



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Luís Carlos Alvarez Tomás

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS PARA
A OTIMIZAÇÃO AERODINÂMICA DE UM
CICLISTA EM MODO DE CONTRA-RELÓGIO**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Área de
Especialização de Energia e Ambiente, orientada pelo Professor Doutor Manuel
Carlos Gameiro da Silva e apresentada ao Departamento de Engenharia
Mecânica, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra**

Outubro de 2020

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Desenvolvimento de Metodologias para a Otimização Aerodinâmica de um Ciclista em Modo de Contra-Relógio

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

Development of Methodologies for the Aerodynamic Optimization of a Cyclist in Time Trial Mode

Autor

Luís Carlos Alvarez Tomás

Orientadores

Professor Doutor Manuel Carlos Gameiro da Silva

Professor Doutor Amândio Manuel Cupido Santos

Júri

Presidente	Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar Professor Associado da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Manuel Carlos Gameiro da Silva Professor Catedrático da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

A presente investigação foi financiada pela Federação Portuguesa de Ciclismo e pelo Comité Olímpico de Portugal.



Coimbra, Outubro, 2020

You should always discuss the defeats because you can learn much more from failure than from success.

Niki Lauda

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Manuel Gameiro da Silva, pelos seus ensinamentos e pela partilha do seu sentido experimentalista na abordagem a cada desafio, ao José Afonso que esteve sempre disponível e me ajudou inúmeras vezes ao longo dos diversos ensaios realizados neste trabalho, e ao Sr. Cardoso que fez toda a estrutura utilizada nos ensaios em túnel de vento, também sempre pronto para me ajudar.

Agradeço aos meus pais Margarida e Carlos pelo apoio que me deram ao longo destes anos, à minha namorada Beatriz por todo o apoio e carinho, aos meus primos João e André pela amizade, aos meus amigos de sempre Pedro, Filipe Borges e Emília, Filipe Neves, Celso e Fiúza, aos que tão bem me receberam em Coimbra (Marques, Fipi, Anita, Nobre, Daniel, Curado, João Diogo, Diogo e Miravall), aos meus amigos Filipe Ramos, Manuel d'Almeida, Rafael Gonçalves, Abreu, Ferreira, Mota e Figueiredo. Um agradecimento muito especial também à Dr^a Anabela Carvalho.

Resumo

O presente trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de metodologias adequadas à aquisição de dados relativos à evolução temporal de parâmetros considerados fundamentais no estudo das forças de resistência atuantes sobre o conjunto ciclista + bicicleta num contexto de alta competição. Através do pós-processamento destes dados, pretende-se efetuar um estudo detalhado da influência que estes parâmetros em análise têm, nomeadamente, nas forças de resistência aerodinâmica atuantes sobre o conjunto ciclista + bicicleta, por forma a chegar a conclusões sobre o tipo de alterações que podem ser implementadas ao nível da posição de condução e do equipamento utilizado pelo ciclista, no sentido de otimizar a prestação do mesmo no decorrer de uma prova.

Foram desenvolvidas metodologias aplicáveis em ensaios de túnel de vento, tendo por base a medição das forças aerodinâmicas que atuam sobre o conjunto ciclista + bicicleta. Foram também desenvolvidas metodologias para aquisição de dados durante ensaios realizados em estrada ou em pista. A partir dos dados de velocidade do conjunto ciclista + bicicleta relativamente ao solo e ao escoamento incidente, através da instalação de uma sonda de pressão de dois furos (mais concretamente, um tubo de *Pitot*) e ainda de um registador de dados de *GPS*, foi possível registar a evolução temporal de parâmetros como a altitude do terreno e a potência mecânica produzida pelo ciclista.

Palavras-chave: Contra-Relógio, Ciclismo, Ensaios em Túnel de Vento, Ensaios de Desaceleração, Área Frontal Efetiva, Otimização de Resistência Aerodinâmica, Balança Multiaxial de Forças

Abstract

The present investigation aims to develop adequate methodology for data acquisition over the temporal evolution of several major parameters in the analysis of drag resistance forces acting on a cyclist in a road bicycle. Through post-processing of the collected data, this study intends to carry out a detailed report in order to reach conclusions on which alterations should be made to the riding position of the cyclist and to the equipment that he uses, in order to achieve noticeable reductions in terms of aerodynamic drag acting upon the cyclist. This reduction in the aerodynamic drag is expected to improve the efficiency of the mechanical power output produced by the cyclist in the pedaling exercise.

Wind tunnel testing methods were developed using a six component balance, the *MCS10* model from the manufacturing brand *HBM*, which facilitates data acquisition of the aerodynamic drag forces acting on both the cyclist's and the bicycle's systems.

Field methods such as the deceleration method were also developed for observing the evolution of parameters such as ground speed and speed in relation to the incident flow over time, as well as altitude and mechanical power output over time. These parameters were obtained using resources such as a two hole pressure probe and a GPS data logger.

In summary, this investigation aims to reach a more accurate method of observing and registering data yielded by the system under study, as well as adequately proposing solutions for optimizing the sustained speed in relation to the power output that the cyclist needs to produce over time. Thus, conducting this study produced several methods suitable for various applications (in wind tunnel or field testing), and the results may positively inform future studies, which can provide more accurate conclusions regarding data acquired from the two-hole pressure probe.

Keywords Time-Trial Cycling, Wind Tunnel Testing, Deceleration Method, Effective Frontal Area, Aerodynamic Drag Optimization, Six Component Balance for Wind Tunnel

Índice

Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas	xiii
1. Introdução.....	15
1.1. Enquadramento Teórico.....	17
1.2. Revisão Bibliográfica.....	18
2. Materiais	23
2.1. Ensaio em Túnel de Vento.....	23
2.1.1. Configuração Experimental.....	23
2.1.1.1 Rolo de Treino.....	24
2.1.1.1.1 Sensor Multiaxial <i>MCS10 by HBM</i>	25
2.1.1.1.2 Módulo de entrada de deformação <i>NI 9237</i>	25
2.1.2. Combinações do equipamento utilizado pelo ciclista.....	26
2.2. Ensaio de Estrada e Ensaio de Pista.....	26
3. Métodos	29
3.1. Cálculo das Áreas Frontais Efetivas	29
3.2. Ensaio em Túnel de Vento	30
3.2.1. Calibração da balança multiaxial de forças.....	31
3.2.2. Análise ao Efeito do Escoamento em torno da estrutura	32
3.2.3. Análise Energética – Potência Mecânica Produzida	33
3.3. Ensaio de Estrada e Ensaio de Pista.....	35
3.3.1. Calibração do Sensor de Pressão (Piezoresistivo).....	35
3.3.2. Tubo de <i>Pitot</i>	36
3.3.3. Ensaio de Estrada.....	36
3.3.4. Ensaio de Desaceleração em Pista	38
4. Procedimento experimental	41
4.1. Ensaio em Túnel de Vento	41
4.1.1. Análise ao Efeito do Escoamento em torno do Conjunto Ciclista + Bicicleta	41
4.1.2. Comparativo de F_x entre as 4 Configurações Ensaçadas	43
4.1.3. Análise Energética	44
4.2. Ensaio de Estrada.....	46
4.3. Ensaio de Desaceleração no Velódromo Nacional de Sangalhos	49
5. Conclusões.....	51
5.1. Ensaio em Túnel de Vento	51
5.2. Ensaio de Estrada.....	52
5.3. Ensaio de Pista.....	52
6. Referências bibliográficas	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ciclista da Especialidade de Contra-Relógio a competir nos <i>UCI World Championships</i>	17
Figura 1.2. Desenvolvimento da 2ª Lei de Newton aplicada ao conjunto ciclista + bicicleta	17
Figura 1.3. Evolução da resistência total de oposição ao movimento (R_T [N]) em função do quadrado da velocidade do ciclista (v_C^2 [m.s ⁻²]) para quatro posições de condução diferentes. (1).....	18
Figura 1.4 Evolução do Coeficiente de Resistência Aerodinâmica (C_D) com o aumento do Número de Reynolds (Re), para Corpos Fuselados e Não-Fuselados. Para corpos não-fuselados, como é o caso da placa plana, C_D mantém se constante com o aumento do número de Reynolds (4).....	20
Figura 1.5. Comparação entre estruturas de escoamento baixa e elevada resistência aerodinâmica. As imagens selecionadas ilustram qualitativamente as assimetrias que se desenvolvem no fluido. (3)	20
Figura 1.6. Variação na Resistência Aerodinâmica (%) em cada posição ocupada numa Prova de Perseguição por Equipas, usando um ciclista a solo como termo de comparação (efetuado apenas para a posição de referência) (8).....	21
Figura 1.7. a) Variação da Resistência Aerodinâmica com a velocidade; b) Variação do C_D com a velocidade. (9)	21
Figura 2.1. Túnel Aerodinâmico de Veículos do LAI-ADAI (15).....	23
Figura 2.2. Secção de Teste do Túnel Aerodinâmico de Veículos do LAI-ADAI.....	23
Figura 2.3. Descritivo geral da instalação	24
Figura 2.4. Rolo de Treino	25
Figura 2.5. Sensor Multiaxial MCS10 (17).....	25
Figura 2.6. NI 9237 & NI USB-9162 (18).....	26
Figura 2.7. Capacetes Utilizados no Ensaio em Túnel de Vento: a) <i>Specialized Evade</i> ; b) <i>Specialized Prevale</i> ; c) <i>Spiuk Zirion</i>	26
Figura 2.8. Circuito que efetua a ligação entre o Sensor Piezoresistivo e o <i>Data Logger</i> ...27	
Figura 2.9. <i>Setup</i> utilizado para a aquisição de dados em estrada e em pista	27
Figura 3.1. Fotografia usada para a obtenção do valor da Área Frontal Efetiva antes (a) e depois (b) de aplicado o pós-processamento	29
Figura 3.2. Posições de Condução adotadas nos Ensaios em Túnel de Vento: a) <i>Recreational Position</i> ; b) <i>Upright Position</i> ; c) <i>Aero Position</i> ; d) <i>Dropped Position</i>	31
Figura 3.3. Calibração segundo o eixo x.....	32
Figura 3.4. Calibração da Balança Multiaxial de Forças segundo o eixo longitudinal X....	32
Figura 3.5. Modelo usado para estimar a Potência de Rolamento [W]	34

Figura 3.6. Montagem experimental utilizada na calibração de um sensor capacitivo de pressão (21) Legenda: 1 - Êmbolo; 2 – Tubagem de Pressão em T; 3 – Sensor de Pressão a calibrar; 4 – Micromanómetro de Betz; 5 – Voltímetro	35
Figura 3.7. Equação de Regressão Linear do Sensor de Pressão ligado ao Tubo de Pitot..	35
Figura 3.8. Funcionamento de um Tubo de <i>Pitot</i> (22)	36
Figura 3.9. Rota e Perfil de Altitude do Ensaio de Estrada realizado entre o <i>LAI</i> e a estrada nacional N17.....	37
Figura 3.10. – a) Pista coberta do Velódromo Nacional de Sangalhos; b) Ciclista durante o ensaio de desaceleração.....	39
Figura 3.11. Estimativa das constantes K_0 , K_1 e CDA para um ensaio de desaceleração na posição de condução <i>Upright</i>	40
Figura 3.12. Análise a um Ensaio de Desaceleração realizado para a posição de condução <i>Upright</i> : a) Perfil de Velocidades; b) Força total aplicada ao conjunto ao longo do tempo (real e estimada)	40
Figura 4.1. Evolução da força de resistência aerodinâmica segundo x com o aumento da velocidade de escoamento em torno do conjunto ciclista + bicicleta, na configuração em que o ciclista se encontra a usar o capacete <i>Specialized Evade</i> .	41
Figura 4.3. Comparativo da força de resistência aerodinâmica (relativa) gerada por capacetes com diferentes configurações ao nível das respetivas entradas de ar (24)	43
Figura 4.4. Evolução temporal das velocidades [km/h] do conjunto bicicleta + ciclista em relação ao solo e ao ar, e do declive do terreno [%] ao longo do tempo	46
Figura 4.5. Evolução temporal das quatro componentes constituintes da força total ao longo do tempo	47
Figura 4.6. Evolução temporal da Força Total (motriz) produzida pelo ciclista ao longo do percurso	47
Figura 4.7. Evoluções temporais da potência mecânica produzida pelo ciclista e da força total calculada (força motriz)	48
Figura 4.8. Energia total consumida pelo ciclista ao longo do trajeto	48
Figura 4.9. Evolução da força total estimada [N] ao longo das várias velocidades do conjunto relativamente ao solo [km/h], para a posição de condução: a) <i>Recreational</i> ; b) <i>Upright</i> ; c) <i>Aero</i> ; d) <i>Dropped</i>	49

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Valores obtidos para as áreas frontais efetivas de cada posição de condução analisada	29
Tabela 2. Evolução dos valores de força de resistência aerodinâmica exercida sobre a estrutura, medidos ao longo das várias velocidades de teste	32
Tabela 3. Coeficiente de Resistência Aerodinâmica (C_D) e <i>Drag Area</i> ($C_{D.A}$)	42
Tabela 4. Força de Resistência Aerodinâmica registrada, para as 4 diferentes configurações, à velocidade de 11.7 m/s.....	43
Tabela 5. Potência total estimada a diferentes velocidades para diferentes posições do ciclista (configuração com o capacete <i>Specialzed Evade</i>).....	45
Tabela 6. Resultados finais dos ensaios de desaceleração realizados no Velódromo Nacional.....	49
Tabela 7. Produto C_{DA} , calculado com base nos dados obtidos em túnel de vento e com base na metodologia usada para estimar o valor de C_{DA} através dos ensaios de desaceleração	50
Tabela 8. Coeficientes de Resistência ao Rolamento estimados e teóricos, para uma velocidade de 29 km/h.....	50

1. Introdução

O presente trabalho de investigação foi desenvolvido no âmbito da unidade curricular intitulada Dissertação de Mestrado, do plano de estudos do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, tendo sido realizado em grande parte nas instalações do Laboratório de Aerodinâmica Industrial da *ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial*.

No ciclismo de alta competição, nas situações de rolamento a velocidades elevadas em terreno plano, a principal força de oposição ao movimento é a força de resistência aerodinâmica, representando cerca de 90% do total das forças de resistência que atuam sobre o conjunto ciclista + bicicleta. Assim, a otimização aerodinâmica deste conjunto mostra-se determinante na melhoria do desempenho que o ciclista apresenta numa situação de competição, possibilitando que uma mesma potência mecânica produzida pelo ciclista possa resultar num melhor desempenho em prova.

