



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

José Carlos Barbosa Cabral

OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE CICLISTAS
DE COMPETIÇÃO BASEADA NA MEDIÇÃO
EXPERIMENTAL DO SEU ARRASTO
AERODINÂMICO E POTÊNCIA

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, na Especialidade de Energia e Ambiente, orientada pelo Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira, apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2022

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Otimização do Desempenho de Ciclistas de Competição Baseada na Medição Experimental do seu Arrasto Aerodinâmico e Potência

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

Autor

José Carlos Barbosa Cabral

Orientador

Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira

Júri

Presidente Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes
Professor Associado da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra



Universidade de
Coimbra - Faculdade
de Ciências e
Tecnologia

Coimbra, julho, 2022

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz.”

Ayrton Senna

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio do meu orientador Pedro Carvalheira, que se mostrou sempre disponível não só para a resolução de todos os problemas que foram surgindo ao longo deste trabalho como para a realização de todos os ensaios realizados.

Agradecer aos meus familiares, com especial referência aos meus pais Joaquim e Anabela e os meus irmãos António e João, pelo apoio dado ao longo deste trabalho e dos 5 anos do curso.

Por fim, agradecer aos meus amigos de Coimbra pela forma como me acolheram e pelo apoio dado durante os 5 anos.

Resumo

As corridas de ciclismo cada vez mais se decidem à milésima de segundo, caso de provas por etapas, ou ao milímetro, caso das provas de um dia, pelo que qualquer melhoria que possa ser feita pode ser a diferença entre a vitória ou a derrota.

O objetivo deste trabalho foi melhorar o desempenho de ciclistas de competição baseado na medição experimental do $C_x A_f$, da área frontal e da sua potência. O $C_x A_f$ do conjunto ciclista + bicicleta é proporcional ao seu arrasto aerodinâmico.

Para tal, foram usados métodos já desenvolvidos por outros autores, com algumas tentativas de melhoria desses métodos com o objetivo de diminuir o desvio padrão dos resultados dos mesmos. Foram também testados diferentes equipamentos utilizados pelo ciclista, diferentes componentes da bicicleta e diferentes posições do ciclista de modo a aferir os melhores equipamentos a utilizar pelo ciclista, os melhores componentes da bicicleta e a melhor posição do ciclista para que tenha o melhor desempenho possível. Por fim realizou-se um estudo com o intuito de perceber a melhor posição do ciclista em função do seu arrasto aerodinâmico e da sua potência.

Com este trabalho foi possível concluir que a melhor posição adotada pelo ciclista não será igual durante toda a realização de uma prova estando esta dependente do declive longitudinal da estrada que o ciclista vai enfrentando durante a prova.

Foi também possível melhorar o método de medição do $C_x A_f$ com a implementação de uma forma mais precisa de medição da velocidade da bicicleta.

Além disso foi possível observar com este trabalho que pequenas mudanças na configuração utilizada podem levar a diferenças de desempenho consideráveis.

Por fim foi também possível observar que a determinação da área frontal está fortemente dependente da capacidade de o ciclista replicar posições.

Palavras-chave: Arrasto aerodinâmico, Área frontal, Potência, Ciclismo, Desempenho, Posição do ciclista.

Abstract

Cycling races are increasingly being decided to the millisecond, in the case of stage events, or to the millimeter, in the case of one-day events, so any improvement that can be made can be the difference between victory or defeat.

The aim of this work was to improve the performance of competitive cyclists based on the experimental measurement of their $C_x A_f$, frontal area and power output. The $C_x A_f$ of the set cyclist + bicycle is proportional to its aerodynamic drag.

For that, methods already developed by other authors were used, with some attempts to improve these methods in order to reduce the standard deviation of their results. Different equipment used by the cyclist, different components of the bicycle and different positions of the cyclist were also tested in order to assess the best equipment to be used by the cyclist, the best components of the bicycle and the best position of the cyclist to have the best possible performance. Finally, a study was carried out in order to understand the best position of the cyclist according to his aerodynamic drag and power.

With this work it was possible to conclude that the best position adopted by the cyclist will not be the same during all the duration of a race, as it depends on the longitudinal slope of the road that the cyclist will face during the race.

It was also possible to improve the method of measurement of $C_x A_f$ with the implementation of a more accurate way of measuring the bicycle speed.

Moreover, it was possible to observe with this work that small changes in the configuration used can lead to considerable performance differences.

Finally, it was also possible to observe that the determination of the frontal area is strongly dependent of the ability of the cyclist to replicate positions.

Keywords: Aerodynamic Drag, Frontal area, Power output, Cycling, Performance, Cyclist position.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Símbolos gregos	xvi
Siglas	xvi
1. Introdução.....	1
2. Revisão bibliográfica.....	7
2.1. Métodos de medição da área frontal do conjunto ciclista + bicicleta.....	7
2.2. Métodos existentes para testes no terreno.....	11
2.2.1. Método de “reboque” ou método de medição da resistência à tração	11
2.2.2. Análise recorrendo a uma regressão linear.....	12
2.2.3. Método da desaceleração.....	13
2.3. Componentes testados.....	14
2.3.1. Rodas	14
2.3.2. Quadros.....	17
2.3.3. Guiador e extensores	18
2.3.4. Capacetes	21
2.3.5. Fatos	22
3. Metodologia.....	25
3.1. Cálculo de CxAf	25
3.1.1. Local	25
3.1.2. Procedimento na realização dos ensaios.....	28
3.1.3. Descrição do método	29
3.1.4. Dados a medir.....	34
3.2. Cálculo da potência desenvolvida pelo ciclista	35
3.2.1. Local	35
3.2.2. Descrição do método	37
3.2.3. Procedimento na realização dos ensaios.....	39
3.2.4. Dados a medir.....	39
4. Configurações do conjunto.....	41
4.1. Configuração 0.....	41
4.1.1. Configuração da bicicleta	41
4.1.2. Configuração do ciclista	43
4.1.3. Posições do ciclista na bicicleta.....	43
4.2. Configuração 1	45
4.3. Configuração 2.....	46
4.4. Configuração 3.....	47
5. Resultados.....	49
5.1. CxAf	49

5.1.1.	Configuração 0	49
5.1.2.	Configuração 1	50
5.1.3.	Configuração 2	50
5.1.4.	Configuração 3	51
5.2.	Área frontal (Af)	52
5.2.1.	Configuração 0	52
5.2.2.	Configuração 2	53
5.3.	Coeficiente da força aerodinâmica segundo x (Cx)	54
5.3.1.	Configuração 0	54
5.3.2.	Configuração 1	54
5.3.3.	Configuração 2	55
5.3.4.	Configuração 3	56
5.4.	Potência	56
5.5.	Posição ideal em função da inclinação da estrada	57
6.	Análise de resultados.....	59
6.1.	CxAf	59
6.1.1.	Configuração 0	59
6.1.2.	Configuração 1	59
6.1.3.	Configuração 2	59
6.1.4.	Configuração 3	60
6.2.	Área frontal.....	60
6.2.1.	Configuração 0	60
6.2.2.	Configuração 2	61
6.3.	Cx	61
6.3.1.	Configuração 0	61
6.3.2.	Configuração 1	61
6.3.3.	Configuração 2	62
6.3.4.	Configuração 3	62
6.4.	Potência	62
6.5.	Posição ideal em função da inclinação da estrada.....	62
7.	Conclusões	65
7.1.	CxAf	65
7.2.	Área frontal.....	66
7.3.	Potência	66
7.4.	Posição ideal em função da inclinação da estrada.....	67
	Referências Bibliográficas	69
	ANEXO A - Outras medidas da configuração 0	73
	ANEXO B - Valores PP	75
	ANEXO C - Tempo total de prova.....	77
	ANEXO D - Desvio padrão das configurações 1, 2 e 3	79
	APÊNDICE A - Coeficiente de resistência ao rolamento usado	81
	APÊNDICE B - Momento de inércia das rodas	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Artigo do jornal Record - retirado de [1].	1
Figura 1.2. “Photo finish” da prova Amstel Gold Race 2019 - retirado de [2].	1
Figura 1.3. Evandro Portela na tentativa de recorde de velocidade - retirado de [4].	2
Figura 1.4. Greg LeMond no contrarrelógio final da volta a França de 1989 - retirado de [6].	3
Figura 2.1. Representação dos ângulos necessários para o cálculo da área frontal - retirado de [12].	7
Figura 2.2. Ciclista posicionado para a aplicação do método de pesagem de fotografias - retirado de [12].	9
Figura 2.3. Imagem a preto e branco do conjunto ciclista + bicicleta no programa Scion Image Release Alpha - retirado de [12].	10
Figura 2.4. Imagem de um ciclista pronta a ser utilizada num programa CAD - retirado de [12].	11
Figura 2.5. Esquema da zona de ensaios do método da desaceleração - retirado de [12].	13
Figura 2.6. (a) Ilustração das rodas aerodinâmicas inventadas por Arthur Hide em 1890 - retirado de [20]; (b) Rodas aerodinâmicas utilizadas hoje em dia - retirado de [21].	14
Figura 2.7. Bicicleta de estrada usada por Tadej Pogačar na volta à França de 2021 - retirado de [23].	15
Figura 2.8. Gráfico realizado por Berto da pressão ideal dos pneumáticos em função do peso suportado - retirado de [25].	16
Figura 2.9. Gráfico do arrasto aerodinâmico da roda em função da razão entre a largura do pneu e do aro - retirado de [26].	17
Figura 2.10. (a) Esboço da bicicleta de Humber - retirado de [20]; (b) Bicicleta usada por Victor Campenaerts na tentativa de recorde da hora - retirado de [20].	17
Figura 2.11. Bicicleta usada por Chris Boardman na tentativa de recorde da hora em 1996 - retirado de [20].	18
Figura 2.12. Representação da primeira bicicleta com guiador aerodinâmico - retirado de [20].	19
Figura 2.13. Imagem de uma das inovações feitas durante a década de 70 - retirado de [20].	19
Figura 2.14. (a) Imagem dos primeiros extensores, equipados numa bicicleta de estrada - retirado de [20]; (b) Extensores usados nos dias de hoje - retirado de [20]; (c) Detalhes dos primeiros extensores - retirado de [20]; (d) Detalhes dos extensores atuais - retirado de [20].	20

Figura 2.15. (a) Capacete típico de provas de contrarrelógio - retirado de [30]; (b) Capacete típico de provas de estrada - retirado de [30].	21
Figura 2.16. Razão $c_d/c_d(\text{nude})$ em função da velocidade do ciclista para vários fatos - retirado de [35].	23
Figura 3.1. Avenida Elísio de Moura.	26
Figura 3.2. (a) Local de início da zona de ensaios; (b) Local do fim da zona de ensaios; (c) Ponto intermédio de validação dos resultados; (d) Percurso total da zona de ensaios.	27
Figura 3.3. Altitude da zona de ensaios em função da distância percorrida pelo ciclista.	28
Figura 3.4. Representação das forças que atuam sobre o conjunto ciclista + bicicleta - adaptado de [39].	30
Figura 3.5. Coeficiente de resistência ao rolamento em função da pressão de insuflação.	31
Figura 3.6. Potência de um ciclista em função do tempo de esforço - Retirado da aplicação Strava® do atleta Pedro Carvalheira.	36
Figura 3.7. (a) Início da zona de ensaios; (b) Fim da zona de ensaios; (c) Percurso total a ser percorrido durante um ensaio.	37
Figura 3.8. Forças que atuam sobre o conjunto ciclista + bicicleta durante o ensaio - adaptado de [43].	38
Figura 4.1. (a) Principais medidas no eixo horizontal da bicicleta; (b) Principais medidas no eixo vertical da bicicleta.	42
Figura 4.2. Configuração 0 usada pelo ciclista.	43
Figura 4.3. Configuração 0 usada pelo ciclista em posição de contrarrelógio.	44
Figura 4.4. Configuração 0 usada pelo ciclista em posição de maximizar a potência.	45
Figura 4.5. Configuração 1.	46
Figura 4.6. Configuração 2.	47
Figura 4.7. Configuração 3.	48
Figura 5.1. Evolução de $C_x A f$ em função de D_{as} para a configuração 0.	49
Figura 5.2. Efeito da mudança do fato do ciclista na evolução do produto $C_x A f$ em função de D_{as} .	50
Figura 5.3. Efeito da mudança do capacete do ciclista na evolução do produto $C_x A f$ em função de D_{as} .	51
Figura 5.4. Efeito da mudança da roda da frente da bicicleta na evolução do produto $C_x A f$ em função de D_{as} .	51
Figura 5.5. (a) Imagem original do conjunto ciclista + bicicleta; (b) Imagem após processamento no programa <i>Adobe Photoshop 2020</i> ; (c) Imagem final no programa <i>ImageJ</i> .	52

Figura 5.6. Evolução da área frontal do conjunto ciclista + bicicleta em função de D_{as} nas posições de contrarrelógio.....	53
Figura 5.7. Efeito da mudança do capacete do ciclista na evolução da área frontal em função de D_{as}	53
Figura 5.8. Evolução do Cx do conjunto ciclista + bicicleta em função de D_{as} na configuração 0.	54
Figura 5.9. Efeito da mudança do fato do ciclista na evolução de Cx em função de D_{as}	55
Figura 5.10. Efeito da mudança do capacete do ciclista na evolução de Cx em função de D_{as}	55
Figura 5.11. Efeito da mudança da roda da frente da bicicleta no Cx em função da D_{as}	56
Figura 5.12. Evolução da potência debitada pelo ciclista em função da frequência cardíaca para várias posições.....	57
Figura 5.13. Tempo total de prova em função da inclinação longitudinal da estrada, em subida.....	58
Figura 5.14. Tempo total de prova em função da inclinação longitudinal da estrada, em descida.	58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Comparação de guiadores realizada por Defraeye et al. - retirado de [27].	20
Tabela 2.2. Comparação de alguns fatos feita por Spurkland et al. - retirado de [34].	22
Tabela 2.3. Perdas de desempenho devido a uma má escolha do tamanho do fato - retirado de [34].	22
Tabela 3.1. Dados a serem medidos para o cálculo do $CxAf$ e os seus instrumentos.	35
Tabela 3.2. Dados medidos no ensaio de potência e os instrumentos utilizados.	40
Tabela 4.1. Principais componentes da bicicleta GIANT TRINITY ADVANCED PRO TT 2017 Frame Size XS.	41
Tabela 4.2. Principais elementos utilizados pelo ciclista.	43

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

a	Aceleração [m^2/s^2].
A_{BSA}	Área superficial corporal [m^2].
A_f	Área frontal [m^2].
C_R	Coefficiente de resistência ao rolamento [-].
C_x	Coefficiente da componente da força aerodinâmica segundo x [-].
D	Diâmetro [m].
D_{as}	Distância entre a anca e a parte de trás do selim [cm].
d	Distância percorrida [m].
$d_{R,K}$	Distância entre o centro de massa do componente k da roda e o eixo de rotação da roda
E	Energia total do sistema [J].
E_d	Energia despendida [J].
\vec{F}_{Ax}	Componente da força aerodinâmica segundo x [N].
\vec{F}_j	Força não conservativa j [N].
\vec{F}_R	Força de resistência ao rolamento [N].
f_{RF}	Fração de peso da roda da frente [-].
G	Inclinação da estrada [%].
g	Aceleração normal da gravidade [m/s^2].
h	Altitude [m].
h_b	Altura do ciclista [cm].
h_i	Altura do pneu [m]
I	Momento de inércia [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$].
k	Relação de proporcionalidade entre a resistência total e o quadrado da velocidade [$\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2$].
L	Comprimento do capacete [m].
$M_{a,h}$	Massa molar do ar húmido [kg/mol].
$M_{a,s}$	Massa molar do ar seco [kg/mol].
M_{CO_2}	Massa molar do dióxido de carbono [kg/mol].
$M_{\text{H}_2\text{O}}$	Massa molar da água [kg/mol].
M_t	Massa total do conjunto [kg].
m_b	Massa do ciclista [kg].
m_k	Massa do componente k da roda [kg]
P	Potência do ciclista [W].
P_b	Pressão barométrica [Pa].
p_0	Pressão atmosférica ao nível do mar [Pa].
p_a	Pressão atmosférica [Pa].
p_{pneu}	Pressão relativa de insuflação do pneu [psi].
$p_{v,s}$	Pressão do vapor saturado [Pa].

p_{vapor}	Pressão de vapor da água [Pa].
R_u	Constante do gás universal [J/mol·K].
R_D	Forças resistivas aerodinâmicas [N].
Re	Número de Reynolds [-].
R_G	Força de resistência a inclinação da estrada [N].
RH	Humidade relativa [%].
R_R	Força de resistência ao rolamento [N].
R_t	Força resistiva total [N].
\vec{s}	Vetor deslocamento [m].
T_a	Temperatura do ar [°C].
v	Velocidade do conjunto [m/s].
v_a	Velocidade do teste [m/s].
$v_{\text{méd}}$	Velocidade média do conjunto [m/s].
v_{vento}	Velocidade do vento a 10 m de altura [m/s].
$v_{\text{v méd,p}}$	Velocidade média do vento paralelo ao conjunto [m/s].
V_{O_2}	Taxa de consumo de oxigénio [%].

Símbolos gregos

ΔH_{vapor}	Entalpia de vaporização [J/kg].
Δt	Diferença de tempo [s].
η_{tr}	Rendimento da transmissão [-].
θ	Ângulo de inclinação longitudinal da superfície da estrada [°].
ρ	Massa volúmica do ar [kg/m ³].
ρ_0	Massa volúmica do ar seco a 273 K e 760 mmHg, [kg/m ³].
ρ_a	Massa volúmica do ar a altitude média da zona de testes [kg/m ³].
χ_{Ar}	Fração molar do Árgon [-].
χ_{CO_2}	Fração molar de dióxido de carbono [-].
χ_{N_2}	Fração molar de Azoto [-].
χ_{O_2}	Fração molar de Oxigénio [-].
ψ_{P-C}	Azimute do percurso entre os pontos de partida e de chegada [°].
ψ_{vento}	Azimute de onde sopra o vento [°].

Síglas

3D	Três dimensões.
CAD	Computer-aided Design.
CFD	Computational Fluid Dynamics.
GPS	Global Positioning System.
PM	Ponto de medida.
PP	Ponte pedonal.
UCI	União Ciclista Internacional.
WT	Túnel de vento.

1. INTRODUÇÃO

As provas de ciclismo disputadas por etapas são muitas vezes disputadas à milésima de segundo, como se pode ver na Fig. 1.1, em que o ciclista português João Almeida ficou a 53 milésimas de segundo do quinto lugar de Daniel Martínez, após 21 dias de prova e 3479,9 km percorridos [1].

João Almeida acaba Giro'2021 em 6.º e fica a 53 milésimos do 5.º

Português subiu duas posições no último dia, mas ficou a uma unha negra de Daniel Martínez



Figura 1.1. Artigo do jornal Record - retirado de [1].

No que diz respeito às provas típicas de um dia, estas têm a tendência de ser disputadas num sprint final entre os corredores, sendo por vezes necessário o recurso ao “photo finish” para determinar o vencedor da mesma, como se pode ver na Fig. 1.2, em que Tom Pidcock perde a corrida por uma questão de milímetros face a Wout van Aert, após 218,6 km de corrida [2].



Figura 1.2. “Photo finish” da prova Amstel Gold Race 2019 - retirado de [2].

Pode-se então afirmar que qualquer melhoria feita no rendimento do conjunto ciclista + bicicleta pode ser a diferença entre a glória e a angustiante sensação de derrota.

Para se melhorar o rendimento do ciclista pode-se optar por dois caminhos, que vão ser o tema principal desta dissertação de mestrado, diminuição das forças resistivas ao movimento e maximização da potência produzida pelo ciclista.

As forças resistivas ao movimento são constituídas por 2 tipos principais:

- Resistência aerodinâmica.
- Resistência ao rolamento.

Segundo Grappe et al. [3], as forças de resistência aerodinâmica, proporcionais ao produto C_dA representam 90% do total das forças resistivas ao movimento para velocidades superiores a 50 km/h. Velocidades essas muitas vezes atingidas pelos ciclistas de alta competição em descidas e em terreno plano, pelo que a sua otimização será fulcral no desempenho dos ciclistas.

Como exemplo do papel que as forças de resistência aerodinâmica podem ter na velocidade de um ciclista, vou apresentar o recorde de velocidade numa bicicleta sem ajuda motora.

Este recorde reconhecido pelo famoso “Guinness World Records”, consistiu em um ensaio em que o ciclista pedala atrás de um carro que vai a rebocar uma estrutura em acrílico com o objetivo de reduzir a velocidade relativa entre o ar e o ciclista e assim reduzir as forças resistivas aerodinâmicas. Como se pode ver na Fig. 1.3, através deste procedimento o atleta brasileiro, ex-ciclista profissional Evandro Portela, conseguiu atingir o recorde de velocidade com um valor de 202 km/h. Apesar deste feito incrível Evandro acredita que é possível chegar aos 280 km/h, velocidade essa que a maior parte dos carros não conseguem atingir [4].



Figura 1.3. Evandro Portela na tentativa de recorde de velocidade - retirado de [4].

Outro exemplo, este mais ligado ao ciclismo de competição, que prova a importância da diminuição das forças resistivas aerodinâmicas, é o caso da “batalha” entre Greg LeMond e Laurent Fignon.

Neste exemplo, à chegada do último contrarrelógio individual da volta a França de 1989, LeMond tinha 50 s de atraso para Fignon. Com um contrarrelógio de 24,5 km pela frente parecia impossível a recuperação da desvantagem, principalmente se tivéssemos em

conta que nessa mesma prova num contrarrelógio de 39 km tinha “apenas” ganho 47 s a Fignon. No entanto, para surpresa de todos LeMond apresentou uma bicicleta totalmente diferente das bicicletas convencionais de estrada. Esta nova bicicleta apresentada na Fig. 1.4, possuía duas características das bicicletas de contrarrelógio dos dias de hoje [5, 6]:

- Extensores.
- Roda traseira lenticular.

Para além disso LeMond ainda utilizou um capacete aerodinâmico, numa época em que a maior parte dos ciclistas não usava capacete, uma posição mais aerodinâmica e uma garrafa de água mais aerodinâmica. Para utilizar estas características distintas dos restantes LeMond realizou testes em túnel de vento.



Figura 1.4. Greg LeMond no contrarrelógio final da volta a França de 1989 - retirado de [6].

Devido à sua boa capacidade de contrarrelógio e às modificações implementadas na bicicleta e nos acessórios, LeMond conseguiu o objetivo final, a conquista da volta a França, com uma vantagem de 8 s sobre Fignon. Esta ainda hoje é a menor diferença entre 1º e 2º classificados na prova mais desejada do calendário mundial de ciclismo.

Será então necessário definir uma forma de calcular as forças resistivas ao movimento com o objetivo de as mesmas serem diminuídas. Para tal pode-se recorrer a 3 tipos de testes [7]:

- Teste em túnel de vento.
- Simulações CFD.
- Testes no terreno com recurso a modelos matemáticos.

Apesar de serem bastante interessantes e de ser possível controlar as condições atmosféricas durante os ensaios, os ensaios em túnel de vento apresentam algumas limitações [8]:

- Custo, um dia de ensaios em túnel de vento pode custar entre 5000 € e 10000 €.
- Se as rodas da bicicleta estiverem imóveis, o efeito do fluxo sobre as mesmas em movimento não é medido.

- A posição do ciclista no teste não é exatamente igual à real devido a possíveis movimentos do ciclista durante a prova.
- O pedalar provoca modificações da resistência aerodinâmica e não são tidos em conta neste tipo de testes.

Relativamente às simulações CFD, apesar de também serem bastante interessantes e de se poder mais uma vez controlar as condições atmosféricas através dos dados de entrada, apresentam grandes limitações em investimento necessário. Isto porque será necessário adquirir um computador com elevado poder de computação para correr a simulação e será também necessário adquirir um scanner 3D para a digitalização do conjunto ciclista + bicicleta. Um scanner com precisão superior a 0,1 mm custa entre 6000 \$ e 30000 \$ [9].

A solução com menor custo, mas nem por isso menos eficiente, são os testes no terreno com recurso a modelos matemáticos.

Neste tipo de testes será necessário recolher alguns dados durante o teste, com recurso a aparelhos de medição meteorológica, ao GPS e sensores de velocidade. Posteriormente será necessário um computador para processar os dados.

Este último tipo de testes será o usado na minha dissertação, por se tratar de uma solução de baixo custo e ao alcance de um ciclista amador, e pelo facto de permitir obter resultados tão credíveis ou em alguns casos mais credíveis que os outros dois tipos de testes.

Schade et al. [10] constataram que ao contrário de testes de WT e de testes CFD, testes no terreno permitem avaliar o conforto do ciclista nas posições testadas.

Outra das vantagens deste tipo de testes reside no facto de considerar a resistência ao rolamento, apesar de esta não ter tanta influência nas forças resistivas como a resistência aerodinâmica, que também poderá produzir diferenças no desempenho do ciclista, pelo que o seu efeito não deverá ser menosprezado.

A grande desvantagem deste tipo de testes em relação aos outros dois tipos de testes é a imprevisibilidade da natureza e a sua constante mudança ao longo do teste, problema que se tenta minimizar com recurso a dispositivos de elevada precisão na medição dos dados meteorológicos.

Outro problema que pode surgir neste tipo de testes é a comparabilidade entre resultados de testes de diferentes autores. Devido às seguintes razões:

- Possibilidade de uso de diferentes técnicas para medir o arrasto aerodinâmico.
- Possibilidade de ser considerado o movimento dos pedais durante o teste.
- Diferenças ergonómicas entre os ciclistas testados, ciclistas maiores regra geral têm maior arrasto aerodinâmico que os mais pequenos.
- Diferenças entre as posições adotadas, é muito difícil ao ciclista representar a mesma posição entre testes, tendo sempre pequenas variações entre a mesma posição.
- Equipamento usado.
- Diferentes pressupostos para obter o coeficiente de resistência ao rolamento.

Para além do estudo das forças resistivas terá interesse estudar a potência desenvolvida pelo ciclista porque esta é a única forma de serem vencidas as forças resistivas ao movimento, a não ser que se encontre em uma descida e nessa situação a transformação de energia potencial em energia cinética poderá vencer essas forças resistivas.

Por fim será bastante interessante estudar a combinação do valor da potência desenvolvida pelo ciclista e da sua força resistiva associada. Isto porque por mais que uma

esteja otimizada se a outra estiver muito longe do ideal poder-se-á estar a perder rendimento global.

