;

h_i – Altitude no ponto i;

H – Altura do ciclista;

I_{RF} – Momento de inércia da roda da frente relativamente ao seu eixo de rotação;

I_{RT} – Momento de inércia da roda de trás relativamente ao seu eixo de rotação;

L – Comprimento característico do conjunto (ciclista + bicicleta);

M_t – Massa total do sistema (ciclista + bicicleta);

p_a – Pressão atmosférica;

R_a – Constante do gás ar seco;

Re_i – Número de Reynolds do conjunto (ciclista + bicicleta) no ponto i;

R_i – Raio da curva no ponto i;

$\vec{s}_i$ – Vetor deslocamento no ponto i;

$\vec{s}_{i+1}$ – Vetor deslocamento no ponto $i+1$;

T_a – Temperatura do ar ambiente;

$T_{f,RF}$ – Momento de atrito da roda da frente;

$T_{f,RT}$ – Momento de atrito da roda de trás;

$W_{P,i}$ – Trabalho produzido pela força de propulsão;

v_i – Velocidade do ciclista no ponto i;

VO_2Max – Taxa máxima de consumo de oxigénio

Símbolos Gregos

α_i – Ângulo de inclinação longitudinal da superfície da estrada no ponto i;

β_i – Ângulo de inclinação transversal da superfície da estrada no ponto i;

ρ_a – Massa volúmica do ar;

μ_a – Viscosidade dinâmica do ar ambiente;

Siglas

dsEP – Distância do selim ao Eixo Pedaleiro

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

RF- Roda da frente

RT – Roda traseira

1. INTRODUÇÃO

Com a invenção da bicicleta no final do século XIX, cedo se percebeu, que a maior dificuldade que os ciclistas enfrentavam no quotidiano para pedalar era vencer a resistência do ar (arrasto aerodinâmico). No entanto, o foco principal durante grande parte do século XX no desenvolvimento das bicicletas consistiu na redução do peso e no aumento da rigidez à torção do quadro e da coluna de direção, no melhoramento do sistema de transmissão com a introdução de mais velocidades, no aumento da relação de transmissão e facilidade de mudar a relação de transmissão, melhoramento da eficácia e da progressividade dos travões, melhoramento da resistência ao rolamento dos pneus, melhoramento da resistência aos furos dos pneus, melhoramento da aderência em piso seco e molhado a curvar e em travagem, adoção de pedais de encaixe e ainda, ultimamente, no melhoramento do conforto e da ergonomia.

Só a partir da década de 80, é que a componente aerodinâmica começou claramente a ser estudada mais em detalhe e aprofundada, muito devido aos desenvolvimentos feitos no ciclismo de pista, e nomeadamente no efeito da área efetiva de arrasto aerodinâmico na distância máxima percorrida por um ciclista durante uma hora.

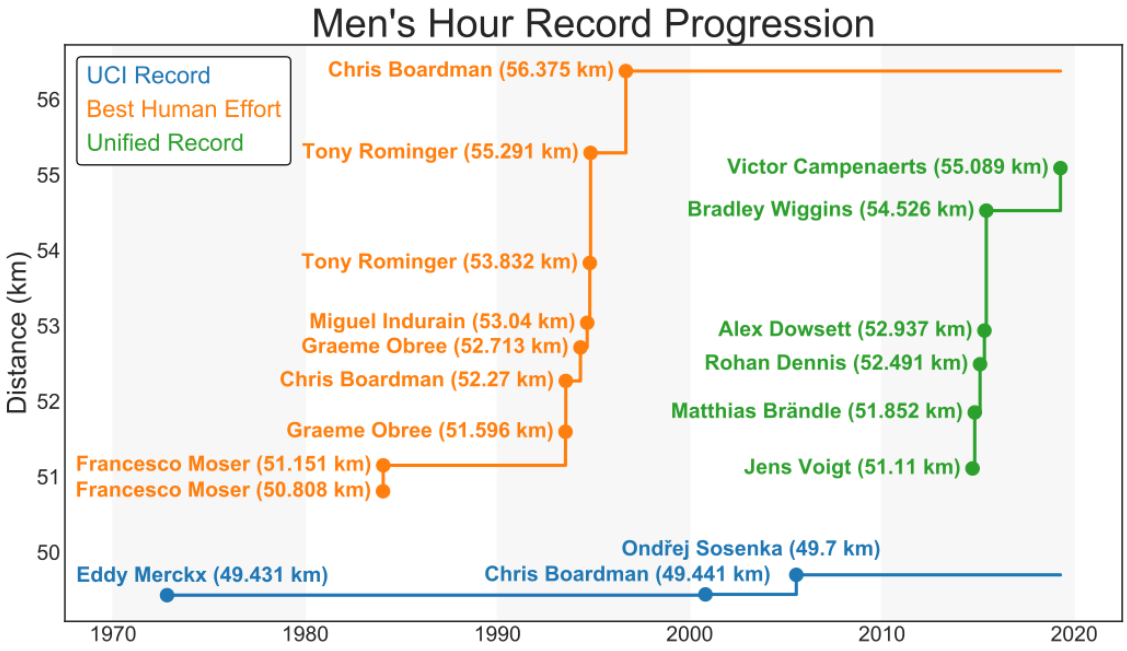


Figura 1.1: Evolução do Recorde da Hora, desde 1970.

Fonte:*https://en.wikipedia.org/wiki/Hour_record*

Basicamente, o recorde da hora consiste na tentativa de o ciclista cumprir a maior distância possível durante uma hora, num velódromo (pista oval de 250 metros). É considerado um dos esforços mais exigentes do desporto de endurance, devido ao facto de este ser feito numa bicicleta de carrete preso (ou seja, uma bicicleta com apenas uma relação de transmissão). Neste caso, 90 % da potência produzida pelo ciclista é usada para vencer a força de arrasto aerodinâmico, dos quais 70 % são devidos apenas ao corpo do ciclista. Os restantes 10 % provém da resistência de atrito de rolamento dos pneus e das perdas por atrito da transmissão, além da força de derrape em cada curva. No entanto, esta força de arrasto depende da posição em que o ciclista se coloca em cima da bicicleta. Por exemplo, Graeme Obree bateu o recorde da hora, alterando a geometria completa da bicicleta, de modo a diminuir a área frontal do ciclista, e assim, permitir ganhos instantâneos de velocidade, sem qualquer alteração na posição ou na condição física do atleta. Conforme representado na figura (1.2), Obree redesenhou o quadro da bicicleta, de modo que este permitisse controlar a bicicleta com os braços, de baixo do peito.

Figura 1.2: Graeme Obree, um dos primeiros ciclistas, a desenvolver quadros e geometrias de bicicleta completamente diferentes, para a otimização da posição, sendo esta inspirada nos atletas de desportos de inverno (*praying mantis/crouching position*). Fonte: *https://cycling-passion.com/graeme-obree-athlete-genius-short-film/*

Além da posição poder ser melhorada, a otimização do equipamento pode levar a grandes alterações no desempenho do ciclista. Moreno Moser bateu o recorde da hora em 1984, usando pela primeira vez, uma bicicleta com rodas lenticulares, que devido ao seu perfil fechado, permitem um melhor controlo do escoamento do ar, e menor dissipação de energia,

sendo assim possível atingir maiores velocidades para o mesmo esforço e para a mesma posição.

No entanto, do ponto de vista fisiológico, uma alteração da posição para uma mais aerodinâmica, leva a uma diminuição da capacidade respiratória máxima do atleta. Isto acontece, pois numa posição mais aerodinâmica, em que a redução da área frontal é otimizada, o ângulo entre o tronco e as pernas (*hip angle*) é menor. Isso provoca uma diminuição do número de músculos utilizados, e logo uma perda de capacidade de realização de trabalho, por parte do ciclista. Portanto, um balanço entre a eficiência aerodinâmica e a fisiologia do ciclista tem de ser analisado, de modo a perceber qual será o ponto ótimo para cada ciclista. Este ponto ótimo é específico para cada ciclista, pois cada indivíduo tem uma compleição física diferente.

Além de termos limitações físicas e limitações aerodinâmicas, também temos limitações regulamentares impostas pela UCI, que impõem restrições à geometria da bicicleta e às posições que os ciclistas podem adotar em cima da bicicleta, no sentido de aumentar a segurança dos ciclistas em competição, diminuindo o risco de queda. Algumas das posições que os ciclistas profissionais não podem usar em prova estão representadas nas figuras 1.3 (a) e 1.3 (b),

(a) (b)

Figura 1.3 (a) e (b): Representação das duas posições em cima da bicicleta banidas pela UCI, em competição, a partir do dia 1 de abril de 2021. A primeira posição (a) é denominada *Super Tuck* (desenvolvida por Matej Mohoric), e a segunda posição (b) é uma posição de contrarrelógio numa bicicleta de estrada normal, em que o controlo do guiador é diminuído. Fonte: https://www.cyclingnews.com/news/uci-bans-forearms-on-bars-aero-position-adds-penalties-for-littering/

Apesar de todas as otimizações possíveis relativas à posição e à bicicleta, sendo o arrasto do corpo do ciclista o fator com maior contribuição para a força de arrasto, o equipamento usado pelo ciclista torna-se fundamental, pois a rugosidade da superfície em corpos rombos (corpo em que o arrasto de forma é muito superior ao arrasto de fricção) influencia a velocidade máxima que este poderá atingir para qualquer potência produzida.

Todos estes avanços são feitos avaliando o coeficiente de arrasto aerodinâmico, que relaciona a força de arrasto criada, com as propriedades do escoamento (densidade e velocidade) e a área frontal do ciclista. Quanto menor for o coeficiente de arrasto aerodinâmico, menor será a força de arrasto criada, permitindo que o ciclista atinja velocidades mais elevadas.

Os métodos mais utilizados para a avaliação dos parâmetros aerodinâmicos incluem a utilização de instalações específicas (túneis de vento aeronáuticos); a utilização de CFD para simular o escoamento, em torno do ciclista, e assim permitir avaliar a distribuição de pressões em torno do ciclista e a influência que diferentes equipamentos e posições têm no arrasto aerodinâmico. Estes métodos estão apresentados na figura (1.4). Além isso, o uso de sensores colocados na bicicleta, como o que é apresentado na figura (1.5), permitem a avaliação em condições reais do arrasto aerodinâmico sentido pelo ciclista. No entanto, existem desvantagens, na utilização destes equipamentos. O elevado preço, a viabilidade, a fiabilidade, a dificuldade de acesso a instalações deste tipo, ou o elevado poder computacional são alguns dos fatores que limitam a empregabilidade geral. Assim, diferentes métodos têm sido desenvolvidos para tentar estimar o coeficiente de arrasto aerodinâmico de forma empírica, utilizando apenas dados de velocidade, tempo e distância percorrida.

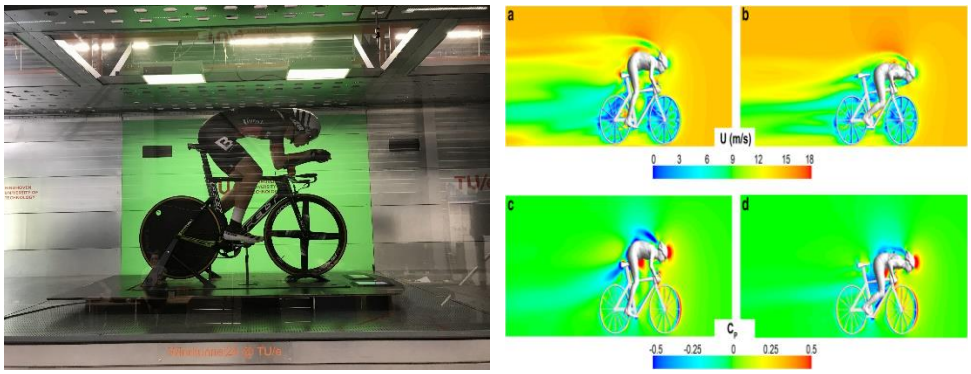


Figura 1.4: Apresentação de duas formas de avaliar e otimizar o arrasto aerodinâmico. A primeira imagem representa um estudo em túnel de vento, e a segunda representa uma simulação em CFD, para diferentes posições. Fonte*: https://www.speeco.tech/story/ ;* (Padilla *et al.*, 2016)

Figura 1.5: Uso de sensores que medem diferentes parâmetros como a velocidade, a pressão dinâmica, a pressão atmosférica, a temperatura, entre outros, para avaliar o arrasto aerodinâmico. Fonte: *https://www.bikeradar.com/news/notio-konect-provides-all-your-aero-data-without-a-wind-tunnel/*

Este projeto tem por fim, a criação de uma metodologia que permita a avaliação consistente, com baixo erro e com investimentos muito baixos, do arrasto aerodinâmico de um ciclista em condições reais, de modo a permitir a avaliação da forma como alterações no sistema bicicleta + ciclista alteram o desempenho geral deste.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apesar do atual desenvolvimento de instalações e de centros de investigação focados no desenvolvimento aerodinâmico no ciclismo, dados históricos acerca de diferentes esforços e da evolução do desempenho de ciclistas de competição ao longo do tempo são analisados através de modelos, validados a partir de dados empíricos obtidos posteriormente. Os modelos existentes consistem num conjunto de equações, que combinam parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos para tentar fazer a representação dos esforços que levaram a novos recordes da hora.

(Padilla *et al.*, 2016) fizeram uma excelente análise das características de um recorde da hora com um caso prático (Miguel Induraín, a 9 de fevereiro de 1994). Os parâmetros fisiológicos (VO_2Max e o limiar anaeróbio) são, por norma, testados em laboratório ou num pequeno circuito plano, através de um teste incremental, que permite retirar a máxima potência aeróbica (correspondente à capacidade máxima do ciclista – 575 W) e a potência no limiar anaeróbico (potência que o ciclista consegue aguentar durante 40 a 60 minutos: 505 W). De

realçar que estes parâmetros apresentados são de um atleta com uma capacidade aeróbica excecional (VO_2Max de 6,4 L/min), comparando com um individuo comum de 30 anos (3,375 L/min) (Kaminsky *et al.*, 2015), além de apresentar uma eficiência acima do comum de 26 %, comparada com ciclistas amadores de 22.5 % (Hopker *et al.*, 2010).

O arrasto aerodinâmico, normalmente, é analisado com base no coeficiente de arrasto e na análise da área frontal. Esta pode ser obtida, através da estimativa para a área superficial do ciclista, utilizando a equação de *DuBois* (Du Bois & Du Bois, 1989):

$$BSA = 0.007184 \times BM^{0.425} \times H^{0.725} \quad (1)$$

Assim, para o exemplo de (Padilla *et al.*, 2016), tendo o ciclista 81 kg e 188 cm, calcula-se a BSA que se pode comparar com a área frontal (FA), que pode ser obtida com base em valores empíricos, através de medições em túnel de vento. Esta apresentou-se como sendo 18 % da BSA e pode-se considerar constante, segundo (di Prampero *et al.*, 1979), para efeitos de cálculo. Este estudo em causa avaliou o coeficiente de arrasto (C_x), com base em testes no túnel de vento, sendo esta avaliação, a metodologia através da qual grande parte dos estudos feitos avaliam e otimizam o arrasto aerodinâmico. O valor do C_x obtido é de 0.65, que está de acordo com os estudos analisando o efeito da posição em cima da bicicleta com o coeficiente de arrasto obtido (Saint, 1997), (Blocken *et al.*, 2018) *e* (Crouch *et al.*, 2017). Como se pode esperar, este valor é muito inferior ao obtido para ciclistas com equipamento convencional e com posições convencionais (di Prampero, 1986) de 0.75 a 0.8, pelo que se pode perceber o efeito da posição no arrasto aerodinâmico. Na tabela 1, apresenta-se os dados históricos relativos ao recorde da hora, através das equações de *DuBois*, e com os valores para o coeficiente de arrasto, sendo obtidos por estimativas, ou por medição em túnel de vento.

Cyclist	Record, km/h	Date, mo/day/yr	Height, cm	Mass, kg	BSA, m^2	FA, m^2	C_d, m^2	C_x, m^2	Power, W
Merckx	49.432	10/25/72	184	72	1.940	0.3491	0.75	0.2618	380
Moser	51.151	01/21/84	182	76	1.969	0.3544	0.70	0.2481	400
Obree	52.713	04/27/94	182	71	1.912	0.3441	0.50	0.1720	359
Indurain	53.040	09/02/94	188	81	2.076	0.3755	0.65	0.2441	510
Rominger	55.291	11/05/94	175	65	1.791	0.3220	0.60	0.1932	456
Boardman	56.375	09/06/96	177	69	1.857	0.3342	0.55	0.1838	462

Tabela 1: Evolução do recorde da hora – Caracterização dos parâmetros principais, que permitiram estes feitos (Padilla *et al.*, 2016). As avaliações aerodinâmicas de Moser e Indurain resultaram de ensaios em túnel de vento, enquanto as outras medidas foram estimadas.

Podemos perceber pela tabela 1, que existem várias formas de bater o recorde da hora. O foco poderá ser no aumento da capacidade do ciclista, através do aumento da potência gerada por este durante uma hora, ou através da diminuição do coeficiente de arrasto aerodinâmico, permitindo para a mesma potência, atingir uma velocidade mais elevada. Esta diminuição do coeficiente de arrasto pode ser conseguida através da redução da área frontal (Blocken *et al.*, 2018), ou através de mover a linha de separação do escoamento no corpo. De referir, que no terreno plano, verificamos que a influência da massa do ciclista é praticamente inexistente, especialmente para um esforço contínuo como este.

Devido à importância do arrasto aerodinâmico, alguns autores apresentam valores médios para diferentes posições, que podem ser utilizados como modelo, para aplicações e otimizações futuras. (Crouch *et al.*, 2017) apresenta uma compilação dos valores da área efetiva de arrasto aerodinâmico, para diferentes posições apresentadas na Figura (2.1). Em média, os valores apresentam reduções entre 10 a 15 % entre as diferentes posições.

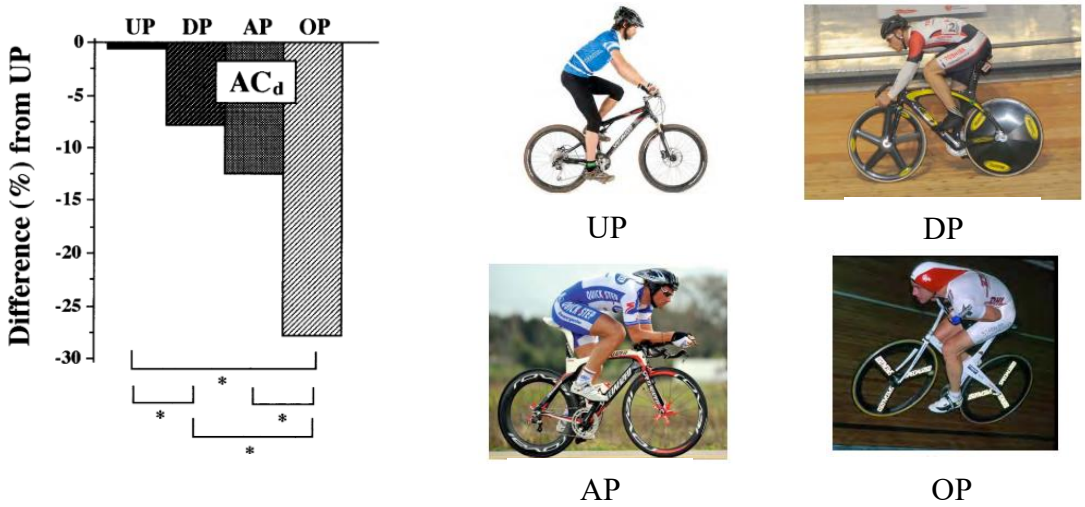


Figura 2.1: Representação do efeito que diferentes posições (UP, DP; AP; OP) têm no coeficiente de arrasto aerodinâmico. O termo de comparação é a posição (UP). Verifica-se que uma posição nos extensores de uma bicicleta de contrarrelógio diminui o coeficiente de arrasto em 15 %. Além disso, apresenta-se a vantagem da posição de Obree, relativamente à posição de contrarrelógio normal, sendo esta uma diferença de 10 %.