Para que este processo de otimização seja bem sucedido, numa primeira instância é necessário proceder à identificação dos parâmetros com maior influência sobre a resistência atuante no sistema analisado. Assim, surge a necessidade de perceber como avaliar estes parâmetros e de entender que tipo de evolução dos mesmos é considerada favorável. Para isso, é essencial compreender que fatores influenciam de forma direta e relevante estas forças, como é o caso da influência direta da área frontal efetiva na força de resistência aerodinâmica atuante sobre o conjunto em análise. A área frontal efetiva é considerada como sendo um dos parâmetros de maior interesse deste estudo, a par das forças de resistência aerodinâmica.

Assim, o principal objetivo desta investigação consiste em desenvolver diversas metodologias, quer através de ensaios em túnel de vento, quer de ensaios de estrada ou de pista, que possibilitem a aquisição e o estudo da evolução temporal de todo um conjunto de parâmetros associados às forças de resistência já referidas, atuantes sobre o conjunto em estudo. Foram alteradas posições de condução e configurações ao nível do equipamento usado pelo ciclista nos ensaios realizados, com o objetivo de entender que tipo de impacto seria possível observar nas forças de resistência aquando destas alterações.

Com isto, esta investigação surge no sentido de responder a questões como:

- De que maneira as alterações ao nível da posição de condução se traduzem numa poupança ao nível da potência mecânica produzida pelo ciclista ao longo de um determinado intervalo de tempo?
- De que maneira a forma e configuração geométrica de um capacete de ciclismo podem aumentar a eficiência energética do ciclista em prova?
- Que tipo de metodologias permitem uma melhor avaliação da evolução das forças e dos parâmetros inerentes às forças de resistência atuantes sobre o conjunto ciclista + bicicleta?

Focando nesta última questão, na presente investigação foram desenvolvidas metodologias de ensaio em túnel de vento que possibilitaram efetuar medições diretas de valores das forças de resistência aerodinâmica atuantes. Foram também desenvolvidas metodologias aplicáveis a ensaios realizados em estrada e em pista, que consistiram na instalação de um sistema de aquisição de dados relativos à velocidade do conjunto relativamente ao solo e ao escoamento incidente, entre outros parâmetros adquiridos como foi o caso da altitude e da potência mecânica produzida em cada instante.

O principal destaque deste trabalho vai para as comparações realizadas entre os resultados obtidos através das diferentes metodologias desenvolvidas, oferecendo assim várias soluções para uma mesma análise da evolução temporal de certos parâmetros. Esta diversidade permite adaptar a forma como é feita a aquisição de dados aos recursos disponíveis em diferentes circunstâncias, sendo que a visão geral que esta investigação fornece permite ao leitor perceber qual a metodologia que melhor se adapta ao parâmetro que este pretende analisar ao longo do tempo.

A presente investigação encontra-se dividida em seis capítulos, sendo que no primeiro deles se encontra esta introdução, que faz referência à pertinência do tema escolhido, objetivos do mesmo e respetiva organização. Neste primeiro capítulo é também realizada a revisão bibliográfica desta dissertação, na qual é dado a conhecer o estado da arte e é contextualizado o estudo que foi feito previamente à execução da mesma.

O segundo capítulo é dedicado à descrição pormenorizada dos equipamentos que foram utilizados para o desenvolvimento e aplicação das metodologias implementadas no âmbito desta investigação. De notar que, tanto este como os próximos capítulos até à conclusão se encontram divididos em subcapítulos referentes aos três tipos de ensaio utilizados: em túnel de vento, em estrada e em pista.

No terceiro capítulo são apresentados os métodos desenvolvidos e utilizados na aquisição e pós processamento dos dados registados. É neste capítulo que são explicados os vários processos de calibração que foram efetuados nos equipamentos usados e que permitem entender melhor a maneira como os dados tratados são obtidos numa primeira instância.

No quarto capítulo, intitulado de *Procedimento Experimental*, são apresentados os resultados obtidos aquando da realização dos três diferentes tipos de ensaio já referidos. No seguimento da apresentação destes dados, é também efetuada a análise dos mesmos, na qual são tecidos alguns comentários que deixam vislumbrar aquilo que será apresentado no quinto capítulo, a conclusão. Neste quinto capítulo são apresentadas as conclusões finais sobre o estudo realizado com as diferentes metodologias utilizadas, nos três tipos de ensaio realizados, sendo também indicadas algumas recomendações para investigações futuras a realizar nesta área.

1.1. Enquadramento Teórico

Na Figura 1.1 é apresentado, num contexto de competição, um ciclista profissional do modo de contra-relógio a pedalar em estrada.

A questão que dá o mote à presente investigação é precisamente: que tipo de metodologias podem ser desenvolvidas para aumentar a eficiência da potência mecânica que este ciclista produz? Com esta questão, pretende-se analisar como é que o ciclista pode atingir velocidades superiores sem ter de aumentar a potência mecânica que usualmente produzia para as manter.



Figura 1.1. Ciclista da Especialidade de Contra-Relógio a competir nos UCI World Championships

Existem várias abordagens experimentais que podem ser utilizadas no âmbito de resolver este problema, recorrendo à realização de:

- Ensaios em estrada;
- Testes em bicicletas estáticas num ginásio;
- Testes em pista.

Ao aplicar a 2ª Lei de Newton ao conjunto em análise na Figura 1.1 (ciclista + bicicleta), é possível observar que elementos como a estrada e o ambiente são os principais responsáveis pelas forças atuantes sobre este conjunto.

$$F_{mot} = R_{rol} + R_{aero} \pm F_{inerc} \pm F_{grav} \quad (1.1)$$

Observando a equação (1.1), é possível verificar que os termos de forças de resistência aerodinâmica e de rolamento surgem associados respetivamente ao ambiente e à estrada, tal como é devidamente identificado na Figura 1.2. **Desenvolvimento da 2ª Lei de Newton aplicada ao conjunto ciclista + bicicleta.**

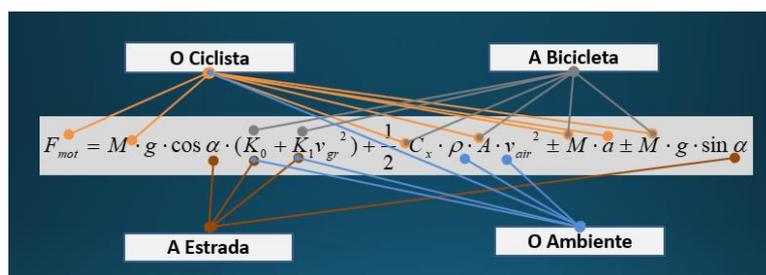


Figura 1.2. Desenvolvimento da 2ª Lei de Newton aplicada ao conjunto ciclista + bicicleta

Da análise da Figura 1.2 é possível identificar quais os parâmetros mais importantes aquando da otimização aerodinâmica deste conjunto, sendo eles o coeficiente de resistência aerodinâmica (vulgarmente representado por C_x ou por C_D) e a área frontal efetiva do conjunto ciclista + bicicleta (A_{ef}).

Para a obtenção do C_D foram desenvolvidas metodologias aplicáveis aos ensaios em túnel de vento, recorrendo ao auxílio de uma balança multiaxial de forças para efetuar a medição das forças de resistência aerodinâmica aplicadas ao conjunto. Por sua vez, a área frontal efetiva foi obtida com recurso a uma técnica de fotometria, baseada no pós processamento de fotografias capturadas do conjunto em várias posições de condução adotadas pelo ciclista.

Algumas metodologias complementares às de ensaios em túnel de vento foram identificadas, como é o caso das metodologias usadas em ensaios de estrada, de desaceleração e de *coast down*. Através destas metodologias complementares, é possível obter estimativas para o produto $C_D A$, definido como área de resistência aerodinâmica. Uma vez que a área frontal efetiva já é previamente conhecida através da técnica de fotometria usada, estas metodologias complementares permitem também obter estimativas dos valores de coeficiente de resistência aerodinâmica obtidos para as várias posições de condução a analisar.

1.2. Revisão Bibliográfica

No ciclismo, em velocidades superiores a 14 m/s, a resistência aerodinâmica representa habitualmente cerca de 90% do total de forças de oposição ao movimento. Assim, a otimização da resistência aerodinâmica é um processo de grande interesse no âmbito do ciclismo de alta competição, que permite obter um melhor desempenho para uma mesma potência mecânica produzida pelo atleta. (1)

A resistência aerodinâmica é diretamente proporcional à Área Frontal Efetiva, A_{ef} [m^2], que pode ser estimada para quatro posições diferentes adotadas pelo ciclista em termos da sua postura corporal e do seu posicionamento relativamente à bicicleta: *Upright* (UP), *Dropped* (DP), *Aero* (AP) e *Obree's* (OP). (2)

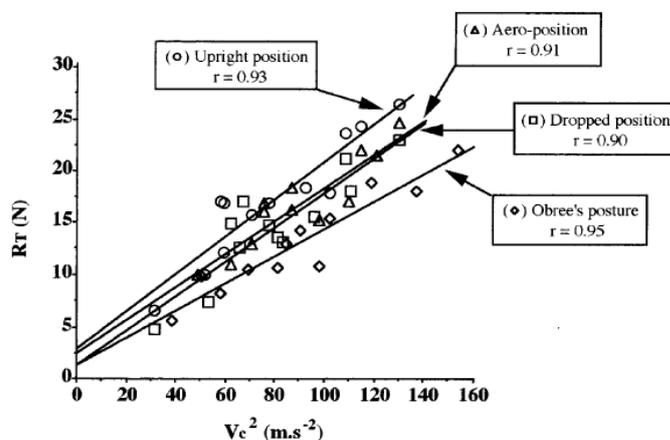


Figura 1.3. Evolução da resistência total de oposição ao movimento (R_T [N]) em função do quadrado da velocidade do ciclista (v_c^2 [$m.s^{-2}$]) para quatro posições de condução diferentes. (1)

Para estimar o coeficiente de resistência aerodinâmica, o método mais utilizado é o de ensaios em túnel de vento, no qual o cálculo de C_D é baseado na quantificação das forças e momentos aplicados ao conjunto ciclista + bicicleta recorrendo a uma balança multiaxial de forças. Este método é sensível a parâmetros como o tipo de roda, o ângulo de guinada e a posição do ciclista. Os resultados obtidos dependem também do estado de repouso ou de movimento do ciclista. De notar que pequenas perturbações laterais que possam ocorrer numa situação real não são consideradas num ensaio em túnel de vento. Pode-se recorrer a outras metodologias para obtenção do coeficiente de resistência aerodinâmica, desta feita em estrada, como é o caso dos ensaios de desaceleração e do método de *coast down*. Nos ensaios de desaceleração, o ciclista, após atingir uma dada velocidade, deixa de pedalar e entra em desaceleração devido à resistência do ar e às forças de atrito de rolamento, sendo os tempos dessa mesma desaceleração registados no decorrer do ensaio. Nos ensaios de *coast down*, é determinada a aceleração média do conjunto ciclista + bicicleta. A magnitude total das forças de resistência ao movimento é calculada através do produto da massa do sistema pela aceleração do mesmo. Estes métodos de ensaio em estrada podem ser usados para validação e otimização de resultados experimentais obtidos em ensaios em túnel de vento ou até mesmo para preparação de ensaios em túnel. Outra alternativa seria realizar uma análise computacional (*CFD*) para estimar o valor da resistência aerodinâmica, sendo que este método permitiria obter uma análise mais detalhada do escoamento em torno do corpo do ciclista. (2)

Sendo o objeto de estudo no ciclismo o conjunto ciclista + bicicleta, estamos perante uma análise ao escoamento e às forças de resistência aerodinâmica que atuam em torno de um corpo não-fuselado (também designado de corpo rombo). As características mais marcantes do escoamento em torno de um corpo não-fuselado são, tipicamente:

- A produção de uma esteira de grande espessura (da ordem de grandeza da dimensão transversal do corpo), induzindo grandes deformações no escoamento exterior a que estão associados grandes déficits de quantidade de movimento, do que resulta uma grande resistência de forma;
- Na região da esteira imediatamente a jusante do corpo, a pressão é inferior à pressão no escoamento não perturbado ($p_b < p_\infty$) e a velocidade do escoamento é extremamente baixa. É este fenómeno que explica o *cone de aspiração* do qual resulta o *Drafting Effect*, muito usado no ciclismo e em outros desportos, como a Fórmula 1. Esta sucção na base do corpo, na região da esteira imediatamente a jusante do corpo, é a principal responsável pela elevada resistência exibida pelos corpos não-fuselados;
- Na região da esteira afastada, o escoamento é caracterizado por uma organização discreta de vórtices alternadamente distribuídos (estrada de *Von Karman*);
- Devido a esta libertação de vórtices, discreta e alternada, são induzidos no corpo esforços pulsatórios que, caso a estrutura seja elástica, a fazem entrar em vibração. (3)

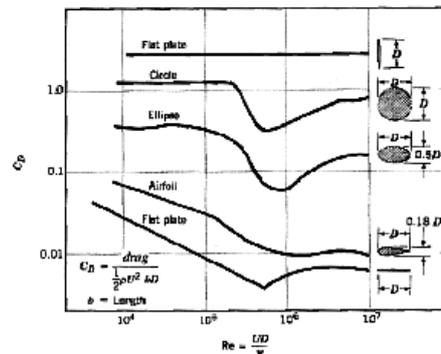


Figura 1.4 Evolução do Coeficiente de Resistência Aerodinâmica (C_D) com o aumento do Número de Reynolds (Re), para Corpos Fuselados e Não-Fuselados. Para corpos não-fuselados, como é o caso da placa plana, C_D mantém-se constante com o aumento do número de Reynolds (4)

Para quantificar as estruturas de vorticidade de larga escala, desenvolvidas à medida que o ciclista completa um ciclo em torno da pedaleira, recorre-se a ensaios em túnel de vento, nos quais foram identificadas assimetrias na esteira de vórtices. A minimização das referidas assimetrias resulta na redução da resistência aerodinâmica em torno deste sistema.(5)

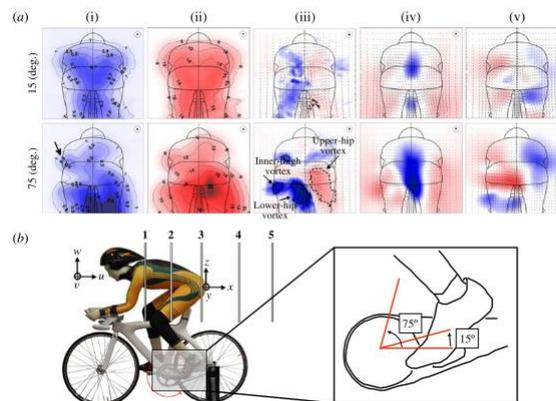


Figura 1.5. Comparação entre estruturas de escoamento baixa e elevada resistência aerodinâmica. As imagens selecionadas ilustram qualitativamente as assimetrias que se desenvolvem no fluido. (3)

Sabe-se que as variações de área superficial frontal ao longo de um ciclo de pedalada não são o mecanismo de maior influência na geração de resistência aerodinâmica, devendo-se esta resistência aerodinâmica maioritariamente às alterações de grande escala que ocorrem na estrutura do escoamento ao longo desse mesmo ciclo. Existem dois regimes de escoamento identificados: regime de escoamento de baixa resistência aerodinâmica (simétrico) e de elevada resistência aerodinâmica (assimétrico). Medições realizadas sugerem que alterações na distribuição da pressão dinâmica na zona inferior das costas do ciclista são maioritariamente responsáveis pela variação da resistência aerodinâmica. É nesta zona inferior das costas que se situam as estruturas de larga escala do escoamento, que têm o maior impacto no desenvolvimento das forças de resistência aerodinâmica em torno do conjunto. (6)

A existência de vento lateral reduz os efeitos provocados pela resistência aerodinâmica em torno do ciclista líder do pelotão e também em torno do ciclista que segue atrás do líder, redução essa que também é significativa para o caso de ventos de menor intensidade. De notar que, nos ensaios realizados em túnel de vento (aquando do estudo do

efeito do vento lateral) se observou que a maior fonte de incertezas se prende com a capacidade do atleta em manter a mesma posição durante toda a duração do ensaio e, mais difícil ainda, que este consiga manter a mesma posição ao longo de todos os diferentes ensaios que sejam realizados, ensaios nos quais é assumida a hipótese de que o atleta repete na perfeição a posição de referência. Concluiu-se também que o *Drafting* é um método eficiente e bem estabelecido para a redução do custo energético no ciclismo, uma vez que os ciclistas na parte posterior do pelotão vão ser menos afetados pelo efeito da resistência aerodinâmica. (7)

A resistência aerodinâmica em torno de ciclistas que se deslocam com grande proximidade varia em função da distância que separa esses mesmos ciclistas entre si.