Deve ainda ser mencionado que as características ideais para um ciclista podem ser diferentes das de outro ciclista, isto acontece porque a altura, peso e musculação de dois ciclistas não são iguais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta secção irão ser apresentados métodos e trabalhos com a mesma finalidade da minha dissertação.

2.1. Métodos de medição da área frontal do conjunto ciclista + bicicleta

Ao longo dos anos foram surgindo vários métodos para medir a área frontal do conjunto, sendo de elevada importância a sua medição uma vez que o arrasto aerodinâmico do conjunto está fortemente dependente deste fator.

O primeiro método a surgir foi o método de di Prampero et al. [11], em que é assumido que a área frontal do conjunto é uma fração da área superficial do ciclista. Para a determinação da área superficial di Prampero et al. utilizavam a Eq. (2.1).

$$A_{BSA} = 0,00949 \times h_b^{0,655} \times m_b^{0,441} \quad (2.1)$$

No entanto, Heil em 2001 [13] provou que isto só acontecia para ciclistas com massas entre 60 e 80 kg.

Alguns anos mais tarde surgiu um novo método que tem como pressuposto que a área frontal do conjunto, A_f , é dependente da massa do ciclista, m_b , do ângulo entre o tronco do ciclista e a horizontal (representado como δ , na Fig. 2.1) e do ângulo do tubo do selim e a horizontal (representado como β , na Fig. 2.1). A equação que traduz a correlação entre estes parâmetros é a Eq. (2.2) [12].

$$A_f = 0,00433 \times \beta^{0,172} \times \delta^{0,096} \times m_b^{0,762} \quad (2.2)$$

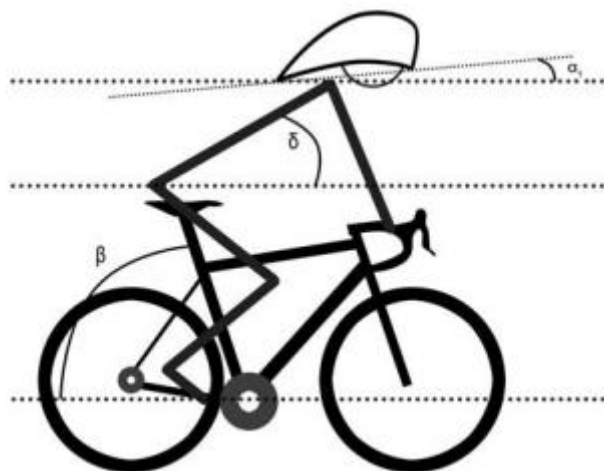


Figura 2.1. Representação dos ângulos necessários para o cálculo da área frontal - retirado de [12].

No entanto, mais uma vez o método foi refutado, desta vez por Garcia-Lopez et al. [14], demonstrando que existe uma fraca correlação entre o ângulo δ e a área frontal do conjunto ($r = 0,42$; $p < 0,5$).

Por fim, Barelle et al. [15] definiram o modelo matemático mais recente para a determinação da área frontal, A_f . Para este modelo ser aplicável é necessário que o ciclista se encontre em posição aerodinâmica com extensores e capacete de contrarrelógio aerodinâmico.

Para este modelo de Barelle et al. é considerado que a área frontal do conjunto, A_f , está dependente da massa do ciclista, m_b , da altura do ciclista, h_b , do comprimento do capacete, L e do ângulo do capacete com a horizontal (representado por α_1 na Fig. 2.1). A correlação entre estes parâmetros pode ser vista na Eq. (2.3).

$$A_f = 0,045 \times h_b^{1,15} \times m_b^{0,2794} + 0,329 \times (L \times \sin \alpha_1) \quad (2.3)$$

Apesar de serem interessantes os modelos matemáticos ficam muitas vezes restringidos a uma determinada posição ou perfil atlético do atleta pelo que será necessário optar por outro tipo de caminho para obter a área frontal do conjunto.

Com o avançar da tecnologia, em particular das câmaras fotográficas, foram desenvolvidos três métodos para a obtenção da área frontal do conjunto.

O primeiro a surgir foi o método de pesagem de fotografias. Para este método é necessária uma câmara fotográfica de boa qualidade, uma impressora para imprimir a fotografia, uma balança de elevada precisão, um retângulo de papel para calibração e um instrumento de corte.

O método de aplicação deste método é bastante simples, tendo o seguinte procedimento [16]:

1. Colocar o ciclista na posição pretendida.
2. Colocar o retângulo de calibração ao lado do ciclista, a metade da distância entre a anca e os ombros.
3. Tirar uma fotografia de plano frontal do conjunto ciclista + bicicleta e do retângulo de calibração, como a apresentada na Fig. 2.2.
4. Imprimir a fotografia com a impressora.
5. Com recurso ao instrumento de corte, cortar o conjunto ciclista + bicicleta e de seguida o retângulo de calibração.
6. Peser o conjunto e o retângulo de calibração, com recurso a balança de elevada precisão.
7. Sabendo a área do retângulo de calibração e o seu peso, calcular a área do conjunto através de relação de proporcionalidade, sabendo o peso do conjunto.



Figura 2.2. Ciclista posicionado para a aplicação do método de pesagem de fotografias - retirado de [12].

Apesar de bastante eficiente na obtenção da área frontal, tal como foi provado por Debraux et al. [16], este método apresenta como grande limitação a dificuldade na precisão de corte da fotografia para a sua pesagem.

Com a evolução dos processos de digitalização e dos computadores foi possível desenvolver um novo método. Desta vez para a aplicação deste método apenas é necessário um computador, um retângulo de calibração e uma câmara fotográfica.

Novamente o procedimento para a aplicação deste método é bastante simples, tendo os seguintes passos [16]:

1. Colocar o ciclista na posição pretendida.
2. Colocar o retângulo de calibração ao lado do ciclista, a metade da distância entre a anca e os ombros.
3. Tirar uma fotografia de plano frontal do conjunto ciclista + bicicleta e do retângulo de calibração, como a representada na Fig. 2.2.
4. Transformar a fotografia numa foto a preto e branco, como representado na Fig. 2.3, para que o ciclista e a bicicleta sejam a parte escura da imagem. Para tal ser possível, será necessário tirar a fotografia num local com o fundo branco (parede de cor branca).
5. Inserir a fotografia no programa *Scion Image Release Alpha 4.0.3.0.2 for Windows*.
6. Com recurso ao número de pixéis do retângulo de calibração, obtido através do programa e a sua área, obtém-se a área frontal do conjunto por uma relação de proporcionalidade, sabendo o número de pixéis do conjunto, obtido através do programa.

Este método também é bastante eficiente e com maior facilidade de ser reproduzido que o anterior, pelo facto de não ser necessário o corte da imagem que pode criar erro na análise devido a erro humano no corte da mesma.



Figura 2.3. Imagem a preto e branco do conjunto ciclista + bicicleta no programa Scion Image Release Alpha - retirado de [12].

Através da evolução dos programas CAD foi possível desenvolver um novo método que não necessitasse de colocar um retângulo de calibração e em que a imagem fosse a preto e branco, permitindo assim obter os valores da área frontal sem necessidade de um fundo branco.

Para este novo método é necessária uma câmara fotográfica de alta qualidade, um computador com capacidade de correr programas CAD e um programa CAD que permita a obtenção da área frontal.

O procedimento para a realização deste método é simples e é o seguinte [16]:

1. Colocar o ciclista na posição pretendida.
2. Tirar uma fotografia de plano frontal do conjunto ciclista + bicicleta, como representado na Fig. 2.4.
3. Inserir a fotografia no programa CAD escolhido para o efeito
4. Traçar a área que se pretende medir com recurso a ferramenta “spline curve” no “sketch 2D”.
5. Inserir no programa uma medida conhecida da imagem (por exemplo largura do guiador, como representado na Fig. 2.4).
6. De seguida o programa faz os cálculos e devolve o valor da área frontal pretendida.



Figura 2.4. Imagem de um ciclista pronta a ser utilizada num programa CAD - retirado de [12].

Todos os 3 métodos foram comparados por Debraux et al. [16], chegando à conclusão que os 3 são válidos e produzem ótimos resultados para a determinação da área frontal do conjunto ciclista + bicicleta. A escolha do método a utilizar para a medição deve ser feita tendo em conta a capacidade do realizador dos testes de utilizar um instrumento de corte e a sua precisão, ou na capacidade de utilizar um computador e os seus programas.

2.2. Métodos existentes para testes no terreno

Ao longo do final dos anos 90 foram aparecendo vários tipos de testes, com o objetivo de calcular o arrasto aerodinâmico do conjunto ciclista + bicicleta. De seguida irei fazer uma breve apresentação desses métodos e da sua viabilidade para poderem ser utilizados.

2.2.1. Método de “reboque” ou método de medição da resistência à tração

Este método consiste em uma mota a rebocar uma bicicleta e através da medição da força necessária para a rebocar calcula-se a resistência aerodinâmica do conjunto ciclista + bicicleta [17].

Para a realização deste teste será necessário que uma mota reboque a bicicleta durante 3 a 4 voltas num velódromo, a velocidade constante, e medir simultaneamente a força de reboque utilizando uma célula de carga. De seguida o teste deverá ser repetido para outras velocidades.

Para a obtenção do $C_x A_f$ do conjunto este método baseia-se na Eq. (2.4).

$$k = 0,5 \times C_x \times A_f \times \rho_0 \times 0,359 \times \frac{P_b}{T_a + 273,15} \quad (2.4)$$

Através da Eq. (2.4) para calcular o C_x será necessário saber previamente os seguintes parâmetros:

- k , da Eq. (2.5).
- A_f , medido através do método da pesagem de fotografias explicado na secção 2.1.

- P_b medido em mmHg e T_a , com recurso a aparelhos para a medição dos mesmos.
- ρ_0 .

$$k = \frac{(R_{t,i} - R_{t,o})}{(v_{a,i}^2 - v_{a,o}^2)} \quad (2.5)$$

O valor de $R_{t,i}$ e de $R_{t,o}$ são obtidos diretamente do valor da célula de carga, os valores das velocidades são os correspondentes às velocidades testadas.

Um dos problemas apresentados por este método reside no facto de que apesar de o motociclo que reboca a bicicleta se encontrar a 10 m de distância, este ainda terá influência no arrasto aerodinâmico como foi provado por Garcia-Lopez et al. [14], resultando em resultados mais otimistas dos que na realidade acontecem.

2.2.2. Análise recorrendo a uma regressão linear

Este método baseia-se na força de resistência total a que o conjunto ciclista + bicicleta está sujeito, R_t , que para este autor é igual à soma da força de arrasto aerodinâmico, R_D , e da força de resistência ao rolamento, como se pode ver na Eq. (2.6).

$$R_t = R_D + R_R \quad (2.6)$$

Sendo R_D e R_R dados pelas Eqs. (2.7) e (2.8), respetivamente.

$$R_D = 0,5 \times \rho \times A_f \times C_x \times v^2 \quad (2.7)$$

$$R_R = C_R \times M_t \times g \quad (2.8)$$

O valor da força de resistência total pode ser determinado pela Eq. (2.9), para tal são necessários um potenciómetro e um medidor de velocidade.

$$R_t = \frac{P}{v} \quad (2.9)$$

Sabendo como calcular a força de resistência total devem ser realizados vários ensaios a várias velocidades, de forma a obter uma curva da força de resistência total ao movimento em função do quadrado da velocidade do conjunto.

A equação deverá ser do tipo da Eq. (2.10).

$$R_t = av^2 + b \quad (2.10)$$

Em que av^2 representa a Eq. (2.7) e b a Eq. (2.8). Sabendo o valor de a e os seguintes valores:

- M_t e v , valores medidos com recurso a instrumentos para essa funcionalidade.
- g , aceleração gravítica do local em que se irá realizar o ensaio.

- ρ , valor calculado em função das condições meteorológicas no local dos ensaios.

Pode-se agora obter o valor do produto $C_x A_f$.

Este método tem como principal limitação o facto de que nem sempre a força de resistência total variar de forma linear com o quadrado da velocidade e nesse caso este método pode resultar em erros de julgamento relativamente ao valor do produto $C_x A_f$ [12].

2.2.3. Método da desaceleração

Este método de cálculo do arrasto aerodinâmico consiste em um ciclista pedalar até uma determinada velocidade, para entrar na zona de ensaios à velocidade pretendida, de seguida o ciclista deixa de pedalar, podendo pedalar em sentido contrário para reproduzir o efeito de pedalagem no ensaio, e fica apenas sujeito às forças resistivas ao movimento (resistência aerodinâmica e resistência ao rolamento), levando a uma desaceleração do mesmo. A zona de ensaios está dividida em duas zonas, tendo um cronómetro à entrada e saída de cada zona, para calcular a velocidade média em cada zona de testes. A primeira zona tem 1 m e a segunda zona tem 20 m, como ilustrado na Fig. 2.5 [18].

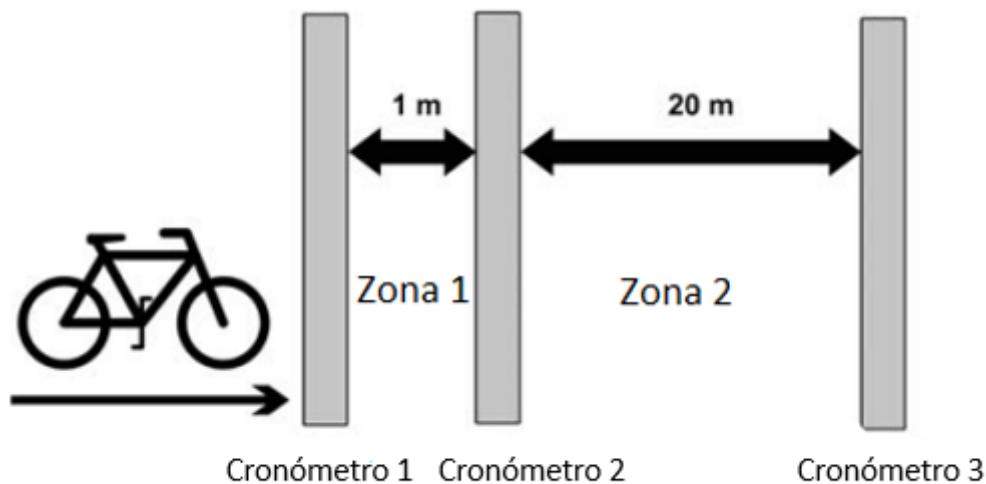


Figura 2.5. Esquema da zona de ensaios do método da desaceleração - retirado de [12].

Para o cálculo do arrasto aerodinâmico este método baseia-se na 2ª lei de Newton ($\sum F = m \times a$) e nas Eqs. (2.7) e (2.8) já descritas no método da regressão linear, sendo que neste caso a massa volúmica do ar se calcula de forma particular como descrito na Eq. (2.11).

$$\rho = \rho_0 \times e^{-0,127 \times h} \times \left(\frac{273}{T_a + 273,15} \right) \quad (2.11)$$

Para o caso de a zona de teste não ser totalmente plana será necessário adicionar ao método a Eq. (2.12), para que seja possível descrever a resistência de inclinação da estrada.

$$R_G = \frac{m \times g \times G}{\sqrt{1 + G^2}} \quad (2.12)$$

Transformando a Eq. (2.6) na Eq. (2.13).

$$R_t = R_D + R_R + R_G \quad (2.13)$$

Para o uso deste método falta apenas determinar o valor da força de resistência total, R_t , para tal recorre-se à Eq. (2.14), baseada na 2ª lei de Newton.

$$R_t = m \times a \quad (2.14)$$

Em que o valor da aceleração nos testes em terreno plano representa o valor da desaceleração, calculado com base na redução de velocidade nas zonas de teste.

Este método é bastante eficaz, reproduzível e sensível a pequenas variações no $C_x A_f$ segundo Debraux et al. [12].

Segundo De Groot et al. [19] apresenta como grande limitação o efeito das condições atmosféricas. Como solução o autor propõe que os testes sejam realizados em condições interiores, nas quais é mais fácil controlar as condições atmosféricas.

2.3. Componentes testados

Nesta secção irão ser apresentados alguns dos componentes que já foram testados por outros autores e as principais conclusões retiradas desses mesmos testes.

2.3.1. Rodas

As primeiras rodas aerodinâmicas apareceram em 1890, no entanto na época não foram muito utilizadas por serem bastante perigosas em ventos cruzados. As rodas deste tipo foram inventadas por Arthur Hide e apresentavam um formato muito idêntico às utilizadas hoje em dia, isto é, roda lenticular atrás e “4-spoke wheel” à frente, como apresentado na Fig. 2.6a [20].

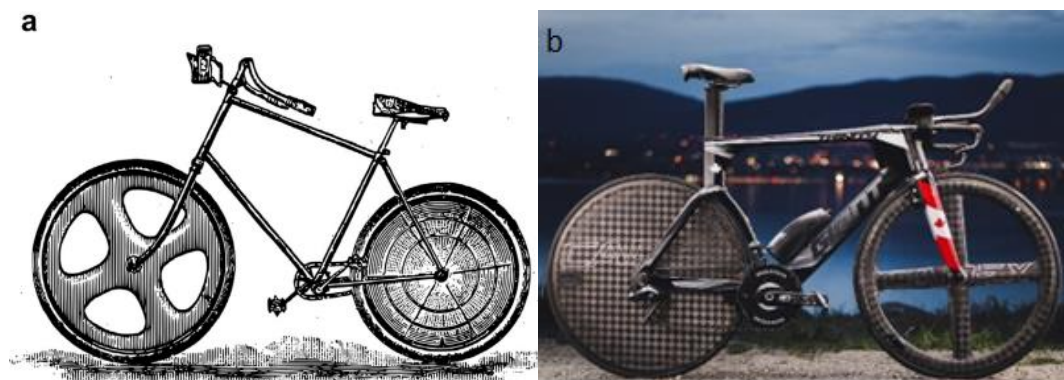


Figura 2.6. (a) Ilustração das rodas aerodinâmicas inventadas por Arthur Hide em 1890 - retirado de [20];
(b) Rodas aerodinâmicas utilizadas hoje em dia - retirado de [21].

Apesar de não terem ficado populares quando foram inventadas, nos anos 80 Moser bateu o recorde da hora duas vezes com este tipo de rodas, levando a que os ciclistas começassem a utilizar este tipo de rodas. Este tipo de rodas é muito parecido com a roda atual sofrendo apenas algumas alterações, principalmente no material usado na construção da roda [20].

No final dos anos 90 e início dos anos 2000 foram testados vários tipos de rodas, recorrendo aos 3 tipos de testes possíveis, isto é, testes em túnel de vento, testes de terreno e testes CFD.

A grande maioria dos testes em túnel de vento e CFD foram feitos testando apenas a roda isolada, resultados esses que nem sempre se verificam quando testados no conjunto ciclista + bicicleta [22]. Outro dos grandes problemas de testes em túnel de vento e CFD é o facto de muitos autores não considerarem o arrasto rotacional na análise da roda, o que reduz drasticamente o arrasto total. Uma vez que segundo Kyle, 1995b [20], o arrasto rotacional contribui entre 20-40% do arrasto total, dependendo do tipo de roda utilizada.

A maior parte dos testes em CFD e túnel de vento são feitos para estudar o arrasto aerodinâmico e a força lateral sofrida pela mesma relativamente aos ventos cruzados. Sendo testadas habitualmente a roda clássica de estrada com aros e raios, Fig. 2.7, a “aero-spoke wheel” desde “tri-spoke”, “four-spoke” (roda da frente da Fig. 2.6b) e “five-spoke” e a roda lenticular (roda de trás da Fig. 2.6b).



Figura 2.7. Bicicleta de estrada usada por Tadej Pogačar na volta à França de 2021 - retirado de [23].

Um dos autores que estudou a aerodinâmica e a força lateral dos vários tipos de rodas foi Barry et al. [22], chegando à conclusão que a escolha da roda não se deve apenas focar no arrasto translacional e deverá também se focar no arrasto rotacional.

Barry et al. também concluíram que a roda lenticular apresenta menor arrasto translacional e rotacional que a roda com raios e aro apresentada na Fig. 2.7, no entanto apresenta maior força lateral em ventos cruzados que a roda com raios e aro, o que vem demonstrar que a escolha ideal para uma prova de ciclismo irá depender das condições meteorológicas durante a prova. O que está em linha com a conclusão de Greenwell et al. [24], em que constataram que quanto maior for a área lateral da roda maior irá ser a força lateral que a mesma irá sofrer.

Kyle [20] para além de ter estudado o arrasto aerodinâmico dos vários tipos de rodas também estudou a resistência ao rolamento e o aumento de peso das mesmas. Concluindo que a resistência ao rolamento depende do material do pneu e da superfície em que ocorrerá a prova e o aumento de peso das rodas leva a um aumento do momento de inércia, o que diminui a aceleração da roda.

Um dos fatores que mais varia com o ciclista e a posição adotada pelo ciclista é a pressão dos pneumáticos ideal para o seu desempenho. Jan Heine [25] observou que a uma pressão abaixo da ideal o ciclista perde velocidade devido à alta resistência ao rolamento e para uma pressão acima da ideal o ciclista não possui qualquer vantagem em termos de desempenho, e irá ser muito menos confortável. Posto isto a pressão ideal para o ciclista deverá ser de 15% “tire drop”, que significa que após a adição do peso da bicicleta e do ciclista o pneu deve deformar 15%. Este “tire drop” não é de fácil medição, no entanto Berto criou um gráfico que correlaciona a pressão ideal do pneu em função da carga a que está sujeito, como é apresentado na Fig. 2.8.

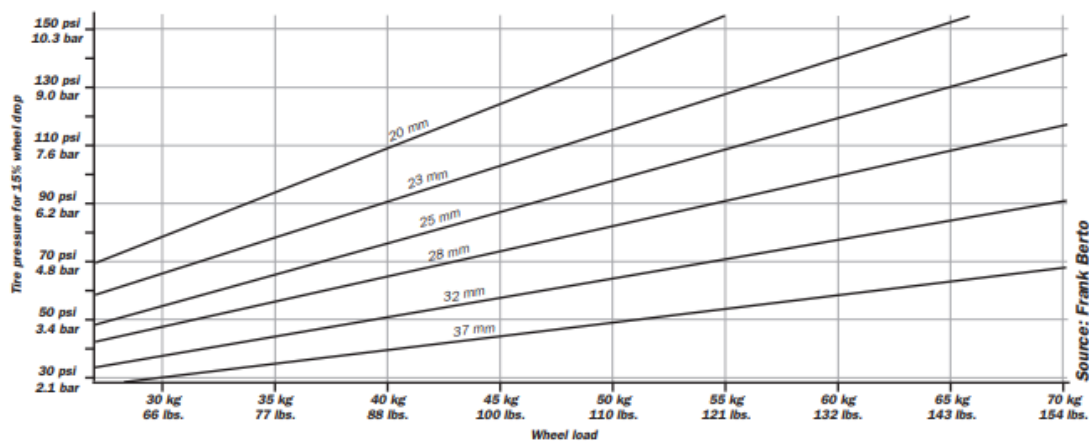


Figura 2.8. Gráfico realizado por Berto da pressão ideal dos pneumáticos em função do peso suportado - retirado de [25].

Estas pressões são ideais para estradas de rugosidade média, para estradas com rugosidade superior à média deverá ser diminuída esta pressão, para evitar que a bicicleta saltite, o que provoca o aumento do coeficiente da resistência ao rolamento durante o andamento, e ainda evitando que o ciclista não consiga “colocar toda a potência no chão”. Para estradas com rugosidade inferior à média deverá ser aumentada a pressão dos pneus.

Por fim, Crane e Morton [26] testaram o efeito da largura do pneu (T) relativamente à largura do aro (W), chegando à conclusão que a largura do pneu deveria ser inferior a largura do aro. Uma vez que este facto irá trazer vantagens no arrasto aerodinâmico, como se pode ver na Fig. 2.9.

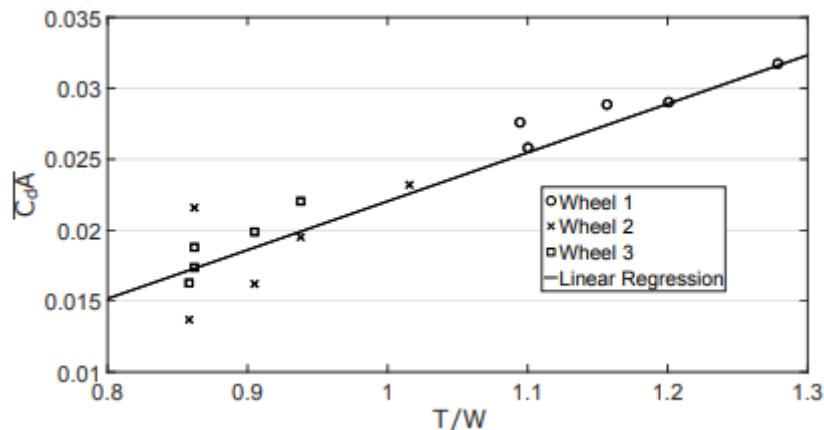


Figura 2.9. Gráfico do arrasto aerodinâmico da roda em função da razão entre a largura do pneu e do aro - retirado de [26].

2.3.2. Quadros

O quadro de bicicleta que hoje em dia é usado e com o qual Victor Campenaerts conquistou o atual recorde da hora é muito idêntico ao quadro de bicicleta inventado por Humber em 1890, como se pode observar por consulta da Fig. 2.10.

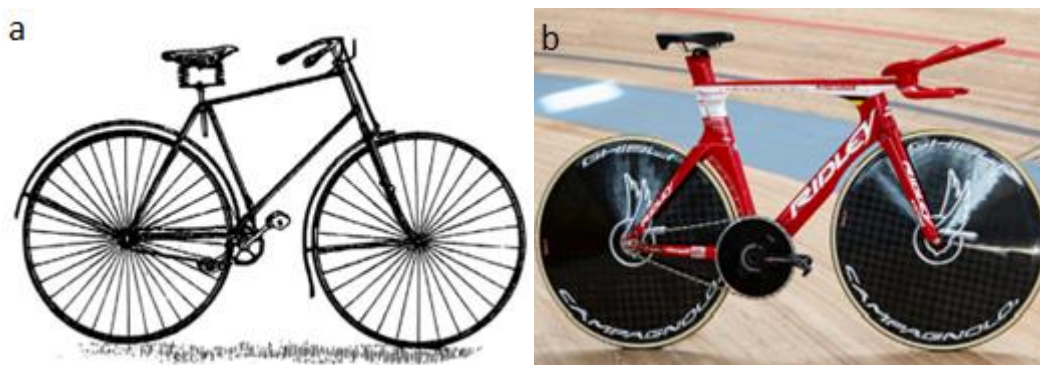


Figura 2.10. (a) Esboço da bicicleta de Humber - retirado de [20]; (b) Bicicleta usada por Victor Campenaerts na tentativa de recorde da hora - retirado de [20].