Apesar dos ganhos da adoção de uma posição mais aerodinâmica, o desempenho do ciclista poderá diminuir para uma posição mais agressiva, em que o tronco está numa posição

horizontal (L. Underwood *et al.*, 2011). Assim, um estudo individual deverá ser feito, de modo a perceber qual será a posição mais vantajosa para cada ciclista, pois cada individuo, devido às suas características fisiológicas, terá uma posição ótimo, para a qual o desempenho é máximo. (Hubenig *et al.*, 2011).

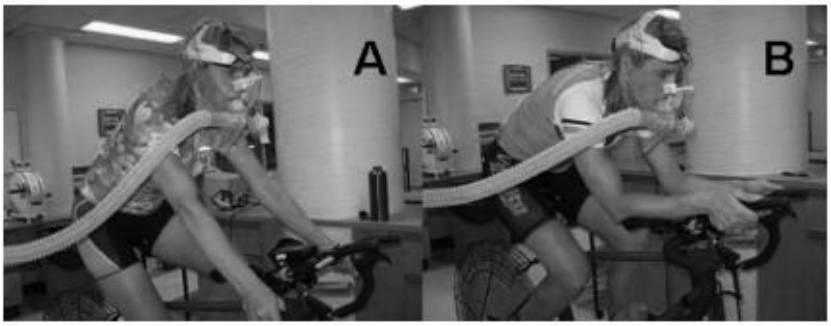


Figura 2.2: Representação dos ensaios feito por (L. Underwood *et al.*, 2011), para análise do efeito metabólico das diferentes posições que o ciclista pode adotar em cima da bicicleta

Além da avaliação em túnel de vento, o uso de CFD está cada vez mais a ser aplicado, à medida que melhorias no poder computacional ocorrem.

(Blocken, 2014) apresenta algumas das razões para usar CFD no estudo aerodinâmico do ciclismo: relativamente barato e rápido, comparado com testes de túnel de vento, permite obter informação relevante de todas as variáveis do domínio; as simulações podem ser feitas com as dimensões corretas, sem problemas de dimensionamento e permite o estudo de fenómenos em maior detalhe. Assim, (Blocken *et al.*, 2013, 2019*)* apresenta já alguns projetos que permitem explicar com maior detalhe os fenómenos aerodinâmicos que ocorrem em torno do ciclista:

A diferença de pressão entre a parte da frente e a parte de trás do ciclista, geram resistência que se opõe ao movimento deste, sendo esta avaliada em termos do coeficiente de pressão estática C_p:

$$C_p = 2\frac{p - p_0}{\rho U_\infty^2} \tag{2}$$

em que p é a pressão estática local e p_0 é a pressão de referência. As zonas, em que o coeficiente de pressão é mais elevado, localizam-se na parte da frente do capacete, braços e pernas, enquanto as zonas com um coeficiente de pressão mais baixo ocorrem, imediatamente

após as linhas de separação do escoamento (ombros, zonas laterais dos braços e das pernas, e na zona lombar). Esta zonas de separação podem ser avaliadas, em termos de coeficiente de fricção da superfície (C_F), pois mudanças neste coeficiente implicam pontos, onde o escoamento passa de laminar a turbulento, logo, permitindo avaliar a extensão destas zonas e os pontos de recuperação do escoamento. Estas duas visualizações permitem avaliar diferentes posições, e assim, determinar qual delas implicará menor arrasto aerodinâmico, e assim, melhores desempenhos.

Outra forma de avaliar a resistência ao movimento do ciclista é através de ensaios de desaceleração, em que o ciclista, numa zona de teste, entra nesta a uma dada velocidade especifica, e deixa de pedalar, e mantém a sua posição, até terminar o segmento de teste (ou atingir uma velocidade mínima) (Debraux *et al.*, 2011). Apesar de apresentar alguns constrangimentos, em termos de trânsito e condições ambientais (idealmente haver pouco ou nenhum trânsito e inexistência de vento), esta apresenta-se como uma solução barata e com resultados que qualquer ciclista pode compreender rapidamente. As condições ambientais e a localização da zona de testes têm de ser especificadas, pois parâmetros como a temperatura, a humidade e a pressão local tem um grande efeito nos resultados obtidos. A não existência de trânsito (ou de qualquer outro ciclista ou peão, em movimento) deverá ser assegurada para que os testes possam ser replicados (Blocken *et al.*, 2016).

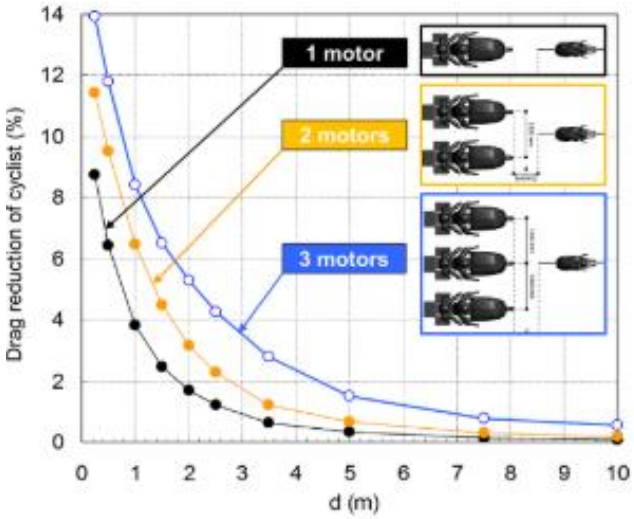


Figura 2.3: Representação dos resultados das simulações em CFD feitas por (Blocken *et al.*, 2016), na influência que veículos motorizados atrás do ciclista em competição, podem ter na redução na área efetiva de arrasto aerodinâmico do ciclista, e assim, inferir a este uma vantagem competitiva, em relação aos ciclistas que não têm o mesmo acompanhamento num esforço individual (contrarrelógio).

De acordo com a figura (2.3), verifica-se que no máximo, se os veículos estiverem imediatamente atrás dos ciclistas, estes conferem uma redução de 14 % no coeficiente de arrasto, permitindo ao ciclista atingir maiores velocidades para o mesmo esforço.

A existência de um carro, na esteira do atleta em avaliação irá também diminuir a área efetiva de arrasto aerodinâmico do atleta, e permitir que este desacelere mais lentamente. Isto ocorre, pois, sendo o sistema ciclista + bicicleta considerado um corpo rombo, a esteira do ciclista é de grande dimensão, sendo que imediatamente a jusante do corpo, existe uma zona de baixa pressão, criando uma força de "sucção" que se opõe ao movimento do ciclista. Esta zona de baixa pressão permite a qualquer outro ciclista seguir à mesma velocidade que o da frente, mas produzindo muito menos trabalho. Mas a presença deste ciclista atrás, irá ocupar parte da região da esteira do ciclista, reduzindo a zona de baixa pressão, reduzindo o arrasto aerodinâmico do ciclista da frente em 3 %.

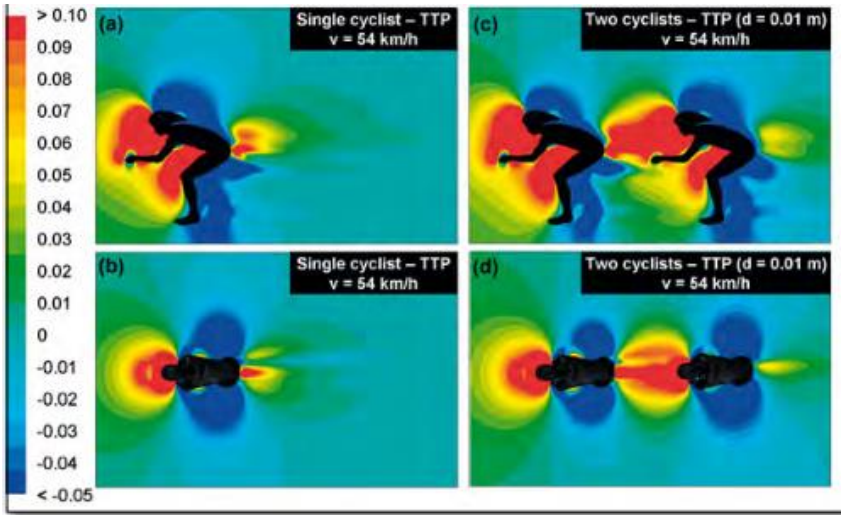


Figura 2.4: Representação dos resultados das simulações em CFD feitas por (Blocken *et al.*, 2013), reproduzindo uma redução do coeficiente de arrasto aerodinâmico do ciclista da frente, devido à presença do ciclista atrás deste.

Além da avaliação da influência da posição do ciclista na bicicleta, visto que o corpo do ciclista representa 70 % do arrasto aerodinâmico total (Pogni & Petrone, 2016), a otimização aerodinâmica do equipamento é fundamental para melhorar o desempenho do ciclista.

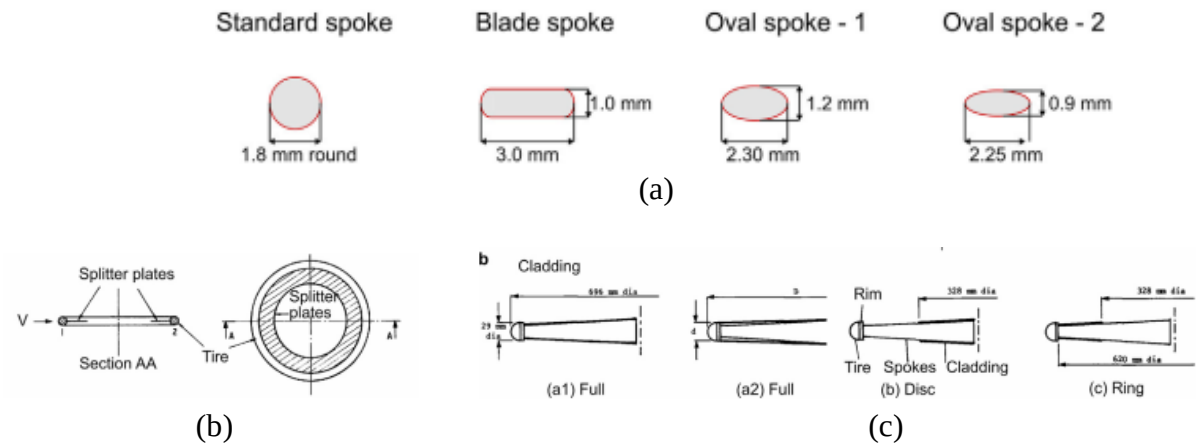


Figura 2.5: Diferentes componentes das rodas que podem ser otimizados: forma dos raios das rodas (a), perfil da roda (b) e largura do pneu (c) (Pogni & Petrone, 2016).

(Barry *et al.*, 2012) analisaram como diferentes tipos de rodas têm desempenhos diferentes no arrasto do ciclista, sendo que, para direções de vento e rodas diferentes devem ser selecionadas para não só otimizar o desempenho, mas também do ponto de vista de segurança, uma vez que os ventos cruzados podem aumentar consideravelmente as forças laterais. diminuindo a estabilidade da bicicleta, especialmente se for instalada uma roda lenticular dianteira.

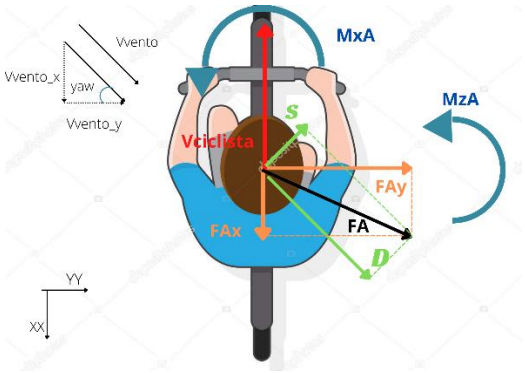


Figura 2.6: Representação de diagrama de forças que atuam na bicicleta e no ciclista

Além das rodas, outro componente que leva a grandes melhorias no desempenho é a utilização de um fato integral. (B. L. Underwood, 2012). (Hong, 2021) avaliou o efeito dos tipos de tecidos que devem ser usados para otimizar o desempenho do ciclista, em certas zonas do corpo. Com o uso de tecidos específicos (nomeadamente nos braços do ciclista) é possível reduzir o coeficiente de arrasto do corpo de 4 a 8 %, de acordo com a figura (2.7). Além disso, alguns tecidos apresentam um comportamento diferente a velocidades diferentes, sendo fundamental perceber as velocidades a que ciclista compete, para que estes tenham um efeito benéfico no arrasto total.

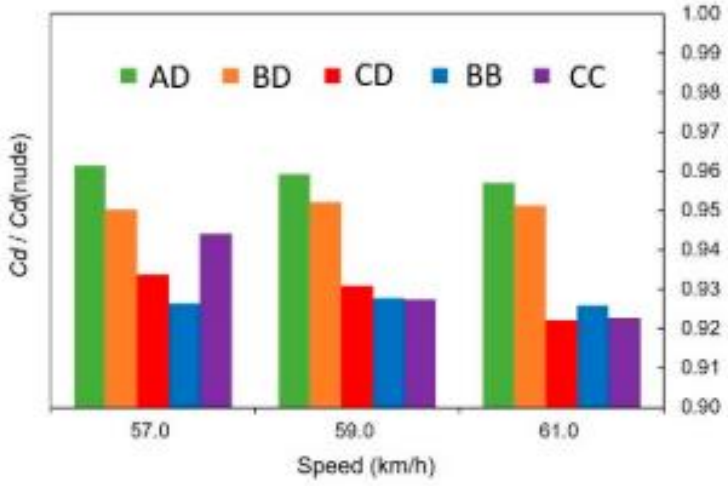


Figura 2.7: Efeito de diferentes tecidos de roupa ciclistas na área efetiva de arrasto aerodinâmico. O valor 1.00 no eixo vertical representa o valor da área efetiva de arrasto aerodinâmico do manequim despido. Os fatos AD, BD e CD tem os braços com os tecidos A, B e C respetivamente, e os antebraços com o tecido D. Os fatos BB e CC têm tecido B e C, respetivamente, listrados em toda a extensão dos membros posteriores (Hong, 2021).

3. TESTES

O primeiro passo na criação da metodologia foi a escolha de um local, em que a avaliação do arrasto aerodinâmico fosse possível. As condições ambientais têm uma grande influência nas velocidades que um ciclista consegue atingir, e podem afetar as medições do arrasto aerodinâmico, se estas não forem medidas com precisão suficiente (mesmo sabendo as condições ambientais com uma estação meteorológica, o vento irá alterar as distribuições de pressão em torno do ciclista, e assim afetar os resultados). Além disso, o efeito dos ventos laterais no ciclista, dependendo da direção relativa entre o vento e o movimento do ciclista, poderão criar efeitos positivos na velocidade atingida pelo ciclista, de acordo com (Barry *et al.,*

2012). Assim, o objetivo era encontrar uma estrada com uma inclinação relativamente elevada, com um asfalto liso e sem curvas, que estivesse relativamente protegida da ação do vento. A estrada escolhida foi a Avenida Elísio Moura, na cidade de Coimbra, pois esta tem a particularidade de estar situada junto a um conjunto de edifícios a oeste, conforme a figura (3.1). Assim, o efeito do vento é claramente minimizado, se no dia de testes em questão, a direção do vento estiver de oeste para este, pois estes edifícios funcionam como pára-vento, garantindo na zona de teste, uma velocidade do vento praticamente nula. Além disso, apresenta um pavimento de elevada qualidade, e não contém qualquer curva em toda a sua extensão.

Figura 3.1: Avenida Elísio Moura. Fonte: *https://mapio.net/s/31276441/*

Como se vê na figura (3.1), a existência de edifícios ao longo da avenida, permite que este local tenha as condições ambientais para a realização de testes aerodinâmicos.

Uma vez selecionado o local para a realização de testes, na figura 3.2 (a) e (b), estão representados os locais de início e de término da zona de testes. Assim, a extensão total da zona de testes é de 510 metros. Estes pontos foram selecionados, pela facilidade de visualização destes pontos na via pública, o que permite retirar os dados da velocidade do ciclista com maior facilidade, assim garantindo maior precisão nos resultados; e também por questões de segurança, pois o ciclista tem assim tempo para travar, após a zona de teste, antes de chegar à interseção de duas vias. A altitude dos pontos iniciais e finais foram retiradas do *Google Earth Pro*, sendo a altitude do ponto inicial de 121 metros, e a altitude do ponto final de 80.3 metros.

a) **b)**

Figura 3.2: Início (a) e término da zona de testes (b). O início da zona de testes é imediatamente antes da passadeira, na linha branca transversal à via de circulação. O fim da zona de teste, é no fim da zona de estacionamento, em que a lancil do passeio faz um ângulo agudo com a via pública. Fonte*: https://www.google.be/maps*

A zona de testes foi dividida em diferentes segmentos, para a comparação dos resultados obtidos pela metodologia da simulação criada e pelos dados medidos experimentalmente nos diferentes ensaios realizados. A 430 metros do início da zona de teste está localizada uma ponte pedonal, o que permite que seja facilmente referenciável e maior consistência nas medições de velocidade realizadas.

3.1. Levantamento topográfico

Para fazer a representação correta do perfil da zona de teste, foi feito um levantamento topográfico, avaliando a altimetria da zona de teste, que permite a representação da distância vertical dos pontos a uma superfície de referência.

Visto a importância da avaliação da variação do declive da via pública na velocidade atingida pelo ciclista em descida, foi adotado um método de nivelamento hidrostático baseado no princípio dos vasos comunicantes, que consiste na avaliação da diferença de cotas entre 2 extremidades de um tubo preenchido com água (neste caso, vinho, pois a adição de álcool permite diminuir a tensão superficial e aumentar a viscosidade do fluido e a tonalidade do vinho permite a visualização mais precisa do nível). A menor tensão superficial do líquido permite reduzir a altura do menisco no tubo onde se encontra o líquido e deste modo diminuir o erro das medições. O aumento da viscosidade do líquido aumenta o amortecimento do movimento

oscilatório do líquido no tubo ao mudar de pontos de medição e deste modo permite reduzir o tempo para realizar uma medição. O material usado está apresentado na tabela A.1.

3.1.1. Procedimento

O levantamento topográfico consistiu na marcação de pontos auxiliares a cada 10 metros, com recurso ao spray branco, fita métrica e à lâmina de estore (que serviu para fazer uma medição reta em relação ao bordo da estrada). Foi criada uma tabela de registo de valores de altura manométrica com 53 pontos e 52 diferenças de cota e a sua medição foi realizada entre cada par de pontos auxiliares adjacentes marcados. Em cada medição, utilizou-se o tubo de 12 metros, as réguas e o fluido da experiência. Devido à inércia e viscosidade do fluido e um tubo de diâmetro interno de 9 mm, cada medição foi feita após 10 a 20 segundos da colocação dos tubos, para garantir que o fluido se encontre em equilíbrio estático. Para cada ponto, 3 medições foram feitas.