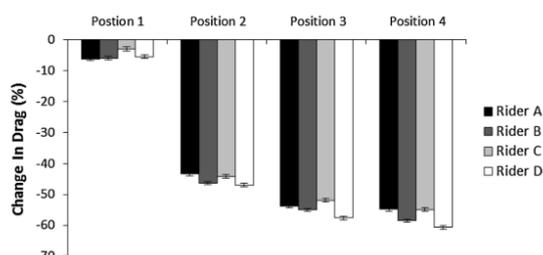


Figura 1.6. Variação na Resistência Aerodinâmica (%) em cada posição ocupada numa Prova de Perseguição por Equipas, usando um ciclista a solo como termo de comparação (efetuado apenas para a posição de referência) (8)

Da análise da Figura 1.6 observa-se que a redução da resistência aerodinâmica é relativamente semelhante entre atletas que se encontrem na mesma posição dentro de uma mesma equipa. No entanto, verificam-se diferenças significativas entre as variações de resistência aerodinâmica exibidas para as diferentes posições ocupadas numa equipa de ciclistas. A mudança de posição de um ciclista pode influenciar a resistência aerodinâmica que existe em torno dos seus colegas de equipa. Contudo, a variabilidade nos efeitos resultantes das interações entre atletas reforça o facto de que as interações ao nível aerodinâmico entre ciclistas dependem fortemente das características dos atletas (tamanho e silhueta), bem como da geometria individual. Assim, a complexidade destas interações acima referidas aponta para a necessidade da realização de testes personalizados para cada atleta, por forma a otimizar o desempenho do mesmo e também para otimizar o potencial do posicionamento dinâmico de toda a equipa. (8)

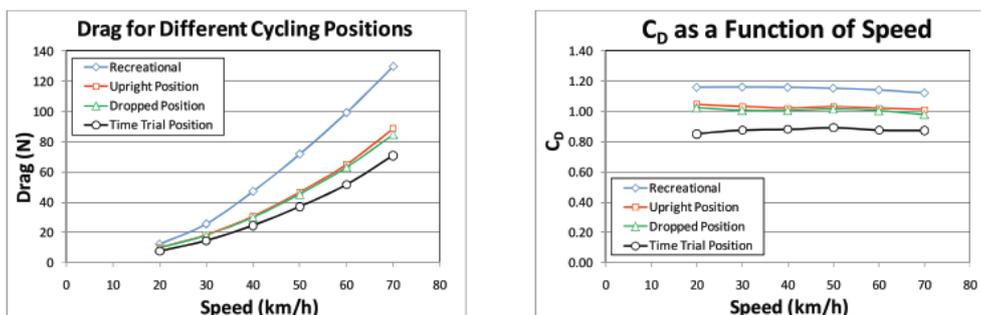


Figura 1.7. a) Variação da Resistência Aerodinâmica com a velocidade; b) Variação do C_D com a velocidade. (9)

Verifica-se no gráfico da Figura 1.7 - a) que a resistência aerodinâmica tem uma variação quadrática com a velocidade, sendo este aumento comum para qualquer ciclista e em qualquer uma das diferentes posições mencionadas. Da análise do gráfico da Figura 1.7 - b) inferiu-se que os valores registados para o C_D , para o intervalo de velocidades estudadas, são praticamente independentes da gama da velocidade.(9)

A otimização de forma e a minimização de rugosidades ou irregularidades superficiais podem levar a uma diminuição significativa da resistência aerodinâmica. Assim, no momento da conceção de bicicletas usadas em alta competição, é comum recorrer ao uso de quadros de bicicleta fabricados em materiais compósitos (com os seus tubos em forma de perfil alar), bem como ao uso de rodas lenticulares e de guiadores equipados com *aero handlebars*, por forma a obter reduções de resistência aerodinâmica até cerca de 14 %, tendo por base de comparação uma bicicleta convencional com um quadro composto por tubos de secção redonda. Uma vez que o corpo do atleta é responsável por cerca de 2/3 da resistência aerodinâmica, sendo a bicicleta apenas responsável pelo restante 1/3, a otimização do escoamento de ar em torno do corpo do atleta é a maneira mais fácil de reduzir a resistência aerodinâmica. (10)

A variável que descreve com maior precisão o desempenho de um ciclista é a potência mecânica produzida, cujos valores registados em situação de competição são diferentes consoante o tipo de etapa, sendo o valor máximo registado para subidas em etapas de montanha (*MT*), seguido da etapa de semi-montanha (*SMT*) e por último da etapa em terreno plano (*FLT*). Em competições de ciclismo consideradas de elite, como é o caso da *Tour de France*, os ciclistas que participam nestas provas possuem uma capacidade aeróbica tipicamente muito alta. (11)

Para descrever a intensidade da atividade física no ciclismo são usados perfis de batimento cardíaco, sendo este método algo impreciso e problemático visto que é altamente influenciável por desvios cardiovasculares. Assim, medições diretas (na bicicleta), realizadas recorrendo a sistemas de medição de potência, aparentam ser menos influenciadas por fatores internos e externos, descrevendo com maior precisão o desempenho do atleta e quantificando melhor a intensidade. (12)

A redução do ângulo do tronco provoca uma redução ao nível das respostas metabólica e fisiológica do ciclista. A esta redução do ângulo do tronco está também associada uma redução linear da área frontal. No caso particular do valor mais baixo de ângulo do tronco possível (0°) verificou-se uma redução significativa ao nível do desempenho fisiológico do ciclista, pelo que esta situação deve ser evitada. Concluiu-se, assim, que existe uma relação evidente entre os ganhos aerodinâmicos e as perdas ao nível fisiológico aquando da redução deste ângulo. (13)

Os efeitos não-lineares da Pressão Insuflada nos Pneus (P_r) e da Força Vertical Aplicada aos Pneus (F_v) no Coeficiente de Resistência de Rolamento (C_r) resultam da forma como estas variáveis modificam o rasto do pneu da bicicleta e as propriedades elásticas do material do pneu. (14)

2. MATERIAIS

2.1. Ensaios em Túnel de Vento

Os ensaios foram realizados nas instalações do LAI-ADAI, que possui um túnel de vento nas suas instalações, a funcionar em regime subsónico.



Figura 2.1. Túnel Aerodinâmico de Veículos do LAI-ADAI (15)

Este equipamento tem uma configuração do tipo *Göttingen*, funcionando em circuito fechado, e possui uma câmara de ensaios aberta, com uma área transversal quadrada de 2 m x 2 m, apresentando uma zona de trabalho com 5 m de comprimento medidos entre a saída da contração e a entrada do coletor do circuito de retorno. A velocidade máxima na secção de teste é de aproximadamente 18 m/s, conseguida através de um ventilador do tipo centrífugo, acionado por um motor elétrico com 230 kVA de potência. Na base desta mesma câmara de ensaios existe um prato rotativo com 3 m de diâmetro. A razão de contração do túnel é de 4:1 (de uma secção máxima de 4 m x 4 m para 2 m x 2 m). (15)

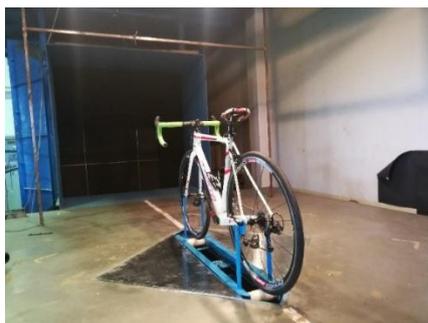


Figura 2.2. Secção de Teste do Túnel Aerodinâmico de Veículos do LAI-ADAI

2.1.1. Configuração Experimental

A plataforma usada nos ensaios do conjunto ciclista + bicicleta em túnel de vento é composta por um sensor multiaxial *MCS10* da *HBM*, por um rolo de treino ligado ao sensor multiaxial e também por um módulo de aquisição de dados de sinais de extensometria da *National Instruments (NI-9237* da Série C) que funciona acoplado ao suporte de módulo único *USB-9162*, também da *NI*. Esta configuração é apresentada de forma esquemática na Figura 2.3.

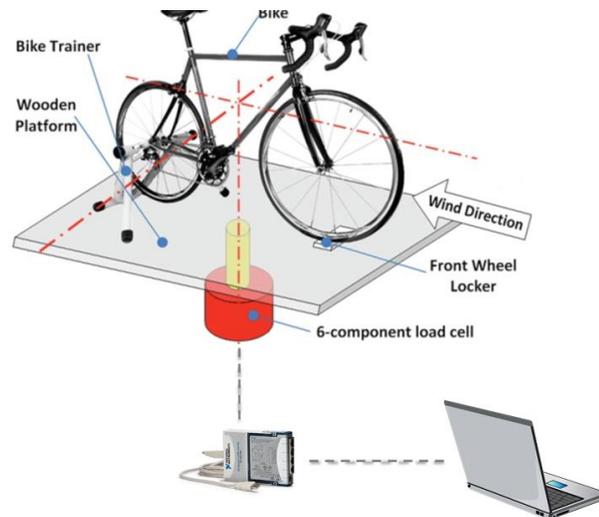


Figura 2.3. Descritivo geral da instalação

Desta forma, é possível registrar os dados relativos às deformações medidas nos extensômetros, correspondentes a esforços e momentos aplicados sobre a estrutura ligada à balança aerodinâmica.

2.1.1.1 Rolo de Treino

Foi projetado e construído de raiz, no âmbito do presente trabalho, o rolo de treino exibido na Figura 2.4, onde se encontra aparafusado o sensor multiaxial e, também, onde se encontra colocada a bicicleta na qual o ciclista vai pedalar. Esta estrutura é constituída por duas longarinas em ferro de 1184 mm cada, com perfil em U e uma aba de 42 mm, e por 2 rolos fabricados em *Nylon*, com 60 mm de diâmetro e 150 mm de largura. O contacto entre os rolos de *Nylon* e o veio que os atravessa é feito através de rolamentos *FAG 204212*, sendo que esse mesmo veio possui 20 mm de diâmetro e 150 mm de largura. No centro desta estrutura encontra-se aparafusada a célula de carga multiaxial de seis componentes *MCS10* da *HBM*.

A posição do rolo onde assenta a roda da frente é ajustável, sendo possível adaptar a distância entre rolos à distância do entre eixo de diferentes bicicletas. Existe também uma correia que passa pelos dois rolos, permitindo reproduzir a cinemática que a roda da frente (não motriz) teria numa situação normal de estrada, rodando ambos os rolos de forma síncrona. No rolo onde assenta a roda traseira existe ainda a possibilidade de instalar uma correia trapezoidal que permita ligar esse mesmo rolo a um freio elétrico que induza resistência ao movimento.



Figura 2.4. Rolo de Treino

Foram também instaladas chapas de alumínio que foram cortadas à medida para tapar o alçapão, por forma a evitar a formação de recirculação, e também para garantir que o escoamento junto ao solo não é perturbado por eventuais rugosidades que possam induzir forças indesejadas sobre a estrutura e sobre o sensor multiaxial acoplado, comprometendo assim a qualidade dos dados experimentais obtidos durante os ensaios em túnel de vento.

2.1.1.1. Sensor Multiaxial MCS10 by HBM

Para a medição e registo de forças exercidas sobre o conjunto ciclista + bicicleta, recorreu-se à célula de carga multiaxial MCS10 da HBM, que efetua a medição das forças e momentos segundo três eixos (x, y e z). Numa balança aerodinâmica como esta, cada célula de carga é individualmente instrumentada com extensómetros¹ para medir as componentes do esforço vertical (F_z) e horizontal (F_x e F_y) bem como os momentos (M_x , M_y e M_z). (16)

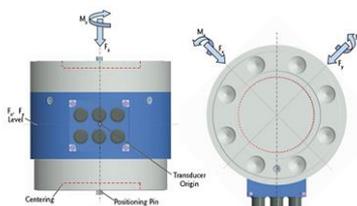


Figura 2.5. Sensor Multiaxial MCS10 (17)

Assim, esta célula apresenta-se como ideal para aplicações na área da engenharia mecânica, fornecendo medições com classe de precisão até 0.1 e fornecendo também uma gama de medição axial até 10 kN e lateral até 2 kN.m. (17)

2.1.1.2. Módulo de entrada de deformação NI 9237

Este módulo de entrada de deformação (ponte da Série C para ponte analógica) inclui todo o condicionamento de sinais necessário para alimentar e medir até quatro sensores baseados em ponte simultaneamente, oferecendo medição de carga ou de deformação com um atraso de fase zero entre canais. Este módulo oferece também uma alta rejeição ao ruído do modo comum. Os seus quatro conectores RJ50 podem ser conectados diretamente à maior parte das células de torque ou de carga. Para estabelecer a ligação entre este módulo de entrada de deformação com o computador, é usado um suporte de módulo único: USB-9162

¹ Na prática, a deformação medida nos extensómetros raramente ultrapassa a ordem de grandeza de 10^{-3} (millistrain). (17)

da *National Instruments*, sendo este compatível com o chassis da Série C, como é o caso do chassis usado (*CompactDAQ*). (18)



Figura 2.6. NI 9237 & NI USB-9162 (18)

2.1.2. Combinações do equipamento utilizado pelo ciclista

Foram quatro as diferentes combinações de equipamento utilizadas neste ensaio em túnel de vento, tendo sido utilizados os três capacetes da Figura 2.7 nas três primeiras e, numa última, o ensaio foi realizado com o ciclista sem usar capacete. O objetivo de usar quatro configurações diferentes foi o de analisar que tipo de influência é que estas alterações no equipamento podem exercer nos resultados obtidos aquando da análise das forças exercidas pelo escoamento sobre o conjunto ciclista + bicicleta. O restante equipamento utilizado pelo ciclista permaneceu inalterado ao longo da duração do ensaio.