No entanto entre 1984 e 2000 várias novas abordagens de quadros foram feitas de forma a conseguir um quadro mais aerodinâmico que o de Humber. A partir de 2000 a UCI limitou o recorde da hora a bicicletas com quadro do perfil da invenção de Humber e com uma razão de “chord to width” de 3 para 1, para os tubos do quadro [20]. Isto representou um atraso na evolução dos quadros de bicicletas de cerca de 16 anos.

Neste período surgiu o quadro “monocoque”, representado na Fig. 2.11, com o qual ainda hoje é detido o recorde da maior distância percorrida por um ciclista numa hora, no entanto ilegal desde 2000 devido, às regras da UCI.



Figura 2.11. Bicicleta usada por Chris Boardman na tentativa de recorde da hora em 1996 - retirado de [20].

Com recurso à bicicleta presente na Fig. 2.11, Chris Boardman detém o recorde de maior distância percorrida numa hora de 56,375 km, conseguido em 1996. O que é superior ao atual recorde da hora, homologado pela UCI, de Victor Campenaerts, com uma distância total percorrida de 55,089 km.

Thompson [20] comparou a bicicleta da equipa da Austrália de 1992 em que o quadro é muito parecido ao da bicicleta usada por Victor Campenaerts, ou seja, a bicicleta com “Diamond-frame”, com a bicicleta “monocoque” utilizada por Boardman no recorde da hora em 1996. Thompson chegou à conclusão que a bicicleta de Boardman necessitava de menos 15% de potência para se deslocar a 55 km/h, o que vem demonstrar a razão pela qual o recorde de Boardman, apesar de ilegal, ainda não ter sido batido.

2.3.3. Guiador e extensores

O design dos guiadores e dos extensores têm dois objetivos [20]:

- Diminuir ao máximo o arrasto aerodinâmico por eles causado, ou seja, ter o formato que permita obter o menor arrasto aerodinâmico.
- Permitir ao ciclista obter a melhor posição em termos de aerodinâmica, sem que com isso o ciclista perca potência transmitida, para tal deve ser conseguido uma menor área frontal e um menor C_x .

No final dos anos 90 do século 19 surgiu o primeiro guiador pensado para reduzir o arrasto aerodinâmico, o objetivo deste guiador é ser mais baixo que os seus antecessores e assim fazer com que o ciclista vá numa posição mais baixa, diminuindo a sua área frontal. Este primeiro guiador aerodinâmico têm o nome de “dropped handlebar” e pode ser visto na Fig. 2.12.



Figura 2.12. Representação da primeira bicicleta com guidador aerodinâmico - retirado de [20].

Até aos anos 70 do século 20 não houve nenhuma evolução no que diz respeito aos guidadores, no entanto nos anos 70 as pessoas voltaram a preocupar-se com a aerodinâmica no ciclismo e por isso desenvolveram novos guidadores. As primeiras inovações que foram feitas nestes tempos concentraram-se em colocar o guidador mais baixo que o seu antecessor e mais aerodinâmico, como pode ser visto na Fig. 2.13.



Figura 2.13. Imagem de uma das inovações feitas durante a década de 70 - retirado de [20].

No entanto a principal evolução que aconteceu nesta revolução aerodinâmica dos guidadores foi a criação dos extensores, inovação que ainda hoje é amplamente utilizada. O primeiro a equipar a sua bicicleta com extensores foi Jim Elliot em 1984. Esta inovação permite que os ciclistas diminuam o stress nos músculos dos braços e que o ciclista possa ter uma área frontal mais baixa que com os anteriores guidadores. O design de Elliot foi melhorado por Pete Penseyres e está apresentado na Fig. 2.14a, que é parecido ao dos extensores que se usam hoje em dia como está apresentado na Fig. 2.14b, que mostra os extensores usados por Primož Roglič na Vuelta em 2019 [20].

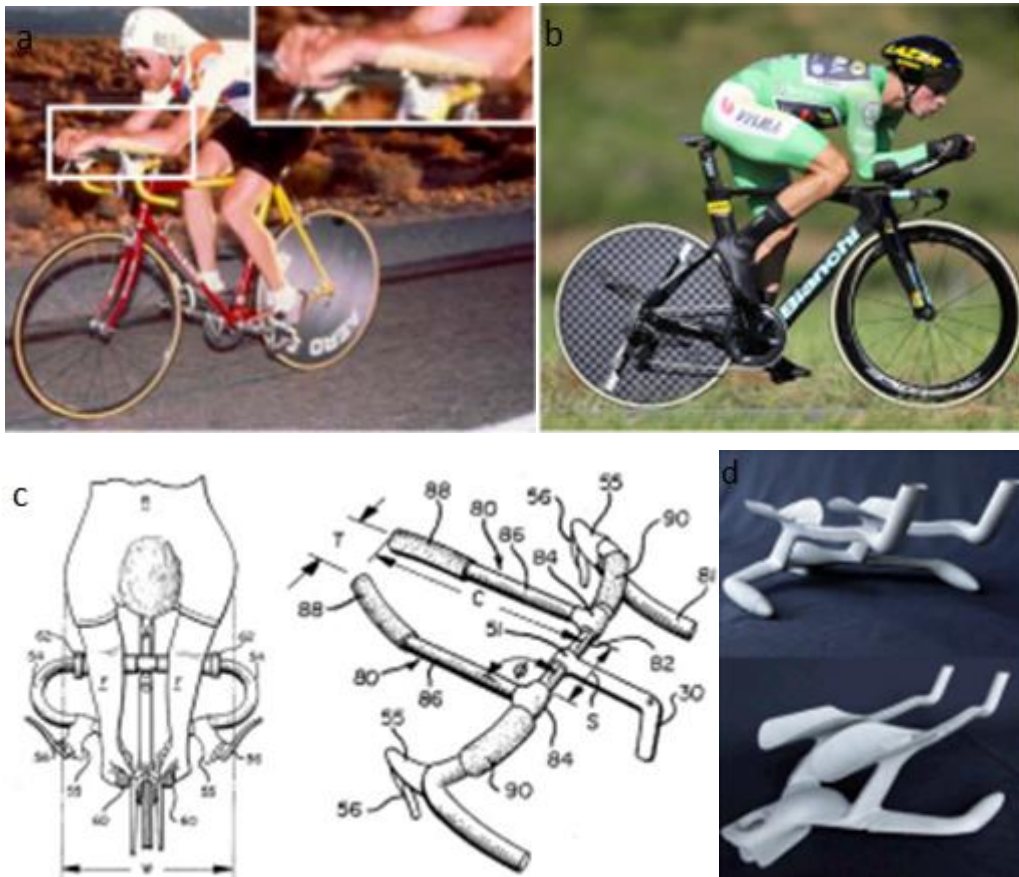


Figura 2.14. (a) Imagem dos primeiros extensores, equipados numa bicicleta de estrada - retirado de [20]; (b) Extensores usados nos dias de hoje - retirado de [20]; (c) Detalhes dos primeiros extensores - retirado de [20]; (d) Detalhes dos extensores atuais - retirado de [20].

Kyle [20] estudou o impacto da implementação dos extensores relativamente ao guiador “dropped handlebar”. Com a realização deste estudo Kyle chegou à conclusão que a implementação dos extensores se traduzia numa melhoria do arrasto aerodinâmico de cerca de 15%, o que em parte vem explicar a fenomenal recuperação de Greg LeMond apresentada na secção 1. Estes valores foram comprovados por Defraeye et al. [27], com recurso ao túnel de vento e a simulação CFD, tal como é apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Comparação de guiadores realizada por Defraeye et al. - retirado de [27].

Position	$AC_{D,cyclist \text{ and } bicycle} (m^2)$	$AC_{D,cyclist} (m^2)$	$\frac{AC_{D,cyclist}}{AC_{D,cyclist \text{ and } bicycle}} (\%)$
UP	0.270	0.193	72
DP	0.243	0.167	68
TTP	0.211	0.134	64

Analisando os resultados apresentados na Tabela 2.1 também se verifica que a redução do arrasto aerodinâmico do ciclista não foi totalmente acompanhada pelo conjunto ciclista + bicicleta. Isto é, da DP (“dropped position”) para TTP (posição nos extensores) no

conjunto melhorou cerca de 13% enquanto que no ciclista melhorou cerca de 19%, o que vem confirmar que se deve analisar sempre o conjunto.

Alguns autores estudaram o efeito da alteração da altura e largura dos extensores. Underwood e Jermy [28] chegaram à conclusão que tanto a altura como a largura ideal dos extensores variam de pessoa para pessoa, pelo que cada um deverá fazer o seu estudo para otimizar a sua posição. No entanto é possível tirar algumas conclusões gerais deste estudo. Segundo Underwood e Jermy, as alturas dos extensores têm mais influência no arrasto aerodinâmico do conjunto ciclista + bicicleta que a largura dos extensores, pelo que se deve primeiro focar em otimizar a altura dos extensores.

2.3.4. Capacetes

O capacete é um acessório de extrema importância na segurança dos ciclistas, como se pode comprovar pelo estudo de Scott et al. [29]. Em que foi analisado o efeito do uso do capacete na fração do número de pessoas que foi para o hospital devido a problemas na cabeça ou pescoço causados por acidente de bicicleta. Chegou-se à conclusão que apenas 22% dos ciclistas usava capacete.

Devido ao facto de não poderem ser deixados de lado nas provas de ciclismo os capacetes sofreram evolução em termos aerodinâmicos de forma a não prejudicarem o desempenho dos ciclistas.

Alam et al. [30] fizeram uma comparação entre vários tipos de capacetes usados por ciclistas profissionais, fizeram ainda a comparação entre o uso desses capacetes e a falta dele e as diferenças aerodinâmicas consequentes do seu uso.

Alam et al. chegaram à conclusão que o melhor capacete por eles testado, representado na Fig. 2.15a, capacete típico das provas de contrarrelógio, é melhor que não usar qualquer capacete. Este facto interessante é mais um dos fatores que beneficiou LeMond no famoso Tour de França de 1989.

Alam et al. na comparação entre capacetes também concluíram que o capacete da Fig. 2.15a é muito melhor que os típicos capacetes de estrada, apresentado na Fig. 2.15b, que quando usados pelo ciclista produzem arrasto aerodinâmico semelhante ao de um ciclista sem capacete.



Figura 2.15. (a) Capacete típico de provas de contrarrelógio - retirado de [30]; (b) Capacete típico de provas de estrada - retirado de [30].

Brownlie et al. [31] também fizeram uma comparação entre capacetes. Brownlie et al. concluíram que numa prova de contrarrelógio de 40 km, feita a uma potência de 427 W por um ciclista de 70 kg numa bicicleta de 9,1 kg, seriam ganhos cerca de 89 s se usasse o melhor capacete do estudo face ao pior capacete desse mesmo estudo, revelando a importância de uma escolha adequada do capacete para o melhor desempenho do ciclista.

2.3.5. Fatos

- Segundo Oggiano et al. [32], o C_x , causado pelo ciclista, é dependente de 3 fatores:
- Forma, dependente das características físicas do atleta e da posição por ele adotada na prática de ciclismo.
 - Movimento, dependente da velocidade, vibrações e acelerações a que o ciclista está sujeito.
 - Superfície, característica fortemente ligada ao tipo de fato que o ciclista usa e os seus componentes.

Brownlie et al. [33] sugeriram que fossem usados fatos segmentados para que cada parte do corpo fosse coberta pelo tecido ideal para a pressão a que está sujeita, isto porque dependendo da zona em análise irá variar a pressão a que a mesma se encontra.

Spurkland et al. [34] estudaram a vantagem da escolha de um fato correto. Neste estudo Spurkland et al. compararam 3 fatos diferentes, chegando à conclusão que a escolha de um fato adequado pode trazer uma vantagem de cerca de 30 s, numa prova de 1 h realizada a 50 km/h, como apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Comparação de alguns fatos feita por Spurkland et al. - retirado de [34].

Cyclist	Jersey		Drag difference (g)	Power difference (W)	Drag increase* (%)		Time difference 1h, 50km/h (s)	
					Person 1	Person 2	Person 1	Person 2
	B		-32	-4.4	-1.2	-1.3	-00:15	-00:17
	C		-60	-8.2	-2.2	-2.4	-00:28	-00:31
	D		0	0	0	0	00:00	00:00

Spurkland et al. estudaram ainda a desvantagem de não usar um fato que se ajustasse totalmente ao corpo do ciclista, chegando à conclusão que a má escolha do tamanho do fato poderá levar a uma perda de tempo na ordem dos 50 s, numa prova de 1 h realizada a 50 km/h, como apresentado na Tabela 2.3. Podemos então concluir que será da maior importância escolher um fato que seja ajustável totalmente ao corpo do ciclista do que escolher um fato com melhores características globais, mas sem se ajustar às características físicas do ciclista.

Tabela 2.3. Perdas de desempenho devido a uma má escolha do tamanho do fato - retirado de [34].

Sizing	Jersey size	M	Drag difference (g)	Power difference (W)	Drag increase* (%)		Time difference 1h, 50km/h (s)	
					Person 1	Person 2	Person 1	Person 2
			+104	+14.2	-3.8	-4.2	+0:48	+00:53

A explicação para esta situação são as pequenas rugas criadas pelo fato devido ao facto de este ser um pouco mais largo que o ideal para o ciclista em questão.

Pela análise do gráfico de Hong e Asai [35], representado na Fig. 2.16, é possível concluir que o fato ideal irá depender da velocidade a que o ciclista realizar a sua prova. Isto

porque para uma determinada velocidade o fato ideal será um, no entanto, para outra velocidade será outro, logo tendo em conta o perfil da etapa poderá mudar a escolha do fato.

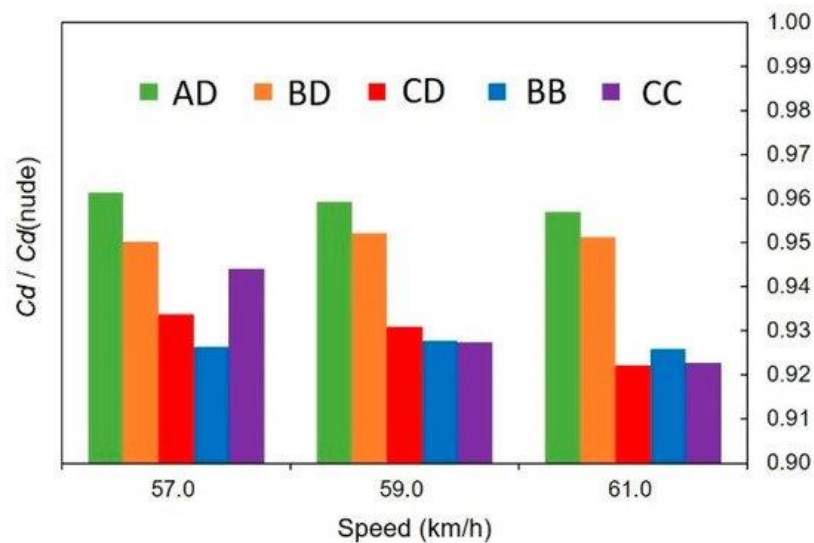


Figura 2.16. Razão $c_d/c_d(\text{nude})$ em função da velocidade do ciclista para vários fatos - retirado de [35].

Pela análise da Fig. 2.16, também é possível concluir que um fato adequado ao ciclista é mais vantajoso que o ciclista nu. Sendo por isso normal que Spurkland et al. tenham reparado que um fato com mangas mais compridas seja mais vantajoso que com mangas mais curtas, pelo facto de o tecido do fato ser mais vantajoso em termos aerodinâmicos que a pele do ciclista.

3. METODOLOGIA

Nesta secção da dissertação vai ser apresentada a metodologia para o cálculo do $C_x A_f$ e da potência desenvolvida pelo ciclista.

O arrasto aerodinâmico do conjunto ciclista + bicicleta é proporcional ao produto $C_x A_f$.

3.1. Cálculo de $C_x A_f$

O método a utilizar nesta dissertação de mestrado será um método integral desenvolvido por Carvalheira [36]. Este método insere-se na categoria dos testes no terreno e, como explicado na secção 1, está integrado no tipo de testes mais vantajosos para orçamentos baixos, no entanto, com resultados bastante precisos.

O facto de se tratar de um método integral é uma grande vantagem face aos outros tipos de testes no terreno, uma vez que não necessita de uma velocidade de entrada fixa na zona de testes e pelo facto de que um possível erro de cálculo num determinado ponto do percurso é corrigido no ponto seguinte. Isto é, o erro médio deste método é bastante constante e baixo, o que torna os resultados bastante comparáveis entre si.

A grande desvantagem deste método é o “handicap” de todos os tipos de testes no terreno, ou seja, as condições meteorológicas. Para minimizar este fator limitante será necessário escolher um local de teste em que seja possível minimizar o efeito destes fatores.

3.1.1. Local

O local escolhido para a realização dos ensaios foi a Avenida Elísio de Moura, em Coimbra, apresentado na Fig. 3.1. Por algumas razões tais como:

- Se tratar de uma descida com bastante inclinação, quanto maior for a velocidade menor será o erro no cálculo do produto $C_x A_f$.
- Se tratar de uma descida em linha reta, isto é, sem curvas que façam variar a posição do ciclista na bicicleta.
- Existirem ao longo de toda a descida prédios do lado direito do ciclista, fazendo com que nos dias em que o vento sopra de Oeste para Este, o efeito do mesmo seja praticamente nulo no cálculo $C_x A_f$.
- Piso em bom estado de conservação para não ser um fator limitante no desempenho do ciclista.



Figura 3.1. Avenida Elísio de Moura.

Apesar destas vantagens todas, esta avenida apresenta uma grande desvantagem, o trânsito, já que seguir ou ser seguido por um carro ou uma moto pode levar a diminuições no produto do $C_x A_f$, tal como foi provado por Blocken et al. [37]. Para o trânsito ser evitado será necessário que os testes sejam realizados em períodos do dia que ele não exista, o que apenas é conseguido ao início e final de cada dia, ou em alternativa nas manhãs de Domingo.

3.1.1.1. Zona de ensaio

A zona para a realização dos ensaios será entre o início da passadeira da Avenida Elísio de Moura, junto à rotunda no cimo da avenida, situada a 124,000 m de altitude, representada na Fig. 3.2a e a perpendicular à abertura entre dois prédios situada a 86,199 m de altitude, representado na Fig. 3.2b. A distância total entre o ponto inicial e o final a zona de testes é de 470 m. Foi ainda admitido um ponto intermédio de modo a validar os resultados, para esse caso escolheu-se a ponte pedonal, apresentada na Fig. 3.2c, situada a 89,994 m de altitude e à distância de 430 m do ponto inicial de medição.

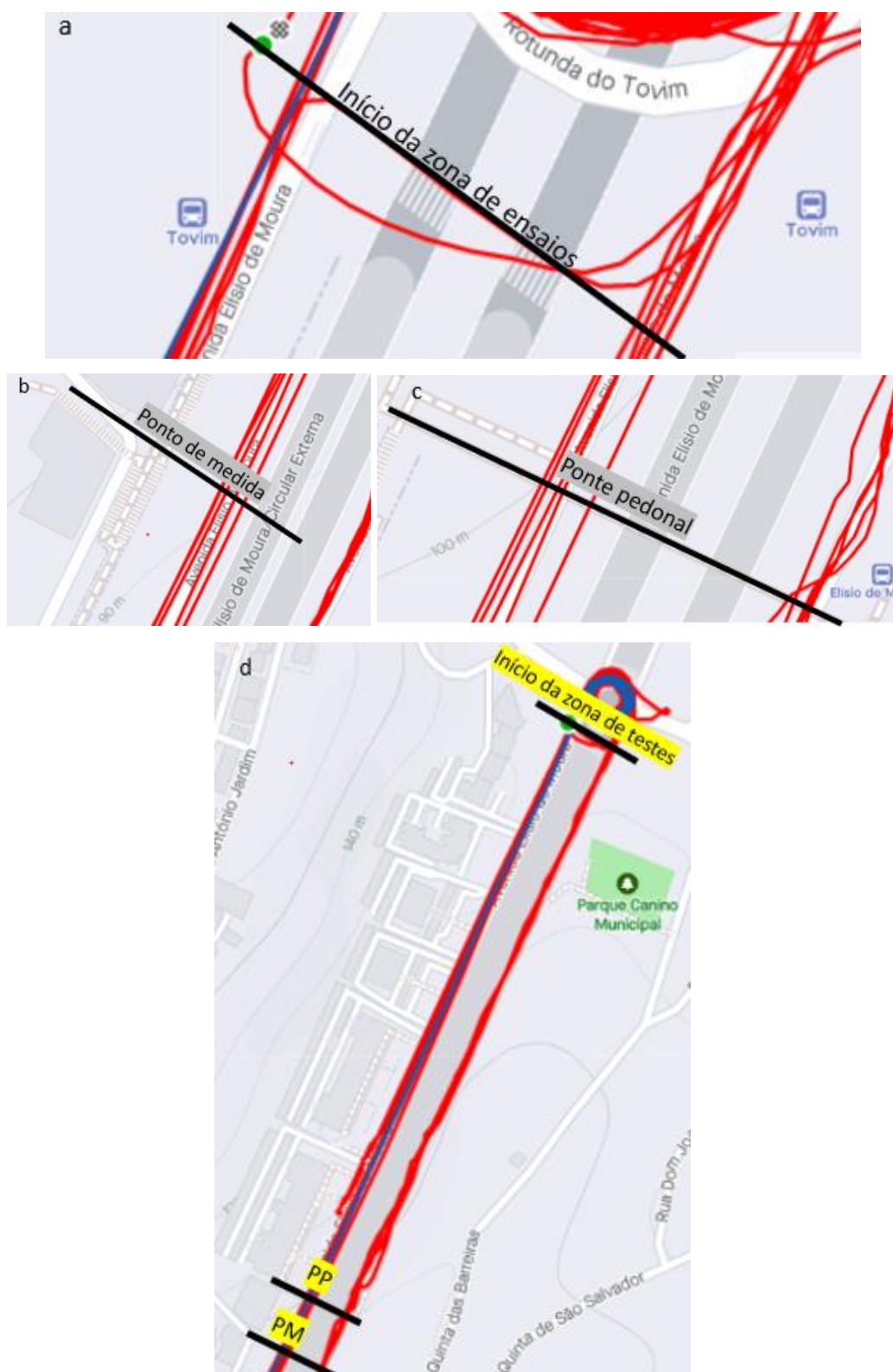


Figura 3.2. (a) Local de início da zona de ensaios; (b) Local do fim da zona de ensaios; (c) Ponto intermédio de validação dos resultados; (d) Percurso total da zona de ensaios.

De forma a ser possível aplicar este método será necessário conhecer a altitude em função da distância percorrida na descida, para tal, foi feito um levantamento topográfico.

Este levantamento topográfico já tinha sido feito na realização de uma dissertação por Gonçalves [38], no entanto teve de ser feita uma correção à altitude de todos os pontos do percurso. Uma vez que após atualização do *Google Earth Pro* a altitude de cada ponto aumentou em 3 m. O gráfico representativo da altitude em função da distância percorrida na zona de ensaios está apresentado na Fig. 3.3.

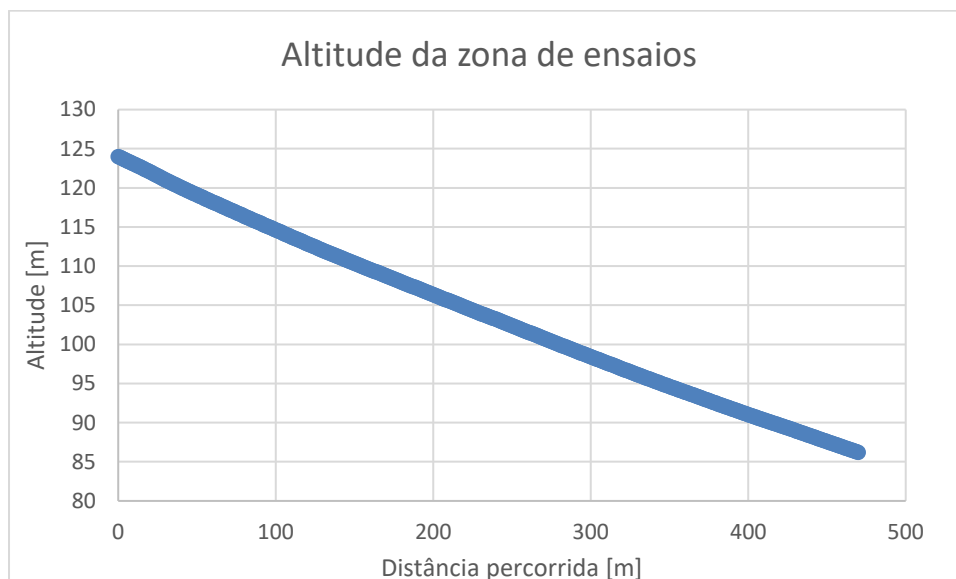


Figura 3.3. Altitude da zona de ensaios em função da distância percorrida pelo ciclista.

3.1.2. Procedimento na realização dos ensaios

Para os testes serem considerados válidos é necessário cumprir uma série de requisitos tais como:

- Se existir vento este deve ser de Oeste, lado dos prédios, para Este de forma a minimizar o seu efeito devido ao efeito de para-vento dos prédios altos da rua.
- Será necessário que o ciclista mantenha a mesma posição ao longo de toda a zona de testes, posição essa que pode variar entre diferentes testes, de forma a garantir a repetibilidade e comparabilidade dos resultados dos mesmos.
- Deverá permanecer em linha reta durante toda a zona de testes para que a distância percorrida nos vários testes seja a mesma.
- Se algum carro se aproximar da bicicleta, seja pela traseira, lado ou pela frente, o teste deverá ser considerado inválido porque este facto poderá adulterar o resultado do mesmo.
- O ciclista deverá ganhar uma velocidade na ordem dos 30 km/h, para entrar na zona de testes, o que poderá fazer na rotunda antes da passadeira.
- Durante o ensaio o ciclista deverá pedalar em seco, ou seja, pedalar sem que isso cause transmissão de potência à roda traseira, para que os resultados contemplem o movimento das pernas de um ciclista de competição.
- O ciclista deverá ir a olhar para a frente durante toda a zona de ensaios, tentando ao máximo que a cabeça não se mova durante o ensaio.
- Não deverá existir piso molhado, por razões de segurança do ciclista.

