



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Mariana Guilherme Martins

**CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PARTICULADA EM
AMBIENTE URBANO**

**Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de
Especialização em Território e Gestão do Ambiente orientada pela
Professora Doutora Oxana Anatolievna Tchepele e apresentada ao
Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra.**

Fevereiro de 2020

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Mariana Guilherme Martins

CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PARTICULADA EM AMBIENTE URBANO

CHARACTERIZATION OF PARTICULATE MATTER IN AN URBAN ENVIRONMENT

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente,
orientada pelo Professor Doutor Oxana Anatolievna Tchepel.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Fevereiro de 2020



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Quero começar por agradecer à Professora Oxana Tchepel pela orientação, pelo apoio prestado e pelo conhecimento transmitido no desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço também À Previdência Portuguesa – Associação Mutualista de Coimbra, sem a qual não teria sido possível obter os resultados que adquiri, pela disponibilidade e por cederem o espaço para colocar o equipamento de medição na Rua da Sofia.

Um agradecimento especial à Noela, à Marta e ao João por me terem ajudado a fazer as contagens de tráfego. Foi um dia muito cansativo, mas a vossa companhia tornou tudo mais simples e divertido. Também quero agradecer pelo apoio e motivação, e por tirarem tempo para me ajudar com as minhas dúvidas. Quero agradecer particularmente à Noela por me explicar como trabalhar com o GRIMM e ao João fica também o agradecimento por todas as boleias e por me ajudar na instalação do GRIMM.

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação utilizou dados adquiridos no âmbito do Projeto ISY-AIR: Sistema integrado de avaliação e previsão da qualidade do ar à escala urbana (MIT-EXPL/IRA/0023/2017).

Muito obrigada a todos os meus amigos de Torres Novas, que me acompanham há muitos anos e que mesmo com a distância e o tempo que passa sem nos vermos continuam sempre de braços abertos para me acolher. Quero também deixar um profundo agradecimento a todos aqueles que conheci em Coimbra e que considero família, por me acompanharem ao longo desta aventura, por todos os momentos de diversão e apoio, e por estarem presentes nas alturas difíceis e também nas de maior alegria. Quero agradecer ao Marcel por ser sempre meu amigo e por, com o seu jeito peculiar, sempre me apoiar e ajudar da melhor forma que consegue.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer à minha família, tanto à de sangue como à de coração. Em especial ao meu irmão, Pedro, por todo o apoio, paciência, amizade e irmandade. Por me ajudar sempre em qualquer situação, por festejar sempre as minhas conquistas (mesmo quando pequenas), por me chamar à atenção quando mais preciso, por me ajudar a ver o lado bom de todas as situações, por me lembrar que a vida é curta e deve ser aproveitada, porque, na verdade, o que importa é ser feliz.

Quero deixar também um agradecimento muito especial à minha mãe e aos meus avós, a quem dedico esta dissertação, e que me acompanham sempre no meu coração. E que acredito que estão a ver o terminar desta etapa desde a sua casa de praia na terra que sempre amaram.

A todos muito obrigada!

RESUMO

Nas últimas décadas, as partículas atmosféricas têm sido alvo de diversos estudos, sendo consideradas como um dos principais poluentes com efeitos nocivos na saúde. A matéria particulada pode ser emitida através de fontes naturais e antropogénicas, o que influencia propriedades como a composição química e o tamanho das partículas. Os impactes provocados na saúde humana, nos materiais e no meio ambiente variam consoante as características das partículas e a concentração de partículas presentes na atmosfera.

O principal objetivo da presente dissertação, consiste na caracterização de partículas atmosféricas, em termos de distribuição por tamanho, concentração mássica e numérica, em ambiente urbano, influenciado diretamente por tráfego rodoviário. Para atingir este objetivo foi implementada uma campanha experimental de medição de partículas atmosféricas durante uma semana do mês de maio de 2019, utilizando um espectrómetro de aerossol portátil, GRIMM. Com o intuito de caracterizar a matéria particulada num ambiente urbano selecionou-se um local de medição, com influência direta de tráfego rodoviário, dentro de uma área classificada pela UNESCO como Património Mundial da Humanidade. Adicionalmente, realizou-se um levantamento de informação no mesmo local, num dos dias de campanha, para caracterizar a variação temporal e composição do tráfego rodoviário com o intuito de ajudar na interpretação dos dados obtidos na medição.

Os dados adquiridos com o espectrómetro de aerossol portátil permitiram obter a distribuição por tamanho das partículas atmosféricas, na gama entre 0,25 – 32 μm , em termos de número (partículas/l), massa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e área de superfície (mm^2/l), e obter a concentração mássica de PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ e PM_1 . Os dados obtidos permitiram realizar uma análise temporal e uma análise estatística e foram comparados com valores medidos nas estações de monitorização de qualidade do ar de Coimbra.

Com os dados adquiridos na campanha, verificou-se que a distribuição por tamanho é multimodal e que a concentração numérica é principalmente influenciada por partículas com diâmetros menores, sendo que estas não têm grande impacte na concentração mássica, que, por sua vez, é maioritariamente influenciada por partículas de maior diâmetro. Concluiu-se que, apesar do local de medição ter influência direta do tráfego, as condições meteorológicas têm maior impacte na variação temporal das concentrações de partículas na atmosfera. Também se concluiu que, em nenhum dia da campanha de medição, foram excedidos o valor-limite estabelecido na legislação atual para PM_{10} e o valor recomendado pela OMS para $\text{PM}_{2.5}$.

Palavras-chave: poluição do ar, medição de partículas atmosféricas, GRIMM, distribuição por tamanho

ABSTRACT

In recent decades, atmospheric particles have been the subject of several studies, being considered as one of the main pollutants with harmful effects on health. Particulate matter can be emitted through natural and anthropogenic sources, which influences properties such as chemical composition and particle size. The impacts on health vary depending on the characteristics of the particles and the concentration of particles present in the atmosphere.

The main objective of this work is to characterize atmospheric particles, in terms of size distribution, mass and numerical concentration, in an urban environment, directly influenced by road traffic. In order to achieve this goal, an experimental campaign to measure atmospheric particles was implemented during a week in May 2019, using a portable aerosol spectrometer, GRIMM. In order to characterize particulate matter in an urban environment, a measurement site was selected, with direct influence of road traffic, within an area classified by UNESCO as a World Heritage Site. Additionally, an information survey was carried out in the same location, on one of the campaign days, to characterize the temporal variation and composition of road traffic in order to help understand the data obtained with the measurement.

The data acquired with the portable aerosol spectrometer allowed to obtain the number (particle/l), mass ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) and surface area (mm^2/L) size distribution, in the range between 0,25 – 32 μm , as well as the mass concentration of PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ and PM_1 . The obtained data allowed to perform a temporal analysis and a statistical analysis and were compared with values measured at the air quality monitoring stations of Coimbra.

With the data acquired in the campaign, it was found that the distribution by size is multimodal. It was concluded that the numerical concentration is mainly influenced by particles with smaller diameters, which do not have a great impact on mass concentration, which is mainly influenced by particles of larger diameter. It was possible to conclude that, although the measurement location is directly influenced by road traffic, the meteorological conditions have a greater impact on the variation of atmospheric particle concentration. It was also concluded that, the limit value established in the current legislation for PM_{10} and the recommended value by WHO for $\text{PM}_{2.5}$, were not exceeded during the measurement campaign.

Keywords: air pollution, measurement of atmospheric particles, GRIMM, size distribution

ÍNDICE

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivo.....	3
1.2	Estrutura do trabalho.....	3
2	Revisão Bibliográfica.....	5
2.1	Partículas atmosféricas em suspensão	5
2.1.1	Caracterização do diâmetro de partículas	9
2.1.2	Distribuição de partículas por tamanho	10
2.2	Métodos de medição de partículas atmosféricas	15
2.3	Localização e classificação das Estações de Qualidade do Ar.....	20
3	Metodologia.....	24
3.1	Espectrômetro de Aerossol Portátil (GRIMM)	24
3.2	Caracterização da Área de Estudo	28
3.2.1	Local de Medição	31
3.2.2	Condições meteorológicas	32
3.2.3	Caracterização do tráfego rodoviário na Rua da Sofia	38
4	Resultados e discussão	42
4.1	Distribuição de partículas por tamanho	42
4.2	Concentrações da Matéria Particulada.....	45
4.2.1	Concentrações de PM ₁₀	45
4.2.2	Concentrações de PM _{2.5} e de PM ₁	51
4.3	Caracterização do tráfego rodoviário na Rua da Sofia	54
5	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	61
6	Referências Bibliográficas	63
	ANEXO.....	1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema genérico da distribuição por tamanho, principais modos, fontes de emissão, processos de formação e mecanismos de remoção de partículas atmosféricas (Adaptado de Seinfeld, 1986).....	5
Figura 2.2 – Regiões do sistema respiratório afetadas por partículas atmosféricas (adaptado de GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co. KG, 2009).....	6
Figura 2.3 – Representação da distribuição da concentração numérica das partículas (partícula/cm ³) pelo diâmetro (µm) das partículas (Adaptado de Seinfeld e Pandis, 2006)....	10
Figura 2.4 – Distribuição do número, área de superfície e volume em função do diâmetro da partícula (Seinfeld e Pandis, 2006).....	13
Figura 2.5 – Distribuição do número, área de superfície e volume expressa em função de logaritmo do diâmetro da partícula (Seinfeld e Pandis, 2006).....	14
Figura 2.6 - Esquema de um sistema de amostragem de grande volume (High Volume System - HVS) (adaptado de APA, 2010a).....	16
Figura 2.7 - Esquema do princípio de funcionamento de um Monitor de Atenuação Beta (Adaptado de Asbach, 2010).....	17
Figura 2.8 - Delimitação das Zonas e Aglomerações da Região Centro e respetivas estações de monitorização (CTCV e CCDRC, 2010).....	22
Figura 3.1 – Vista frontal (a), lateral esquerda (b) e traseira (c) do espectrómetro de aerossol, GRIMM (adaptado de GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016b).....	24
Figura 3.2 - Sistema de recolha da amostra de ar (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016b).....	25
Figura 3.3 – Representação esquemática da câmara de medição (adaptado de GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016b).....	26
Figura 3.4 - Janela "Overview" do GRIMM 1178 LabVIEW Software (adaptado de GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016a).....	27
Figura 3.5 – Localização da área de estudo na cidade de Coimbra.....	29
Figura 3.6 - Conjunto histórico e cultural “Universidade de Coimbra – Alta e Sofia” (UC, 2019).....	30
Figura 3.7 - Sentido das vias rodoviárias da área de estudo.....	31

Figura 3.8 - Variação temporal da temperatura do ar de 1 a 31 de maio de 2019 em Portugal continental (adaptado de IPMA, 2019), os dias das medições efetuadas neste trabalho estão identificados a sombreado.....	33
Figura 3.9 – Enquadramento das estações meteorológicas na cidade de Coimbra.....	34
Figura 3.10 - Perfil de temperatura (média horária) do período de estudo (27 – 31 de maio de 2019).....	35
Figura 3.11 - Rosa dos ventos da estação Estádio relativa ao período de estudo (27 – 31 de maio de 2019).....	36
Figura 3.12 - Perfil da velocidade (média horária) do vento durante o tempo de estudo (27 – 31 de maio de 2019).....	37
Figura 3.13 - Perfil da humidade relativa (média horária) durante o tempo de estudo (27 – 31 de maio de 2019).....	38
Figura 3.14 - Identificação do local onde se realizou a contagem de tráfego no dia 28 de maio de 2019.....	39
Figura 4.1 - Distribuição do número por tamanho das partículas, de cada dia do período de estudo (27 – 31 de maio de 2019).....	42
Figura 4.2 – Distribuição das partículas por tamanho, em termos de massa, de cada dia do período de estudo (27 – 31 de maio de 2019).....	43
Figura 4.3 – Distribuição por tamanho das partículas, em termos de área de superfície, de cada dia do período de estudo (27 – 31 de maio de 2019).....	45
Figura 4.4 - Concentração média horária ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de PM_{10} obtida com o aparelho de medição (GRIMM), durante o período de estudo.....	46
Figura 4.5 - Concentração de PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) obtida com o aparelho de medição (GRIMM), durante o período de estudo.	47
Figura 4.6 – Localização das estações de monitorização de qualidade do ar de Coimbra e do local de medição.....	48
Figura 4.7 – Concentração média horária ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de PM_{10} registada pelas estações de monitorização existentes em Coimbra e pelo aparelho de medição (GRIMM), durante o período de estudo.....	49
Figura 4.8 - Concentração de PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) registada pelas estações de monitorização existentes em Coimbra e pelo equipamento (GRIMM), durante o período de estudo.....	50

Figura 4.9 - Concentração média diária ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de PM_{10} dos valores registados no GRIMM e nas estações de monitorização de AFM e IGUC, e valor limite.....	51
Figura 4.10 - Concentração mássica ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de $\text{PM}_{2.5}$ e PM_1 registada pelo aparelho de medição (GRIMM), durante o período de estudo.....	52
Figura 4.11 - Concentração média horária de $\text{PM}_{2.5}$ e de PM_1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) obtida com o aparelho de medição (GRIMM), durante o período de estudo.....	53
Figura 4.12 – Concentração média diária ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de $\text{PM}_{2.5}$ e PM_1 dos valores registados no GRIMM, e valor recomendado pela Organização Mundial da Saúde para $\text{PM}_{2.5}$	54
Figura 4.13 - Número de veículos observados na Rua da Sofia por categoria, em cada hora de contagem, no dia 28 de maio de 2019.....	55
Figura 4.14 - Percentagem de veículos em circulação na Rua da Sofia por categoria, no dia 28 de maio de 2019.....	55
Figura 4.15 - Amostra considerada para análise da idade dos veículos em circulação na zona de estudo, por categoria, no dia 28 de maio de 2019.....	57
Figura 4.16 - Percentagem de veículos ligeiros de passageiros repartidos pelas diferentes classes.....	58
Figura 4.17 - Percentagem de veículos ligeiros de mercadorias repartidos pelas diferentes classes.....	58

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Classificação tecnológica de acordo com o primeiro ano de registo (adaptado de APA, 2019a).....	39
Quadro 3.2 – Redução dos níveis de emissão de PM tendo em conta a Norma Euro (adaptado de EEA, 2018b).....	40
Quadro 3.3 – Idade dos veículos, tendo em conta as letras de matrículas (adaptado de IMTT, 2019).....	40
Quadro 4.1 – Idade e número de veículos ligeiros de passageiros observados na Rua da Sofia, no dia 28 de maio de 2019, e em circulação em Portugal no ano de 2018 (adaptado de ACAP e AUTO INFORMA, 2018).....	58
Quadro 4.2 - Idade e número de veículos ligeiros de mercadorias observados na Rua da Sofia, no dia 28 de maio de 2019, e em circulação em Portugal no ano de 2018 (adaptado de ACAP e AUTO INFORMA, 2018).....	59

ABREVIATURAS

ACAP – Associação Automóvel de Portugal

APA – Agência Portuguesa da Ambiente

AUTO INFORMA – Comercialização de Estudos e Prestação de Serviços no Sector Automóvel

ARAN – Associação Nacional do Ramo Automóvel

CCDRC – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro

CCDR-N – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte

CMC – Câmara Municipal de Coimbra

CTCV – Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro

EEA – *European Environment Agency*

IMTT – Instituto de Mobilidade e dos Transportes Terrestres

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

OMS – Organização Mundial da Saúde

PM₁₀ – Partículas atmosféricas com diâmetro aerodinâmico inferior a 10 µm

PM_{2,5} – Partículas atmosféricas com diâmetro aerodinâmico inferior a 2.5 µm

PM₁ – Partículas atmosféricas com diâmetro aerodinâmico inferior a 1 µm

SIPA – Sistema de Informação para o Património Arquitetónico

UC – Universidade de Coimbra

USEPA – *United States Environmental Protection Agency*

WHO – *World Health Organization*

1 INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica é uma ameaça global que provoca impactos significativos na saúde humana, nos materiais e nos ecossistemas, podendo desencadear e agravar doenças respiratórias, provocar danos na vegetação, acidificar o solo e a água, contribuir para a redução de colheitas e danificar construções. É possível verificar que os poluentes atmosféricos podem ainda contribuir para as alterações climáticas, e estas, por sua vez, afetarão a qualidade do ar no futuro. Por estas razões, a poluição do ar é reconhecida como a uma das maiores preocupações ambientais. Como tal, as populações esperam que as autoridades competentes implementem medidas efetivas que tenham como objetivo a redução da poluição do ar e os seus efeitos. Neste contexto, é necessária uma maior compreensão dos processos que contribuem para esta problemática, ou seja, quais as suas causas, como os poluentes são transportados e transformados na atmosfera, como varia a composição química da atmosfera ao longo do tempo, e ainda quais os problemas que os poluentes instigam na população, ecossistemas, clima e na sociedade e economia (EEA, 2018a; EEA, 2013).

Os poluentes atmosféricos podem ser classificados como primários, correspondendo aos que são diretamente emitidos na atmosfera, e como secundários, que se formam na atmosfera através de reações entre poluentes precursores. Dependendo das suas fontes de emissão, ou das fontes de emissão dos seus precursores, a origem dos poluentes pode ser de ordem natural, antropogénica ou mista. Os impactos verificados na saúde provocados pela poluição atmosférica encontram-se associados ao tempo de exposição, podendo este ser de curto (horas ou dias) ou de longo prazo (meses ou anos). Consoante o poluente e o tempo de exposição, a Organização Mundial de Saúde define diretrizes para a proteção da saúde pública (EEA, 2018a).

Na Europa, a matéria particulada é considerada como um dos poluentes atmosféricos mais nocivos para a saúde pública, pois devido ao seu tamanho possui a capacidade de penetrar profundamente nos pulmões e passar para a corrente sanguínea. O impacto que este poluente tem na saúde humana e no ambiente, também depende da sua composição, visto que estas partículas podem ser constituídas por diversos componentes químicos (EEA, 2013).

O material particulado pode ser encontrado tanto em ambiente urbano como em ambiente rural, e caracteriza-se como sendo uma mistura complexa constituída por componentes que apresentam diversas características químicas e físicas (WHO, 2006a). As partículas atmosféricas variam em termos de tamanho, apresentando diâmetros na ordem de alguns nanómetros a centenas de micrómetros, dependendo da fonte de emissão, mecanismos de formação e das condições meteorológicas (Alam et al., 2011). Consoante o tamanho das

partículas atmosféricas estas têm capacidade de se depositar em diferentes locais do sistema respiratório, sendo que as partículas de menores dimensões apresentam mais facilidade em entrar nas regiões profundas do sistema respiratório, podendo até conseguir entrar na corrente sanguínea (Cardoso, 2016).

Face aos efeitos nocivos provocados pelas partículas atmosféricas, não só na saúde pública, mas também no meio ambiente e em edifícios e construções, é importante monitorizar os níveis de concentração de partículas em suspensão na atmosfera (EEA, 2013). Como tal, existem redes de monitorização de qualidade do ar que fornecem medições de concentrações de poluentes que, posteriormente, podem ser comparadas com os valores das diretrizes nacionais e internacionais (WHO, 1999). Os níveis de concentração de partículas atmosféricas têm sido, principalmente, medidos como concentração mássica de PM_{10} , levando a que as concentrações de $PM_{2.5}$ e de frações de tamanho menores sejam medidas em menor extensão. Apesar, de se prestar menos atenção a concentração de $PM_{2.5}$, este corresponde a um importante indicador de risco para a saúde humana, podendo até ser melhor indicador do que PM_{10} , uma vez que prevê melhor os efeitos na saúde humana (WHO, 2006a; WHO, 1999). No entanto, para além de concentração mássica, devem ser medidos outros parâmetros de matéria particulada, como por exemplo a composição química e a distribuição de partículas por tamanho (US EPA, 2004).

O tamanho e a distribuição das partículas por tamanho correspondem a propriedades físicas importantes que influenciam o transporte, a deposição e os efeitos das partículas atmosféricas na saúde e no meio ambiente (Pio et al., 2014). Desta forma, informação sobre a distribuição por tamanho da matéria particulada corresponde a um conhecimento importante em termos de preocupação com a saúde humana (Rovelli et al., 2017). Como os padrões de qualidade do ar se baseiam nas concentrações mássicas das partículas atmosféricas, estes podem não fornecer informação suficiente que permita tirar conclusões sobre a relação entre o número de partículas e os efeitos observados na saúde humana e no meio ambiente. Logo, é necessário medir a distribuição do número de partículas por tamanho de forma a ser possível entender melhor os efeitos provocados pelas partículas atmosféricas (Wu et al., 2008).

Em alguns estudos, onde se efetuaram medições das distribuições do número de partículas por tamanho, verificaram que os padrões diurnos eram fortemente afetados pela densidade de tráfego na área urbana, sendo que observaram aumentos significativos de concentração numérica de partículas atmosféricas durante as horas de ponta de tráfego. Portanto, em ambiente urbano, as emissões provenientes do tráfego rodoviário representam uma das fontes mais importantes de partículas atmosféricas (Wu et al., 2008).

1.1 Objetivo

O principal objetivo deste estudo consiste na caracterização da matéria particulada em ambiente urbano, em termos de distribuição por tamanho, concentração numérica e mássica, nomeadamente numa área inserida na cidade de Coimbra.

De forma a alcançar este objetivo, executaram-se as seguintes tarefas:

- Levantamento de estudos e informação que permitiram compreender a problemática do tema que se pretende abordar e de qual a metodologia adequada a aplicar;
- Planeamento e implementação da campanha experimental de medição. Procedeu-se à seleção do local de medição adequado para atingir o objetivo pretendido, ou seja, tendo em conta se este era influenciado diretamente pelo tráfego rodoviário. Decidiu-se quando se daria início à campanha de medição, e quanto tempo esta duraria, tendo em conta as condições meteorológicas;
- Tratamento dos dados necessários, como as concentrações de partículas presentes na atmosfera. E recolha e tratamento de outros dados, como as condições meteorológicas e volume de tráfego rodoviário;
- Análise e interpretação de todos os dados obtidos, através de avaliação da série temporal e das distribuições por tamanho obtidas em termos de número (partícula/l), massa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e área de superfície (mm^2/l). E análise da variação temporal e caracterização do tráfego rodoviário, bem como da variação de parâmetros meteorológicos, como a temperatura, velocidade e direção do vento e humidade relativa;
- Por fim, comparou-se os dados obtidos com os valores medidos nas estações de monitorização da qualidade do ar de Coimbra no mesmo período de tempo da campanha experimental de medição, e com os valores estipulados na legislação atual e os valores recomendados pela OMS.

1.2 Estrutura do trabalho

O trabalho está repartido em cinco capítulos, incluindo a presente introdução.

No capítulo dois efetua-se uma revisão da literatura existente de forma a enquadrar o tema que se vai abordar. Em primeiro lugar, apresenta-se o conceito de matéria particulada, bem como as classificações utilizadas para descrever as partículas atmosféricas, que, por sua vez, podem depender do método de medição utilizado, do local de deposição das partículas no sistema respiratório e dos processos de formação das partículas. De seguida, são identificadas as fontes de emissão de partículas atmosféricas e faz-se uma descrição dos diferentes métodos que podem ser utilizados na medição de matéria particulada.

No capítulo três, descreve-se a metodologia aplicada no decorrer deste trabalho. Apresentando-se o equipamento de medição utilizado, a caracterização da área de estudo e os procedimentos utilizados para obter os resultados de concentrações de matéria particulada.

No capítulo quatro são apresentados os resultados obtidos através da metodologia aplicada, bem como a interpretação e discussão dos mesmos.

Por fim, no último capítulo apresentam-se as conclusões obtidas neste trabalho e ainda algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo efetua-se uma revisão da literatura existente de forma a enquadrar o tema que se vai abordar. Em primeiro lugar, apresenta-se o conceito de matéria particulada e as classificações (consoante o tamanho) utilizadas normalmente para definir as partículas atmosféricas. De seguida, faz-se uma breve identificação das fontes de emissão das partículas atmosféricas, bem como uma descrição dos diferentes métodos de medição que podem ser aplicados.

2.1 Partículas atmosféricas em suspensão

A matéria particulada, geralmente, é definida como um poluente atmosférico constituído por uma complexa mistura de partículas sólidas e líquidas suspensas no ar, que diferem consoante o seu tamanho, composição e origem (Alam et al., 2011; Davidson et al., 2005; WHO, 2006b). Os componentes que constituem esta complexa mistura, que pode ser encontrada tanto em ambiente urbano como em rural, possuem diversas características químicas e físicas que determinam o comportamento das partículas na atmosfera, bem como os efeitos provocados no ambiente e na saúde humana. (Pio et al., 2014; WHO, 2006a). Frequentemente, as partículas atmosféricas são classificadas de acordo com as suas propriedades aerodinâmicas, uma vez que estas influenciam os processos de transporte e de remoção das partículas na atmosfera, e também afetam a deposição das mesmas no sistema respiratório (WHO, 2003).

Para descrever a matéria particulada utilizam-se diferentes classificações, algumas das quais são definidas de acordo com os métodos analíticos de medição utilizados. Outras estão relacionadas com o impacto das partículas atmosféricas na saúde humana, nomeadamente o local de deposição das partículas no sistema respiratório. Existem, ainda, classificações associadas aos processos de formação das partículas (WHO, 2003).

Na Figura 2.1, encontra-se representado o perfil multimodal de distribuição por tamanho proposto por Whitby e Cantrell (1976), citados por Seinfeld e Pandis (2006), no qual se pode visualizar os principais modos existentes, fontes de emissão, processos de formação e mecanismos de remoção associados ao tamanho das partículas atmosféricas.

De acordo com Seinfeld e Pandis (2006), as partículas atmosféricas podem ser classificadas com base no tamanho e nos processos de formação, da seguinte forma: modo de nucleação ($< 0,01 \mu\text{m}$), modo de Aitken ($0,01 - 0,1 \mu\text{m}$), modo de acumulação ($0,1 - 2,5 \mu\text{m}$) e modo grosseiro ($> 2,5 \mu\text{m}$). Sendo que os três primeiros modos constituem a fração fina das partículas atmosféricas.