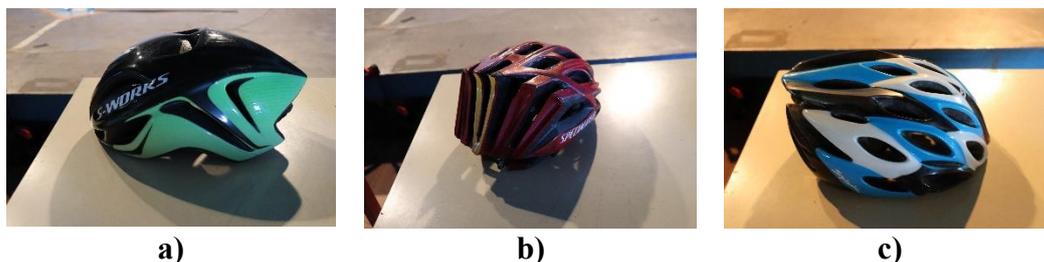


Figura 2.7. Capacetes Utilizados no Ensaio em Túnel de Vento:
a) *Specialized Evade*; b) *Specialized Prevale*; c) *Spiuk Zirion*

2.2. Ensaio de Estrada e Ensaio de Pista

No Ensaio de Estrada e no Ensaio realizado na Pista de Ciclismo do Velódromo Nacional, foram adquiridos os valores da velocidade do escoamento incidente relativamente à bicicleta. Para tal, foi necessário um circuito idêntico ao da Figura 2.8, constituído por uma pilha de 9 V ligada a um regulador de tensão de 5 V que alimenta um sensor de pressão, cuja saída do mesmo tem uma gama de 0 a 5 V. Por sua vez, este sensor de pressão está ligado a um *Data Logger*. Como a gama de tensão das entradas analógicas do *Data Logger* se encontra situada entre os 0.0 e os 2.5 V, foi necessário colocar um divisor de tensão na saída analógica do sensor de pressão para que este mesmo sensor passe a ter uma resposta que se situe dentro da mesma gama de tensões de entrada do *Data Logger*. Este divisor de tensão é feito recorrendo a um potenciómetro que permite redefinir quer o valor de tensão para uma diferença de pressão nula no transdutor de pressão, quer o valor de ganho.

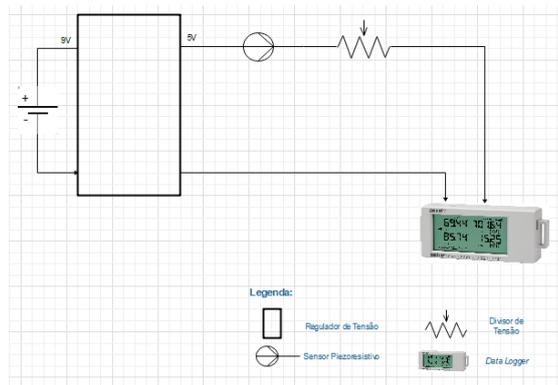


Figura 2.8. Circuito que efetua a ligação entre o Sensor Piezoresistivo e o *Data Logger*

Tal como é possível observar na Figura 2.9, este circuito encontra-se ligado a um Tubo de *Pitot* para medir a velocidade do escoamento incidente (vento). As várias medições que foram efetuadas ao longo dos ensaios realizados foram registadas num *Data Logger*, neste caso o *Hobo UX120-006M 4-Channel Analog Data Logger*.



Figura 2.9. *Setup* utilizado para a aquisição de dados em estrada e em pista

3. MÉTODOS

3.1. Cálculo das Áreas Frontais Efetivas

Dada a forte influência que a área frontal efetiva do conjunto ciclista + bicicleta tem sobre a força de resistência aerodinâmica, a determinação deste parâmetro é fundamental para as várias análises que foram realizadas no decorrer desta investigação.

Assim, a bicicleta usada nos vários ensaios realizados foi colocada em cima de um rolo de treino que foi posicionado à frente de uma parede branca. Foi efetuada uma medição da altura e da largura da *testa* do quadro da bicicleta com o objetivo de calcular a respetiva área desse mesmo elemento. Esta área serviu de escala na etapa de pós-processamento que mais à frente será descrita. De seguida, o ciclista colocou-se em cima da bicicleta e foi fotografado completamente imóvel nas quatro posições que foram analisadas ao longo dos ensaios (*Recreational*, *Upright*, *Dropped* e *Aero*). Com todas as fotografias recolhidas, o pós-processamento foi feito recorrendo a um *software* de edição de imagem, o *Gimp*, no qual todos os elementos que não fazem parte da área frontal do conjunto ciclista + bicicleta foram removidos.



Figura 3.1. Fotografia usada para a obtenção do valor da Área Frontal Efetiva antes (a) e depois (b) de aplicado o pós-processamento

Considerando o exemplo exibido na Figura 3.1, do cálculo da área frontal efetiva para a posição *Recreational*, foi calculado qual o número de pixéis existentes na Figura 3.1 - b) e foi efetuada a comparação entre este número de pixéis e o número obtido apenas para a *testa* do quadro da bicicleta, cuja área foi previamente determinada. Desta forma, foi possível converter o número de pixéis obtido de 420123 para uma área frontal efetiva de 0.399 m². Na Tabela 1, encontram-se os restantes valores de área frontal efetiva obtidos para todas as posições em estudo:

Posição de Condução	Número de Pixéis	Área Frontal Efetiva [m ²]
<i>Recreational</i>	420123	0.399
<i>Upright</i>	403963	0.383
<i>Aero</i>	295131	0.280
<i>Dropped</i>	311063	0.295

Tabela 1. Valores obtidos para as áreas frontais efetivas de cada posição de condução analisada

Assim, com base nos valores exibidos na Tabela 1, torna-se possível calcular o valor do coeficiente de resistência aerodinâmica, obtido através da seguinte equação (que requer também a determinação de F_x):

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (3.1)$$

3.2. Ensaio em Túnel de Vento

Foi realizado no túnel aerodinâmico do *LAI – ADAI*, um ensaio em que foram registados os vários valores medidos para a força de resistência aerodinâmica (F_x) com o intuito de perceber como é que as diferentes posições adotadas por um ciclista de contra-relógio afetam o escoamento em torno do conjunto ciclista + bicicleta e, conseqüentemente, a força de resistência aerodinâmica que atua sobre esse mesmo conjunto. Este ensaio foi realizado para três velocidades diferentes de escoamento e com três capacetes diferentes (e também sem capacete), com o ciclista a pedalar e também com este em regime estático.

Assim, algumas das limitações associadas a este tipo de ensaio em túnel de vento são as seguintes:

- Na situação em que o conjunto em estudo se encontra estático, o escoamento em torno desse mesmo conjunto encontra-se alterado pelo chão, devido ao desenvolvimento de uma camada limite;
- Se as rodas da bicicleta estiverem paradas, o efeito do vento não é considerado;
- A posição de condução do ciclista na bicicleta durante o ensaio em túnel de vento não é necessariamente idêntica à posição adotada por este numa situação real de competição.

De considerar ainda que pequenos movimentos laterais que ocorrem em situações reais não se encontram presentes num ensaio em túnel de vento, visto que os graus de liberdade do conjunto bicicleta + ciclista se encontram restringidos nesta situação. (2)

Foi solicitado ao ciclista que pedalasse nas quatro diferentes posições de condução apresentadas na Figura 3.2, sendo que este repetiu essas mesmas quatro posições para três velocidades de escoamento incidente diferentes de 5.0; 7.3 e 11.7 m/s.

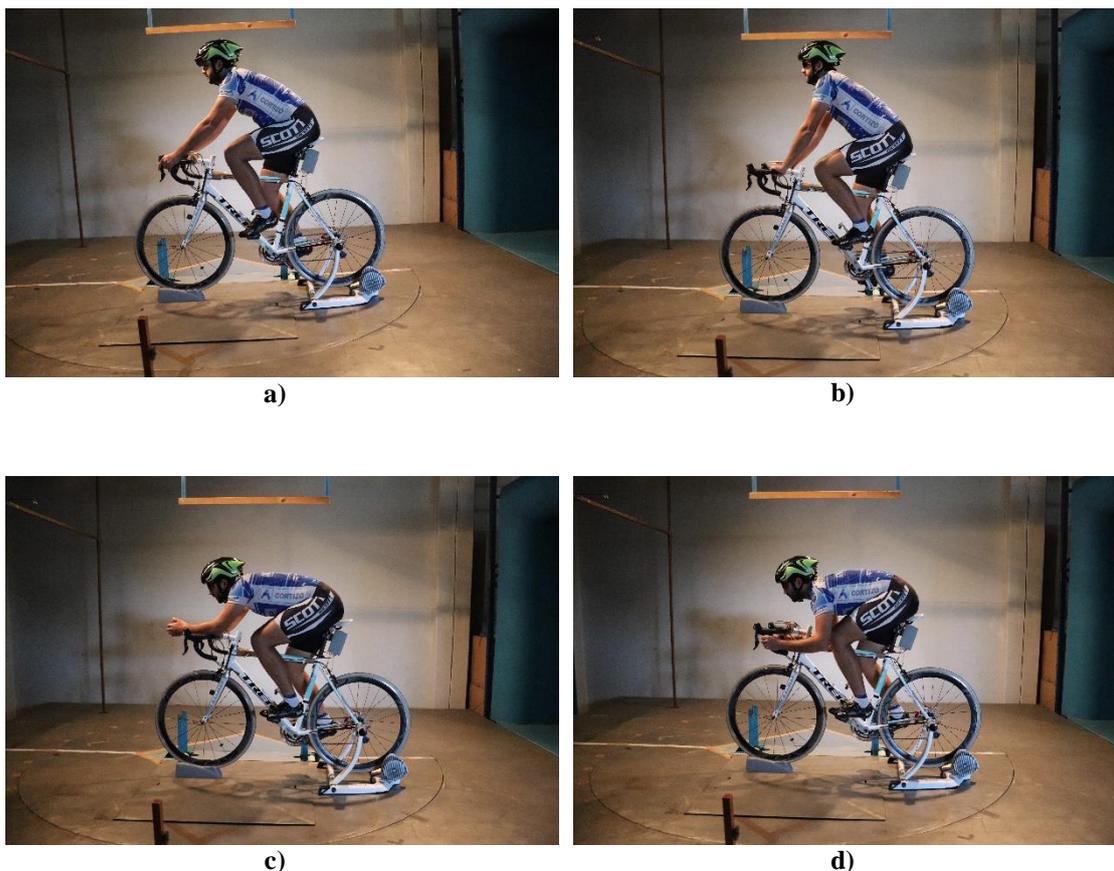


Figura 3.2. Posições de Condução adotadas nos Ensaiois em Túnel de Vento:
a) *Recreational Position*; b) *Upright Position*; c) *Aero Position*; d) *Dropped Position*

3.2.1. Calibração da balança multiaxial de forças

Por forma a converter a deformação (adimensional) registada nos extensómetros e exibida pelo *software* de aquisição numa força em Newton, foi necessário calibrar a balança multiaxial de forças. Assim, suspendendo discos de peso previamente conhecido e usando um cabo conectado através de uma roldana, foram aplicadas segundo o eixo X forças de valor conhecido e foi registado, para cada peso utilizado, o valor médio de deformação ao longo de 20 medições (a uma taxa de aquisição de 1 valor / segundo). Com base nestes dados, foi possível efetuar uma regressão linear que permite extrapolar que força está associada a uma determinada deformação medida pelas pontes de extensometria. Este processo de calibração para o eixo X é representado na Figura 3.3.



Figura 3.3. Calibração segundo o eixo x

Dessa mesma regressão linear, resulta uma equação da forma $Força [N] = f(Tensão [V])$, tal como é apresentado na Figura 3.4.

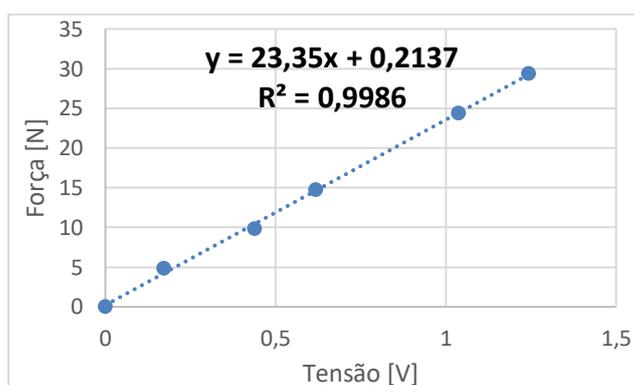


Figura 3.4. Calibração da Balança Multiaxial de Forças segundo o eixo longitudinal X

Estas medições que foram efetuadas para realizar a regressão linear podem estar afetadas por alguns erros, como é o caso do ruído eletromagnético do equipamento de medida e da própria rede elétrica, que pode induzir algumas perturbações nos resultados obtidos.

3.2.2. Análise ao Efeito do Escoamento em torno da estrutura

Inicialmente, foram efetuadas medições apenas com a estrutura na qual a bicicleta é acoplada à balança de forças, tendo sido obtidos os seguintes dados para F_x :

Velocidade [m/s]	F_x [N]
0.0	0.000
5.0	0.537
7.3	0.911
11.7	1.051

Tabela 2. Evolução dos valores de força de resistência aerodinâmica exercida sobre a estrutura, medidos ao longo das várias velocidades de teste

Numa primeira análise à Tabela 2, é facilmente observável que com o aumento da velocidade do escoamento incidente sobre a estrutura, a força de resistência aerodinâmica segundo o eixo x vai aumentar progressivamente, variando de acordo com a seguinte equação:

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A \quad (3.2)$$

Assim, a força de resistência aerodinâmica segundo o eixo x é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade do escoamento incidente sobre o conjunto ciclista + bicicleta.

Desta forma, ao longo das várias medições efetuadas, será possível descontar o efeito da força de resistência aerodinâmica exercida sobre esta estrutura às várias velocidades de escoamento ensaiadas. Assegura-se assim que os resultados obtidos serão representativos apenas do efeito que o escoamento incidente exerce sobre o conjunto ciclista + bicicleta.