- Será necessário que o ciclista depile as pernas nas 6 horas anteriores ao ensaio.

O não cumprimento de qualquer um destes requisitos acima descritos leva à anulação desse ensaio, isto acontece para garantir a repetibilidade e comparabilidade dos resultados. Para a realização destes testes também será necessário um conjunto de equipamentos como:

- Aparelho de GPS, de modo a registar a posição em que se encontra o ciclista num determinado momento do ensaio, montado no extensor esquerdo da bicicleta, inclinado para a esquerda a 15° com a horizontal, de modo a não existir obstrução de sinal entre o aparelho de GPS e os satélites.
- Todo o material inerente a um ciclista, desde bicicleta a equipamentos e acessórios.
- Sensor de velocidade colocado na roda dianteira, conectado ao aparelho de GPS, para que seja medida a velocidade do ciclista em cada ponto da zona de ensaios da forma mais precisa possível.
- Uma pessoa auxiliar para detetar possíveis irregularidades no procedimento.
- Será necessário recorrer ao site Ventusky de modo a obter a temperatura do ar, humidade relativa do ar e velocidade do vento durante o ensaio.
- Será ainda necessário recorrer ao site IPMA de modo a obter a pressão atmosférica ao nível médio das águas do mar durante o ensaio.
- Por fim será necessário um computador para tratar os dados com recurso ao programa Microsoft® Excel.

O teste em si consiste em o ciclista entrar na zona de testes a uma velocidade na ordem do 30 km/h, não necessitando de ser exata por se tratar de um método que têm em conta todas as forças presentes no sistema ciclista + bicicleta. O ciclista tem de manter uma determinada posição, entre o início e o fim da zona de testes, movimentando apenas as pernas com o movimento de pedalar, no entanto sem transmitir potência à roda traseira com esse movimento, para que os resultados sejam os mais próximos da realidade, uma vez que a falta de movimento das pernas pode diminuir o produto do $C_x A_f$. Posteriormente ao fim da zona de teste o ciclista poderá começar a travar e chegar ao fim da avenida em segurança.

3.1.3. Descrição do método

Poderia ter escolhido qualquer um dos métodos apresentados na secção 2.2, no entanto nenhum deles seria tão preciso como o método que irei apresentar de seguida.

O método a utilizar como descrito anteriormente será o desenvolvido por Carvalheira [36], que é um método integral e que tem em conta todas as forças conservativas e não conservativas que atuam no conjunto ciclista + bicicleta, essas forças encontram-se representadas na Fig. 3.4.

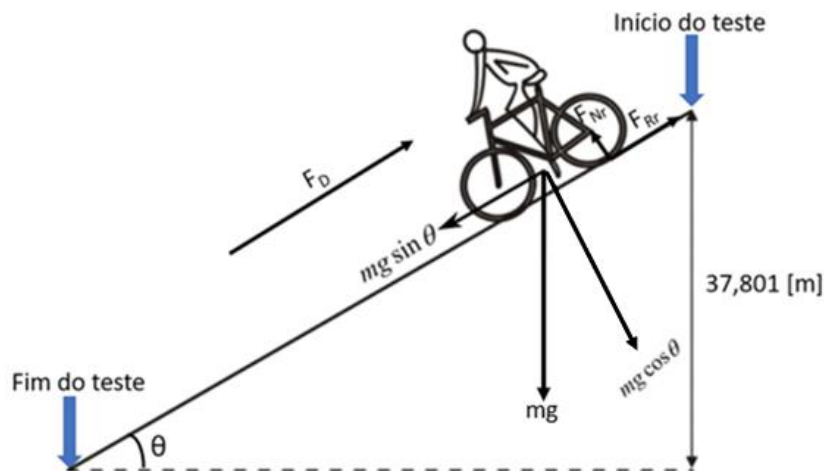


Figura 3.4. Representação das forças que atuam sobre o conjunto ciclista + bicicleta - adaptado de [39].

De notar que a roda da frente deveria ter forças representadas de forma análoga à roda de trás, no entanto por questões estéticas essas forças não foram representadas.

Este método considera que a variação de energia mecânica entre o ponto i e o ponto $i+1$ se deve ao trabalho das forças não conservativas como se pode ver na Eq. (3.1).

$$E_{i+1} - E_i = \sum_{j=1}^n \vec{F}_j \times (\vec{s}_{i+1} - \vec{s}_i) \quad (3.1)$$

As forças não conservativas que irão provocar alteração da energia total do sistema são a força de resistência ao rolamento, representada na Eq. (3.2) e na Fig. 3.4 como F_{Rr} no caso da roda de trás, e a componente da força aerodinâmica que atua paralelamente ao eixo longitudinal do ciclista, representada na Eq. (3.5) e na Fig. 3.4 como F_D .

Na zona de testes, a força de resistência ao rolamento cria trabalho negativo, a força aerodinâmica poderá variar, isto é, poderá criar trabalho positivo ou negativo, uma vez que esta força irá depender da direção do vento. Quando maioritariamente de costas para o conjunto ciclista + bicicleta, irá produzir trabalho positivo, quando maioritariamente de frente para o ciclista + bicicleta irá produzir trabalho negativo.

$$|\vec{F}_{R,i}| = C_{R,i} \times M_t \times g \times \cos(\theta_i) \quad (3.2)$$

A grande dificuldade no cálculo da força de resistência ao rolamento Eq. (3.2), reside na obtenção do coeficiente de resistência ao rolamento dos pneus. Uma vez que este irá depender do tipo de pneus, da sua pressão, do tipo de piso em que irão rolar, da carga suportada pelos pneus e da sua temperatura [40]. Para ultrapassar esta dificuldade recorreu-se ao site [41], em que foram realizadas várias experiências com diferentes pneus a várias pressões de insuflação, para uma determinada carga suportada pelo pneu, uma dada largura interna do aro da roda e para uma dada temperatura ambiente e retirado o coeficiente de resistência ao rolamento de cada pneu a cada pressão testada. Os valores obtidos do coeficiente de resistência ao rolamento para cada pneu em função da pressão de insuflação estão apresentados na Fig. 3.5.

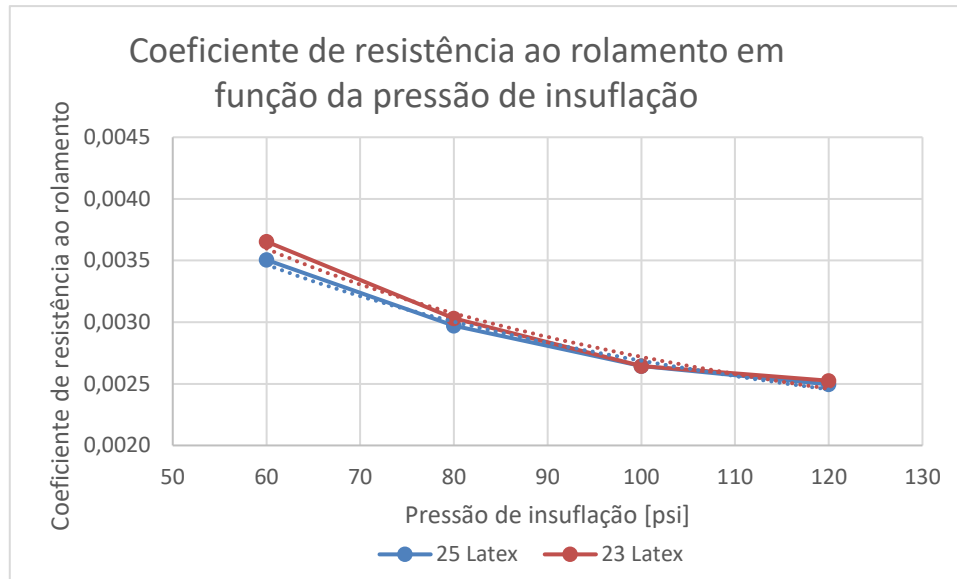


Figura 3.5. Coeficiente de resistência ao rolamento em função da pressão de insuflação.

Para a obtenção deste gráfico foi necessário ajustar uma curva aos pontos experimentais, para tal recorreu-se a uma equação do género da Eq. (3.3).

$$C_{R,i} = a_{R,x} \times p_{\text{pneu}}^{b_{R,x}} \quad (3.3)$$

Com a Eq. (3.3) ajustada aos valores medidos experimentalmente [41] é possível obter qualquer valor do coeficiente de resistência ao rolamento em função da pressão.

Tendo o valor do coeficiente de resistência ao rolamento de cada roda pode ser obtido o coeficiente de resistência ao rolamento do conjunto ciclista + bicicleta com recurso à Eq. (3.4).

$$C_{R,i} = f_{RF} \times a_{RF} \times p_{RF}^{b_{RF}} + (1 - f_{RF}) \times a_{RT} \times p_{RT}^{b_{RT}} \quad (3.4)$$

Sendo que a_{RF} e b_{RF} representam os valores de $a_{R,x}$ e $b_{R,x}$ da Eq. (3.3), x varia conforme seja roda da frente (F) ou roda de trás (T).

$$|\vec{F}_{Ax,i}| = C_x \times A_f \times \frac{1}{2} \times \rho_a \times (v_i + v_{\text{vento,paralelo},i})^2 \quad (3.5)$$

No que diz respeito ao vento considerado na força aerodinâmica, Eq. (3.5), apenas é considerada a componente do vento paralela ao vetor deslocamento do conjunto ciclista + bicicleta que atua de frente ou nas costas do ciclista, sendo positivo quando está de frente e negativo quando se encontra de costas, já que devido às baixas velocidades do vento na altura dos ensaios pode ser desprezada a força lateral que este iria provocar. A velocidade da componente do vento paralela ao vetor deslocamento do conjunto ciclista + bicicleta é calculada com recurso à Eq. (3.26).

O C_x pode ser calculado a partir da Eq. (3.6), sabendo que C_x é função do número de Reynolds do escoamento em torno do conjunto ciclista + bicicleta.

$$C_x = c_x \times Re_i^b \quad (3.6)$$

Os coeficientes c_x e b devem ser determinados experimentalmente para valores de Reynolds compreendidos entre $[4,0 \times 10^5; 1,0 \times 10^6]$. Para este caso em particular foi assumido que $b = 0$, uma vez que o arrasto aerodinâmico é maioritariamente de pressão, sendo o arrasto aerodinâmico de fricção desprezável quando comparado com o arrasto aerodinâmico de pressão, pelo que a Eq. (3.6) pode ser simplificada assumindo a forma apresentada na Eq. (3.7).

$$C_x = c_x \quad (3.7)$$

Relativamente à área frontal, irá ser calculada através do método da digitalização apresentado na secção 2.1.

Será ainda necessário calcular de uma forma precisa a massa volúmica do ar no momento em que vão ocorrer os ensaios. Uma vez que segundo Underwood e Atkinson et al. [40, 42], um aumento da temperatura em 3 °C e uma diminuição da pressão em 2 kPa causa uma redução na massa volúmica do ar que causa uma diminuição do arrasto aerodinâmico em cerca de 4%.

Para calcular a massa volúmica do ar num determinado momento recorre-se a Eq. (3.8).

$$\rho_a = \frac{p_a \times M_{a,h}}{R_u(273,15 + T_a)} \quad (3.8)$$

Na Eq. (3.8) é necessário calcular a pressão atmosférica no local dos ensaios, o que é feito com recurso à Eq. (3.9).

$$p_a = p_0 + \rho_a \times g \times h_{\text{teste}} \quad (3.9)$$

Para calcular a aceleração gravítica em função da altitude e latitude do local dos ensaios foi usada a Eq. (3.10), segundo a norma WGS-84.

$$g_\phi = 9,780327 \times \left(\frac{1 + A \times \sin(\phi)^2}{\sqrt{1 - B \times \sin(\phi)^2}} \right) \times \left(\frac{C}{C + h_{\text{teste}}} \right)^2 \quad (3.10)$$

Segundo a norma os valores de A , B e C assumem os valores de 0,00193185138639; 0,00669437999013 e 6378100 respetivamente.

Será ainda necessário considerar a humidade do ar na Eq. (3.8). Para tal será necessário calcular a massa molar do ar húmido o que é conseguido através da Eq. (3.11), considerando que a pressão total é igual à soma da pressão de ar seco com a pressão de vapor de água.

$$M_{a,h} = \left(1 - \frac{p_{\text{vapor}}}{p_a} \right) \times M_{a,s} + \left(\frac{p_{\text{vapor}}}{p_a} \right) \times M_{\text{H}_2\text{O}} \quad (3.11)$$

Para determinar a massa molar do ar húmido será preciso calcular a massa molar do ar seco e a pressão de vapor de água, o que é conseguido através das Eqs. (3.12) e (3.13), respetivamente.

$$M_{a,s} = \chi_{O_2} \times M_{O_2} + \chi_{N_2} \times M_{N_2} + \chi_{Ar} \times M_{Ar} + \chi_{CO_2} \times M_{CO_2} \quad (3.12)$$

$$p_{\text{vapor}} = p_{v,s} \times \frac{RH}{100} \quad (3.13)$$

No entanto para calcular a pressão de vapor de água ainda será necessário primeiro calcular a pressão de vapor saturado da água, o que é conseguido através da Eq. (3.14).

$$p_{v,s} = 3619 \times \exp \left[\frac{\Delta H_{\text{vapor}} \times M_{H_2O}}{R_u} \times \left(\frac{1}{298,15} - \frac{1}{273,15 + T_a} \right) \right] \quad (3.14)$$

Tendo em conta todas as forças não conservativas a Eq. (3.1), pode ser simplificada e fica com a forma representada na Eq. (3.15).

$$E_{i+1} - E_i = (-\vec{F}_{R,i} - \vec{F}_{Ax,i}) \times (\vec{s}_{i+1} - \vec{s}_i) \quad (3.15)$$

A energia total despendida ao longo do percurso da zona de ensaios é dada pela Eq. (3.16).

$$E_d = \sum_{i=1}^n (F_{R,i} + F_{Ax,i}) \times (s_{i+1} - s_i) \quad (3.16)$$

Estando agora completamente definidas as forças não conservativas será agora necessário definir a forma de obter a energia mecânica do sistema num determinado ponto do ensaio, isso é conseguido com recurso à Eq. (3.17).

$$E_i = M_t \times g \times h_i + \frac{1}{2} \times M_t \times v_i^2 + \frac{1}{2} \left(I_{RF} \times \frac{4}{D_{RF}^2} + I_{RT} \times \frac{4}{D_{RT}^2} \right) \times v_i^2 \quad (3.17)$$

Em que a primeira parcela representa a energia potencial gravítica do sistema, a segunda parcela representa a energia cinética de translação e a terceira parcela representa a energia cinética de rotação das rodas.

A primeira e segunda parcela são obtidas de forma relativamente fácil com recurso ao aparelho de GPS, para saber a altitude a que se encontra o conjunto, e ao sensor colocado na roda, para determinar a velocidade do conjunto. No entanto a terceira parcela exige um trabalho prévio um pouco mais complexo.

Para tal recorre-se ao teorema de Steiner, representado na Eq. (3.18), em que o momento de inércia da roda em relação ao seu eixo de rotação é igual ao somatório do momento de inércia do elemento da roda em relação ao eixo que passa no centro de massa do elemento da roda e que é paralelo ao eixo de rotação da roda, mais a massa desse elemento a multiplicar pela distância do centro de massa do elemento ao eixo de rotação da roda R.

$$I_R = \sum_{k=1}^n (I_{xx,CM,k} + m_{R,k} \times d_{R,k}^2) \quad (3.18)$$

No entanto na roda existem vários elementos diferentes, pelo que será necessário defini-los todos. Os elementos considerados no cálculo do momento de inércia foram:

- Pneu
- Câmara de ar.
- Aro.
- Fundo de aro.
- Raios.
- Tampo do pipo.
- Cabeça dos raios.
- Cubo da roda.

Os únicos elementos que tem o centro de massa desviado do centro de massa da roda são os raios e como tal são os únicos que possuem a primeira parcela da Eq. (3.18). A equação para determinar o momento de inércia dos raios é a Eq. (3.19).

$$I_{R,raios} = I_{xx,k} + m_k \times d_{R,k}^2 \quad (3.19)$$

Para determinar o momento de inércia dos pneus e dos restantes elementos foram utilizadas as Eqs. (3.20) e (3.21), respetivamente.

$$I_{R,pneu} = \frac{2}{3} \times m_k \times d_{R,k}^2 + \frac{1}{3} \times m_k \times \left(\frac{0,622 + 2 \times h_{pneu}}{2} \right)^2 \quad (3.20)$$

$$I_{R,k} = m_k \times r_k^2 \quad (3.21)$$

O momento de inércia total da roda é a soma dos momentos de inércia de cada elemento. Se for feito o mesmo procedimento para uma roda com mais algum elemento esse elemento deve ser considerado no cálculo do momento de inércia total da roda.

3.1.4. Dados a medir

Apresentadas todas as equações necessárias para a obtenção do $C_x A_f$ importa ainda referenciar todos os dados que deverão ser medidos no momento do ensaio. Na Tabela 3.1 estão representados os dados que é necessário medir e o instrumento a ser utilizado.

Tabela 3.1. Dados a serem medidos para o cálculo do $C_x A_f$ e os seus instrumentos.

Parâmetro a ser medido	Instrumento de medida	Unidades
Massa do conjunto	Balança	[kg]
Temperatura	Termómetro	[°C]
Pressão atmosférica	Site do IPMA	[mbar]
Humidade relativa	Site do IPMA	[%]
Velocidade nos 3 pontos de medida	Sensor de velocidade na roda	[km/h]
Velocidade do vento na direção do movimento	Retirado do site Ventusky	[km/h]
Pressão dos pneus	Bomba de Insuflação	[psi]

De notar que alguns destes parâmetros não podem ser medidos a cada ensaio, por questões de logística, pelo que devem ser lidos no início dos ensaios e no fim dos mesmos e posteriormente ser feita uma regressão linear entre os valores no início e no fim dos ensaios para se obterem os valores desses parâmetros para o momento do ensaio.

3.2. Cálculo da potência desenvolvida pelo ciclista

Tendo já o produto do $C_x A_f$ obtido pelo método apresentado na secção 3.1, pode-se agora obter o valor da potência para essas mesmas posições, com o objetivo de depois conjugar as duas e tirar conclusões sobre a melhor opção para o ciclista em função do tipo de terreno que irá enfrentar na prova.

Os ensaios de medição de potência poderiam ser feitos apenas com medidores de potência sejam eles através de aparelhos GPS ou então com recurso a pedais específicos que calculam a força exercida pelo ciclista e a convertem em potência. Como é lógico os segundos apresentam uma maior precisão nos resultados que os primeiros.

No entanto nesta dissertação optou-se por utilizar um método desenvolvido por Carvalheira [36], de modo a ter em conta mais fatores para obter a potência desenvolvida pelo ciclista.

3.2.1. Local

O local que foi utilizado para a realização destes ensaios, foi diferente do local de ensaios para a avaliação do produto do $C_x A_f$ do conjunto ciclista + bicicleta. Uma vez que essa subida seria demasiado curta, em termos de duração do esforço físico, para avaliar a potência desenvolvida pelo ciclista. Esta escolha foi feita porque a potência de um ciclista só tende a estabilizar ao fim de um tempo de esforço de algumas dezenas de minutos, como se pode verificar pela Fig. 3.6.

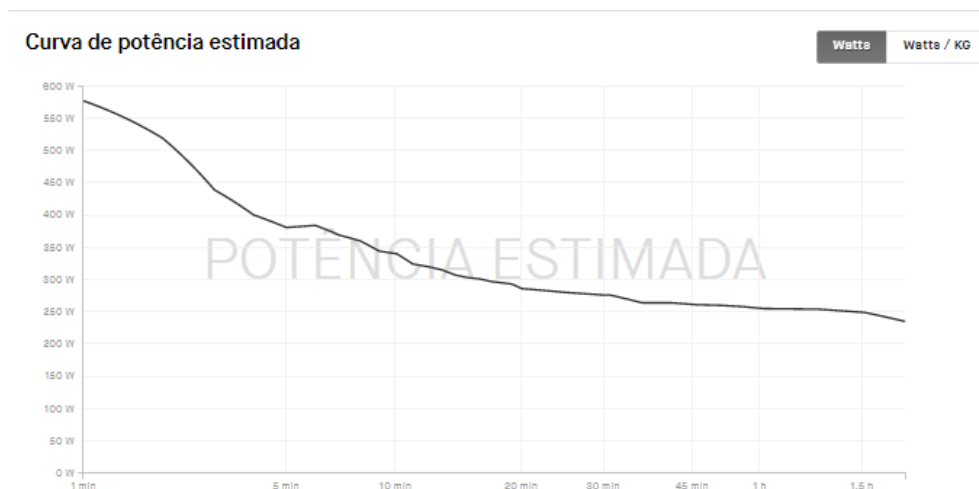


Figura 3.6. Potência de um ciclista em função do tempo de esforço - Retirado da aplicação Strava® do atleta Pedro Carvalheira.

Sendo assim escolheu-se um local que estivesse abrigado do vento por casas e vegetação dos dois lados da estrada, desta vez a influência do $C_x A_f$ é menor pelo facto de o ciclista não atingir velocidades tão elevadas, que tivesse uma subida de pendente praticamente constante e uma distância considerável, de modo a permitir que o ciclista tenha um esforço de tempo superior a uma dezena de minutos, para que a sua potência já esteja praticamente estabilizada. O local de início e fim do percurso podem ser vistos nas Figs. 3.7a e 3.7b, respetivamente. A totalidade do percurso terá 2,740 km, uma pendente média de 5,52 % e um desnível de 151 m, o percurso seleccionado pode ser visto na sua totalidade na Fig. 3.7c, representado pela linha azul.



Figura 3.7. (a) Início da zona de ensaios; (b) Fim da zona de ensaios; (c) Percurso total a ser percorrido durante um ensaio.

3.2.2. Descrição do método

Para este método considera-se novamente a variação de energia entre o ponto de partida e o ponto de chegada, no entanto devido ao facto de que nem toda a potência ser transmitida à roda de trás irá ser necessário introduzir o fator de rendimento da transmissão, representado na equação da variação de energia como η_{tr} . Segundo Underwood [40] o rendimento da transmissão para potências entre 100 e 400 W situa-se entre 0,95 e 0,98, e é dependente da tensão da corrente, tipo de corrente, lubrificação da corrente e da relação de transmissão. Tendo em conta o que Underwood constatou optei por escolher um valor de rendimento da transmissão de 0,97. A equação da variação de energia entre dois pontos do percurso é a Eq. (3.22).

$$W_{ciclista} = -(E_{i+1} - E_i) = \frac{(-\vec{F}_{R,i} - \vec{F}_{Ax,i}) \times (\vec{s}_{i+1} - \vec{s}_i)}{\eta_{tr}} \quad (3.22)$$

As forças presentes na Eq. (3.22) podem ser vistas na Fig. 3.8.

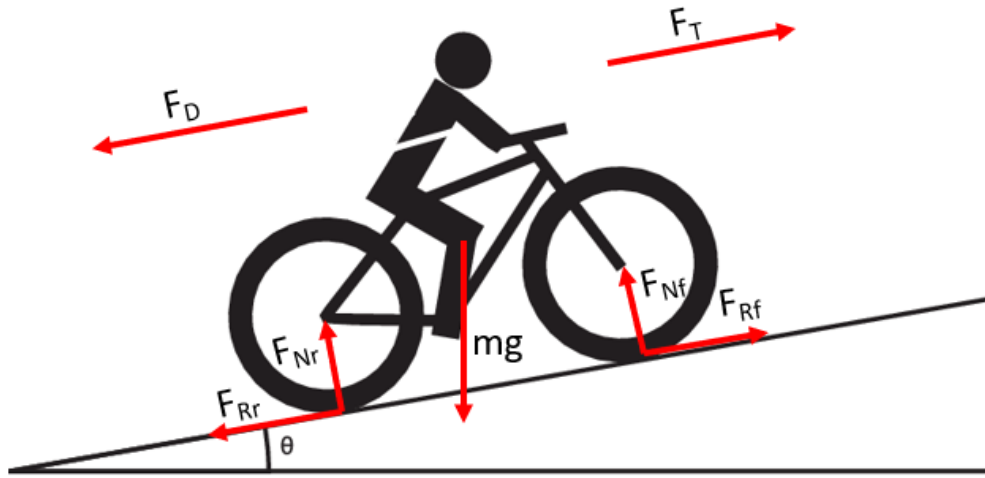


Figura 3.8. Forças que atuam sobre o conjunto ciclista + bicicleta durante o ensaio - adaptado de [43].

A potência média desenvolvida pelo ciclista entre a partida e a chegada do trajeto pode ser obtida pela Eq. (3.23).

$$\dot{W}_{\text{ciclista}} = \frac{M_t g \times \frac{(h_c - h_p)}{\Delta t} + (|\vec{F}_R| + |\vec{F}_{Ax}|) \times (v_{\text{méd}})}{\eta_{\text{tr}}} \quad (3.23)$$

Para a aplicação da Eq. (3.23) será necessário calcular previamente $|\vec{F}_{Ax}|$, o que é realizado com a Eq. (3.25), calcular $|\vec{F}_R|$, o que é realizado com a Eq. (3.2) e calcular a $v_{\text{méd}}$, o que é realizado através da Eq. (3.24).

$$v_{\text{méd}} = \frac{d}{\Delta t} \quad (3.24)$$

$$|\vec{F}_{Ax}| = \frac{1}{2} \times C_x A_f \times \rho_a \times (v_{\text{méd}} + v_{v \text{ méd,p}})^2 \quad (3.25)$$

Sendo que a velocidade média do vento, $v_{v \text{ méd,p}}$, da Eq. (3.25) calcula-se de acordo com a Eq. (3.26).

$$v_{v \text{ méd,p}} = 0,10 \times v_{\text{vento}} \times \cos(\psi_{P-C} - \psi_{\text{vento}}) \quad (3.26)$$

Na Eq. (3.26) é assumido que a velocidade do vento ao nível do conjunto ciclista + bicicleta é igual 10 % da velocidade do vento a 10 m de altura, devido ao percurso estar protegido do vento por edifícios e vegetação ao longo da quase totalidade do percurso.