No final, foi realizado o tratamento dos dados e obtenção da inclinação da estrada a_i, específica para cada segmento, assim como a obtenção dos ângulos de inclinação α_j, para cálculo de cada uma das componentes das forças associadas ao movimento do ciclista, através do conjunto de equações de (3) a (6). A representação altimétrica está representada na figura (3.3).

$$h_i\ (\mathrm{mm}) = y_{i+1} - y_i\ , i = 1, \dots\ , 53 \tag{3}$$

$$Y_i\ = \frac{h_i}{1000}, i = 1, \dots\ , 53 \tag{4}$$

$$H_{j+1}\ (\mathrm{m}) = H_j - Y_j\ , j = 1, \dots\ , 510 \tag{5}$$

$$\alpha_j\ (°) = \mathrm{sen}^{-1}\left(H_{j+1} - H_j\right), i = 1, \dots\ , 510 \tag{6}$$

h_i representa o cálculo da diferença de altura manométrica efetuada para cada segmento da zona de teste, sendo y_i, a altura manométrica no ponto i, Y_i é variação da altitude por unidade de distância percorrida (em metros); H_j representa a altitude no ponto j (altitude em cada metro da zona de teste) e α_j representa o ângulo com a horizontal em cada segmento da estrada delimitado por dois pontos de medição adjacentes, que neste caso é constante a cada 5 ou cada

10 metros consoante a distância entre dois pontos de medição adjacentes. A divisão da zona de teste em segmentos de 5 ou 10 metros deve-se ao facto de na parte inicial da descida, existir um declive bastante acentuado, pelo que a medição da diferença de altura manométrica nos pontos iniciais de medição se tornaria impossível ou mais difícil, pois a altura manométrica nas réguas de medição estaria fora da escala de medição com as réguas de medição de 1200 mm e 800 mm utilizadas.

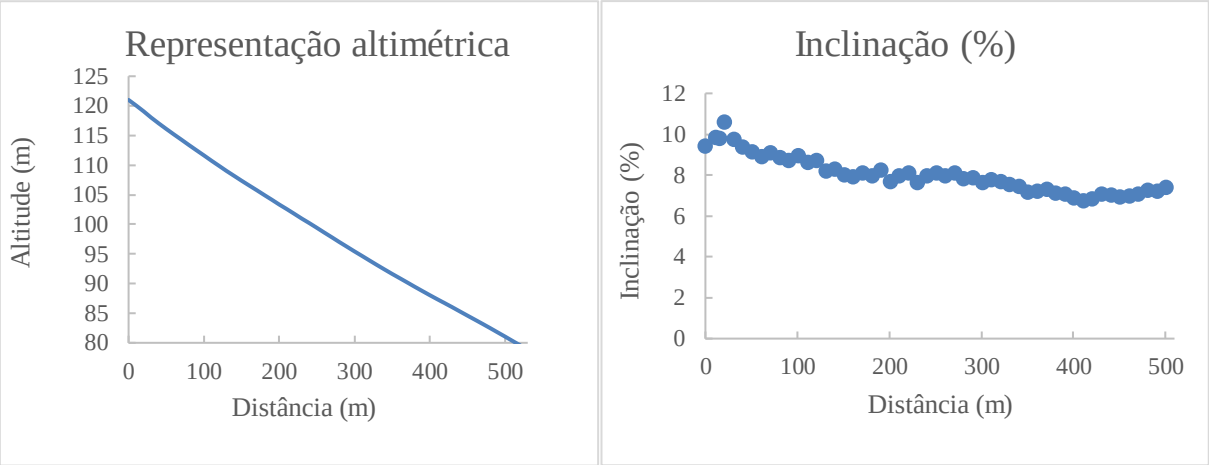


Figura 3.3: Levantamento topográfico da avenida Elísio Moura

A inclinação da estrada normalmente é dada em termos percentuais, ou seja, sendo a diferença de altitude a cada 100 metros de distância percorrida, que pode ser calculada pela Eq. (7).

$$a_i\ (\%) = Y_i \times 100 \tag{7}$$

Por fim, podemos calcular a inclinação média da avenida, que é dada pela média das inclinações de cada segmento da zona de teste, expressa pela Eq. (8).

$$\bar{a}\ (\%) = \frac{\sum_{i=1}^{n} a_i}{n} \tag{8}$$

Em que n representa o número de segmentos na zona de teste. Assim, a inclinação média é de 8,015 %.

4. METODOLOGIA

4.1. Ensaio de descida para cálculo da área efetiva de arrasto aerodinâmico

Para o cálculo da área efetiva de arrasto aerodinâmico, o método usado para calcular a área efetiva de arrasto aerodinâmico consiste num teste, em que o ciclista, equipado com sensores de velocidade e um dispositivo GPS, para receção dos dados da velocidade e armazenamento dos mesmos, inicia a descida da Avenida Elísio Moura (zona de teste), a uma dada velocidade e numa dada posição, que permanece fixa, ao longo da descida. Assim, que estão reunidas as condições para a realização de um ensaio, o ciclista ganha alguma velocidade na rotunda, que existe antes da entrada na zona de teste. A velocidade inicial não é tão importante, uma vez que o importante é garantir que o ciclista entra na zona de teste, já numa direção paralela à via pública, para que a distância percorrida por este seja a mais próxima possível de uma linha reta.

As condições para que a realização de um teste seja possível são a inexistência de vento na direção do sentido do movimento do ciclista (preferencialmente os testes foram realizados em dias soalheiros, com vento fraco, e com direção perpendicular à via – de preferência, de Este para Oeste, uma vez que desta forma, os edifícios funcionam uma pára-vento, e na zona de teste, a velocidade do vento é praticamente desprezável); a inexistência de trânsito (como foi demonstrado por outros autores, o efeito de outros objetos em movimento afeta o escoamento em torno do ciclista, logo os resultados teriam erro, se este ponto não fosse considerado). Assim, os dias para a realização dos testes foram escolhidos, através da verificação de aplicações meteorológicas (*Ventusky*), que fornecem previsões em especial da direção do vento, assim como da temperatura, humidade e outros parâmetros meteorológicos relevantes. Para resolver o problema do trânsito, grande parte dos ensaios foram realizados, ou pela manhã ou no fim do dia, em horários, nos quais grande parte da população não está em movimento na via pública. Este ponto é importante, pois estando numa cidade como Coimbra, a realização dos testes noutros horários iria ter erros, devido à circulação de carros, nas vias públicas adjacentes. Assim, desta forma, também resolvemos o problema da obtenção de uma atmosfera imóvel, sem qualquer turbulência, para a realização dos ensaios.

O algoritmo aplicado para a simulação é baseado num método energético integral, aplicado por (Carvalheira, 2004), para avaliação do desempenho e comportamento de um veículo de muito baixo consumo de combustível na *18th Shell Eco Marathon*. Tem em conta a energia cinética e a energia potencial gravítica do sistema bicicleta + ciclista, o trabalho das forças dissipativas do atrito de rolamento das rodas e de arrasto aerodinâmico.

O algoritmo tem em conta a influência das condições ambientais tais como a temperatura, a pressão, humidade relativa e a viscosidade dinâmica do ar. Foi considerado que a superfície da estrada tem declive transversal nulo (ou seja, inclinação da via pública do centro para a periferia considerou-se desprezável).

Após a caracterização dos parâmetros corporais do ciclista e das condições ambientais no dia de teste, a massa volúmica do ar húmico tem de ser ajustada para estas condições por um método iterativo. O estudo da área efetiva de arrasto aerodinâmico consiste em registar as velocidades de entrada e de saída da zona de teste, bem como em diferentes pontos ao longo da descida, de modo a ajustar os valores de velocidade calculados aos valores experimentais obtidos. Esta modelação faz-se, alterando a área efetiva de arrasto aerodinâmico, para que as velocidades experimentais e modeladas sejam as mesmas.

4.1.1. Modelação para medição da área efetiva de arrasto aerodinâmico

Quando o ciclista se desloca do ponto *i* para o ponto *i*+1 da zona de teste, existe uma alteração na energia total do sistema que é igual ao trabalho das forças não conservativas, expressado na Eq. (9):

$$E_{i+1} - E_i = \sum_{j=1}^{n} \vec{F}_j \times (\vec{s}_{i+1} - \vec{s}_j) \tag{9}$$

Sendo que a energia total do ciclista resulta da soma da energia cinética de translação do veículo, a energia potencial gravítica do veículo e a energia cinética de rotação das rodas.

$$E_i = M_t g h_i + \frac{1}{2} M_t v_i^2 + \frac{1}{2}\left(I_{RF}\frac{4}{D_{RF}^2} + I_{RT}\frac{4}{D_{RT}^2}\right) v_i^2 \tag{10}$$

O momento de inércia das rodas I_R foi obtido experimentalmente, aplicando o Teorema de Steiner para cada um dos seus componentes. Os componentes considerados foram o pneu; a câmara de ar; os raios, as cabeças de raio, o magneto para o sensor de velocidade; a tampa do pipo da roda; o cubo da roda e a cassete. Para cada componente, foi aplicada a Eq. (11).

$$I_R = \sum_{k=1}^{n} I_{xx,CM,k} + m_{R,k} d_{R,k}^2 \tag{11}$$

Sendo $I_{xx,CM,k}$ o momento de inércia do elemento, em relação ao seu centro de massa, $m_{R,k}$, a massa do elemento da roda R e $d_{R,k}$, a distância do centro de massa do elemento ao eixo de rotação da roda R. Os únicos elementos com um centro de massa desviado foram os raios das rodas.

Os momentos de inércia de cada elemento, em torno do centro de massa estão apresentados na tabela 2, sendo h_{pneu}, a altura do pneu.

Componente	Equação
Pneu	$\frac{2}{3} m_i r_i^2 + \frac{1}{3} m_i (\frac{0.622+2\times h_{pneu}}{2})^2$ (12.1)
Câmara de ar, aro, tampa do pipo, cabeça de raio, cubo	$m_i r_i^2$ (12.2)
Raios	$I_{xx,i} + m_i d_{R,i}^2$ (12.3)

Tabela 2: Equações usadas para calcular o momento de inércia total da roda.

As forças não conservativas consideradas na Eq. (9) são a força de atrito de rolamento, a componente da força aerodinâmica a atuar paralelamente ao eixo longitudinal do ciclista. Todas estas forças são paralelas ao deslocamento do veículo quando este está em movimento. A força de atrito de rolamento tem sentido contrário ao movimento (produzem trabalho negativo). A força aerodinâmica normalmente tem sentido contrário negativo, podendo haver situações, em que esta tem produz trabalho positivo, nomeadamente quando a direção e o sentido do vento coincidem com a do ciclista em movimento. O módulo da força de atrito de rolamento no ponto i é dado pela Eq. (13):

$$\left|\vec{F}_{R,i}\right| = C_{r,i} M_t \, g \cos \alpha_i \tag{13}$$

O coeficiente de atrito de rolamento das rodas ($C_{r,i}$), assumido independente da velocidade do veículo foi calculado a partir de dados experimentais, obtidos para diferentes pneus *Continental Grand Prix 5000*, usados para a realização dos ensaios. Como base nos dados experimentais retirados de *https://www.bicyclerollingresistance.com/specials/grand-prix-5000-comparison* para diferentes pressões, foi possível aproximar o coeficiente de rolamento de cada pneu, com diferentes polinómios do 2º grau, para cada cenário, estando a sua variação com a pressão, em Psi, representada na Figura (4.1). A curva de aproximação genérica para o

coeficiente de rolamento de cada roda é dada pela Eq. (14). Foram usados nos ensaios dois tipos de pneus (GP 4000 e GP 5000), com dois larguras diferentes (23 mm ou 25 mm) e dois tipos de câmaras de ar (em latex ou em borracha de butil).

$$C_{r,i} = a_2 p_{pneu}^2 + a_1 p_{pneu} + a_0 \tag{14}$$

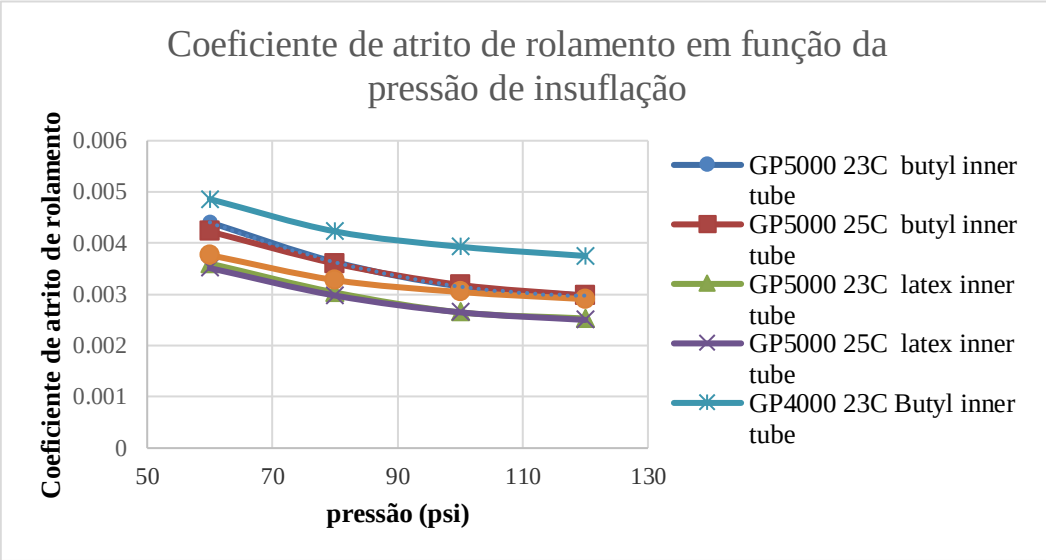


Figura 4.1: Representação da relação entre o coeficiente de atrito de rolamento dos diferentes pneus e a pressão de insuflação do pneu

Tendo os coeficientes de atrito para cada roda, podemos obter o coeficiente de atrito para o sistema bicicleta + ciclista pela Eq. (15).

$$C_{r,i} = f_{RF} \times a_{RF}\, {p_{RF}}^{b_{RF}} + (1 - f_{RF}) \times a_{RT}\ {p_{RT}}^{b_{RT}} \tag{15}$$

A pressão é dada em psi (1 psi = 6895 Pa). (Heine, 2006) referem que, devido à posição assumida na bicicleta, ocorre uma distribuição assimétrica do peso do ciclista, sendo que a fração de peso na roda da frente pode variar com o ciclista e a posição assumida por este na bicicleta. f_{RF} é a fração de peso na roda da frente do conjunto (ciclista + bicicleta). Os coeficientes a_{RF} e b_{RF} são os coeficientes para o cálculo do coeficiente de rolamento do pneu da roda da frente em função da pressão de insuflação da roda da frente e a_{RT} e b_{RT} são os coeficientes para o cálculo do coeficiente de rolamento do pneu da roda de trás em função da

pressão de insuflação da roda de trás. Os valores de coeficiente de rolamento obtidos estão apresentados no apêndice B para algumas das combinações mais usadas nos testes realizados.

O módulo da componente paralela ao eixo longitudinal do veículo da força aerodinâmica a atuar no veículo no ponto i, $\vec{F}_{Ax,i}$, é dada pela Eq. (16), onde a ação do vento é apenas considerada na direção do sentido do movimento, sendo positiva quando o vento está de frente e negativa quando este está de cauda. O vento na direção perpendicular é considerado desprezável, não tendo qualquer efeito no movimento do ciclista no ensaio em questão.

$$\left|\vec{F}_{Ax,i}\right| = C_x A_f \frac{1}{2} \rho_a (v_i + v_{\text{vento,paralelo,i}})^2 \tag{16}$$

O módulo da força, devido ao peso do sistema ciclista + bicicleta nos pneus no plano da roda, $\vec{F}_{Pt,i}$, é dado pela Eq. (17), onde α_i é a inclinação da superfície da pista no ponto i. A inclinação da estrada foi medida experimentalmente, através do levantamento topográfico da zona de teste.

$$\left|\vec{F}_{Pt,i}\right| = M_t g \text{ sen } \alpha_i \tag{17}$$

Tendo em conta as expressões anteriores para todas as forças que realizam trabalho, durante o movimento do ciclista, a Eq. (8) pode ser escrita como a Eq. (18).

$$E_{i+1} - E_i = (\vec{F}_{Pt,i} - \vec{F}_{R,i} - \vec{F}_{Ax,i})\,(\vec{s}_{i+1} - \vec{s}_j) \tag{18}$$

Assim, a energia total despendida durante um dado percurso é dada pela soma de todas as forças dissipativas e é dada pela Eq. (19).

$$E_{dispendida} = \sum_{i=1}^{n} (F_{R,i} + F_{Ax,i})\,(s_{i+1} - s_j) \tag{19}$$

Na Eq. (16), a massa volúmica do ar é calculada assumindo o ar como húmido e de acordo com a equação dos gases perfeitos, Eq. (20).

$$\rho_a = \frac{p_a}{R_a T_a} \tag{20}$$

A pressão atmosférica p_a, usada na Eq. (20) é calculada considerando a altitude média da zona de teste (h_{teste} = 99.48 m) e a pressão ao nível do mar (p_0) pela Eq. (21).

$$p_a = p_0 + \rho_a g h_{\text{teste}} \tag{21}$$

A aceleração gravítica foi obtida, segundo a norma WGS-84, que tem em conta a latitude local ϕ e a altitude média da zona de teste h_{teste} pela Eq. (22).

$$g_{\phi} = 9.780327 \left(\frac{1 + A\,\mathrm{sen}^2\phi}{\sqrt{1 - B\,\mathrm{sen}^2\phi}}\right)\left(\frac{C}{C + h_{\mathrm{teste}}}\right)^2 \tag{22}$$

Sendo $A, B\ e\ C$, 0.00193185138639, 0.00669437999013 e 6378100 respetivamente

A massa molar de ar seco $M_{ar,seco}$ é obtida admitindo que este é constituído por oxigénio (O_2), azoto (N_2), árgon (Ar) e dióxido de carbono (CO_2), com frações molares χ_i de 0.2095, 0.7809, 0.0093 e 0.0003 respetivamente, Eq. (23).

$$M_{\mathrm{ar,seco}} = \chi_{\mathrm{O_2}} M_{\mathrm{O_2}} + \chi_{\mathrm{N_2}} M_{\mathrm{N_2}} + \chi_{\mathrm{Ar}} M_{\mathrm{Ar}} + \chi_{\mathrm{CO_2}} M_{\mathrm{CO_2}} \tag{23}$$

A pressão de vapor saturado $p_{\mathrm{vap.sat.}}$ é calculada pela equação de *Clausius-Clapeyron*, Eq. (24), sendo ΔH_{vap} o calor latente de vaporização da água a 25 ºC (298.15 K), que é 2442300 J/kg.

$$p_{\mathrm{vap.sat.}} = 3169\ \mathrm{Pa} \times \exp\left[\frac{\Delta H_{\mathrm{vap}} \times M_{\mathrm{H_2O}}}{R_u}\left(\frac{1}{298.15} - \frac{1}{(273.15 + T_{amb})}\right)\right] \tag{24}$$

A pressão de vapor p_{vap} na zona de teste é calculada pela Eq. (25), onde *RH* é a humidade relativa do ar ambiente.

$$p_{\mathrm{vap}} = p_{\mathrm{vap.sat}} \times RH \tag{25}$$

A massa molar do ar húmido no dia de teste é dada, considerando que a pressão total é a soma da pressão de vapor de água e da pressão de ar seco, pela Eq. (26).