3.2.3. Análise Energética – Potência Mecânica Produzida

Com base na força de resistência aerodinâmica (F_x) medida neste ensaio, e recorrendo a um modelo de simulação numérica para estimar a resistência associada ao rolamento, é possível efetuar uma análise energética, extrapolando a partir deste ensaio em túnel de vento para uma situação real de estrada. Desta forma, torna-se possível prever de que maneira a posição do ciclista pode representar uma poupança de potência mecânica produzida pelo mesmo para que este mantenha o movimento, a velocidade constante, numa estrada com declive nulo. Assim esta potência total pode ser dividida em duas componentes principais:

$$P_{total} = P_{aerodinâmica} + P_{rolamento} \quad (3.3)$$

Para a obtenção da componente de potência associada à resistência aerodinâmica em torno do conjunto bicicleta + ciclista, é usada a seguinte expressão:

$$P_{aerodinâmica} [W] = F_x [N] \times v [m/s] \quad (3.4)$$

Este valor de F_x é medido pela balança multiaxial de forças, sendo que a velocidade do escoamento (v) na secção de teste do túnel de vento é determinada com recurso a um anemómetro.

Por sua vez, para o cálculo da componente da potência associada à resistência de rolamento, foi necessário recorrer ao modelo de simulação numérica da Figura 3.5 para estimar os valores que a potência de rolamento assume às várias velocidades de escoamento incidente ensaiadas.

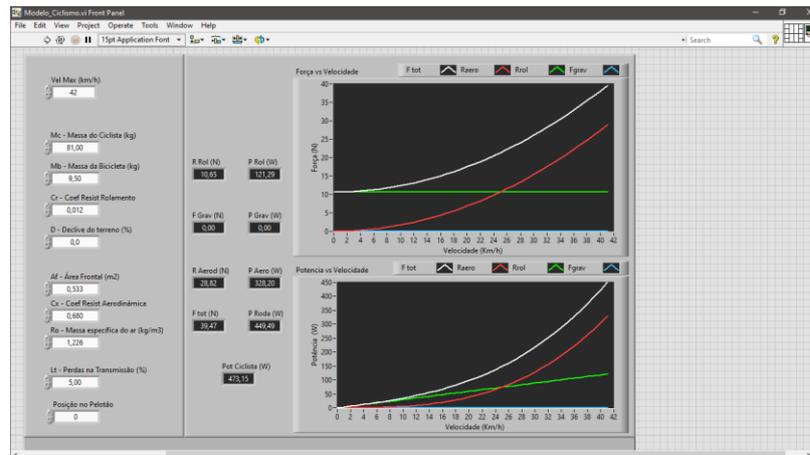


Figura 3.5. Modelo usado para estimar a Potência de Rolamento [W]

Com base na análise da Figura 3.5, é possível observar que foi necessário definir alguns parâmetros de entrada para obter o *output* do valor da potência associada à resistência de rolamento. Assim, os parâmetros de entrada que tiveram de ser definidos foram os seguintes:

- velocidade relativamente ao solo, a que o conjunto ciclista + bicicleta se encontra – visto que o ensaio em túnel de vento foi realizado a três velocidades de escoamento diferentes, foi também necessário calcular o valor da potência de rolamento associada a cada uma dessas três velocidades (5.0; 7.3 e 11.7 m/s);
- massa do conjunto ciclista + bicicleta – a massa do ciclista é de 81 kg e a massa da bicicleta é de 9.5 kg, perfazendo um total de 90.5 kg quando combinadas;
- coeficiente de resistência de rolamento – visto que o que se pretende é recriar as condições verificadas num ensaio de estrada, o valor atribuído ao C_R para o alcatrão é de 0.01221 [adimensional]; (19)
- declive do terreno – na presente situação do ensaio em túnel de vento, o declive do terreno simulado é de 0%;
- perdas na transmissão – 3%. (20)

3.3. Ensaio de Estrada e Ensaio de Pista

3.3.1. Calibração do Sensor de Pressão (Piezoresistivo)

Para calibrar o Sensor de Pressão Piezoresistivo inserido no circuito acima mencionado na Figura 2.8, foi usado um Micromanómetro de *Betz*.



Figura 3.6. Montagem experimental utilizada na calibração de um sensor capacitivo de pressão (21)
Legenda: 1 - Êmbolo; 2 - Tubagem de Pressão em T; 3 - Sensor de Pressão a calibrar;
4 - Micromanómetro de Betz; 5 - Voltímetro

Através da montagem exibida na Figura 3.6, foi gerado um sinal de entrada em pressão a partir de um êmbolo, tendo esta pressão sido aplicada, em simultâneo, ao sensor a calibrar e ao micromanómetro de coluna de água do tipo *Betz*, através de uma tubagem com uma derivação em T. Durante a calibração, foi elaborada uma tabela constituída por uma coluna de valores de altura em milímetros de coluna de água, [mm c. a.], exibidos no visor do Micromanómetro de *Betz*, e constituída também por uma coluna de valores de tensão em Volt [V], lidos num Voltímetro Digital. Com estes valores, foi possível efetuar a regressão linear apresentada na Figura 3.7.

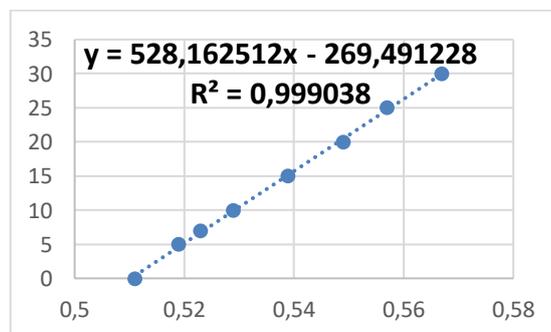


Figura 3.7. Equação de Regressão Linear do Sensor de Pressão ligado ao Tubo de Pitot

No final, a equação obtida a partir desta regressão linear é da forma $h = f(V)$, permitindo extrapolar valores de altura em milímetros de coluna de água a partir da voltagem fornecida pelo transdutor. (21)

3.3.2. Tubo de Pitot

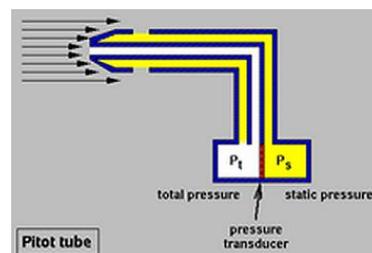


Figura 3.8. Funcionamento de um Tubo de Pitot (22)

Tal como se encontra esquematizado na Figura 3.8, o Tubo de *Pitot* mede a diferença entre a pressão total e a pressão estática. Conhecida esta diferença, é possível resolver a Equação de *Bernoulli* para a velocidade do escoamento incidente:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho_{ar} v^2 &= \rho_{\acute{a}gua} g h \\ \Leftrightarrow v &= \sqrt{\frac{2 g \rho_{\acute{a}gua} h}{\rho_{ar}}} \\ \Leftrightarrow v &= \sqrt{\frac{2 \times 9,81 \times 10^3 \times (h \times 10^{-3})}{1,21}} \\ \Leftrightarrow v_{ar} [m/s] &= 4 \sqrt{h [mm ca]} \quad (3.5) \end{aligned}$$

3.3.3. Ensaio de Estrada

Para testar numa situação real de estrada a configuração preparada para a aquisição e registo da velocidade do conjunto ciclista + bicicleta relativamente ao solo e ao escoamento, foi selecionado um trajeto de viagem no qual existisse um perfil de altitudes caracterizado por diferentes variações de declive e também no qual o ciclista se deparasse com diferentes intensidades e direções da velocidade do vento. De notar que as variáveis acima mencionadas vão ser recolhidas com recurso a um registador de dados de *GPS* e a um *Data Logger*, ao qual está ligado o tubo de *Pitot*. Desta forma, o ensaio foi realizado na

região compreendida entre o LAI e a estrada nacional N17, tal como é mostrado na rota desenhada na Figura 3.9.



Figura 3.9. Rota e Perfil de Altitude do Ensaio de Estrada realizado entre o LAI e a estrada nacional N17

Um dos objetivos deste ensaio foi o de avaliar a evolução temporal das componentes de força atuantes sobre o conjunto bicicleta + ciclista ao longo do mesmo. Assim, sobre o conjunto em estudo, foram aplicadas quatro forças diferentes: a Força de Resistência Aerodinâmica, a Força de Resistência de Rolamento, a Força Gravitacional e a Força de Inércia. Desta forma, a força que a roda motriz transmite ao solo para garantir o movimento é dada pela seguinte equação:

$$F_{total} = R_{Rol} + R_{Aero} + F_{inércia} + F_{grav} \quad (3.6)$$

Desenvolvendo cada um dos termos do segundo membro da equação (3.6), vem a seguinte expressão para a força total que é transmitida pela roda motriz ao solo:

$$F_{total} = (m_{ciclista} + m_{bicicleta}) \times g \times \cos(\alpha) \times C_R + \frac{1}{2} \times \rho_{ar} \times v_{ar}^2 \times C_D A + (m_{ciclista} + m_{bicicleta}) a + (m_{ciclista} + m_{bicicleta}) \times g \times \sin(\alpha) \quad (3.7)$$

em que:

- $m_{ciclista} + m_{bicicleta}$ é a massa do conjunto estudado, sendo a massa do ciclista de 81.0 kg e a massa da bicicleta de 9.5 kg;
- g é a aceleração gravítica (constante) [m/s^2];
- α é o ângulo de declive do terreno [$^\circ$], que é dado pela seguinte equação:

$$\alpha = \arcsen\left(\frac{\Delta h}{d}\right), \quad \text{em que:}$$

- Δh é a diferença de altitudes [m] entre dois pontos consecutivos;
- d é o deslocamento linear [m] entre esses mesmos dois pontos consecutivos, dado pela equação: $d = \frac{v_1 + v_2}{2} \times (t_2 - t_1)$.

- C_R é o coeficiente de resistência de rolamento, adimensional. Na presente situação, tendo o ensaio sido realizado num piso de alcatrão, foi considerado que $C_R = 0.01221$; (19)
- ρ é a densidade do ar, de 1.226 kg/m^3 à temperatura de $15 \text{ }^\circ\text{C}$;
- v_{ar} é a velocidade do conjunto ciclista + bicicleta medida relativamente ao escoamento incidente (vento) através do tubo de *Pitot* [m/s];
- $C_D A$ é a *Drag Area* [m^2] do conjunto. Visto que o ciclista percorreu o trajeto inteiro em *Recreational Position*, através dos dados da Tabela 3. **Coefficiente de Resistência Aerodinâmica (C_D) e *Drag Area* ($C_D A$)**, vem o valor de $C_D A = 0.400 \text{ [m}^2\text{]}$;
- a é a aceleração instantânea do conjunto ciclista + bicicleta [m/s^2], dada pela equação $a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$.

Com isto, torna-se possível efetuar o cálculo, em cada instante, das várias componentes da força motriz acima mencionadas recorrendo à equação (3.6).

Assim, o gráfico representativo da evolução temporal das várias componentes da força total (motriz) foi elaborado com informações provenientes do sistema de aquisição de dados instalado na bicicleta.

De notar que os valores apresentados nos vários gráficos do Capítulo 4 partiram de um processo de filtragem relacionado com a resolução da medição de altitude do sistema de *GPS* que é igual a 1 metro, o que provocava um comportamento anómalo da evolução temporal do sinal pelo facto de os valores medidos variarem por patamares. Assim, concluiu-se que uma evolução temporal de 10 em 10 segundos dos sinais de altitude e velocidade seria a mais adequada. Desta forma, foi obtida uma reamostragem do sinal com uma taxa de aquisição mais baixa.

3.3.4. Ensaios de Desaceleração em Pista

Para eliminar qualquer tipo de influência do vento (de cauda, de frente ou lateral) a adulterar os tempos medidos para as várias desacelerações, o local escolhido para realizar este ensaio foi a pista coberta do Velódromo Nacional de Sangalhos. O Velódromo Nacional, que cumpre os requisitos funcionais exigidos pela *UCI*, possui nas suas instalações uma pista coberta de 250 metros de extensão, na qual foram realizados os ensaios de desaceleração.



Figura 3.10. – a) Pista coberta do Velódromo Nacional de Sangalhos; b) Ciclista durante o ensaio de desaceleração.

Foi necessário definir alguns parâmetros antes da realização destes ensaios de desaceleração, nomeadamente:

- A velocidade inicial a partir da qual o ciclista deixava de pedalar (passando a rolar em regime de roda livre) - $v_{inicial} = 45 \text{ km/h}$;
- A velocidade de corte a partir da qual se assume que a bicicleta parou – atendendo ao facto de que o dispositivo que registou as velocidades relativamente ao solo não mede velocidades abaixo de um certo valor, nunca chegando a registar valores de 0 km/h, surgiu a necessidade de definir uma velocidade de corte, que neste caso foi definida como sendo $v_{corte} = 5 \text{ km/h}$.

Com isto, o seguinte procedimento foi aplicado para as mesmas quatro posições que foram objeto de estudo nos ensaios realizados em túnel de vento: *Recreational*, *Upright*, *Aero* e *Dropped Position*. Assim, o ciclista partiu a uma velocidade inicial de 45 km/h, desacelerando em regime de roda livre até à velocidade de corte, sendo que os dados relativos à variação da velocidade ao longo do tempo foram registados pelo registador de dados de *GPS*.

Aplicando a 2ª Lei de *Newton* neste contexto de ensaios de desaceleração (realizados a declive nulo), vem a equação:

$$F_{Total} = F_{Aero} + F_{Rol}$$

$$\Leftrightarrow m \times a = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A + m \times g (K_0 + K_1 \times v^2) \quad (3.8)$$

Através do perfil de velocidades, exibido na Figura 3.12 - a), é possível calcular o valor da aceleração em cada instante, o que possibilita o cálculo da força total (real), exercida pela conjugação das forças de resistência ao rolamento e de resistência aerodinâmica, através do produto da massa pela aceleração em cada instante. Ao observar o segundo termo da equação (3.8) é possível perceber que a força total depende de um conjunto de constantes e da variável velocidade (relativamente ao solo). Fixando o valor de todas as constantes à exceção de K_0 , K_1 e $C_D A$, e recorrendo à função *Solver* do *Excel*, é possível estimar qual a conjugação de valores que estas três constantes podem assumir por forma a minimizar a diferença representada na Figura 3.11 por S^2 . Esta diferença resulta do somatório de todas as diferenças ao quadrado entre a força real e a força estimada em cada instante. Desta operação resulta a obtenção dos valores das constantes K_0 , K_1 e $C_D A$ que minimizam o

somatório das diferenças ao quadrado entre força real e força estimada, em cada instante. Como consequência da obtenção de novos valores para as três constantes já enunciadas, os valores da força estimada em cada instante também vão sofrer alterações com a aplicação da função *Solver*. Tal como é observável na Figura 3.12 - b), esta função permite que os dados obtidos para a força estimada sigam a tendência marcada pela dispersão definida pelos valores de força real instantânea, previamente obtidos com base nos valores de aceleração instantânea.