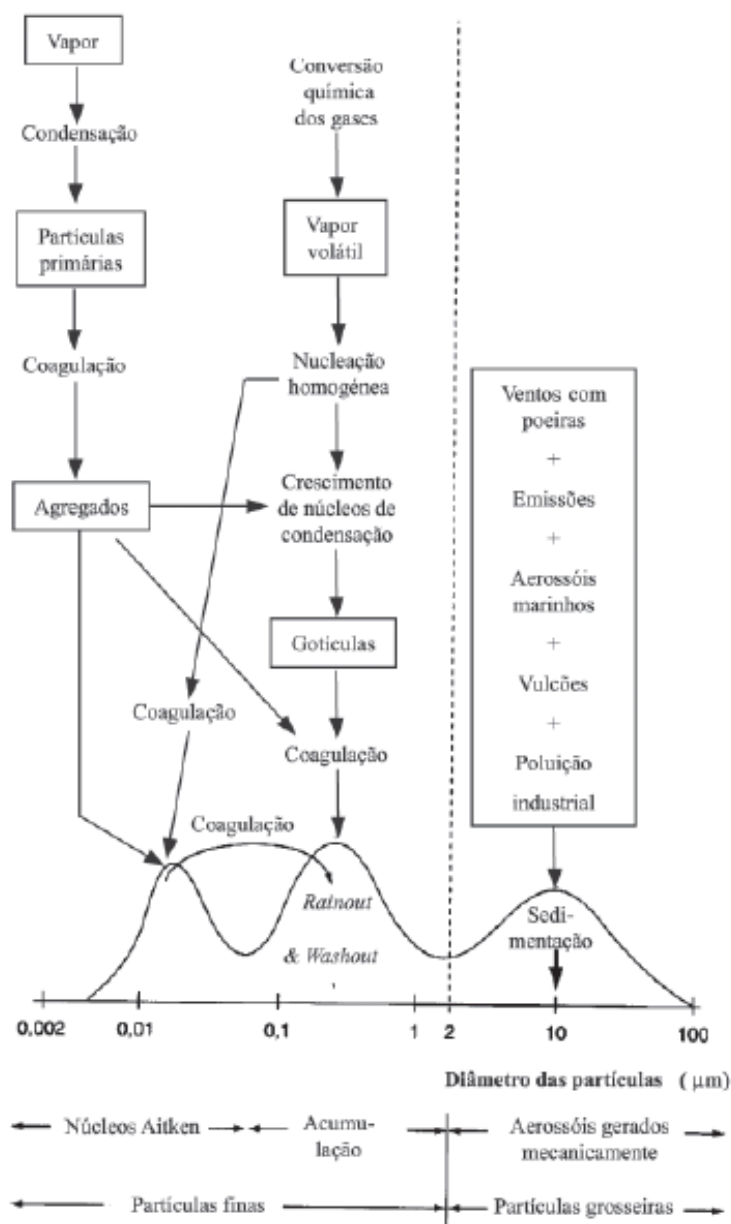


Figura 2.1 – Esquema genérico da distribuição por tamanho, principais modos, fontes de emissão, processos de formação e mecanismos de remoção de partículas atmosféricas (Adaptado de Seinfeld, 1986).

Por outro lado, a classificação relacionada com o local de deposição das partículas no sistema respiratório, representado da Figura 2.2, categoriza as partículas atmosféricas como:

- i. Inaláveis – correspondem às partículas que entram no trato respiratório, alcançando apenas as vias aéreas superiores;
- ii. Torácicas – são as partículas que conseguem passar para além da laringe, alcançando os pulmões e as regiões de troca gasosa do pulmão;

- iii. Respiráveis – são as que têm maior probabilidade de atingir e de se depositarem na região de troca gasosa do pulmão, nomeadamente os alvéolos pulmonares (US EPA, 2004);

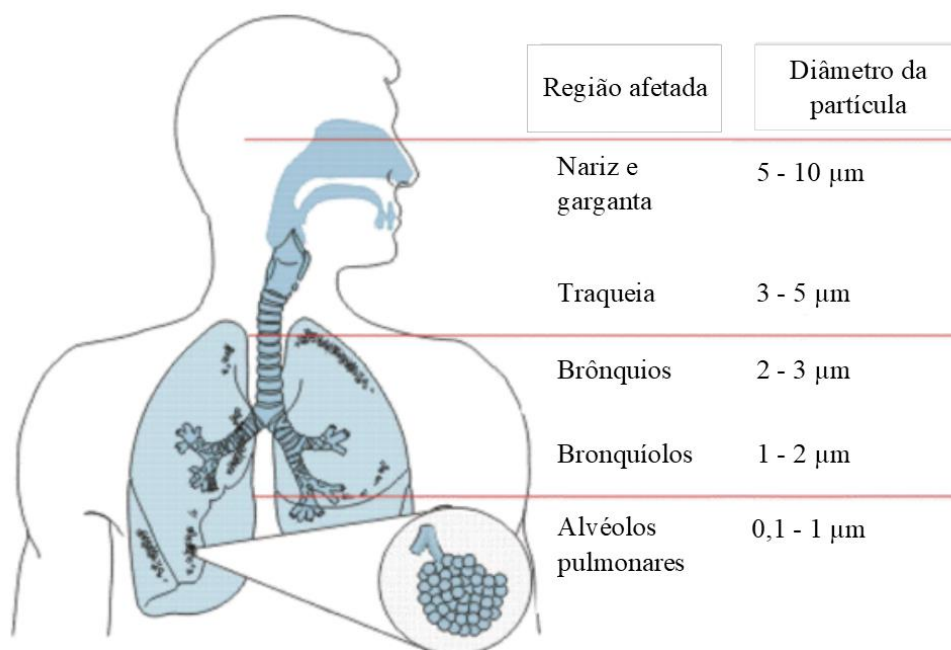


Figura 2.2 – Regiões do sistema respiratório afetadas por partículas atmosféricas (adaptado de GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co. KG, 2009).

De acordo com o Decreto-Lei n.º 47/2017 de 10 de maio, as PM_{10} podem ser definidas como “as partículas em suspensão suscetíveis de passar através de uma tomada de ar seletiva, tal como definido no método de referência para a amostragem e medição de PM_{10} , norma EN 12341, com uma eficiência de corte de 50 % para um diâmetro aerodinâmico de 10 µm”.

Semelhante às PM_{10} , as $PM_{2.5}$ são definidas como “partículas em suspensão suscetíveis de passar através de uma tomada de ar seletiva, tal como definido no método de referência para a amostragem e medição de $PM_{2.5}$, norma EN 12341:2014, com uma eficiência de corte de 50 % para um diâmetro aerodinâmico de 2,5 µm” (DL-47/2017, 10 de maio). Estes termos são definidos de acordo com os métodos analíticos de medição utilizados, e baseiam-se no diâmetro de corte de 50% do aparelho de amostragem específico (US EPA, 2004).

Adicionalmente, consoante o tamanho, também é habitual repartir as partículas pelas seguintes categorias: partículas totais em suspensão (TSP), no qual estão incluídas todas as partículas suspensas no ar; PM₁₀, abrange todas as partículas com diâmetro inferior a 10 µm; PM_{2.5} (fração fina), abrange todas as partículas com diâmetro inferior a 2,5 µm; fração grosseira, na qual estão incluídas as partículas cujo diâmetro se encontra entre 2,5 - 10 µm; ultrafinas, referem-se às partículas que possuem diâmetro inferior a 0,1 µm (WHO, 2006b).

As partículas atmosféricas também podem ser classificadas como primárias ou secundárias. Sendo definidas como partículas primárias as que são diretamente emitidas para a atmosfera, enquanto que as partículas secundárias são formadas na atmosfera através de reações químicas entre gases precursores, como óxidos de enxofre, óxidos de azoto, amoníaco e compostos orgânicos voláteis (WHO, 2013). Os processos de formação das partículas secundárias acabam por depender das concentrações dos gases precursores referidos, das condições atmosféricas, como a radiação solar, bem como das interações entre gases precursores e as partículas pré-existent na atmosfera (US EPA, 2004).

As partículas atmosféricas e os gases precursores podem ser emitidos através de fontes antropogénicas ou de fontes naturais (WHO, 2013). As partículas grosseiras são geradas através de processos mecânicos e consistem em partículas provenientes tanto de fontes naturais como de fontes antropogénicas (Seinfeld, 1986). Nomeadamente, atividades industriais associadas ao setor da construção, da produção de cimento, de cerâmica e extração de minerais, fogos florestais, erupções vulcânicas, erosão do pavimento de vias rodoviárias e desgaste de travões e pneus de veículos resultante do tráfego rodoviário, ressuspensão de partículas presentes no solo, material biológico (ex: grãos de pólen), “spray marinho”, e processos de combustão (ex: cinzas e fuligem) (US EPA, 2004; WHO, 2006a; WHO, 2013). As partículas que constituem a fração grosseira tendem a depositar-se rapidamente da atmosfera, permanecendo em suspensão durante apenas de minutos a horas, e normalmente percorrem pequenas distâncias (US EPA, 2004; Wilson e Suh, 1997). As partículas finas resultam de processos de combustão (motores de veículos, produção de energia em habitações e indústrias) (EEA, 2018a; WHO, 2013), e podem ser transportadas ao longo de milhares de quilómetros e permanecer na atmosfera durante vários dias, até semanas (US EPA, 2004; Wilson e Suh, 1997).

Os processos de combustão estacionária e móvel constituem a principal fonte de emissão de muitos poluentes primários, incluindo as partículas atmosféricas. Na Europa, a emissão de poluentes atmosféricos resulta dos transportes rodoviários e não-rodoviários (como por exemplo, o transporte aéreo, ferroviário e marítimo), de processos de combustão relacionados com o sector comercial e residencial, da produção e distribuição de energia, da indústria e da agricultura e resíduos (incluindo os aterros, incineração de resíduos com recuperação de calor e queima aberta de resíduos) (EEA, 2018a).

A exposição humana às partículas atmosféricas, seja de curto ou longo prazo, origina efeitos adversos na saúde, principalmente, nos sistemas respiratório e cardiovascular (Fuzzi et al., 2015). Segundo a OMS (2006a), não foi demonstrado um limite de concentração de matéria particulada abaixo do qual não se observem efeitos adversos na saúde da população. Como tal, os países são encorajados a cumprirem um conjunto de padrões de qualidade do ar cada vez mais rigorosos, acompanhando esse progresso através da redução de emissões e de concentrações de matéria particulada.

Na Europa, face aos efeitos adversos observados na saúde pública, a OMS definiu diretrizes de curto (24 horas) e longo (anual) prazo relativamente às concentrações de PM_{10} e $PM_{2.5}$ que devem ser observadas na atmosfera (WHO, 2006a).

Em Portugal, a Diretiva 2008/50/CE, de 21 de maio, foi transposta para a legislação nacional pelo Decreto-Lei nº 102/2010, de 23 de setembro, que foi recentemente alterado pelo Decreto-Lei nº 47/2017, de 10 de maio, e estabelece o regime de avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente, tendo em conta as orientações da Organização Mundial da Saúde. Como tal, no Decreto-Lei nº 102/2010, de 23 de setembro, encontram-se estabelecidos valores-limite, que correspondem a “um nível fixado com base em conhecimentos científicos com o intuito de evitar, prevenir ou reduzir os efeitos nocivos na saúde humana e ou no ambiente, a atingir num prazo determinado e que, quando atingido não deve ser excedido”. No Quadro A1 do anexo estão apresentados os valores-limite definidos no Decreto-Lei nº 102/2010, de 23 de setembro.

2.1.1 Caracterização do diâmetro de partículas

O tamanho é considerado como uma das propriedades mais importantes que determina o comportamento das partículas na atmosfera. Assim, partículas atmosféricas com diferentes tamanhos assumem diferentes comportamentos. Por exemplo, partículas com tamanho ligeiramente superior a moléculas de gás são governadas pelo movimento Browniano, enquanto que partículas maiores, na ordem de alguns micrómetros, são afetadas principalmente pela força gravitacional (Kulkarni et al., 2011).

O diâmetro é a medida mais utilizada para definir o tamanho de partículas esféricas, enquanto que para partículas não esféricas, como por exemplo fibras e aglomerados, é mais difícil definir uma dimensão universal de tamanho. Assim, para estas partículas existem várias definições de tamanho e forma dependendo da técnica de medição aplicada (Kulkarni et al., 2011).

Normalmente, aplica-se o conceito de “diâmetro equivalente” quando se pretende atribuir um determinado tamanho a uma partícula quando esta representa uma determinada propriedade ou um determinado comportamento de interesse num dado sistema. Ou seja, o diâmetro equivalente corresponde ao diâmetro de uma esfera com o mesmo valor relativamente a uma

determinada propriedade física que a partícula em estudo. Assim, o diâmetro aerodinâmico equivalente de uma partícula corresponde ao diâmetro de uma esfera de densidade unitária (1g/cm^3) que apresenta a mesma velocidade de deposição que a partícula em estudo. Regularmente, utiliza-se o conceito de diâmetro aerodinâmico para descrever o comportamento das partículas no sistema respiratório (Kulkarni et al., 2011).

Como referido anteriormente, de forma a ser possível descrever partículas que apresentam vazios internos, ou formas e estruturas mais complexas, também se definiram diâmetros equivalentes que se baseiam na massa, volume e área de superfície das partículas. Por exemplo, o “diâmetro de volume equivalente” define-se como sendo o diâmetro de uma partícula esférica que tem o mesmo volume que a partícula em estudo. Outro exemplo, é o “diâmetro de Stokes”, sendo que este corresponde ao diâmetro de uma partícula esférica que possui a mesma densidade e velocidade de deposição que a partícula em estudo (Kulkarni et al., 2011).

O diâmetro ótico define-se como o diâmetro de uma partícula que tenha a mesma resposta num instrumento de detecção de partículas através da sua interação com luz, ou seja, corresponde ao diâmetro de uma partícula cujo índice de refração é igual ao da partícula utilizada para calibrar o contador de partículas ótico (U.S. Environmental Protection Agency, 2004; Kulkarni et al., 2011). Como referido anteriormente, dependendo do tipo de técnica de medição utilizado consideram-se diferentes definições de tamanho de partículas (Kulkarni et al., 2011).

2.1.2 Distribuição de partículas por tamanho

A distribuição de partículas por tamanhos é considerada uma das características mais importantes de um aerossol atmosférico, uma vez que corresponde à distribuição de uma propriedade específica do aerossol sobre uma gama de tamanho (Kulkarni et al., 2011). Ou seja, uma distribuição por tamanho corresponde a uma representação clara de como as partículas atmosféricas são distribuídas pelos vários intervalos de tamanho, consoante a propriedade do aerossol que se pretende analisar (Hinds, 1982).

Segundo Kulkarni et al. (2011), para apresentar a distribuição por tamanhos é necessário repartir a gama de tamanhos, que se quer considerar, em vários intervalos sucessivos, e de seguida determinar qual o número (massa, área de superfície ou volume) das partículas em cada intervalo de tamanho. O limite superior de cada intervalo coincide com o limite inferior do intervalo seguinte. Desta forma, as partículas são agrupadas em intervalos de tamanho discretos e contíguos, tornando possível a representação gráfica da sua distribuição por tamanhos, onde se representa a propriedade de interesse no eixo das ordenadas e o tamanho (diâmetro) no eixo das abcissas (Hinds, 1982; Kulkarni et al., 2011). A representação gráfica desta distribuição pode ser feita através de histogramas, onde a largura de cada retângulo corresponde a cada

intervalo de tamanho e a altura representa a concentração numérica de partículas existentes em cada intervalo (Hinds, 1982; Seinfeld e Pandis, 2006), como se pode observar na Figura 2.3.

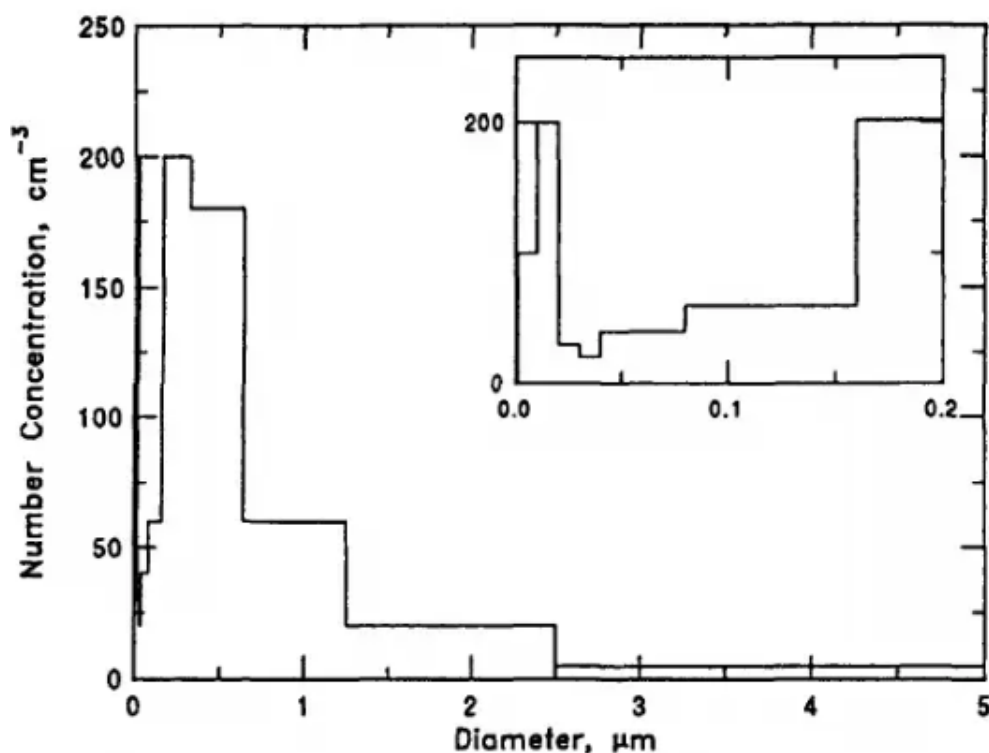


Figura 2.3 – Representação da distribuição da concentração numérica das partículas (partícula/cm³) pelo diâmetro (µm) das partículas (Adaptado de Seinfeld e Pandis, 2006).

Observando a Figura 2.3, verifica-se que ao se representar toda a gama de tamanhos de interesse, não é possível observar determinados detalhes da distribuição por tamanho, nomeadamente a distribuição relativa a diâmetros inferiores a 0,2 µm. Como tal, para se conseguir observar esta fração de tamanho (0,001 – 0,2 µm) é necessário ampliá-la, como se pode observar na Figura 2.3.

Verifica-se também que a concentração numérica presente em cada intervalo de tamanho depende do respetivo intervalo, e torna-se necessário normalizar o histograma para remover essa dependência. Assim, divide-se a concentração numérica de partículas presentes em cada intervalo pela largura do mesmo. Desta forma, a concentração numérica de partículas passa a ser expressa por µm⁻¹ cm⁻³. A distribuição muda de forma, mas agora a área abaixo da curva é proporcional à concentração numérica, cm⁻³ (Hinds, 1982; Seinfeld e Pandis, 2006).

Portanto, como se pode verificar, a caracterização das partículas atmosféricas efetua-se através da sua distribuição por intervalos de tamanho específicos, consoante o seu diâmetro, sendo que a concentração de partículas associada a cada intervalo de tamanho pode ser expressa relativamente ao número, massa, área de superfície ou volume (Seinfeld, 1986). Segundo Seinfeld e Pandis (2006), é possível definir a distribuição do número (n_N), da área de superfície (n_S) e do volume (n_V), como:

$$n_N(D_p)dD_p \quad (1)$$

$$n_S(D_p)dD_p \quad (2)$$

$$n_V(D_p)dD_p \quad (3)$$

Que corresponde ao número, à área de superfície e ao volume de partículas por cm^3 de ar com diâmetros no intervalo de D_p a $(D_p + dD_p)$. Cada partícula tem uma área de superfície de πD_p^2 , assim, a distribuição da área de superfície pode ser calculada, através de:

$$n_S(D_p) = \pi D_p^2 n_N(D_p) \quad (\mu\text{m}^2 \mu\text{m}^{-1} \text{cm}^{-3}) \quad (4)$$

E a distribuição de volume pode ser determinada através de:

$$n_V(D_p) = \frac{\pi}{6} D_p^3 n_N(D_p) \quad (\mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-1} \text{cm}^{-3}) \quad (5)$$

Considerando que todas as partículas possuem densidade, ρ_p (g cm^{-3}), então a distribuição da massa das partículas em relação ao seu tamanho, $n_M(D_p)$, é:

$$n_M(D_p) = \left(\frac{\rho_p}{10^6}\right) \left(\frac{\pi}{6}\right) D_p^3 n_N(D_p) = \frac{\rho_p}{10^6} n_V(D_p) \quad (\mu\text{g} \mu\text{m}^{-1} \text{cm}^{-3}) \quad (6)$$

Onde se utiliza o fator 10^6 para se converter as unidades da densidade, ρ_p , de g cm^{-3} para $\mu\text{g} \mu\text{m}^{-3}$, para manter as unidades de $n_M(D_p)$ como $\mu\text{g} \mu\text{m}^{-1} \text{cm}^{-3}$. A utilização direta das funções de distribuição, $n_N(D_p)$, $n_S(D_p)$, $n_V(D_p)$ e $n_M(D_p)$, não é considerada prática, uma vez que o diâmetro das partículas varia ao longo de diferentes ordens de magnitude, como se pode observar na Figura 2.4. Para evitar este problema de escala, o logaritmo do diâmetro normalmente é representado no eixo das abcissas, de forma a que diversas ordens de grandeza do diâmetro possam ser vistas claramente (Seinfeld e Pandis, 2006).

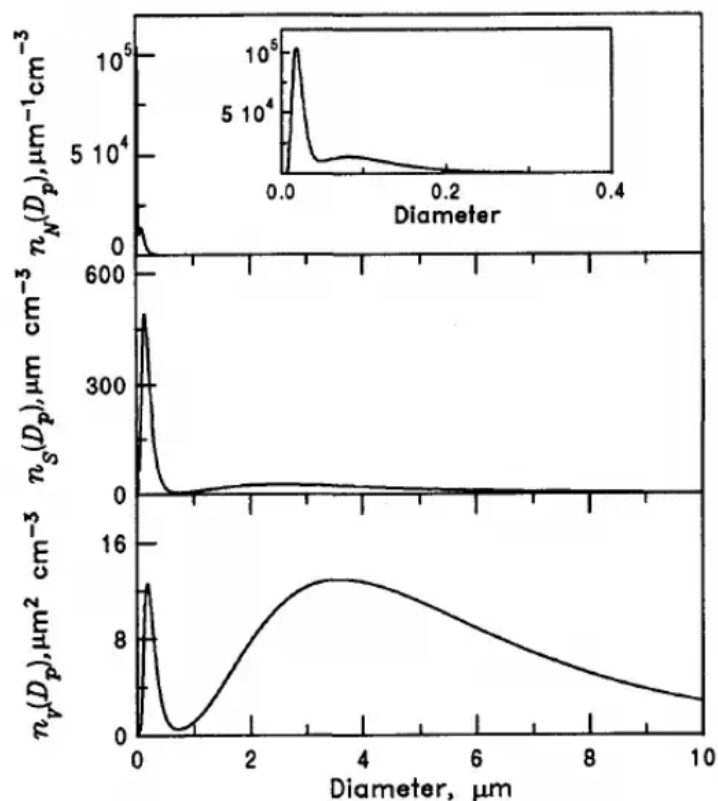


Figura 2.4 – Distribuição do número, área de superfície e volume em função do diâmetro da partícula (Seinfeld e Pandis, 2006).

No entanto, a representação do logaritmo do diâmetro no eixo das abcissas origina uma imagem distorcida da distribuição por número, uma vez que a área abaixo da curva deixa de corresponder à concentração do número de partículas. Neste sentido, a distribuição das partículas deve ser analisada em função do logaritmo do diâmetro (Seinfeld e Pandis, 2006), como representado na Figura 2.5.

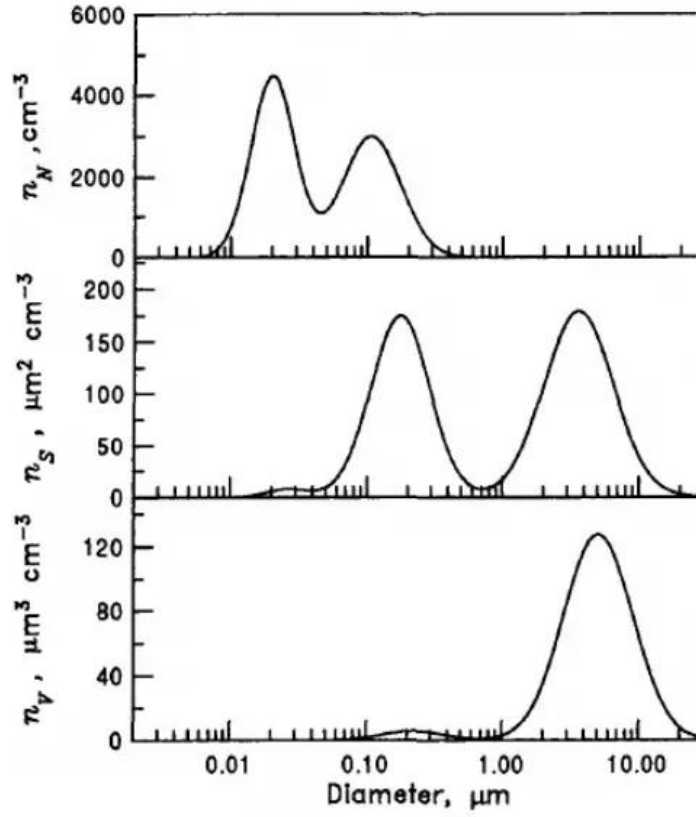


Figura 2.5 - Distribuição do número, área de superfície e volume expressa em função de logaritmo do diâmetro da partícula (Seinfeld e Pandis, 2006).

Portanto, a distribuição do número, $n_N(\log D_p)$, passa a ser definida como:

$$n_N(\log D_p) d \log D_p \quad (7)$$

Correspondendo ao número de partículas por cm^3 de ar com diâmetros no intervalo de $\log(D_p)$ a $\log(D_p + dD_p)$. Neste contexto, a distribuição da área de superfície e do volume são também definidas em relação ao logaritmo do diâmetro:

$$n_S(\log D_p) = \pi D_p^2 n_N(\log D_p) \quad (\mu\text{m}^2 \text{cm}^{-3}) \quad (8)$$

$$n_V(\log D_p) = \frac{\pi}{6} D_p^3 n_N(\log D_p) \quad (\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}) \quad (9)$$

Uma vez que o diferencial do número, da área de superfície e do volume de partículas no intervalo de tamanho de D_p a $(D_p + dD_p)$ também pode ser representado por dN , dS e dV , respectivamente, obtém-se:

$$dN = n_N(\log D_p) d \log D_p \quad (10)$$

$$dS = n_S(\log D_p) d \log D_p \quad (11)$$

$$dV = n_V(\log D_p) d \log D_p \quad (12)$$

Assim, as distribuições por tamanho referidas, são:

$$n_N(\log D_p) = \frac{dN}{d \log D_p} \quad (13)$$

$$n_S(\log D_p) = \frac{dS}{d \log D_p} \quad (14)$$

$$n_V(\log D_p) = \frac{dV}{d \log D_p} \quad (15)$$

Utilizando um equipamento de medição de partículas apropriado é possível obter os dados necessários para se reproduzir as funções de distribuição anteriormente referidas. Dependendo da propriedade que se pretende analisar utilizam-se métodos de medição diferentes (Kulkarni et al., 2011).

2.2 Métodos de medição de partículas atmosféricas

As medições de matéria particulada podem ser utilizadas para verificar se um determinado local se encontra em conformidade com os padrões de qualidade do ar, para determinar tendências de longo prazo nesses mesmos padrões e podem ser aproveitados para estudos epidemiológicos, bem como para estudos relacionados com o desenvolvimento de estratégias de redução da poluição e com a validação de modelos de qualidade do ar (US EPA, 2004). O método escolhido para realizar as medições de matéria particulada depende do objetivo que se pretende alcançar (WHO, 2006b).

O método de referência para a determinação da concentração mássica de PM_{10} e de $PM_{2.5}$ corresponde ao método gravimétrico. Os equipamentos de monitorização que se baseiam no método gravimétrico aspiram o ar ambiente a um caudal constante através de um filtro, durante um determinado período de tempo. O filtro é pesado antes e após as medições e a diferença obtida corresponde à massa das partículas atmosféricas que ficaram retidas no mesmo. Posteriormente, o filtro pode ser analisado em laboratório de forma a determinar a composição química das partículas atmosféricas recolhidas na amostragem (APA, 2010a).