3.2.3. Procedimento na realização dos ensaios

Este novo método baseia-se em medir o tempo (Δt) que o ciclista demorou a percorrer o percurso definido, assumindo um conjunto de pressupostos para que seja válido o ensaio:

- O peso do conjunto mantém-se constante durante o ensaio, no entanto utiliza-se a média do peso entre o início e o fim do ensaio.
- É mantida a mesma posição na bicicleta ao longo de todo o ensaio.
- As casas e vegetação que existem dos dois lados da via tornam o vento praticamente nulo.
- A frequência cardíaca do ciclista deve ser mantida praticamente constante, sendo o seu valor definido previamente ao teste.
- As condições atmosféricas não se alteram ao longo de todo o ensaio.

Para este método será necessário um conjunto de equipamentos tais como:

- Aparelho de GPS, de modo a registar a posição em que se encontra o ciclista durante a realização do ensaio e medir o tempo realizado entre o início e fim do ensaio.
- Todo o material necessário a um ciclista, desde bicicleta a equipamentos e acessórios.
- Será preciso recorrer ao site Ventusky para saber a velocidade e direção do vento durante o ensaio.
- Será ainda necessário recorrer ao site IPMA de modo a obter a pressão atmosférica, temperatura do ar e humidade relativa do ar durante o ensaio.
- Por fim será necessário um computador para tratar os dados com recurso ao programa Microsoft® Excel.

3.2.4. Dados a medir

Apresentadas todas as equações necessárias para a resolução importa ainda referenciar todos os dados que deverão ser medidos no momento do ensaio. Na Tabela 3.2 estão apresentados os dados que é necessário medir e os instrumentos utilizados.

A frequência cardíaca do atleta não entra no cálculo da potência, mas permite medir o nível de esforço do atleta, que posteriormente devido aos diferentes níveis de frequência cardíaca permitirá realizar um gráfico da potência do ciclista em função da frequência cardíaca. A medição da frequência cardíaca também permite evitar que o ciclista atinja o seu limite e colapse em termos físicos.

A potência média retirada da aplicação Strava não entra no cálculo, mas serve de parâmetro de controlo para o valor obtido pelo método.

Tabela 3.2. Dados medidos no ensaio de potência e os instrumentos utilizados.

Parâmetro a ser medido	Instrumento de medida	Unidades
Tempo	Cronómetro do GPS	[s]
Massa do conjunto	Balança	[kg]
Pressão dos pneus	Manómetro da Bomba de insuflação	[psi]
Temperatura	Retirado do site Ventusky	[°C]
Pressão atmosférica	Retirado do site IPMA	[mbar]
Humidade relativa	Retirado do site Ventusky	[%]
Velocidade e direção do vento	Retirado do site Ventusky	[km/h]
Frequências cardíacas mínimas, médias e máximas	Sensor de frequência cardíaca	[bpm]
Potência média	Aplicação Strava	[W]

4. CONFIGURAÇÕES DO CONJUNTO

Neste capítulo da dissertação de mestrado irão ser apresentadas as configurações testadas, com o objetivo de no próximo capítulo apresentar os resultados dessas mesmas configurações.

4.1. Configuração 0

Nesta secção irá ser apresentada a configuração 0, com o objetivo de nas próximas secções serem apresentadas algumas alterações desta configuração 0, de forma a melhorar o desempenho do ciclista.

4.1.1. Configuração da bicicleta

Como configuração 0 foi escolhida uma bicicleta de contrarrelógio, uma vez que:

- Apresenta roda lenticular na roda traseira da mesma, facto que já foi amplamente testado e apresenta ótimos resultados como pode ser visto na secção 2.3.1.
- Apresenta extensores no guiador, característica essencial para qualquer ciclista que pretenda ter um arrasto aerodinâmico o mais baixo possível.

De modo a que os resultados dos testes possam ser analisados e comparados com os de outros autores será necessário definir todas as medidas características da bicicleta escolhida para a realização dos ensaios. As principais medidas características estão apresentadas na Fig. 4.1.

A bicicleta escolhida foi a GIANT TRINITY ADVANCED PRO TT 2017 Frame Size XS, e é constituída pelos componentes representados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Principais componentes da bicicleta GIANT TRINITY ADVANCED PRO TT 2017 Frame Size XS.

Componente	Modelo
Roda da frente	REYNOLDS STRIKE SLG 25.0 × 62 mm Carbon Clincher 16 raios
Roda de trás	ZIPP SP9 CC V2 CCL 700R SR 11S WHT
Pneu roda da frente	Continental GP 5000 622-23C
Pneu roda de trás	Continental GP 5000 622-25C
Câmara de ar roda da frente e de trás	MICHELIN AIRCOMP LATEX 700C 22<->23-622 Válvula Presta de 60 mm
Bidon	GIANT AeroVault de 440 ml
Selim	ISM PN 3.0 Black
Pedais	LOOK Blade Ti
Extensores	GIANT originais da bicicleta
Pedaleiro	SRAM RED GXP Crankset 11 SP 167.5
Prato grande	SRAM ROAD TT 55T 11S 130
Prato pequeno	SRAM ROAD 42T V4 130 AL3 BLK 11S

Otimização do desempenho de ciclistas de competição baseada na medição experimental do seu arrasto aerodinâmico e potência

Desviador frontal	Shimano Dura-Ace Di2 FD-R9150 2×11s
Desviador traseiro	Shimano Dura-Ace Di2 RD-R9150-SS 11s
Cassete	SRAM RED XG 1190 11SP 11-28T
Corrente	SRAM RED 22 com Quick Link SRAM 11 Sp - 108 elos
Apertos de roda	TRIRIG STIX
Almofadas dos apoios de braços	Ritchey

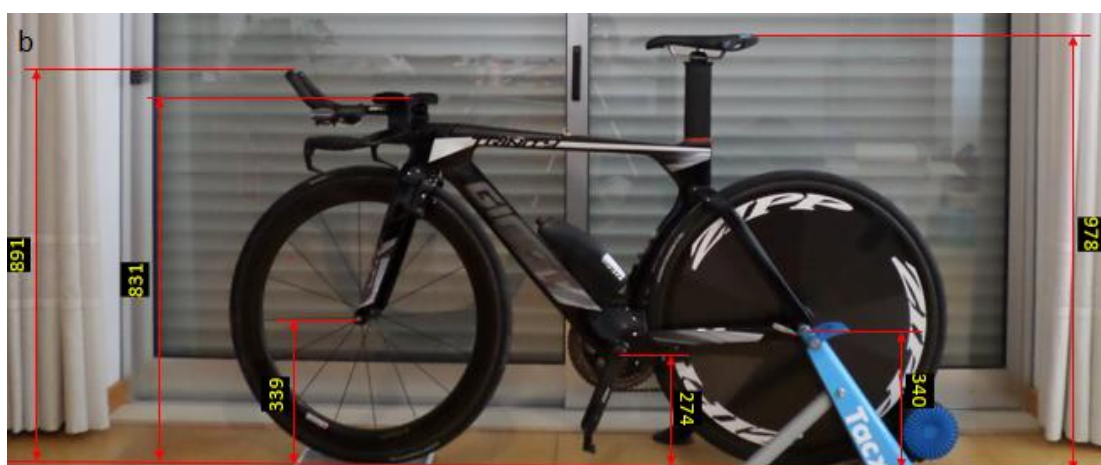


Figura 4.1. (a) Principais medidas no eixo horizontal da bicicleta; (b) Principais medidas no eixo vertical da bicicleta.

4.1.2. Configuração do ciclista

O equipamento e acessórios escolhidos para a configuração 0 do ciclista são apresentados na Fig. 4.2.

A especificação dos principais elementos utilizados na configuração 0 do ciclista é apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Principais elementos utilizados pelo ciclista.

Componente	Modelo
Fato	Skinsuit CASTELLI Body Paint 4.X Speedsuit, Grey and Black, tamanho M
Capacete	GIANT RIVET TT, tamanho M (55-59 cm)
Óculos	DPV Nostral Preto Fotocromático
Sapatilhas	SHIMANO RP9, tamanho 43
Luvras	CASTELLI Aero Speed, tamanho L
Meias	CASTELLI FAST FEET Pretas e Vermelhas, tamanho L/XL
Capas das sapatilhas	VELOTÓZE cor de laranja e curtas, tamanho M (39-42,5)
Depilação	Depilação com lâmina de barbear até 6 h antes do início das medições



Figura 4.2. Configuração 0 usada pelo ciclista.

4.1.3. Posições do ciclista na bicicleta

Como tinha sido dito no capítulo 1 a posição ideal para um ciclista não é um dado que se saiba antes da realização dos ensaios, uma vez que pode mudar a posição ideal de ciclista para ciclista. Assim sendo para cada configuração será necessário medir o $C_x A_f$ em função da posição do ciclista na bicicleta. Por esta razão definiram-se quatro posições de contrarrelógio. Estas 4 posições que irão ser testadas em todas as configurações desta dissertação estão apresentadas na Fig. 4.3, em que a única diferença entre elas reside na D_{as}

(distância anca selim). D_{as} toma os valores de 0, 5, 10 e 15 cm para $D_{as 1}$, $D_{as 2}$, $D_{as 3}$ e $D_{as 4}$ respetivamente.

Para além de serem testadas as 4 posições de contrarrelógio, ainda será testada uma posição em que o ciclista coloca as suas mãos no guiador e mantém os braços esticados como é apresentado na Fig. 4.4. Esta posição foi testada não com intuito de ser a melhor em termos aerodinâmicos, mas pelo facto de que com a mesma se poderem obter resultados de potência bastante melhores e por isso poder ser a melhor opção para velocidades mais baixas.

Relativamente ao D_{as} escolhido para esta posição em específico, foi D_{as} de 10 cm, uma vez que segundo o ciclista esta era a posição mais confortável e por isso será a posição em que se espera que consiga desenvolver uma potência mais elevada, facto que será analisado na secção 6.4.

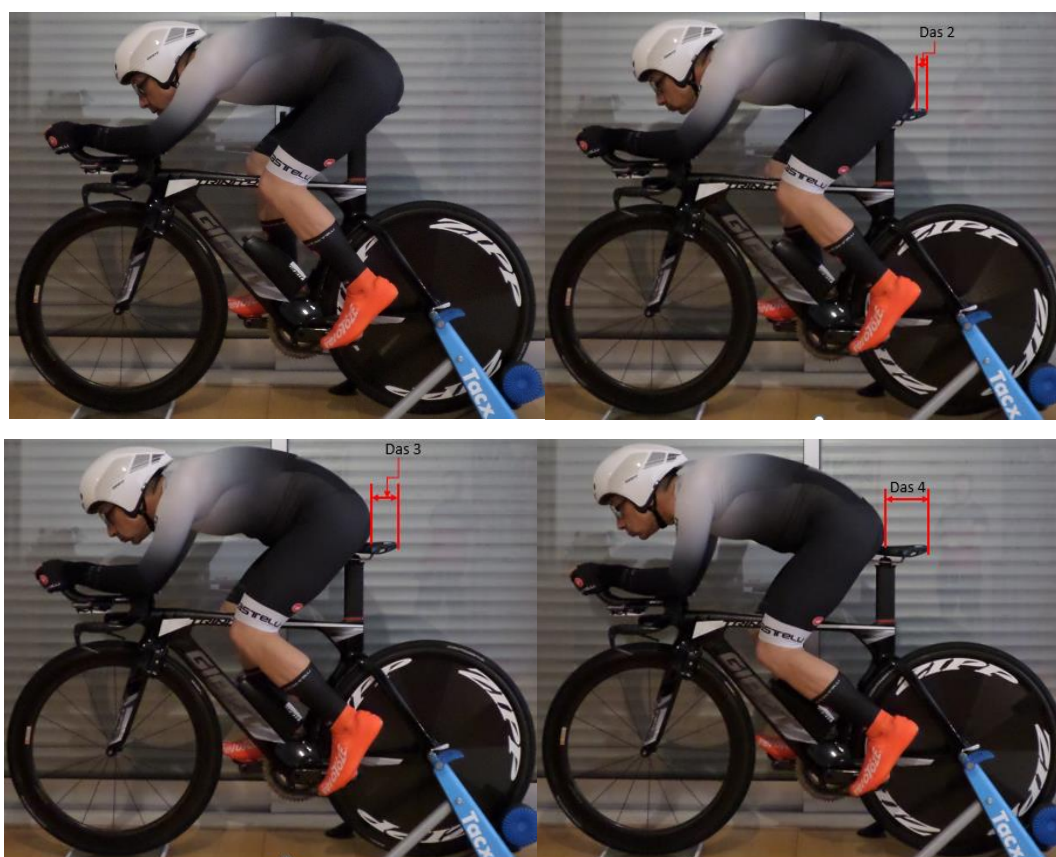


Figura 4.3. Configuração 0 usada pelo ciclista em posição de contrarrelógio.

A altura da câmara e a distância da câmara ao ciclista estão apresentadas no anexo A.

Para que o ciclista não se engane na D_{as} foi usada fita cola de cor preta, com superfície com relevo, para que existisse algum relevo no selim e assim o ciclista conseguisse com mais facilidade replicar a posição desejada. Para melhor visualização do selim e da fita cola consultar o anexo A.



Figura 4.4. Configuração 0 usada pelo ciclista em posição de maximizar a potência.

4.2. Configuração 1

Como primeira alteração e consequente tentativa de melhoria do desempenho do ciclista testou-se um fato diferente.

Conforme explicado na secção 2.3.5 desta dissertação a escolha adequada do fato do ciclista é de extrema importância uma vez que pode em casos extremos levar a perdas de tempo na ordem dos 50 s, numa prova de 50 km.

Sabendo desta situação decidiu-se testar o fato Skinsuit *CASTELLI Body Paint 3.3 Speedsuit, Black and Red*, tamanho M, uma vez que o mesmo apresentava buracos nas mangas e na zona da coxa de forma a promover a transição de escoamento de camada limite de laminar para turbulento. A transição do regime do escoamento é importante uma vez que se o escoamento tiver mais energia, caso do escoamento turbulento, irá retardar o “descolamento” do escoamento no objeto em análise, promovendo a diminuição da pressão negativa.

Relativamente à configuração 0 apenas é alterada a configuração do ciclista, mantendo a mesma configuração da bicicleta e as posições adotadas pelo ciclista.

No que diz respeito à alteração da configuração do ciclista apenas é alterado o fato que o mesmo utiliza, esta nova configuração é apresentada na Fig. 4.5.



Figura 4.5. Configuração 1.

4.3. Configuração 2

Como segunda alteração e conseqüente tentativa de melhoria do desempenho do ciclista testou-se um capacete diferente.

A escolha de um capacete adequado para o ciclista pode em casos extremos trazer uma vantagem de cerca de 90 s, numa prova de 40 km, pelo que o teste deste componente é de extrema importância. Sabendo deste facto decidiu-se testar o capacete *LAZER VOLANTE*, tamanho M.

Relativamente à configuração 0 apenas é alterada a configuração do ciclista, mantendo a mesma configuração da bicicleta e as posições adotadas pelo ciclista.

No que diz respeito à alteração da configuração do ciclista apenas é alterado o capacete que o mesmo utiliza. Esta nova configuração é apresentada na Fig. 4.6.



Figura 4.6. Configuração 2.

4.4. Configuração 3

Como terceira e última alteração e conseqüente tentativa de melhoria do desempenho do ciclista testou-se uma roda dianteira diferente.

Como explicado na secção 2.3.2 a roda ideal para condições atmosféricas ideais é a lenticular, no entanto o uso deste tipo de roda à frente é ilegal. Sabendo deste facto decidiu-se testar a roda *HED JET 9 RC BLACK*. Que é uma roda com um perfil lateral maior que a roda da configuração 0 e como tal com características mais aproximadas da roda lenticular que a anterior, tal como é apresentado na Fig. 4.7.

Relativamente à configuração 0 é alterada a configuração do ciclista e a configuração da bicicleta, mantendo as posições adotadas pelo ciclista.

No que diz respeito a configuração 0 do ciclista é alterado o capacete, utilizando o mesmo capacete da configuração 2.

Relativamente a configuração 0 da bicicleta apenas é alterada a roda dianteira.



Figura 4.7. Configuração 3.

5. RESULTADOS

Neste capítulo vão ser apresentados os resultados do produto $C_x A_f$, área frontal e o coeficiente da força aerodinâmica segundo x (C_x) das 4 configurações apresentadas no capítulo 4.

Ainda neste capítulo serão apresentados os resultados de potência para a configuração 2.

5.1. $C_x A_f$

Estando definidas na totalidade as configurações do ciclista, equipamento e posição, e as configurações da bicicleta, pode-se dar início aos ensaios com o intuito de determinar o valor do $C_x A_f$ das diferentes configurações, usando o método descrito na secção 3.1.

De forma a garantir resultados mais precisos cada posição apresentada nos gráficos desta secção foi testada 3 vezes.

Importa ainda dizer que os resultados apresentados resultam das medições de velocidade realizadas no Ponto de Medição (PM) e que os resultados para as medições de velocidade realizadas na Ponte Pedonal (PP) podem ser consultados no anexo B.

5.1.1. Configuração 0

Os resultados obtidos para o produto $C_x A_f$ para a configuração 0 nas diferentes posições de contrarrelógio, especificadas por valores distintos de D_{as} , são apresentados na Fig. 5.1.

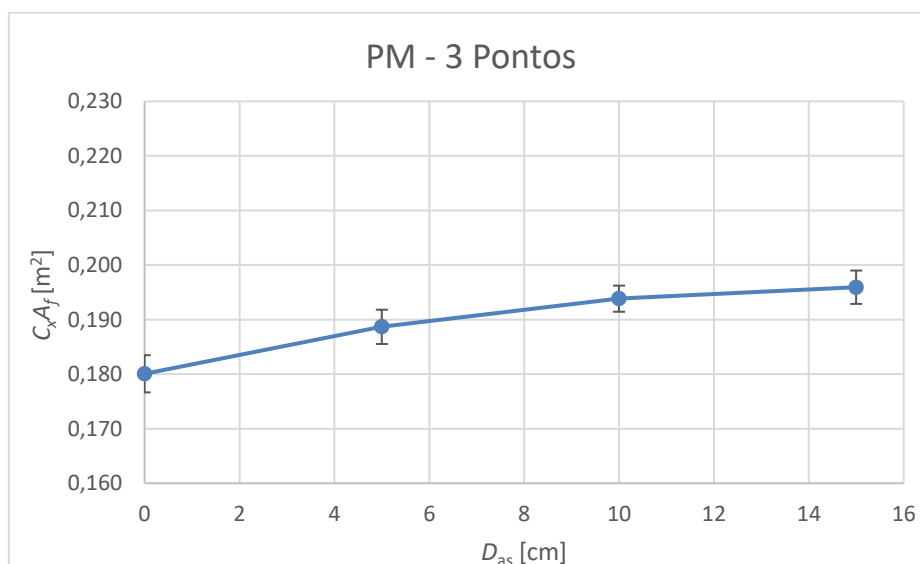


Figura 5.1. Evolução de $C_x A_f$ em função de D_{as} para a configuração 0.

De referir ainda que o produto $C_x A_f$ obtido para a configuração 0 do conjunto para a posição representada na Fig. 4.4 foi de $0,2415 \text{ m}^2$ e um desvio padrão associado de $0,0105 \text{ m}^2$.

5.1.2. Configuração 1

O efeito da mudança do fato do ciclista no produto $C_x A_f$, em diferentes posições de contrarrelógio, especificadas por valores distintos de D_{as} , relativamente à configuração 0 é apresentado na Fig. 5.2.

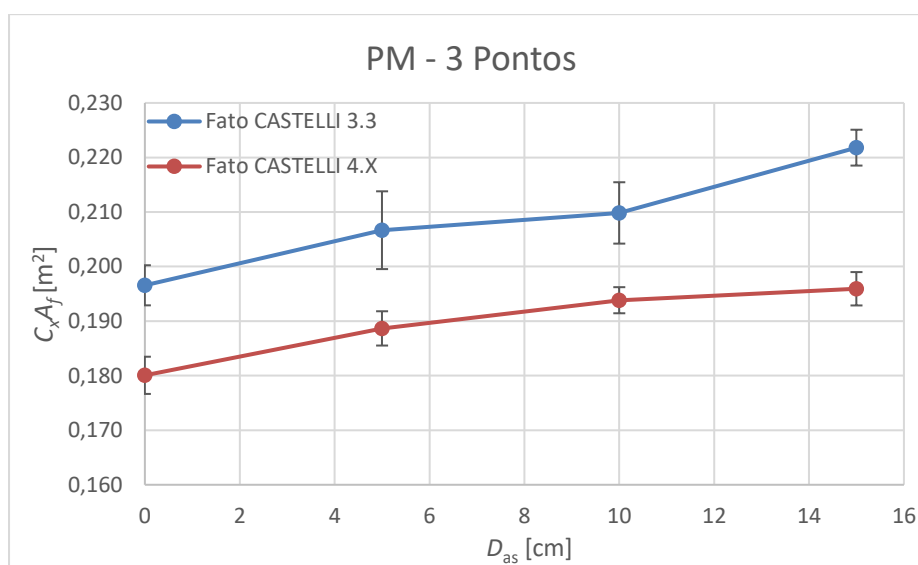


Figura 5.2. Efeito da mudança do fato do ciclista na evolução do produto $C_x A_f$ em função de D_{as} .

O desvio padrão destes ensaios pode ser consultado com mais detalhe no anexo D.

5.1.3. Configuração 2

O efeito da mudança do capacete do ciclista no produto $C_x A_f$, em diferentes posições de contrarrelógio, especificadas por valores distintos de D_{as} , relativamente à configuração 0 é apresentado na Fig. 5.3.

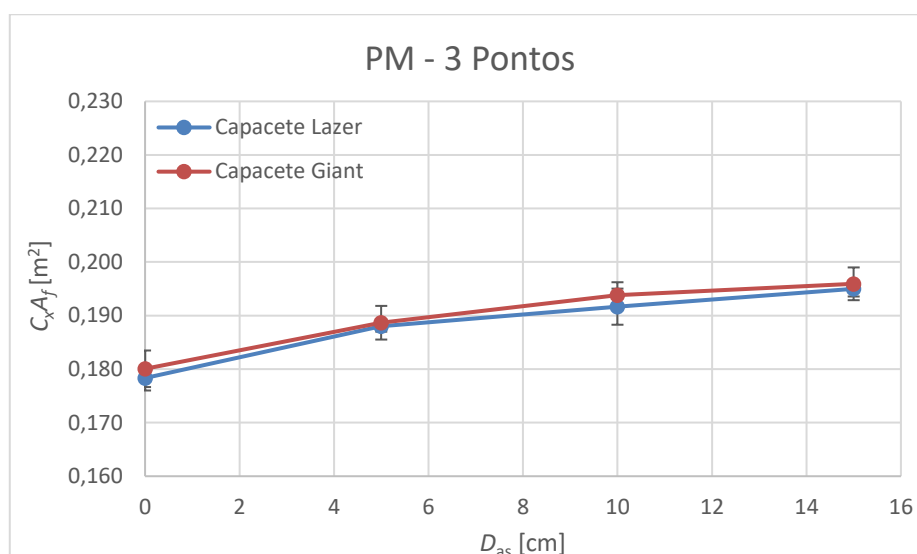


Figura 5.3. Efeito da mudança do capacete do ciclista na evolução do produto $C_x A_f$ em função de D_{as} .

De referir ainda que para a posição da Fig. 4.4 o valor do $C_x A_f$ é de 0,2270 m² e tem um desvio padrão de 0,0034 m².

O desvio padrão destes ensaios pode ser consultado com mais detalhe no anexo D.

5.1.4. Configuração 3

O efeito da mudança da roda da frente da bicicleta no produto $C_x A_f$, em diferentes posições de contrarrelógio, especificadas por valores distintos de D_{as} , é apresentado na Fig. 5.4.

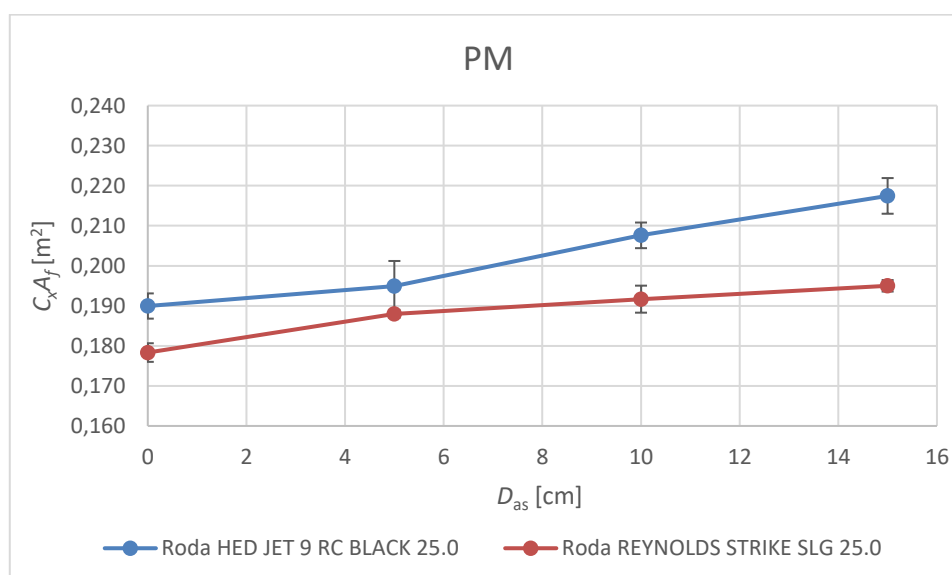


Figura 5.4. Efeito da mudança da roda da frente da bicicleta na evolução do produto $C_x A_f$ em função de D_{as} .

O desvio padrão destes ensaios pode ser consultado com mais detalhe no anexo D.

5.2. Área frontal (A_f)

Uma vez que a área frontal é um dos fatores mais influentes no valor do arrasto aerodinâmico, a mesma deve ser determinada. Para tal foi usado o método da digitalização apresentado na secção 2.1, com uma alteração em relação ao programa utilizado. Em vez de ser utilizado o programa *Scion Image Release Alpha 4.0.3.0.2 for Windows* foi utilizado o programa *ImageJ*.

