

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCELO LUÍS KORELO

CONCEPTION AND DEVELOPMENT OF A SAMPLE GAS SWITCHING SYSTEM
FOR DECENTRALIZED SAMPLING VIA LINE CONNECTIONS IN THE PILOT
STUDY MOSS WALL

CURITIBA
2017

MARCELO LUÍS KORELO

CONCEPTION AND DEVELOPMENT OF A SAMPLE GAS SWITCHING SYSTEM
FOR DECENTRALIZED SAMPLING VIA LINE CONNECTIONS IN THE PILOT
STUDY MOSS WALL

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial, no Curso de Pós-graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial (PPGMAUI), Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Andreas Friedrich Grauer

Coorientador: Dr.-Ing. Ulrich Vogt

CURITIBA
2017

K84c

Korelo, Marcelo Luís

Conception and development of a sample gas switching system for decentralized sampling via line connections in the pilot study moss wall / Marcelo Luís Korelo. – Curitiba, 2017.

100 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, 2017.

Orientador: Andreas Friedrich Grauer – Co-orientador: Ulrich Vogt.

Bibliografia: p. 96-100.

1. Ar – poluição. 2. Musgo. 3. Atmosfera – Poluição. 4. Veículos a motor – Dispositivos de controle da poluição. 5. Controle de poluição – Equipamentos e acessórios. I. Universidade Federal do Paraná. II. Grauer, Andreas Friedrich. III. Vogt Ulrich. IV. Título.

CDD: 577.276



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **MARCELO LUIS KORELO** intitulada: "**CONCEPTION AND DEVELOPMENT OF A SAMPLE GAS SWITCHING SYSTEM FOR DECENTRALIZED SAMPLING VIA LINE CONNECTIONS IN THE PILOT STUDY MOSS WALL**", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-graduação.

Stuttgart, 31 de Julho de 2017.

Apl. Prof., Dr.-Ing. UWE SCHNELL
Presidente da Banca Examinadora (USTUTT)

Prof. Dr. ANDREAS FRIEDRICH GRAUER
Orientador - Avaliador Interno (PPGMAUI/UFPR)

Dr.-Ing. ULRICH VOGT
Coorientador - Avaliador Externo (USTUTT)

M.Sc. TOBIAS DOMINICZAK
Avaliador Externo (USTUTT)

Profa. Dra. DANIELA NEUFFER
Avaliador Interno (PPGMAUI/USTUTT)

Dedico esse trabalho à toda minha família que me apoiou indiscutivelmente em todos os momentos com grande alegria e entusiasmo. Em especial, ao meu grande Pai, Paulo que é meu eterno pai, amigo, guia e exemplo em todas as horas e que tem uma energia vital invejável; à minha querida e dedicada mãe, Natália, a quem devo minha vida desde os primeiros dias, minha primeira e mestra e insistente apoiadora em todos os momentos; aos meus irmãos Aurélio e José Carlos, meus irmãos e melhores amigos, com quem compartilho todas as alegrias e frustrações com muito bom humor; à minha especial e amada esposa Tatiana, musa inspiradora que me impulsiona e faz acreditar que tudo é possível, e que nossos sonhos são realizados a cada instante, juntamente com nossos lindos filhos, Victor Hugo e Luna que estiveram conosco durante todo instante dessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Ao meu estimado orientador Andreas Friedrich Grauer que tornou possível a realização de minha pesquisa na Alemanha junto aos seus antigos colegas na Universidade de Stuttgart. Um crítico, pesquisador e acima de tudo, um grande Professor.

À Prof^a Margarete Lass Erbe por todo apoio e otimismo infinito. Grande incentivadora e capaz de tornar tudo possível.

À Prof^a Daniela Neuffer que trabalha com o coração nessa parceria entre a UFPR e a Universidade de Stuttgart. Grande apoiadora em todos os momentos.

À Prof^a Karen Juliana do Amaral por possibilitar a parceria da Uni Stuttgart com a UFPR.

Ao Prof. Ulrich Vogt por ter aceitado me orientar e fazer parte de seu time de pessoas fantásticas (Abdul, Tobias, entre outros) no IFK na Universidade de Stuttgart. Grande Professor, pessoa incrível, amado por todos e grande apoiador da interação internacional no *Air Quality Control, Solid Waste and Waste Water Process Engineering* (WASTE).

À Sra. Carolina Acuno Caro, *Course Director* do Programa Internacional WASTE na Universidade de Stuttgart com muita responsabilidade e carinho com todos os alunos.

Às minhas colegas de Dupla Diplomação, Francine Santiago Bucco e Tingni Hu por estarmos juntos como um time unido nesse mestrado em Stuttgart.

Ao Prof. Klaus Fischer por todo seu apoio em inúmeros momentos do programa. Fantástico Prof. Klaus!

E a todos os outros professores e amigos que não estão listados aqui, mas que com certeza me ajudaram nessa conquista.

"O tempo é como um rio. Você nunca poderá tocar na mesma água duas vezes,
porque a água que já passou, nunca passará novamente..."
Gustavo Aschar

"Celebre a vida!!!"
Marcelo Korelo (o autor)

RESUMO

O uso da vegetação para absorver poluentes do ar no meio ambiente urbano está sendo avaliado por uma experiência de parede de musgo de 100 m ao longo da estrada B14 em direção ao centro da cidade de Stuttgart, na Alemanha. Para o estudo, o equipamento de medição de poluentes do ar deve ser instalado corretamente para obter valores precisos que representam as condições em cada ponto de amostragem. Para fazer isso, amostras de ar de diferentes pontos de entrada são sugados e transportados para um container de medição localizado centralmente onde os analisadores estão localizados. O objetivo das tubulações é transportar amostras de ar de pontos diferentes para apenas um analisador para evitar desvios específicos do dispositivo e para simplificar a calibração. Sabe-se que o transporte de amostras de ar através de longos tubos horizontais pode levar a perdas de partículas, especialmente partículas de aerossol ultrafinas $dp < 100$ nm devido à difusão browniana e partículas mais grossas $dp > 3$ μ m devido à sedimentação gravitacional. Este artigo apresenta os resultados de um estudo na Alemanha para determinar as perdas de partículas na amostragem e transporte de ar através de longos tubos para avaliar a eficiência das paredes verdes para capturar poluentes atmosféricos urbanos. Os resultados mostraram a melhor solução possível utilizando um tubo de cobre de 22 mm de diâmetro interno e duas seções de 25 m de comprimento para a gama de partículas de aerossol ultrafinas foram: 10 nm = 95%; 20 nm = 90%; 30 nm = 96%. 50 nm = 91%; e 100 nm = 87%. Como o objetivo desta pesquisa foi encontrar uma solução de tubo viável para realizar medidas representativas sem perdas significativas de partículas como uma estratégia de amostragem para avaliar o uso de paredes verdes para capturar poluentes atmosféricos urbanos ou tráfego, foi obtida com o respectivo material de tubos de cobre.

Palavras-chave: Poluição do ar. Barreiras verdes. Musgo e Poluentes do Ar. Controle de Poluição do Transporte. Amostragem de Poluentes Atmosféricos.

ABSTRACT

The use of vegetation to absorb air pollutants in the urban environment is being evaluated by a 100 m long Moss Wall experiment along the B14 road towards the center of the city of Stuttgart in Germany. For the study, the air pollutant measurement equipment must be installed correctly to obtain accurate values representing the conditions at each sampling point. To do this, air samples from different inlet points are sucked and transported to a centrally located measuring container where the analyzers are located. The purpose of the pipelines is to transport air samples from different points to only one analyzer in order to avoid device-specific deviations and to simplify the calibration. It is known that transporting air samples through long horizontal pipes can lead to particulate losses, especially ultrafine aerosol particles $dp < 100$ nm due to Brownian diffusion and coarse particles $dp > 3$ μ m due to gravitational sedimentation. This article presents the results of a study in Germany to determine particle losses in sampling and transport of air through long tubes to evaluate the efficiency of green walls to capture urban air pollutants. The results showed the best feasible solution using a 22 mm internal diameter copper tube and two 25 m long sections for the range of ultrafine aerosol particles were: 10 nm = 95%; 20 nm = 90%; 30 nm = 96%. 50 nm = 91%; and 100 nm = 87%. As the objective of this research was to find a viable pipe solution to perform representative measurements without significant losses of particles as a sampling strategy to evaluate the use of green walls to capture urban air pollutants or traffic, was obtained with the respective material of tubes of copper.

Keywords: Air Pollution. Green barriers. Moss and Air Pollutants. Transportation Pollution Control. Air Pollutant Sampling.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESPÉCIES DE MUSGOS USADOS NO EXPERIMENTO <i>MOSS WALL</i>	24
FIGURA 2 – EXPERIMENTO <i>MOSS WALL</i> AO LADO DA RODOVIA B14 EM STUTTGART	24
FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO EXPERIMENTO <i>MOSS WALL</i>	25
FIGURA 4 – DEPOSIÇÃO DE PARTÍCULAS NOS PULMÕES	33
FIGURA 5 – TÍPICA DISTRIBUIÇÃO DO MP DIESEL POR NÚMERO, MASSA E DEPÓSITO NOS PULMÕES	34
FIGURA 6 – AMOSTRAGEM ATMOSFÉRICA DE PARTÍCULAS DE LOCAIS FIXOS	39
FIGURA 7 – AMOSTRAGEM DE UM FLUXO DE GÁS	40
FIGURA 8 – ENTRADA PADRÃO DO SELETOR AMOSTRADOR PARA MP _{2.5}	41
FIGURA 9 – DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES DO FLUXO LAMINAR E TURBULENTO	43
FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIE NO REGIME DE FLUXO	43
FIGURA 11 – MECANISMOS DE PERDA DE PARTÍCULAS DURANTE A AMOSTRAGEM E TRANSPORTE DE AEROSSÓIS EM TUBULAÇÕES	45
FIGURA 12 – ENTRADA DA SONDA DE AMOSTRAGEM DE CORRENTES DE FLUXO EM CONDIÇÕES ISOCINÉTICAS E NÃO ISOCINÉTICAS ...	46
FIGURA 13 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA HORIZONTAL E VERTICAL DO EXPERIMENTO ZOTTO	50
FIGURA 14 – SMPS AEROSOL ANALYZER DIAGRAM FLOW	53
FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DE PERDA DE PARTÍCULAS EM TUBULAÇÕES LONGAS COM O SMPS+C	55
FIGURA 16 – SONDA DE BICO PARA AMOSTRAGEM DE AR	56
FIGURA 17 – CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO COM TUBO DE TEFLON ENROLADO	59
FIGURA 18 – CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO COM TUBO DE TEFLON ESTICADO	61

FIGURA 19 – CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO COM TUBO DE PVC ENROLADO	63
FIGURA 20 – CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO COM TUBO DE COBRE ENROLADO NO LABORATÓRIO.....	65
FIGURA 21 – CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO COM TUBO DE COBRE ENROLADO NO PÁTIO INTERNO DO IFK.....	67
FIGURA 22 – CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO COM TUBO DE COBRE ENROLADO NO PÁTIO INTERNO DO IFK.....	69
FIGURA 23 – CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO COM TUBO DE COBRE ENROLADO NO LABORATÓRIO DO IFK.....	73
FIGURA 24 – CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO COM TUBO DE COBRE ENROLADO EM CAMPO NO LOCAL DO <i>MOSS WALL</i>	75
FIGURA 25 – MONITOR DO EXPERIMENTO DE CAMPO MOSTRANDO GRANDE PERTURBAÇÃO NAS LEITURAS DAS CONCENTRAÇÕES DE MP CAUSADAS PELO TRÁFEGO PESADO	92
FIGURA 26 – DIAGRAMA DE FLUXO DO SISTEMA COMUTADOR DE GASES DE MEDIÇÃO	94

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – PENETRAÇÃO DE PARTÍCULAS NAS TUBULAÇÕES PARA DIFERENTES VOLUMES DE FLUXOS E SUAS COMPARAÇÕES EM PENETRAÇÕES VERTICAIS E HORIZONTAIS.....	51
GRÁFICO 2 – PERDA DE PARTÍCULAS CALCULADAS E MEDIDAS COM DIFERENTES TUBOS E COMPRIMENTOS PARA VALIDAÇÃO DE AMOSTRAGEM PARA O SOFTWARE PLC	52
GRÁFICO 3 – RESULTADOS DO SOFTWARE PLC PARA TUBOS DE TEFLON..	76
GRÁFICO 4 – CONCENTRAÇÕES OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE TEFLON.....	77
GRÁFICO 5 – PERDA DE PARTÍCULAS EM % OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE TEFLON	78
GRÁFICO 6 – CONCENTRAÇÕES OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE TEFLON.....	79
GRÁFICO 7 – PERDA DE PARTÍCULAS EM % OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE TEFLON	80
GRÁFICO 8 – RESULTADOS DO SOFTWARE PLC PARA TUBOS DE PVC	81
GRÁFICO 9 – CONCENTRAÇÕES OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE PVC.....	82
GRÁFICO 10 – PERDA DE PARTÍCULAS EM % OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE TEFLON.....	82
GRÁFICO 11 – CONCENTRAÇÕES OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO COBRE	84
GRÁFICO 12 – PERDA DE PARTÍCULAS EM % OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE COBRE	84
GRÁFICO 13 – CONCENTRAÇÕES OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO COBRE	85
GRÁFICO 14 – PERDA DE PARTÍCULAS EM % OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE COBRE	86
GRÁFICO 15 – CONCENTRAÇÕES OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO COBRE	87
GRÁFICO 16 – PERDA DE PARTÍCULAS EM % OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE COBRE	87