Os equipamentos gravimétricos utilizados na determinação de concentração mássica de PM_{10} podem ser de pequeno (*Low Volume System - LVS*), grande (*High Volume System - HVS*) e de muito grande (*Superhigh Volume System - WRAC*) volume, com um caudal constante de 2,3 m^3/h , 68 m^3/h e 77,9 m^3/h , respetivamente (APA, 2010a). Na Figura 2.6, encontra-se

representado o esquema do funcionamento de um sistema de amostragem de grande volume (HVS).

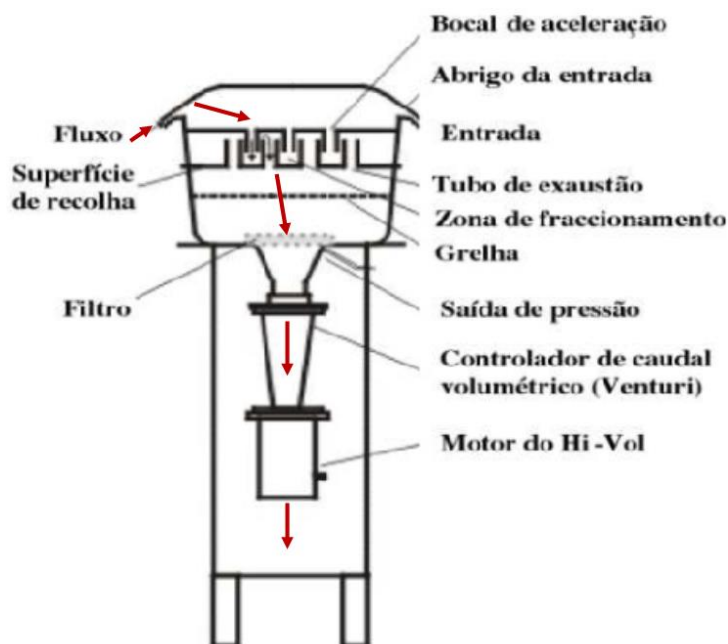


Figura 2.6 - Esquema de um sistema de amostragem de grande volume (High Volume System - HVS) (adaptado de APA, 2010a).

Como alternativa, também se podem utilizar equipamentos de medição automáticos, cujo princípio de medição se baseia em métodos considerados equivalentes, como o método de “Absorção de Radiação Beta”, o método de “Balança de Inércia” e o método ótico (APA, 2010a, 2010b). Os equipamentos utilizados para a monitorização de partículas atmosféricas devem ser equivalentes aos equipamentos aprovados pela norma EN 12341 do Comité Europeu de Normalização (APA, 2010a; WHO, 1999).

O método de Absorção de Radiação Beta permite determinar a concentração mássica de partículas atmosféricas, através de medições automáticas e contínuas. O princípio de funcionamento deste método consiste na absorção de radiação beta, emitida por uma fonte radioativa, por parte das partículas atmosféricas depositadas num filtro. Os equipamentos de medição que utilizam o método de absorção de radiação beta são constituídos por um filtro, com forma de fita composto por fibra de vidro, que se encontra inserido entre a fonte radioativa e o detetor de radiação Geiger-Muller. Inicialmente, mede-se a absorção da radiação beta da fita antes desta ser exposta ao fluxo de ar ambiente, de forma a obter a “atenuação em branco”.

De seguida, o filtro é atravessado por um caudal constante de ar ambiente e conseqüentemente, acumula um depósito de partículas atmosféricas. A fita volta a ser exposta à fonte de radiação e mede-se a absorção de radiação beta. Desta forma obtém-se a concentração mássica das partículas atmosféricas depositadas no filtro (Chow, 1995; APA, 2010a). Na Figura 2.7 encontra-se esquematizado o princípio de funcionamento de um equipamento de absorção de radiação beta.

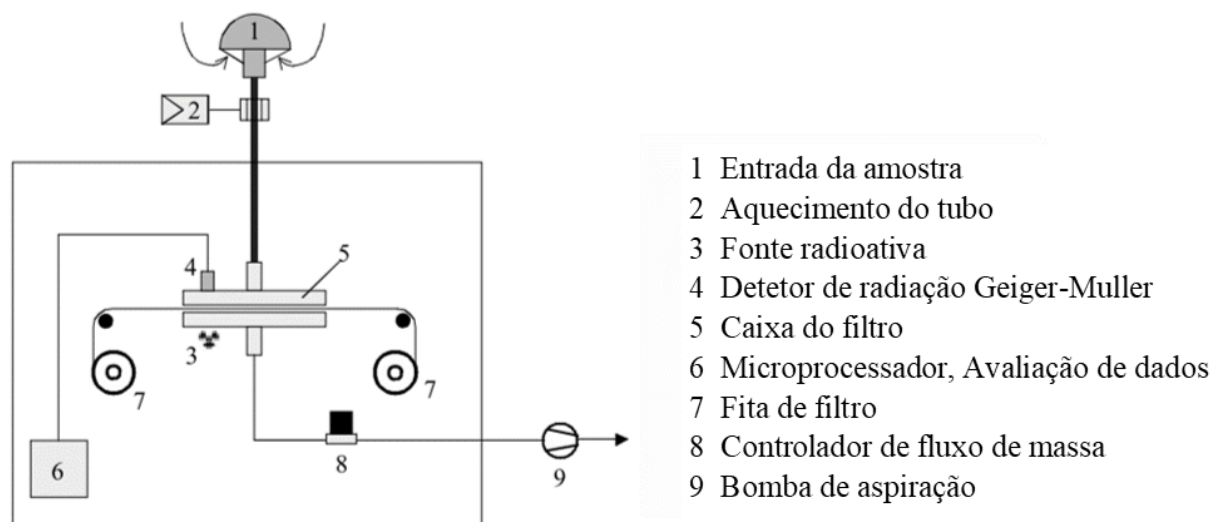


Figura 2.7 - Esquema do princípio de funcionamento de um Monitor de Atenuação Beta (Adaptado de Asbach, 2010).

Outro método utilizado na medição da concentração de partículas atmosféricas são os métodos óticos. Este método efetua a caracterização da amostra baseando-se nas propriedades óticas das partículas utilizando uma célula ótica, onde as partículas são expostas a um feixe de luz. A presença das partículas atmosféricas provoca a dispersão de luz, sendo que a quantidade de luz dispersa está relacionada com o número de partículas. Normalmente, estes equipamentos de medição permitem contar o número de partículas e determinar a concentração de partículas por gamas de tamanho (APA, 2010b)

Através da aplicação dos métodos referidos acima é possível adquirir os dados necessários para a realização das diferentes distribuições de partículas por tamanho mencionadas anteriormente. Por exemplo, utilizando um impactor de cascata é possível obter a distribuição de massa através da pesagem das partículas acumuladas em cada uma das fases do equipamento. Enquanto a distribuição por número pode ser obtida diretamente através de um contador de partículas ótico (Kulkarni et al., 2011).

Lin e Lee (2004) mediram as concentrações mássicas de PM_1 e PM_{10} durante 8 meses, entre 2000 e 2001, na área urbana de uma cidade em Taiwan, com o intuito de examinar como estes indicadores de matéria particulada são afetados por fatores sazonais e meteorológicos. Para medir as concentrações das partículas atmosféricas utilizaram um amostrador de ar universal, nomeadamente um UAS-310 (sistema de alto volume). Constataram que as concentrações diárias de PM_1 , durante o período de estudo, variaram entre 16 a $108 \mu\text{g}/\text{m}^3$, enquanto as concentrações diárias de PM_{10} variaram entre 32 a $195 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Observaram que devido às condições de estagnação (baixa ventilação, menor velocidade do vento e altura da camada de mistura) que se fazem sentir no inverno, a concentração de partículas atmosféricas era mais elevada neste período do que no verão e no outono. Retiraram informação relativamente à velocidade do vento durante o período de estudo, o que lhes permitiu observar correlações inversas entre a velocidade do vento e as concentrações de matéria particulada. Concluíram que uma maior velocidade do vento durante o período de verão e outono contribuiu para uma melhor dispersão e, naturalmente, para uma menor concentração de partículas em suspensão na atmosfera. Sugeriram também que as altas temperaturas no verão e no outono permitem um aumento da altura da camada de mistura, possibilitando a dispersão das partículas. No entanto, salientaram que é necessário considerar outros fatores que influenciam as concentrações de matéria particulada, como a direção do vento e as fontes de emissão.

Rovelli et al. (2017) efetuaram uma campanha de medição de material particulado numa área urbana de fundo em Como (Norte de Itália), entre maio de 2015 e março de 2016, de forma a investigarem a concentração mássica, distribuição por tamanho e a variabilidade temporal das partículas atmosféricas no local de estudo. Utilizaram um impactor de cascata de baixa pressão de 13 estágios na recolha de partículas atmosféricas, distribuindo-as consoante o seu tamanho, no intervalo de tamanho de $0,028$ a $10 \mu\text{m}$. No tratamento e análise de dados, tendo em conta a ativação dos sistemas de aquecimento residencial, decidiram separar os resultados em dois períodos: a estação sem aquecimento (maio – outubro) e a estação de aquecimento (outubro – março). Observaram que durante a estação sem aquecimento, as partículas atmosféricas apresentaram uma distribuição trimodal, identificando um pico acentuado no modo de acumulação, entre $0,3$ e $0,5 \mu\text{m}$, e outros dois picos menos acentuados no modo grosseiro, centrados aproximadamente em 3 e $8 \mu\text{m}$. Constataram que o pico identificado no modo de acumulação aumentou bastante durante a estação de aquecimento, enquanto que os outros dois picos não sofreram alterações. Esta variação pode estar associada à presença de maior número de fontes de partículas submicrométricas durante o inverno (estação de aquecimento). Concluíram ainda que as concentrações médias de $PM_{2.5}$ ($22,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e de PM_{10} ($27,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) medidas na área de estudo excederam os valores anuais das diretrizes de qualidade do ar estabelecidas pela Organização Mundial da Saúde.

Alam et al. (2011), realizaram uma campanha de medição de partículas atmosféricas durante os meses de março e abril de 2010, em quatro cidades do Paquistão. Utilizaram um medidor de partículas ótico, nomeadamente, o GRIMM Modelo 1.109, que lhes permitiu obter informação em termos de distribuição por tamanho, concentração mássica (M) e numérica (N) e ainda, concentrações de PM₁₀ e PM_{2.5}. Observaram que durante o período de estudo, as concentrações de partículas atmosféricas (N, M e PM₁₀ e PM_{2.5}) medidas eram elevadas em quase todos os locais de medição. Constataram, ainda, que as concentrações médias diárias de PM₁₀ e PM_{2.5}, em todos os locais de medição, ultrapassavam as concentrações máximas recomendadas pela Organização Mundial de Saúde.

No estudo desenvolvido por Bathmanabhan et al. (2010) realizaram-se medições de concentração mássica de PM₁₀, PM_{2.5} e PM₁ perto de uma via rodoviária na cidade de Chennai (Índia), com o intuito de investigar os ciclos diurnos, semanais e sazonais das concentrações. Efetuaram a monitorização de partículas atmosféricas através de um monitor GRIMM, entre novembro de 2007 e maio de 2008, abrangendo assim 3 estações (pós-monção, inverno e verão). Para além das medições de concentrações de matéria particulada, realizaram, no local de estudo, contagens de tráfego durante um dia da semana e no fim-de-semana. Constataram a existência de dois picos de concentração de partículas atmosféricas no ciclo diurno, que correspondiam ao tráfego na hora de ponta da manhã e da tarde. Observaram também concentrações máximas de matéria particulada nos períodos de inverno e pós-monção, provocadas por más condições de dispersão associadas a inversões térmicas. Enquanto que no período de verão observaram concentrações de partículas atmosféricas mais baixas. Concretamente, durante os períodos de inverno e pós-monção, as concentrações médias diárias de PM₁₀, PM_{2.5} e PM₁ variaram entre 77–228, 36–148 e 28–109 µg/m³, e 147–259, 61–126 e 46–101 µg/m³, respetivamente. E durante o período de verão, as concentrações médias diárias de PM₁₀, PM_{2.5} e PM₁ variaram entre 29–171, 14–94 e 9–71 µg/m³. Por fim, constataram que as concentrações médias diárias de PM₁₀ e de PM_{2.5} excederam os padrões estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde, durante cerca de 50 % e 75 % do tempo, respetivamente.

Wu et al. (2008) utilizaram informação sobre a distribuição por tamanho do número de partículas atmosféricas relativa a dois anos de medições, para investigar as suas variações diurnas, semanais e sazonais, bem como a sua variação conforme parâmetros meteorológicos. O estudo foi efetuado em Pequim, China, num local urbano e utilizaram dois analisadores de mobilidade diferencial (DMA – Differential Mobility Analyser) juntamente com dois contadores de partículas por condensação (CPC – Condensation Particle Counter) para medir a distribuição por tamanho das partículas no intervalo de tamanho de 3 nm a 800 nm. Simultaneamente, utilizaram um calibrador aerodinâmico de partículas (APS – Aerodynamic Particle Sizer) para medir a distribuição por tamanho do número de partículas com diâmetro aerodinâmico de 800 nm a 10 µm. Consideraram que para o modo de nucleação, modo de

Aitken, modo de acumulação e modo grosseiro os intervalos de tamanho correspondiam a 3 – 20 nm, 20 – 100 nm, 100 – 1000 nm e 1 – 10 μm , respetivamente. Constataram que, durante o período de medição (dois anos), as concentrações médias do número de partículas no modo de nucleação, modo de Aitken e modo de acumulação foram de 9000 cm^{-3} , $15,900\text{ cm}^{-3}$ e 7800 cm^{-3} , respetivamente. Concluíram ainda que com o aumento da velocidade do vento, a concentração numérica das partículas do modo grosseiro e do modo de nucleação aumenta, enquanto as concentrações numéricas do modo de Aitken e do modo de acumulação diminuem.

Ntziachritos et al. (2007) efetuaram medições dos níveis de concentração e dos perfis diurnos da área de superfície das partículas atmosféricas em diferentes locais urbanos em Los Angeles. Observaram que a concentração da superfície das partículas atmosféricas, junto a uma autoestrada, era de $150\text{ }\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ($0,15\text{ mm}^2/\text{l}$), enquanto que a 100 metros de distância dessa autoestrada na direção do vento a concentração diminuía para $100\text{ }\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ($0,1\text{ mm}^2/\text{l}$). Constataram também que em áreas urbanas os níveis de concentração diminuía para $50 - 70\text{ }\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ($0,05 - 0,07\text{ mm}^2/\text{l}$).

2.3 Localização e classificação das Estações de Qualidade do Ar

Tendo em vista a minimização das consequências derivadas da poluição atmosférica que se fazem sentir na saúde humana e no meio ambiente, foram adotadas medidas legislativas, tanto a nível nacional como a nível comunitário. De forma a cumprir as obrigações legais o território nacional foi repartido em áreas que são sujeitas a uma avaliação obrigatória da qualidade do ar. Essas áreas foram definidas como:

- Zonas - a área geográfica de características homogéneas, em termos de qualidade do ar, ocupação de solo e densidade populacional delimitada para fins de avaliação e gestão da qualidade do ar;
- Aglomerações - uma zona que constitui uma conurbação caracterizada por um número de habitantes superior a 250 000 ou em que o número de habitantes se situe entre os 250 000 e os 50 000 habitantes e tenha uma densidade populacional superior a $500\text{ hab}/\text{km}^2$ (CCDR, 2012).

Nestas zonas e aglomerações que se encontram ao longo do país, efetua-se a avaliação da qualidade do ar através de redes de medição, constituídas por estações de monitorização da qualidade do ar, geridas pelas Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR) da região onde estão inseridas. A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) desenvolveu uma base de dados, a *QualAr*, onde são disponibilizados ao público os dados referentes à qualidade do ar medidos em contínuo pelas diversas estações existentes (QualAr, 2019).

As estações de monitorização são classificadas consoante o ambiente em que estão inseridas e a influência das emissões de poluentes atmosféricos a que estão sujeitas. Relativamente ao ambiente pode-se identificar três tipos de estações:

- Urbana – localizadas em ambiente urbano (cidades);
- Suburbanas – localizadas na periferia das cidades;
- Rurais – localizadas em ambiente rural.

Segundo a influência dos poluentes atmosféricos, é possível classificar as estações como sendo de:

- Tráfego – monitorizam a qualidade do ar resultantes de emissões diretas do tráfego rodoviário;
- Industriais – monitorizam a qualidade do ar resultante de emissões diretas da indústria;
- Fundo – não estão sujeitas a influência direta de emissões de nenhuma fonte específica, mas representam a poluição a que a população está exposta mesmo que se encontre distante das fontes de emissão (CCDR-N, 2014).

A Região Centro está dividida em três zonas (Zona Centro Litoral, Zona Centro Interior e Zona de Influência de Estarreja) e duas aglomerações (Coimbra e Aveiro/Ílhavo). A rede de monitorização da qualidade do ar da Região Centro é gerida pela Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro (CCDRC), sendo constituída atualmente por nove estações de medição, como se pode observar na Figura 2.8 (CTCV e CCDRC, 2010).

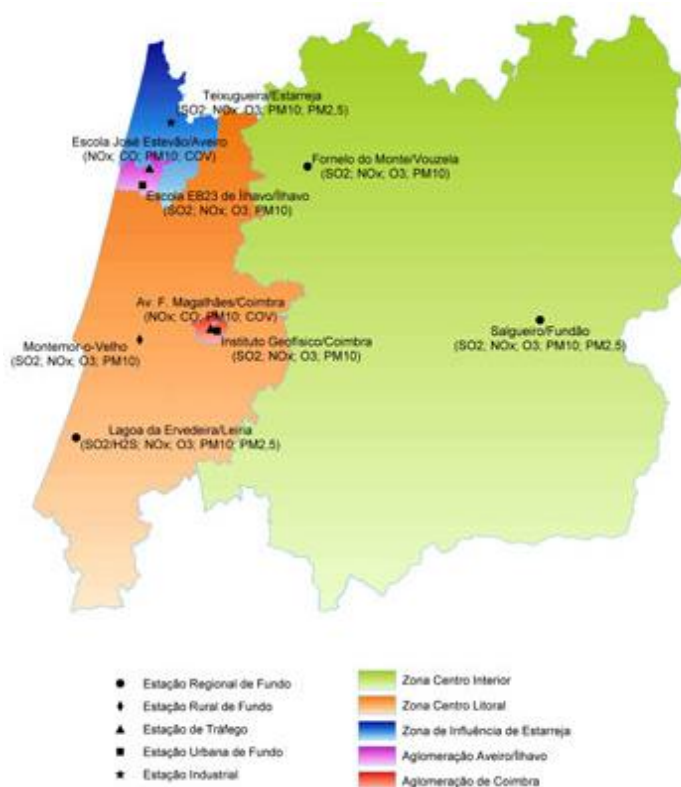


Figura 2.8 - Delimitação das Zonas e Aglomerações da Região Centro e respetivas estações de monitorização (CTCV e CCDRC, 2010).

Especificamente, na cidade de Coimbra existem duas estações de monitorização da qualidade do ar. A estação do Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra é caracterizada como uma estação urbana de fundo e deu início às suas medições no ano de 2003, monitorizando poluentes como dióxido de azoto (NO₂), monóxido de azoto (NO), ozono (O₃), óxidos de azoto (NO_x), partículas com diâmetro inferior a 10 µm (PM₁₀) e dióxido de enxofre (SO₂). A segunda estação iniciou as medições em 2008, localiza-se na Avenida Fernão Magalhães e é caracterizada como uma estação de tráfego, medindo concentrações de poluentes como dióxido de azoto (NO₂), monóxido de azoto (NO), óxidos de azoto (NO_x), monóxido de carbono (CO), partículas com diâmetro inferior a 10 µm (PM₁₀) e benzeno (C₆H₆) (APA, 2019b).

A nível nacional, a avaliação e gestão da qualidade do ar é efetuada através de medições fixas utilizando métodos de referência ou métodos equivalentes (DL-47/2017). Assim, nas estações de monitorização da qualidade do ar, para a amostragem e determinação da concentração mássica de partículas com diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 10 µm (PM₁₀) aplica-se o método de referência que corresponde ao método gravimétrico, através do qual se efetua a recolha gravimétrica de partículas atmosféricas em filtros pesados por meio de balança, em

condições controladas de temperatura e humidade relativa. O período de amostragem pode ser até 24 horas e as concentrações das partículas atmosféricas são expressas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Semelhante a PM_{10} , o método de referência utilizado na determinação da concentração mássica de partículas com diâmetro igual ou inferior a $2.5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$), corresponde ao método gravimétrico (APA, 2010a).

3 METODOLOGIA

De forma a cumprir o objetivo principal desta dissertação foi necessário realizar medições dos níveis de poluição do ar, nomeadamente das partículas em suspensão na atmosfera, numa área urbana localizada na cidade de Coimbra. As medições decorreram no mês de maio de 2019, especificamente entre dia 27 e dia 31. No presente capítulo encontra-se descrita a metodologia aplicada no planeamento e implementação da campanha experimental de medição, começando por descrever o equipamento de medição utilizado.

3.1 Espectrómetro de Aerossol Portátil (GRIMM)

Neste trabalho, foi utilizado um espectrómetro de aerossol portátil (GRIMM), para efetuar medições de partículas atmosféricas na área de estudo selecionada. O espectrómetro de aerossol portátil (GRIMM), identificado na Figura 3.1, é um aparelho que efetua medições de forma contínua e permite realizar a quantificação de partículas atmosféricas em 31 frações de tamanho, abrangidas no intervalo de diâmetro entre 0,25 a 32 μm . Os resultados das medições são expressos como concentrações de partículas, especificamente concentrações numéricas (partículas/L) e concentrações mássicas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), por intervalo de tamanho (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016b).

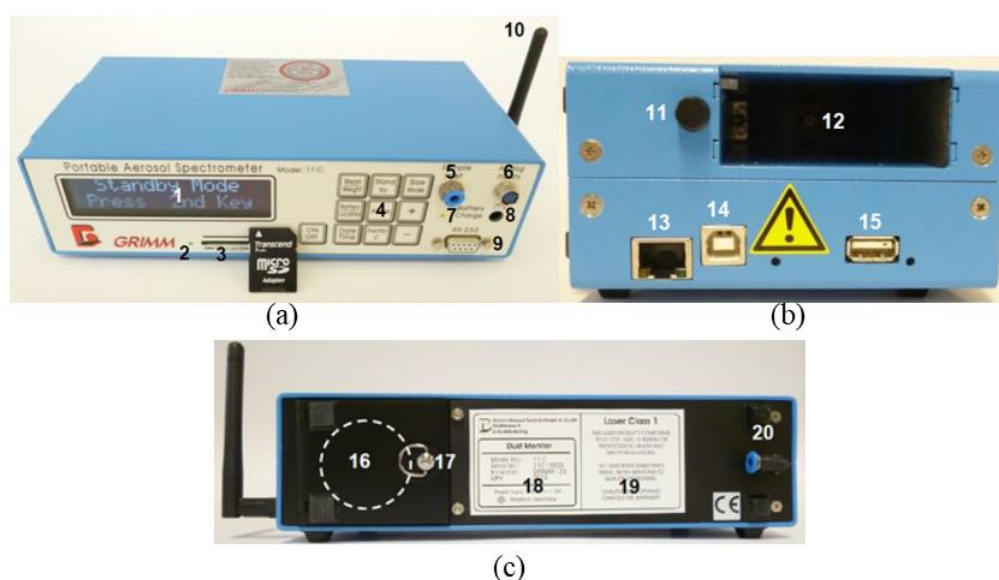


Figura 3.1 – Vista frontal (a), lateral esquerda (b) e traseira (c) do espectrómetro de aerossol, GRIMM (adaptado de GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016b).

Este aparelho foi projetado para determinar a distribuição por tamanho de partículas atmosféricas, bem como a sua massa, através de um método de dispersão de luz (Grimm e Eatough, 2009). Os dados adquiridos através do dispositivo são gravados num cartão de memória SD que está inserido no equipamento. Estes dados são gravados de acordo com um intervalo de tempo predefinido, que pode variar entre 6 segundos até 60 minutos. O equipamento possui ainda um filtro gravimétrico que recolhe as partículas em suspensão no ar após a sua passagem pela câmara de medição ótica (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016b).

O princípio de funcionamento consiste na colheita de amostra de ar ambiente para dentro do equipamento a 1.2 L/min através da entrada de amostra, que se encontra representada na Figura 3.2 (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016b).



Figura 3.2 - Sistema de recolha da amostra de ar (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016b).

A amostra de ar é direcionada para dentro da câmara de medição, representada na Figura 3.3, onde cada partícula é iluminada por um feixe de luz proveniente de um laser. A dispersão de luz de cada partícula é contada e a intensidade do sinal de luz disperso detetada é atribuída a um tamanho de partícula específico (Pio et al., 2014; GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016b; Grimm e Eatough, 2009). Depois de passar pela câmara de medição a amostra de ar atravessa o filtro gravimétrico que detém as partículas. Posteriormente, o filtro pode ser analisado para determinação da massa das partículas atmosféricas recolhidas, bem como sujeito a análise química (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016b).

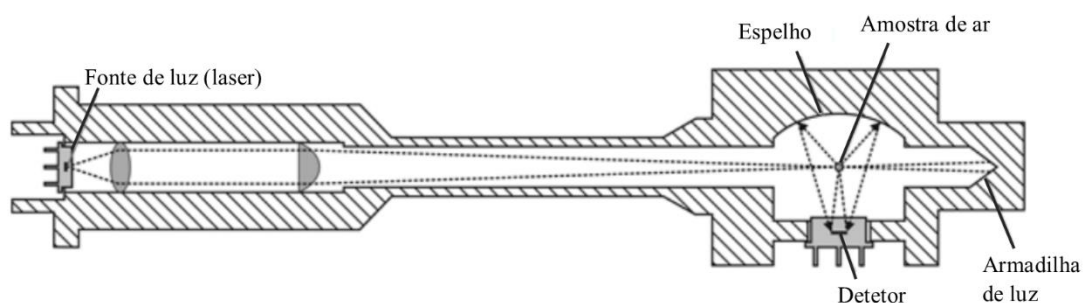


Figura 3.3 – Representação esquemática da câmara de medição (adaptado de GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016b)

O equipamento de medição, GRIMM, permite determinar o número (através de contagens) e a distribuição por tamanho de partículas atmosféricas, sendo que os outros parâmetros são calculados. Ou seja, a massa da matéria particulada é determinada indiretamente, através da distribuição por tamanho do número de partículas atmosféricas. Primeiro, os dados obtidos são convertidos em volume, utilizando o diâmetro médio de cada um dos 31 intervalos de tamanho diferentes (Bathmanabhan et al., 2010; Grimm e Eatough, 2009). Posteriormente, os resultados do volume são convertidos em distribuição por tamanho de massa das partículas, através de um algoritmo incorporado no GRIMM, que aplica fatores específicos do instrumento (Alam et al., 2011; Bathmanabhan et al., 2010; Burkart et al., 2010; Grimm e Eatough, 2009).

No âmbito deste trabalho, o intervalo de tempo definido para as contagens da matéria particulada foi de 1 minuto e os dados medidos foram gravados no cartão de memória SD inserido no equipamento, sendo posteriormente transferidos para o computador através do GRIMM 1178 LabVIEW Software.

O GRIMM Software 1178, baseado em LabVIEW, projetado por GRIMM Aerosol Technik, foi divulgado em 2010 e tem como objetivo simplificar a visualização e interpretação das medições realizadas. O software permite estabelecer o intervalo de tempo para realizar as medições, bem como transferir os dados gravados no cartão SD para o computador (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016b).