Como referido na secção 2.1 para a utilização do programa foi necessário primeiro tratar a imagem, como pode ser visto na Fig. 5.5b, para tal foi utilizado o programa *Adobe Photoshop 2020*. Por fim, no programa *ImageJ* foi necessário transformar a imagem de modo a ficar binária como pode ser visto na Fig. 5.5c. Feitas as transformações de imagem necessárias o programa calcula a área frontal da parte preta da imagem.

De forma a que as fotos tivessem o menor erro possível devido a planos de imagem diferentes da realidade foram definidas previamente a altura da câmara, altura do quadro preto e distância da mesma ao quadro preto, que na situação ideal deveria ser infinita. Essas medidas estão apresentadas no anexo A.



Figura 5.5. (a) Imagem original do conjunto ciclista + bicicleta; (b) Imagem após processamento no programa *Adobe Photoshop 2020*; (c) Imagem final no programa *ImageJ*.

De forma a garantir resultados mais precisos em cada posição foram tiradas duas fotos e analisadas as duas.

Apenas foram analisadas as áreas frontais da configuração 0 e da configuração 2, uma vez que as configurações 1 e 3 apresentam mudanças que praticamente não alteram a área frontal, como é o caso do fato e da roda da frente.

5.2.1. Configuração 0

Os resultados da evolução da área frontal em função de D_{as} obtidos para a configuração 0, nas posições de contrarrelógio, são apresentados na Fig. 5.6.

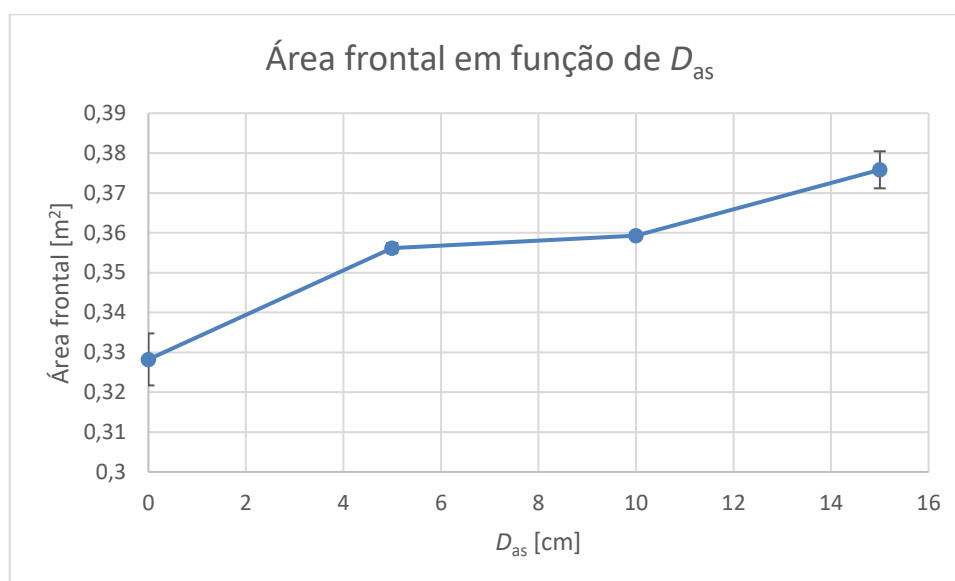


Figura 5.6. Evolução da área frontal do conjunto ciclista + bicicleta em função de D_{as} nas posições de contrarrelógio.

O valor médio obtido da área frontal para a configuração 0 com o ciclista com as mãos no guidador e braços esticados, posição da Fig. 4.4, foi de $0,474 m^2$ tendo um desvio padrão de $0,002 m^2$.

5.2.2. Configuração 2

O efeito da mudança do capacete do ciclista na área frontal do conjunto ciclista + bicicleta, em diferentes posições de contrarrelógio, especificadas por valores distintos de D_{as} , relativamente à configuração 0 é apresentado na Fig. 5.7.

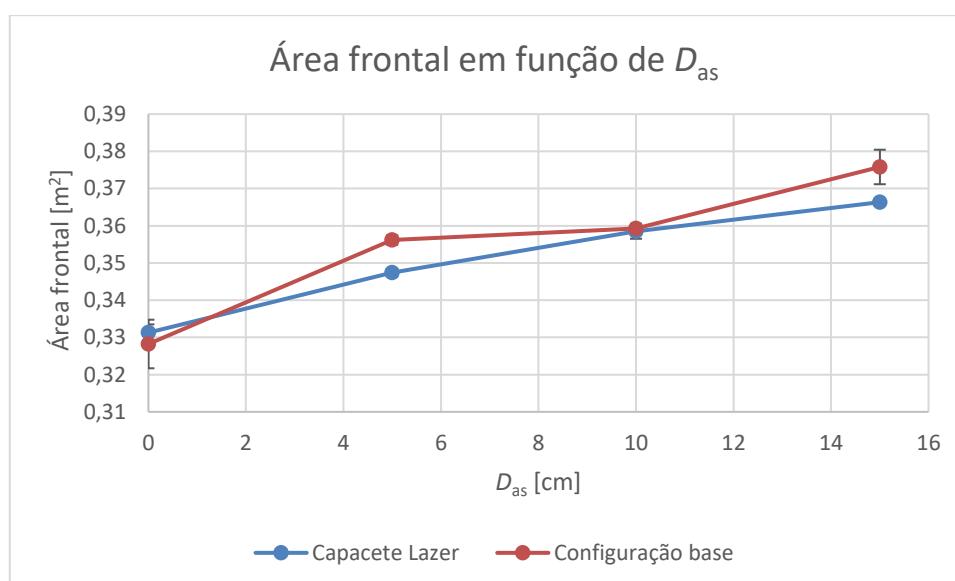


Figura 5.7. Efeito da mudança do capacete do ciclista na evolução da área frontal em função de D_{as} .

Importa ainda referir que para esta configuração, na posição da Fig. 4.4, a área frontal medida do conjunto ciclista + bicicleta tem um valor de $0,4548 \text{ m}^2$ e um desvio padrão de $0,0014 \text{ m}^2$.

5.3. Coeficiente da força aerodinâmica segundo x (C_x)

Sabendo o valor do produto $C_x A_f$ calculado na secção 5.1 e o valor da área frontal calculada na secção 5.2 é possível obter o valor do C_x .

De referir que foram utilizados os valores das medições de velocidade no PM para a obtenção do C_x .

5.3.1. Configuração 0

Os resultados obtidos para o C_x em função de D_{as} para a configuração 0, nas posições de contrarrelógio, especificadas por valores distintos de D_{as} , são apresentados na Fig. 5.8.

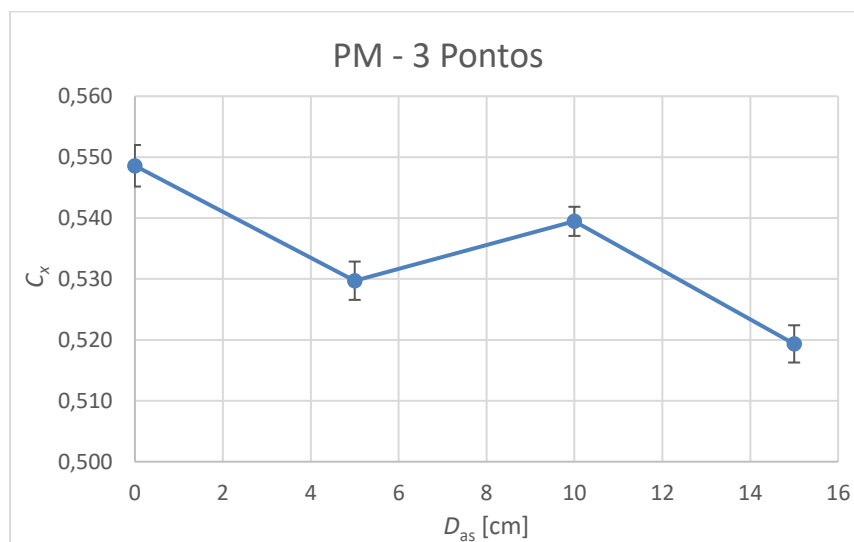


Figura 5.8. Evolução do C_x do conjunto ciclista + bicicleta em função de D_{as} na configuração 0.

Relativamente à posição da Fig. 4.4 o valor do C_x tem o valor médio de $0,5098$ tendo um desvio padrão de $0,0222$ para as 3 medições efetuadas.

5.3.2. Configuração 1

O efeito da mudança do fato do ciclista no C_x do conjunto ciclista + bicicleta, em diferentes posições de contrarrelógio, especificadas por valores distintos de D_{as} , relativamente à configuração 0, é apresentado na Fig. 5.9.

A área frontal utilizada foi a da configuração 0 uma vez que a alteração de fato não iria trazer mudanças significativas neste parâmetro.

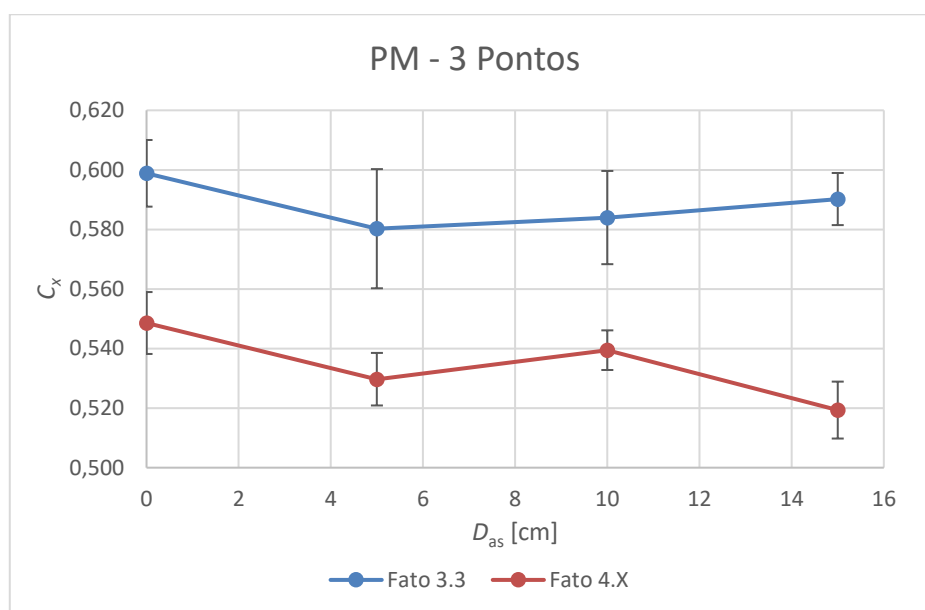


Figura 5.9. Efeito da mudança do fato do ciclista na evolução de C_x em função de D_{as} .

5.3.3. Configuração 2

O efeito da mudança do capacete do ciclista no C_x do conjunto ciclista + bicicleta em diferentes posições de contrarrelógio, especificadas por valores distintos de D_{as} , relativamente à configuração 0, é apresentado na Fig. 5.10.

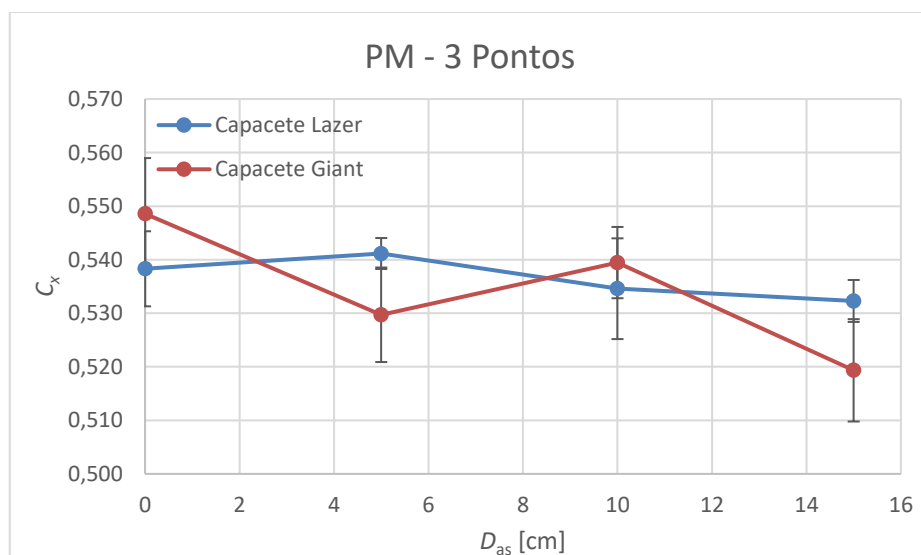


Figura 5.10. Efeito da mudança do capacete do ciclista na evolução de C_x em função de D_{as} .

Relativamente à posição da Fig. 4.4, o C_x tem o valor de 0,4991 e um desvio padrão de 0,0075.

5.3.4. Configuração 3

O efeito da mudança da roda da frente da bicicleta no C_x do conjunto ciclista + bicicleta em diferentes posições de contrarrelógio, especificadas por valores distintos de D_{as} , é apresentado na Fig. 5.11.

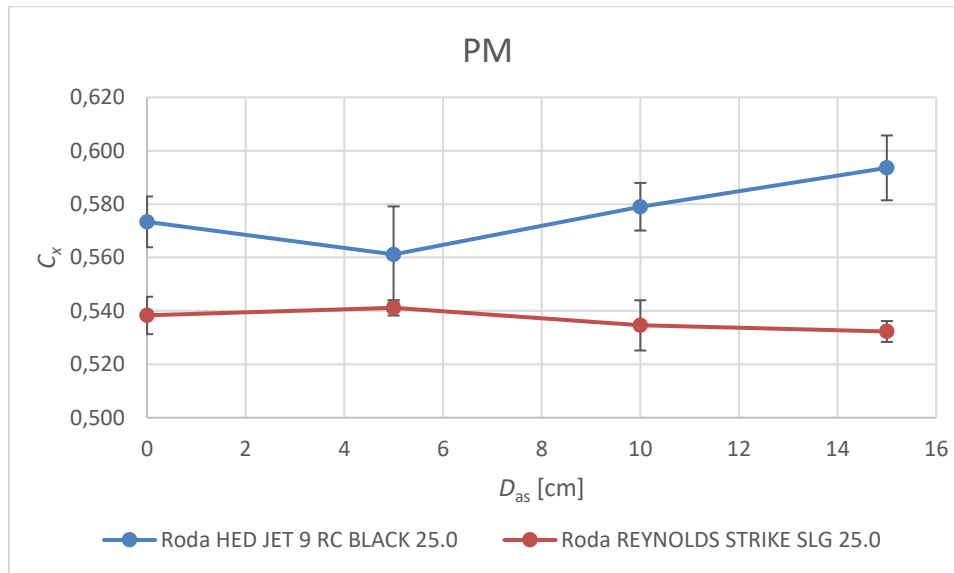


Figura 5.11. Efeito da mudança da roda da frente da bicicleta no C_x em função da D_{as} .

5.4. Potência

Nesta secção irão ser apresentados os resultados da medição da potência debitada pelo ciclista nas 4 posições de contrarrelógio e na posição da Fig. 4.4, utilizando o método descrito na secção 3.2.

Para tal, cada posição foi testada a 3 frequências cardíacas distintas, de modo a ser possível obter a evolução da potência em função da frequência cardíaca do ciclista.

As frequências cardíacas escolhidas foram 120, 130 e 140 bpm, de forma a evitar que o ciclista superasse os 90 % do seu V_{O_2} máx. Uma vez que segundo Atkinson [42], os melhores ciclistas de estrada apenas conseguem manter o V_{O_2} máx acima de 90 % durante 1 hora e como os ensaios representam cerca de 2 horas de exercício, deve se manter um V_{O_2} máx abaixo de 90 % de modo a evitar fadiga do ciclista.

Desta forma é garantido que se analisa a potência do ciclista em função da posição adotada em vez de ser analisado o cansaço devido à duração e intensidade do esforço.

Os resultados da potência debitada pelo ciclista em função da frequência cardíaca para várias posições são apresentados na Fig. 5.12.

A configuração utilizada para este ensaio foi a configuração 2, uma vez que apresenta o melhor capacete testado e o melhor fato testado.

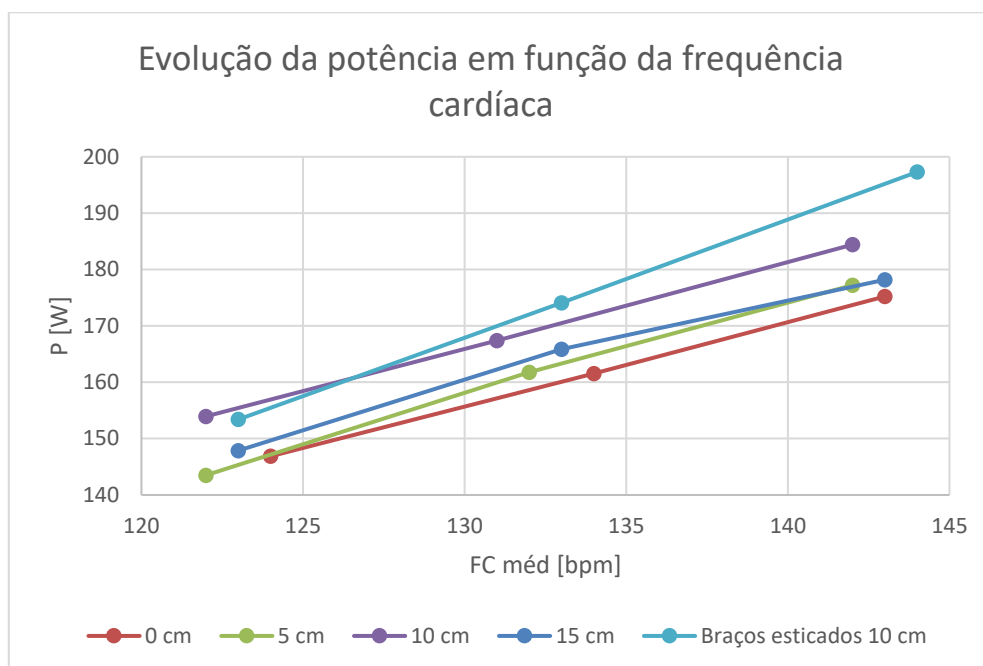


Figura 5.12. Evolução da potência debitada pelo ciclista em função da frequência cardíaca para várias posições.

5.5. Posição ideal em função da inclinação da estrada

De forma a determinar a posição ideal para o ciclista em função da inclinação longitudinal da estrada foi utilizado o método descrito na secção 3.2, no entanto neste caso o valor a determinar é o tempo total para completar um percurso de 5000 m. A potência utilizada nestas simulações, para cada posição, foi a potência determinada na secção 5.4 para a frequência cardíaca considerada na simulação.

Como tal fizeram-se simulações para cada posição variando a inclinação longitudinal da estrada desde -8 % até 8 % e para uma frequência cardíaca fixa. Os resultados destas simulações são apresentados na Fig. 5.13 e Fig. 5.14.

A configuração utilizada nestes ensaios foi a configuração 2.

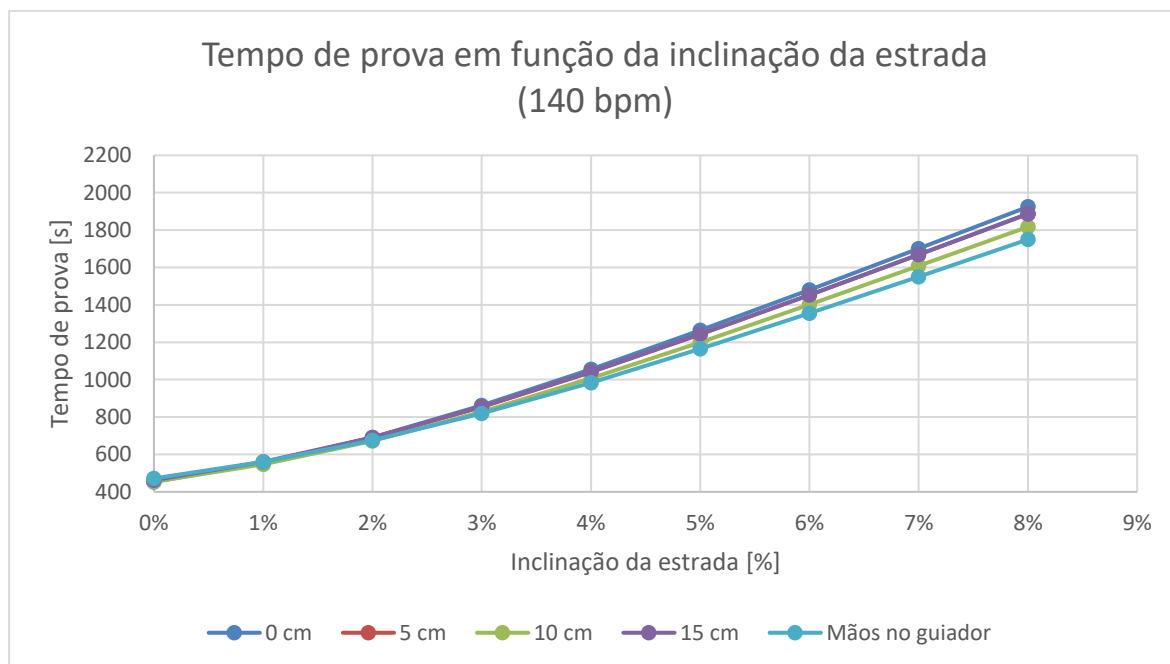


Figura 5.13. Tempo total de prova em função da inclinação longitudinal da estrada, em subida.

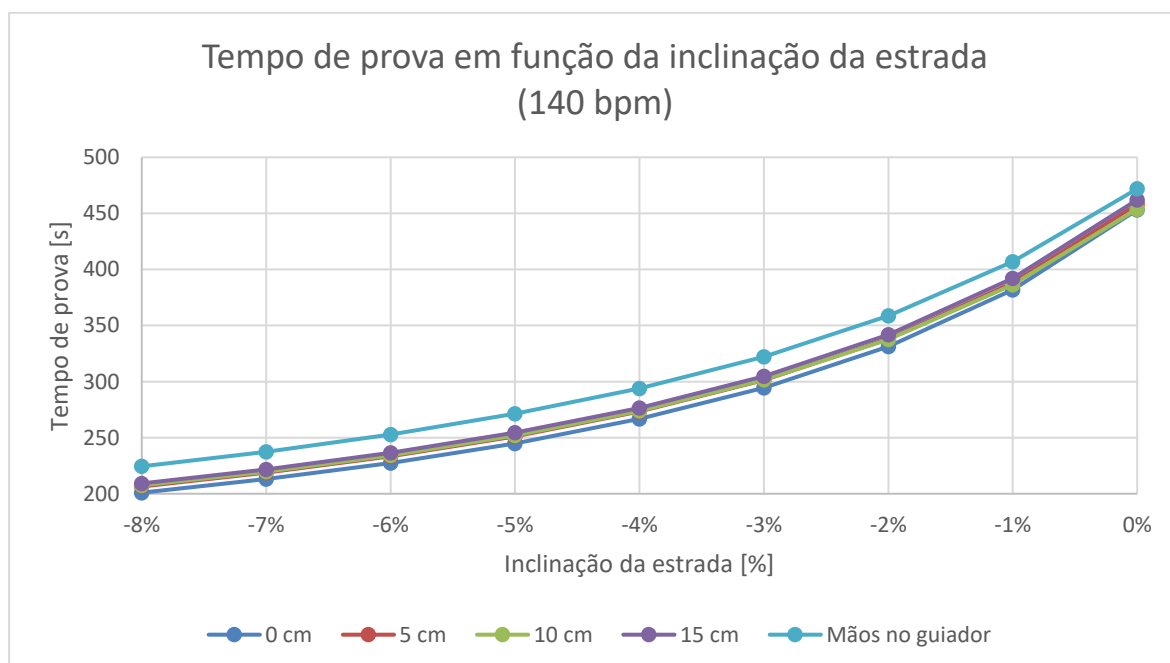


Figura 5.14. Tempo total de prova em função da inclinação longitudinal da estrada, em descida.

Os valores do tempo de prova em função da inclinação longitudinal da estrada e da posição, para a frequência cardíaca de 140 bpm, estão apresentados em tabelas no Anexo C. Os valores do tempo de prova em função da inclinação longitudinal da estrada e da posição, para a frequência cardíaca de 130 bpm, estão apresentados num gráfico no Anexo C.

6. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo da dissertação vão ser analisados os resultados nas várias configurações testadas no capítulo 5.

6.1. $C_x A_f$

6.1.1. Configuração 0

Pela análise da Fig. 5.1 pode-se dizer que o produto $C_x A_f$ da configuração 0 é mais baixo para D_{as} mais baixo (0 cm) e que vai aumentado com o aumento de D_{as} , o que está de acordo com o esperado, uma vez que quanto maior for D_{as} maior vai ser a área frontal e como tal maior será o produto $C_x A_f$ do conjunto.

Analisando a Fig. 5.1 também se pode dizer que para a configuração 0 o valor mínimo do produto $C_x A_f$ conseguido é de 0,1801 m², e que apresenta um valor máximo de 0,2415 m² alcançado na posição em que as mãos estão no guiador e braços esticados, Fig. 4.4.

Por fim da análise dos resultados da configuração 0 pode-se constatar que o desvio padrão destes ensaios foi baixo (cerca de 0,003 m²) e que o D_{as} que menos desvio padrão teve foi o D_{as} de 10 cm, o que pode acontecer pelo facto de ser a posição mais confortável e como tal a mais fácil de se reproduzir ao longo das 3 tentativas.

6.1.2. Configuração 1

Pela análise da Fig. 5.2 pode-se dizer que a evolução do produto $C_x A_f$ em função de D_{as} é semelhante à da configuração 0, no entanto a alteração do fato não alcançou o propósito de diminuir o produto $C_x A_f$ do conjunto, sendo que para esta nova configuração o valor mínimo conseguido do produto $C_x A_f$ foi de 0,1966 m².

O facto de não se ter conseguido melhorar o produto $C_x A_f$ pode-se dever a dois fatores. Pelo facto de no dia dos ensaios a rotunda no topo da Avenida Elísio de Moura estar molhada e como tal molhou a roda fazendo com que a mesma “agarrasse” sujidades aumentando assim o coeficiente de resistência ao rolamento, ou pelo facto deste novo fato, Castelli 3.3 ficar com pequenas rugas nos braços do ciclista quando o mesmo está vestido.