GRÁFICO 17 – CONCENTRAÇÕES OBTIDAS COM O ESPECTRÔMETRO DE AEROSSOL, COM E SEM O TUBO COBRE	88
GRÁFICO 18 – CONCENTRAÇÕES OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO COBRE	89
GRÁFICO 19 – PERDA DE PARTÍCULAS EM % OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE COBRE	90
GRÁFICO 20 – CONCENTRAÇÕES OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO COBRE	91
GRÁFICO 21 – PERDA DE PARTÍCULAS EM % OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE COBRE	91

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – IMPORTANTES LEGISLAÇÕES DA ALEMANHA E DA UE	29
--	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PRINCIPAIS POLUENTES DO AR E SEUS LIMITES PARA A UE.....	30
TABELA 2 – (Re) PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE FLUXO DE AMOSTRAGEM	72

LISTA DE SIGLAS

BImSchG	-	<i>Bundes-Immissionsschutzgesetz</i>
CLRTAP	-	Convenção de Genebra sobre poluição atmosférica transfronteiriça de longo alcance
CH ₄	-	Metano
COVNM _s	-	Compostos Orgânicos Voláteis Não Metanos
CPC	-	<i>Condensation Particle Counter</i>
DMA	-	<i>Differential mobility analyzers</i>
dp	-	Diâmetro de partícula
DWD	-	Serviço Meteorológico Alemão
EUA	-	Estados Unidos da América
HAP _s	-	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
IEA	-	Agência Internacional de Energia
IFK	-	Instituto de Tecnologia de Combustão e Geração de Energia
LCP	-	<i>Large Combustion Plants</i>
LUBW	-	Agência Estadual de Meio Ambiente, Medições e Conservação da Natureza de Baden-Württemberg
MP	-	Material Particulado
MS	-	Espectrômetro de Massa
N	-	Nitrogênio
NEC	-	<i>National Emission Ceilings</i>
NH ₃	-	Amônia
NO	-	Óxido Nítrico
NO ₂	-	Dióxido de Nitrogênio
NO _x	-	Óxidos de Nitrogênio
O	-	Oxigênio

O ₃	-	Ozônio
OMS	-	Organização Mundial da Saúde
OPC	-	<i>Optic Particle Counter</i>
PLC	-	<i>Particle Loss Calculator</i>
PTFE	-	Polytetrafluoretileno (TEFLON®)
PTS	-	Partículas Totais em Suspensão
PVC	-	Policloreto de Vinila
Re	-	Número de Reynolds
S	-	Enxofre
SMPS	-	<i>Scanning Mobility Particle Sizer</i>
SO ₂	-	Dióxido de Enxofre
UE	-	União Europeia
UBA	-	Agência Federal Ambiental da Alemanha
ZOTTO	-	Torre de Monitoramento Zotino
WCCAP	-	Centro Mundial de Calibração para Física de Aerossóis

LISTA DE ABREVIATURAS E UNIDADES

°C	-	grau Celcius
%	-	porcento
µm	-	micrometro
cm	-	centímetro
Cu	-	cobre
D_t	-	diâmetro interno da tubulação
<i>et al.</i>	-	e outros
h	-	hora
K	-	Kelvin
l / min	-	litro por minuto
m	-	metro
m ²	-	metro quadrado
m ³ / h	-	metro cúbico por hora
mBar	-	milibar
mg / km	-	miligrama por quilometro
mg / m ³	-	micrograma por metro cúbico
min	-	minuto
mm	-	milímetro
<i>Ni-63</i>	-	níquel-63
®	-	marca registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	OBJETIVO PRINCIPAL.....	26
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
2.1	LEGISLAÇÃO SOBRE A POLUIÇÃO DO AR.....	28
2.2	POLUENTES ATMOSFÉRICOS	31
2.3	IMPACTO DOS POLUENTES DO AR PARA SAÚDE HUMANA E OS ECOSSISTEMAS	35
2.4	USO DE PLANTAS PARA CAPTURAR POLUENTES DO AR.....	37
2.5	AMOSTRAGEM DE POLUENTES DO AR.....	38
2.6	MECÂNICA DE FLUIDOS E MOVIMENTO DE PARTÍCULAS.....	41
2.7	PERDAS DE PARTÍCULAS NA AMOSTRAGEM E TRANSPORTE	44
2.8	EXPERIMENTOS SIMILARES NA LITERATURA.....	49
2.9	ANALISADORES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS	52
3	METODOLOGIA.....	55
3.1	EXPERIMENTO 1 – LABORATÓRIO – TEFLON TUBE.....	58
3.2	EXPERIMENTO 2 – LABORATÓRIO – TEFLON	60
3.3	EXPERIMENTO 3 – LABORATÓRIO – PVC.....	62
3.4	EXPERIMENTO 4 – LABORATÓRIO – COBRE	64
3.5	EXPERIMENTO 5 – LABORATÓRIO – COBRE	66
3.6	EXPERIMENTO 6 – LABORATÓRIO – COBRE	68
3.7	EXPERIMENTO 7 – LABORATÓRIO – COBRE	70
3.8	EXPERIMENTO 8 – CAMPO – COBRE	73
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
4.1	EXPERIMENTO 1 – LABORATÓRIO – TEFLON	76
4.2	EXPERIMENTO 2 – LABORATÓRIO – TEFLON	78
4.3	EXPERIMENTO 3 – LABORATÓRIO – PVC.....	80
4.4	EXPERIMENTO 4 – LABORATÓRIO – COBRE	83
4.5	EXPERIMENTO 5 – LABORATÓRIO – COBRE	85
4.6	EXPERIMENTO 6 – LABORATÓRIO – COBRE	86
4.7	EXPERIMENTO 7 – LABORATÓRIO – COBRE	89
4.8	EXPERIMENTO 8 – LABORATÓRIO – COBRE	90

5 CONCLUSÃO.....	93
REFERÊNCIAS.....	96

1 INTRODUÇÃO

Desde o início do uso generalizado da combustão de combustíveis fósseis e das emissões de substâncias nocivas para o ar, a poluição do ar é uma grande ameaça para ecossistemas e culturas, além de afetar a saúde humana.

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2014), cerca de 3,7 milhões de óbitos prematuros foram causados pela poluição do ar em todo o mundo no ano de 2012. Estes são dados sobre a poluição do ar ao ar livre, no entanto, se os efeitos da poluição do ar em espaços internos forem considerados, é possível tratar a poluição do ar como o maior risco para a saúde humana em todo o mundo. A Agência Federal Alemã de Meio Ambiente (UBA, 2014) demonstra que a exposição a partículas finas causa cerca de 47.000 óbitos prematuros por ano apenas na Alemanha.

As partículas transportadas pelo ar ou material particulado (MP) são componentes essenciais na atmosfera e influenciam em questões atmosféricas, como o clima global e a visibilidade. Um efeito material sobre o clima é a sua interação com a radiação solar de curto comprimento de onda (RAMANATHAN *et al.*, 2001). As recentes projeções sobre os efeitos na saúde da poluição das partículas no mundo mostram números drásticos de morbidade e morte prematura (LELIEVELD *et al.*, 2015).

O maior impacto da poluição do ar está nos países de baixa e média renda, mas também existe um risco importante para a saúde humana nas regiões industrializadas. No entanto, devido ao aumento do aquecimento global e à frequência de inversões de temperatura, esses episódios de poluição constante são mais propensos a ocorrer no inverno no Hemisfério Norte (BIRMILI; HOFFMANN, 2006). As mudanças climáticas também podem influenciar a poluição na estação do verão, uma vez que há uma maior probabilidade de massas de ar estacionárias (AQEG, 2007).

Por causa desse impacto, muito tem sido discutido em todo o mundo sobre como superar os desafios colocados pela poluição do ar, além de ter criado ferramentas de monitoramento e modelagem da qualidade do ar. O desenvolvimento, implementação e avaliação dessas políticas de controle da poluição do ar e o estabelecimento dessas redes de monitoramento de grandes

poluentes atmosféricos têm principalmente objetivos regulatórios. Em paralelo, equipamentos modernos estão disponíveis para medir poluentes atmosféricos, aerossóis e gases traços na atmosfera e, portanto, ter acesso a modelos mais complexos de poluição do ar de forma mais precisa e clara do que em anos anteriores.

O estabelecimento de limites de emissão atmosférica para fins regulatórios é atualmente determinado pelo Conselho Europeu 2008/50/EC no que se refere à concentração em massa de MP_{10} e $MP_{2.5}$ (EC, 2008). Partículas menores que $10\ \mu\text{m}$ e $2,5\ \mu\text{m}$ em diâmetro aerodinâmico atualmente servem como métricas legais em todo o mundo para avaliar a exposição de uma população de partículas no ar. A justificativa para o uso de MP_{10} e $MP_{2.5}$ foi o grande número de evidências epidemiológicas de efeitos adversos para a saúde com base nessas métricas.

As fontes antropogênicas modernas em áreas urbanas incluem a combustão de combustíveis de veículos, particularmente diesel e desgaste de componentes de veículos (PETROFF *et al.*, 2008, AQEG, 2005, BUKOWIECKI *et al.*, 2011). O impacto ambiental dos componentes de desgaste, como freios e ressuspensão das partículas de poeira das estradas, é alto porque as partículas são mais propensas a conter metais pesados, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) e sulfetos tóxicos ou cancerígenos.

Várias pesquisas apresentam estudos conclusivos que mostram que as emissões dos veículos a motor são a principal fonte de poluição das partículas ultrafinas em ambientes urbanos (HARRISON *et al.*, 1999). De acordo com Kirchstetter *et al.* (1999), uma grande parte dessas partículas ultrafinas provêm de veículos diesel pesados.

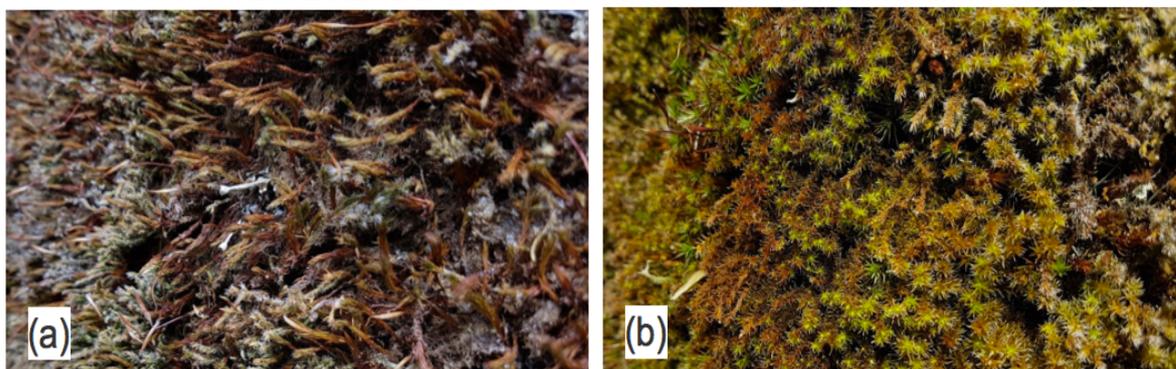
No ano de 2016, a cidade de Stuttgart na Alemanha excedeu em 66 dias os níveis seguros de partículas MP_{10} designados pela União Europeia (UE) (LUBW, 2017). De acordo com os regulamentos da UE, o limite de 24 h de $50\ \mu\text{g} / \text{m}^3$ não pode ser excedido há mais de 35 dias (2008/50/CE). Para atender aos padrões de qualidade do ar estabelecidos pela União Europeia para reduzir os impactos da poluição do ar, as autoridades implementaram na cidade de Stuttgart e região, algumas medidas como parte de um plano ambiental: áreas verdes, alarme de partículas inaláveis "*Feinstaub Alarm*" e outras medidas a serem implementado como uma zona de tráfego proibido "*No Go Zone*" durante períodos de alta poluição, destinados a veículos a diesel que emitem mais de $80\ \text{mg} / \text{km}$ de partículas finas.

O *Feinstaub Alarm*, que é um alarme de partículas inaláveis, desencadeado pela cidade de Stuttgart, quando o Serviço Meteorológico Alemão (DWD) verifica os seguintes critérios em dias críticos de inverno quando os níveis de poluição estão acima dos limites legais e as condições climáticas não favorecem a dispersão da poluição, como : concentração de matéria em partículas superior a $30 \mu\text{g} / \text{m}^3$ no ponto do *Neckar*; falta de chuva; falta de vento efetivo de direção favorável; inversão noturna da temperatura do solo; camada de mistura plana durante o dia; e baixa velocidade do vento.

Outra medida importante a ser estudada pela cidade de Stuttgart para melhorar a qualidade do ar é o uso da vegetação, por exemplo, o musgo. A instalação de vegetação em áreas altamente contaminadas pela poluição do ar pode levar a uma redução local das concentrações de poluentes atmosféricos externos, conforme demonstrado por (FRAHM; SABOLJEVIC, 2007). Há uma série de considerações teóricas e práticas, testes laboratoriais e externos, demonstrando a eficácia dessas medidas de reflorestamento. Da mesma forma, estudos com base em pesquisa em laboratório indicam que o musgo tem um grande efeito sobre a redução de MP e dióxido de nitrogênio (NO_2). Até à data, existem, no entanto, poucos resultados quantitativos de ensaios de campo sobre a eficácia dos musgos em uma área grande, mas a literatura sugere um efeito semelhante.

Com base no experimento promissor Muro de Musgo (*Moss Wall*), este assunto deve ser investigado de forma mais adequada. Assim, uma parede de musgo foi implantada no centro de Stuttgart, que foi construída ao lado de uma rodovia movimentada, a B14, que leva ao centro da cidade e está perto do local altamente contaminado *Neckartor*, onde há uma estação de monitoramento da qualidade do ar operada pela Agência Estadual de Meio Ambiente, Medições e Conservação da Natureza de Baden-Württemberg (LUBW). Duas espécies de musgo estão sendo usadas para o desenvolvimento de tal experiência. A FIGURA 1 mostra a imagem dos musgos usados no experimento, onde a FIGURA 1(a) é a espécie *Ceratodon purpureus* e a FIGURA 1(b) mostra a espécie *Racomitrium canescens*.