No ficheiro que é transferido para o computador encontra-se seguinte informação:

- Concentração de PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 , e concentração de partículas inaláveis, respiráveis e alveolares;
- Distribuição por tamanho da concentração numérica;
- Distribuição por tamanho da concentração mássica;
- Parâmetros técnicos de medição;

A informação referida acima, é repartida por quatro ficheiros diferentes: *M.dat*, *C.dat*, *dM.dat* e *L.dat*, respetivamente (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016a). O software também permite efetuar medições “online”, ou seja, com o equipamento ligado ao computador, nas quais os dados adquiridos são diretamente transferidos para o mesmo. Neste caso, através do GRIMM 1178 LabVIEW Software, é possível iniciar e terminar as medições, bem como visualizar toda a informação recolhida no momento em tempo real, como se pode observar na Figura 3.4 (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016a).



Figura 3.4 - Janela "Overview" do GRIMM 1178 LabVIEW Software (adaptado de GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016a).

O GRIMM 1178 LabView Software permite apresentar os dados adquiridos de diversas formas. Na janela “Distribution” do software, é possível observar a distribuição por tamanho da concentração de partículas atmosféricas, seja essa concentração referente ao número (Figura A1 do anexo), massa (Figura A2 do anexo) ou área de superfície (Figura A3 do anexo) das partículas (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016a).

O software permite apresentar, em tabelas, as concentrações de partículas atmosféricas correspondentes a cada momento das medições, tendo em conta o intervalo de tempo pré-

definido. Como se pode observar na Figura A5 do anexo, nessas tabelas estão apresentados os valores correspondentes à concentração numérica, à concentração mássica e a parâmetros técnicos que permitem averiguar o estado do equipamento no momento da medição (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016a).

A secção referente aos dados medidos de concentração mássica está repartida em duas subsecções. Na subsecção “mass values” são apresentadas as concentrações mássicas de PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, partículas inaláveis, respiráveis e alveolares, em $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Enquanto na subsecção “mass distribution” é apresentada a concentração mássica referente a cada intervalo de tamanho, também em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016a).

A janela “Time”, existente no software, permite visualizar a variação das concentrações mássicas e numéricas, ao longo do tempo, referentes a cada fração de tamanho durante o período em que decorre a medição (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016a).

Na janela “Statistics” do GRIMM 1178 LabView Software, é possível visualizar dados estatísticos (ex: mínimo, máximo, média), bem como gráficos *boxplot* dos valores de PM₁₀, PM_{2.5} e PM₁.

3.2 Caracterização da Área de Estudo

Para o desenvolvimento desta dissertação selecionou-se como zona de estudo uma rua localizada na área urbana de Coimbra, a Rua da Sofia, integrante da Baixa da cidade.

O município de Coimbra atua como um núcleo de atração dos centros urbanos dos municípios vizinhos, visto que alberga uma forte concentração de serviços, quer de carácter público como carácter privado. A atratividade gerada pelo município de Coimbra, devido à centralidade de equipamentos e serviços existentes na cidade, proporciona uma maior concentração de empregos e movimentos diários entre casa e trabalho/escola. Assim, os eixos viários (IP3, IC2, EN17, EN341, EN111 e EN234) que compõem a rede rodoviária nacional e que têm como ponto de convergência a cidade de Coimbra, atuam como pontos de acesso principais à zona urbana da cidade, suportando um sistema de movimentos pendulares gerados entre a cidade e os municípios vizinhos (CMC, 2012).

As circulares (interna e externa) existentes ao redor da cidade possibilitam a difusão do elevado número de movimentos pendulares que afluem para a zona urbana da cidade, contribuindo para a redução de tráfego na Avenida Fernão Magalhães e na Avenida Emídio Navarro. O terminal rodoviário de Coimbra, localizado na Avenida Fernão de Magalhães, estabelece várias ligações nacionais e regionais, representando assim um local de ligação entre a rede rodoviária nacional/regional e a rede urbana da cidade. Esta última, por sua vez, serve as principais vias

da cidade, verificando-se uma concentração dos serviços no centro urbano, incluindo a Rua da Sofia (CMC, 2012).

A Rua da Sofia, identificada na Figura 3.5, encontra-se localizada na Baixa da cidade, pertencendo à União de Freguesias de Coimbra (Sé Nova, Santa Cruz, Almedina e São Bartolomeu) e corresponde a um dos eixos principais da rede rodoviária da cidade, sendo servida por diversas linhas urbanas que integram a rede de transportes coletivos de Coimbra (CMC, 2012). Em termos morfológicos, possui um comprimento de 460 metros e uma largura de 12.5 metros, iniciando-se na Praça 8 de maio e terminando na Ladeira de Santa Justa (SIPA, 2006).



Figura 3.5 - Localização da área de estudo na cidade de Coimbra.

O edifício da Rua da Sofia, do qual fazem parte sete edifícios históricos (colégios), está intimamente ligado à história da Universidade de Coimbra. Como tal, a Rua da Sofia pertence ao conjunto histórico e cultural, “Universidade de Coimbra – Alta e Sofia”, identificado na Figura 3.6, que em 2013 foi classificado como Património Mundial da Humanidade pela

Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) (CMC, 2019; SIPA, 2006; World Heritage, 2019;).

Tendo em conta a relevância histórica e cultural do local acima referido é da maior importância a sua proteção e preservação. Como tal, e sabendo que a deposição de poluentes atmosféricos constitui um dos agentes que contribui para a degradação de monumentos e edifícios em áreas urbanas (Tittarelli et al., 2008), considerou-se pertinente efetuar uma caracterização das partículas atmosféricas nesta zona de estudo.



Figura 3.6 – Conjunto histórico e cultural “Universidade de Coimbra – Alta e Sofia” (UC, 2019).

3.2.1 Local de Medição

No âmbito desta dissertação procedeu-se à medição de concentrações de partículas suspensas no ar, na Rua da Sofia. A campanha de monitorização decorreu ao longo de 5 dias, iniciando-se no dia 27 de maio de 2019 e terminando no dia 31 de maio de 2019. O equipamento de medição, GRIMM, foi instalado na varanda do 1º piso de um edifício localizado no entroncamento entre a Rua da Sofia e a Rua Dr. Manuel Rodrigues, como se pode verificar na Figura 3.7.

Na Figura 3.7 observa-se que na Rua da Sofia o tráfego rodoviário circula nos dois sentidos, exceto na porção da via posterior ao entroncamento com a Rua Dr. Manuel Rodrigues, a partir da qual a deslocação se realiza apenas num sentido. Do lado esquerdo da zona de estudo verifica-se a existência de três vias de sentido único que conectam a Rua da Sofia com a Avenida Fernão Magalhães. A Rua João Machado recebe os veículos provenientes da Rua da Sofia e da Ladeira de Santa Justa, conduzindo-o até à Avenida Fernão Magalhães. Os outros dois eixos viários, nomeadamente a Rua Dr. Manuel Rodrigues e a Rua João de Ruão, acolhem o trânsito da Avenida Fernão Magalhães direcionando-o até à Rua da Sofia. A Rua Olímpio Nicolau Rui Fernandes também é uma via rodoviária de dois sentidos que estabelece ligação com a Rua da Sofia, suportando os movimentos que convergem para o centro da cidade.

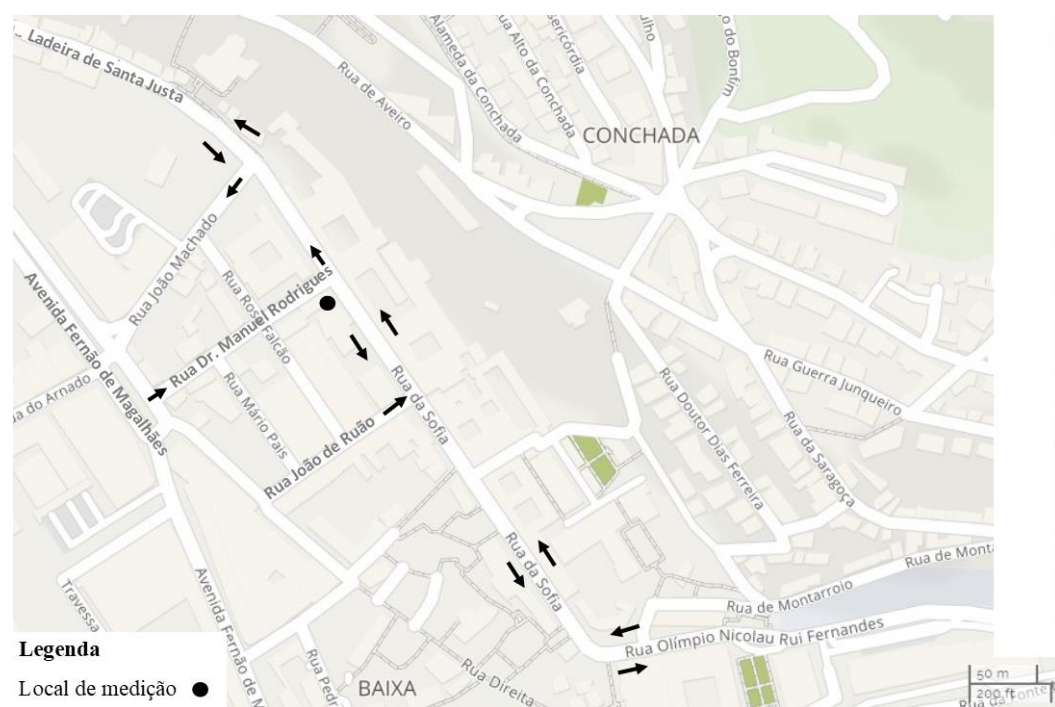


Figura 3.7 - Sentido das vias rodoviárias da área de estudo.

3.2.2 Condições meteorológicas

As condições meteorológicas influenciam os processos de dispersão e mecanismos de remoção de matéria particulada, conseqüentemente afetando as concentrações de partículas presentes na atmosfera (Galindo et al., 2011). Neste sentido, torna-se essencial analisar e caracterizar a situação meteorológica durante o período de medição.

De acordo com o IPMA (2019), o mês de maio de 2019 foi caracterizado pela ocorrência de episódios de tempo quente e seco, devido à influência de uma massa de ar tropical proveniente do Norte de África, pela passagem de ondulações frontais de fraca atividade e por um fluxo do quadrante norte, originado por um anticiclone localizado no Atlântico e uma depressão de origem térmica centrada na Península Ibérica.

Na última semana de maio de 2019, período em que decorreu o estudo, verificou-se que no dia 27 de maio o céu esteve pouco nublado ou limpo, que a velocidade do vento variou entre fraca a moderada, sendo predominante do quadrante norte e foi registada uma descida de temperatura máxima do ar. Nos restantes dias da semana, nomeadamente de dia 28 ao dia 31, o continente foi afetado por uma massa de ar tropical. Face a esta situação, o tempo esteve seco e quente, e a velocidade do vento variou entre fraca a moderada, sendo predominante do quadrante leste e, por vezes, forte nas terras altas das regiões Norte e Centro durante a noite e parte da manhã (IPMA, 2019).

Entre o dia 27 e o dia 31, registou-se um período quente, no qual se verificou que os valores de temperatura do ar foram sempre superiores ao valor normal 1971-2000. Sendo de destacar os últimos três dias do mês, nos quais o valor médio da temperatura máxima do ar, em Portugal continental, foi superior a 30°C, como se pode observar na Figura 3.8 (IPMA, 2019).

Na Figura 3.8 está representada a variação diária da temperatura (máxima, média e mínima) do ar durante o mês de maio de 2019. Os valores registados são comparados com um valor normal de temperatura (máxima, média e mínima), que se refere ao período de tempo 1971-2000 (IPMA, 2019). Esses valores normais de temperatura estão representados como linhas contínuas tracejadas. A zona sombreada da Figura 3.8 é relativa ao período de tempo em que decorreram as medições realizadas neste trabalho.

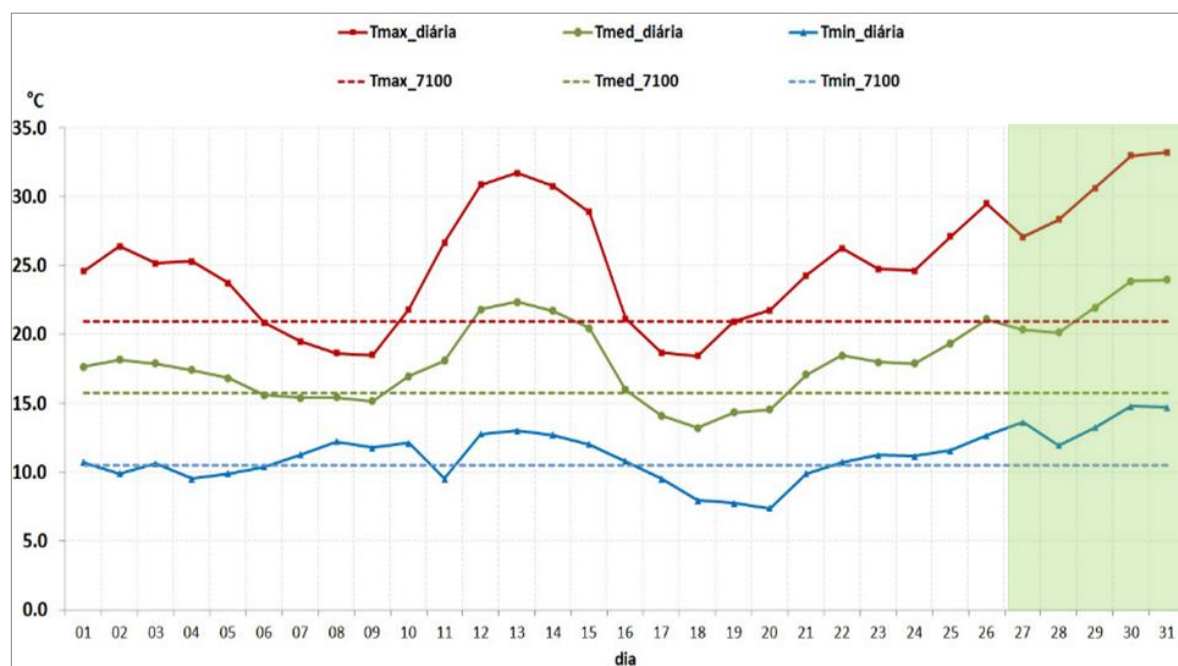


Figura 3.8 – Variação temporal da temperatura do ar de 1 a 31 de maio de 2019 em Portugal continental (adaptado de IPMA, 2019), os dias das medições efetuadas neste trabalho estão identificados a sombreado.

De forma a caracterizar as condições meteorológicas perto da área de estudo e durante o período em questão, analisou-se os valores de temperatura do ar, humidade relativa, velocidade e direção do vento. Como não existem estações meteorológicas na Rua da Sofia, recorreu-se a dados meteorológicos registados por estações existentes nas proximidades da área de estudo, nomeadamente a estação UC.POLO I@ALTA, com uma elevação de 39 metros, e a estação ADAI@DEM.UC, com elevação de 124 metros, cujos dados foram retirados do site *Weather Underground*. E ainda a uma estação, localizada na Avenida da Guarda Inglesa, perto do estádio universitário, integrante na campanha de monitorização de qualidade do ar desenvolvida no âmbito do Projeto “ISY-AIR”.

Na Figura 3.9, é possível observar-se a localização das três estações. Através do Google Earth, verificou-se que a estação pertencente à campanha de monitorização da qualidade do ar do Projeto “ISY-AIR”, estação Estádio, corresponde à estação mais próxima no local de medição (Rua da Sofia), apresentando uma distância de 915,5 metros (medidos em linha reta). Enquanto que as estações meteorológicas UC.POLO I@ALTA e ADAI@DEM.UC, encontram-se distanciadas do local de medição a 996,05 metros e 3590 metros, respetivamente.

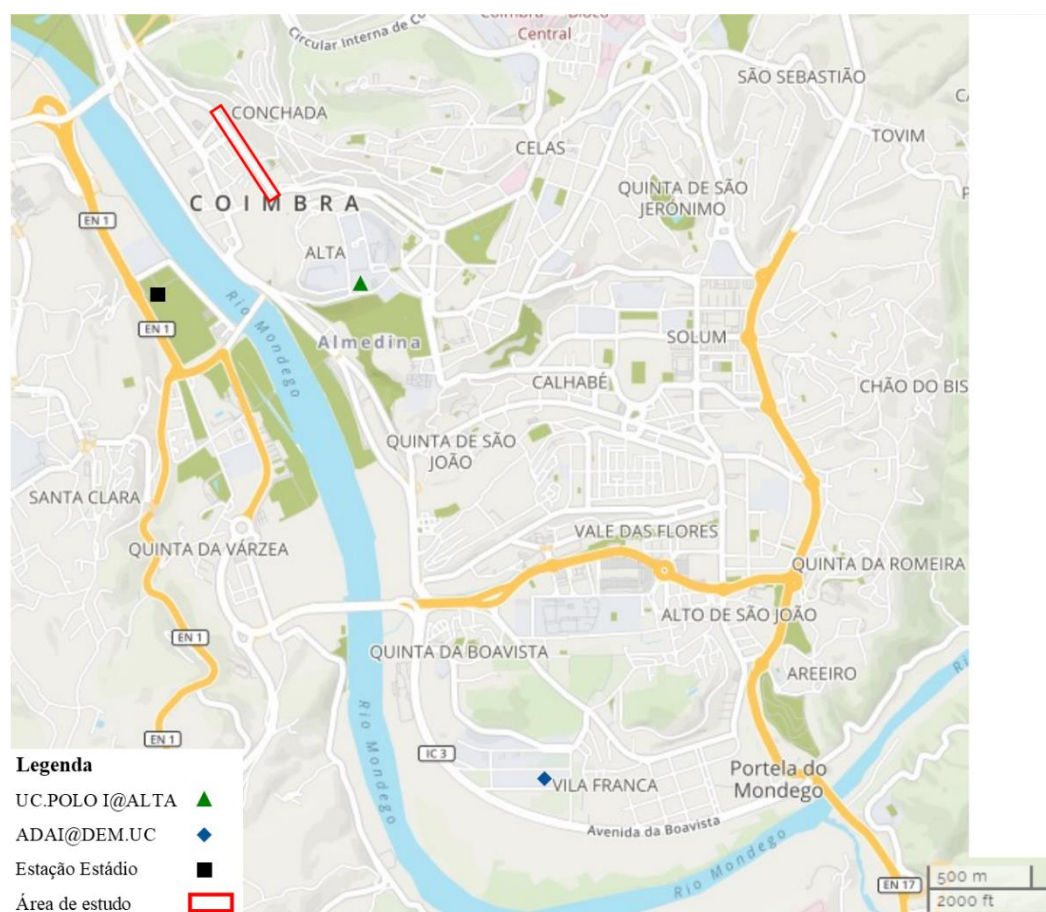


Figura 3.9 - Enquadramento das estações meteorológicas na cidade de Coimbra.

Temperatura

Das medições realizadas pelas estações meteorológicas mencionadas anteriormente, foram retirados os valores de temperatura registada nos dias em que decorreram as medições das concentrações de partículas atmosféricas, de forma a ser possível construir um perfil de temperatura para o período de estudo. De seguida, procedeu-se ao cálculo dos valores de temperatura média horária de cada dia. É importante referir que apenas se recolheram os dados meteorológicos registados entre o instante em que se iniciou e terminou a campanha de medição, 16h do dia 27 de maio e 18h do dia 31 de maio, respetivamente. Exceto na estação do Estádio que apenas possuía dados até às 11h de dia 31 de maio. Na Figura 3.10, é possível observar o perfil de temperatura relativo aos dias em que decorreu o estudo.

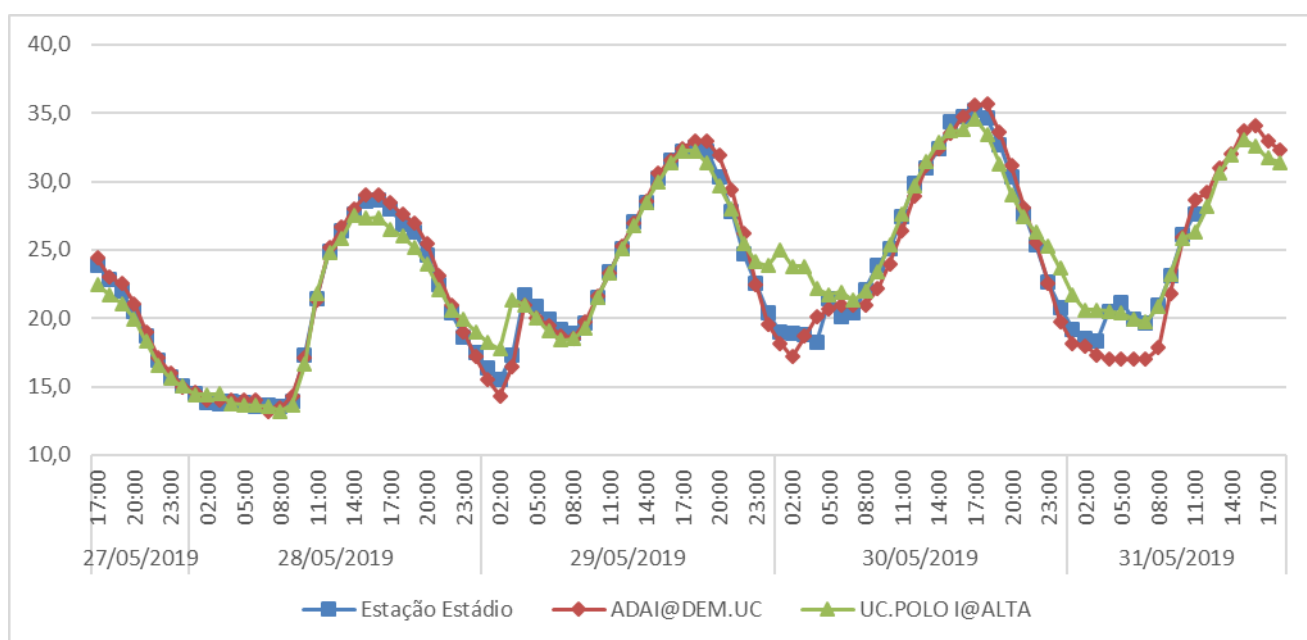


Figura 3.10 - Perfil de temperatura (média horária) do período de estudo (27 – 31 de maio de 2019).

Analisando a Figura 3.10, verifica-se que o perfil de temperatura de cada estação meteorológica é semelhante, registrando-se apenas algumas diferenças durante a madrugada, principalmente no dia 30 e no dia 31. Estas diferenças podem estar relacionadas com a localização de cada estação meteorológica, bem como o edificado existente nas suas proximidades. É possível observar que, ao longo dos 5 dias, a temperatura do ar tende a aumentar atingindo o máximo no dia 30, constatando-se um ligeiro decréscimo da temperatura no dia 31. Também se pode verificar que o intervalo de tempo das 14h às 18h corresponde ao período no qual se registam os valores máximos de temperatura diários.

Velocidade e Direção do vento

Recorrendo ao site *Weather Underground* e através dos dados fornecidos pelo Projeto “ISY-AIR”, foi possível adquirir os valores da velocidade e direção do vento referentes aos dias em que decorreu o estudo. Através destes dados, construiu-se uma rosa dos ventos para cada estação de monitorização facilitando a interpretação dos dados obtidos. Na Figura 3.11, correspondente à rosa dos ventos da estação do Estádio, é possível observar que os ventos dominantes são oriundos de este (90°), sucedendo-se os ventos com origem em oés-noroeste (292.5°). As velocidades do vento registadas variam maioritariamente entre 1.5 e 3.1 m/s, sendo que as velocidades máximas registadas atingiram os 5.1 m/s.

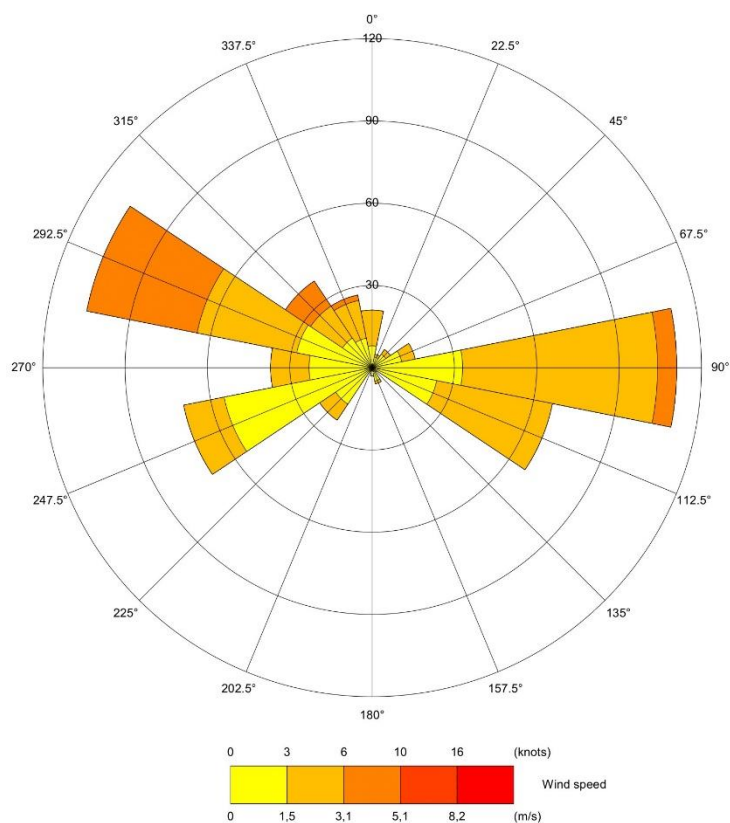


Figura 3.11 - Rosa dos ventos da estação Estádio relativa ao período de estudo (27 – 31 de maio de 2019).

Em anexo, encontram-se as rosas dos ventos da estação UC.POLOI@ALTA (Figura A5) e da estação ADAI@DEM.UC (Figura A6).

Na Figura 3.12 pode-se observar a variação das velocidades médias horárias do vento ao longo do período de estudo, registado nas três estações meteorológicas. É importante referir que os valores de velocidade do vento registados na estação ADAI@DEM.UC no período noturno podem estar associados a erros de medição, visto que nas outras estações não se observam os mesmos valores, exceto na estação UC.POLOI@ALTA entre as 23h do dia 28 e 1h do dia 29 de maio.