$$M_{\mathrm{ar,humido}} = \left(1 - \frac{p_{\mathrm{vap}}}{p_a}\right) M_{\mathrm{ar,seco}} + \left(\frac{p_{\mathrm{vap}}}{p_a}\right) M_{\mathrm{H_2O}} \tag{26}$$

A viscosidade dinâmica do ar, em Pa.s, é calculada usando a Eq. (27), que é um polinómio obtido a partir do ajustamento pelo método dos mínimos quadrados das viscosidade dinâmica para ar à pressão de 1 atm, publicadas na tabela (A.4) de (Incropera F.P., 1996) e no intervalo de temperaturas [250 K, 350 K], ou seja [-23,15 ºC, 76,85 ºC], onde T_a é a temperatura do ar em ºC.

$$\mu_a = 1{,}711 \times 10^{-5} + 4{,}860 \times 10^{-8}(T_a - 273{,}15) \tag{27}$$

Na Eq. (16), C_x é função do número de Reynolds de um fluxo em redor de um veículo, de acordo com a Eq. (28). c_x e *b* usados na Eq. (28) são determinados experimentalmente para um intervalo do número de Reynolds [4.0×10^5, 1.0×10^6]. Neste trabalho, foi considerado que a constante *b* tem valor 0.

$$C_x = c_x Re_i^b \tag{28}$$

O número de Reynolds de um escoamento em torno de um objeto, usado na Eq. (28), é dado pela Eq. (29), onde L é o comprimento da bicicleta.

$$Re_i = \frac{\rho_a L v_i}{\mu_a} \tag{29}$$

4.2. Metodologia para cálculo da potência produzida pelo ciclista em movimento

Obtida a área efetiva de arrasto aerodinâmico, através da metodologia apresentada na Secção 4.1.1, pode-se avaliar o trabalho produzido pelo ciclista para percorrer qualquer percurso, em cada uma das posições testadas. Para isso, pode-se recorrer a métodos diretos (potenciómetros situados em diferentes pontos da bicicleta), sendo que estes avaliam o trabalho produzido diretamente pelo ciclista; ou usar-se métodos indiretos, que a partir da parametrização de todas as variáveis que afetam o deslocamento do ciclista, permitem obter um valor para o trabalho exterior produzido pelo sistema (bicicleta + ciclista) para vencer as forças dissipativas. É mencionado "trabalho exterior", uma vez que perdas internas na transferência de potência dos pedais para a roda (perdas de transmissão) irão diminuir o trabalho efetivo que o ciclista utiliza para o movimento. As principais perdas de transmissão estão associadas à lubrificação incorreta da corrente (geração de atrito entre as correntes e os dentes da transmissão, que diminuem a eficácia de transferência de movimento), ao uso de uma relação de transmissão incorreta (carreto traseiro demasiado pequeno – elevada deformação da corrente, que leva a perdas); ao desalinhamento da corrente, devido à elevada variedade de relações de transmissão que podem ser utilizadas pelo ciclista em andamento; ao desgaste da corrente (o contacto entre a corrente e o pinhão não é perfeito, o que leva a perdas, e a um maior desgaste também do pinhão); e por fim, devido à qualidade e falta de manutenção dos rolamentos usados para a transmissão.

Tendo em consideração as perdas apresentadas, assume-se um rendimento de transmissão, η_{tr}, nesta metodologia de 97.0 %.

O algoritmo apresentado consiste numa análise energética integral do sistema bicicleta + ciclista, tal como o anterior, sendo que neste caso, a única adição feita ao algoritmo é a introdução do trabalho realizado pelo ciclista. Neste método, existe conservação da energia

mecânica, ou seja, o trabalho produzido pelo ciclista é igual à variação de energia mecânica entre o ponto *i* e o ponto *i*+1. Ao contrário do que acontece em descida, o peso, dependendo da estrada selecionada para teste, irá realizar trabalho negativo (a componente paralela à direção do movimento tem sentido contrário ao movimento).

O método consiste em medir o tempo que o ciclista demora a percorrer um determinado percurso, considerando que a sua posição (ou seja, a área efetiva de arrasto aerodinâmico), o seu peso (sendo este a média entre o peso inicials e final) e as condições ambientais se mantêm constantes durante esse esforço.

Assim, para calcular a potência, inicialmente, faz-se o balanço energético do sistema bicicleta + ciclista do ponto *i* para o ponto *i*+1, e o trabalho que o ciclista tem de produzir para se deslocar do ponto *i* para o ponto *i*+1 é dada pela Eq. (30):

$$W_{ciclista} = -(E_{i+1} - E_i) = \frac{(-\vec{F}_{Pt,i} - \vec{F}_{R,i} - \vec{F}_{Ax,i})\,(\vec{s}_{i+1} - \vec{s}_j)}{\eta_{tr}} \tag{30}$$

A potência média que o ciclista tem de produzir para passar do ponto i para o ponto i+1 é dada pela Eq. (31).

$$\dot{W}_{ciclista} = \frac{W_{ciclista}}{\Delta t} = \frac{\left(\vec{F}_{Pt,i}\right)\frac{(\vec{h}_{i+1} - \vec{h}_j)}{\Delta t} + \overrightarrow{(F_{R,i}} + \vec{F}_{Ax,i})\,(\vec{v})}{\eta_{tr}} \tag{31}$$

Sendo que $\vec{h}_{i+1} - \vec{h}_j$ representa a diferença de quotas entre o ponto *i* e o ponto *i*+1, Δt é o tempo total que o ciclista demorou para passar do ponto *i* para o ponto *i*+1, considerando um rendimento da transmissão η_{tr}.

5. EQUIPAMENTO E POSIÇÃO DE CONTROLO

Para a validação do modelo, foram realizadas um conjunto de medições para 2 ciclistas na zona de teste para diferentes posições, com o objetivo de averiguar a exatidão da metodologia apresentada, assim como criar um ponto de partida para o qual otimizações foram realizadas, com vista à redução do coeficiente de arrasto. As condições ambientais foram escolhidas de tal modo que a velocidade do vento na direção paralela ao movimento do ciclista não exceda 0.2 km/h. Além disso, outro critério para a validação de um ensaio consistiu em comparar a evolução teórica e a evolução medida da velocidade entre 2 pontos da zona de teste. Esta avaliação permite verificar se existiram incoerências na realização de cada ensaio. No presente

trabalho, está apresentada a metodologia aplicada ao ciclista A, estando os resultados da avaliação e otimização do ciclista B no apêndice F.

Visto que a área efetiva de arrasto aerodinâmico é um fator decisivo no ciclismo, especialmente em esforços de contrarrelógio, as medições que foram feitas incidiram no sentido de otimizar o desempenho do ciclista nesta disciplina do ciclismo de estrada.

5.1. Especificações da posição e geometria da bicicleta

De modo a caracterizar a posição do ciclista na bicicleta, foi realizado um conjunto de medições na geometria do quadro da bicicleta, com o objetivo de permitir a replicação dos resultados, e conseguir avaliar melhor o impacto de diferentes alterações na configuração da bicicleta no arrasto aerodinâmico. As medições relativas à geometria da bicicleta estão representadas nas figuras (5.1) e (5.2). Toda a informação relativa ao equipamento usado pelo ciclista A encontra-se no apêndice C.

Figura 5.1: Avaliação da geometria de diferentes partes da bicicleta do ciclista A.

Figura 5.2: Avaliação da geometria de diferentes partes da bicicleta do ciclista A.

Com estas medições, a caracterização da posição do ciclista foi feita através da diferença entre diferentes parâmetros da geometria da bicicleta. Esta avaliação foi realizada, usando

algumas das designações que diferentes profissionais da área da biomecânica no ciclismo usam para caracterizar e otimizar a posição e o conforto em cima da bicicleta, de modo a evitar lesões. Esta análise está apresentada na figura (5.3).

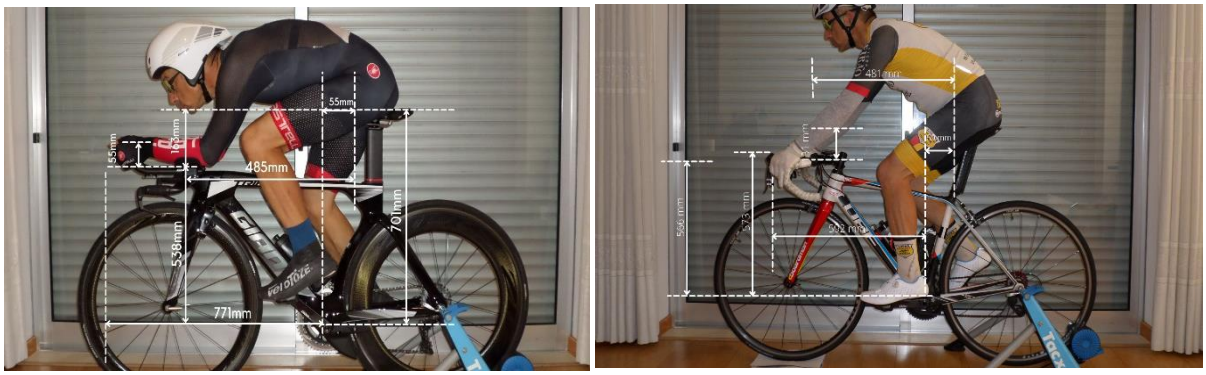


Figura 5.3: Resultados da caracterização geométrica da bicicleta do ciclista A.

5.2. Resultados da avaliação da posição de controlo

Com os dados recolhidos relativamente à posição e geometria de controlo para o ciclista, foram efetuadas medições para diferentes posições em cima da bicicleta de teste.

Para a medição da velocidade e obtenção e registo dos dados via GPS, foi usado um computador de bicicleta *Garmin Edge 130* e para medição e registo do ritmo cardíaco do ciclista foi usado um computador de bicicleta *Polar CS400*, montado exteriormente ao avanço do lado esquerdo, com a parte de trás da abraçadeira do suporte de fixação *K-Edge* montada 65 mm à frente do ponto mais avançado do apoio de braço esquerdo na vertical do extensor e inclinado para a esquerda 15°± 2° para minimizar a área frontal, como representado na figura (CP.1) em anexo. O prolongamento da parte de baixo do tubo de alumínio do suporte foi montado tangente à parte de baixo do guiador.

A primeira bateria de testes consistiu em avaliar a área efetiva de arrasto aerodinâmico para diferentes posições da anca no selim, conforme sugere a figura (5.4). Foram realizados ensaios para uma posição da anca mais avançada (15 cm à frente da parte de trás do selim), posição intermédia (10 cm) e posição mais recuada (5 cm). Para que o ciclista tivesse noção do local onde estava sentado, foi usada uma superfície rugosa no selim para evitar a perda da posição durante o ensaio, representada na figura (CP.1) no apêndice C.

Figura 5.4: Variação da posição da anca no selim.

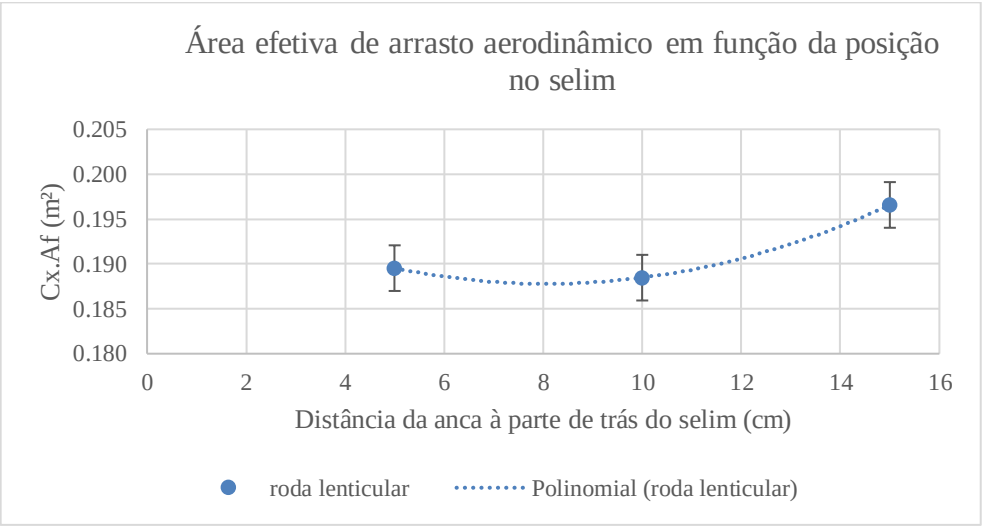


Figura 5.5: Resultados da avaliação da influência da posição da anca no selim na área efetiva de arrasto aerodinâmico para o ciclista.

Da figura (5.5), podemos verificar que existe um ponto ótimo onde o ciclista A se deve posicionar de modo a obter o menor arrasto possível, sendo o ponto ótimo do ponto de vista aerodinâmico, o ponto em que a anca se encontra a 8.1 cm da parte traseira do selim, correspondendo a uma área efetiva de arrasto aerodinâmico de 0.1878 m^2. Além disso, podemos verificar que a variabilidade dos ensaios diminui para os ensaios com a anca mais recuada. Isto ocorre, porque quanto mais recuada estiver a anca, maior será a facilidade do ciclista em manter a mesma posição da cabeça durante a duração do ensaio em questão, uma vez que a posição da cabeça tem uma grande influência no arrasto. Portanto, além de posições para a anca mais avançada aumentar o dispêndio de energia para qualquer posição, também se mostra como uma

posição onde o ciclista apresenta maior instabilidade, um ponto importante no desempenho a altas velocidades.

Os testes de controlo foram feitos com uma roda lenticular (roda com um perfil fechado), e foi estudada a influência da roda lenticular no arrasto aerodinâmico. Esta cria menos turbulência no escoamento, pelo que menos energia é dissipada, e em teoria, uma diminuição do arrasto. Esse pensamento foi confirmado na realização de medições comparando a utilização de rodas lenticulares e de rodas normais., como podemos verificar na tabela (3). No entanto, apesar da roda lenticular ser vantajosa do ponto de vista aerodinâmico em situações de ventos cruzados, as forças laterais sentidas pelo ciclista, diminuem a estabilidade da bicicleta, provocando uma diminuição do desempenho do ciclista, em virtude de este não conseguir controlar a bicicleta com tanta facilidade.

Tipo de Roda	***Cx.Af* (m^2) com a anca a 5 cm da parte de trás do selim**	***Cx.Af* (m^2) com a anca a 10 cm da parte de trás do selim**	***Cx.Af* (m^2) com a anca a 15 cm da parte de trás do selim**
ZIPP Super 9 (lenticular)	0.1895 ± 0.0040	0.1885 ± 0.0032	0.1966 ± 0.0066
ZIPP 808 FC CCL (com aro e raios)	0.2005± 0.0026	0.1995± 0.0028	0.2027 ± 0.0067

Tabela 3: Área efetiva de arrasto aerodinâmico do ciclista A usando uma roda lenticular e uma roda com aro e raios com aro com 82 mm de altura.

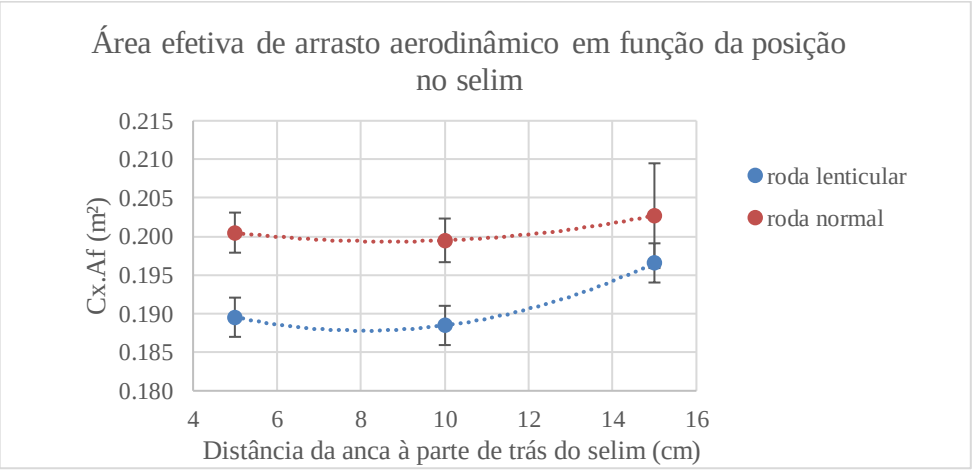


Figura 5.6: Área efetiva de arrasto aerodinâmico do ciclista A usando uma roda lenticular e uma roda com aro e raios normais.

Verificamos na figura (5.6) que as duas curvas apresentam praticamente o mesmo comportamento, apenas tendo uma variação para os pontos onde a anca está mais avançada, devido à maior instabilidade e dificuldade em manter a mesma posição ao longo de todos os ensaios. Destes resultados, podemos concluir que o ganho aerodinâmico de utilizar uma roda lenticular corresponde a uma redução da área efetiva de arrasto aerodinâmico de 0.0094 ± 0.00281 m^2, o que significa a uma redução de 4,89 %. Estes dados estão de acordo com os resultados empíricos obtidos pelos fornecedores de rodas lenticulares e com os estudos académicos que analisaram estas comparações.

6. OTIMIZAÇÃO

De acordo com os dados em cima, verificamos que o ciclista A apresenta já uma posição extremamente otimizada, pois este tem uma área efetiva de arrasto aerodinâmico relativamente reduzida. Assim, a otimização do equipamento tornou-se o ponto seguinte a avaliar, e foram estudadas algumas das hipóteses para otimizações possíveis de serem realizadas no grupo de controlo.

6.1. Otimização no equipamento utilizado nos ensaios

Partindo de um *Cx.Af* de 0.1885 m^2, o objetivo foi o de tentar reduzir a área frontal provocada pelo equipamento, quantificando essa redução, e verificando o *Cx.Af*, teoricamente possível de alcançar. Para cada elemento, estimou-se a redução da área efetiva de arrasto aerodinâmico, através da análise da sua forma, de acordo com (Streeter & Wylie, 1979).

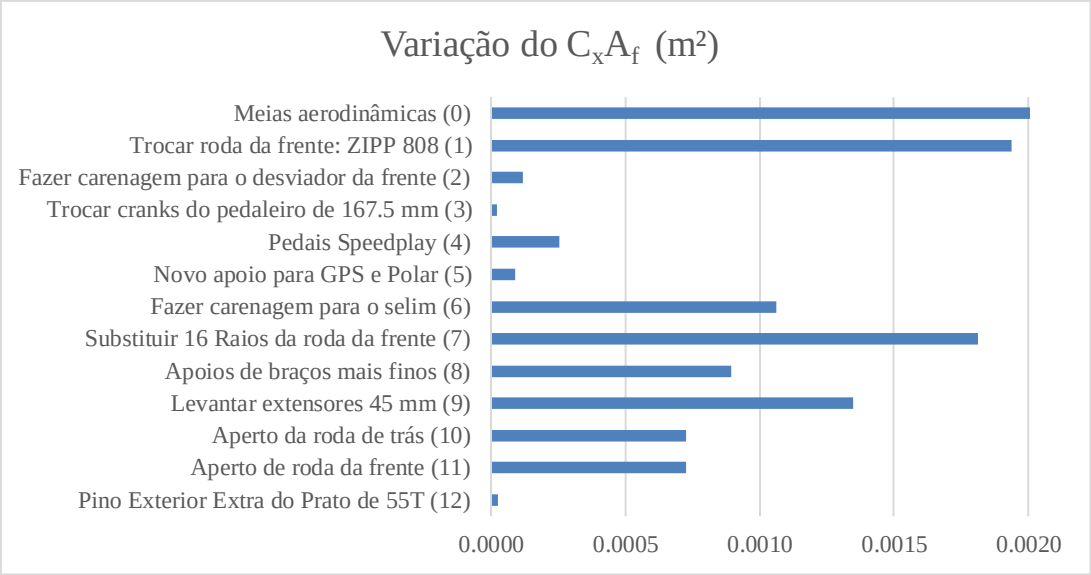


Figura 6.1: Redução da área efetiva de arrasto aerodinâmico estimada com as diferentes alterações que podem ser feitas.