Ftotal ABS Calc [N]	Ftotal Estimado [N]	diferença^2	correlação	0,87337
27,65277778	34,59324577	48,17009594		
27,65277778	33,05348085	29,16759369	k0 :	0,00455
40,22222222	31,55352184	75,14636626	K1:	3E-05
32,68055556	29,44282177	10,48292009	Cd.A [m^2]	0,37332
30,16666667	27,78988964	5,649069042		
25,13888889	26,3134523	1,379599214	Peso [N]:	887
27,65277778	25,11927505	6,41863609		
25,13888889	23,84367661	1,677574839		
22,625	22,71858399	0,008757963		
12,56944444	21,73412795	83,99142371	ro [kg/m^3]	1,226
15,08333333	21,19872203	37,39797889		
25,13888889	20,56709108	20,90133518	S^2	1496,88
22,625	19,5406908	9,512963264		
22,625	18,64505785	15,83993949	C0	
22,625	17,77607184	23,51210428	C1	
17,59722222	16,93373276	0,440218266		
22,625	16,29700271	40,04354969		
7,541666667	15,50203595	63,36747914		
17,59722222	15,24296857	5,542510257		
15,08333333	14,64999212	0,187784605		

Figura 3.11. Estimativa das constantes K_0 , K_1 e $C_D A$ para um ensaio de desaceleração na posição de condução *Upright*

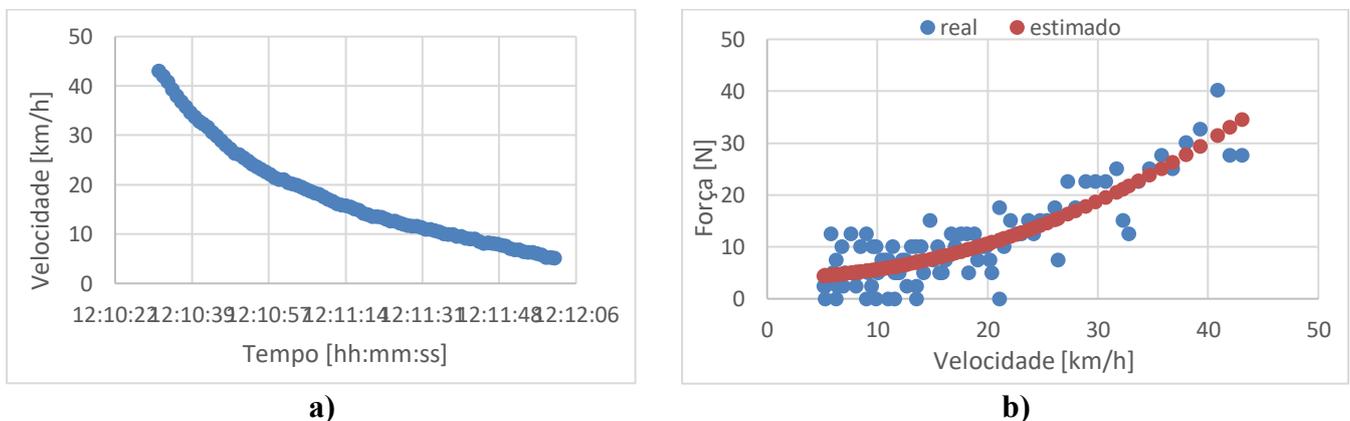


Figura 3.12. Análise a um Ensaio de Desaceleração realizado para a posição de condução *Upright*: a) Perfil de Velocidades; b) Força total aplicada ao conjunto ao longo do tempo (real e estimada)

Esta metodologia desenvolvida permite estimar o valor do produto $C_D A$ através de um ensaio de desaceleração, bem como o valor das constantes K_0 e K_1 , coeficientes de atrito estático e dinâmico (respetivamente), através dos quais é obtido o valor do coeficiente de resistência ao rolamento (C_R).

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. Ensaio em Túnel de Vento

4.1.1. Análise ao Efeito do Escoamento em torno do Conjunto Ciclista + Bicicleta

Numa primeira configuração ensaiada, o ciclista encontrava-se equipado com o capacete *Specialized Evade*.

Os valores registados para a força de resistência aerodinâmica (F_x) ao longo das três velocidades de escoamento incidente ensaiadas, e nas quatro posições de condução adotadas pelo ciclista, são apresentados no gráfico da Figura 4.1.

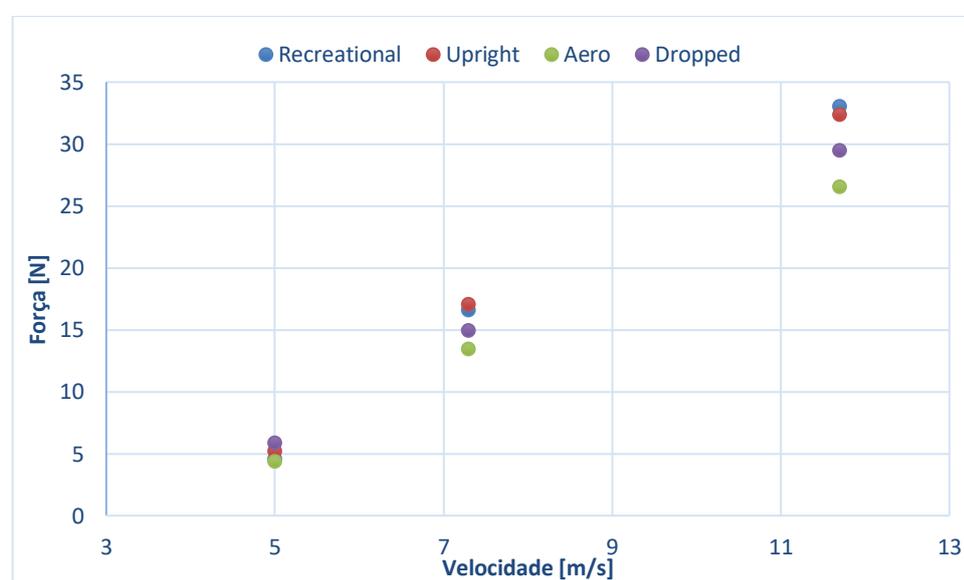


Figura 4.1. Evolução da força de resistência aerodinâmica segundo x com o aumento da velocidade de escoamento em torno do conjunto ciclista + bicicleta, na configuração em que o ciclista se encontra a usar o capacete *Specialized Evade*

Se para baixas velocidades do escoamento incidente os pontos correspondentes aos vários valores de força de resistência aerodinâmica exercida sobre o conjunto para diferentes posições do ciclista são praticamente coincidentes, para velocidades mais elevadas (como é o caso dos 11.7 m/s) torna-se mais fácil de distinguir as várias posições de condução adotadas pelo ciclista ao longo do ensaio. Isto deve-se, em parte, ao facto de as forças de resistência aerodinâmica aumentarem com o quadrado da velocidade do escoamento (ver equação (3.2)), pelo que as diferenças ao nível das forças de resistência aerodinâmica também vão ser mais notórias com o aumento da velocidade. De considerar também que, neste tipo de medições, a relação sinal-ruído é claramente mais desfavorável, fazendo com que os erros de carácter aleatório tenham um peso mais significativo nos resultados. Assim, para valores totais das forças relativamente baixos, o efeito do ruído torna-se mais relevante, o que justifica as diferenças praticamente inexistentes observadas entre os vários valores de força de resistência aerodinâmica para baixas velocidades no gráfico da Figura 4.1.

Comparando os vários valores de forças de resistência aerodinâmica registradas para as quatro diferentes posições de condução em análise, para uma velocidade constante de 11.7 m/s a *Aero Position* apresenta-se como sendo a mais aerodinâmica, exibindo assim o menor de todos os valores de força de resistência aerodinâmica registrados a essa velocidade. Segue-se a *Dropped Position* como sendo a segunda posição mais aerodinâmica de entre as quatro em estudo, para esta velocidade de 11.7 m/s. Por último, a *Recreational* e a *Upright Position* são as menos aerodinâmicas, sendo que a *Upright Position* apresenta um valor da força de resistência aerodinâmica inferior ao exibido pela *Recreational Position*.

Completando a equação (3.1) com os dados da Figura 4.1 e da Tabela 1 do Subcapítulo 3.1, foi possível calcular os valores do coeficiente de resistência aerodinâmica e do produto $C_D A$ para as várias posições, na configuração em que o ciclista equipa com o capacete *Specialized Evade*. Estes dados são apresentados de seguida na Tabela 3.

Posição de Condução	C_D	A_{ef} [m²]	<i>Drag Area</i> ($C_D.A_{ef}$)
<i>Recreational</i>	1.00	0.399	0.399
<i>Upright</i>	1.08	0.383	0.414
<i>Aero</i>	1.21	0.280	0.339
<i>Dropped</i>	1.35	0.295	0.398

Tabela 3. Coeficiente de Resistência Aerodinâmica (C_D) e *Drag Area* ($C_D.A$)

4.1.2. Comparativo de F_x entre as 4 Configurações Ensaçadas

Posição (A Pedalar) a $v = 11,7$ m/s	Specialized Evade [N]	Specialized Prevale [N]	Spiuk Zirion [N]	Sem Capacete [N]
<i>Recreational Position</i>	33.0	34.1	33.8	37.0
<i>Upright Position</i>	32.4	35.1	35.1	35.2
<i>Aero Position</i>	26.6	27.0	30.3	27.7
<i>Dropped Position</i>	29.5	30.5	30.2	30.5

Tabela 4. Força de Resistência Aerodinâmica registada, para as 4 diferentes configurações, à velocidade de 11.7 m/s

Observando os dados exibidos na Tabela 4, é notável que a configuração mais aerodinâmica de entre as quatro configurações testadas é a configuração em que o ciclista se apresenta equipado com o capacete *Specialized Evade*. Assim, para cada uma das posições ensaiadas, esta configuração exibiu sempre o menor valor de força de resistência aerodinâmica registada (F_x). Por observação visual da Figura 2.7, é possível observar que é este o capacete que apresenta uma maior suavidade na geometria do seu bordo de fuga, assemelhando-se mais à forma de uma gota, ao contrário do que acontece nos outros dois capacetes em que o bordo de fuga acaba a uma cota vertical superior e de forma mais *repentina* (como se estivessem a um ângulo de ataque superior). Assim, devido a este pormenor na geometria do capacete *Specialized Evade*, é expectável que a separação do escoamento que incide sobre este capacete ocorra mais tarde que nos restantes capacetes em análise e que este apresente uma região de escoamento separado de dimensões inferiores na sua esteira.

O facto de este capacete apresentar o menor número de entradas de ar ao longo da sua superfície também contribui para que este seja mais aerodinâmico que os restantes. Isto deve-se ao facto de estas entradas de ar serem usualmente responsáveis por um aumento da resistência aerodinâmica gerada em torno do capacete, dado que estas entradas de ar dão origem ao fenómeno de separação do escoamento localmente. De notar que um menor número de entradas de ar no capacete vai ter influência no conforto térmico e na ventilação da cabeça do ciclista. (23)

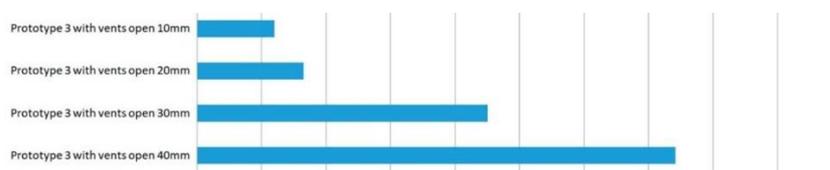


Figura 4.2. Comparativo da força de resistência aerodinâmica (relativa) gerada por capacetes com diferentes configurações ao nível das respetivas entradas de ar (24)

Por sua vez, a configuração que se mostrou como sendo a menos aerodinâmica de uma forma mais global foi a configuração em que o ciclista se apresenta sem capacete, visto que esta configuração foi a que se mostrou menos aerodinâmica em mais posições ensaiadas (Posições *Recreational* e *Upright*). Por último, a configuração menos aerodinâmica obtida

para a *Aero Position* foi com o capacete *Spiuk Zirion* e, para a *Dropped Position*, foi com o capacete *Specialized Prevale* que se obteve a configuração menos aerodinâmica de todas.

4.1.3. Análise Energética

Para um melhor entendimento da eficiência energética associada a uma posição de condução mais aerodinâmica, recorrendo às equações do Subcapítulo 3.2.3: *Análise Energética – Potência Mecânica Produzida*, e também aos dados de P_{Rol} provenientes do modelo de simulação numérica apresentado na Figura 3.5. Modelo usado para estimar a Potência de Rolamento [W], foi possível realizar uma análise energética às potências geradas pelas forças atuantes sobre o conjunto ciclista + bicicleta ao longo do tempo. Os resultados desta análise são apresentados de seguida na Tabela 5, para as várias velocidades de escoamento incidente.

V [m/s]	Posição	F_x [N]	P_{Aero} [W]	P_{Rol} [W]	P_{Total} [W]
5	Recreational	4.6	23.0	21.0	44.0
5	Upright	5.2	26.0	21.0	47.0
5	Aero	4.4	21.9	21.0	42.9
5	Dropped	5.9	29.4	21.0	50.4
7.3	Recreational	16.6	121.1	30.8	151.9
7.3	Upright	17.1	124.7	30.8	155.5
7.3	Aero	13.5	98.2	30.8	129.0
7.3	Dropped	14.9	109.0	30.8	139.8
11.7	Recreational	33.0	386.4	50.5	436.9
11.7	Upright	32.4	378.7	50.5	429.2
11.7	Aero	26.6	310.8	50.5	361.3
11.7	Dropped	29.5	345.3	50.5	395.8

Tabela 5. Potência total estimada a diferentes velocidades para diferentes posições do ciclista (configuração com o capacete *Specialzed Evade*)

Da análise desta tabela, observa-se que com o aumento da intensidade das forças de resistência aerodinâmica, a potência associada às mesmas (P_{Aero}) vai também aumentar, tendo um impacto significativo no valor da potência total.

Atendendo a que no presente ensaio, para uma mesma velocidade do escoamento incidente, a potência de rolamento é constante, as diferenças registadas entre potências totais de posição para posição, à mesma velocidade, devem-se às diferenças registadas nos valores de potência associada à força de resistência aerodinâmica.

À semelhança do que se verificou no âmbito da discussão de resultados da Figura 4.1, também aqui se verificou uma relação sinal-ruído mais desfavorável, favorecendo o peso relativo dos erros de carácter aleatório para menores velocidades de ensaio. Desta forma, a baixas velocidades observam-se diferenças mais reduzidas entre os valores de potência total apresentados para as quatro posições de condução.

Numa análise para a velocidade de 11.7 m/s e a declive nulo, observa-se que a posição para a qual o ciclista tem de produzir um menor *Mechanical Power Output* para manter o movimento a uma velocidade constante é a *Aero Position*, seguida da *Dropped Position*, *Upright* e *Recreational* (por esta ordem). Nestas condições, a redução obtida na potência

mecânica que o ciclista tem de produzir para manter o movimento, relativamente à *Recreational Position*, é a seguinte:

- 1.00 % de redução de *mechanical power output* na *Upright Position*;
- 17.30 % de redução de *mechanical power output* na *Aero Position*;
- 9.40 % de redução de *mechanical power output* na *Dropped Position*.