FIGURA 1 – ESPÉCIES DE MUSGOS USADOS NO EXPERIMENTO MOSS WALL



FONTE: O autor (2017)

O *Moss Wall* tem 100 metros de comprimento e três metros de altura. A FIGURA 2 mostra o *Moss Wall* ao lado da Rodovia B14 e equipamentos de medição de poluentes instalados.

FIGURA 2 – EXPERIMENTO MOSS WALL AO LADO DA RODOVIA B14 EM STUTTART

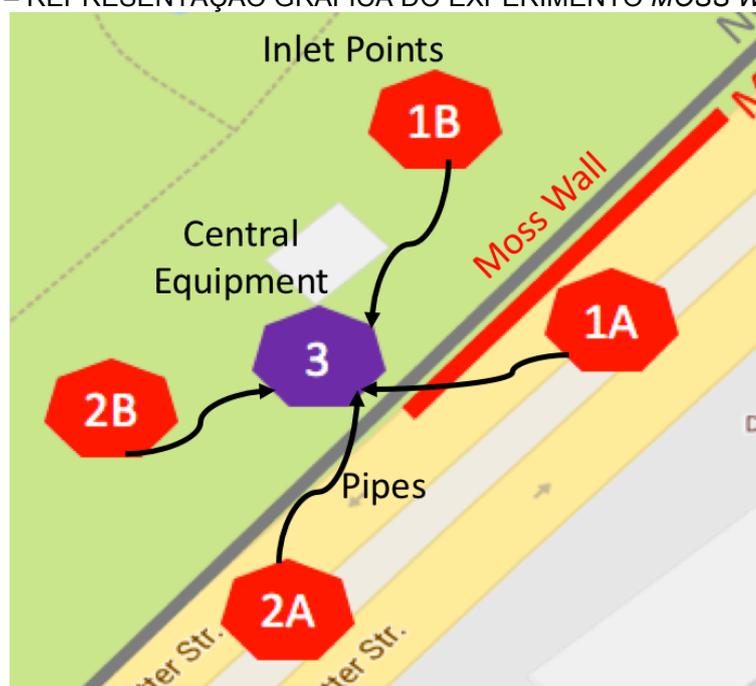


FONTE: O autor (2017)

Para avaliar a eficiência dos musgos para lidar com NO_2 e MP, foram utilizados vários métodos e equipamentos, parte de outras pesquisas, porém um dos principais desafios do experimento é garantir a precisão da medição de diferentes pontos de amostragem de ar.

O objetivo desta dissertação de mestrado é desenvolver um sistema de comutação de gás de medição para monitoração de amostragem de ar. A amostragem de ar ocorre a partir de 4 posições diferentes realizadas por meio de uma mangueira ou tubo de 50 metros de comprimento, dirigida a um contêiner de central onde estão localizados os analisadores de gás. A FIGURA 3 mostra a representação gráfica da configuração do experimento *Moss Wall* com os 4 tubos de entrada de amostragem em direção ao contêiner de central.

FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO EXPERIMENTO MOSS WALL



FONTE: Modificado de GOOGLE MAPS (2017)

As linhas de transporte de amostragem de ar funcionam junto com um conjunto de instrumentos de medição, para evitar desvios específicos do dispositivo e simplificar a calibração. Para este estudo particular, as partículas de aerossol foram medidas com um *Scanning Mobility Particle Sizer* (SMPS) espectrômetro, juntamente com um *Condensation Particle Counter* (CPC) localizado em um ponto central de 50 metros, na distância horizontal, longe dos pontos de amostra.

O desafio de transportar aerossóis através de tubos longos é que este procedimento sempre causa perdas de partículas. Os mecanismos de perda de transporte mais relevantes para a amostragem de aerossóis atmosféricos incluem sedimentação, deposição inercial, efeitos de carga elétrica e difusão turbulenta e laminar (HINDS, 1999; BROCKMAN, 2001). Enquanto as partículas grossas são

especialmente suscetíveis à sedimentação e compactação em seções e curvas horizontais, as concentrações de partículas finas e especialmente ultrafinas de $dp < 100$ nm são degradadas pela difusão browniana em fluxo laminar ou turbulento. As seções de tubo de dobra são conhecidas por causar perdas de transporte, misturando o perfil de fluxo radial e, assim, curvas de perda a jusante melhoradas (WANG et al., 2002). Embora a maioria dos processos de perda física tenha sido descrita com precisão, uma avaliação prática de sistemas específicos de amostragem de ar é mais complicada porque, muitas vezes, há várias perdas devido aos processos de interação.

Até à data, experimentos semelhantes não foram documentados para investigar o transporte horizontal de aerossóis em tubos longos, mas apenas verticalmente. Os poucos estudos com experimentos adicionais são curtos tubos horizontais ou com configurações diferentes que não são suficientes para garantir a aplicabilidade no experimento *Moss Wall*.

Para conseguir isso, foram realizados experimentos laboratoriais, de campo e também simulações numéricas usando modelos computacionais de dinâmica de fluidos com o software *Particle Loss Calculator* (PLC) para caracterizar o desempenho do transporte de amostragem através de mangueiras e tubos longos, conforme descrito neste documento.

Espera-se que este estudo auxilie a encontrar uma solução viável realizar para o transporte de amostras de poluentes do ar usando longas mangueiras ou tubos horizontais, o que pode levar a uma possível perda mínima de partículas ou mesmo prever perdas de partículas para cada faixa de diâmetro de partícula e, em seguida, aplicar correções específicas aos dados de medição ao avaliar poluentes atmosféricos urbanos.

1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

No âmbito de uma experiência de campo, o efeito de redução de MP e NO₂ dos musgos deve ser investigado com a ajuda de um muro de musgos na Rodovia B14 em Stuttgart. Isso inclui o desenvolvimento de um sistema de comutação de gás de medição com tecnologia de controle associada. O ar deve ser sugado em 4

posições diferentes por meio de mangueiras ou tubulações. No contêiner central estão localizados os analisadores de gás. As linhas funcionam junto com um conjunto de instrumentos de medição para evitar desvios específicos do dispositivo e simplificar a calibração. Neste caso, a troca de medição de gás terá que regular o tempo de ciclo de medição de cada linha de amostragem.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar experimentos sobre o transporte de partículas em mangueiras e tubos;
- Desenvolver uma comutação de gás de medição para medir através de 4 mangueiras ou tubos idênticos;
- Selecionar a eletrônica necessária, tecnologia de controle e válvulas para o estudo piloto;
- Avaliar pré experiências e conclusões para a configuração final do experimento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os seguintes temas de revisão bibliográfica são apresentados a seguir e fazem parte do estudo de pesquisa para realizar este projeto de dissertação de mestrado. Os assuntos estão relacionados de forma mais precisa e adequada aos objetivos deste trabalho, sendo que o amplo conteúdo de cada capítulo está facilmente disponível e de forma bem detalhada na literatura.

2.1 LEGISLAÇÃO SOBRE A POLUIÇÃO DO AR

A poluição do ar tem sido uma séria ameaça para a saúde humana e o ambiente por um longo período de tempo, mas depois de grandes catástrofes, como o *Smog* de Donora de 1948 e o grande *Smog* de Londres em 1952, onde uma neblina ou névoa combinada com fumaça e outros poluentes atmosféricos, causando centenas de mortes, as pessoas começaram a se preocupar mais com isso (BELL; DAVIS, 2001). A primeira evidência científica que liga a poluição do ar aos impactos ambientais foi a *Waldsterben*, uma palavra alemã para os fenômenos da mortalidade da floresta na década de 1970, onde as emissões de dióxido de enxofre (SO₂) das usinas a carvão começaram a prejudicar as florestas nos Estados Unidos (EUA) e na Alemanha (KRAHL-URBAN *et al.*, 1988). Depois disso, para abordar o problema da poluição do ar, que não encontra fronteiras e pode percorrer longas distâncias, a UE implementou limites legais e de controle de emissões para poluentes atmosféricos para fontes específicas e totais. O QUADRO 1 apresenta as importantes legislações implementadas na UE ao longo de três décadas.

QUADRO 1 – IMPORTANTES LEGISLAÇÕES DA ALEMANHA E DA UE

1979 Convenção de Genebra sobre poluição atmosférica transfronteiriça de longo alcance (CLRTAP)
Diretiva 96/62/EC do Conselho Europeu relativa à avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente, referida como (<i>Air Quality Framework Directive</i>).
1999 Protocolo para abate de acidificação, eutrofização e ozônio no nível do solo (Gothenburg Protocol).
Diretiva 1999/30/EC relativa aos valores-limite de dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio e óxidos de nitrogênio, material particulado e chumbo no ar ambiente, referida como (<i>First Daughter Directive</i>).
Diretiva 2000/69/EC relativa aos valores-limite para o benzeno e o monóxido de carbono no ar ambiente, referida como (<i>Second Daughter Directive</i>).
Diretiva 2001/80/EC relativa as grandes usinas de combustão (<i>LCP Directive</i>).
Diretiva 2001/81/EC, relativa aos tetos nacionais de emissão (<i>NEC Directive</i>).
Diretiva 2002/3/EC relativa ao ozono no ar ambiente. Esta foi a (<i>Third Daughter Directive</i>).
Diretiva 2004/107/EC relativa ao arsênio, ao cádmio, ao mercúrio, ao níquel e aos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos no ar ambiente, referida como (<i>Fourth Daughter Directive</i>).
Diretiva 97/101/EC que estabelece um intercâmbio recíproco de informações e dados de redes e estações individuais que medem a poluição do ar ambiente nos Estados-Membros, referida como (<i>Eol Decision</i>).
Diretiva 2004/461/EC que estabelece um questionário para a elaboração de relatórios anuais sobre a avaliação da qualidade do ar ambiente nos termos das Diretivas 96/62/EC e 1999/30/EC e das Diretivas 2000/69/EC e 2002/3/EC do Parlamento Europeu e do Conselho.
Diretiva 2008/50/EC relativa a qualidade do ar ambiente e ar mais limpo para a Europa.
Diretiva 2015/2193/EC relativa as médias usinas de combustão.
Diretiva 2016/2284/EC relativa aos compromissos nacionais de redução dos cinco poluentes (dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, compostos orgânicos voláteis, amônia e partículas finas) responsáveis pela acidificação, eutrofização e poluição do ozônio no solo, o que leva a impactos negativos significativos sobre saúde humana e meio ambiente.
Lei Federal de Controle de Emissões da Alemanha (<i>BImSchG</i>)
Instruções Técnicas sobre Controle de Qualidade do Ar (<i>TA Luft</i>)

FONTE: O autor (2017)

Embora a sociedade em geral tenha mais acesso a informação e esteja mais preocupada com as questões ambientais e as leis são mais estritas do que nunca, ainda hoje em dia enfrentamos altos níveis de poluição do ar, especialmente as principais cidades do mundo. Os países em desenvolvimento da Ásia, Ásia do Sul, Oriente Médio, África e América do Sul são responsáveis pelos maiores problemas, já que as cidades em rápida expansão aumentam as emissões de poluição atmosférica. Em contrapartida, a concentração dos poluentes atmosféricos chave

diminuiu na UE, nos EUA e no Japão nos últimos anos e, em certa intenção, aumentou a qualidade do ar (EEA, 2016).

A fim de atingir os objetivos estabelecidos nas diretivas da UE, as ações de redução da poluição desempenham um papel crucial. Esta missão é atribuída a cada membro do estado e a Alemanha, como parte da UE, está muito comprometida com isso. O governo alemão tem quatro estratégias básicas para implementar seus objetivos: estabelecendo padrões de qualidade do ar; usando a melhor tecnologia disponível; produtos reguladores; e estabelecendo tetos de emissão (BMUB, 2017).

Atualmente, os padrões de qualidade do ar no país são transportados para o Direito Alemão da Diretiva 2008/50/EC sobre qualidade do ar ambiente e ar mais limpo para a Europa, a futura diretiva sobre emissões industriais e a Diretiva 2001/81/EC sobre os limites máximos nacionais de emissão para certos poluentes atmosféricos. A TABELA 1 apresenta o limite de poluentes atmosféricos para a UE (EC, 2017b).

TABELA 1 – PRINCIPAIS POLUENTES DO AR E SEUS LIMITES PARA A UE

Pollutant	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Averaging Period	Permitted Exceedances each Year
PM _{2.5}	25	1 year	n/a
SO ₂	350	1 hour	24
	125	24 hours	3
NO ₂	200	1 hour	18
	40	1 year	n/a
PM ₁₀	50	24 hours	35
	40	1 year	n/a

FONTE: Adaptada de EC (2017b).

Um aspecto importante, antes de estabelecer qualquer política ambiental sobre qualidade do ar, é avaliar informações de um inventário de emissões para localizar pontos de prioridade e implementar as medidas necessárias para a aplicação de recursos com maior eficiência (FRIEDRICH, 2015).

Na Alemanha, as cidades devem criar e implementar um Plano de Ar Limpo para cumprir a legislação do país e da CE e a implementação é supervisionada e controlada pela Agência Estadual de Meio Ambiente. Esse plano deve abordar todas

as fontes de emissão e buscar uma melhoria constante, incluindo diferentes estratégias que possam ajudar a atingir os objetivos ambientais (BECKER, 2015).

2.2 POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Os poluentes do ar são quaisquer concentrações de sólidos, líquidos ou gases no ar que possam causar um impacto negativo nos seres humanos e no meio ambiente. Existem poluentes atmosféricos que ocorrem naturalmente a partir de vulcões ou de fontes de emissões antropogênicas, como por exemplo, de veículos rodoviários. Os poluentes primários são emitidos diretamente das fontes e os poluentes secundários são formados como uma reação dos primários, luz solar e outros componentes do ar (IEA, 2016).