Do ponto de vista aerodinâmico, pela figura (6.1) meias aerodinâmicas e a troca da roda da frente é o ponto onde maiores ganhos são passíveis de obter, sendo a posição dos extensores e a carenagem do selim, os outros pontos a serem considerados. Em baixo, estão enunciadas as otimizações realizadas do equipamento:

1. **Substituição do aperto das rodas por um de menor área frontal** (**Skewers TRIRIG STIX)**

2. **Novo apoio para o dispositivo GPS e Polar**- Substituição do apoio existente por um mais fino, considerando um *Cx* 0.6;

3. **Uso de meias Aerodinâmicas** – Visto que as pernas do ciclista funcionam como cilindros face ao escoamento, o uso de tecidos que permitem diminuir a largura da esteira têm um grande impacto no arrasto aerodinâmico. Assim, foram usadas meias aerodinâmicas da marca Castelli. Foi considerada um diâmetro da perna de 0.081 m, um pé-de-meia de 16 cm e uma rugosidade adimensional de 0.0057. Os cálculos foram feitos para uma temperatura de 15 ºC e uma velocidade do ciclista de 45 km/h. Consultando (Schlichting, 1979), obtemos uma redução de C_x de 1.17 para 0.80.

4. **Remoção da "Barbatana de Tubarão"** - Para que a bicicleta esteja de acordo com os regulamentos da UCI, é necessário remover um acessório no quadro, que está apresentado na figura (6.2). A remoção desta peça implica mais 3 W a 50 km/h, (Giant, 2016) ou um aumento de 0.001828 m^2 da área efetiva de arrasto aerodinâmico, relativamente aos resultados de controlo.

Figura 6.2: Representação da "barbatana de tubarão", usada em bicicletas de triatlo para melhoria da eficiência aerodinâmica do atleta, não sendo, no entanto, permitida pelos regulamentos da UCI (Bicycles, 2016).

Somando a redução do coeficiente de arrasto associada a estas alterações, obtemos uma redução total de 0.00508 m^2, o que significa um ganho aerodinâmico de 2.695 %. Podemos concluir que o coeficiente de arrasto mínimo teórico possível de ser atingido com este ciclista é de 0.1834 m^2, colocando este atleta num patamar de excelência, em termos aerodinâmicos.

Podemos também avaliar as otimizações com base no custo por m^2 de área efetiva de arrasto aerodinâmico reduzida, estando essa correlação apresentada na figura (6.3). A numeração das alterações coincide com a numeração da figura (6.1).

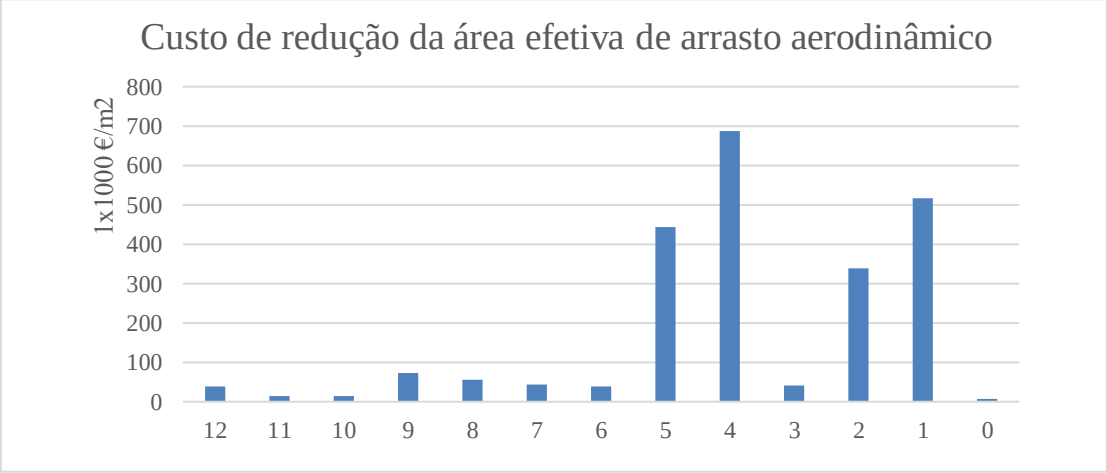


Figura 6.3: Custo de redução da área efetiva de arrasto aerodinâmico unitário para cada alteração.

Podemos concluir que, apesar da substituição da roda ter um impacto significativo na eficiência aerodinâmica, implica maiores custos, e com este gráfico, podemos verificar que novos apoios e a aquisição dos pedais têm um custo demasiado elevado para os ganhos passíveis de serem obtidos com a sua compra.

Para o ciclista ter uma melhor compreensão dos ganhos que podem ser atingidos, a diminuição da potência despendida pelo ciclista para se deslocar a uma dada velocidade, devida a cada alteração, foi realizada, sendo essa informação apresentada na figura (6.4).

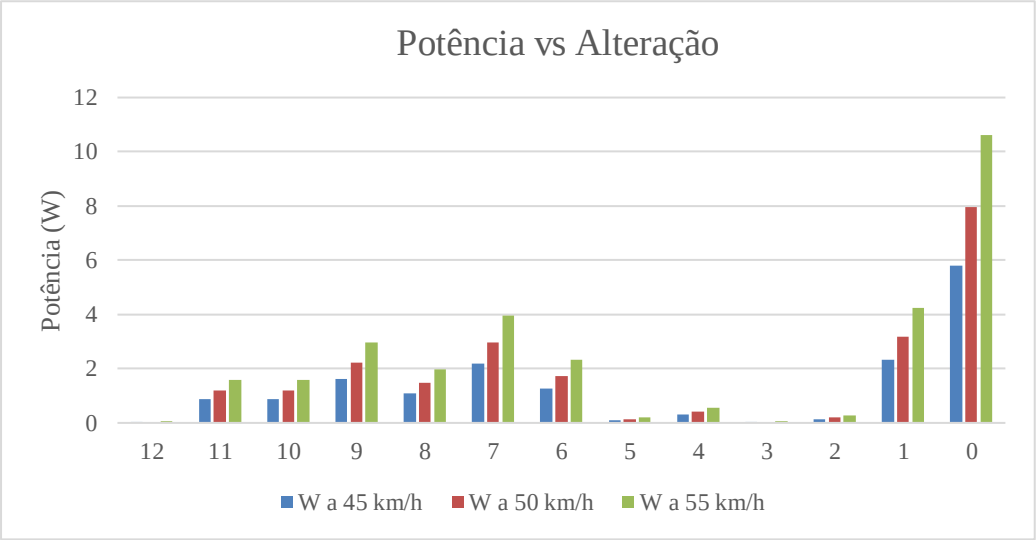


Figura 6.4: Redução da potência que o ciclista tem de produzir para se deslocar a determinadas velocidades, com resultado de cada alteração nos componentes da bicicleta.

Visto que, o recorde da hora, no início de 2021, se apresenta em cerca de 55 km/h, o ciclista A, com as alterações realizadas, necessita de aproximadamente menos 15 W para se deslocar a esta velocidade, sendo este um ganho considerável, tendo em conta, que apenas foram avaliadas alterações em componentes da bicicleta, e que a bicicleta no seu todo constitui apenas 30 % do arrasto total.

6.2. Otimização da posição

A otimização da posição dos ciclistas foi feita com base também nos testes de potência, de modo a tentar melhorar o desempenho dos ciclistas na posição de contrarrelógio.

6.2.1. Avaliação da potência

Para cada posição avaliada anteriormente, foram realizados testes em subida, com intensidades controladas, de modo a averiguar quais seriam as posições ótimas em cima da bicicleta, para a produção de trabalho pelo ciclista. A intensidade dos testes foi controlada com base na frequência cardíaca. Visto que a frequência cardíaca, em treino, varia com muitos fatores externos (temperatura, humidade, hora do dia, alimentação), o seguinte protocolo foi realizado para avaliar a potência produzida em cada posição:

1. Estando, o limiar anaeróbio do ciclista entre os 150 bpm e os 155 bpm, foram escolhidas intensidades entre os 120 e os 130 bpm, os 135 e os 140 bpm, e os 145 e os 150 bpm. Estas intensidades permitem a realização de ensaios repetitivos, sem que o atleta acumule fadiga, pois são intensidades que o ciclista consegue manter por grandes períodos de tempo, sem que comece a haver uma diferença entre os estímulos internos e o trabalho produzido externo (ou seja, para uma determinada frequência cardíaca a potência irá manter-se estável, e não diminui ao longo do tempo);
2. O atleta, antes de iniciar os testes, realiza um pequeno aquecimento para permitir uma boa ativação muscular e cardiovascular;
3. Uma vez finalizada a bateria de testes para uma posição, o ciclista passa para o próximo patamar de intensidade;
4. Para a validação dos resultados, impõe-se que o ciclista não realize nenhuma refeição pesada, nas 2 horas antes do início dos testes.

6.2.1.1. Avaliação da potência em função da posição da anca no selim na bicicleta de contrarrelógio

Em baixo, estão apresentados os resultados relativos à influência da posição da anca na potência produzida pelo ciclista A, medida na Avenida Elísio de Moura.

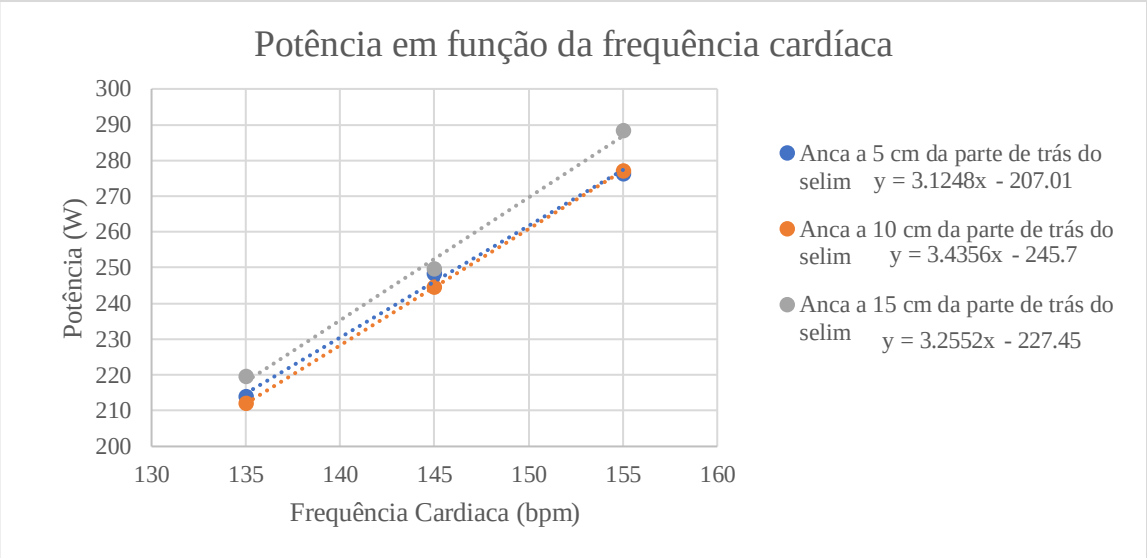


Figura 6.5: Resultados obtidos da potência, em função da frequência cardíaca para diferentes posições da anca no selim para o ciclista A.

Com base na figura (6.5), podemos concluir que para uma posição da anca mais avançada, o ciclista em questão consegue colocar maior potência, para o mesmo esforço interno, comprometendo, no entanto, a eficiência aerodinâmica. Assim, outra alteração foi realizada e consistiu na elevação dos apoios dos extensores em 23 mm e no seu avanço em 3 cm, de modo a permitir ao ciclista atingir a produção de potência máxima, na posição da anca onde o arrasto é mínimo. Esta alteração poderá aumentar a área efetiva de arrasto aerodinâmico ótima, mas permite ao ciclista aumentar a potência produzida na sua posição de contrarrelógio, visto que a posição a 15 cm é uma posição com a anca bastante avançada.

6.2.1.2. Comparação da potência numa posição de conforto e posição com as mãos nos extensores

Visto que o ciclista quando sobe, se desloca a menor velocidade, a capacidade para este transferir trabalho para os pedais torna-se fundamental. Por isso, foi avaliada a diferença entre a potência produzida nas posições aerodinâmicas e uma posição normal confortável na bicicleta de estrada com as mãos nas manetes nos travões e com os braços esticados.

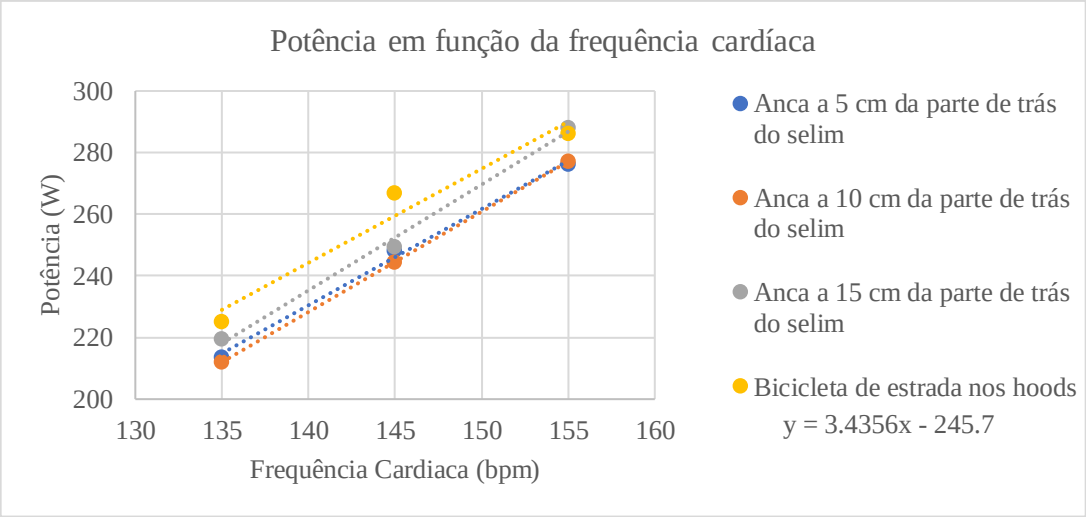


Figura 6.6: Resultados obtidos da potência, em função da frequência cardíaca para as diferentes posições descritas. Verifica-se que na bicicleta de estrada com uma posição confortável, o ciclista consegue colocar mais potência que numa posição aerodinâmica. Esta diferença está de acordo com os estudos (Hubenig *et al.*, 2011), que demonstram que quanto menor for o ângulo entre o tronco e as pernas, menor é a capacidade do ciclista para transferir trabalho para os pedais.

6.2.1. Posição ótima em função da inclinação da estrada

Como a potência que o ciclista consegue produzir depende da posição em que este se coloca, foi efetuado um estudo para avaliar a posição mais rápida para diferentes inclinações da estrada. Mantendo todas as variáveis em estudo constantes apresentadas em anexo, analisou-se o desempenho do ciclista nas diferentes posições, variando a inclinação da estrada, para diferentes intensidades (135 bpm, 145 bpm e 155bpm), com base nas curvas de potência em função da frequência cardíaca. Os gráficos a 135 e a 145 bpm apresentam-se no apêndice E.

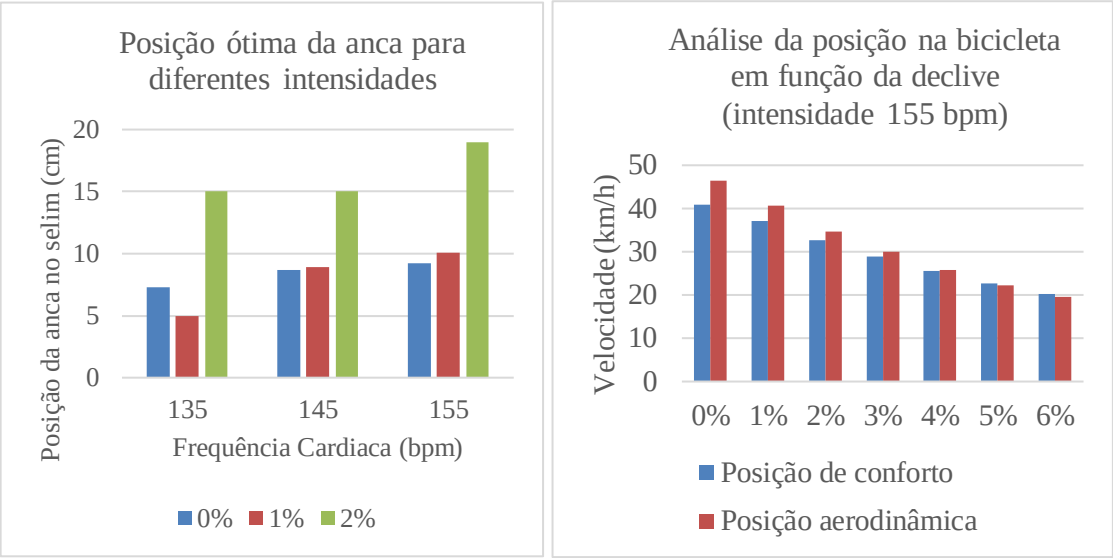


Figura 6.7: Resultados do estudo de otimização da posição para a melhoria do desempenho do ciclista em diferentes inclinações da estrada. Até 2 % de inclinação, uma posição mais aerodinâmica é vantajosa. A 2 % de inclinação, a posição com a anca a 15 cm da parte de trás do selim, apesar de ser menos eficiente aerodinamicamente, permite a produção de maior potência, pelo que deverá ser a posição adotada em subida ligeira.

Verificamos que para cada intensidade, não só existe uma posição ótima da anca no selim, numa posição aerodinâmica, para diferentes declives da estrada, mas também que o ciclista se consegue deslocar mais rápido na posição de conforto, para inclinações superiores a 5 %, ou situações em que a velocidade se aproxima dos 20 km/h, onde a perda de eficiência aerodinâmica é contrabalançada com o ganho de capacidade para transferir potência na posição de conforto.

7. RESULTADOS APÓS AS ALTERAÇÕES

Com base na informação apresentada nas secções anteriores, fez-se a otimização da posição, e os ensaios foram realizados novamente na Avenida Elísio de Moura, sendo os resultados apresentados na Figura (7.1).