Por fim, da análise de resultados pode-se constatar que o desvio padrão destes ensaios foi ligeiramente superior ao da configuração 0 (cerca de 0,005 m²) o que poderá ter acontecido devido ao facto de que durante os ensaios o vento ter mudado de orientação de forma mais significativa.

6.1.3. Configuração 2

Pela análise da Fig. 5.3 pode-se dizer mais uma vez que a evolução do produto $C_x A_f$ em função de D_{as} é semelhante à da configuração 0, e que o principal pressuposto desta alteração foi conseguido, apesar de ter sido de forma muito discreta. Já que devido à

alteração o produto $C_x A_f$ mínimo passou a ser de 0,1783 m² novamente para a posição em que a D_{as} é de 0 cm e que o valor máximo do $C_x A_f$ foi de 0,2270 m² alcançado para a posição em que o ciclista vai com as mãos no guidador e braços esticados, Fig. 4.4. Esta maior diminuição do produto do $C_x A_f$ relativamente às posições de contrarrelógio mostra que este novo capacete é bastante mais favorável que o anterior para a posição da cabeça adotada nesta posição.

Por fim na análise de resultados pode-se constatar que o desvio padrão destes ensaios foi ligeiramente inferior ao da configuração 0 (cerca de 0,002 m²) o que poderá ter acontecido devido ao facto de que nestes ensaios as velocidades do vento serem mais baixas que nos ensaios anteriores.

6.1.4. Configuração 3

Pela análise da Fig. 5.4 pode-se dizer mais uma vez que a evolução do produto $C_x A_f$ em função da D_{as} é semelhante à da configuração 0, no entanto o principal propósito desta alteração não foi conseguido. Uma vez que o valor mínimo do produto $C_x A_f$ para esta configuração é de 0,1900 m², mais uma vez atingido para D_{as} de 0 cm.

Importa ainda referir que estes valores médios foram obtidos a partir de “apenas” 2 medições uma vez que no dia dos ensaios o vento estava irregular e como tal houve valores que tiveram de ser desprezados devido a valores do vento acima do desejável.

Devido à instabilidade do vento o desvio padrão médio foi de cerca de 0,004 m², o que apesar de parecer inferior ao da configuração 1 não é, uma vez que neste caso apenas foram analisados dois ensaios para cada posição.

Por fim, os dados do vento deste ensaio não foram obtidos a partir do Ventusky, mas sim a partir da medição dos mesmos com um anemómetro localizado a metade do percurso. Esta alteração na medição dos dados do vento deveu-se à instabilidade do mesmo no dia dos ensaios.

6.2. Área frontal

6.2.1. Configuração 0

Pela análise da Fig. 5.6 pode-se observar que a área frontal vai aumentando com o aumento da D_{as} . O que seria de esperar uma vez que quanto maior a D_{as} mais para a frente estará o ciclista no selim e como consequência desse facto mais próximo dos extensores, fazendo com que o ângulo do tronco do ciclista com a horizontal aumente (representado como δ na Fig. 2.1), aumentando assim a área frontal.

Uma das surpresas na medição da área frontal aconteceu na evolução de D_{as} de 5 cm para 10 cm uma vez que o aumento da mesma foi significativamente mais baixo que o esperado.

Pela análise dos resultados da secção 5.2.1 também se pode concluir que o valor mínimo da área frontal é de 0,328 m² e acontece na posição em que D_{as} é de 0 cm e que o maior valor da área frontal é de 0,475 m² e é obtido para a posição em que o ciclista leva as mãos no guidador e braços esticados.

O desvio padrão médio da área frontal da configuração 0 calculado foi de 0,003 m² tendo o seu máximo na posição em que D_{as} é de 0 cm, o que poderá acontecer pelo facto de ser a posição mais desconfortável e como tal a que apresenta mais dificuldade de ser reproduzida pelo ciclista.

6.2.2. Configuração 2

Pela análise da Fig. 5.7 observa-se que a área frontal aumenta de forma muito mais constante com D_{as} que na configuração 0.

Pela análise dos resultados da secção 5.2.2 também se pode concluir que o valor mínimo da área frontal é de 0,331 m² e acontece na posição em que D_{as} é de 0 cm e que o maior valor da área frontal é de 0,455 m² e é obtido para a posição em que o ciclista leva as mãos no guiador.

De um modo geral a área frontal desta nova configuração é mais baixa que a configuração 0, demonstrando que o $C_x A_f$ desta configuração ser mais baixo que o da configuração 0 pode não só dever-se a um melhor escoamento do ar em redor do conjunto como também a uma menor área frontal do mesmo.

O desvio padrão médio da área frontal da configuração 0 calculado foi de 0,002 m² tendo novamente o seu máximo na posição em que D_{as} é de 0 cm.

6.3. C_x

6.3.1. Configuração 0

A evolução do C_x com D_{as} apresentada na Fig. 5.8 não tem uma tendência clara. Isto poderá ter acontecido devido aos resultados da área frontal da configuração 0 não terem a evolução esperada para D_{as} de 5 cm e 10 cm.

No entanto, pela análise da Fig. 5.8 é possível observar que a variação do C_x com D_{as} para as posições de contrarrelógio é baixa tendo um mínimo de 0,5193 e um máximo de 0,5465, sendo que o mínimo ocorre para D_{as} de 15 cm e o máximo para D_{as} de 0 cm, o que é o contrário dos resultados do produto $C_x A_f$.

Por fim, ainda se pode observar que a posição com as mãos no guiador e braços esticados é a que apresenta o menor C_x de todos com um valor de 0,5098, apesar de ser o pior em termos do produto $C_x A_f$.

6.3.2. Configuração 1

Mais uma vez os resultados não possuem uma tendência clara, o que já seria de esperar uma vez que a área frontal utilizada foi a mesma que a da configuração 0.

No entanto pela análise da Fig. 5.9 é possível observar que a variação do C_x com D_{as} para as posições de contrarrelógio é baixa, tendo um mínimo de 0,5803 e um máximo de 0,5989, sendo que o mínimo ocorre para D_{as} de 5 cm e o máximo para D_{as} de 0 cm.

Como era esperado apresenta um C_x superior à configuração 0, uma vez que apresenta uma área frontal igual à configuração 0 e um produto $C_x A_f$ superior.

6.3.3. Configuração 2

Pela análise da Fig. 5.10 pode-se observar que a variação do C_x com D_{as} é praticamente nula, tendo um mínimo de 0,5323 e um máximo de 0,5412, sendo que esses valores ficam muito próximos dos valores da configuração 0, revelando que a alteração de capacete melhorou o produto $C_x A_f$ principalmente pela diminuição da área frontal uma vez que a variação do C_x foi baixa e em certas posições nem sequer é inferior ao da configuração 0.

Também se pode observar que o mínimo do C_x ocorre para D_{as} de 15 cm e o máximo para D_{as} de 5 cm.

6.3.4. Configuração 3

Pela análise da Fig. 5.11 pode-se verificar que o valor do C_x para cada D_{as} é superior ao da configuração 2, tendo um mínimo de 0,561 e um máximo de 0,594, o que já seria de esperar, uma vez que a área frontal é a mesma e o produto $C_x A_f$ da configuração 3 é substancialmente superior ao da configuração 2.

Também se pode observar que o mínimo do C_x ocorre para D_{as} de 5 cm e o máximo para D_{as} de 15 cm.

6.4. Potência

Pela análise da Fig. 5.12 pode-se concluir que a melhor posição em termos de potência é a posição com as mãos no guidador e braços esticados. Também se pode observar que dentro das posições de contrarrelógio a que melhor desempenho apresenta é a posição que tem uma D_{as} de 10 cm o que era de esperar uma vez que segundo o ciclista esta era a posição em que sentia maior conforto na bicicleta.

Também se pode constatar que a pior posição em termos de potência é a que melhor desempenho apresenta em termos aerodinâmicos (D_{as} de 0 cm) revelando a importância de analisar os dois parâmetros.

Ainda se pode observar que as posições em que D_{as} é de 5 cm e de 15 cm, apresentam resultados de potência muito parecidos o que poderá acontecer pelo facto de se encontrarem à mesma distância da posição ideal (D_{as} de 10 cm).

Por fim pode-se observar que os resultados para os quais é mais difícil tirar conclusões são os resultados para 120 bpm. Isto acontece pelo facto de terem sido os primeiros ensaios de cada dia de testes sendo mais fácil nesse primeiro ensaio obter oscilações na potência devido a fatores pré-ensaio como por exemplo uma noite mal dormida ou diferentes massas de O_2 armazenadas nos tecidos musculares.

6.5. Posição ideal em função da inclinação da estrada

Pela análise dos resultados para frequência cardíaca de 140 bpm pode-se observar que de 0 % até 2 % de inclinação longitudinal da estrada a posição ótima é a de D_{as} de 10 cm e mãos nos extensores e que acima de 2 % de inclinação a posição ideal é a de mãos no guidador e braços esticados.

A posição em que D_{as} é de 0 cm, apesar de ser a melhor em termos aerodinâmicos, tem uma potência substancialmente inferior às das outras posições e apenas é a ideal para inclinações inferiores a 0 %. Para inclinações superiores a 3 % esta posição é a pior de todas as posições testadas.

A posição que apresenta melhores resultados em termos de potência, ou seja, a posição em que o ciclista leva as mãos no guidador apenas se torna a ideal para inclinações superiores a 2 %. Este fator deve-se ao facto de a mesma possuir um produto $C_x A_f$ consideravelmente superior ao das outras posições analisadas, fazendo mesmo que seja a pior posição para provas planas (inclinações iguais a zero).

A surpresa desta análise reside na posição em que D_{as} é de 10 cm e o ciclista leva as mãos nos extensores, uma vez que apesar de não ser a melhor nem em termos aerodinâmicos nem em termos de potência é a que apresenta a melhor conjugação dos dois para valores de inclinação entre 0 % e 2 %.

7. CONCLUSÕES

Neste capítulo vão ser apresentadas as principais conclusões da realização desta dissertação de mestrado.

7.1. $C_x A_f$

Pela análise dos resultados obtidos do produto $C_x A_f$ pode-se concluir que a configuração 0 já possui um valor de $C_x A_f$ bastante baixo e como tal a sua melhoria é bastante complicada.

Também se pode concluir que a troca de fato foi uma tentativa falhada, provavelmente pelo facto de o mesmo criar pequenas rugas nos braços do ciclista piorando significativamente o produto $C_x A_f$ do conjunto.

A alteração do capacete foi um sucesso em termos do produto $C_x A_f$ uma vez que o diminui, conseguindo reduzi-lo em média cerca de $0,0014 \text{ m}^2$, o que corresponde a uma melhoria de cerca de $0,74\%$. Este ganho residual pode parecer pouco importante, mas numa prova de 50 km pode significar uma melhoria de cerca de 11 s , o que pode ser a diferença entre a vitória e a derrota.

A alteração da roda da frente não produziu a melhoria desejada.

No que diz respeito à melhor posição em termos aerodinâmicos os resultados foram coerentes em todos os ensaios e ficou demonstrado que quanto menor for D_{as} menor irá ser o produto $C_x A_f$, o que seria de esperar uma vez que a área frontal irá aumentar com o aumento da D_{as} .

A pior posição em termos aerodinâmicos foi a posição em que o ciclista leva as mãos no guiador e braços esticados, este facto já era esperado uma vez que a sua área frontal é $1,27$ vezes maior que a pior das restantes posições.

A partir dos ensaios realizados também se pode concluir que a melhor configuração testada foi a 2, para a qual se obteve um valor mínimo de $C_x A_f$ de $0,1783 \text{ m}^2$.

Importa referir que se realizaram alguns ensaios extra, no entanto a roda ainda não possuía sensor de velocidade e os resultados obtidos apresentavam desvios padrão bastante elevados (cerca de $0,01 \text{ m}^2$), e como tal, tiveram de ser desprezados, podendo ser concluído que é necessário que exista um aparelho com elevada precisão na medição da velocidade da bicicleta.

Ainda foi tentada uma abordagem diferente na medição da velocidade do vento. Em vez de se utilizarem os valores do Ventusky, a velocidade do vento foi medida com recurso a um anemómetro a meio do percurso, no entanto os resultados apresentavam desvios padrão superiores ao método tradicional. Tal poderá ter acontecido pelo facto de a velocidade do vento a meio do percurso não representar de forma precisa a velocidade do vento que o ciclista enfrenta ao longo do percurso.

Por fim também se pode concluir que conseguidas as condições ideais para a realização dos ensaios, o método consegue ser bastante preciso e sensível a pequenas alterações na configuração.

7.2. Área frontal

No que diz respeito à área frontal pode-se concluir que de uma forma geral a configuração com o capacete da *LAZER* (configuração 2) apresenta menor área frontal que a configuração com o capacete *GIANT* (configuração 0), e que os valores da área frontal se encontram em linha com outros estudos [44]

Também foi possível concluir que a área frontal aumenta com o aumento de D_{as} o que já seria de esperar uma vez que o aumento de D_{as} promove o aumento do ângulo δ e como tal aumenta a área frontal.

No entanto no cálculo da área frontal da configuração 0 surgiu uma surpresa, que é o facto de que nas posições de contrarrelógio em que D_{as} é de 5 e 10 cm os resultados da área frontal serem muito parecidos. Isto pode advir do facto de ser muito difícil ao ciclista reproduzir posições, e que na posição de 5 cm esteja ligeiramente acima e na posição de 10 cm esteja ligeiramente a baixo.

Pode-se então concluir que os resultados estão fortemente ligados à capacidade de o ciclista conseguir reproduzir uma posição de forma correta, caso contrário poderá alterar os resultados e induzir em erro o analista.

Importa dizer que não foram analisadas as áreas frontais das configurações 1 e 3, uma vez que a alteração do fato ou da roda não irão mudar a área frontal do conjunto.

Por fim conclui-se que o conjunto ciclista + bicicleta consegue uma área frontal mínima de 0,328 m² valor atingido para a configuração 0.

7.3. Potência

Dos ensaios de potência pode-se concluir que em todas as posições escolhidas a potência evolui de uma forma praticamente linear desde os 120 bpm até aos 140 bpm.

Também se pode concluir que a melhor posição em termos de potência é a posição em que o ciclista leva as mãos no guiador e braços esticados, facto que já seria de esperar uma vez que o ciclista nessa posição vai mais confortável que nas posições de contrarrelógio.

Dentro das posições de contrarrelógio a melhor é a que apresenta uma D_{as} de 10 cm e a pior é a que apresenta uma D_{as} de 0 cm. Mais uma vez era expectável uma vez que segundo o ciclista estas posições eram respetivamente, a mais confortável e a mais desconfortável.

Um facto curioso que surgiu na análise da potência em função da D_{as} foi que as posições em que D_{as} é de 5 e 15 cm apresentam resultados bastante similares o que pode indicar que a posição em que a D_{as} é de 10 cm é a ideal e que o afastamento dessa posição para a frente ou para trás resulta em resultados similares.

Também se pode concluir que este método é bastante preciso uma vez que a diferença entre o valor obtido por este método e o valor retirado da aplicação Strava é de cerca de 5 W. Esta diferença deve-se às condições atmosféricas, $C_x A_f$ e peso total que a aplicação Strava considera.

Por fim pode-se concluir que os resultados para 120 bpm apresentam algum ruído uma vez que são os primeiros ensaios de cada dia de testes e como tal o ciclista pode apresentar maior ou menor capacidade física dependendo de fatores externos nas horas anteriores aos ensaios.

7.4. Posição ideal em função da inclinação da estrada

A melhor posição para a frequência cardíaca de 140 bpm depende da inclinação longitudinal da estrada, uma vez que para inclinações inferiores a 0 % a melhor posição é aquela em que D_{as} é de 0 cm e mãos nos extensores, de 0 % até 2 % a melhor posição é aquela em que D_{as} é de 10 cm e mãos nos extensores, enquanto que para inclinações superiores a 2 % a melhor posição é aquela em que D_{as} é de 10 cm e mãos no guiador e braços esticados.

Existe um facto interessante nestes resultados, uma vez que para inclinações superiores a 0% as posições ideais têm um D_{as} de 10 cm, o que vem ao encontro do “feeling” do ciclista que acha essa D_{as} a mais confortável de todas.

O facto de a partir de 2 % a melhor posição ser a de mãos no guiador vai de encontro ao facto de que quanto menor a velocidade menor a importância do arrasto aerodinâmico e maior a da potência desenvolvida.

Também se pode concluir que ao longo de uma prova o ciclista deverá mudar a posição na bicicleta de modo a aproveitar da melhor forma as suas capacidades em função do local do percurso em que o mesmo se encontra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “João Almeida acaba Giro’2021 em sexto e fica a incríveis 53 milésimos do quinto - Giro - Jornal Record.” <https://www.record.pt/modalidades/ciclismo/giro/detalhe/joao-almeida-ao-ataque-do-top-5-no-giro2021-siga-o-contrarrelogio-final-em-direto> (accessed Jun. 30, 2022).
- [2] “Amstel: finalmente Van Aert reencontrou-se com a vitória |.” <http://jornalciclismo.com/?p=55451> (accessed Jun. 30, 2022).
- [3] F. Grappe, R. Candau, A. Belli, and J. D. Rouillon, “Aerodynamic drag in field cycling with special reference to the Obree’s position,” <http://dx.doi.org/10.1080/001401397187388>, vol. 40, no. 12, pp. 1299–1311, Dec. 2010, doi: 10.1080/001401397187388.
- [4] “Ciclista brasileiro bate recorde a 202 km/h!” <https://www.redbull.com/br-pt/ciclista-brasileiro-bate-recorde-a-202-km-h> (accessed Jun. 30, 2022).
- [5] “Carro Vassoura: Contrarrelogios finais: reviravoltas ao último dia.” <https://www.carrovassoura.com/2014/08/contrarrelogios-finais-reviravoltas-ao.html> (accessed Jun. 30, 2022).
- [6] “Piedmont Velo Sports: Greg Lemond’s Amazing Time Trial To Win The 1989 Tour de France.” <http://piedmontvelosports.blogspot.com/2011/12/greg-lemonds-amazing-time-trial-to-win.html> (accessed Jun. 30, 2022).
- [7] F. Malizia and B. Blocken, “Bicycle aerodynamics: History, state-of-the-art and future perspectives,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 200, p. 104134, May 2020, doi: 10.1016/J.JWEIA.2020.104134.
- [8] P. Debraux, F. Grappe, A. v. Manolova, and W. Bertucci, “Aerodynamic drag in cycling: methods of assessment,” <https://doi.org/10.1080/14763141.2011.592209>, vol. 10, no. 3, pp. 197–218, Sep. 2011, doi: 10.1080/14763141.2011.592209.
- [9] “Os melhores scanners 3D de 2022 – Guia de compr | All3DP.” <https://all3dp.com/pt/1/melhores-scanners-3d/> (accessed Jun. 30, 2022).
- [10] D. Schade, A. Froncioni, and J. Natrup, “A New Approach to Measure Position Stability on the Bike in Time Trial Performance-A Pilot Study,” *J Sci Cycling*, vol. 29, no. 2, pp. 57–58, 2016.
- [11] P. E. di Prampero, G. Cortili, P. Mognoni, and F. Saibene, “Equation of motion of a cyclist,” <https://doi.org/10.1152/jappl.1979.47.1.201>, vol. 47, no. 1, pp. 201–206, 1979, doi: 10.1152/JAPPL.1979.47.1.201.
- [12] P. Debraux, F. Grappe, A. v. Manolova, and W. Bertucci, “Aerodynamic drag in cycling: Methods of assessment,” *Sports Biomechanics*, vol. 10, no. 3, pp. 197–218, Sep. 2011, doi: 10.1080/14763141.2011.592209.
- [13] D. P. Heil, “Body mass scaling of projected frontal area in competitive cyclists,” *European Journal of Applied Physiology* 2001 85:3, vol. 85, no. 3, pp. 358–366, 2001, doi: 10.1007/S004210100424.
- [14] J. García-López, J. A. Rodríguez-Marroyo, C. E. Juneau, J. Peleteiro, A. C. Martínez, and J. G. Villa, “Reference values and improvement of aerodynamic drag in professional cyclists,” <https://doi.org/10.1080/02640410701501697>, vol. 26, no. 3, pp. 277–286, Feb. 2008, doi: 10.1080/02640410701501697.

- [15] C. Barelle, V. Chabroux, and D. Favier, “Modeling of the time trial cyclist projected frontal area incorporating anthropometric, postural and helmet characteristics,” *Sports Engineering 2010 12:4*, vol. 12, no. 4, pp. 199–206, Jul. 2010, doi: 10.1007/S12283-010-0047-Y.
- [16] P. Debraux, W. Bertucci, A. v. Manolova, S. Rogier, and A. Lodini, “New method to estimate the cycling frontal area.,” *Int J Sports Med*, vol. 30, no. 4, pp. 266–272, 2009, doi: 10.1055/S-0028-1105940/ID/29.
- [17] C. Capelli, G. Rosa, F. Butti, G. Ferretti, A. Veicsteinas, and P. E. di Prampero, “Energy cost and efficiency of riding aerodynamic bicycles,” *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology 1993 67:2*, vol. 67, no. 2, pp. 144–149, Aug. 1993, doi: 10.1007/BF00376658.
- [18] S. Tengattini and A. Bigazzi, “Validation of an Outdoor Coast-Down Test to Measure Bicycle Resistance Parameters,” *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, vol. 144, no. 7, p. 04018031, Apr. 2018, doi: 10.1061/JTEPBS.0000152.
- [19] G. de Groot, A. Sargeant, and J. Geysel, “Air friction and rolling resistance during cycling.,” *Medicine and Science in Sports and Exercise*, vol. 27, no. 7, pp. 1090–1095, Jul. 1995, doi: 10.1249/00005768-199507000-00020.
- [20] F. Malizia and B. Blocken, “Bicycle aerodynamics: History, state-of-the-art and future perspectives,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 200, p. 104134, May 2020, doi: 10.1016/J.JWEIA.2020.104134.
- [21] “CADEX Cycling no Twitter: ‘This one just in from our friends in Canada, national Junior TT champion @jacobrubuliak’ s stunning @GiantBicycles Trinity featuring an aero four spoke front and an aero disc rear. Photo: @deon_nel_photography #GiantTrinity #BuiltWithCADEX #overachieve <https://t.co/C5wjZIGtHE>” / Twitter.” <https://twitter.com/CADEXCycling/status/1399425747660558338> (accessed Jul. 01, 2022).
- [22] N. Barry, D. Burton, T. Crouch, J. Sheridan, and R. Luescher, “Effect of crosswinds and wheel selection on the aerodynamic behavior of a cyclist,” *Procedia Engineering*, vol. 34, pp. 20–25, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.PROENG.2012.04.005.
- [23] “Tadej Pogacar’s Colnago V3Rs.” <https://en.brujulabike.com/colnago-v3rs-pogacar-2020/> (accessed Jul. 01, 2022).
- [24] D. I. Greenwell, N. J. Wood, E. K. L. Bridge, and R. J. Addy, “Aerodynamic characteristics of low-drag bicycle wheels,” *The Aeronautical Journal*, vol. 99, no. 983, pp. 109–120, 1995, doi: 10.1017/S0001924000028281.
- [25] M. Vande and F. Berto, “Under Pressure. Australian Cyclist,” vol. 5, no. 1, p. 48, 2006.
- [26] R. Crane and C. Morton, “Drag and Side Force Analysis on Bicycle Wheel-Tire Combinations,” *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 140, no. 6, Jun. 2018, doi: 10.1115/1.4039513/383609.
- [27] T. Defraeye, B. Blocken, E. Koninckx, P. Hespel, and J. Carmeliet, “Aerodynamic study of different cyclist positions: CFD analysis and full-scale wind-tunnel tests,” *Journal of Biomechanics*, vol. 43, no. 7, pp. 1262–1268, May 2010, doi: 10.1016/J.JBIOMECH.2010.01.025.
- [28] L. Underwood and M. Jermy, “Optimal handlebar position for track cyclists,” *Sports Engineering 2013 16:2*, vol. 16, no. 2, pp. 81–90, Mar. 2013, doi: 10.1007/S12283-013-0111-5.

- [29] L. R. Scott *et al.*, “Helmet use and bicycle-related trauma injury outcomes,” <https://doi.org/10.1080/02699052.2019.1650201>, vol. 33, no. 13–14, pp. 1597–1601, Dec. 2019, doi: 10.1080/02699052.2019.1650201.
- [30] F. Alam, H. Chowdhury, Z. Elmir, A. Sayogo, J. Love, and A. Subic, “An experimental study of thermal comfort and aerodynamic efficiency of recreational and racing bicycle helmets,” *Procedia Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 2413–2418, Jun. 2010, doi: 10.1016/J.PROENG.2010.04.008.
- [31] L. Brownlie, P. Ostafichuk, E. Tews, H. Muller, E. Briggs, and K. Franks, “The wind-averaged aerodynamic drag of competitive time trial cycling helmets,” *Procedia Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 2419–2424, Jun. 2010, doi: 10.1016/J.PROENG.2010.04.009.
- [32] L. Oggiano, L. Brownlie, O. Troynikov, L. M. Bardal, C. Sæter, and L. Sætran, “A Review on Skin Suits and Sport Garment Aerodynamics: Guidelines and State of the Art,” *Procedia Engineering*, vol. 60, pp. 91–98, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.PROENG.2013.07.018.
- [33] L. Brownlie *et al.*, “Streamlining the time trial apparel of cyclists: The Nike swift spin project,” <http://dx.doi.org/10.1080/19346182.2009.9648499>, vol. 2, no. 1–2, pp. 53–60, Jan. 2010, doi: 10.1080/19346182.2009.9648499.
- [34] L. Spurkland, L. M. Bardal, L. Sætran, and L. Oggiano, “Low Aerodynamic Drag Suit for Cycling - Design and Testing,” *icSPORTS 2015 - Proceedings of the 3rd International Congress on Sport Sciences Research and Technology Support*, vol. 2, pp. 89–96, Nov. 2015, doi: 10.5220/0005589600890096.
- [35] S. Hong and T. Asai, “Aerodynamics of Cycling Skinsuits Focused on the Surface Shape of the Arms,” *Applied Sciences 2021, Vol. 11, Page 2200*, vol. 11, no. 5, p. 2200, Mar. 2021, doi: 10.3390/APP11052200.
- [36] P. de Figueiredo Vieira de Carvalheira, “Simulation of the Performance of an Extra-Low Fuel Consumption Vehicle,” 2004, pp. 424–429. Accessed: Jul. 07, 2022. [Online]. Available: <https://www.actapress.com/Abstract.aspx?paperId=16147>
- [37] B. Blocken, Y. Toparlar, and T. Andrienne, “Aerodynamic benefit for a cyclist by a following motorcycle,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 155, pp. 1–10, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.JWEIA.2016.04.008.
- [38] B. R. 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, 2021.
- [39] “Solved: Chapter 1 Problem 1P Solution | Fundamentals Of Thermal-fluid Sciences With Student Resource Dvd 4th Edition | Chegg.com.” <https://www.chegg.com/homework-help/fundamentals-of-thermal-fluid-sciences-with-student-resource-dvd-4th-edition-chapter-1-problem-1p-solution-9780077422400> (accessed Jul. 01, 2022).
- [40] L. Underwood, “Aerodynamics of Track Cycling,” 2012.
- [41] “Continental Grand Prix 5000 23, 25, 28, 32 mm Comparison.” <https://www.bicyclerollingresistance.com/specials/grand-prix-5000-comparison> (accessed Jul. 01, 2022).
- [42] G. Atkinson, R. Davison, A. Jeukendrup, and L. Passfield, “Science and cycling: current knowledge and future directions for research,”

- <https://doi.org/10.1080/0264041031000102097>*, vol. 21, no. 9, pp. 767–787, Sep. 2008, doi: 10.1080/0264041031000102097.
- [43] “Free body diagram of the forces acting on a bike – Pesquisa Google.”
https://www.google.com/search?q=Free+body+diagram+of+the+forces+acting+on+a+bike&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwielKjfvY74AhUCwKQKHf-dBxoQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1366&bih=625&dpr=1#imgsrc=CUqk9iAaITmtnM (accessed Jul. 01, 2022).
- [44] “Sciences of Sport | Field method for assessing the cycling frontal area.”
<https://www.sci-sport.com/en/articles/field-method-for-assessing-the-cycling-frontal-area-005.php> (accessed Jul. 03, 2022).