Muitos poluentes do ar estão ligados à mortalidade ou morbidade, incluindo óxidos de nitrogênio (NO_x), ozônio (O_3), monóxido de carbono (CO), dióxidos de enxofre (SO_2) e material particulado (MP), especialmente partículas menores como $\text{PM}_{2.5}$ devido à capacidade de penetrar mais profundamente nos pulmões (OMS, 2016).

A nova Diretiva 2016/2284/EC relativa à redução das emissões nacionais de determinados poluentes atmosféricos determina a redução de cinco poluentes atmosféricos chave: MP, NO_x , SO_2 , compostos orgânicos voláteis não metanos (COVNM) e amônia (NH_3). É cientificamente provado que são altamente responsáveis pela acidificação, eutrofização e poluição do ozônio no solo, causando impactos negativos sobre os seres humanos e o meio ambiente (EC, 2017c).

Material Particulado (MP)

MP está diretamente relacionado às emissões de tráfego. Estes são uma mistura de partículas de aerossol com uma ampla gama de distribuição de tamanhos e composição química. Neste grupo estão incluídas substâncias sólidas e líquidas no ar que estão suspensas no ar. Os principais constituintes de MP são sulfatos, nitratos, amônia, cloreto de sódio, fuligem, poeira mineral e água. O MP pode se

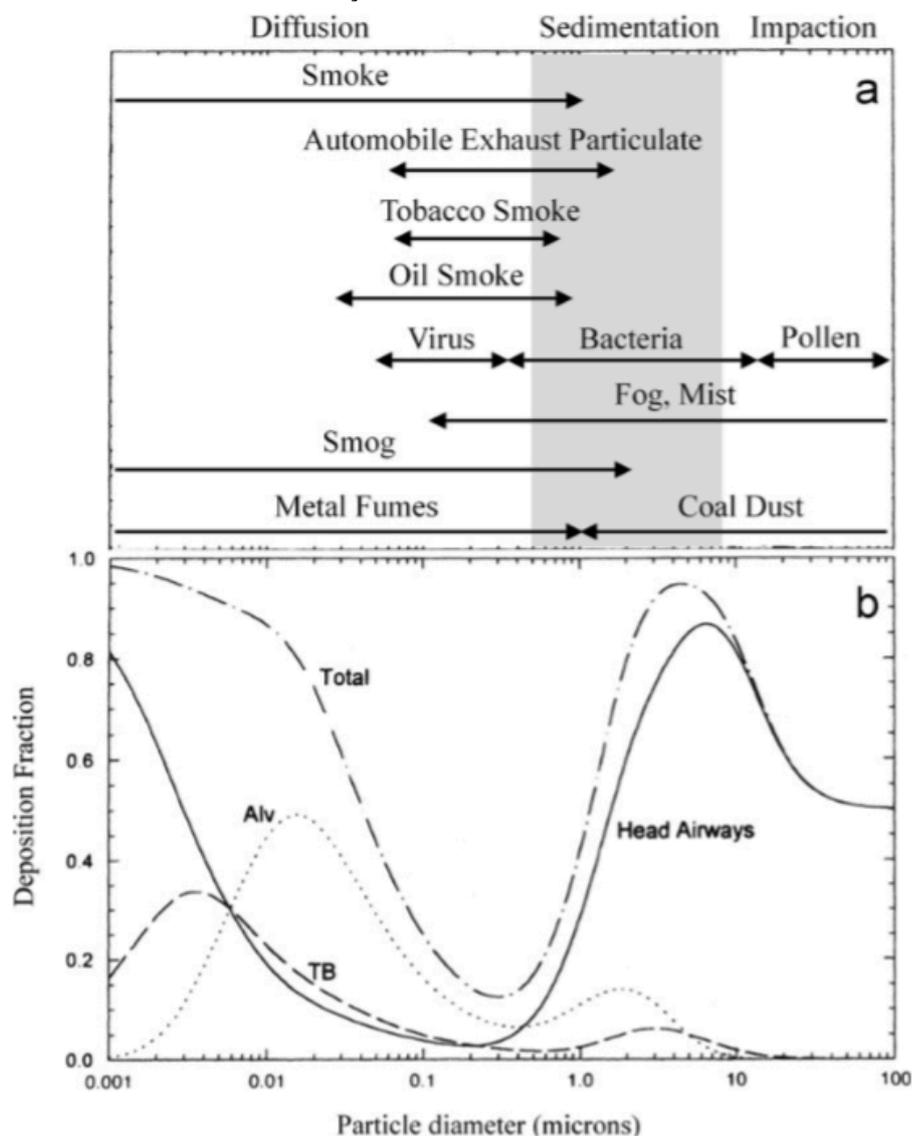
apresentar como uma partícula primária ou como uma partícula secundária formada na atmosfera a partir de emissões de SO₂, NO_x, NH₃ e COVNM's (EEA, 2014).

Os parâmetros mais importantes de MP são a concentração total de massa, a distribuição de tamanho e a composição química, onde o tamanho de partícula é o mais importante, conforme especificado pelo diâmetro da partícula (dp), e sabe-se que as partículas menores têm os principais impactos na saúde para humanos porque permanecem suspensas no ar e podem penetrar profundamente no sistema respiratório (HINDS, 1999).

Para fins epidemiológicos, a classificação mais comum das partículas é MP₁₀, MP_{2.5}. Este é o diâmetro equivalente e, neste caso, o diâmetro aerodinâmico. MP₁₀ descreve partículas com uma $dp < 10 \mu\text{m}$. São partículas inaláveis que podem ser depositadas na região extratorácica e respiratória superior e estão associadas a algumas doenças como a asma e também alguns produtos químicos tóxicos, como metais e dioxinas. Como MP_{2.5} é parte do MP₁₀, partículas menores também são capazes de penetrar profundamente nos pulmões causando doenças como o câncer. O MP_{2.5} é definido para partículas finas com $dp < 2,5 \mu\text{m}$ (VALLERO, 2014). Mais recentemente, mesmo as partículas menores, as chamadas partículas de aerossol ultrafinas com $dp < 0,1 \mu\text{m}$ ou PM_{0.1} são um assunto recorrente de estudos devido à capacidade de penetrar profundamente no sistema respiratório e até mesmo na corrente sanguínea causando inflamação sistêmica e para dano cerebral (DELFINO *et al.*, 2005).

Para entender a ação do MP na atmosfera e seu comportamento de deposição no sistema respiratório humano como seus efeitos para a saúde, a distribuição de tamanho de poluentes particulados e sua composição química é muito importante. A FIGURA 4 mostra a deposição de partículas nos pulmões. 4(a) Relação entre a origem das partículas, o tamanho e os principais mecanismos de deposição. Adaptado de (HINDS 1999) e (DOLOVICH; NEWHOUSE 1993). 4(b) Depósito total e regional previsto (Alv = alveolar, TB = traqueobrônquico, *Head Airways* = extratorácico) adaptado de (HINDS, 1999).

FIGURA 4 – DEPOSIÇÃO DE PARTÍCULAS NOS PULMÕES

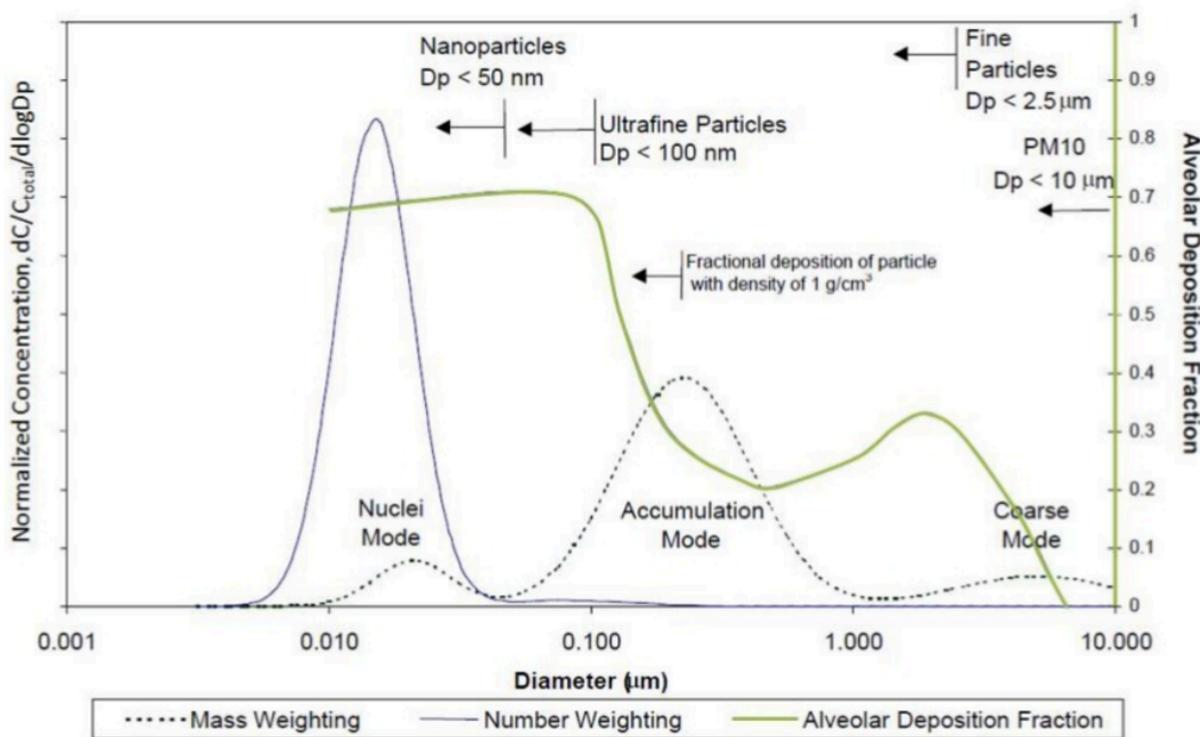


FONTE: Adaptada de HINDS (1999); DOLOVICH; NEWHOUSE (1993)

As emissões de veículos de combustão constituem a principal fonte de partículas ultrafinas nas cidades (HARRISON *et al.*, 1999), especialmente veículos a diesel, na Europa de acordo com Kirchstetter *et al.* (1999). Um aspecto importante é que as partículas ultrafinas têm maior concentração de partículas, mas contribuem com uma pequena massa ou volume de partículas (JUNKER *et al.*, 2000).

A FIGURA 5 mostra uma distribuição típica de tamanho de MP diesel por número, massa e deposição de pulmão. Pode-se notar que a fração de deposição alveolar é maior para a concentração do número de partículas do diesel na faixa de partículas de diâmetro ultrafino.

FIGURA 5 – TÍPICA DISTRIBUIÇÃO DO MP DIESEL POR NÚMERO, MASSA E DEPÓSITO NOS PULMÕES



FONTE: Adaptada de KITTELSON (1998)

Dióxido de Enxofre (SO₂)

Principalmente formado por oxidação de enxofre (S) através da combustão de combustíveis fósseis sólidos como o carvão ou óleos pesados, como motores diesel. As maiores fontes de SO₂ são geradores de energia elétrica e o transporte usando combustíveis com S. SO₂ também pode contribuir para a formação de partículas de sulfato secundário na atmosfera (EEA, 2014).

Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

NO_x é a soma de óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂). Durante os processos de combustão, nitrogênio (N) a partir de ligações de ar com oxigênio (O) para formar NO, então outras reações convertem NO em NO₂. As principais fontes de NO_x são as instalações de combustão, a combustão residencial para cozinhar e aquecer, e a fonte maior vem do transporte rodoviário (EEA, 2014).

Amônia (NH₃)

NH₃ é emitido principalmente pelo uso de fertilizantes na agricultura. Os nitratos de amônio e os sulfatos de amônio podem causar acidificação e eutrofização que afetam os seres humanos e o meio ambiente. Também responde por reações de partículas secundárias (EEA, 2014).

Compostos Orgânicos Voláteis Não Metanos (COVNm)

Os COVNm são um grupo de poluentes emitidos principalmente pelo transporte rodoviário, pinturas e uso de outros solventes, também em certa medida pela vegetação. Neste grupo, o metano (CH₄) é excluído. Os oxidantes fotoquímicos são produzidos a partir da reação de COVNm e NO_x na presença de luz solar. Os COVNm contribuem para a formação de O₃ troposférico (EEA, 2014).

Monóxido de Carbono (CO)

CO normalmente é emitido devido à combustão incompleta. Algumas fontes de emissão de CO incluem transporte rodoviário, processos industriais e combustão residencial para cozinhar e aquecer. CO reage com outros poluentes que produzem O₃ troposférico (EEA, 2014).

Ozônio (O₃)

O₃ (troposférico) é formado a partir de uma cadeia de reações químicas de certos gases precursores como NO_x, CO e COVNm e CH₄ (EEA, 2014).

2.3 IMPACTO DOS POLUENTES DO AR PARA SAÚDE HUMANA E OS ECOSISTEMAS

De acordo com a OMS, 2016, a poluição do ar representa o maior risco ambiental para a saúde. É certo que a poluição do ar afeta os seres humanos e o

meio ambiente a nível mundial, sem distinção de idade ou distribuição social, embora algumas regiões do globo, geralmente países mais pobres, tendem a sofrer mais devido à falta de políticas eficientes de poluição do ar.

A poluição do ar afeta a saúde humana de muitas maneiras, com estudos epidemiológicos e evidências de mortalidade e morbidade. Os poluentes do ar podem incluir agentes cancerígenos em fases de vapor e partículas, compostos metálicos e metálicos e substâncias oxidativas que causam inflamação e defeitos genéticos. MP especialmente, é um dos principais contribuintes para os cânceres pulmonares e outros (VALLERO, 2014).