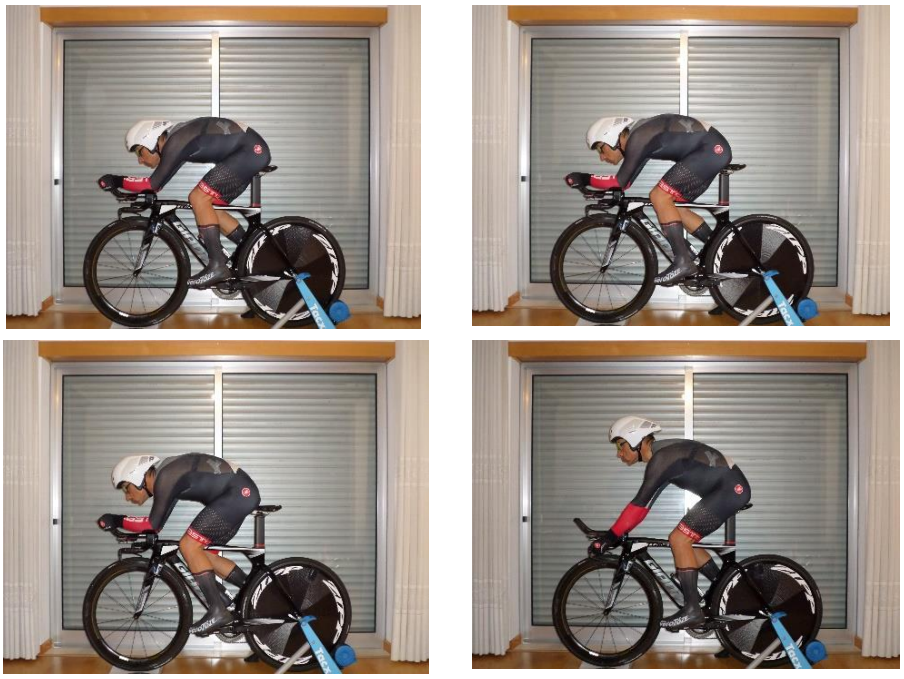


Figura 7.1: Configuração final nas diferentes posições, após as alterações na posição e no equipamento do ciclista A, nas diferentes posições aerodinâmicas (com a anca a 5 cm, 10 cm e 15 cm da parte de trás do selim, segurando os extensores e na posição de conforto.

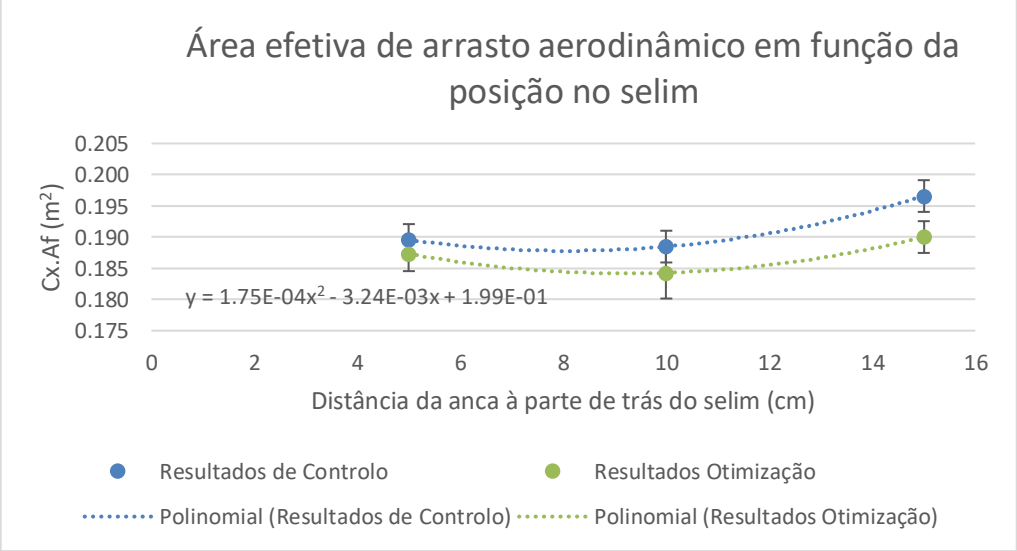


Figura 7.2: Resultados do estudo da área efetiva de arrasto aerodinâmico em função da posição no selim.

Após a otimização, verificamos que uma redução da área efetiva de arrasto aerodinâmico foi conseguida para todos os pontos. O novo ponto ótimo da posição da anca para a otimização do arrasto aerodinâmico ocorre a uma distância de 9.25 cm da parte de trás do selim, correspondendo a uma área efetiva de arrasto aerodinâmico de 0. 0.1840 ± 0.0040 m^2,

estando os resultados dentro das expetativas e de acordo com os cálculos teóricos realizados. De notar que o ciclista mesmo com uma posição da anca mais avançada, apresenta uma área efetiva de arrasto aerodinâmico semelhante à área efetiva de arrasto aerodinâmica mínima antes da otimização, o que era o objetivo da elevação dos extensores em 23 mm, melhorando o desempenho do ciclista ao permitir que este coloque mais potência para a mesma eficiência aerodinâmica. Na figura (7.3), está representada a relação entre a potência produzida para 2 posições da anca.

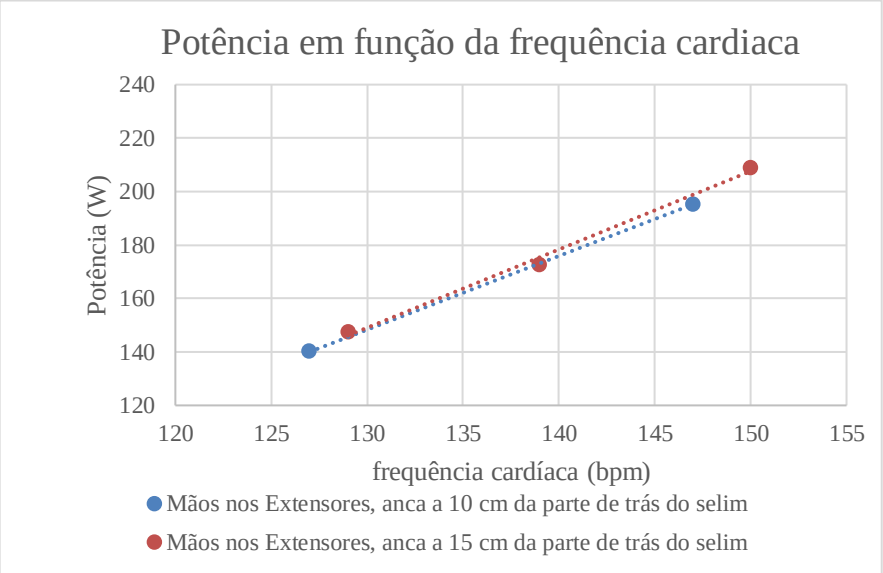


Figura 7.3: Resultados dos testes de potência, após as alterações na posição e no equipamento do ciclista, nas diferentes posições aerodinâmicas nos extensores.

Como se pode observar da figura (7.3), verifica-se que a elevação dos extensores permite menores diferenças entre as posições, que permite ao ciclista produzir praticamente a mesma potência para as 2 posições apresentadas. Os resultados de potência são menores, pois foram obtidos numa subida com início na rotunda no cimo da Avenida Elísio de Moura e fim na Mata de Vale de Canas, em Coimbra, com maior duração (entre 10 a 15 minutos) em comparação com os ensaios efetuados antes das alterações (entre 2.5 a 4 minutos).

8. VALIDAÇÃO DO MÉTODO ESCOLHIDO

Com os dados recolhidos relativamente à posição e geometria da bicicleta de estrada do ciclista A, foram efetuadas medições para diferentes posições em cima da bicicleta de teste. Foram realizados testes para comparação da área efetiva de arrasto aerodinâmico em 4 posições diferentes, como apresentado na figura (8.1).

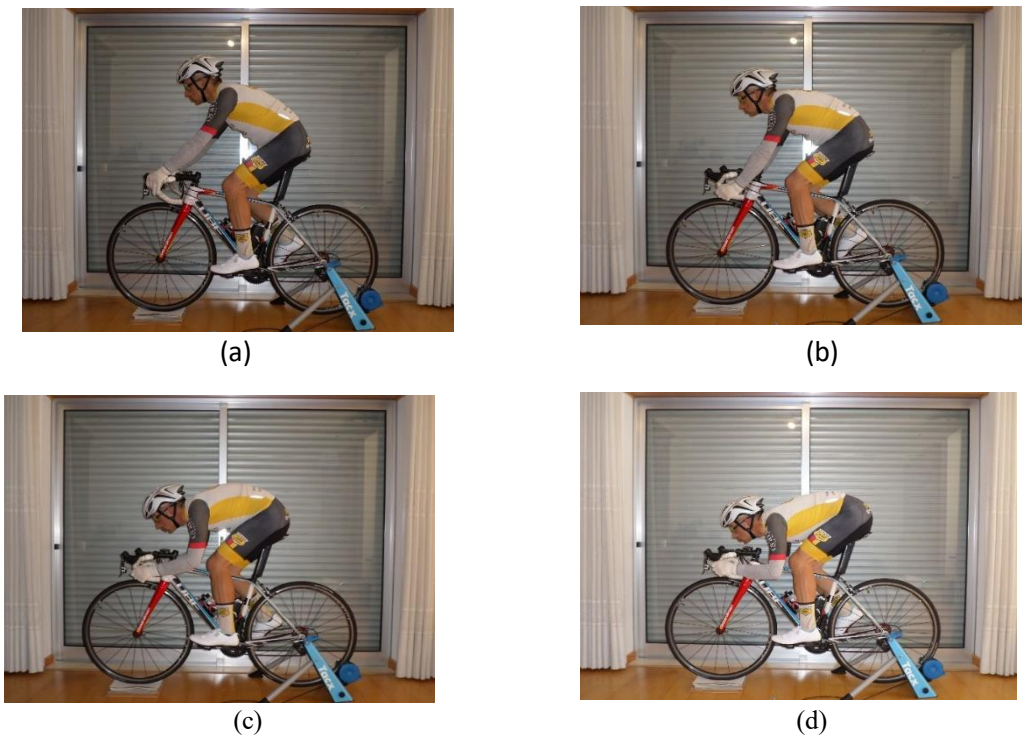


Figura 8.1: (a) Posição com as mãos nos hoods (parte do guiador onde estão os travões), braços direitos, a olhar para a frente, a pedalar; (b) Posição com as mãos nos drops, braços direitos, sentado confortável no selim, a olhar para a frente, a pedalar; (c) Posição com as mãos nos drops, braços fletidos a 102° e o queixo a 10 cm do Polar CS400 (queixo a 12,5 cm do avanço), anca a cerca de 2 cm da parte trás do selim, a olhar para a frente, a pedalar (d) Posições com as mãos nos drops, braços dobrados, posição aero, queixo quase no guiador, anca a cerca de 4 cm da parte trás do selim, a olhar para a frente, a pedalar.

De acordo com os resultados apresentados na figura (8.2), a área efetiva de arrasto aerodinâmico apresenta valores ligeiramente inferiores aos apresentados por (Blocken *et al.*, 2018). No entanto, este fato ocorre porque a compleição física dos ciclistas é totalmente diferente (a massa do ciclista do estudo de Blocken é de 82 kg). Assim, assumindo que os 2 ciclistas têm a mesma massa volúmica e as mesma proporções corporais, aplicando a Eq. (32) que correlaciona a massa e a altura dos 2 ciclistas e considerando a área efetiva de arrasto

aerodinâmico da bicicleta de 0.085 m^2, os resultados estão apresentados no apêndice D e são muito próximos daqueles obtidos no estudo, permitindo validar a metodologia aplicada.

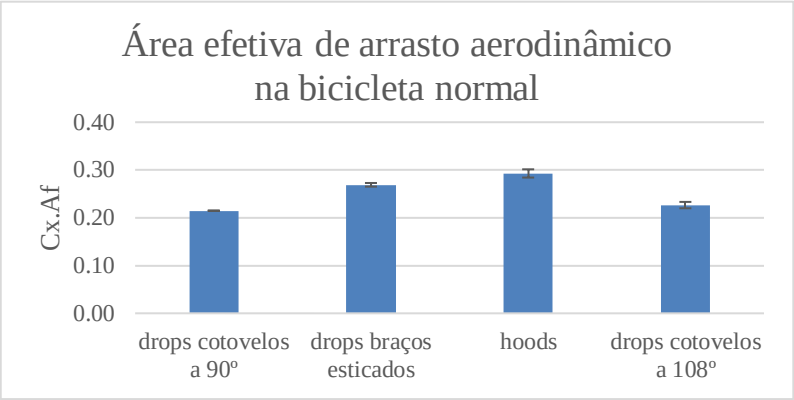


Figura 8.2: Variação da área efetiva de arrasto aerodinâmico para diferentes posições numa bicicleta normal de estrada.

$$C_xA_{f,corr} = C_xA_{f,bici} + (C_xA_{f,ciclista} - C_xA_{f,bici}) \times \left(\frac{m_{\text{Blocken}}}{m_{ciclista}}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (32)$$

9. AVALIAÇÃO DA POSIÇÃO DE TRAVAGEM

Quedas no ciclismo são infelizmente um fator que influencia o resultado das provas. Habitualmente, as quedas ocorrem devido a derrapagem instável da roda da frente, pois nesta o ciclista não tem tanto controlo de direção como na roda traseira, no caso de esta derrapar. Assim, foi analisada a distribuição de peso de um ciclista em cima da bicicleta, de modo a tentar otimizar a sua posição em curva, para que este consiga curvar mais rápido e com segurança.

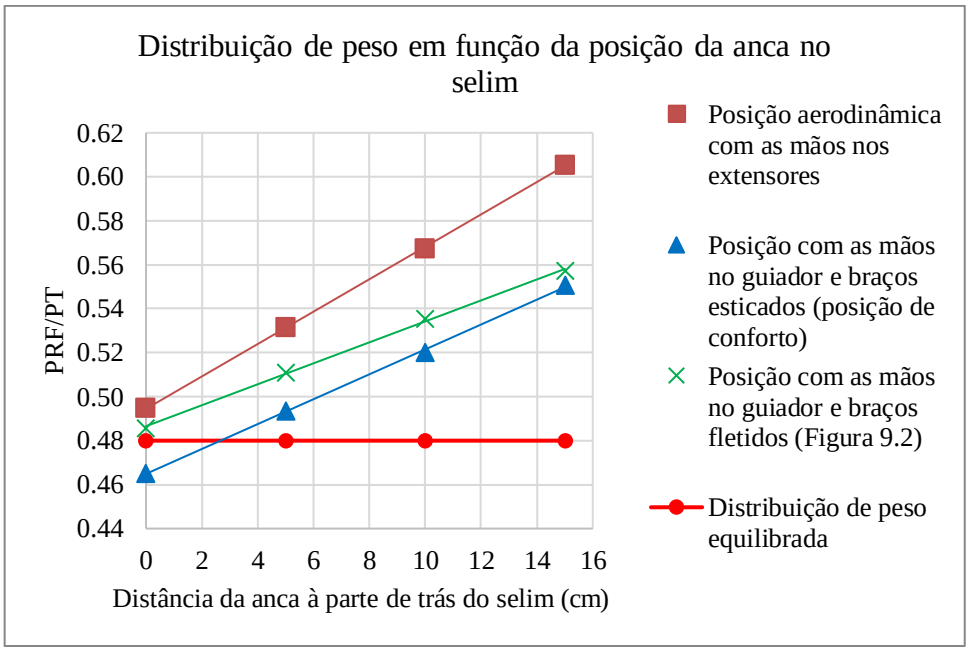


Figura 9.1: Distribuição do peso do ciclista na bicicleta em função da posição da anca no selim, sendo PRF, o peso suportado pela roda da frente e PT, o peso total do sistema bicicleta + ciclista.

Devido ao facto de se utilizar um pneu dianteiro com uma largura inferior ao traseiro, para que o peso esteja equilibrado pelas 2 rodas, apenas 48 % do peso total deverá estar sobre a roda da frente. O valor de 48 % foi determinado, dividindo a largura do pneu da roda da frente (24.0 mm) pela soma das larguras reais medidas com as pressões de insuflação utilizadas em competição dos pneus da frente e de trás (24.0 mm + 26.0 mm). Verifica-se pela figura (9.1) que se as mãos forem nos extensores, o ciclista não distribui o peso de forma equilibrada para este caso.

Esta análise é feita sem aceleração longitudinal, não considerando a força que ocorre em travagem, que irá induzir maior peso na roda da frente. Assim, para curvar com acelerações laterais elevadas (superiores a 0.40 g), o ciclista deverá ter as mãos no guiador, braços esticados e com a anca a uma distância inferior a 2.5 cm da parte de trás do selim. Com a anca a 0 cm da parte do selim, apenas 46 % do peso é suportado pela roda da frente, que além de estar abaixo do valor para uma distribuição equilibrada, permite a adição das forças exercidas em travagem, que aumentam o peso colocado sobre a roda da frente.

Figura 9.2: Posição de travagem e de curva que o ciclista deve adotar para travar e curvar com a maior eficiência possível.

10. DISCUSSÃO

Este projeto propôs-se a desenvolver uma metodologia que permitisse a avaliação e otimização do desempenho do ciclista, com base na medição da área efetiva de arrasto aerodinâmico e da potência produzida pelo ciclista. Verificou-se que a metodologia aplicada permite a obtenção de resultados semelhantes aos efetuados por outros estudos, considerando as diferentes características corporais dos ciclistas dos diferentes estudos. No entanto, a metodologia apresenta-se como robusta, uma vez que permite a obtenção em condições reais das características aerodinâmicas do ciclista com precisão semelhante à obtida em túneis de vento ou simulações CFD, com erros da mesma magnitude. Deverá notar-se que as condições externas têm uma grande influência nos resultados, e, portanto, a aplicação da metodologia só deverá ser válida se todos os pressupostos apresentados anteriormente (inexistência de tráfico e de vento) são corretamente aplicados. Este estudo focou-se primariamente na avaliação de uma característica da posição do ciclista (posição da anca) e da comparação da utilização de rodas lenticulares ou rodas normais e na sua otimização, sendo que outros estudos poderão ser feitos, como o ajuste de outros parâmetros importantes na posição do ciclista (por exemplo, o uso de diferentes capacetes ou fatos de contrarrelógio).

Os resultados das otimizações para o ciclista são referenciados para esforços de contrarrelógios de média a longa duração (duração superior a 3 minutos). Para esforços de menor duração, a realização de trabalho torna-se fulcral, e logo a posição ótima poderá não ser a mais aerodinâmica ou a que é apresentada neste estudo (posições com o ciclista levantado da bicicleta são posições que serão ótimas para certos momentos da corrida, como acelerações após curvas, momentos de subida ou a sprintar).

A caracterização da posição numa bicicleta de estrada normal permite a validação dos resultados apresentados, pois esta apresenta-se, de acordo com os resultados obtidos noutros estudos. A vantagem da metodologia apresentada é que apenas necessita de um sensor GPS, de um sensor de velocidade e de um medidor de frequência cardíaca, para a realização dos ensaios, não sendo necessário equipamentos dispendiosos como túneis de vento ou softwares complexos de CFD, para a realização de ensaios práticos para a avaliação da posição e do desempenho do ciclista.

11. CONCLUSÕES

11.1. Área efetiva de arrasto aerodinâmico

´ De acordo com os testes realizados, podemos verificar que uma bicicleta de contrarrelógio permite a adoção de uma posição mais aerodinâmica para o ciclista, daí ser a bicicleta usada na maior parte dos esforços individuais no ciclismo. Verifica-se também que existe uma correlação não linear entre a posição da anca no selim e a área efetiva de arrasto aerodinâmico, sendo necessário um estudo individual para cada atleta para verificar o ponto ótimo que otimiza o desempenho aerodinâmico. No geral, o ciclista apresenta uma posição mais aerodinâmica quando a anca se situa numa posição ligeiramente recuada em relação ao centro do selim (8 a 10 cm da parte de trás do selim).