Conclui-se assim da análise da Tabela 5 que é maior a eficiência energética (do ponto de vista da potência mecânica produzida pelo ciclista) associada a posições cuja área frontal efetiva é inferior.

4.2. Ensaio de Estrada

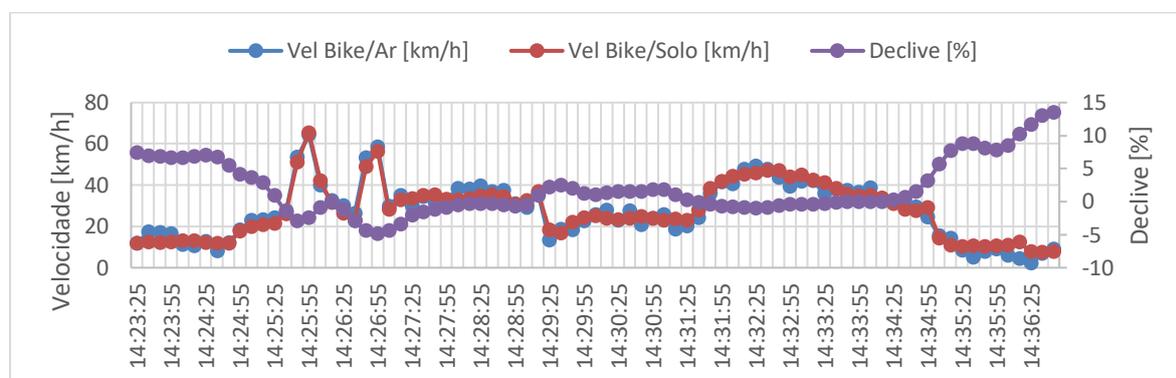


Figura 4.3. Evolução temporal das velocidades [km/h] do conjunto bicicleta + ciclista em relação ao solo e ao ar, e do declive do terreno [%] ao longo do tempo

Da análise da Figura 4.3 destaca-se a proximidade existente entre as curvas representativas da velocidade do conjunto ciclista + bicicleta relativamente ao solo (curva azul) e relativamente ao ar (curva vermelha). De facto, a correlação entre os dados representativos destas duas curvas é de 0.972987, o que indica que ao longo deste percurso a velocidade do vento assumiu valores em média muito baixos. Esta velocidade do vento é dada pela diferença entre as velocidades representadas na figura acima, sendo o seu valor médio de 2.63 km/h ao longo deste percurso. O valor mínimo de velocidade do vento foi de 0.06 km/h registado às 14:31:55, enquanto que o seu valor máximo registado foi de 8.00 km/h às 14:36:15, instante no qual é possível observar um espaçamento maior entre as duas curvas já referidas.

De notar ainda que, nos instantes associados a decréscimos do valor do declive (como é possível observar entre as 14:25:35 e as 14:25:45) se encontram associados aumentos de ambos os valores de velocidade representados nas curvas a azul e a vermelho. Por sua vez, quando o declive do terreno apresenta uma evolução crescente, ambas as velocidades referidas diminuem de valor, tal como acontece entre as 14:25:45 e as 14:26:15 e também como acontece no final do percurso, a partir das 14:34:55.

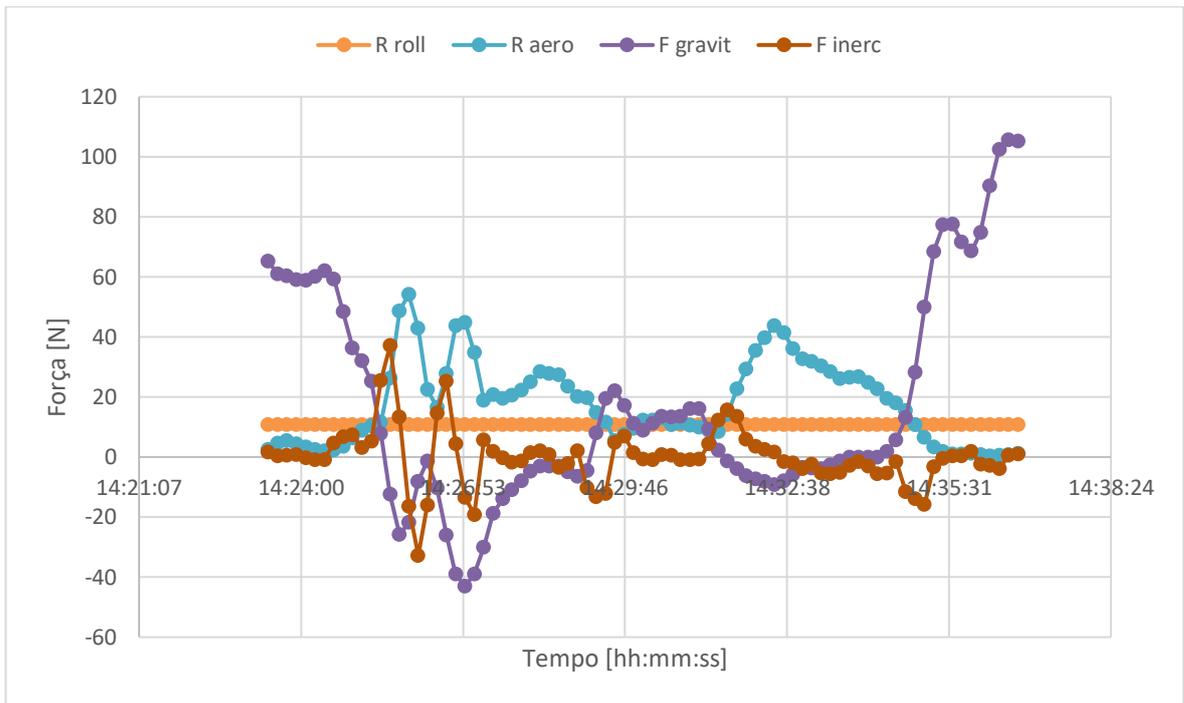


Figura 4.4. Evolução temporal das quatro componentes constituintes da força total ao longo do tempo

Na Figura 4.4 são representadas as evoluções temporais das quatro componentes constituintes da força total atuante sobre o conjunto ciclista + bicicleta ao longo do tempo de ensaio em estrada. Somando estas quatro componentes de força, obtém-se a Força Total produzida pelo ciclista ao longo do percurso, cuja evolução temporal é representada no gráfico da Figura 4.5.

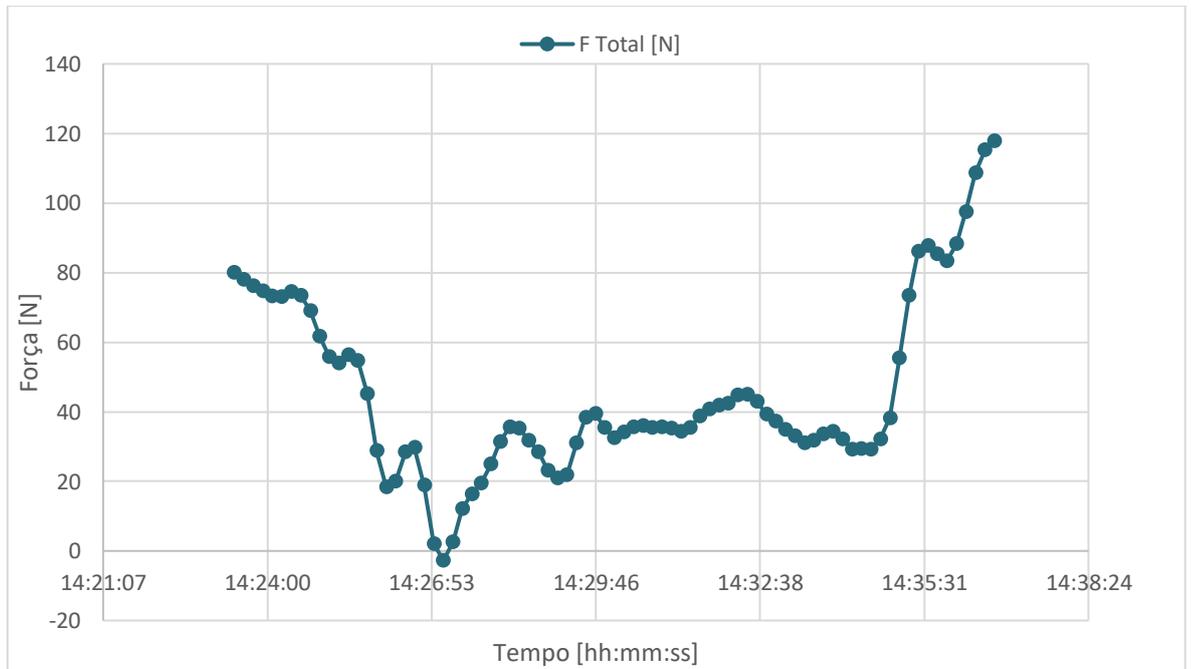


Figura 4.5. Evolução temporal da Força Total (motriz) produzida pelo ciclista ao longo do percurso

O nível médio desta força total é de 45.26 N, sendo este valor garantido maioritariamente pela soma das resistências aerodinâmica e de rolamento. Quanto às oscilações que ocorrem nesta curva, as mesmas devem-se maioritariamente às grandes variações que foram sendo registadas ao longo do percurso para as forças gravitacional e de inércia, o que resulta num desvio padrão da força total de 25.50 N.

Por último, é apresentada na Figura 4.6 a evolução temporal da potência requerida que o ciclista tem de produzir ao longo do tempo.

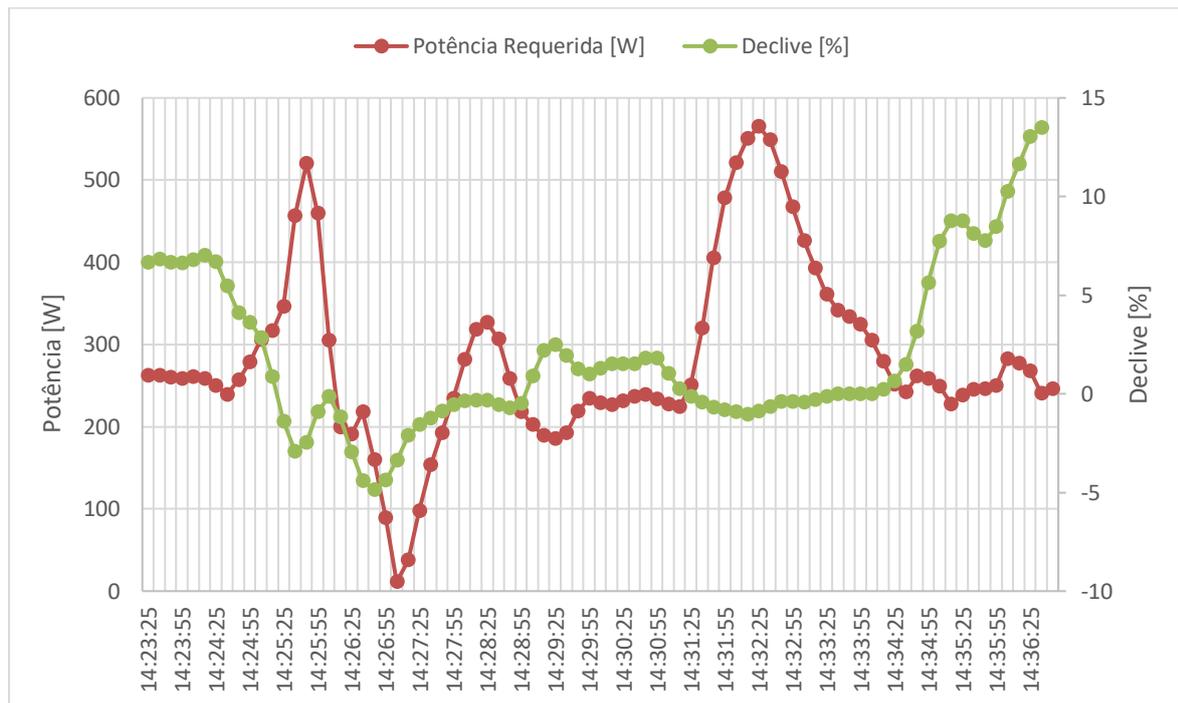


Figura 4.6. Evoluções temporais da potência mecânica produzida pelo ciclista e da força total calculada (força motriz)

Por integração desta potência em ordem ao tempo, é possível obter a evolução temporal da energia total consumida pelo ciclista ao longo do percurso, tal como é apresentado na Figura 4.7.

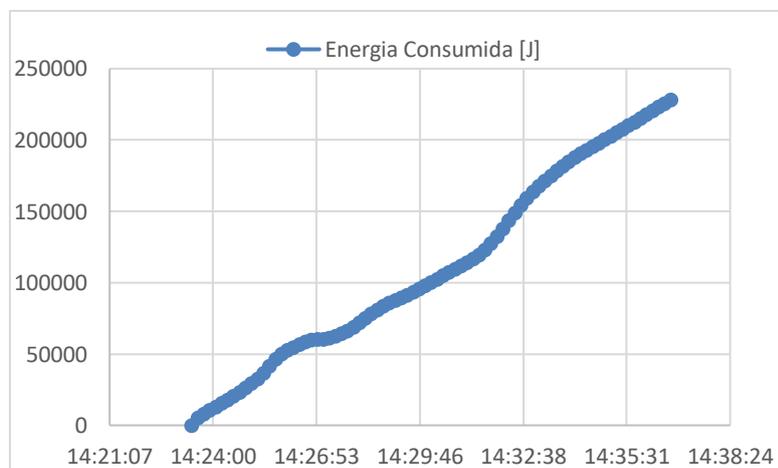


Figura 4.7. Energia total consumida pelo ciclista ao longo do trajeto

4.3. Ensaio de Desaceleração no Velódromo Nacional de Sangalhos

Realizado o pós-processamento do perfil de velocidades registado (evolução temporal da velocidade do conjunto ciclista + bicicleta relativamente ao solo), foram obtidos os seguintes dados relativos aos vários tempos de desaceleração obtidos em pista:

Posição	Instante Inicial	Instante Final	$\Delta t_{médio}$
<i>Recreational</i>	11:04:43	11:06:20	00:01:36
	11:09:07	11:10:42	
<i>Upright</i>	12:10:30	12:12:01	00:01:30
	12:13:28	12:14:56	
<i>Dropped</i>	12:16:41	12:18:25	00:01:46
	12:20:06	12:21:54	
<i>Aero</i>	11:18:30	11:20:18	00:01:50
	12:00:47	12:02:40	

Tabela 6. Resultados finais dos ensaios de desaceleração realizados no Velódromo Nacional

Observando os resultados apresentados na Tabela 6, numa primeira análise é possível perceber que para cada posição ensaiada foram realizados dois ensaios de desaceleração, entre os quais foi feita uma média aritmética que representa o tempo médio que o ciclista demorou a desacelerar desde a velocidade inicial de 45 km/h até à velocidade de corte de 5 km/h, em regime de roda livre. Por ordem decrescente de tempo, a posição a partir da qual demorou mais a desacelerar até à velocidade de corte foi a *Aero Position*, seguida da *Dropped*, *Recreational* e, por último, *Upright Position*.