O mecanismo exato que liga MP e câncer ainda não está completamente claro, mas como o MP é composto por vários compostos químicos e sua distribuição de tamanho é capaz de penetrar profundamente no sistema respiratório e até mesmo na corrente sanguínea, podem conter substâncias causadoras de câncer (VALLERO, 2014).

As associações do MP aos problemas de saúde podem ser doenças cardiovasculares e pulmonares, efeitos no sistema nervoso central e sistema reprodutivo, além do câncer. MP no ambiente pode interferir na atmosfera alterando padrões de chuva e temperatura (EEA, 2014).

SO₂ pode causar um grande impacto no sistema respiratório humano. Alguns dos problemas são asma e inflamação do trato respiratório, dor de cabeça e redução das funções pulmonares. No ambiente, o SO₂ pode causar chuva ácida e deposição e danos às plantas e vias navegáveis. (EEA, 2014).

NO₂ pode agravar sintomas respiratórios e infecções, afetar o fígado, pulmões, baço e sangue. No ambiente, contribui para a chuva e deposição ácidas, também causando eutrofização nas vias navegáveis. (EEA, 2014).

NH₃ pode causar irritação no sistema respiratório e também olhos e pele, também pode agravar sintomas respiratórios como asma. NH₃ no ambiente pode contribuir para a acidificação e eutrofização das vias navegáveis (EEA, 2014).

Os COVNM, como o benzeno e o 1,3-butadieno, são prejudiciais aos seres humanos. Além disso são precursores do O₃ troposférico (EEA, 2014).

CO pode causar problemas no sistema nervoso e coração, dor de cabeça, tonturas e fadiga (EEA, 2014).

O₃ troposférico pode causar irritação do sistema respiratório, agravar asma e funções pulmonares. Tem um efeito de aquecimento na atmosfera e também afeta a visibilidade (EEA, 2014).

2.4 USO DE PLANTAS PARA CAPTURAR POLUENTES DO AR

Uma das maneiras de reduzir a concentração de poluentes do ar, especialmente nos centros urbanos, devido às emissões de tráfego é usando vegetação ou aumentando espaços mais verdes como um amortecedor para melhorar a qualidade do ar.

A capacidade da vegetação para melhorar a qualidade do ar depende de muitos fatores, como tipo de vegetação, tamanho, solo, localização em relação à fonte de poluição e clima. A vegetação tem a capacidade herdada de absorver gases no ar e também partículas pequenas MP_{0.1} por estômatos de plantas e armazená-la. Isso é muito útil nos centros da cidade onde as emissões de veículos motorizados são predominantes e a maior parte da distribuição de tamanho de MP está nessa faixa. Por outro lado, partículas maiores como MP_{2.5} e MP₁₀ não se cabem nos estômatos, precipitando na superfície das folhas e são lavadas ou permanecem em suspensão no ar (HIEMSTRA *et al.*, 2008).

Dependendo do tipo de vegetação, alguns poluentes do ar podem ser capturados de forma mais efetiva do que outros. As árvores de coníferas são as melhores para capturar MP, enquanto as árvores planas e largas de folhas com superfícies rugosas são melhores para capturar nitrogênio. Um aspecto importante é que as plantas não conseguem absorver altas concentrações de poluentes atmosféricos como um catalisador eficiente para gases residuais, mas podem ajudar a reduzir as concentrações e a temperatura ambiente local (CROW, 2011).

O uso de plantas com flores não mostrou grande eficiência na captura de poluentes atmosféricos, especialmente MP, porque as partículas maiores não podem ser absorvidas pela planta, de modo que as partículas são depositadas na superfície das folhas e, no entanto, são ressuspensas no ar, agindo mais como uma barreira física (KAPPIS *et al.*, 2007).

Frahm; Sabovljevic (2007) investigou o uso de musgo para capturar poluentes do ar porque sua fisiologia é diferente das plantas com flores. Os musgos não têm raízes, então eles precisam coletar seus nutrientes do ar. Os nutrientes são compostos químicos baseados em nitrogênio, também mineral e matéria orgânica presentes nas partículas que, ao contrário do musgo, carregam uma carga negativa, sendo atraídos e ligados eletrostaticamente pela superfície. Esta é uma vantagem sobre as plantas com flores devido ao fato de que a captura de MP é possível, mesmo com partículas maiores, como o MP₁₀. Além do mais, as cianobactérias que vivem na superfície do filme de musgo absorvem compostos inorgânicos e se transformam em matéria orgânica, fornecendo também nitrogênio fixo como nutrientes.

Os musgos são briófitas, plantas que não possuem raízes e tecidos internos para a circulação de líquidos. É por isso que eles precisam absorver água e nutrientes da atmosfera pela superfície que possui 30 vezes mais área do que uma planta de floração normal. A sua reprodução é através da germinação de esporos e requer uma fina camada de água ou umidade para os esporos viajarem. Assim, os musgos prosperam em lugares úmidos e sombreados, embora sejam altamente tolerantes à dessecação extrema e retomem o metabolismo normal muito rapidamente após a reidratação. Um aspecto interessante dos musgos é que, no inverno, eles são muito mais ativos do que no verão na captura de nutrientes do ar e coincidentemente, o fenômeno de inversão térmica neste período geralmente limita a diluição, de modo que os níveis de poluição podem ser maiores (FRAHM; SABOVLJEVIC, 2007). Estudos de laboratório mostraram uma taxa de retenção de partículas usando musgos de 20 gramas de MP/m²/ano (FRAHM; SABOVLJEVIC, 2007).

2.5 AMOSTRAGEM DE POLUENTES DO AR

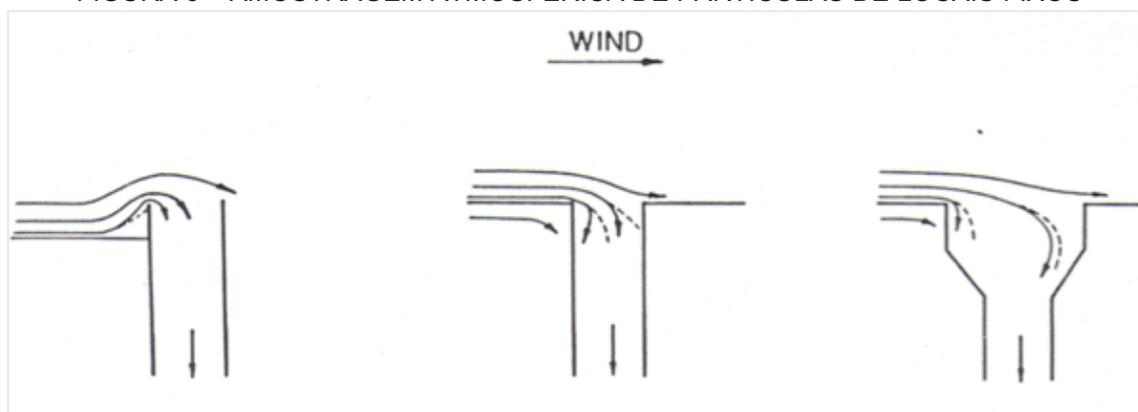
O objetivo da amostragem de poluentes do ar é obter uma amostra representativa, precisa e precisa possível da atmosfera local e transportá-la para os analisadores com perdas mínimas. Nesta tarefa, normalmente os gases são facilmente amostrados e transportados através de tubos sem problemas, embora a

reação com o material do tubo e a queda de pressão devido a características dimensionais podem afetar as medições. Diferente dos gases, o MP está sujeito a inércia e pode causar distorções nas medições (NEUMAN *et al.*, 1999).

O principal objetivo da amostragem de MP é obter a distribuição numérica, a concentração de massa e a composição química, geralmente em função do diâmetro das partículas. Isso é fundamental para entender as fontes de emissões das partículas e seus efeitos sobre a saúde humana e o ambiente. Também é sempre importante observar o comportamento das partículas na corrente de gás (GIT, 2007).

O objetivo principal da amostragem de MP é obter a distribuição de numérica, a concentração de massa e a composição química, geralmente em função do diâmetro das partículas. Isso é fundamental para entender as fontes de emissões das partículas e seus efeitos sobre a saúde humana e o ambiente. É importante sempre estar atento com o comportamento das partículas na corrente de gás. Nesse caso, duas opções de entradas de amostras podem ser usadas. O primeiro, ao realizar amostragem atmosférica de partículas de um local fixo, como se vê nos exemplos da FIGURA 6 (GIT, 2007).

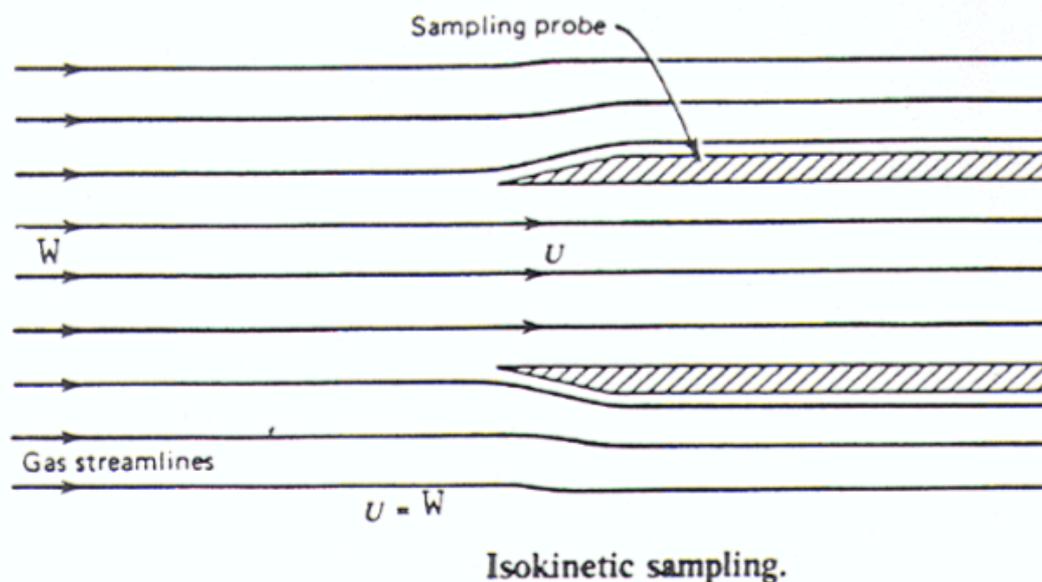
FIGURA 6 – AMOSTRAGEM ATMOSFÉRICA DE PARTÍCULAS DE LOCAIS FIXOS



FONTE: Adaptada de GIT (2007)

O segundo, quando a amostragem de um fluxo de gás, como visto na FIGURA 7 (GIT, 2007).

FIGURA 7 – AMOSTRAGEM DE UM FLUXO DE GÁS



FONTE: Adaptada de KITTELSON (1998)

Os principais métodos para a separação de partículas do gás de transporte são por filtração e impacto. Por exemplo, a entrada utilizada para selecionar o tamanho de partícula $dp < 2,5 \mu\text{m}$ ou $\text{MP}_{2.5}$ usa artefatos que evitam partículas maiores para seguir o caminho no analisador (VALLERO, 2014).

A estratégia de amostragem depende do tipo de poluente do ar que é objeto de estudo. É importante adquirir dados suficientes com qualidade e quantidade para alcançar objetivos satisfatórios. A melhor configuração é quando o analisador está próximo da fonte de poluição, então o fluxo da amostra corre diretamente para o instrumento e assim erros de medição podem ser minimizados. É sempre importante evitar precipitações e gotículas de neblina na entrada de amostragem e no analisador. Normalmente, esse tipo de configuração não é possível, então uma combinação de dispositivos deve ser utilizada. Assim, o uso de um condicionador de aerossóis para secar o fluxo da amostra é recomendado. Além disso, outros detalhes importantes devem ser cuidadosamente observados, como os distribuidores de fluxo para dividir as amostras para diferentes analisadores estabelecendo um fluxo laminar regular para minimizar erros nas medições (WMO, 2016).

A FIGURA 8(a) mostra um seletor de entrada padrão para $\text{MP}_{2.5}$. A FIGURA 8(b) e 8(c) mostram a visão interna do mecanismo de impacto de partículas.

FIGURA 8 – ENTRADA PADRÃO DO SELETOR AMOSTRADOR PARA MP_{2.5}

FONTE: O autor (2017)

Ao medir MP, nenhum instrumento é capaz de analisar uma ampla faixa de tamanhos de partículas, de 1 nm a 100 μm , e para isso, é necessária uma combinação de analisadores e técnicas diferentes. Além disso, para diferentes rendimentos de medição, são fornecidas informações diferentes sobre a partícula. É sempre importante especificar o intervalo de partículas necessárias o mais estreito possível para a necessidade de diferentes equipamentos e, por isso, calibração específica para cada um, criando divergências inesperadas nos dados de medição (WMO, 2016).

2.6 MECÂNICA DE FLUIDOS E MOVIMENTO DE PARTÍCULAS

Um fluido é dito ser newtoniano quando se comporta de acordo com a Lei de Newton. Em condições normais, a água, os gases e também o ar são considerados

newtonianos. Ao estudar um transporte de fluxo de fluido, uma propriedade importante é a viscosidade. A viscosidade do ar depende principalmente da temperatura e aumenta com a temperatura. A viscosidade é uma medida da resistência do fluido ao fluxo e é uma propriedade física importante para a dinâmica do movimento fluido e limites próximos de sólidos. A resistência ao cisalhamento em um fluido é causada por fricção intermolecular exercida quando as camadas de fluido tentam deslizar umas para as outras. Existem duas medidas relacionadas de viscosidade do fluido. Dinâmico é uma medida da resistência interna aos cortes de corte. A cinemática é a relação entre a viscosidade dinâmica e a densidade do fluido. Pode ser conveniente ao analisar o número de Reynolds (Re), que expressa a proporção das forças inerciais para as forças viscosas (WHITE, 1999).