ANEXO A - OUTRAS MEDIDAS DA CONFIGURAÇÃO 0

Tabela AN.1. Localização da câmara fotográfica em relação ao conjunto ciclista + bicicleta.

Fotos de lado	
Altura da câmara	100 [cm]
Distância ao eixo da bicicleta	2,80 [m]
Local	Centrada com o meio da distância entre eixos da bicicleta
Fotos para medição de A_f	
Altura da câmara	91 [cm]
Distância ao quadro preto	5,40 [m]
Local	Centrada com o meio da largura do guidador

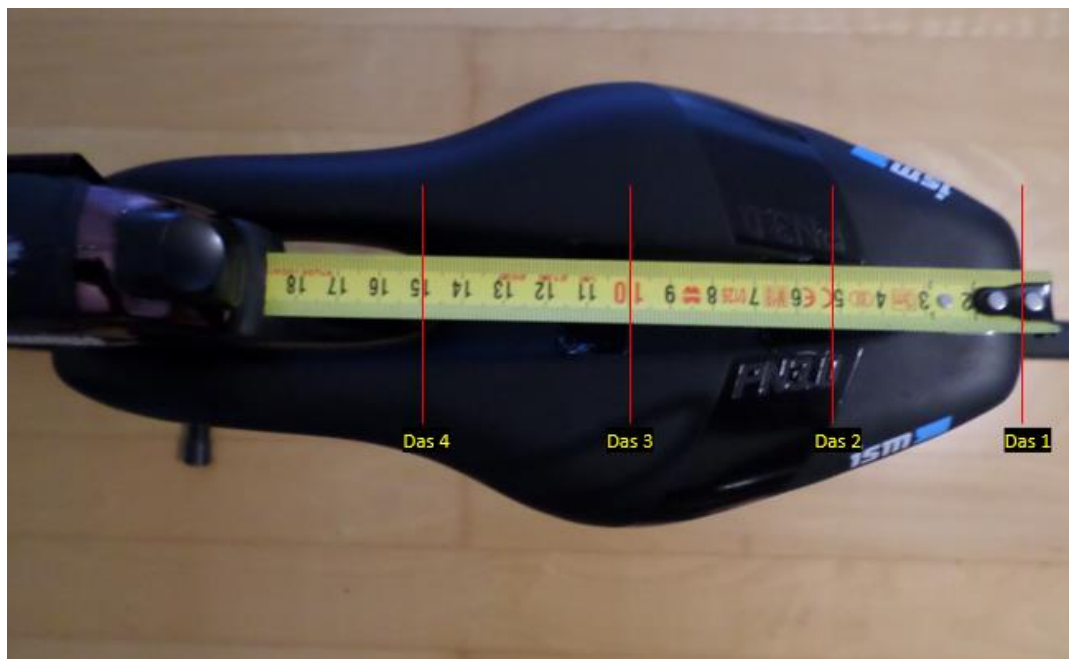


Figura AN.1. Fita adesiva para marcação de D_{as} no selim.

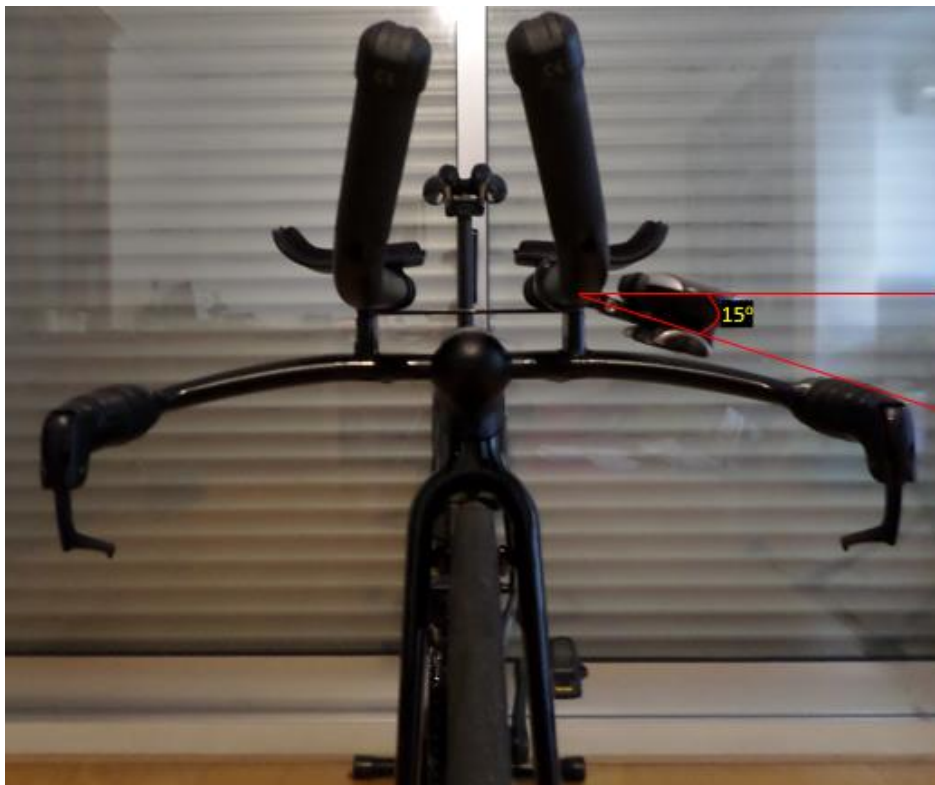


Figura AN.2. Ângulo do aparelho GPS relativamente à horizontal.

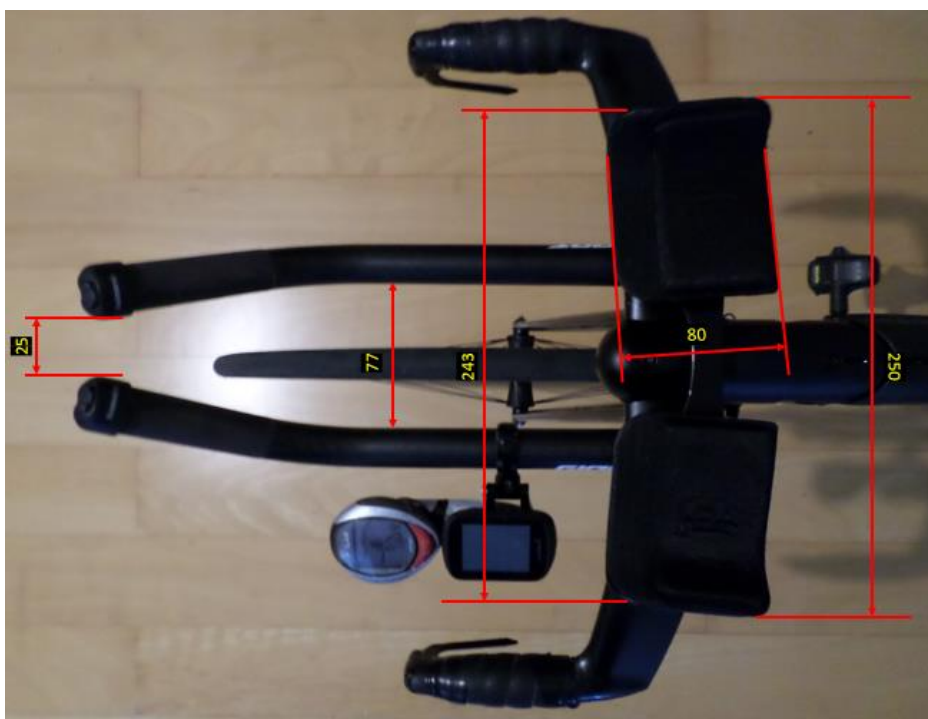


Figura AN.3. Medidas principais dos extensores.

ANEXO B - VALORES PP

Tabela BN.1. Produto $C_x A_f$ da configuração 0 PP.

D_{as} [cm]	$C_x A_f$ médio [m ²]	$\sigma C_x A_f$ [m ²]
0	0,1794	0,0032
5	0,1871	0,0035
10	0,1926	0,0034
15	0,1952	0,0036

Tabela BN.2. Produto $C_x A_f$ da configuração 1 PP.

D_{as} [cm]	$C_x A_f$ médio [m ²]	$\sigma C_x A_f$ [m ²]
0	0,1972	0,0031
5	0,2067	0,0083
10	0,2104	0,0040
15	0,2229	0,0035

Tabela BN.3. Produto $C_x A_f$ da configuração 2 PP.

D_{as} [cm]	$C_x A_f$ médio [m ²]	$\sigma C_x A_f$ [m ²]
0	0,1785	0,0024
5	0,1894	0,0011
10	0,1922	0,0036
15	0,1947	0,0016

Tabela BN.4. Produto $C_x A_f$ da configuração 3 PP.

D_{as} [cm]	$C_x A_f$ médio [m ²]	$\sigma C_x A_f$ [m ²]
0	0,1856	0,0053
5	0,1972	0,0096
10	0,2078	0,0043
15	0,2134	0,0018

ANEXO C - TEMPO TOTAL DE PROVA

Tabela CN.1. Valores assumidos na obtenção do tempo total de prova.

C_R	M_t	g	$C_x A_f$	ρ_{ar}	v_{vento}	d
[-]	[kg]	[m/s ²]	[m ²]	[kg/m ³]	[m/s]	[m]
Depende da posição	80,0	9,80665	Depende da posição	1,22	0	5000

Tabela CN.2. Valores do tempo total de prova, em subida, para frequência cardíaca de 140 bpm.

D_{as} 0 cm	Tempo [s]	D_{as} 5 cm	Tempo [s]	D_{as} 10 cm	Tempo [s]	D_{as} 15 cm	Tempo [s]	mãos no guiador	Tempo [s]
0%	453	0%	458	0%	454	0%	462	0%	472
1%	554	1%	556	1%	547	1%	560	1%	560
2%	691	2%	688	2%	673	2%	691	2%	676
3%	862	3%	853	3%	828	3%	855	3%	819
4%	1056	4%	1040	4%	1007	4%	1042	4%	984
5%	1264	5%	1242	5%	1200	5%	1243	5%	1165
6%	1480	6%	1453	6%	1401	6%	1453	6%	1355
7%	1701	7%	1669	7%	1608	7%	1669	7%	1550
8%	1925	8%	1887	8%	1817	8%	1887	8%	1750

Tabela CN.3. Valores do tempo total de prova, em descida, para frequência cardíaca de 140 bpm.

D_{as} 0 cm	Tempo	D_{as} 5 cm	Tempo	D_{as} 10 cm	Tempo	D_{as} 15 cm	Tempo	mãos no guiador	Tempo [s]
0%	453	0%	458	0%	454	0%	462	0%	472
-1%	382	-1%	388	-1%	386	-1%	392	-1%	407
-2%	331	-2%	338	-2%	338	-2%	342	-2%	359
-3%	295	-3%	301	-3%	301	-3%	305	-3%	322
-4%	267	-4%	273	-4%	274	-4%	277	-4%	294
-5%	245	-5%	251	-5%	252	-5%	254	-5%	271
-6%	227	-6%	233	-6%	234	-6%	236	-6%	253
-7%	213	-7%	219	-7%	220	-7%	222	-7%	237
-8%	201	-8%	206	-8%	208	-8%	209	-8%	224

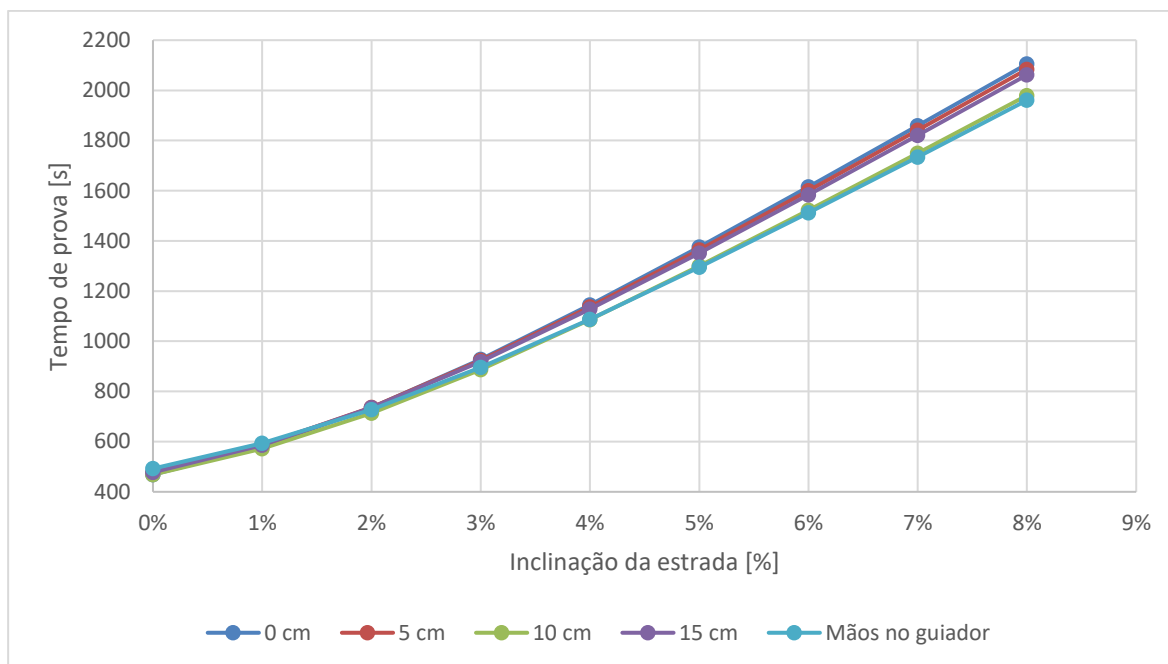
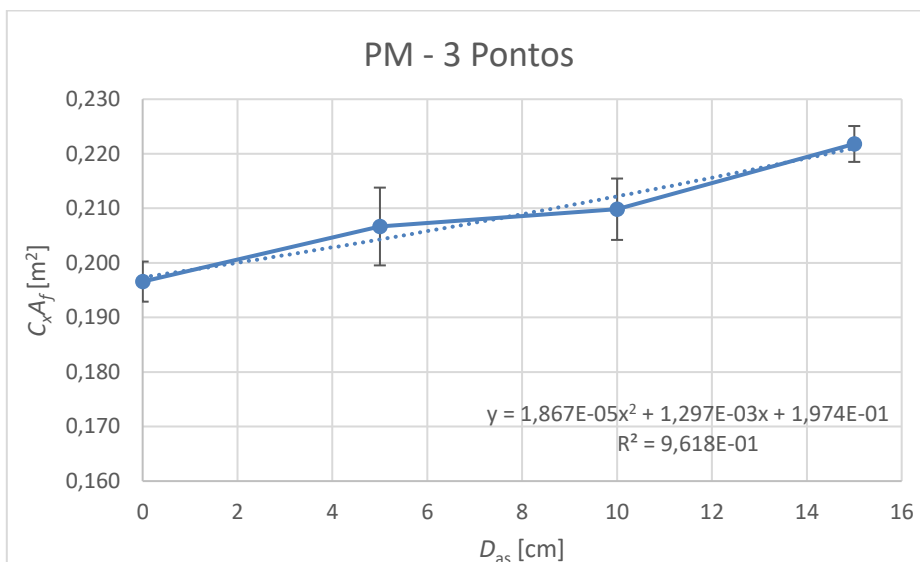
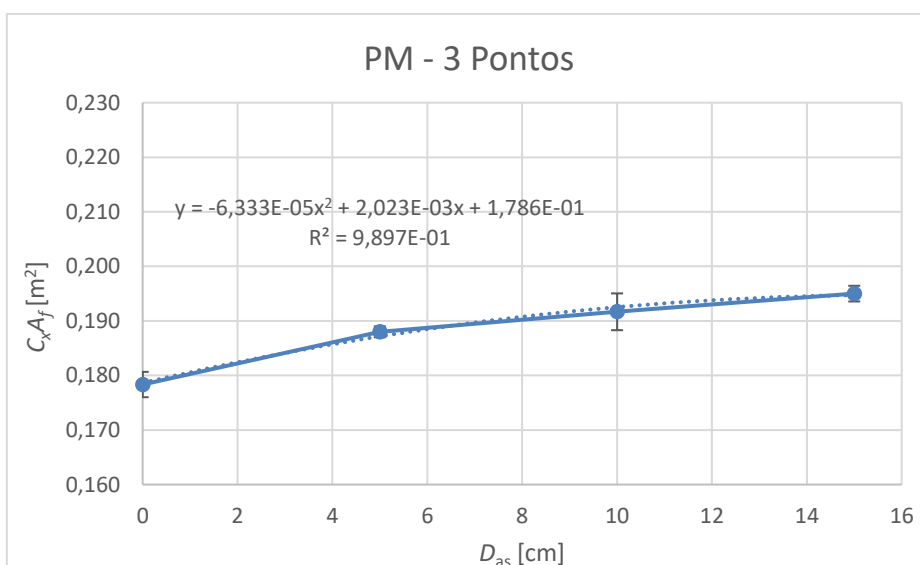


Figura CN.1. Tempo total de prova em função da inclinação longitudinal da estrada para a frequência cardíaca de 130 bpm.

ANEXO D - DESVIO PADRÃO DAS CONFIGURAÇÕES 1, 2 E 3

Figura DN.1. Produto $C_x A_f$ da configuração 1 e o seu desvio padrão.Figura DN.2. Produto $C_x A_f$ da configuração 2 e o seu desvio padrão.

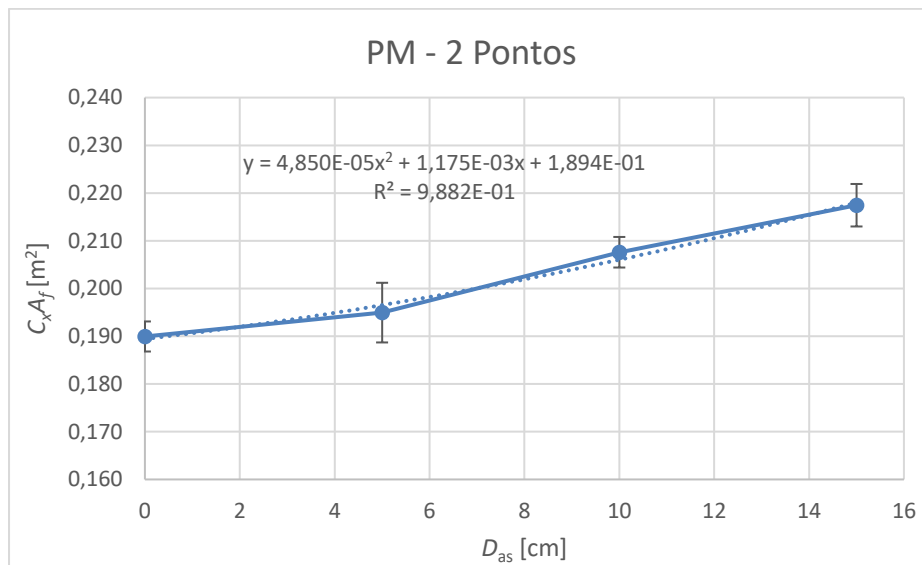


Figura DN.3. Produto $C_x A_f$ da configuração 3 e o seu desvio padrão.

APÊNDICE A - COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO USADO

Tabela AP.1. Coeficiente de resistência ao rolamento de cada roda.

Roda	a_R [-]	b_R [-]	p_{pneu} [psi]	C_R [-]	Pneu
Trás	0,02699	-0,49880	94	0,002799	Continental GP 5000 622-25C
Frente REYNOLDS STRIKE SLG	0,03436	-0,54872	94	0,002841	Continental GP 5000 622-23C
Frente HED JET 9 RC BLACK	0,02699	-0,49880	80	0,003033	Continental GP 5000 622-23C

Tabela AP.2. Coeficiente de resistência ao rolamento em função da posição, configurações 0, 1, 2.

D_{as} [cm]	f_{RF} [-]	C_R [-]
0	0,4946	0,002820
5	0,5315	0,002821
10	0,5672	0,002823
15	0,6055	0,002824
10*	0,5333	0,002821

Tabela AP.3. Coeficiente de resistência ao rolamento em função da posição, configuração 3.

D_{as} [cm]	f_{RF} [-]	C_R [-]
0	0,4946	0,002915
5	0,5315	0,002924
10	0,5672	0,002932
15	0,6055	0,002941
10*	0,5333	0,002924

* Mãos no guidador e braços esticados

APÊNDICE B - MOMENTO DE INÉRCIA DAS RODAS

Tabela BP.1. Momento de inércia da roda ZIPP SP9 CC V2 CCL 700R SR 11S WHT equipada com o pneu Continental GP 5000 622-25C.

Componente	I_{xx}, CM [kg · m ²]	Massa [kg]	Raio [m]	I [kg · m ²]
Pneu Continental GP5000 622x25C Preto	0	0,2157	0,3235	2,317E-02
Câmara de ar Michelin LATEX AIRCOMP 700x22-23C Válvula Presta de 36 mm	0	0,0790	0,3210	8,140E-03
Aro ZIPP SUPER 9 V2 CC 622x18	0	0,2910	0,3140	2,869E-02
Fundo de aro	0	0,0183	0,3060	1,714E-03
2×Tampão em Fibra de Carbono-Epoxy com uma camada de carbono de 163 [g/m ²]	0,0087	0,1796	0	8,743E-03
Cubo ZIPP 177	0	0,2000	0,0150	4,500E-05
Espuma rígida do núcleo	0,0129	0,2642	0	1,286E-02
Total				9,210E-02

Tabela BP.2. Momento de inércia da roda REYNOLDS STRIKE SLG 25.0 x 62 mm Carbon Clincher 16 raios equipada com o pneu Continental GP 5000 622-23C.

Componente	I_{xx}, CM [kg · m ²]	Massa [kg]	Raio [m]	I [kg · m ²]
Pneu Continental GP5000 622x23C Preto	0	0,2030	0,3225	2,162E-02
Câmara de ar Michelin LATEX AIRCOMP 700x18-20C, válvula Presta de 40 mm	0	0,0710	0,3200	7,270E-03
Extensor da válvula DECATHLON de 29 mm	0	0,0011	0,2435	6,226E-05
Aro REYNOLDS STRIKE SLG Carbon Clincher 2017 622	0,0453	0,5430	0	4,530E-02
Fundo de aro Schwalbe Tubeless Tape 21 mm × 0,12 mm, 2 voltas + 50 mm de sobreposição	0	0,0121	0,311	1,172E-03
16 Cabeças dos raios internas ao aro em alumínio de 12 mm com hexagonal de 5 mm	0	0,0055	0,2645	3,848E-04
16 raios perfilados pretos (2,25×1,25)	0,0005	0,0829	0,1428	2,148E-03
Cubo Reynolds Racing Straight Pull for Rim Brake 100x9 16H	0,00002	0,1100	0,0148	4,553E-05
Total				7,828E-02

Tabela BP.3. Momento de inércia da roda HED JET 9 RC BLACK 25.0 x 90 mm, aro em liga de alumínio com carenagem em carbono-epoxy, Clincher 18 raios equipada com o pneu Continental GP 5000 622-23C.

Componente	$I_{xx,CM}$ [kg · m ²]	Massa [kg]	Raio [m]	I [kg · m ²]
Pneu Continental GP5000 622x23C Preto	0	0,2047	0,3225	2,181E-02
Câmara de ar Michelin LATEX AIRCOMP 700x22-23C, Válvula Presta de 60 mm	0	0,0814	0,3213	8,403E-03
Extensor da válvula PROBLEM SOLVER de 34 mm	0	0,0011	0,234	6,133E-05
Aro em liga de alumínio HED Belgium Plus, Rim Brake Clincher 25x21,5 mm 622x21C 18H	0,0438	0,4650	0	4,381E-02
Carenagem em carbono-epoxy do aro de alumínio	0,0149	0,2050	0	1,486E-02
Fundo de aro Schwalbe Tubeless	0	0,0142	0,3060	1,300E-03
18 Cabeças dos raios curtas em alumínio de 12 mm com quadrado de 3,25 mm de lado	0	0,0054	0,2960	4,756E-04
18 Raios I420 Black SP	0,0006	0,0860	0,1548	2,646E-03
Cubo HED ROAD SONIC CARBON (F) for Rim Brake	0	0,0730	0,0127	1,177E-05
Sensor de Velocidade GARMIN Speed Sensor 2	0	0,0140	0,0160	2,664E-04
Total				9,368E-02