A otimização das meias apresenta-se como a alteração que provoca maior impacto durante a seleção do equipamento, permitindo ganhos de 5 %, entre a utilização de meias normais e de meias aerodinâmicas. Além disso, o perfil dos raios das rodas apresenta-se como uma das principais alterações que se devem realizar para a diminuição da área efetiva de arrasto aerodinâmico, ao permitir que cada raio produza uma esteira menor, diminuindo assim a energia dissipada. Do ponto de vista económico, a colocação dos extensores na posição ótima permite uma melhoria no desempenho aerodinâmico. Isto ocorre, pois, os extensores são o primeiro ponto de contacto entre o escoamento externo e o sistema ciclista + bicicleta, pelo que otimizações na forma como o escoamento se comporta nesta zona irão afetar o comportamento do escoamento em torno do resto do sistema.

Verifica-se que a posição adotada pelo ciclista em cima da bicicleta é o fator que provoca maiores alterações na área efetiva de arrasto aerodinâmico, sendo, na bicicleta de estrada, a posição nos *drops* com os braços a 90º com o queixo próximo do guiador, a posição que otimiza o desempenho aerodinâmico. Este facto explica a razão pela qual os ciclistas em competição adotam este tipo de posição, pois esta permite-lhes atingir maiores velocidades.

No entanto, esta posição é difícil de manter por longos períodos de tempo. Assim, a posição com os braços fletidos a 102º apresenta-se com a posição que o ciclista deverá tentar adotar em situações em que, não só o desempenho aerodinâmico é importante, mas também, a capacidade para transferir trabalho para os pedais. Apesar do ciclista estar mais confortável com as mãos nos *hoods* e com os braços esticados, este tipo de posições deverá ser apenas adotado, em situações em que as velocidades são reduzidas e o trabalho realizado pelo ciclista é o fator principal que permite ao ciclista se deslocar mais rápido (em subida).

11.2. Otimização da posição em termos da potência produzida

Apesar da posição mais aerodinâmica ser vantajosa para certas situações particulares, por exemplo de descida, em que o trabalho realizado pelo ciclista é reduzido, esta poderá não ser a posição mais correta de ser adotada. Verificamos que apesar da posição da anca a 9.6 cm para o ciclista em particular ser a mais rápida, esta não se apresenta como a posição em que este consegue desenvolver mais potência. Verifica-se que quanto mais avançada estiver a anca, maior será facilidade do ciclista de realizar trabalho, verificando-se diferenças de 5 a 10 W entre a potência produzida pelo ciclista entre uma posição com a anca mais recuada e mais avançada. Além disso, outro aspeto a ter em consideração é a forma como o ciclista se coloca no guiador. Uma posição mais confortável, com os braços esticados, agarrando os manípulos dos travões é a posição que permite maior geração de potência, e que permite a este se deslocar com maior velocidade em situações de subida. Verificamos uma redução de 5 a 10 % entre a potência que o ciclista consegue desenvolver agarrando o guiador nos extensores, relativamente à posição com as mãos nos manípulos dos travões.

Para curvar e travar, o ciclista deverá colocar-se numa posição que minimize o peso suportado pela roda da frente, de modo a permitir um maior controlo sobre a bicicleta, caso

exista uma derrapagem instável. A posição a adotar para o ciclista A deverá ser uma em que as mãos estão no guiador, os braços esticados e a anca, a uma distância inferior a 2.5 cm da parte de trás do selim.

Por isso, deverá ser notado que não existe uma posição ótima que o ciclista deverá sempre adotar, uma vez que a posição que permite ao ciclista se deslocar mais rápido dependerá da envolvente externa e da velocidade a que este se desloca (além das variações internas individuais de produção de potência em diferentes posições).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barry, N., Burton, D., Crouch, T., Sheridan, J., & Luescher, R. (2012). Effect of crosswinds and wheel selection on the aerodynamic behavior of a cyclist. *Procedia Engineering*, *34*(December), 20–25. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.005

Blocken, B. (2014). 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1–57. http://sts.bwk.tue.nl/urbanphysics/pdf/2014_JWEIA_Blocken_Review_Preprint.pdf%0Apapers3://publication/uuid/21147AAD-C838-4763-86F3-8DC968402660

Blocken, B., Defraeye, T., Koninckx, E., Carmelie, J., & Hespel, P. (2013). Surprises in cycling aerodynamics. *Europhysics News*, *44*(1), 20–23. https://doi.org/10.1051/epn/2013102

Blocken, B., Toparlar, Y., & Andrianne, T. (2016). Aerodynamic benefit for a cyclist by a following motorcycle. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *155*, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.04.008

Blocken, B., van Druenen, T., Toparlar, Y., & Andrianne, T. (2018). Aerodynamic analysis of different cyclist hill descent positions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *181*(August), 27–45. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.08.010

Blocken, B., van Druenen, T., Toparlar, Y., & Andrianne, T. (2019). CFD analysis of an exceptional cyclist sprint position. *Sports Engineering*, *22*(1), 1–11. https://doi.org/10.1007/s12283-019-0304-7

Carvalheira, P. de F. V. (2004). Proceeedings of the 15th IASTED International Conference MODELLING AND SIMULATION, March 1-3 2004, Marina Del Rey, California, USA. *Simulation of the Performance of an Extra-Low Fuel Consumption Vehicle*, 414–126.

Continental Grand Prix 5000 23, 25, 28, 32 mm Comparison. (n.d.). Retrieved March 23, 2021, from https://www.bicyclerollingresistance.com/specials/grand-prix-5000-comparison

Crouch, T. N., Burton, D., LaBry, Z. A., & Blair, K. B. (2017). Riding against the wind: a review of competition cycling aerodynamics. *Sports Engineering*, *20*(2), 81–110. https://doi.org/10.1007/s12283-017-0234-1

Debraux, P., Grappe, F., & Manolova, A. V. (2011). *Aerodynamic drag in cycling : Methods of assessment Aerodynamic drag in cycling : methods of assessment*. *June 2014*. https://doi.org/10.1080/14763141.2011.592209

di Prampero, P. E. (1986). The energy cost of human locomotion on land and in water. *International Journal of Sports Medicine*, *7*(2), 55–72. https://doi.org/10.1055/s-2008-1025736

di Prampero, P. E., Cortili, G., Mognoni, P., & Saibene, F. (1979). Equation of motion of a cyclist. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, *47*(1), 201–206. https://doi.org/10.1152/jappl.1979.47.1.201

Du Bois, D., & Du Bois, E. F. (1989). A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. 1916. *Nutrition (Burbank, Los Angeles County, Calif.)*, *5*(5), 303.

Heine, J. (2006). Optimizing Your Tire Pressure for Your Weight. *Bicycle Quarterly*, *5*(4), 1–2.

Hong, S. (2021). *applied sciences Aerodynamics of Cycling Skinsuits Focused on the Surface Shape of the Arms*.

Hopker, J., Jobson, S., Carter, H., & Passfield, L. (2010). Cycling efficiency in trained male and female competitive cyclists. *Journal of Sports Science & Medicine*, *9*(2), 332–337.

Hubenig, L. R., Game, A. B., & Kennedy, M. D. (2011). Effect of different bicycle body positions on power output in aerobically trained females. *Research in Sports Medicine*, *19*(4), 245–258. https://doi.org/10.1080/15438627.2011.608039

Kaminsky, L. A., Arena, R., & Myers, J. (2015). Reference Standards for Cardiorespiratory. *Mayo Clinic Proceedings*, *90*(11), 1515–1523. https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2015.07.026

Padilla, S., Universitario, H., & Asturias, P. De. (2016). *Scientific approach to the 1-h cycling world record : a case study*. *November 2000*. https://doi.org/10.1152/jappl.2000.89.4.1522

Pogni, M., & Petrone, N. (2016). Comparison of the aerodynamic performance of five racing bicycle wheels by means of CFD calculations . *Procedia Engineering*, *147*, 74–80.

https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.192

Saint, P. (1997). *Obree ' s position*. *1*, 1299–1311.

Streeter, V. L., & Wylie, E. B. (1979). *Fluid mechanics (seventh ed.).*

Underwood, B. L. (2012). *Aerodynamics of Track Cycling*. *June*.

Underwood, L., Schumacher, J., Burette-Pommay, J., & Jermy, M. (2011). Aerodynamic drag and biomechanical power of a track cyclist as a function of shoulder and torso angles. *Sports Engineering*, *14*(2), 147–154. https://doi.org/10.1007/s12283-011-0078-z

APÊNDICE A: MATERIAL USADO NO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

Material Utilizado
Fita métrica de 25 m graduada em 1 cm, classe de precisão II
Spray de tinta acrílica branca
2 folhas A4 para registo das cotas a cada 10 metros de estrada.
Lâmina de estore em PVC de 1500×62×14 mm a servir como régua
Tubo de plástico flexível transparente d_{int} = 9 mm, d_{ext} = 12 mm, l = 12 m
1 régua de 1200 mm e 1 régua de 800 mm graduadas em 1 mm com 3 níveis de bolha para medir a diferença de altura manométrica entre início e no fim de cada segmento
1 litro de vinho tinto com 12% de álcool
2 canetas azuis
2 cadernos para apoio de escrita
2 rolhas nas extremidades do tubo – para impedir a saída de fluido dos tubos

Tabela AP.1: Material Utilizado no Levantamento Topográfico

APÊNDICE B: COEFICIENTE DE ATRITO DE ROLAMENTO NAS CONFIGURAÇÕES USADAS PARA OS DIFERENTES ENSAIOS

Cr	p_{RF} /psi	p_{RT} /psi	f_{RF}	Combinação de pneus usada para diferentes ensaios
0.003764	88	88	0.443	GP4000 23C, câmara em Latex RF e GP4000 25C, câmara em Butil RT
0.004055	94	94	0.443	GP4000 23C câmaras em Butil FR e TR
0.003527	94	94	0.443	GP4000 23C câmaras em Latex FR e TR
0.003208	88	88	0.443	GP4000 SII 23C câmara em Latex FR e GP5000 25C e câmara em Latex TR
0.003490	88	88	0.443	GP5000 23C, câmara em Butil RF e GP5000 25C, câmara em Butil RT
0.002821	94	94	0.521	GP5000 23C, câmara em Latex RF e GP5000 25C, câmara em Latex RT

Tabela BP.1: Atrito de rolamento de diferentes combinações de pneus possíveis

Combinação de pneus usada para diferentes ensaios	a_{RF}	b_{RF}	a_{RT}	b_{RT}
GP4000 23C câmara em Latex FR e GP4000 25C câmara em Butil TR	0.01581	-0.3302	0.01864	-0.3414
GP4000 23C câmaras em Butil FR e TR	0.02229	-0.3751	0.02229	-0.3751
GP4000 23C câmaras em Latex FR e TR	0.01581	-0.3302	0.01581	-0.3302
GP4000 SII 23C câmara em Latex FR e GP5000 25C e câmara em Latex TR	0.01581	-0.3302	0.02699	-0.4988
GP5000 23C e câmara em Butil FR e GP5000 25C e câmara em Butil TR	0.04687	-0.5790	0.03470	-0.5139
GP5000 23C e câmara em Latex FR e GP5000 25C e câmara em Latex TR	0.03436	-0.5487	0.02699	-0.4988

Tabela BP.2: Coeficientes obtidos para calcular o atrito de rolamento de diferentes combinações de pneus possíveis

APÊNDICE C: EQUIPAMENTO DE CONTROLO E PARÂMETROS CORPORAIS DOS CICLISTAS

Nas tabelas, apresentam-se as características das bicicletas que foram usadas como base para a otimização da área efetiva de arrasto aerodinâmico.

Componentes da Bicicleta	GIANT TRINITY ADVANCED PRO TT 2017, Frame Size XS	CUBE LITENING SUPER HPC PRO 2013, Frame Size 50
Bidon:	GIANT AeroVault de 440 ml montado no downtube	ELITE CRONO CX de 500 mL montado no seattube e ELITE CORSETTA de 350 mL
Saca:	Nenhuma	Nenhuma
Selim:	ISM PN 3.0 Black	PRO STEALTH CARBON 255×142
Pedais	LOOK Kéo Blade Ti	LOOK Kéo Blade Carbon 2020
Depilação	Depilação com lâmina de barbear na véspera	Depilação com lâmina de barbear na véspera
Extensores/guiador	GIANT originais da bicicleta com 70 mm de lixa 400 nas pontas	RITCHEY WCS STREEM II em liga Alumínio
Pedaleiro	SRAM RED GXP Crankset 130 BCD 11 SP 167.5	SRAM RED GXP COMPACT Crankset 110 BCD 11 SP 167.5
Prato grande	SRAM ROAD TT 55T 11S 130	SRAM ROAD 50T 110 BCD 11S
Prato pequeno	SRAM ROAD 42T V4 130 AL3 BLK 11S	SRAM ROAD 34T 110 BCD 11S
Desviador Frontal	Shimano Dura-Ace Di2 FD-R9150 2x 11s	SRAM FORCE 22 Yaw 2x11s
Desviador Traseiro	Shimano Dura-Ace Di2 RD-R9150-SS 11s	SRAM RED 10 SP
Cassette	SRAM RED XG 1190 11SP 11-28T	SRAM RED OG 1090 10SP 11-25T
Corrente	SRAM RED 22 com Quick Link SRAM 11 Sp - 108 elos	SRAM RED 22 com Quick Link SRAM 11 Sp - 106 elos

Tabela CP.1: Equipamento específico das bicicletas utilizadas pelos ciclistas

Informação das Rodas	**GIANT TRINITY ADVANCED PRO TT 2017, Frame Size XS**
Roda da frente	REYNOLDS STRIKE SLG 25.0 × 62 mm, largura interna do aro de 17 mm, Carbon Clincher 16 raios 1.25 × 2.20 mm, momento de inércia 0.07449 kg.m^2
Roda de trás	ZIPP SUPER 9, largura interna do aro de 17,5 mm, momento de inércia 0.08798 kg.m^2
Pneu da roda da frente	Continental GP 5000 622-23C
Pneu da roda de trás	Continental GP 5000 622-25C
Câmara de ar da roda da frente	MICHELIN AIRCOMP LATEX 700C 22/23, Válvula Presta 60 mm
Câmara de ar da roda de trás	MICHELIN AIRCOMP LATEX 700C 22/23, Válvula Presta 40 mm

Tabela CP.2 Caracterização das rodas de controlo usadas pelo ciclista na realização dos testes.

Informação das Rodas	**CUBE LITENING SUPER HPC PRO 2013, Frame Size 50**
Roda da frente	DT SWISS RR21 DICUT 21,5×21 mm, largura interna do aro de 18,0 mm, momento de inércia 0.07089 kg.m^2
Roda de trás	DT SWISS RR21 DICUT 21,5×21 mm, largura interna do aro de 18,0 mm, momento de inércia 0.078001 kg.m^2
Pneu da roda da frente	Continental GP 4000 SII 622-23C
Pneu da roda de trás	Continental GP 5000 622-25C
Câmara de ar da roda da frente	MICHELIN AIRCOMP LATEX 700C 18/20 Válvula Presta 36 mm
Câmara de ar da roda de trás	MICHELIN AIRCOMP LATEX 700C 22/23 Válvula Presta 40 mm

Tabela CP.3 Caracterização das rodas de controlo usadas pelo ciclista na realização dos testes.

Equipamento do ciclista (roupa)	**GIANT TRINITY ADVANCED PRO TT 2017, Frame Size XS**
Fato	Skinsuit CASTELLI Body Paint 3.3 Speedsuit, Tamanho M
Capacete	GIANT RIVET TT, Tamanho M (55-59 cm)
Sapatos	SHIMANO RP9, Tamanho 43
Óculos	DPV Nostral Preto Fotocromático
Luvas	Luvas Castelli Aero Speed. Tamanho L
Meias	B'TWIN AZUIS, Tamanho 39-42
Shoe Covers	VELOTÓZE pretas e curtas, tamanho M (39-42,5)

Tabela CP.4: Vestuário usado pelo ciclista durante a execução dos testes.

Equipamento do ciclista (roupa)	**CUBE LITENING SUPER HPC PRO 2013, Frame Size 50**
Fato	PACTO CARBON Licor Beirão (Jersey (Tamanho S), Calções (Tamanho M)) + Camisola interior SWITCHER tamanho M
Capacete	Specialized Evade Branco 2016, Tamanho M (54-60 cm)
Sapatos	SHIMANO RP9, Tamanho 43
Óculos	DPV Nostral Preto Fotocromático
Luvas	DEXTER Brancas Tamanho 9/L
Meias	PACTO CARBON Licor Beirão, tamanho 39-42
Shoe Covers	sem capas

Tabela CP.5: Vestuário usado pelo ciclista durante a execução dos testes.

Figura CP.1: Representação do sistema onde estão suportados os dispositivos GPS e a forma como foi avaliada a posição da anca com fitas de marcação para as posições das 5 cm, 10 cm. Para 15 cm, a anca coloca-se onde começa a separação do selim na sua zona mais estreita)

	Altura (m)	Massa (kg)	IMC (kg/m²)	Cavalo (m)	dsEP (m)	Idade (anos)
Ciclista A	1,713	67	22,8	0,79	0,720	57
Ciclista B	1,757	77	24,9	0,89	0,795	47

Tabela CP.6: Parâmetros fisiológicos do ciclista de estudo.

APÊNDICE D – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM OS DE ESTUDOS ANTERIORES

Posição Blocken	$C_xA_{f,\text{ciclista}}$ (m^2)	M_{ciclista} (kg)	M_{Blocken} (kg)	$C_xA_{f,\text{corr}}$ (m^2)	$C_xA_{f,\text{Blocken}}$ (m^2)	$\Delta C_xA_{f,}$ (%)
"Back up"	0.2690	70.09	82.0	0.289	0.277	2.17
"Back horizontal"	0.2266	69.25	82.0	0.243	0.236	1.56
"Back down 1"	0.2148	69.40	82.0	0.230	0.222	1.79

Tabela DP.1: Comparação da área efetiva do arrasto aerodinâmico obtida neste trabalho com a área efetiva de arrasto aerodinâmico obtida por (Blocken *et al*., 2018).

APÊNDICE E – OTIMIZAÇÃO DA POSIÇÃO DO CICLISTA A PARA QUALQUER DECLIVE DA ESTRADA

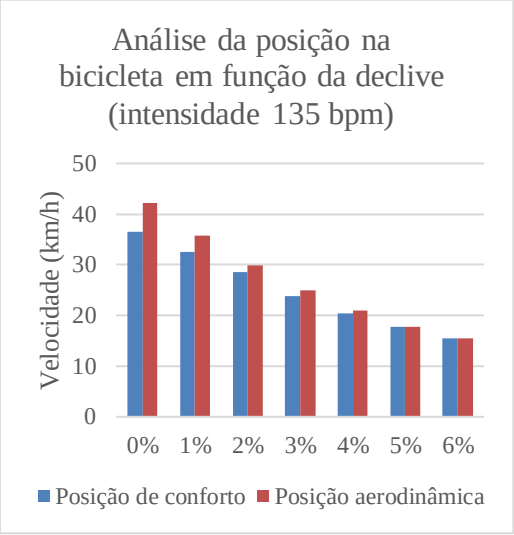


Figura EP.1: Análise da velocidade que o ciclista atinge para determinadas frequências cardíacas (130 bpm) em função da inclinação da estrada para uma posição ótima com as mãos nos extensores e uma posição de conforto com as mãos nos manípulos dos travões.