De seguida, foi realizada uma análise à força total (estimada) exercida sobre o conjunto ciclista + bicicleta em cada instante, para cada uma das quatro posições de condução ensaiadas.

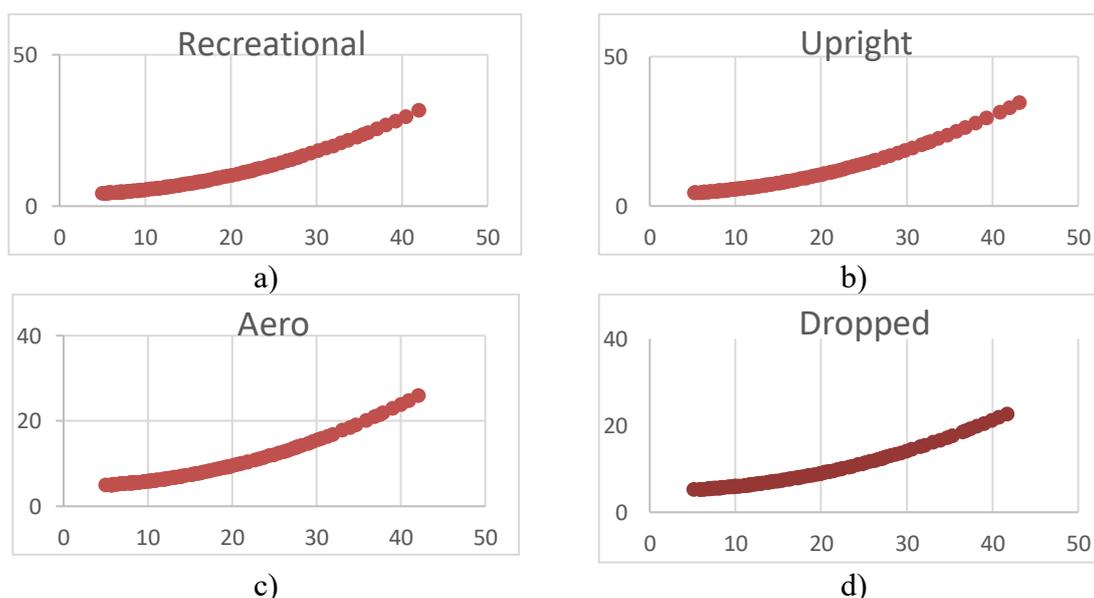


Figura 4.8. Evolução da força total estimada [N] ao longo das várias velocidades do conjunto relativamente ao solo [km/h], para a posição de condução: a) *Recreational*; b) *Upright*; c) *Aero*; d) *Dropped*.

No seguimento desta análise à força total estimada, foi desenvolvida uma metodologia para estimar o valor das constantes: produto C_{DA} , coeficiente de atrito estático (K_0) e dinâmico (K_1).

Posição de Condução	$C_{DA_{ef}}$ (túnel de vento)	$C_{DA_{ef}}$ (desaceleração)	Coefficiente de Correlação (R^2)
<i>Recreational</i>	0.400	0.399	0.87435
<i>Upright</i>	0.415	0.373	0.87337
<i>Aero</i>	0.338	0.258	0.72214
<i>Dropped</i>	0.397	0.214	0.68782

Tabela 7. Produto C_{DA} , calculado com base nos dados obtidos em túnel de vento e com base na metodologia usada para estimar o valor de C_{DA} através dos ensaios de desaceleração

Na Tabela 7, são apresentados na segunda coluna os valores já obtidos para o produto C_{DA} no Subcapítulo 4.1, relativo aos ensaios realizados em túnel de vento. Na terceira coluna são apresentados os valores estimados do produto C_{DA} através dos ensaios de desaceleração realizados em pista, e na terceira coluna é apresentado o valor da correlação obtida entre a força total (real) exercida sobre o conjunto e a força total estimada através da função *Solver*, como já foi referido no Subcapítulo 3.2. Assim, é possível observar que quanto melhor a aproximação do produto C_{DA} estimado no ensaio de desaceleração relativamente ao mesmo produto calculado nos ensaios em túnel de vento, melhor vai ser a correlação obtida entre os valores calculados (reais) e os valores estimados de força total.

Por último, apresentam-se na tabela seguinte os valores estimados para os coeficientes de atrito estático (K_0) e dinâmico (K_1), o resultante coeficiente de resistência ao rolamento estimado (C_R) e os valores teóricos existentes desse mesmo coeficiente para os pneus usados. (25)

Posição de Condução	K_0	K_1	C_R <i>experimental</i>	C_R <i>teórico</i> (6.9 bar)
<i>Recreational</i>	0.00440	0.000010	0.00403	0.00531
<i>Upright</i>	0.00455	0.000030	0.00479	
<i>Aero</i>	0.00528	0.000030	0.00551	
<i>Dropped</i>	0.00556	0.000029	0.00579	

Tabela 8. Coeficientes de Resistência ao Rolamento estimados e teóricos

5. CONCLUSÕES

5.1. Ensaio em Túnel de Vento

É possível observar uma correlação entre os menores valores de forças de resistência aerodinâmica registados e as menores áreas frontais efetivas obtidas. Assim, a *Aero Position*, que se apresentou como sendo a mais aerodinâmica à velocidade de 11.7 m/s, é a posição que apresenta uma menor área frontal efetiva na Tabela 1. Valores obtidos para as áreas frontais efetivas de cada posição de condução analisada. Por sua vez, a posição menos aerodinâmica (*Recreational Position*) foi a que exibiu um maior valor de área frontal efetiva. Esta correlação vai de encontro ao que é enunciado na equação (3.2).

Neste tipo de medições, a relação sinal-ruído é claramente mais desfavorável, fazendo com que os erros de caráter aleatório tenham um peso mais significativo nos resultados. Desta forma, para valores totais das forças relativamente baixos, o efeito do ruído torna-se mais relevante, o que justifica as diferenças praticamente inexistentes entre os vários valores de força de resistência aerodinâmica obtidos para baixas velocidades. No entanto, à medida que a velocidade de escoamento incidente aumenta, os valores registados de força de resistência aerodinâmica também se vão distanciar de posição para posição, a uma mesma velocidade. Isto deve-se ao facto de a força de resistência aerodinâmica variar com o quadrado da velocidade do escoamento incidente.

Os valores das forças registadas para F_y e F_z foram muito baixos, verificando-se inclusivamente alguma inconstância devido às oscilações introduzidas pelo próprio escoamento, o que conduziu a correlações muito fracas entre forças e velocidades de escoamento incidente segundo as componentes dos eixos Y e Z. No entanto, apenas seria expectável que as forças laterais (F_y) e verticais (F_z) fossem significativas se o ângulo de guinada (γ) fosse diferente de zero ao longo da duração do ensaio realizado.

As posições às quais se encontram associados menores valores de área frontal efetiva do conjunto, são também as posições que apresentam um menor valor da potência total que o ciclista tem de produzir para manter o movimento a uma certa velocidade.

Ao comparar a geometria das quatro configurações ensaiadas, é possível concluir que:

- A geometria do capacete que se revelou mais aerodinâmica é a que mais se assemelha à de um perfil alar fino, cujo bordo de ataque é arredondado e o bordo de fuga é pontiagudo (condição de *Kutta Joukowski*);
- Quanto menor o número de entradas de ar na superfície do capacete, melhor vai ser a aerodinâmica do mesmo.

Assim, um capacete com a forma descrita de perfil alar fino, e com um número de entradas de ar reduzido, vai permitir obter uma menor região de escoamento deslocado na esteira imediatamente a jusante do mesmo, visto que é retardada a transição da camada limite que se desenvolve ao longo da sua superfície, pelo que a força de resistência aerodinâmica exercida sobre o capacete vai ser menor nesta situação.

5.2. Ensaio de Estrada

A metodologia que se propôs ser desenvolvida foi implementada com sucesso, permitindo registrar dados considerados essenciais, maioritariamente na realização de ensaios em estrada, como é o caso da velocidade relativamente ao escoamento incidente. Assim, esta metodologia fornece informações complementares às que já antes eram passíveis de obter no âmbito da utilização de um registador de dados de *GPS*.

Destaque também para a capacidade de separar as várias componentes das forças atuantes sobre o conjunto ciclista + bicicleta em estudo, permitindo uma análise mais pormenorizada da contribuição de cada uma das forças que compõem a força total produzida pelo ciclista em cada instante.

No entanto, esta metodologia ainda carece de algumas melhorias relativamente às questões de qualidade metrológica dos resultados obtidos.

5.3. Ensaio de Pista

As posições para as quais se verificaram menores valores de área frontal efetiva na Tabela 1. Valores obtidos para as áreas frontais efetivas de cada posição de condução analisada, são também as posições para as quais foram obtidos maiores tempos de desaceleração até à velocidade de corte. Estes resultados vão também de encontro àquilo que já foi referido anteriormente no Subcapítulo 4.1 aquando da análise ao ensaio realizado em túnel de vento.

Foi possível verificar (na Tabela 7) que quanto melhor a aproximação entre os valores estimados para o produto $C_D A$ neste ensaio e os valores já apresentados para esse mesmo produto no Capítulo 4.1, mais forte é a correlação existente entre a força total real e a força total estimada. De notar que as correlações mais fracas foram obtidas para as posições de condução em que existe maior dificuldade por parte do ciclista em manter a posição inalterada ao longo de todo o ensaio (*Aero* e *Dropped Position*). Conclui-se assim que esta metodologia usada para estimar o produto $C_D A$ representa uma alternativa de baixo custo quando comparada com o método de ensaios em túnel de vento, sendo que o principal obstáculo num ensaio de desaceleração é a capacidade de o ciclista manter a sua posição de condução inalterada ao longo do tempo de ensaio, principalmente para as posições de condução *Aero* e *Dropped*.

Da análise dos resultados obtidos, conclui-se também que esta metodologia permite estimar o valor dos coeficientes de atrito estático e dinâmico (K_0 e K_1 , respetivamente), possibilitando assim o cálculo do valor do coeficiente de resistência ao rolamento (C_R).

6. Referências bibliográficas

1. Grappe F, Candau R, Belli A, Rouillon JD. Aerodynamic drag in field cycling with special reference to the obree's position. *Ergonomics*. 1997;40(12):1299–311.
2. Debraux P, Grappe F, Manolova A V., Bertucci W. Aerodynamic drag in cycling: Methods of assessment. *Sport Biomech*. 2011;10(3):197–218.
3. Vasco de Brederode, Luís da Cunha Eça. *Aerodinâmica Incompressível: Fundamentos*. 2014.
4. Ed P. *Aerodynamics of Bicycles Introduction* [Internet]. Available from: https://www.princeton.edu/~asmits/Bicycle_web/blunt.html
5. Hosoi AE. Drag kings: Characterizing large-scale flows in cycling aerodynamics. *J Fluid Mech*. 2014;748:1–4.
6. Crouch TN, Burton D, Brown NAT, Thompson MC, Sheridan J. Flow topology in the wake of a cyclist and its effect on aerodynamic drag. *J Fluid Mech*. 2014;748:5–35.
7. Belloli M, Giappino S, Robustelli F, Somaschini C. Drafting Effect in Cycling: Investigation by Wind Tunnel Tests. *Procedia Eng* [Internet]. 2016;147:38–43. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.186>
8. Barry N, Burton D, Sheridan J, Thompson M, Brown NAT. Aerodynamic drag interactions between cyclists in a team pursuit. *Sport Eng* [Internet]. 2015;18(2):93–103. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s12283-015-0172-8>
9. Chowdhury H, Alam F, Mainwaring D. A full scale bicycle aerodynamics testing methodology. *Procedia Eng* [Internet]. 2011;13:94–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.05.057>
10. Kyle CR, Weaver MD. Aerodynamics of human-powered vehicles. 218:141–54.
11. Vogt S, Schumacher YO, Roecker K, Dickhuth HH, Schoberer U, Schmid A, et al. Power output during the Tour de France. *Int J Sports Med*. 2007;28(9):756–61.
12. Vogt S, Heinrich L, Schumacher YO, Blum A, Roecker K, Dickhuth HH, et al. Power output during stage racing in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc*. 2006;38(1):147–51.
13. Fintelman DM, Sterling M, Hemida H, Li FX. The effect of time trial cycling position on physiological and aerodynamic variables. *J Sports Sci*.

- 2015;33(16):1730–7.
14. Besancë U De, Saint P. In τ uence of tyre pressure and vertical load on coefficient of Inform. 1999;1361–71.
 15. Sismeiro JL dos S. Estudo da Erosão, por acção o vento, de pilhas de armazenamento.
 16. Hoffman B. Six-Component Load Cell Design for Use in Force Measurement Platforms. 2013;
 17. Sensor Multiaxial MCS10 [Internet]. Available from: <https://www.hbm.com/pt/5626/sensor-multiaxial-mcs10/>
 18. NI-9237, Módulo da Série C de entrada de deformação/ponte [Internet]. Available from: <https://www.ni.com/pt-pt/support/model.ni-9237.html>
 19. Meyer D, Kloss G, Senner V. What is Slowing Me Down? Estimation of Rolling Resistances during Cycling. *Procedia Eng* [Internet]. 2016;147:526–31. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.232>
 20. Rohloff B, Greb P. Efficiency Measurements of Bicycle Transmissions - a neverending Story? [Internet]. Available from: <https://www.hupi.org/HParchive/PDF/hp55/hp55p11-15.pdf>
 21. Silva MG da. Apontamentos da Disciplina de Instrumentação e Medida. In Coimbra; 2010.
 22. No Title [Internet]. Available from: http://www.formula1-dictionary.net/pitot_tube.html
 23. Alam F, Chowdhury H, Wei HZ, Mustary I, Zimmer G. Aerodynamics of ribbed bicycle racing helmets. *Procedia Eng* [Internet]. 2014;72(2007):691–6. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.117>
 24. The Ultimate Aero Helmet is your Bald Head! [Internet]. Available from: <https://www.cyclingapps.net/blog/the-ultimate-aero-helmet-is-your-bald-head-who-knew/>
 25. Bierman J. Road Bike Tire Test: Vittoria Rubino Pro Control [Internet]. 2016. Available from: <https://www.bicyclerollingresistance.com/road-bike-reviews/vittoria-rubino-pro-control-2016#rr>