O número de Reynolds é a proporção de forças de inércia para forças viscosas, como um fluido que flui dentro de um tubo. Re é definido pela fórmula:

$$Re = \frac{\rho \cdot \omega_t \cdot D_t}{\mu}$$

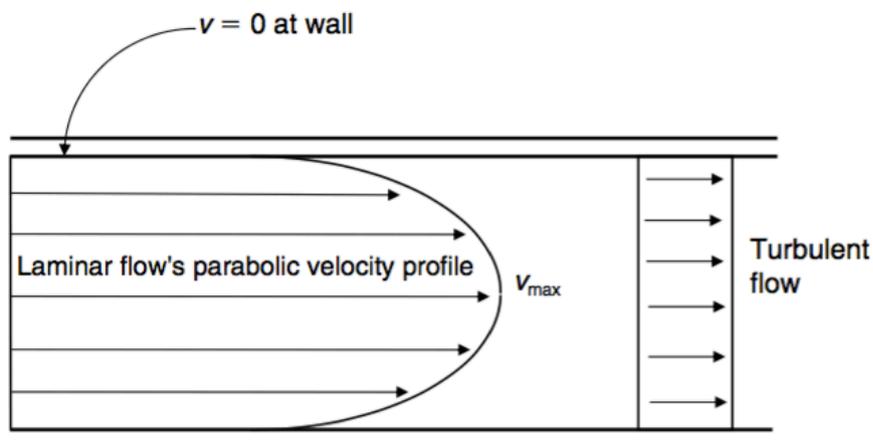
Onde ρ é a densidade do fluido, ω_t é a velocidade do fluxo no tubo, D_t é o diâmetro interno do tubo, e μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

Na maneira prática, o número Reynolds (Re) é usado para determinar se o fluxo em um duto é laminar, transitório ou turbulento. Assim, o fluxo pode ser considerado:

- **Laminar** $Re < 2300$
- **Transiente** $2300 < Re < 4000$
- **Turbulento** $Re > 4000$

O regime de fluxo laminar ocorre em baixos números Re , onde as forças viscosas são dominantes. É esperado um movimento fluido liso e constante. Em um regime de fluxo turbulento, com altos números Re , prevalecem as forças inerciais, mostrando movimentos caóticos, vórtices e outras instabilidades do fluxo. A FIGURA 9 mostra a forma de distribuições de velocidade dos fluxos de regimes laminares e turbulentos.

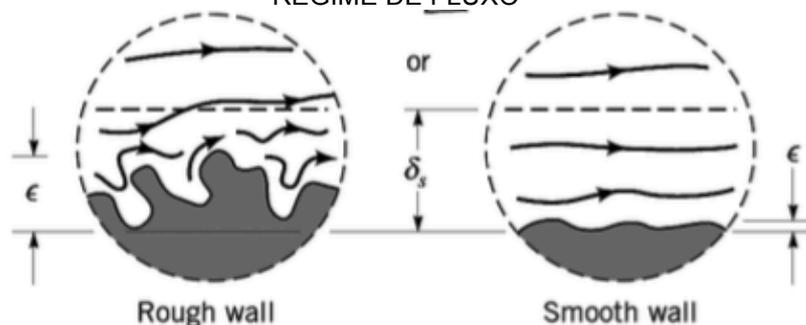
FIGURA 9 – DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES DO FLUXO LAMINAR E TURBULENTO



FONTE: Adaptada de VALLERO (2014)

O valor de $Re < 2300$ é para transição em tubos cilíndricos. Outras geometrias, como placas, cilindros e esferas, têm diferentes valores de transição. O regime de transição do fluxo depende de muitos efeitos, como a rugosidade da parede, como se vê na FIGURA 10 ou as flutuações no fluxo de entrada, mas o parâmetro primário é o número de Reynolds (Re) (WHITE, 1999).

FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIE NO REGIME DE FLUXO



FONTE: Adaptada de WHITE (1999)

No fluxo laminar, o fator de fricção do tubo diminui inversamente com Re . Portanto, para um fluxo laminar totalmente desenvolvido, a rugosidade do tubo pode ser negligenciada. (BRANCO, 1999). Para isso, quando da amostragem de MP, recomenda-se um fluxo de regime laminar para minimizar as perdas de partículas devido à difusão e inércia, especialmente para a nucleação e modo de partículas maiores (WMO, 2016).

O volume do gás de amostragem é muito importante para determinar a carga de massa na atmosfera. A medida do volume de fluxo da linha de amostragem é necessária para determinar o volume de ar e determinar a concentração dos poluentes do ar. Com o volume de fluxo, a velocidade do fluido pode ser calculada e assim Re . O cálculo usa a fórmula da taxa de fluxo volumétrico, que é definida por:

$$Q_V = A \cdot \omega$$

Onde A é a seção de área do duto e ω é a velocidade do fluxo no duto (VALLERO, 2014).

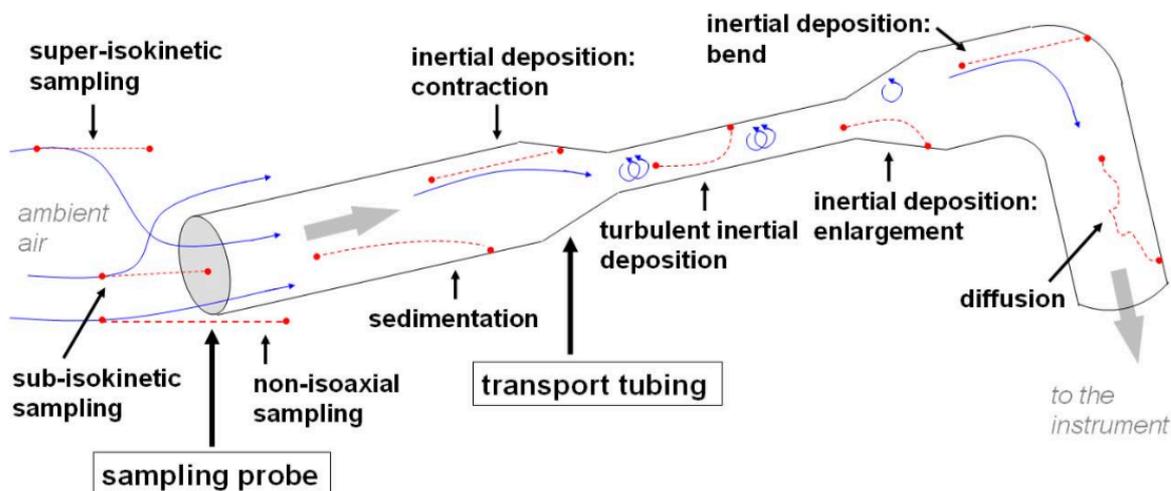
2.7 PERDAS DE PARTÍCULAS NA AMOSTRAGEM E TRANSPORTE

A amostragem de MP no ar normalmente consiste em uma sonda de amostragem e linhas de transporte. Em alguns casos, são necessários longos tubos. O principal desafio na amostragem e transporte de partículas para os analisadores é evitar perdas de partículas. Na sonda de amostragem, a amostragem não representativa vem quando as condições não são isoaxiais nem isocinéticas. Nas linhas de transporte, os mecanismos de perda de partículas dependem da distribuição de tamanho de partícula e são geralmente causados por difusão de partículas, impacto inercial, sedimentação gravitacional, eletrostática e termoforese (HINDS, 1999) e (BROCKMANN, 2001).

Geralmente, as perdas devido à difusão de partículas são críticas para partículas ultrafinas com $dp < 0,1 \mu\text{m}$. Em contrapartida, as perdas de partículas devido à sedimentação e impacto estão relacionadas ao transporte de amostras de ar em tubos horizontais e inclinados, bem como curvas. A configuração de toda a configuração de amostragem e o regime do fluxo de ar principal têm grande influência na eficiência das medições. (TSAI; PUI, 1990) e (WANG *et al.*, 2002).

A FIGURA 11 mostra os mecanismos de perda de partículas mais importantes associados à amostragem e ao transporte de MP.

FIGURA 11 – MECANISMOS DE PERDA DE PARTÍCULAS DURANTE A AMOSTRAGEM E TRANSPORTE DE AEROSSÓIS EM TUBULAÇÕES



FONTE: Adaptada de WEIDEN *et al.* (2009)

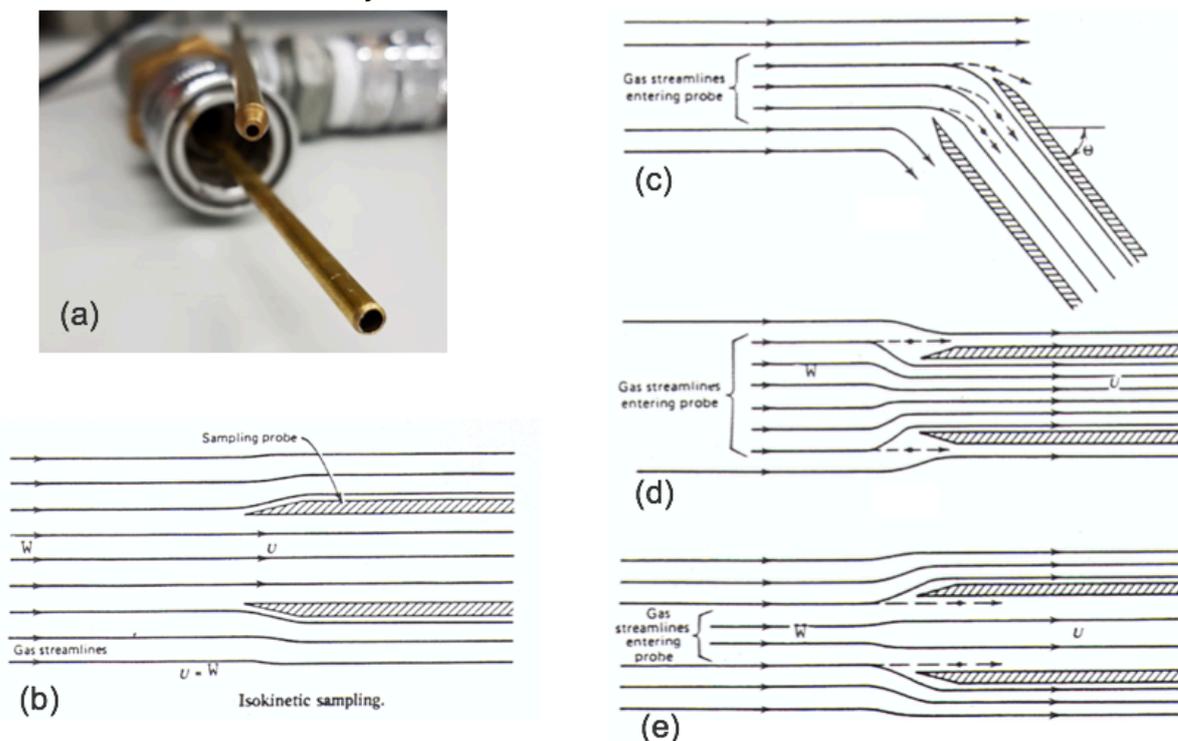
Perdas de Amostragem

Estabelecer um fluxo laminar é importante para evitar perdas de partículas quando a amostragem das entradas e o transporte do fluido através de tubos e cada passo da instalação deve estar nas condições desejadas. No ponto de coletar as amostras de partículas do fluxo de ar principal, uma sonda de bico com condições de fluxo específicas é acoplada para conduzir as amostras de ar ao equipamento de análise (VALLERO, 2014).

Embora para os poluentes em fase gasosa, muitas vezes as condições isocinéticas podem ser assumidas sem grande preconceito, quando realizando a amostragem de MP, a condição isocinética adequada deve ser cuidadosamente estabelecida. A FIGURA 12 apresenta uma entrada de sonda para a amostragem de MP do fluxo principal do fluido. A Figura 12(a) mostra uma imagem das sondas de bocal usadas para a amostra do MP do fluxo principal, enquanto a FIGURA 12(b) apresenta uma configuração com condições isocinéticas. Aqui, fluxos de ar paralelos fluem para a entrada da amostra, carregando com elas partículas de todos os diâmetros capazes de serem transportadas pelo fluxo de corrente. A FIGURA 12(c) mostra uma condição não isocinética devido a um desalinhamento angular da entrada da corrente principal. Na FIGURA 12(d), a velocidade dentro da amostra de bocal é maior do que o fluxo principal, então a entrada captura mais linhas de corrente, evitando partículas maiores para seguir o fluxo e entrar na entrada da

amostra. Oposta a isso, na FIGURA 12(e), a velocidade no fluxo principal é maior do que a entrada da amostra, divergindo as linhas de corrente ao redor das bordas da entrada (VALLERO, 2014).

FIGURA 12 – ENTRADA DA SONDA DE AMOSTRAGEM DE CORRENTES DE FLUXO EM CONDIÇÕES ISOCINÉTICAS E NÃO ISOCINÉTICAS



FONTE: a) O autor (2017); demais figuras adaptadas de GIT (2007)

A condição isocinética é obrigatória quando fazendo amostragem de MP no ar. Quando as partículas são transportadas com um gás no fluxo principal, é necessária atenção na configuração do equipamento de medição, entradas de amostras e linhas de transporte para evitar ou minimizar as perdas de partículas.

Perdas de Transporte

Em um estudo recente de Kumar *et al.* (2008), os resultados relataram perdas por difusão, inerciais e eletrostáticas como os mecanismos prevalentes de perdas de partículas para as emissões de escape de motores na faixa de (3 a 300 nm de diâmetro). A fim de minimizar as perdas de difusão e inércia, alguns procedimentos são sugeridos como manter o fluxo constante, escolhendo os tubos de transporte com uma grande relação volume / superfície, mantendo tempos de permanência

curtos e evitando curvas e voltas afiadas. As perdas eletrostáticas podem ser eliminadas usando material de tubulação condutora e aterramento apropriado. Os tubos de metal são preferidos como cobre, alumínio e aço inoxidável. Se for necessária uma tubulação flexível, elas devem receber um tratamento de material condutor para ajudar a dissipar as cargas elétricas.