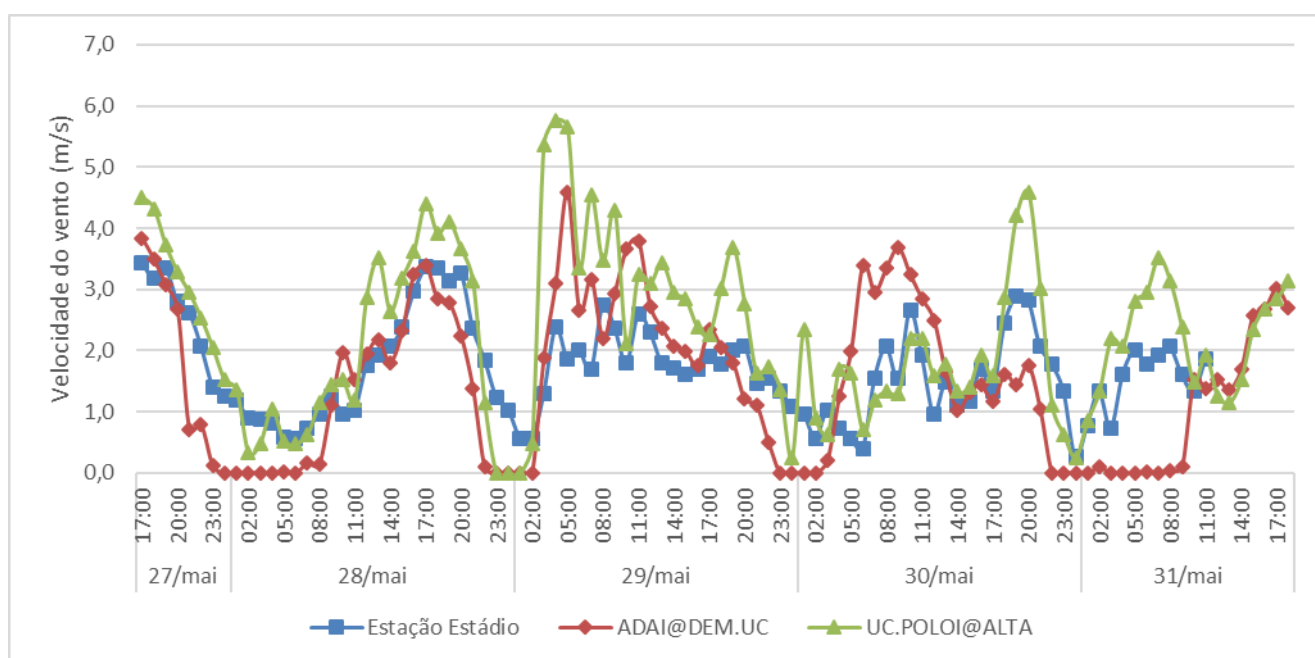


Figura 3.12 - Perfil da velocidade (média horária) do vento durante o tempo de estudo (27 – 31 de maio de 2019).

Pela análise da Figura 3.12, verifica-se que no dia 28 de maio a velocidade do vento aumentou durante o período diurno (9h – 20h). Registrando-se velocidades máximas do vento entre as 16h e as 20h. Enquanto que nos dias que lhe sucedem constata-se um aumento da velocidade do vento durante a parte da noite e da manhã, como referido no Boletim Climatológico de maio de 2019. Sendo que o aumento de velocidade do vento mais acentuado na parte da noite e da manhã ocorreu no dia 29 de maio. Estes aumentos da velocidade do vento contribuem para a dispersão das partículas presentes na atmosfera, enquanto que as velocidades do vento mais baixas dificultam essa mesma dispersão. As diferenças observadas a partir da madrugada de dia 29 de maio podem estar associadas à massa de ar tropical que atingiu o continente a dia 28 de maio.

Humidade relativa

Através do site *Weather Underground* e dos dados fornecidos pelo Projeto “ISY-AIR”, foi possível adquirir os valores da humidade relativa referentes aos dias em que decorreu o estudo. Posteriormente, procedeu-se ao cálculo dos valores de humidade relativa média horária de cada dia do período de estudo, que estão representados na Figura 3.13. Durante a realização de medições de partículas atmosféricas é necessária ter em atenção os valores de humidade relativa, uma vez que quanto mais elevada a humidade relativa maior o risco de condensação no interior do equipamento de medição, GRIMM, o que pode provocar danos no mesmo. Elevada humidade relativa também se encontra associada ao risco de condensação de partículas, o que contribui para o aumento do seu tamanho. Desta forma as partículas atmosféricas de

menor diâmetro serão atribuídas a intervalos de tamanho superiores, levando assim a uma distorção dos valores reais. Neste sentido, recomenda-se que durante o período de medição a humidade relativa deve ser inferior a 95 % para que não ocorra condensação (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG, 2016b).

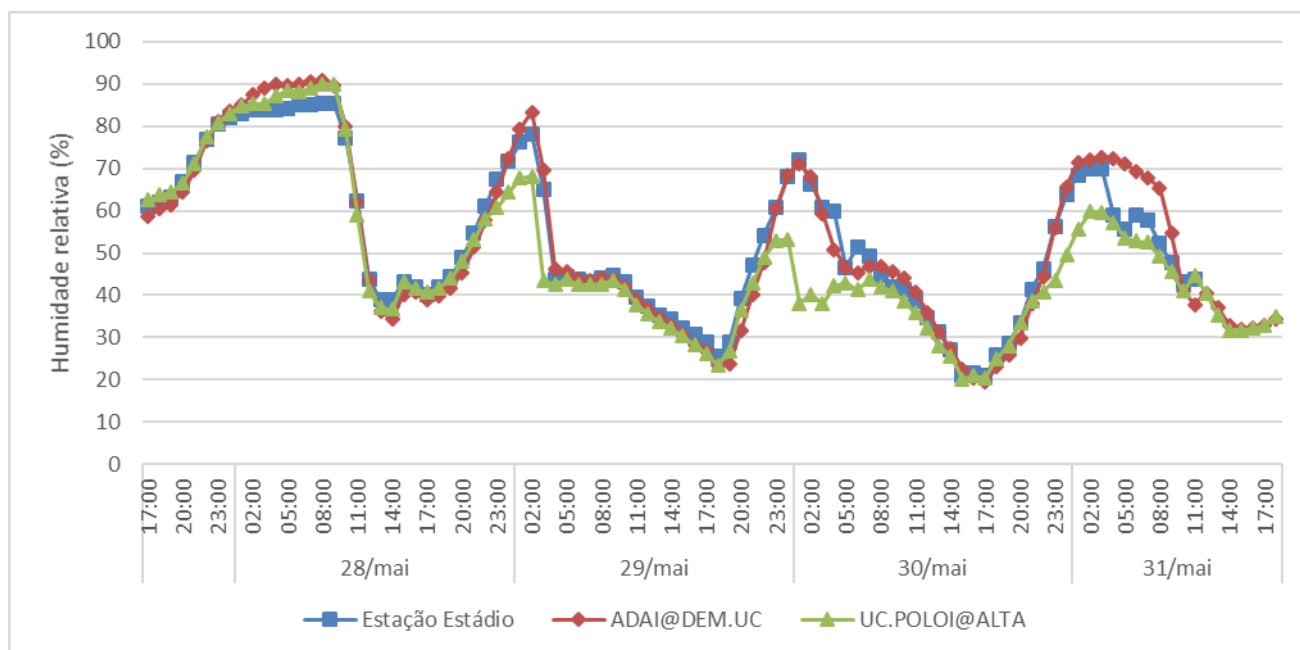


Figura 3.13 - Perfil da humidade relativa (média horária) durante o tempo de estudo (27 – 31 de maio de 2019).

Analisando a Figura 3.13, verifica-se que em nenhum dia a humidade relativa ultrapassou os 95%, observando-se um máximo, no dia 28 de maio às 8h, de 90,08%.

3.2.3 Caracterização do tráfego rodoviário na Rua da Sofia

As emissões resultantes dos processos de combustão que ocorrem nos veículos e do desgaste de pneus e travões, bem como a ressuspensão de partículas presentes nas vias rodoviárias, constituem uma das principais fontes de matéria particulada em áreas urbanas (Bathmanabhan et al., 2010; Taiwo et al., 2014; WHO, 2013). Neste contexto, é importante conhecer as características do tráfego rodoviário. A caracterização do volume de tráfego pode ser efetuada através de contagem de veículos em função das categorias de veículos que circulam na via, por unidade de tempo, nos diferentes troços da rede viária (IMTT, 2011).

Como referido anteriormente, a área de estudo considerada neste trabalho é um dos principais eixos da rede rodoviária da cidade de Coimbra, tendo um elevado movimento rodoviário. Como tal, de forma a caracterizar o tráfego rodoviário da Rua da Sofia, realizou-se a contagem de

veículos durante o período de estudo, nomeadamente, no dia 28 de maio de 2019 (terça-feira), que representa um dia comum de circulação (dia útil).

A contagem de veículos foi realizada manualmente, entre as 8h e as 21h (especificamente, das 8h - 12h, 14h - 16h, 18h - 20h e 21h - 22h), em amostras de 15 minutos intercaladas por intervalos de igual período. O tráfego rodoviário foi repartido pelas diferentes tipologias de veículos, nomeadamente: ligeiros de passageiros, ligeiros de mercadorias, pesados de passageiros, pesados de mercadorias e motociclos.

Na Figura 3.14 está identificado o local onde se realizou a contagem de veículos e o local de medição na área de estudo. Posteriormente, através da extrapolação dos dados adquiridos foi possível calcular o número de veículos, por categoria, para cada hora de contagem.

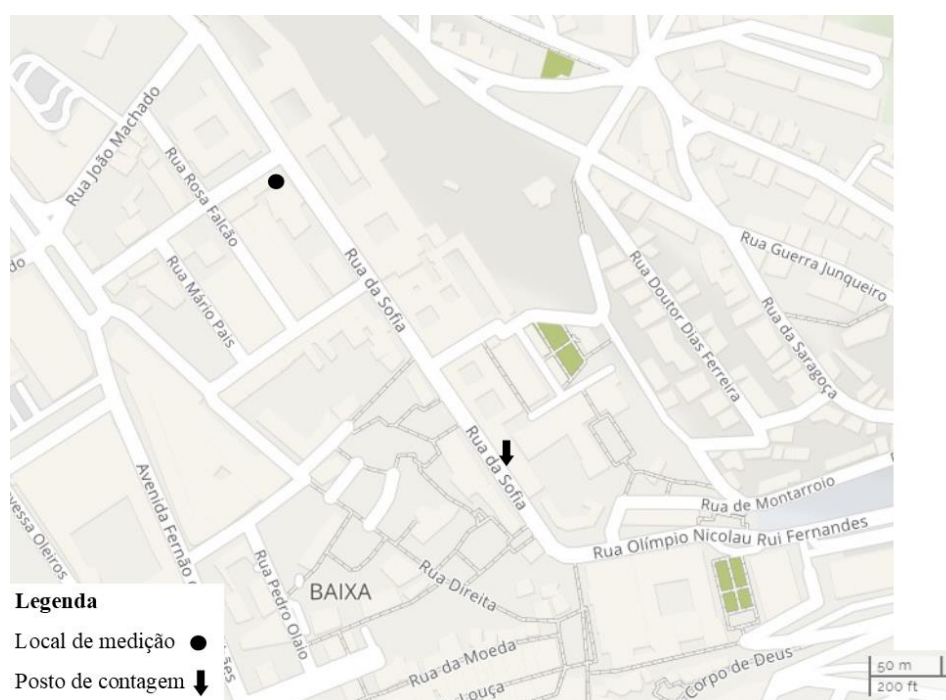


Figura 3.14 – Identificação do local onde se realizou a contagem de tráfego no dia 28 de maio de 2019.

As emissões provenientes de veículos rodoviários são regulamentadas pela legislação europeia. De maneira a cumprir as exigências estabelecidas na legislação, os fabricantes de veículos têm melhorado de forma contínua as tecnologias dos motores, bem como instalado diversos equipamentos que contribuem para a redução de emissões de poluentes, tais como catalisadores e filtro de partículas diesel (DPF's). Como resultado, os níveis de emissões de veículos

modernos são mais baixos que os níveis de emissões de veículos que entraram em circulação há duas décadas. Após o ano de 1992, tornou-se obrigatório em todos os Estados Membros a aplicação de novas normas, designadas de normas Euro, sendo que os veículos produzidos antes desse ano constituem a classe designada de ‘Convencional’ (EEA, 2018b). As diferentes classes de veículos estabelecidas, refletem etapas legislativas (‘Euro’) ou etapas tecnológicas, sendo que têm em consideração o ano de produção de cada veículo. Neste contexto, a distribuição dos veículos pelas diferentes classes realiza-se de acordo com o seu ano de fabrico, como se pode verificar no Quadro 3.1 (EEA, 2018b).

Quadro 3.1 – Classificação tecnológica de acordo com o primeiro ano de registo (adaptado de APA, 2019a).

Categoria do Veículo	Combustível	Norma Euro	Ano
Ligeiros de passageiros	Gasolina	Convencional	<1993
		Euro 1	1993 - 1996
		Euro 2	1997 - 2000
		Euro 3	2001 - 2005
		Euro 4	2006 - 2010
		Euro 5	2011 - 2015
		Euro 6	>2016
	Gasóleo	Convencional	<1992
		Euro 1	1993 - 1996
		Euro 2	1997 - 2000
		Euro 3	2001 - 2005
		Euro 4	2006 - 2010
		Euro 5	2011 - 2015
		Euro 6	>2016
Ligeiros de mercadorias	Gasolina/Gasóleo	Convencional	<1994
		Euro 1	1995 - 1997
		Euro 2	1998 - 2000
		Euro 3	2001 - 2005
		Euro 4	2006 - 2010
		Euro 5	2011 - 2015
		Euro 6	>2016

Como referido anteriormente, os veículos colocados em circulação nos últimos anos apresentam um menor nível de emissões de poluentes, tal facto provém do cumprimento das normas Euro, por parte dos fabricantes de veículos. De norma para norma encontram-se estabelecidas reduções dos níveis de emissão dos diferentes poluentes regulamentados (EEA,

2018b). No Quadro 3.2 estão identificadas as reduções dos níveis de emissão para partículas atmosféricas.

Quadro 3.2 – Redução dos níveis de emissão de PM tendo em conta a Norma Euro (adaptado de EEA, 2018b).

Norma Euro	Redução de emissões de PM face à norma anterior (%)
Euro 1	-
Euro 2	55,0
Euro 3	37,5
Euro 4	50,0
Euro 5 e Euro 6	88,0

Neste trabalho, tendo em vista a distribuição dos veículos pelas diferentes classes, efetuou-se um levantamento de informação, durante o período de tempo da contagem de tráfego, em que se registaram as letras de matrículas referentes aos veículos ligeiros de passageiros e aos ligeiros de mercadorias. Tendo em conta a informação presente no Quadro 3.3, é possível relacionar a informação registada durante as contagens com o ano em que determinado veículo entrou em circulação.

Quadro 3.3 – Idade dos veículos, tendo em conta as letras de matrículas (adaptado de IMTT, 2019).

Data	Matrículas
Até 29 de fevereiro de 1992	AA-00-00
De 01/03/1992 até 24/05/2005	00-00-AA
A partir de 25/05/2005	00-AA-00

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo estão apresentados os resultados obtidos com a medição de partículas atmosféricas, nomeadamente a distribuição por tamanho das partículas atmosféricas em termos de número (partícula/l), massa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e área de superfície (mm^2/l), e as concentrações de PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ e PM_1 . Também são apresentados os resultados da contagem de tráfego rodoviário na área de estudo.

4.1 Distribuição de partículas por tamanho

O espectrómetro de aerossol portátil, GRIMM, foi recolhido no final do período de estudo. De seguida, transferiu-se a informação gravada no cartão de memória SD para o computador utilizando o GRIMM 1178 LabVIEW Software.

Na Figura 4.1, pode-se observar a distribuição por tamanho das concentrações, em termos de número, das partículas atmosféricas durante o período de estudo. Constata-se a existência de um maior número de partículas principalmente nos diâmetros inferiores a $0,5 \mu\text{m}$. Ou seja, existe um maior número de partículas com diâmetro menor.

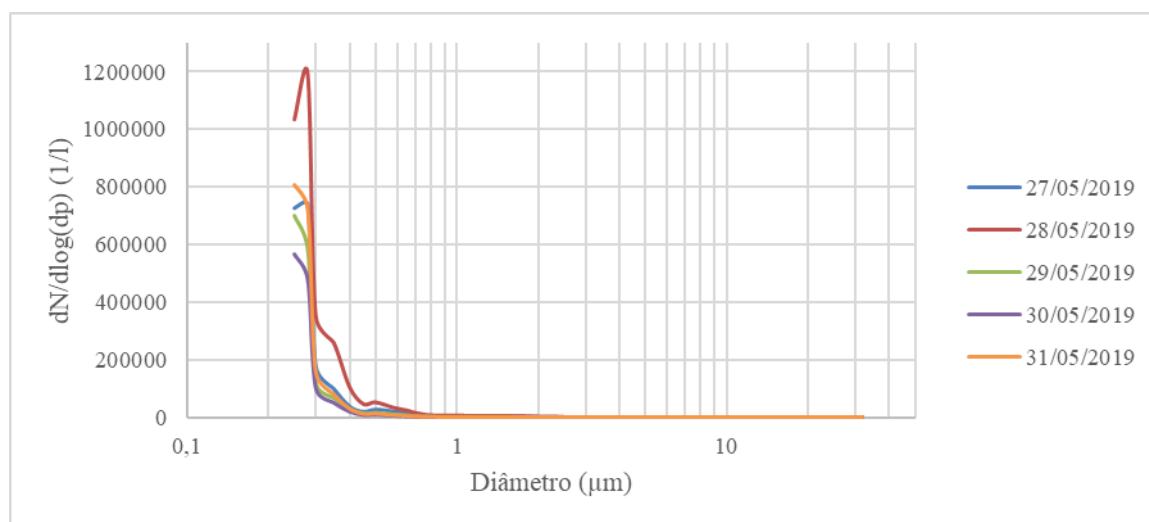


Figura 4.1 – Distribuição do número por tamanho das partículas, de cada dia do período de estudo (27 – 31 de maio de 2019).

Resultados semelhantes foram observados por Pio et al. (2014) num estudo efetuado em Cabo Verde, durante 2011, no qual observaram que na distribuição por tamanho da concentração numérica anual, a maioria das partículas pertencia a diâmetros inferiores a $0,6 \mu\text{m}$. O que pode estar associado ao facto de as partículas de maior dimensão possuírem pouco tempo de vida na

atmosfera, uma vez que, dado o seu tamanho, tendem a depositar-se rapidamente através da gravidade e de processos de impacte provocados pelo vento. Já as partículas com menor dimensão apresentam tempo de vida mais longo, sendo mais suscetíveis ao transporte de longas distâncias (Cardoso, 2016; WHO, 2006a). Neste contexto, as concentrações de partículas atmosféricas observadas no desenvolvimento deste trabalho podem estar associadas a outras fontes (antropogénicas e naturais) que se encontram distantes do local de medição.

A distribuição por tamanho dos dias do período de estudo segue quase sempre o mesmo padrão, exceto no dia 28 de maio. No qual se verifica diferenças quando o diâmetro é igual a 0,28 e a 0,35 μm .

Na Figura 4.2, está representada a distribuição por tamanho da concentração mássica de partículas referentes a cada dia do período de estudo.

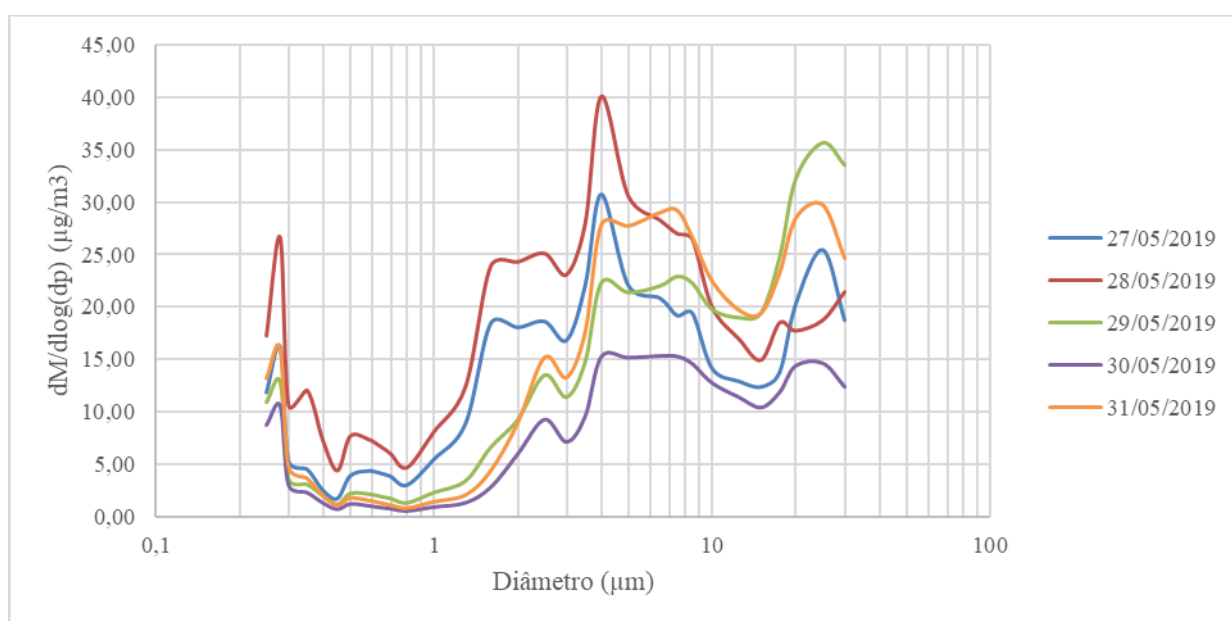


Figura 4.2 – Distribuição das partículas por tamanho, em termos de massa, de cada dia do período de estudo (27 – 31 de maio de 2019).

Analisando a Figura 4.2, verifica-se a existência de uma distribuição por tamanho multimodal. No modo de acumulação foi possível identificar um pico acentuado a 0,28 μm . Resultados semelhantes foram obtidos no estudo desenvolvido por Rovelli et al (2017), no qual referiram que num ambiente urbano típico, as partículas desta ordem de grandeza podem ser resultado das emissões provenientes do tráfego rodoviário, devido aos processos de combustão incompletos da gasolina, gasóleo e outros combustíveis.

No modo grosseiro identificaram-se dois picos acentuados a 4 e a 25 μm . As partículas que se inserem nesta fração de tamanho podem também ser resultado dos processos de ressuspensão provenientes do tráfego rodoviário (WHO, 2006a).

A distribuição por tamanho de cada dia segue o mesmo padrão, apesar das concentrações em cada dia serem diferentes. Verifica-se algumas diferenças no padrão de distribuição em determinados dias, nomeadamente, dia 27 e 28 de maio. Quando o diâmetro é igual a 1,6 μm , observa-se uma diferença na distribuição no dia 27 e 28 de maio comparativamente aos outros dias. Entre 6,5 e 8,5 μm a distribuição por tamanho nos dias 27 e 28 de maio também difere da distribuição dos restantes dias. E ainda, no dia 28 de maio, quando o diâmetro é igual a 25 μm a distribuição não é semelhante à distribuição dos outros dias do período de estudo. As discrepâncias observadas podem estar associadas à massa de ar tropical que atingiu o continente no dia 28 de maio, uma vez que esta afeta as condições meteorológicas como a velocidade do vento, que conseqüentemente influenciam a distribuição de massa das partículas atmosféricas.

Na Figura 4.3, encontra-se representada a distribuição por tamanho, em termos de área de superfície, das concentrações de partículas atmosféricas para cada dia do período de estudo. É possível observar um pico acentuado a 0,28 μm .

Neste estudo, o valor máximo de área de superfície por unidade de volume das partículas atmosféricas observado foi igual a 0,3 mm^2/L , o que não difere muito dos resultados mencionados na literatura revista. Ntziachristos et al. (2007) observou que, junto a uma autoestrada, a concentração média diária de área de superfície das partículas atmosféricas correspondia a 0,15 mm^2/L .

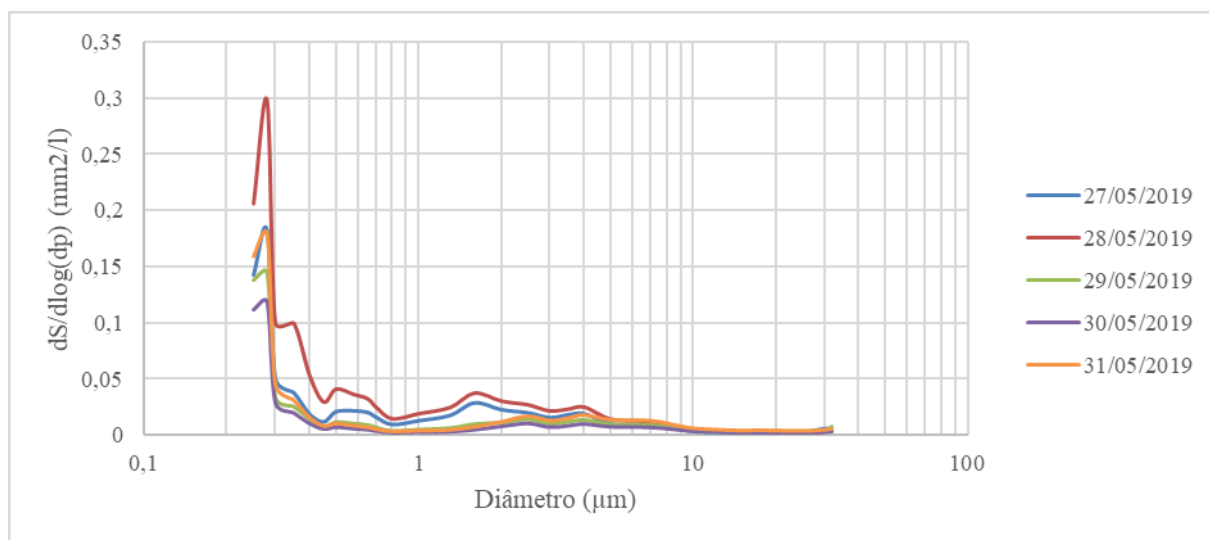


Figura 4.3 - Distribuição por tamanho das partículas, em termos de área de superfície, de cada dia do período de estudo (27 – 31 de maio de 2019).

Pela análise da Figura 4.3, verifica-se que a distribuição por tamanho em cada dia do período de estudo segue quase sempre a mesma tendência. No dia 27 e 28 de maio, constata-se que para um diâmetro igual a 1,6 μm a distribuição por tamanho difere dos restantes dias do período de estudo.

4.2 Concentrações da Matéria Particulada

No presente subcapítulo são apresentadas as concentrações de PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ e PM_1 determinadas com o espectrómetro de aerossol portátil, GRIMM, bem como as concentrações de PM_{10} medidas nas estações de monitorização de qualidade do ar de Coimbra, durante o período de estudo, e respetiva interpretação.

4.2.1 Concentrações de PM_{10}

Neste estudo, após a recolha do aparelho de medição procedeu-se à análise dos dados medidos, onde se determinou as concentrações médias horárias de PM_{10} . Na Figura 4.4, está representada a variação da concentração de PM_{10} ao longo do período de estudo na Rua da Sofia.