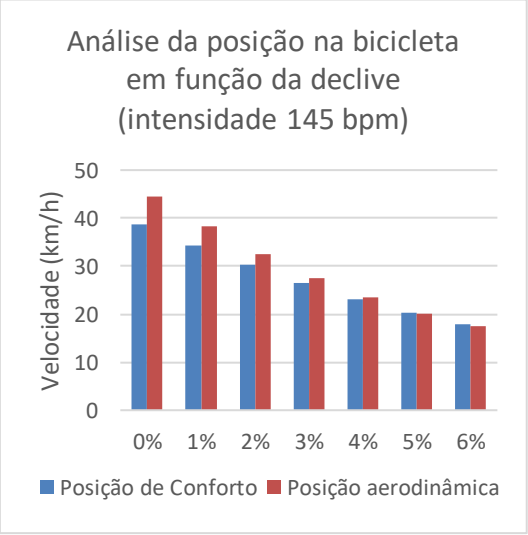


Figura EP.2: Análise da velocidade que o ciclista atinge para determinadas frequências cardíacas (140 bpm) em função da inclinação da estrada para uma posição ótima com as mãos nos extensores e uma posição de conforto com as mãos nos manípulos dos travões

APÊNDICE F – EQUIPAMENTO, GEOMETRIA DA BICICLETA E RESULTADOS DO ESTUDO AERODINÂMICO DO CICLISTA B

Roda da frente:	ZIPP 808 NSW CCL (Carbon Clincher), 18 raios SAPIM CX Sprint 1.25 x 2.25 mm, momento de inércia 0.07980 kg.m^2
Roda de trás:	ZIPP 808 NSW CCL (Carbon Clincher), 24 raios SAPIM CX Sprint 1.25 x 2.25 mm, momento de inércia 0.08148 kg.m^2
Pneu da roda da frente	Continental GP 5000 622-23C
Pneu da roda de trás	Continental GP 5000 622-25C
Câmara de ar da roda da frente	MICHELIN AIRCOMP LATEX 700C 22/23, Válvula Presta de 60 mm + Extensor Decathlon de 27 mm
Câmara de ar da roda de trás:	MICHELIN AIRCOMP LATEX 700C 22/23, Válvula Presta de 60 mm + Extensor Decathlon de 27 mm

Tabela FP.1 Caracterização das rodas de controlo usadas pelo ciclista B na realização dos testes.

Componentes da bicicleta	**NIMBLE TT 2017 Frame Size 52**
Bidon:	ELITE CRONO CX de 500 ml montado no seattube
Saca:	Nenhuma
Selim:	Selle Italia SLR Titanium SUPERFLOW S3 275×131 mm
Pedais	LOOK Kéo Blade
Extensores/guiador:	PROFILE DESIGN S-bend T2 Comprimento de 245 mm
Pedaleiro	SRAM RED GXP Crankset 11 SP 170 BCD 130
Prato grande:	SRAM ROAD TT 55T 10S 130
Prato pequeno:	SRAM ROAD 42T V4 130 AL3 BLK 11S
Desviador Frontal:	SRAM Force 22 Yaw 2x11s
Desviador Traseiro:	SRAM FORCE Short Cage 10s
Cassette:	SRAM OG-1090 11-25T
Corrente:	SRAM RED 22 com Quick Link SRAM 11 Sp - 108 elos
Luz da frente	Decathlon FL900 montada no guiador junto ao extensor direito do lado exterior do extensor.
Luz traseira	Luz chinesa cópia da CATEYE montada no seatpost com um o'ring.

Tabela FP.2: Equipamento específico das bicicletas utilizadas pelo ciclista B.

Equipamento do ciclista (roupa)	**NIMBLE TT 2017 Frame Size 52**
Fato:	Calções SRAM tamanho L + Jersey Granfondo do Gerês verde tamanho S
Capacete:	POC Cerebel Raceday Marine Blue, tamanho M (54-60 cm)
Óculos:	OAKLEY JawBreaker
Luvas:	sem luvas
Meias:	CASTELLI vermelhas curtas
Shoe Covers:	VELOTÓZE laranjas e curtas, tamanho M (39-42,5)
Edge 130	Garmin Edge 130 montado exteriormente ao extensor do lado esquerdo, com a parte de trás da abraçadeira do suporte de fixação ZIPP montada a 117 mm à frente do guiador e inclinado para a esquerda a 40° com a horizontal.

Tabela FP.3: Vestuário usado pelo ciclista B durante a execução dos testes.

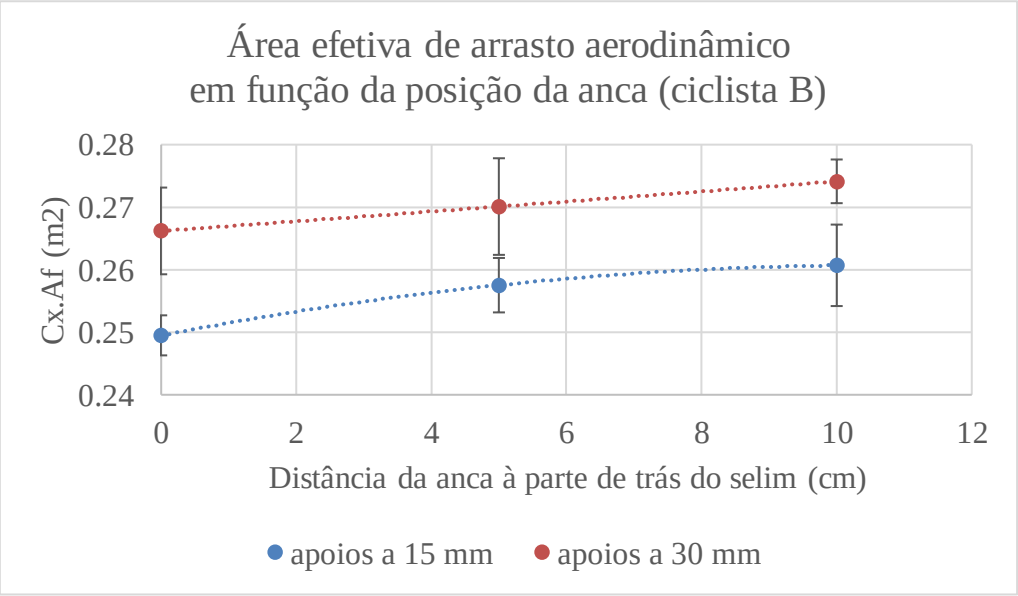


Figura FP.1: Resultados obtidos do estudo aerodinâmico efetuado para o ciclista. Podemos verificar que elevar os apoios de braços em 15 mm tem um impacto negativo na área efetiva de arrasto aerodinâmico do ciclista. Para o ciclista B, uma anca mais recuada permite a melhoria da eficiência aerodinâmica.

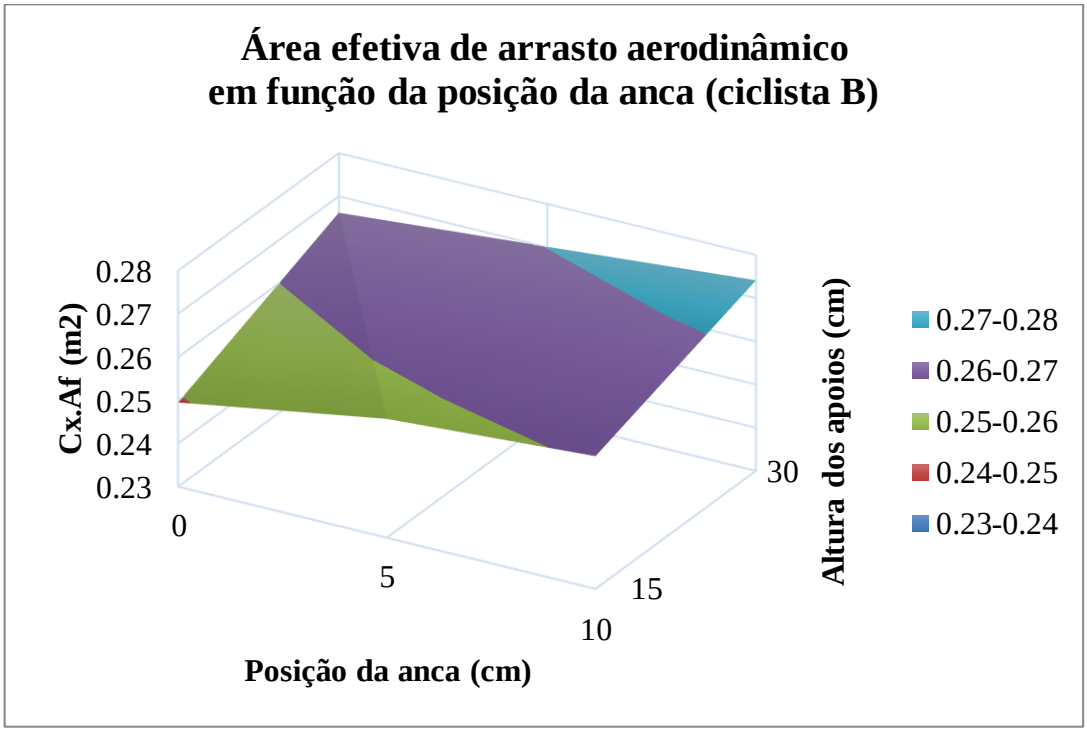


Figura FP.2: Superfície obtida correlacionando a posição da anca, a altura de apoios de braços e a área efetiva de arrasto aerodinâmico do ciclista

ANEXO A – COMPARAÇÃO DO USO DE CÂMARAS EM LATEX E DE CÂMARAS EM BUTIL (NORMAIS)

Atrito de rolamento com câmaras de ar de latex da Michelin				
Tipo de Pneu	GP 5000			
Largura do Pneu	**23-622**	**25-622**	**28-622**	**32-622**
Câmara de ar	Latex 80 g			
120 psi	8.5 Watt	8.4 Watt	8.0 Watt	7.8 Watt
100 psi	8.9 Watt	8.9 Watt	8.4 Watt	8.2 Watt
80 psi	10.2 Watt	10.0 Watt	9.2 Watt	9.0 Watt
60 psi	12.3 Watt	11.8 Watt	10.9 Watt	10.3 Watt

Tabela AN.1: Comparação entre o atrito de rolamento usando câmaras de latex e de butil, para o mesmo pneu. (Continental Grand Prix 5000 23, 25, 28, 32 mm Comparison, n.d.)

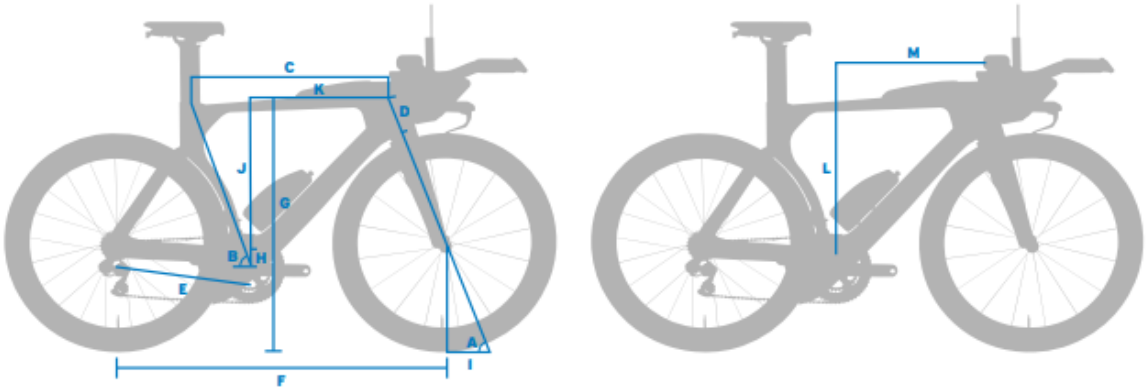
Atrito de rolamento com câmaras de ar de butil da Michelin				
Tipo de Pneu	GP 5000			
Largura do Pneu	**23-622**	**25-622**	**28-622**	**32-622**
Câmara de ar	Butil 100 g			
120 psi	10.0 Watt	10.0 Watt	9.7 Watt	9.2 Watt
100 psi	10.6 Watt	10.7 Watt	10.3 Watt	9.7 Watt
80 psi	12.2 Watt	12.1 Watt	11.5 Watt	11.0 Watt
60 psi	14.8 Watt	14.2 Watt	14.1 Watt	12.9 Watt

Tabela AN.2: Comparação entre o atrito de rolamento de pneus com diferentes espessuras para a mesma câmara de ar usada (Continental Grand Prix 5000 23, 25, 28, 32 mm Comparison, n.d.)

Câmara de ar	Massa (g)	60 psi	80 psi	100 psi	120 psi
Vittoria Latex 25/28	80	8.3 Watt	8.8 Watt	9.9 Watt	11.7 Watt
Tubolito S-Tubo Road	22	8.8 Watt	9.6 Watt	10.6 Watt	12.6 Watt
Conti Race 28 Light	75	9.3 Watt	9.9 Watt	11.0 Watt	13.1 Watt
Tubolito Tubo-Road	40	9.6 Watt	10.1 Watt	11.7 Watt	13.8 Watt
Schwalbe SV20 Light	73	9.7 Watt	10.4 Watt	11.5 Watt	13.7 Watt
Conti Race 28	102	10.0 Watt	10.7 Watt	12.1 Watt	14.2 Watt
Schwalbe SV 15	105	11.2 Watt	12.1 Watt	13.5 Watt	16.3 Watt

Tabela AN.3: Comparação entre o atrito de rolamento com diferentes marcas de câmaras de ar de latex. (Fonte: *https://www.bicyclerollingresistance.com/specials/tubolito*

ANEXO B– GEOMETRIA DA BICICLETA DE CONTRARRELÓGIO GIANT TRINITY ADVANCED PRO TT



LABEL	TRINITY ADVANCED PRO / TRINITY ADVANCED GEOMETRY					
	Frame Size		XS	S	M	L
A	Head Angle	Degrees	73.0	73.0	73.0	73.0
B	Seat Angle	Degrees	74.7/76.2/78	74.7/76.2/78	74.7/76.2/78	74.7/76.2/78
C	Toptube	Centimeters	56.8	58.0	60.2	60.8
D	Headtube	Centimeters	8.0	11.0	14.0	17.0
E	Chainstay	Centimeters	40.5	40.5	40.5	40.5
F	Wheelbase	Centimeters	96.7	98.8	100.3	101.8
G	Standover Height	Centimeters	74.2	76.7	79.0	83.6
H	B.B. Drop	Centimeters	6.5	6.5	6.5	6.5
I	Trail	Centimeters	6.1	6.1	6.1	6.1
J	Stack	Centimeters	48.2	51.0	53.9	56.8
K	Reach	Centimeters	39.8	41.0	41.7	42.3
L	Armrest Stack (Triathlon)	Centimeters	55.0 - 58.0	58.0 - 61.0	61.0 - 64.0	64.0 - 67.0
L	Armrest Stack (TT)	Centimeters	52.2 - 55.2	55.2 - 58.2	58.2 - 61.2	61.2 - 64.2
M	Armrest Reach (Triathlon)	Centimeters	40.3 - 46.3	41.5 - 47.5	42.2 - 48.2	42.8 - 48.8
M	Armrest Reach (TT)	Centimeters	41.1 - 47.1	42.3 - 48.3	43.0 - 49.0	43.6 - 49.6

Tabela BN.1: Geometria completa da bicicleta de contrarrelógio usada no estudo. (Giant, n.d)

ANEXO C– DADOS RELATIVOS À BICICLETA DE ESTRADA USADA PELO CICLISTA A E DA BICICLETA USADA PELO CICLISTA B

MODELL		LITENING SUPER HPC						
RAHMENGRÖSSE		50cm	53cm	56cm	58cm	60cm	62cm	64cm
SITZROHR MM	A	460	490	520	540	560	580	600
SITZROHR MITTE-MITTE MM	A'	408	438	468	488	508	528	548
OBERROHR MM	B	505	515	531	544	554	564	574
OBERROHR HORIZONTAL MM	B'	520	530	545	560	570	580	590
SITZWINKEL GRAD	C	74,5	74,0	73,5	73,0	73,0	73,0	73,0
STEUERRÖHRWINKEL GRAD	D	71,0	71,5	72,0	73,0	73,0	73,0	73,0
KETTENSTREBEN MM	E	406	406	406	406	406	406	406
STEUERROHR MM	F	120	130	145	165	185	205	220
RADSTAND MM	G	979	980	987	988	998	1008	1018
TRETLAGERHÖHE ZUR NABENACHSE MM	H	-68	-68	-65	-65	-65	-65	-65
REACH MM	R	377	379	385	388	392	396	410
STACK MM	S	516	528	541	563	582	601	616

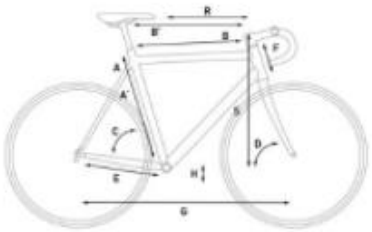
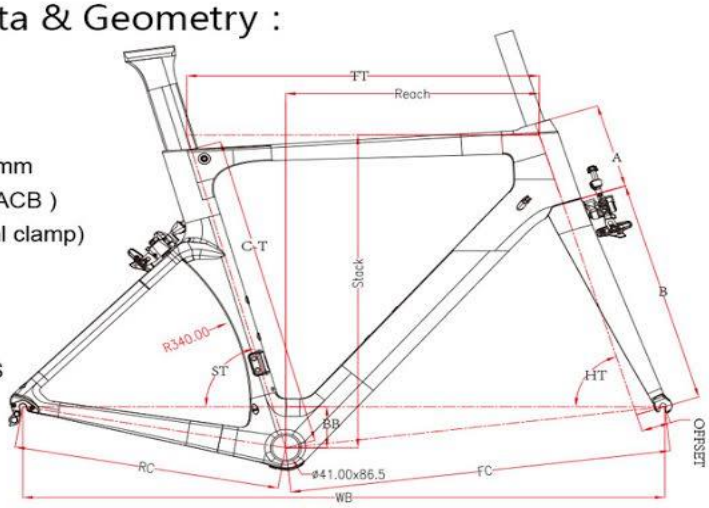


Tabela CN.1: Geometria do quadro da bicicleta de estrada normal usada no estudo

Frame Technical Data & Geometry :

Finish: UD/3K
Size: 49/52/54/56/59cm
Weight: 1150g/54cm
Head tube: integrated 42mm/52mm
(HeadsetFSA NO.42 ACB)
Seat post: special shape (special clamp)
BB shell: BB86
Front brake: caliper brake
Rear brake: SHIMANO
9010/6810/5810-RS



LCR006																		
SIZE	C-T	A	B	Offset	TT	HT	ST	BB	RC	WB	FC	RD	FD	STACK	REACH	POST	H/T INSERT	BB INSERT
49	480	130	370	45	515	71.5°	74.5°	69	405	967.6	572.7	Inner	Inner	510	373.4	Special	FSA NO: 42 ACB	BB86
52	500	135	370	45	525	72°	74.5°	69	405	973.6	578.6			516.5	381.8			
54	520	140	370	45	535	72.5°	74°	69	405	974.5	579.5			523.7	384.8			
56	540	160	370	45	545	73°	73.5°	69	405	975.2	580.3			543.2	385			
59	560	180	370	45	560	73°	73.5°	69	405	990	595			558.3	395			

Tabela I.2: Geometria do quadro da bicicleta usado pelo ciclista B no estudo.