Perdas por Difusão

Para partículas com $dp < 100$ nm, o movimento browniano cria um fluxo líquido de partículas de áreas com altas concentrações para áreas de baixa concentração. Em seguida, pequenas partículas se apegam às paredes do tubo, criando uma área de baixa concentração perto delas. É por isso que a difusão sempre gera transporte e depósito de partículas para as paredes (WILLEKE; BARON, 2005).

Perdas por Sedimentação

Em partículas com $dp > 0,5$ μm , especialmente partículas grossas maiores do que $dp > 2,5$ μm , as forças gravitacionais causam perda de partículas na tubulação. As forças gravitacionais atuam sobre o peso das partículas maiores, sendo depositado no fundo da tubulação (WILLEKE; BARON, 2005).

Depósito Inercial em Curvas

As curvas do tubo forçam uma mudança de direção no fluxo e as partículas maiores não podem seguir a mudança súbita perfeitamente devido à sua inércia. Há uma chance de a partícula sujeita à mudança de direção para continuar com o fluxo, mas dependendo das propriedades da partícula, ela permanece presa na seção de curvatura (WILLEKE; BARON, 2005).

Depósito Inercial em Contrações

Se houver uma contração no tubo, as partículas precisam mudar as direções das linhas de corrente que as partículas maiores não podem seguir completamente.

Como consequência, as partículas podem depositar nas paredes em frente à contração (WILLEKE; BARON, 2005).

Depósito Inercial Devido a Ampliação

A ampliação em um tubo com um ângulo superior a 8° pode causar redemoinhos no fluxo. (SCHADE; KUNZ, 1989). Os redemoinhos causam curvaturas do fluxo em direção às paredes do tubo causando a deposição de partículas atrás do alargamento (WILLEKE; BARON, 2005).

Depósito Eletrostático

As perdas de partículas devido à deposição eletrostática são insignificantes se as linhas de transporte forem aterradas e consistirem em material eletricamente condutor. Nesse caso, nenhum campo elétrico será formado no interior do tubo, pois o efeito de uma gaiola de Faraday e até partículas de aerossol altamente carregadas não serão depositadas eletrostaticamente (WILLEKE; BARON, 2005). A exceção a este caso é a presença de partículas de aerossol carregadas unipolares, então a repulsão mútua de partículas produzirá um fluxo das partículas em direção às paredes dos tubos, causando deposição. Na maioria das situações, as partículas de aerossol não são carregadas unipolarmente e isso pode ser negligenciado (WILLEKE; BARON, 2005).

Perdas por Termoforese

Se houver um gradiente de temperatura dentro do tubo, um fluxo de partículas se desenvolve de áreas quentes a áreas frias. No lado mais quente, as moléculas de ar transferem mais impulso para as partículas do que para o lado mais frio, transportando partículas para o lado mais frio. Caso as paredes do tubo fiquem mais frias do que o fluxo de ar no tubo, as partículas de aerossol serão depositadas nas paredes. Na maioria dos casos, as situações de medição de aerossóis têm um gradiente de temperatura entre as paredes do tubo e o aerossol menor que 40 K, então as perdas de partículas devido a termoforese são insignificantes (WILLEKE; BARON, 2005).

Tratamento das Perdas de Partículas

Em caso de desvios, existem duas maneiras de corrigir os resultados da medição de amostragem de MP. Primeiro, uma previsão teórica e experimental das perdas de partículas e a aplicação da correção especificada às medidas ambientais. Em segundo lugar, introduzindo um padrão de calibração relativo às perdas medidas no ambiente. O primeiro método é o mais utilizado, pois a calibração geralmente não é prática de ser realizada com frequência (VALLERO, 2014).

2.8 EXPERIMENTOS SIMILARES NA LITERATURA

Experimento ZOTTO (BIRMILI *et al.*, 2007)

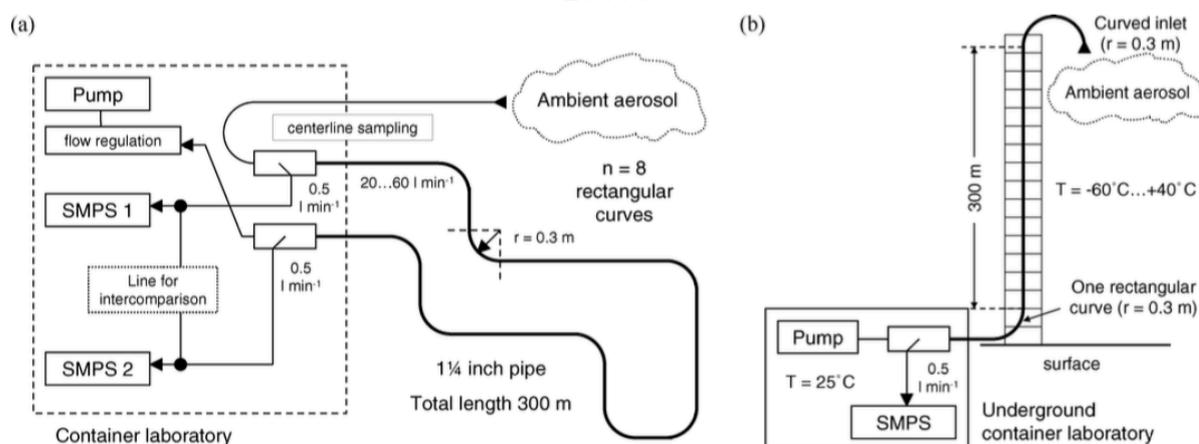
O experimento da Torre Alta de Monitoramento de Zotino (ZOTTO), localizado na Sibéria Central, tem 300 metros de altura e foi projetado para observações atmosféricas a longo prazo que são representativas de uma área espacial muito grande. A torre e o laboratório foram construídos pela *Max Planck Society*, da Alemanha, em cooperação com a Rússia.

Os aerossóis ambientais da ZOTTO são coletados através de dois tubos de entrada de diâmetro interno de 2,8 cm, um atingindo o topo da torre a 300 m acima do solo, o outro a 50 m de altura. Um sistema de válvula controlado por computador comuta a amostragem de aerossóis entre os dois níveis de altura a cada 6 min enquanto mantém o fluxo nominal de 40 l / min em ambas as entradas.

Durante os experimentos da ZOTTO, as perdas de transporte de partículas de aerossol através do tubo foram determinadas experimentalmente para diâmetros de partículas entre 10 e 400 nm, e a amostragem fluía entre 20 e 60 l / min. As perdas de transporte foram determinadas medindo simultaneamente as distribuições de tamanho de número de partículas do aerossol ambiente a montante e a jusante do tubo de 300 m usando dois espectrômetros do tipo *Scanning Mobility Particle Sizer* (SMPS). A FIGURA 13(b) mostra o diagrama representativo da experiência vertical. Com um fluxo de amostragem de 40 l / min, a penetração de partículas atingiu uma eficiência máxima de 0,97 para partículas na faixa de tamanho entre 50 e 200 nm. A penetração de partículas diminuiu para 0,66 para 20 nm e 0,29 para partículas de 10

nm. Os valores teóricos para a penetração de partículas foram calculados com base nas expressões de difusão brownianas em fluxo laminar ou totalmente turbulento.

FIGURA 13 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA HORIZONTAL E VERTICAL DO EXPERIMENTO ZOTTO



FONTE: Adaptadas de BIRMILI *et al.* (2007)

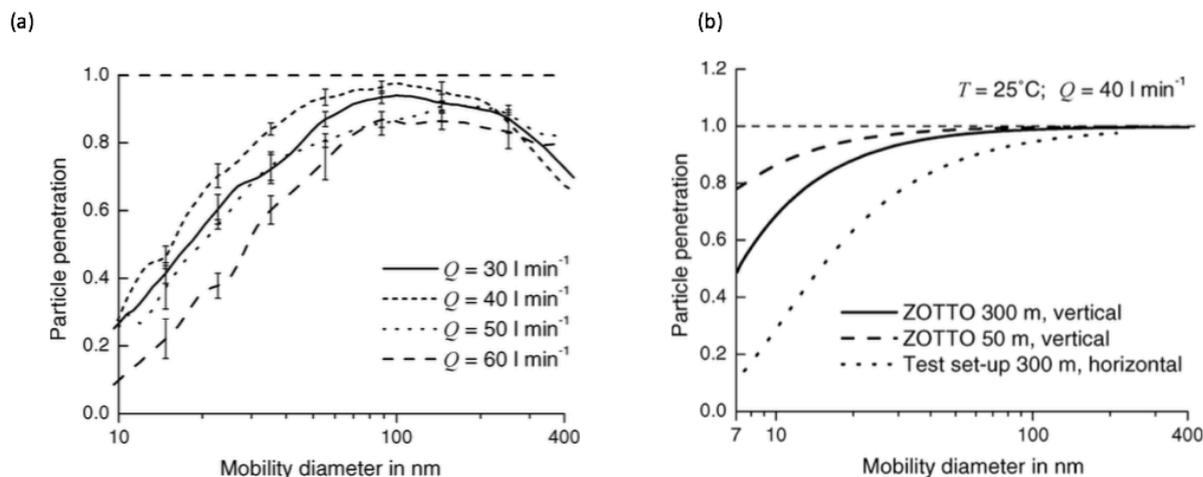
Os resultados de calibração para a configuração de teste orientada horizontalmente, como se vê na FIGURA 13(a), são aplicados para fornecer fatores de correção dependentes do tamanho para a instalação vertical na torre ZOTTO. O experimento ZOTTO demonstra a viabilidade prática de longos tubos de entrada para amostragem de partículas atmosféricas, em uma configuração vertical de torre alta.

Na experiência de configuração de calibração horizontal, as partículas no intervalo $50 < dp < 1000$ nm são transmitidas eficientemente através do tubo. O $dp = 10$ nm é transportado a uma taxa de eficiência de 20%. Para as partículas maiores, as forças gravitacionais têm uma grande influência na deposição de partículas e este tipo de perdas de partículas não foram calibradas experimentalmente, mas foram estimadas para o fluxo de tubos laminares horizontais segundo Brockmann (2001). A transmissão de partículas de 50% para partículas em torno de $dp = 3$ μ m estabelece o ponto de corte superior. Este corte de tamanho é irrelevante para as medidas de distribuição de tamanho de número de partículas, mas crucial para as medidas de aerossóis ópticos.

No GRÁFICO 1 (a), o gráfico mostra diferentes volumes de fluxo testados e o melhor resultado alcançado foi de 40 l / min. O GRÁFICO 1 (b) mostra resultados

gráficos da penetração de partículas através de tubos em uma configuração vertical e horizontal.

GRÁFICO 1 – PENETRAÇÃO DE PARTÍCULAS NAS TUBULAÇÕES PARA DIFERENTES VOLUMES DE FLUXOS E SUAS COMPARAÇÕES EM PENETRAÇÕES VERTICAIS E HORIZONTAIS.



FONTE: Adaptadas de BIRMILI *et al.* (2007)

Experimento *Particle Loss Calculator* (PLC) (WEIDEN *et al.*, 2009)

O *Max Planck Institute* de Química em Mainz, na Alemanha, desenvolveu um laboratório móvel para medidas flexíveis e móveis da concentração e composição de aerossóis e gases e, como parte deste projeto, foi criado o software PLC para simular perdas de partículas em amostras e transporte e auxiliar nos projetos de entrada de amostragem.

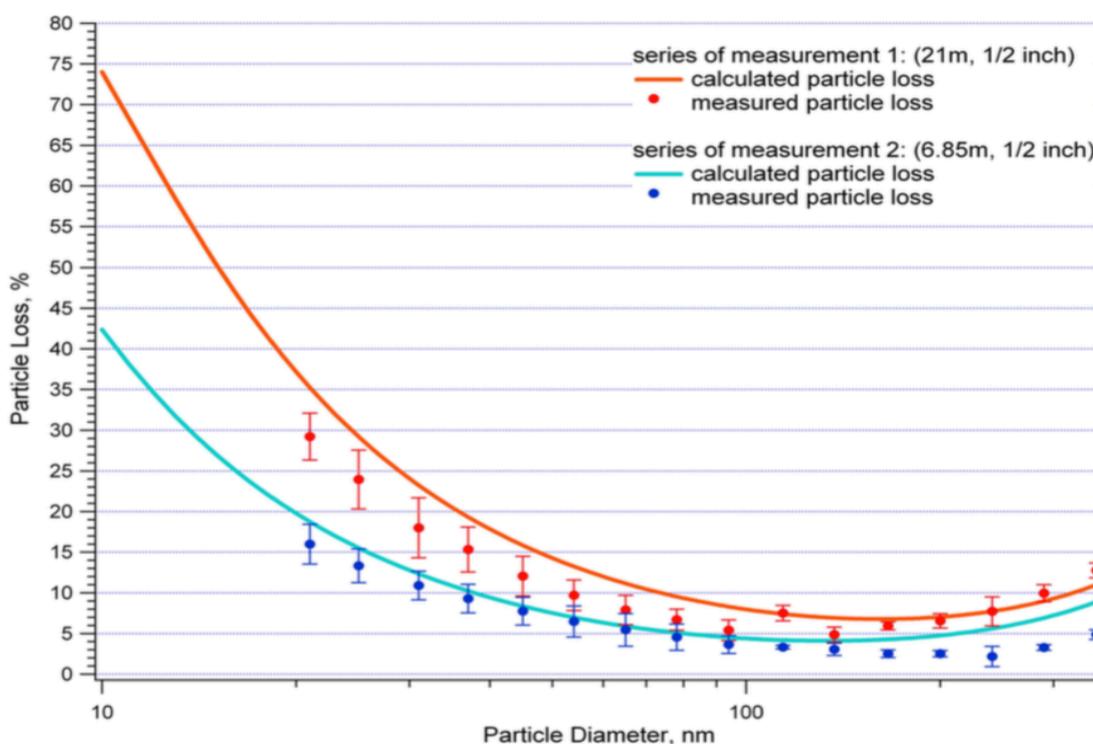
Foram utilizados dois *Condensation Particle Counters* (CPC) idênticos e *Optic Particle Counters* (OPC) para a detecção de partículas na faixa de tamanho de $10 < dp < 350$ nm e $300 < dp < 32$ μ m, respectivamente.