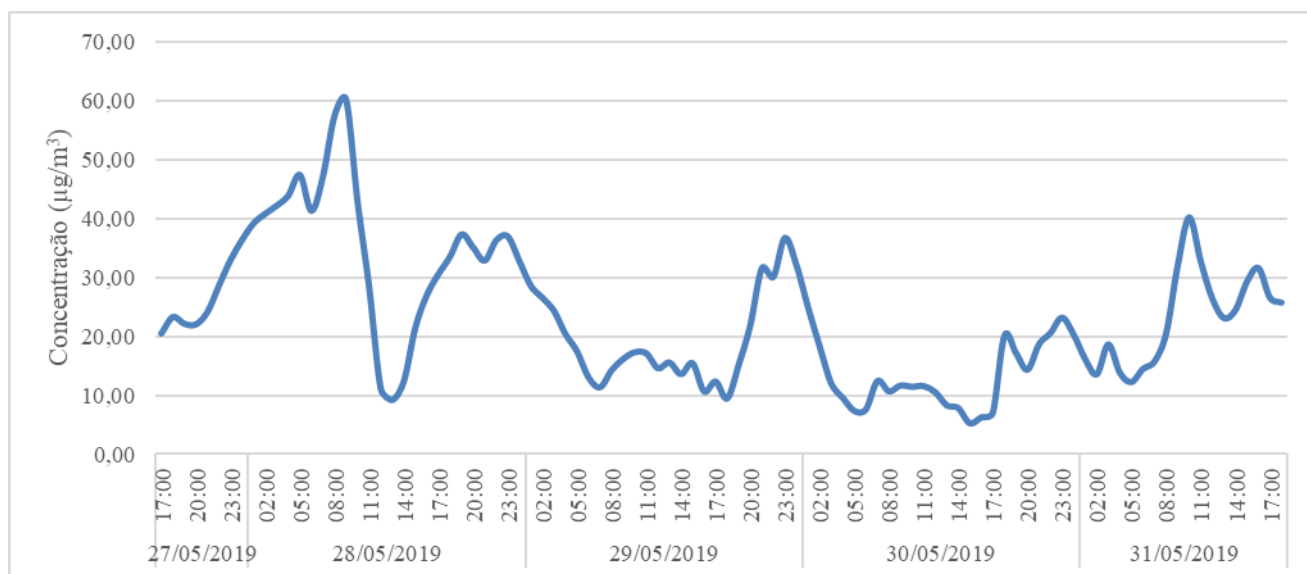


Figura 4.4 - Concentração média horária ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de PM_{10} obtida com o aparelho de medição (GRIMM), durante o período de estudo.

Na Figura 4.4 é possível observar que a concentração de matéria particulada não é constante ao longo do período de estudo. A diferença de concentração observada pode ser resultado da variação de parâmetros que influenciam a concentração de partículas na atmosfera, como, por exemplo, o fluxo de tráfego rodoviário e as condições meteorológicas.

De acordo com Galindo et al. (2011), elevada velocidade do vento contribui para a dispersão de poluentes atmosféricos, levando à redução de concentração de matéria particulada, bem como baixa velocidade do vento contribui para um aumento da concentração de poluentes atmosféricos. E segundo Lin e Lee (2004), elevadas concentrações de partículas atmosféricas correspondem a condições de estagnação (baixa ventilação, menor velocidade do vento e menor altura da camada de mistura).

Pela análise da Figura 4.4, verifica-se um aumento da concentração de PM_{10} , entre as 22h e a 00h do dia 27 de maio, que pode estar relacionado com a diminuição da velocidade do vento observada para o mesmo período de tempo (ver Figura 3.12 do capítulo 3). No dia 28 de maio verifica-se um aumento da concentração de matéria particulada entre as 8h e 10h, momento em que a velocidade do vento também aumenta. Mas nesta situação, o aumento da concentração de partículas atmosféricas poderá estar associado ao volume de tráfego rodoviário, visto que o intervalo de tempo entre as 8h e 10h corresponde ao período de hora de ponta da manhã (Bathmanabhan et al., 2010). Medições efectuadas em cinco cidades europeias demonstraram concentrações elevadas de matéria particulada durante os períodos de tráfego da manhã (WHO, 2006a).

Ainda no dia 28 de maio, observaram-se concentrações de partículas mais baixas entre o 12h e as 16h, altura em que a velocidade do vento estava a aumentar. Entre as 19h e a 00h verificou-se um aumento na concentração da matéria particulada e uma diminuição da velocidade do vento (ver Figura 3.12 do capítulo 3).

Com as concentrações de partículas atmosféricas obtidas foi possível construir gráficos de *boxplot* que permitem uma visão quantitativa das diferentes concentrações de matéria particulada observadas ao longo do período de medição.

Na Figura 4.5, a parte inferior e superior das caixas representam o primeiro (25% dos menores valores) e terceiro (75% dos valores maiores) quartil, respetivamente. A mediana, ou segundo quartil, representa o valor central de uma amostra (50% dos dados) e é representada pela linha na parte de dentro de cada caixa (Neto et al., 2017). As barras de erro representam o 5º e o 95º percentil. Assim, os gráficos *boxplot* permitem analisar a dispersão dos dados de concentração obtidos.

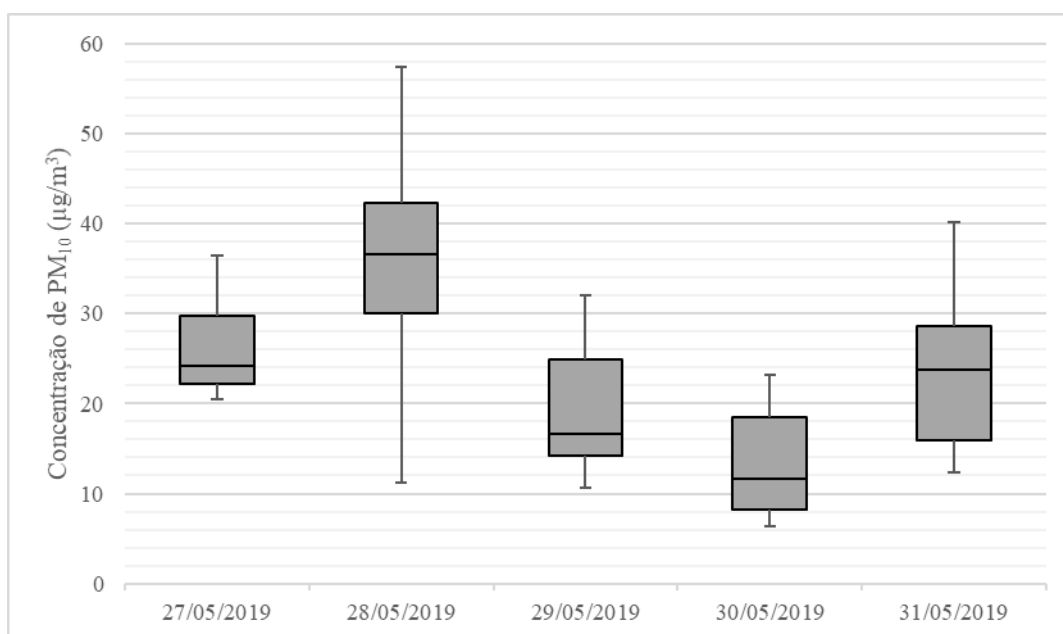


Figura 4.5 - Concentração de PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) obtida com o aparelho de medição (GRIMM), durante o período de estudo.

Pela análise da Figura 4.5, no dia 28 de maio foi registada a mediana mais elevada. Assim, as concentrações de PM_{10} neste dia tendem a ser superiores relativamente aos restantes dias do período de estudo. Já no dia 30 de maio foi registada a menor mediana, pelo que as

concentrações de PM_{10} neste dia tendem a ser inferiores quando comparadas com os restantes dias do período de estudo. Os dias 28 e 31 de maio apresentam uma maior dispersão dos valores de concentração de PM_{10} .

No presente estudo, recorreu-se à base de dados de qualidade do ar, *QualAr*, para retirar as concentrações de PM_{10} , referentes ao período de estudo, medidas nas estações de monitorização de qualidade do ar existentes em Coimbra (identificadas na Figura 4.6). Posteriormente, os dados de concentração obtidos com o espectrómetro de aerossol, GRIMM, na Rua da Sofia foram ainda comparados com as concentrações de PM_{10} medidas nas estações de monitorização de qualidade do ar de Coimbra.

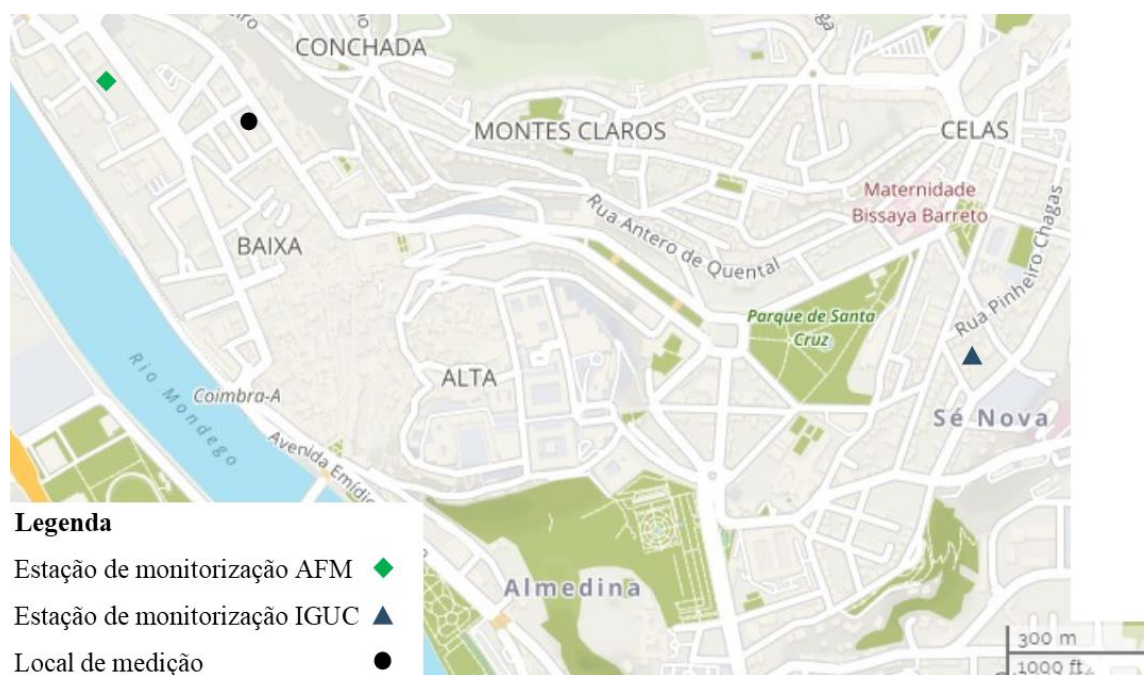


Figura 4.6 - Localização das estações de monitorização de qualidade do ar de Coimbra e do local de medição.

Na Figura 4.7 está representada a variação das concentrações de PM_{10} , ao longo do período de análise, medidas nas duas estações de monitorização da qualidade do ar de Coimbra, bem como a variação da concentração de PM_{10} , ao longo do período de análise, obtida com o equipamento de medição na Rua da Sofia.

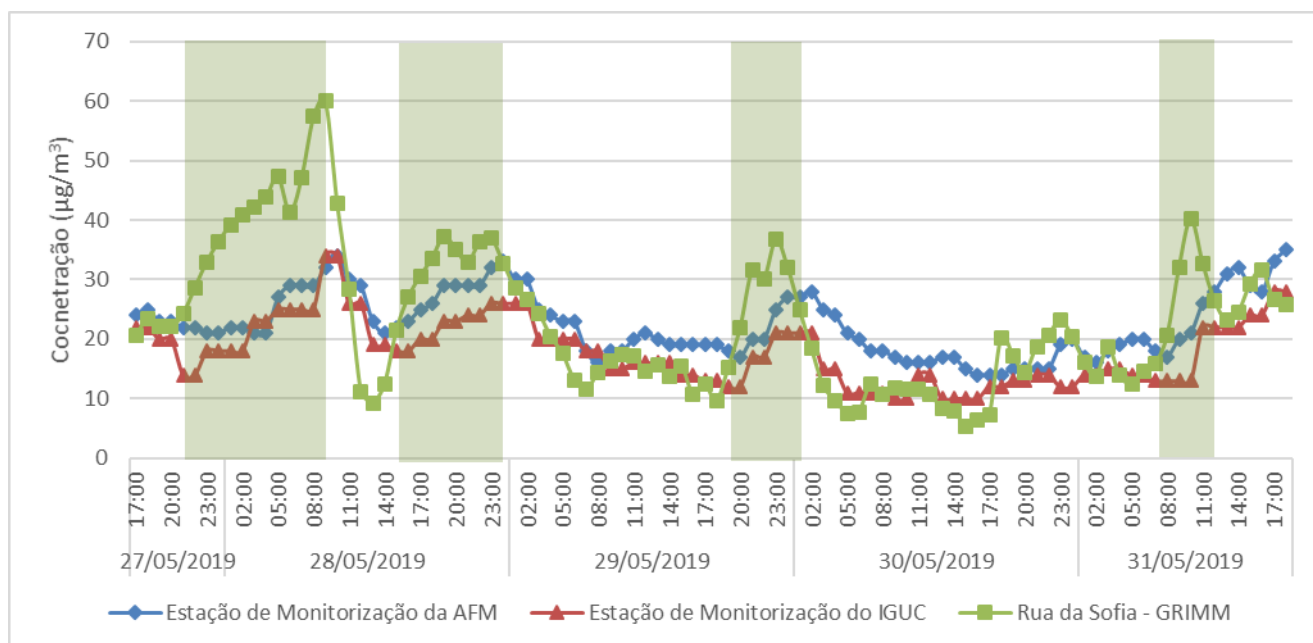


Figura 4.7 - Concentração média horária ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de PM_{10} registada pelas estações de monitorização existentes em Coimbra e pelo aparelho de medição (GRIMM), durante o período de estudo.

Pela análise da Figura 4.7, é possível constatar que as concentrações de PM_{10} registadas na estação de monitorização da Avenida Fernão Magalhães seguem um padrão semelhante às concentrações de PM_{10} registadas na estação do Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra.

A estação de monitorização do IGUC regista uma menor concentração de PM_{10} ao longo do período de estudo, tal se pode atribuir ao facto de esta ser uma estação urbana de fundo. Assim, as concentrações monitorizadas não são directamente influenciadas por fontes de emissão mas, resultam do transporte de poluentes atmosféricos com origem fora da área urbana e das emissões da cidade (APA, 2010a).

Apesar dos valores das concentrações de PM_{10} observadas pelo GRIMM seguirem o mesmo padrão das concentrações de PM_{10} medidas nas estações de monitorização de qualidade do ar de Coimbra torna-se possível verificar algumas discrepâncias.

Na Figura 4.7, estão identificados (a sombreado) os períodos de tempo onde se verificam algumas diferenças, nomeadamente, entre as 21h do dia 27 de maio e as 9h do dia 28 de maio, as 15h e a 00h do dia 28 de maio, as 20h do dia 29 e a 1h do dia 30 de maio e, por fim, entre as 8h e o 12h do dia 31 de maio. Estas diferenças podem estar associadas ao local de

monitorização, bem como ao método de medição utilizado, uma vez que nas estações de monitorização de Coimbra o método utilizado corresponde ao método gravimétrico.

Na Figura 4.8 está representada, na forma de boxplot, as variações de concentrações de PM_{10} registadas nas estações de monitorização existentes em Coimbra e pelo aparelho de medição (GRIMM), durante o período de estudo.

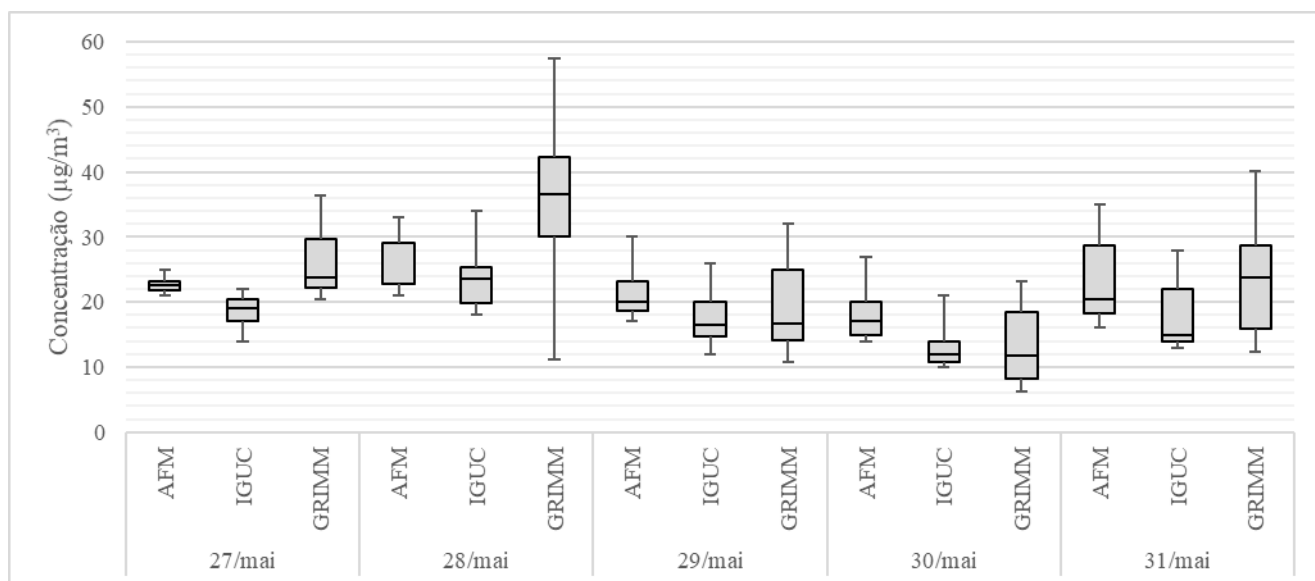


Figura 4.8 – Concentração de PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) registada pelas estações de monitorização existentes em Coimbra e pelo equipamento (GRIMM), durante o período de estudo.

Analisando as concentrações de PM_{10} registadas nas estações de monitorização de Coimbra, verifica-se que também para o dia 28 de maio foi registada a mediana mais elevada. Pelo que, para esse dia, as concentrações de PM_{10} tendem a ser superiores relativamente aos restantes dias do período de estudo. Nas estações de monitorização (AFM e IGUC) no dia 30 de maio também foi registada a menor mediana. E o dia 31 de maio apresenta uma maior dispersão dos valores de concentração de PM_{10} registada nas estações de monitorização (AFM e IGUC).

Tendo em vista verificar se as concentrações diárias de PM_{10} medidas se encontravam em conformidade com os valores limite estabelecidos no Decreto-Lei n.º 47/2017, de 10 de maio de 2017, procedeu-se ao cálculo da concentração média diária de PM_{10} para cada estação de monitorização de qualidade do ar e dos valores obtidos através do GRIMM, referente a cada dia do período de estudo. Pelo que se obteve os valores representados na Figura 4.9.

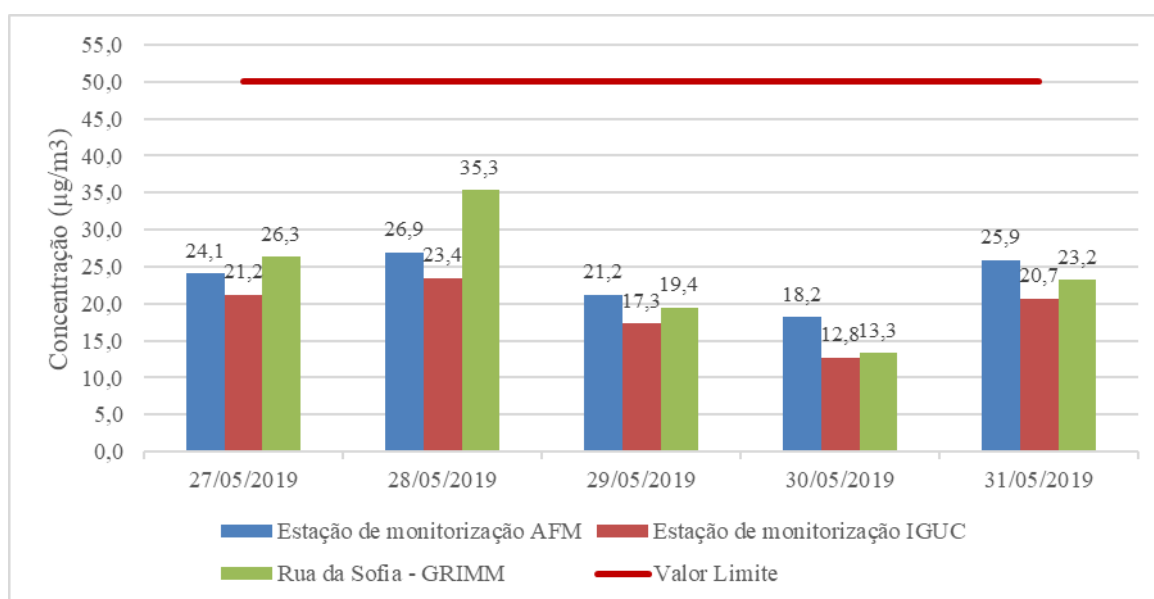


Figura 4.9 - Concentração média diária ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de PM_{10} dos valores registados no GRIMM e nas estações de monitorização de AFM e IGUC, e valor limite.

Pela análise de Figura 4.9, constata-se que o valor limite médio diário para a proteção da saúde humana estabelecido no Decreto-Lei n.º 47/2017, de 10 de maio de 2017, não foi excedido em nenhum dia do período de estudo.

4.2.2 Concentrações de $\text{PM}_{2.5}$ e de PM_{10}

Neste estudo, adicionalmente a PM_{10} , procedeu-se à análise dos dados medidos, onde se determinou as concentrações médias horárias de $\text{PM}_{2.5}$ e de PM_{10} , que estão representadas na Figura 4.10.

As estações de monitorização da Avenida Fernão Magalhães e do Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra, não monitorizam as $\text{PM}_{2.5}$ e PM_{10} , como tal não é possível comparar com as concentrações medidas pelo equipamento de medição, GRIMM, utilizado neste estudo.

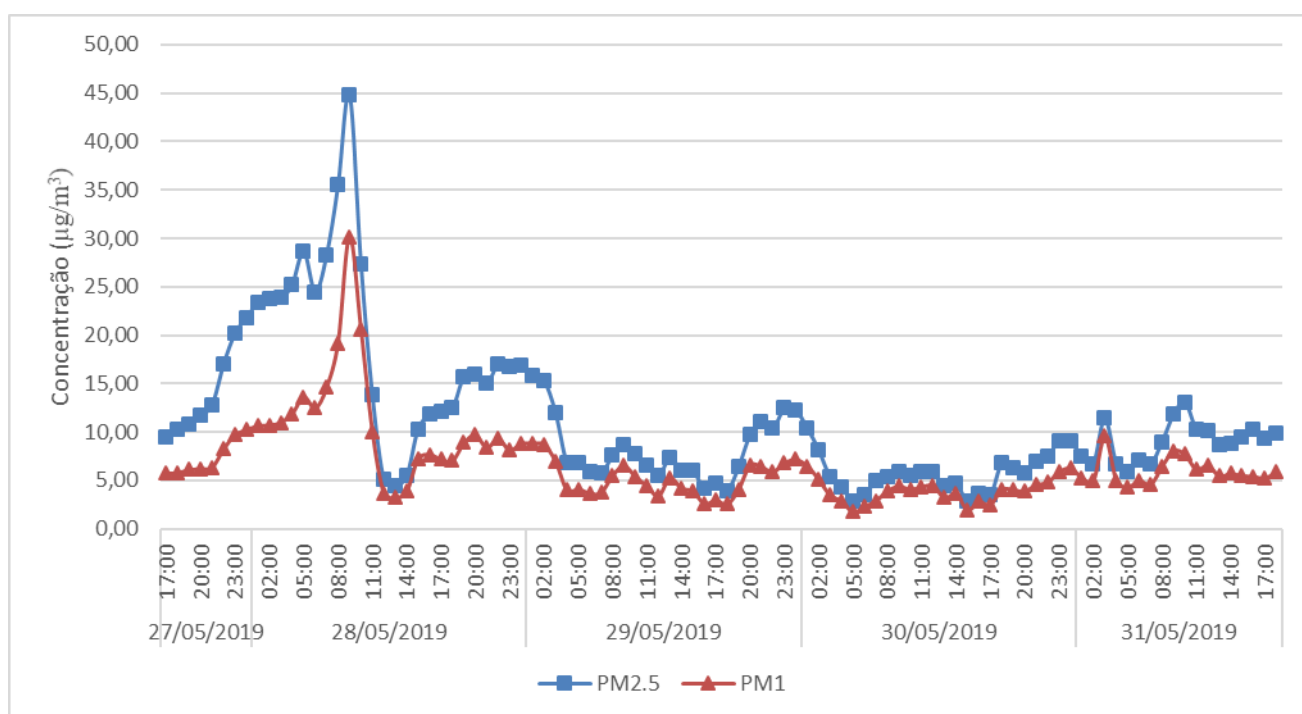


Figura 4.10 - Concentração mássica ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de $\text{PM}_{2.5}$ e PM_1 registada pelo aparelho de medição (GRIMM), durante o período de estudo.

Utilizando as concentrações de matéria particulada obtidas com o equipamento de medição, GRIMM, utilizado neste estudo, foi possível construir um gráfico de *boxplot* que representa a dispersão das concentrações de $\text{PM}_{2.5}$ e de PM_1 em cada dia do período de estudo do período de estudo (Figura 4.11).

Na Figura 4.11, a parte inferior e superior das caixas representam o primeiro (25% dos menores valores) e terceiro (75% dos valores maiores) quartil, respetivamente. A mediana, ou segundo quartil, é representada pela linha na parte de dentro de cada caixa. As barras de erro representam o 5º e o 95º percentil.

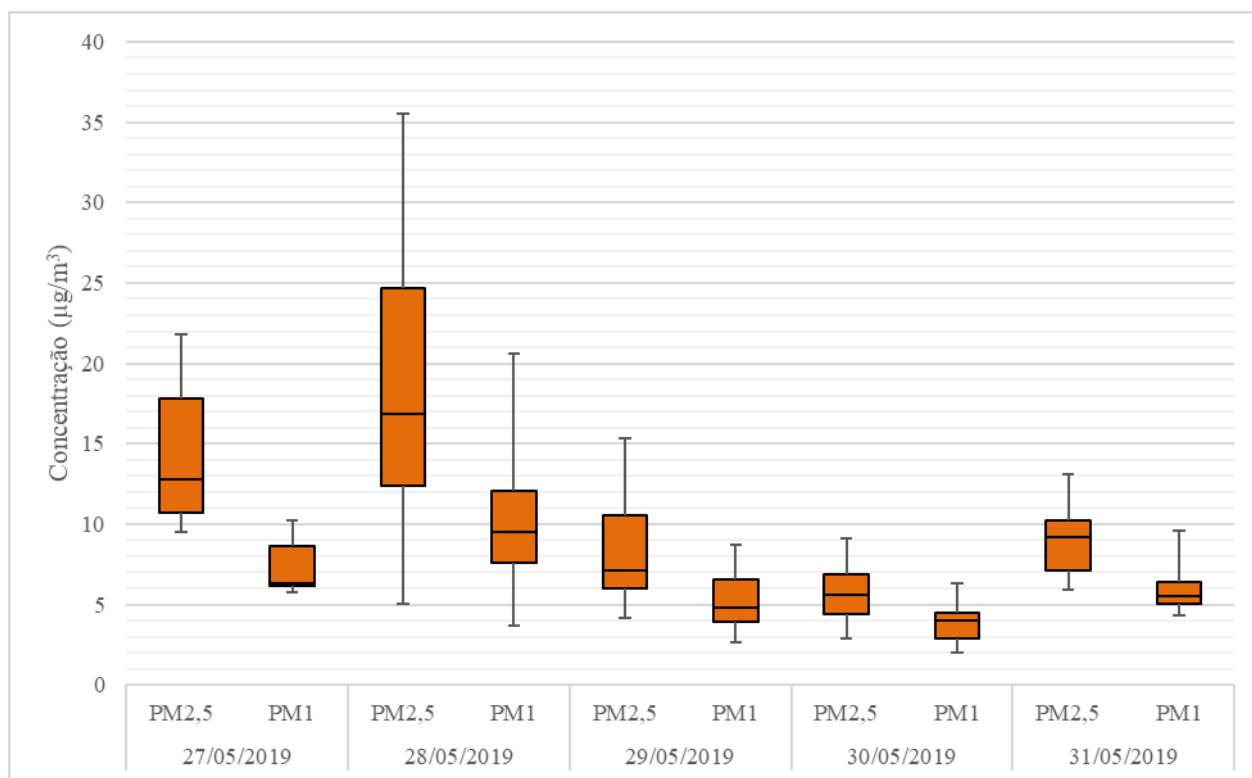


Figura 4.11 - Concentração média horária de $PM_{2.5}$ e de PM_1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) obtida com o aparelho de medição (GRIMM), durante o período de estudo.

Semelhante à concentração de PM_{10} , no dia 28 de maio foi registrada a mediana mais elevada, pelo que as concentrações de $PM_{2.5}$ e de PM_1 tendem a ser superiores em relação aos restantes dias do período de estudo. Também no dia 30 de maio foi registrada a menor mediana, tanto para $PM_{2.5}$ como para PM_1 . Assim, as concentrações neste dia tendem a ser inferiores relativamente aos restantes dias do período de análise. O dia 28 de maio apresenta a maior dispersão dos valores de concentração de $PM_{2.5}$ e de PM_1 , comparativamente aos restantes dias do período de estudo.

No Decreto-lei nº47/2017 de 10 de maio apenas se encontra estipulado o valor-limite anual (média) para $PM_{2.5}$. Neste projeto, o período de medição de partículas atmosféricas foi de cinco dias, como tal apenas se tem acesso à concentração média horária e diária de $PM_{2.5}$ ao longo do período referido. Sendo assim, como se pode observar na Figura 4.12, os valores de concentração média diária de cada dia do período de estudo com o valor de $PM_{2.5}$ (médio diário) recomendado pela Organização Mundial da Saúde, nomeadamente $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO, 2006a).

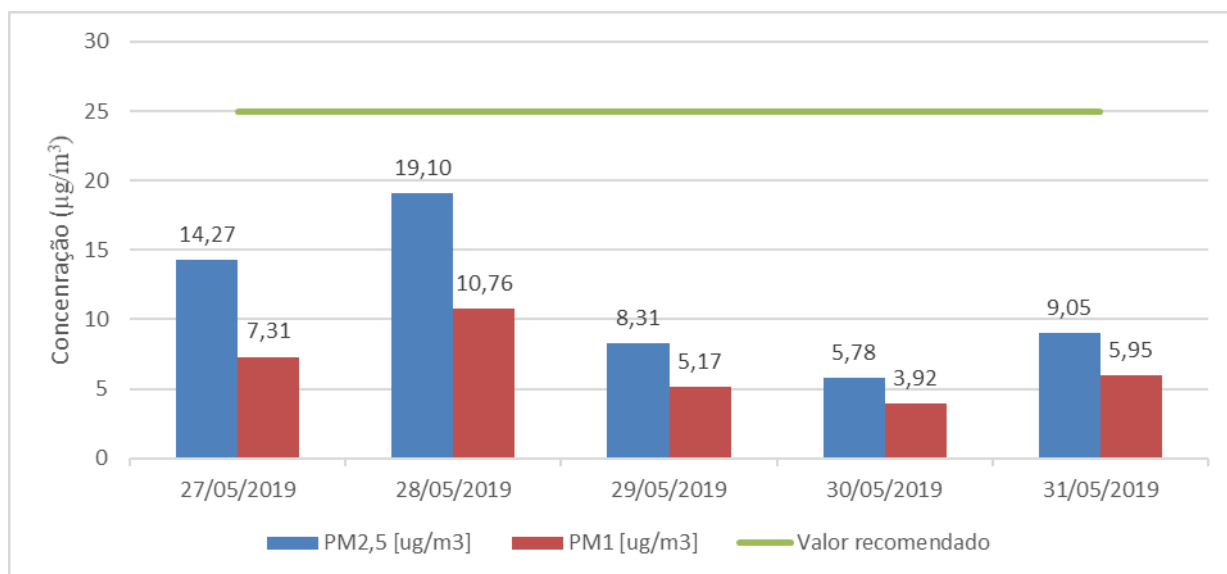


Figura 4.12 - Concentração média diária ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de $\text{PM}_{2.5}$ e PM_1 dos valores registados no GRIMM, e valor recomendado pela Organização Mundial da Saúde para $\text{PM}_{2.5}$.

Observando a Figura 4.12 verifica-se que em nenhum dia o valor médio diário recomendado pela OMS foi excedido.

4.3 Caracterização do tráfego rodoviário na Rua da Sofia

Através da contagem de tráfego realizada neste trabalho, foi então possível obter o número de veículos que circulavam na via (dois sentidos), por categoria, durante determinados períodos de tempo. Na Figura 4.13, encontra-se representado o número de veículos determinados, por categoria, para cada hora de contagem.

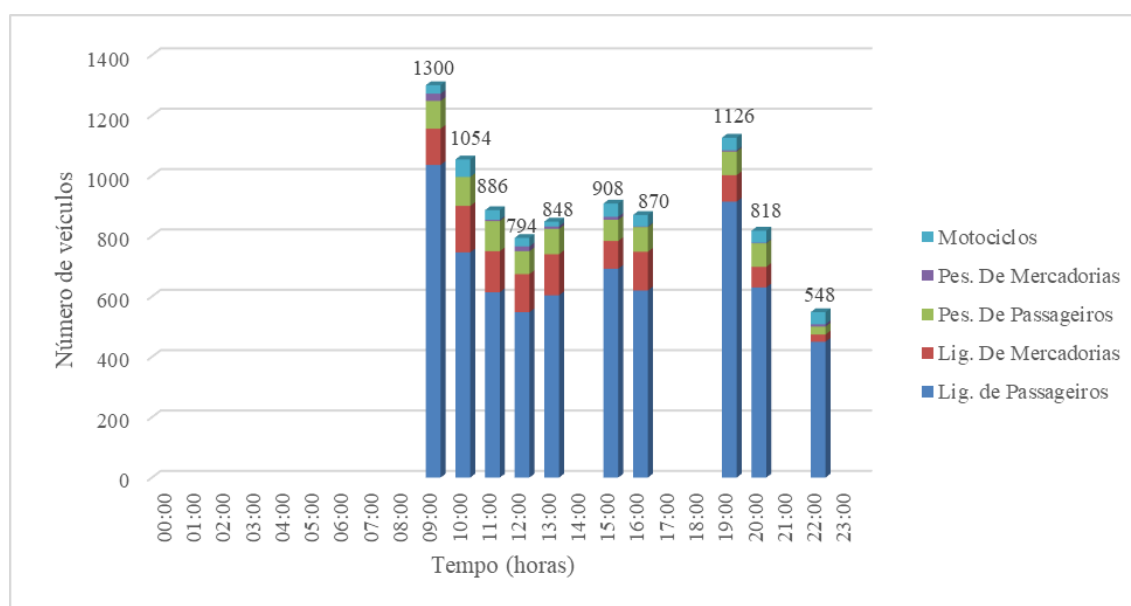


Figura 4.13 - Número de veículos observados na Rua da Sofia por categoria, em cada hora de contagem, no dia 28 de maio de 2019.

Ao analisar a Figura 4.13, verifica-se que no período da manhã a hora de ponta corresponde às 9h, na qual se registou um total de 1300 veículos em circulação, em ambas as faixas de rodagem. Enquanto que na parte da tarde se verifica um pico às 19h, registando-se 1126 veículos. Também se procedeu ao cálculo das percentagens de veículos correspondentes a cada categoria, como se pode observar na Figura 4.14.

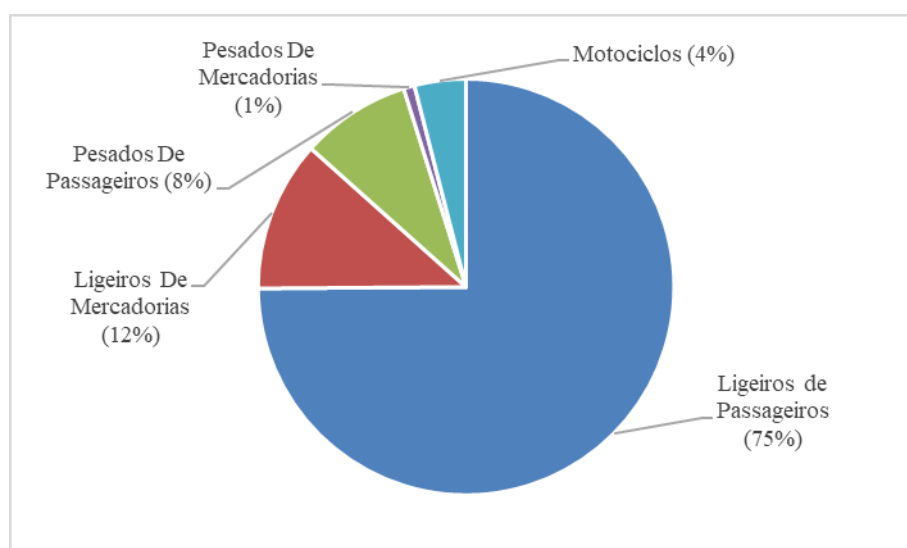


Figura 4.14 – Percentagem de veículos em circulação na Rua da Sofia por categoria, no dia 28 de maio de 2019.

Analisando a Figura 4.14, verifica-se que os veículos ligeiros de passageiros correspondem a 75% do número total de viaturas que se encontravam em circulação durante as horas de contagem de tráfego. Relativamente aos restantes veículos, 12% correspondem a ligeiros de mercadorias, 8% a pesados de passageiros e 4% a motociclos, sendo que apenas 1% do número total de veículos registados corresponde a pesados de mercadorias.

Através dos dados adquiridos durante a contagem de tráfego não foi possível construir um perfil de tráfego para a Rua da Sofia, uma vez que a contagem de tráfego não foi efetuada durante o dia inteiro. Assim, os dados obtidos foram comparados com resultados (perfil de tráfego) de um trabalho realizado (Pinto, 2014) na proximidade da área de estudo, nomeadamente a Avenida Fernão Magalhães. É importante mencionar que o perfil de tráfego referido pode não representar um dia típico de circulação, uma vez que o perfil de tráfego é relativo a um dia. Na Figura A7 do anexo, encontra-se representado o perfil de tráfego relativo à Avenida Fernão Magalhães (a linha azul) e o número de veículos registados na Rua da Sofia no dia das contagens de tráfego.

A Avenida Fernão Magalhães é um dos principais eixos de acessibilidade ao Centro Histórico, constituindo-se como elemento estruturante da mobilidade e acessibilidade da população, suportando um elevado volume de tráfego rodoviário (CMC, 2012). Analisando a Figura A7 do anexo, nesse eixo viário verifica-se uma maior circulação de veículos, nomeadamente das 9h até às 20h, sendo que as 19h corresponde à hora na qual se regista um maior volume de tráfego. Em contrapartida, na Rua da Sofia, a hora em que se registou maior volume de tráfego foi às 9h.

Na Figura 4.15, está representada a amostra de veículos registados para análise da idade dos mesmos, sendo que se obteve um total de 3100 veículos.

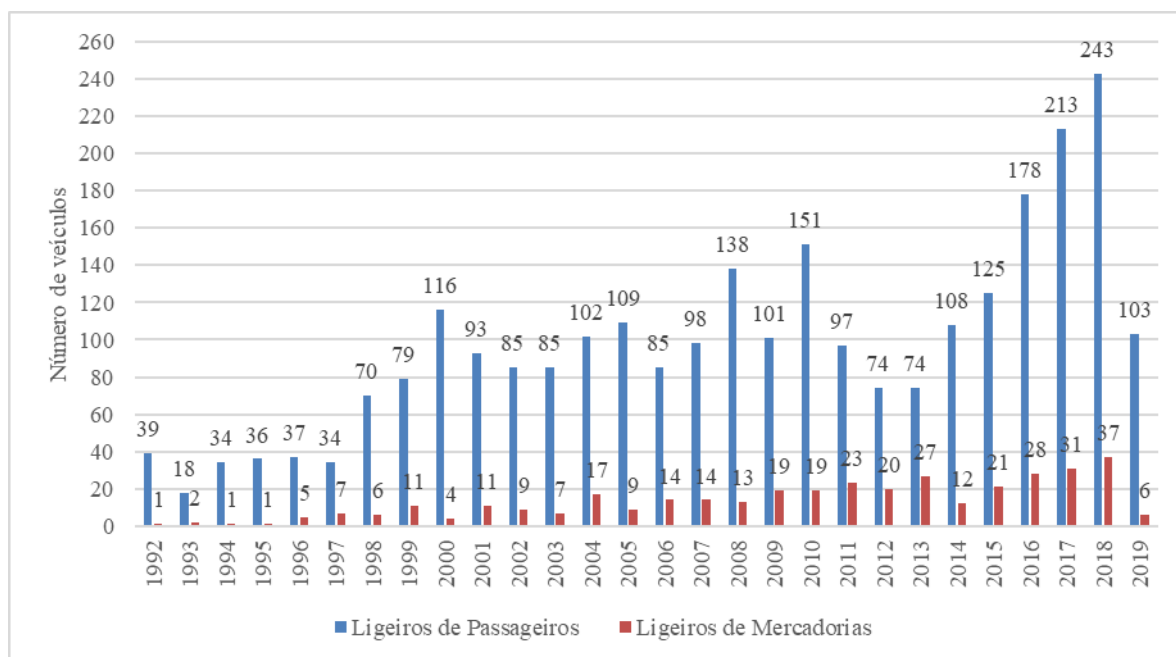


Figura 4.15 – Amostra considerada para análise da idade dos veículos em circulação na zona de estudo, por categoria, no dia 28 de maio de 2019.

Considerando a informação presente no Quadro 3.1 e a idade dos veículos observados, determinou-se o número de veículos pertencentes a cada classe. Na Figura 4.16, está representada a percentagem de veículos ligeiros de passageiros repartidos pelas diferentes classes. E na Figura 4.17, está representada a percentagem de veículos ligeiros de mercadorias repartidos pelas diferentes classes. A idade dos veículos foi determinada tendo em conta a base de dados da Associação Nacional do Ramo Automóvel (ARAN) (ARAN, 2019), e as letras de matrículas obtidas com base na amostra.

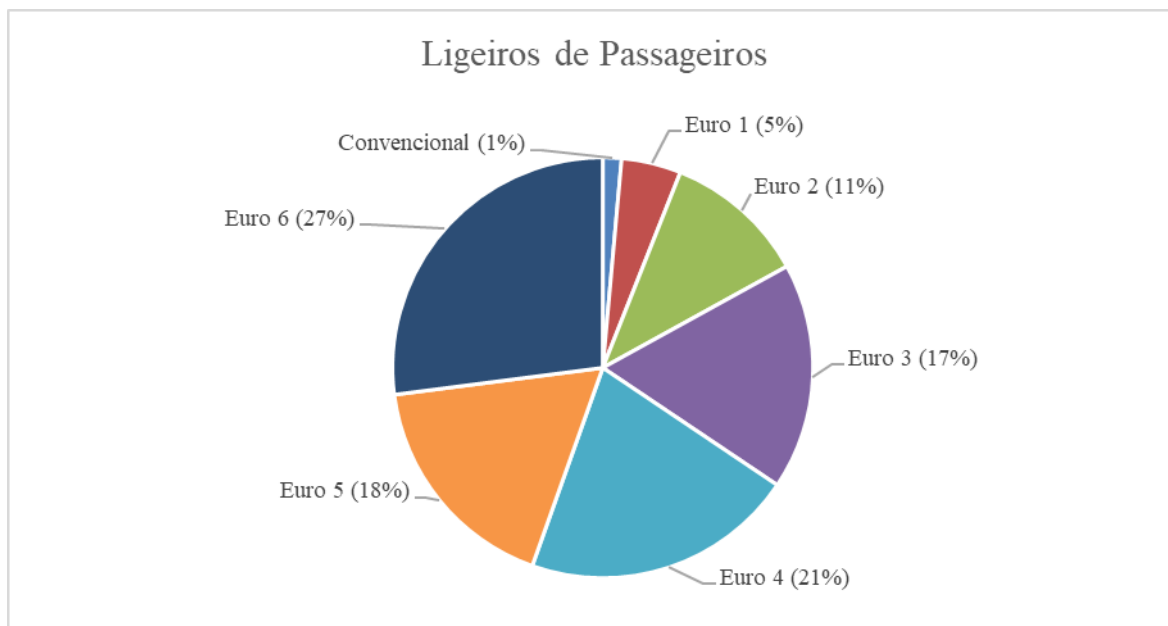


Figura 4.16 - Percentagem de veículos ligeiros de passageiros repartidos pelas diferentes classes.

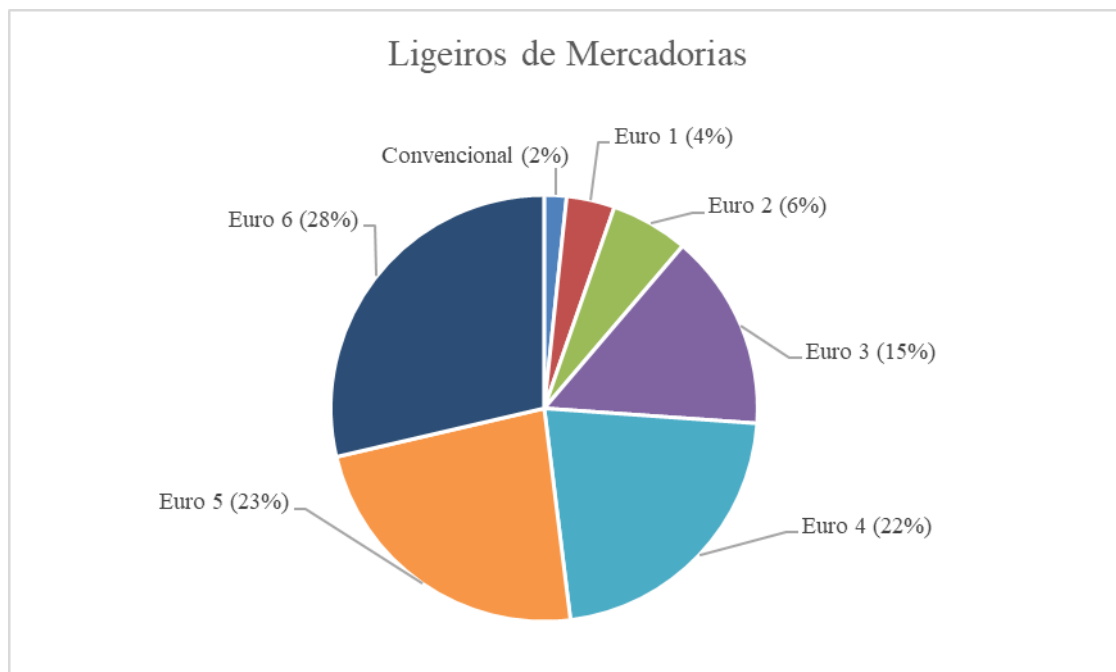


Figura 4.17 - Percentagem de veículos ligeiros de mercadorias repartidos pelas diferentes classes.

Na categoria de ligeiros de passageiros, constata-se que as classes predominantes são o Euro 6, Euro 4 e Euro 5, representando 27%, 21% e 18% dos veículos registados nesta categoria, respetivamente. Na categoria de ligeiros de mercadorias, verifica-se que 28% dos veículos registados pertencem à classe Euro 6, 23% pertence ao Euro 5 e 22% ao Euro 4.

No Quadro 4.1 encontra-se representado, em termos de idade, o número de veículos ligeiros de passageiros em circulação em Portugal, bem como o número de veículos observados na Rua da Sofia. Comparando os conjuntos de valores, verifica-se que os veículos observados na Rua da Sofia são mais recentes do que os veículos em circulação a nível nacional.

Quadro 4.1 – Idade e número de veículos ligeiros de passageiros observados na Rua da Sofia, no dia 28 de maio de 2019, e em circulação em Portugal no ano de 2018 (adaptado de ACAP e AUTO INFORMA, 2018).

Idade dos veículos	Rua da Sofia		Nacional	
	Nº de veículos	%	Nº de veículos	%
Até 1 ano	103	3,78	208095,00	4,3
De 1 a 2 anos	243	8,92	209266,00	4,4
De 2 a 3 anos	213	7,82	182620,00	3,8
De 3 a 4 anos	178	6,53	157376,00	3,3
De 4 a 5 anos	125	4,59	134879,00	2,8
De 5 a 10 anos	504	18,50	967461,00	20,2
De 10 a 15 anos	531	19,49	1053403,00	21,9
De 15 a 20 anos	481	17,65	1110212,00	23,1
Mais de 20 Anos	347	12,73	776687,00	16,2
Total	2725		4800000	

No Quadro 4.2 encontra-se representado, em termos de idade, o número de veículos ligeiros de mercadorias em circulação em Portugal, bem como o número de veículos observados na Rua da Sofia. Comparando os conjuntos de valores, verifica-se que as percentagens referentes à idade dos veículos observados na Rua da Sofia são muito distintas das percentagens registadas a nível nacional, sendo que veículos observados na Rua da Sofia são mais recentes do que os veículos em circulação a nível nacional.

Quadro 4.2 - Idade e número de veículos ligeiros de mercadorias observados na Rua da Sofia, no dia 28 de maio de 2019, e em circulação em Portugal no ano de 2018 (adaptado de ACAP e AUTO INFORMA, 2018).

Idade dos veículos	Rua da Sofia		Nacional	
	Nº de veículos	%	Nº de veículos	%
Até 1 ano	6	1,6	31334	2,8
De 1 a 2 anos	37	9,9	32305	2,9
De 2 a 3 anos	31	8,3	29222	2,7
De 3 a 4 anos	28	7,5	25427	2,3
De 4 a 5 anos	21	5,6	18389	1,7
De 5 a 10 anos	101	26,9	178042	16,2
De 10 a 15 anos	69	18,4	291218	26,5
De 15 a 20 anos	48	12,8	304932	27,7
De 20 a 25 anos	34	9,1	189131	17,2
Total	375		1100000	

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido no âmbito da presente dissertação teve como principal objetivo a caracterização de partículas atmosféricas em ambiente urbano, em termos de distribuição por tamanho, concentração mássica e numérica. Como tal, foram efetuadas medições dos níveis de poluição do ar, nomeadamente de partículas atmosféricas, utilizando um espectrómetro de aerossol portátil, GRIMM, Modelo 11-C.

As medições decorreram ao longo de cinco dias, especificamente desde dia 27 até dia 31 de maio de 2019. A área de estudo considerada neste trabalho foi a Rua da Sofia, localizada na área urbana da cidade de Coimbra. A zona de estudo pertence ao conjunto histórico e cultural, “Universidade de Coimbra – Alta e Sofia”, que em 2013 foi classificado como Património Mundial da Humanidade pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO).

Durante o período de estudo efetuou-se uma contagem manual de veículos, nomeadamente no dia 28 de maio de 2019 (entre as 8h e as 21h), com o objetivo de caracterizar o volume de tráfego rodoviário na zona de estudo.

Posteriormente, procedeu-se ao tratamento dos dados medidos com o espectrómetro de aerossol portátil, GRIMM, que foram transferidos para o computador através do GRIMM 1178 LabView Software. No tratamento de dados foram determinadas as concentrações médias horárias e diárias de PM_{10} , $PM_{2.5}$ e PM_1 , que permitiram observar a variação da concentração ao longo do período de estudo.

As concentrações médias horárias de PM_{10} foram ainda comparadas com as concentrações medidas nas estações de monitorização de qualidade do ar de Coimbra, nomeadamente a estação de monitorização da Avenida Fernão Magalhães e a estação de monitorização do Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra. A distribuição por tamanho de partículas atmosféricas, em termos de concentração numérica, mássica e área de superfície por unidade de volume, foi obtida através das funcionalidades do GRIMM 1178 LabView Software.

Para caracterizar as condições meteorológicas perto do local de estudo e durante o período em questão, analisou-se informação relativa a parâmetros meteorológicos que afetam as concentrações de partículas presentes na atmosfera. Essa informação foi registada por estações meteorológicas próximas da área de estudo.

Com este estudo, foi possível concluir que a distribuição por tamanho da concentração mássica de partículas no período de estudo é multimodal. Verificando-se um pico acentuado no modo

de acumulação, nomeadamente a 0,28 μm . E dois picos acentuados no modo grosseiro, nomeadamente a 4 e a 25 μm . Na distribuição por tamanho da concentração numérica, constatou-se que a maioria das partículas atmosféricas para o período de estudo tem diâmetro inferior a 0,5 μm . Relativamente à distribuição por tamanho em termos de área de superfície por unidade de volume, observou-se um pico acentuado a 0,28 μm .

Com a análise efetuada concluiu-se que a concentração de PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ e PM_1 não é constante ao longo do período de estudo, variando ao longo de cada dia. A diferença de concentração observada pode ser resultado da variação de parâmetros que influenciam a concentração de partículas na atmosfera, como o fluxo de tráfego rodoviário e condições meteorológicas (ex: velocidade de vento). Foi possível concluir que, apesar do local de medição ser fortemente influenciado pelo tráfego rodoviário, as concentrações de partículas atmosféricas são maioritariamente afetadas pelas condições meteorológicas. Uma vez que as variações de concentração de partículas na atmosfera coincidem com as alterações observadas nos parâmetros meteorológicos. E porque nem sempre se observou um aumento da concentração de matéria particulada nos períodos das horas de ponta de tráfego rodoviário.

Ainda foi possível concluir que as concentrações médias diárias de PM_{10} referentes ao período de estudo, obtidas com o equipamento de medição utilizado neste trabalho, não excederam o valor limite (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) estabelecido no Decreto-Lei nº47/2017, de 10 de maio. As concentrações médias diárias de $\text{PM}_{2.5}$, referentes ao período de estudo, obtidas com o equipamento de medição utilizado neste trabalho, também não excederam o valor recomendado (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pela Organização Mundial de Saúde.

Tendo em conta o trabalho desenvolvido na presente dissertação, sugere-se que, no futuro, se realize o cálculo de emissões provenientes do tráfego rodoviário que circula na Rua da Sofia através de modelação, e ainda uma caracterização da composição química das partículas atmosféricas através de métodos de medição adequados, para ajudar na interpretação dos dados obtidos através das medições.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACAP e AUTO INFORMA. (2018). *ESTATÍSTICAS DO SECTOR AUTOMÓVEL*. Associação Automóvel de Portugal e Comercialização de Estudos e Prestação de Serviços no Sector Automóvel, Unipessoal, Lda.

Alam, K., Blaschke, T., Madl, P., Mukhtar, A., Hussain, M., Trautmann, T., e Rahmane, S. (2011). “Aerosol Size Distribution and Mass Concentration Measurements in Various Cities of Pakistan.” *Journal of Environmental Monitoring*, **13**, 1944–52.

APA. (2019a). *Portuguese National Inventory Report on Greenhouse Gases, 1990–2007 submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol*. Maio, 2019. Amadora, Portugal. Agência Portuguesa do Ambiente.

APA. (2019b). *QualAr – Base de Dados Online sobre a Qualidade do Ar*. Agência Portuguesa do Ambiente. Acedido em 8 de agosto de 2019, em: <https://qualar1.apambiente.pt/qualar/index.php?page=4&subpage=3&estacao=2006>

APA. (2010a). *MANUAL DE MÉTODOS E DE PROCEDIMENTOS OPERATIVOS DAS REDES DE MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR - Amostragem e Análise*. Laboratório de Referência do Ambiente. Agência Portuguesa do Ambiente.

APA. (2010b). *Qualidade do Ar em Espaços Interiores - Um Guia Técnico*. Agência Portuguesa do Ambiente.

ARAN. (2019). *Matrículas por ano*. Associação Nacional do Ramo Automóvel. Acedido a 10 de junho de 2019, em: <https://www.site.aran.pt/index.php/matriculas-por-ano>

Asbach, C. (2010). “Development and Evaluation of a Highly Effective Gas Particle Partitioner with Minimal Effect on the Gas Composition”, Tese de Doutoramento, Universidade de Duisburgo-Essen, Alemanha. Retirado de: https://duepublico2.uni-due.de/receive/duepublico_mods_00005538

Bathmanabhan, S., Nagendra, S., & Madanayak, S. (2010). “Analysis and interpretation of particulate matter – PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ emissions from the heterogeneous traffic near an urban roadway”. *Atmospheric Pollution Research*, *1*(3), 184–194. <https://doi.org/10.5094/APR.2010.024>

Burkart, J., Steiner, G., Reischl, G., Moshhammer, H., Neuberger, M., & Hitzemberger, R. (2010). “Characterizing the performance of two optical particle counters (Grimm OPC1.

108 and OPC 1.109) under urban aerosol conditions.” *Journal of Aerosol Science*, 41(10), 953–962. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2010.07.007>

Cardoso, J. G. (2016). “Estudo do Aerossol (poeira do Sara) na região de Cabo Verde.”, Tese de Doutoramento. Departamento do Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro. Aveiro

CCDRC. (2012). *A Preservação da Qualidade do Ar – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro*. Acedido em 7 de agosto de 2019, em: http://www.ccdrc.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=261:a-preservacao-da-qualidade-do-ar&catid=275&Itemid=183

CCDR-N. (2014). “Relatório de Análise Estatística dos Dados de Qualidade do Ar, da Região Norte, em 2013”. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte.

Chow, J. C. (1995). “Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles.” *Journal of the Air and Waste Management Association*, 45(5), 320–382. <https://doi.org/10.1080/10473289.1995.10467369>

CMC. (2019). *Património Mundial da Humanidade*. Câmara Municipal de Coimbra. Acedido em 19 de outubro de 2019, em: <https://www.cm-coimbra.pt/areas/visitar/7-razoes-para-visitar/1-patrimonio-mundial-da-humanidade>

CMC. (2012). *Área de Reabilitação Urbana - Estudos de Caracterização (Vol.B)*. Parque Expo. Câmara Municipal de Coimbra. Acedido a 25 de julho de 2019, no site da Câmara Municipal de Coimbra: <https://www.cm-coimbra.pt/areas/viver/urbanismo-em-atualizacao-2/reabilitacao-urbana/em-vigor/areas-de-reabilitacao-urbana/coimbra-alta-2/coimbra-alta>

CTCV e CCDRC. (2010). *Plano de Melhoria da Qualidade do Ar na Região Centro*. Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, e Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro.

Davidson, C. I., Phalen, R. F., & Solomon, P. A. (2005). “Airborne particulate matter and human health: A review.” *Aerosol Science and Technology*, 39(8), 737–749. <https://doi.org/10.1080/02786820500191348>

DL-47/2017 de 10 de maio. *Diário da República nº90. I Série*. Ministério do Ambiente.

EEA. (2018a). “Air quality in Europe - 2018 report.” EEA Report. No 12/2018. European Environment Agency

EEA. (2018b). “EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 – Update Jul. 2018, 1.A.3.b.i, 1.A.3.b.ii, 1.A.3.b.iii, 1.A.3.b.iv Passenger cars, light commercial trucks, heavy-duty vehicles including buses and motor cycles”, European Environment Agency.

EEA. (2013). “SINAIS DA AEA 2013 O ar que respiramos - Melhorar a qualidade do ar na Europa”. European Environment Agency, Copenhagen.

Galindo, N., Varea, M., Gil-Moltó, J., Yubero, E., & Nicolás, J. (2011). “The influence of meteorology on particulate matter concentrations at an urban mediterranean location.” *Water, Air, and Soil Pollution*, 215(1–4), 365–372. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0484-z>

GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG. (2016a). “*GRIMM 1178 Software for Optical Particle Counter Portable and Stationary Aerosol Spectrometers.*”

GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG. (2016b). “*Portable Laser Aerosol Spectrometer Model 11-C.*”

GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co. KG. (2009). “New Methods to Measure Environmental Exposure in Real Time.”, OECD Conference Center, Paris, France.

Grimm, H., e Eatough, D. J. (2009). “Aerosol measurement: The use of optical light scattering for the determination of particulate size distribution, and particulate mass, including the semi-volatile fraction.” *Journal of the Air and Waste Management Association*, 59(1), 101–107. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.59.1.101>

Hinds, William C. (1982). “Aerosol Technology. Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles”. 1º Edição. John Wiley & Sons, Los Angeles, California.

IMTT. (2019). *Número de matrícula*. Instituto de Mobilidade e dos Transportes Terrestres, I.P. Acedido a 20 de outubro de 2019, em: <http://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/Veiculos/IdentificacaoVeiculos/Numeromatrricula/Paginas/NumeroMatricula.aspx>

IMTT. (2011). “*Contagens e Inquéritos de Tráfego - Coleção de Brochuras Técnicas/Temáticas.*” Pacote da Mobilidade, Território, Acessibilidade e Gestão da Mobilidade. Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres I.P.

IPMA. (2019). *BOLETIM CLIMATOLÓGICO - Maio 2019, Portugal Continental*. Instituto Português do Mar e da Atmosfera.

- Kulkarni, P., Baron, P. A., Willeke, K. (2011). “Aerosol Measurement: Principles, Techniques, Applications.” 3ª Edição. John Wiley & Sons, Los Angeles, California.
- Lin, J. J., & Lee, L. C. (2004). Characterization of the concentration and distribution of urban submicron (PM₁) aerosol particles. *Atmospheric Environment*, 38(3), 469–475. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.09.056>
- Neto, J. V., Barbosa, C., Torres, É. M., e Estrela, C. (2017). BOXPLOT: UM RECURSO GRÁFICO PARA A ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE DADOS QUANTITATIVOS, 26(76), 1–6.
- Ntziachristos, L., Polidori, A., Phuleria, H., Geller, M. D., Sioutas, C. (2007). Application of a Diffusion Charger for the Measurement of Particle Surface Concentration in Different Environments Application of a Diffusion Charger for the Measurement of Particle Surface Concentration in Different Environments, 41:6, 571-580. <https://doi.org/10.1080/02786820701272020>
- Pinto, T. (2014). “Modelação de Poluentes Atmosféricos em Área Urbana do Concelho de Coimbra.”, Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra. Coimbra.
- Pio, C. A., Calvo, A., Custódio, D., Alves, C. A., Cerqueira, M. A., Cardoso, J. G., Almeida, M. S., Nunes, T., Almeida-Silva, M. (2014). Seasonal variability of aerosol concentration and size distribution in Cape Verde using a continuous aerosol optical spectrometer. *Frontiers in Environmental Science*, 2. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00015>
- QualAr. (2019). *Rede QualAr – A Rede de Medição*. Acedido em 8 de agosto de 2019, em: <https://qualar.apambiente.pt/node/rede-de-medicao-da-qualidade-do-ar>
- Rovelli, S., Cattaneo, A., Borghi, F., Spinazzè, A., Campagnolo, D., Limbeck, A., & Cavallo, D. M. (2017). Mass Concentration and Size-Distribution of Atmospheric Particulate Matter in an Urban Environment. *Aerosol and Air Quality Research*, (17), 1142–1155. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.08.0344>
- Seinfeld, J. H. (1986). “Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution”. 1ª Edição. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.
- Seinfeld, J. H., Pandis, N. S. (2006). “ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS: From Air Pollution to Climate Change.” 2ª edition. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.

-
- SIPA. (2006). “Rua da Sofia”. Sistema de Informação para o Património Arquitectónico. Direcção-Geral do Património Cultural. Acedido a 19 de outubro de 2019, em: http://www.monumentos.gov.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=5909
- Taiwo, A. M., Beddows, D. C. S., Shi, Z., & Harrison, R. M. (2014). “Mass and number size distributions of particulate matter components: Comparison of an industrial site and an urban background site.” *Science of the Total Environment*, 475, 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.076>
- Tittarelli, F., Moriconi, G., & Bonazza, A. (2008). “Atmospheric deterioration of cement plaster in a building exposed to a urban environment.” *Journal of Cultural Heritage*, 9, 203–206. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.09.005>
- UC. (2019). O Bem “Universidade de Coimbra – Alta e Sofia”. Universidade de Coimbra. Acedido a 19 de outubro de 2019, em: <http://www.uc.pt/ruas/property>
- US EPA. (2004). *Air Quality Criteria for Particulate Matter. United States Environmental Protection Agency* (Vol. 1 of 2).
- Wilson, W. E., e Suh, H. H. (1997). Fine Particles and Coarse Particles: Concentration Relationships Relevant to Epidemiologic Studies, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 47:12, 1238-1249, <https://doi.org/10.1080/10473289.1997.10464074>
- WHO. (2013) “Health effects of Particulate Matter.” World Health Organization Regional Office for Europe, Dinamarca.
- WHO. (2006a). “*Air Quality Guidelines Global Update 2005 – Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfure dioxide.*” World Health Organization Regional Office for Europe, Dinamarca.
- WHO. (2006b). “*Framework plan for the development of monitoring of particulate matter in EECCA.*”, World Health Organization European Centre for Environment and Health, Bonn.
- WHO. (2003). “Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide” World Health Organization. Bonn, Germany
- WHO. (1999). *Monitoring ambient air quality for health impact assessment.* WHO Regional Publications, European Series, No. 85, Copenhagen.
-

World Heritage. (2019). *Universidade Coimbra – Alta e Sofia. Património Mundial*. Universidade de Coimbra. Acedido a 19 de outubro de 2019, em: <http://worldheritage.uc.pt/pt/nucleos/>

Wu, Z., Hu, M., Lin, P., Liu, S., Wehner, B., & Wiedensohler, A. (2008). “Particle number size distribution in the urban atmosphere of Beijing , China.” *Atmospheric Environment*, 42(34), 7967–7980. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.06.022>

ANEXO

Quadro A1 - Valores limite de PM₁₀ e PM_{2.5} (Decreto-Lei nº 102/2010, de 23 de setembro).

Período de referência	Valor limite (µg/m ³)	Margem de tolerância	Data limite para observância de valor-limite
PM₁₀			
1 dia (média diária)	50, a não exceder mais do que 35 vezes por ano civil	50 %	Já em vigor desde 1 de janeiro de 2005
Ano civil (média anual)	40	20 %	Já em vigor desde 1 de janeiro de 2005
PM_{2.5}			
Ano civil (média anual)	25	Fase 1 – 20 % até 11 de junho de 2008, a reduzir no dia 1 de janeiro seguinte e em cada período de 12 meses subsequentes numa percentagem anual idêntica, até atingir 0 % em 1 de janeiro de 2015	1 de janeiro de 2015
Ano civil (média anual)	20	Fase 2 - valor -limite indicativo a rever pela Comissão em 2013 à luz de novas informações sobre os efeitos na saúde e ambiente, a viabilidade técnica e a experiência obtida com o valor -alvo.	1 de janeiro de 2020

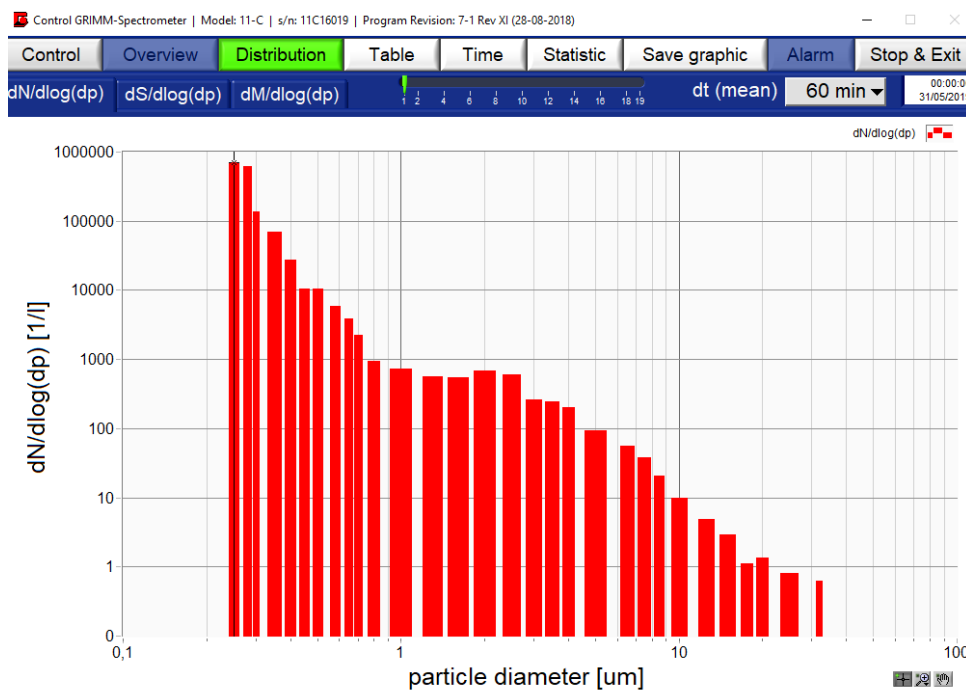


Figura A1 – Representação de distribuição por tamanho (número - dN) através de gráficos de barras.

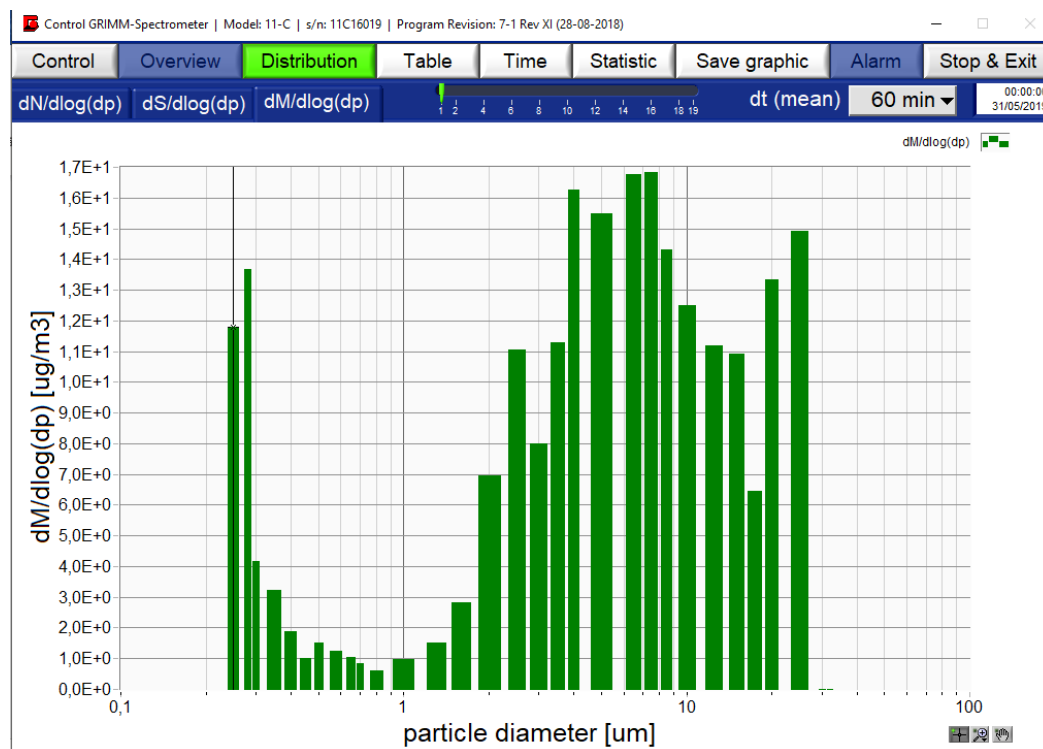


Figura A2 - Representação de distribuição por tamanho (massa - dM) através de gráficos de barras.

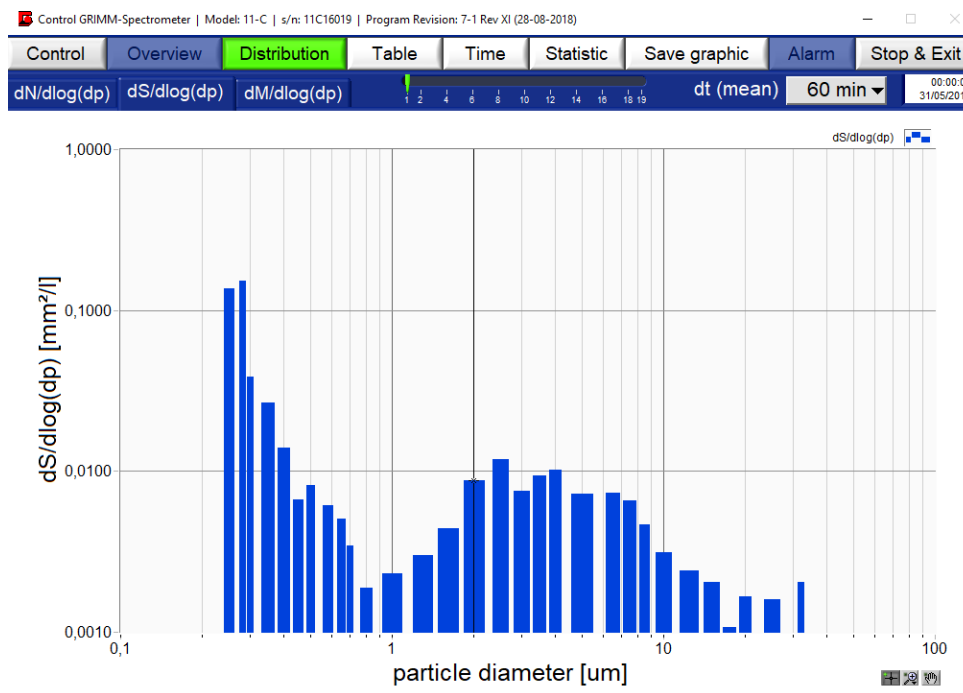


Figura A3 - Representação de distribuição por tamanho (área de superfície - dS) através de gráficos de barras.

date & time	PM10 [ug/m3]	PM2,5 [ug/m3]	PM1 [ug/m3]	Inhalable [ug/m3]	Thoracic [ug/m3]	Alveolic [ug/m3]
31/05/2019 00:00:00	11,6	6,1	4,6	11,6	11,1	7,5
31/05/2019 00:01:00	12,3	6,5	4,5	12,3	11,9	6,1
31/05/2019 00:02:00	15,0	7,3	4,6	17,2	15,1	9,1
31/05/2019 00:03:00	12,9	6,3	4,7	48,0	12,6	7,9
31/05/2019 00:04:00	15,6	7,5	5,4	18,3	15,7	9,3
31/05/2019 00:05:00	15,6	8,3	6,4	34,4	15,3	9,8
31/05/2019 00:06:00	14,9	7,5	5,0	22,0	15,8	9,1
31/05/2019 00:07:00	14,8	7,0	4,9	30,1	15,5	8,6
31/05/2019 00:08:00	15,8	7,3	5,3	16,8	15,0	8,8
31/05/2019 00:09:00	15,1	6,9	4,9	15,1	14,3	8,7
31/05/2019 00:10:00	11,5	6,5	4,3	21,6	11,8	7,9
31/05/2019 00:11:00	19,9	7,0	4,4	29,1	19,8	8,9
31/05/2019 00:12:00	12,7	6,9	4,6	15,4	13,0	8,4
31/05/2019 00:13:00	16,4	7,0	4,8	20,7	16,4	9,2
31/05/2019 00:14:00	14,6	6,5	4,8	14,7	13,7	8,2
31/05/2019 00:15:00	13,3	6,9	4,8	18,1	13,8	8,7
31/05/2019 00:16:00	15,7	7,0	4,9	16,7	15,0	8,8
31/05/2019 00:17:00	14,0	6,6	5,2	20,6	15,3	8,0
31/05/2019 00:18:00	15,7	8,0	6,2	18,4	15,8	9,6
31/05/2019 00:19:00	18,1	8,0	6,2	18,2	16,9	10,0
31/05/2019 00:20:00	16,3	7,7	5,4	22,7	16,1	9,5
31/05/2019 00:21:00	11,0	6,0	4,5	39,3	11,5	7,2
31/05/2019 00:22:00	11,7	6,3	4,5	21,7	11,8	7,7
31/05/2019 00:23:00	17,2	7,2	4,7	25,8	17,6	9,3
31/05/2019 00:24:00	17,3	7,4	4,8	17,3	16,5	9,7
31/05/2019 00:25:00	18,1	8,0	6,1	21,9	18,0	9,9
31/05/2019 00:26:00	16,8	8,8	5,6	17,7	15,9	10,4
31/05/2019 00:27:00	18,4	7,5	5,2	19,5	17,6	10,0
31/05/2019 00:28:00	16,7	7,2	4,6	17,3	15,9	9,2
31/05/2019 00:29:00	17,0	7,8	5,4	19,2	17,1	10,2
31/05/2019 00:30:00	17,3	8,7	5,6	19,5	17,3	11,0

Figura A4 – Janela “Table” do GRIMM 1178 LabVIEW Software.

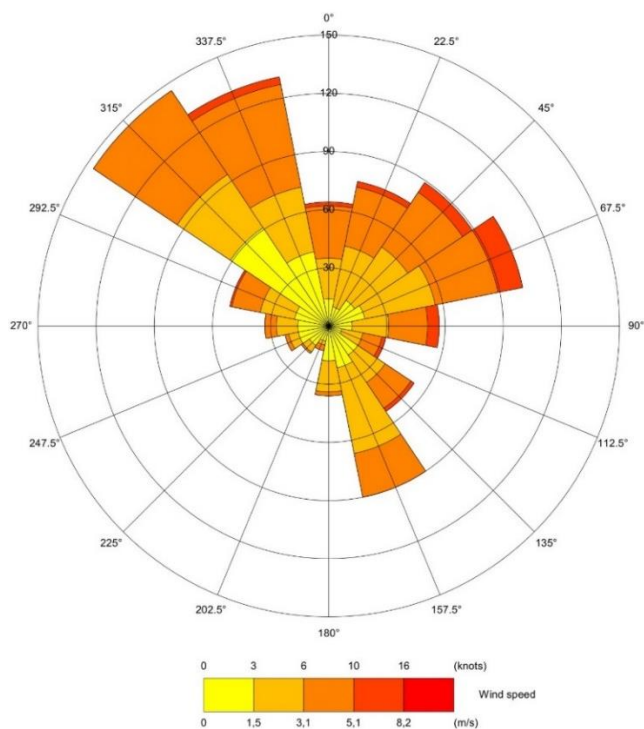


Figura A5 - Rosa dos ventos da estação UC.POLO I@ALTA relativa ao período de estudo (27 – 31 de maio de 2019).

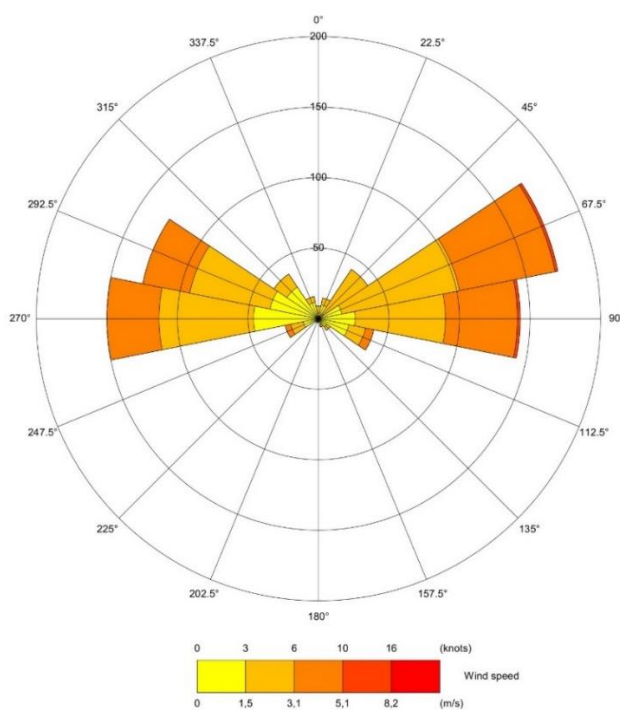


Figura A6 - Rosa dos ventos da estação ADAI@DEM.UC relativa ao período de estudo (27 – 31 de maio de 2019).

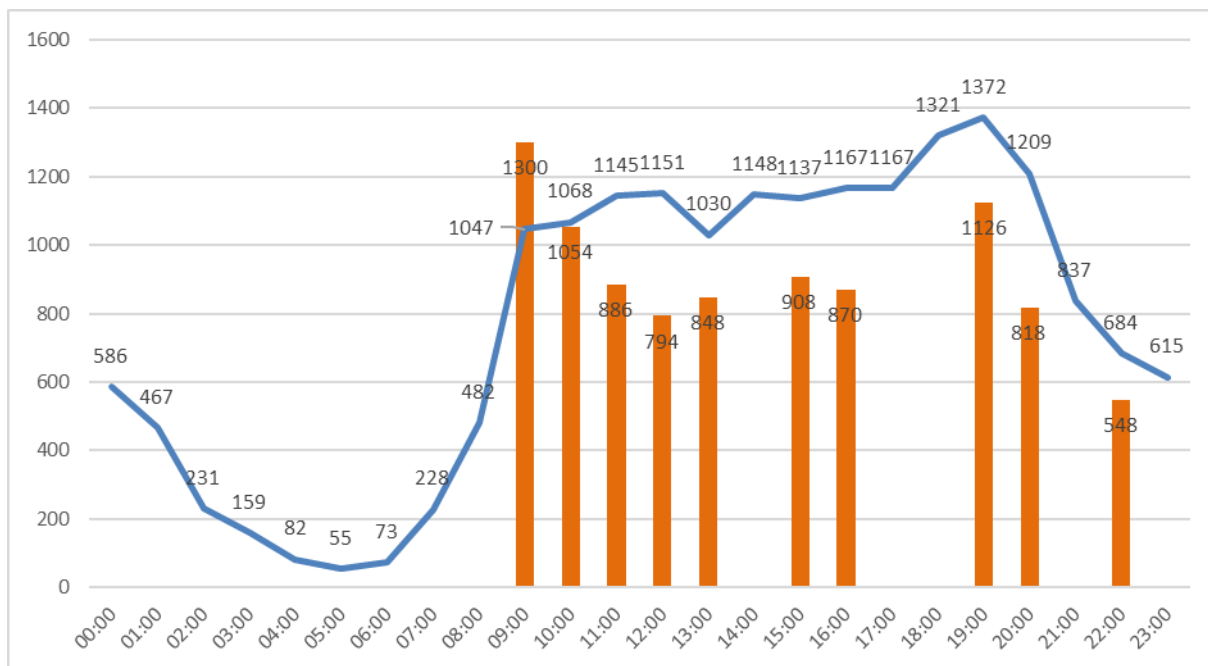


Figura A7 - Perfil de tráfego da Avenida Fernão Magalhães (linha azul) (adaptado de Pinto, 2014) e número de veículos registados na Rua da Sofia no dia 28 de maio de 2019.