Para a validação do software, experimentos utilizaram tubos de aço inoxidável com 1/4 de polegada $D_t = 4,57$ mm e 1/2 polegada $D_t = 10$ mm de vários comprimentos a baixas velocidades de fluxo. Os tubos de 1/4 de polegada tinham comprimentos de 20,80 m, 10 m e 3 m e foram enrolados em várias voltas (até 10). Na faixa de tamanho $20 < dp < 200$ nm, as perdas de partículas medidas são superiores às perdas calculadas com o simulador de software. As medidas realizadas em diferentes configurações mostraram diferenças nos resultados. A

conclusão foi que com o aumento do número de voltas, as perdas de partículas aumentaram.

As perdas de partículas devido à sedimentação inercial nas curvas devem ser insignificantes para partículas pequenas em um fluxo laminar, mas muito influentes para partículas maiores. No entanto, os resultados mostram a forte influência da geometria sobre as perdas de partículas de aerossol. As perdas de partículas dependem não apenas de Re , mas também da geometria do tubo. O GRÁFICO 2 mostra os resultados da experiência do PLC.

GRÁFICO 2 – PERDA DE PARTÍCULAS CALCULADAS E MEDIDAS COM DIFERENTES TUBOS E COMPRIMENTOS PARA VALIDAÇÃO DE AMOSTRAGEM PARA O SOFTWARE PLC



FONTE: Adaptado de WEIDEN *et al.* (2009)

2.9 ANALISADORES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

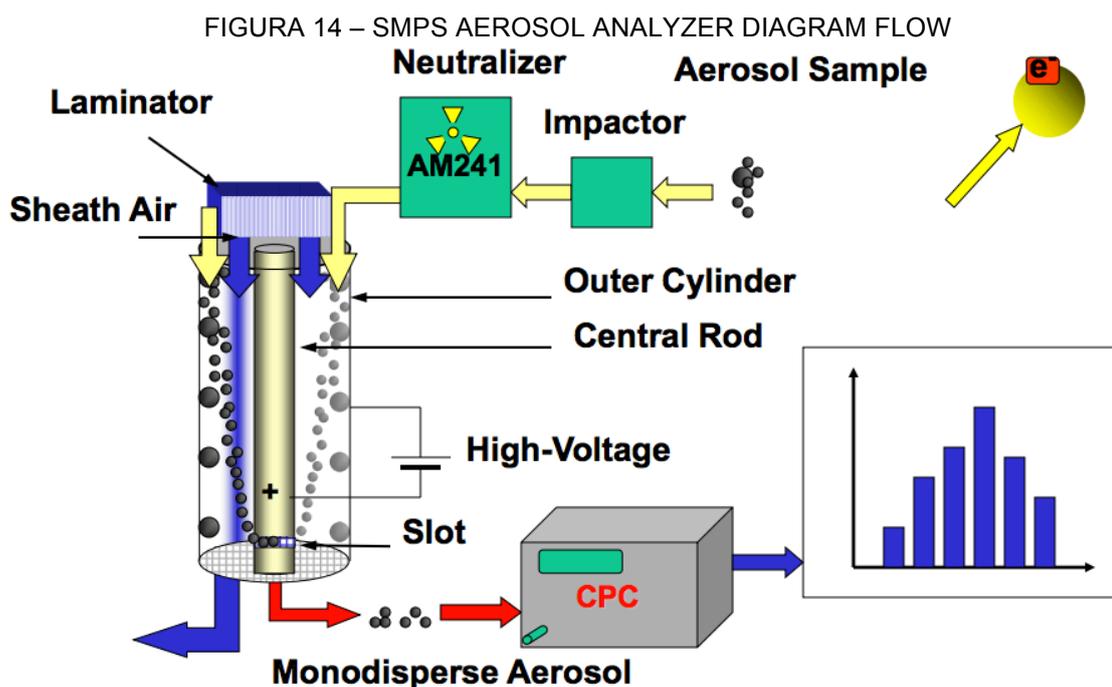
Com a crescente conscientização do MP com menor diâmetro de partícula devido aos seus efeitos nocivos sobre a saúde humana e o ambiente, a avaliação da qualidade do ar usa as definições de concentração gravimétrica de massa MP_{10} e $MP_{2.5}$ com uma medida da concentração do número de partículas que pode ser

realizada por um Espectrômetro de Massa (MS). Uma vez que as partículas de aerossol finas e especialmente ultrafinas com $dp < 100$ nm estão se tornando um assunto de estudos frequentes, devido às emissões dos motores de combustão interna de veículos, eles só podem ser detectados com métodos de contagem de medição de sensibilidade suficiente como o SMPS. Estes são o instrumento mais comum em uso para dimensionar as emissões do escapamento de veículos na região do diâmetro submicrométrico (VDI, 2011).

Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)

Este instrumento está sendo usado extensivamente em laboratórios de teste de motores diesel na Europa e nos EUA. Dimensiona as partículas pelo seu diâmetro equivalente de mobilidade elétrica na faixa de aproximadamente $10 < dp < 1350$ nm de diâmetro. O limite inferior pode ser prolongado para cerca de 7 nm, mas o fator de incerteza aumenta significativamente (KITTELSON *et al.*, 1998b).

O espectrômetro SMPS usa um *Differential Mobility Analyzer* (DMA) para classificar o fluxo de partículas e um CPC para determinar a concentração em cada tamanho. A FIGURA 14 mostra um fluxo de diagrama representativo do analisador de aerossóis SMPS (KITTELSON *et al.*, 1998b).



FONTE: Adaptada de GRIMM AEROSOL TECHNIK GMBH (2017)

O DMA permite a extração de um tamanho selecionado ou a distribuição de tamanho de partículas de aerossol. O sistema classifica partículas carregadas de acordo com sua mobilidade aerodinâmica usando um campo elétrico. Antes de entrar no SMPS, o fluxo é conduzido através de um neutralizador de fonte radioativa *Ni-63* usado para equilibrar a carga dos aerossóis a montante do DMA (GRIMM, 2017).

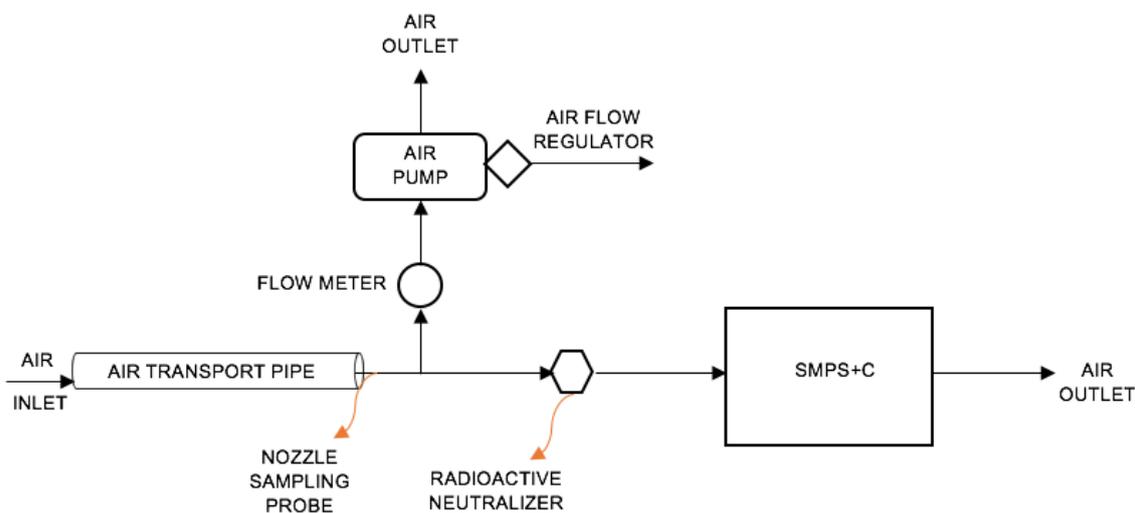
Depois disso, as partículas seguem para o CPC, permitindo a medição on-line da concentração total do número de aerossóis. As partículas coletadas através da entrada de CPC são preparadas condensando um vapor supersaturado (geralmente 1-butanol) na superfície das partículas, formando partículas suficientemente grandes para serem detectadas opticamente. Basicamente, os CPCs consistem em três componentes básicos, o saturador, o condensador e a óptica do detector (GRIMM, 2017).

As concentrações do número de partículas urbanas podem ser um indicador útil das emissões de tráfego rodoviário (HARRISON *et al.*, 1999). As distribuições de tamanho obtidas em 2 a 4 min são os tempos de operação mais típicos e resultam em pequenas distribuições de distorção. As medidas de distribuição de tamanho com o SMPS podem ser tendenciosas se a concentração de partículas ou o tamanho mudar durante o intervalo de tempo da varredura. Isso normalmente ocorre durante o tempo de varredura dos ciclos de medição do SMPS sobre os ciclos de velocidade transitória e da carga do motor. Neste caso, uma amostra de sacos que rapidamente se enche e então permite que uma amostra de aerossol integrada, essencialmente constante, seja retirada durante a varredura de SMPS, e também se as perdas forem caracterizadas e os tempos de análise minimizados, essa abordagem pode essencialmente eliminar esse problema.

3 METODOLOGIA

Localizado no campus da Universidade de Stuttgart em Vaihingen está o Instituto de Tecnologia de Combustão e de Geração de Energia (IFK) onde as experiências de laboratório foram montadas. A FIGURA 15 mostra uma representação gráfica do esquema de configuração dos experimentos. Utilizou-se um analisador SPMS acoplado a um CPC da marca *Grimm Aerosol Technik*, modelo 5.420, operado na ponta e com vazões de aerossóis de 0,3 l / min.

FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DE PERDA DE PARTÍCULAS EM TUBULAÇÕES LONGAS COM O SMPS+C



FONTE: O autor (2017)

Antes de entrar no SMPS, o fluxo foi conduzido por um neutralizador de fonte radioativa Ni-63 usado para equilibrar a carga elétrica do aerossol antes de acessar o DMA. A gama de diâmetros de partículas medidas pelo aparelho foi de $7 < dp < 1350$ nm e, em uma experiência, um espectrômetro de aerossol portátil da marca Grimm, modelo 1.100, que foi usado para medir partículas de $0,5 < dp < 10$ μ m.

As diferentes mangueiras ou tubos utilizados nos experimentos serão descritos individualmente, sendo os materiais utilizados o Polytetrafluoretileno (PTFE) comercialmente denominado Teflon[®], o Policloreto de Vinila (PVC) e o cobre (Cu).

As mangueiras e tubos foram acoplados na orientação horizontal no chão ou, eventualmente, sobre carrinhos ou caixas, e ainda aterrados para evitar perdas de

partículas devido a cargas eletrostáticas. Para compensar a perda de pressão na tubulação, foi utilizada uma bomba de ar com pressão de trabalho de 150 mBar e $16,3 \text{ m}^3 / \text{h}$ de capacidade máxima de fluxo volumétrico. Quando nenhum tubo foi conectado à entrada do SMPS, a bomba de ar estava continuamente funcionando para evitar perturbações e manter o fluxo constante na tubulação em todos os momentos. Para calibrar o fluxo de volume através do tubo, um medidor de fluxo de volume com o intervalo de 0 a $10 \text{ m}^3 / \text{h}$, com precisão de $0,1 \text{ m}^3 / \text{h}$ foi montado para verificar o no volume de fluxo de ar na tubulação.

Para garantir uma amostragem isocinética do ar, foram confeccionadas sondas de bicos cilíndricos de 22 cm de comprimento feitas de uma liga metálica e com diferentes diâmetros para atender as diferentes velocidades de fluxo dos cálculos. Algumas peças de tubulação estavam conectadas com mangueiras de material de silicone tratado com material condutivo eletricamente ou ainda mangueiras de PVC e seladas com grampos de metal, grampos de plástico e eventualmente fitas adesivas. A localização dos experimentos foi o IFK, dentro de um laboratório fechado ou fora do prédio, de acordo com a especificação de cada experimento. O fluido analisado era basicamente o ar ambiente de interior e exterior. A FIGURA 16 mostra as entradas da sonda de bico para amostragem de ar em condições isocinéticas.

FIGURA 16 – SONDA DE BICO PARA AMOSTRAGEM DE AR



FONTE: O autor (2017)

Os experimentos foram realizados durante a temporada de primavera entre maio e julho e a temperatura nos dias de teste foi de 25 °C com 40 % de umidade no ar. Quando a entrada de amostragem de ar do experimento estava localizada dentro do laboratório, uma mangueira com 5 m de extensão conduzia o ar de exaustão da bomba para o exterior, evitando que o aquecimento do ar causado pela bomba de ar pudesse elevar a temperatura local.

3.1 EXPERIMENTO 1 – LABORATÓRIO – TEFLON TUBE

Este foi o primeiro experimento realizado a partir da ideia inicial de usar um tubo flexível de Teflon com 10 mm de diâmetro interno, pois seria fácil montar no local da Experimento *Moss Wall* para amostragem de ar e poderia ser retornado ao laboratório no caso de necessidade de calibração.

Parâmetros

Time of the experiment	22.05.2017 (17:27 – 18:20)
Tube material	PTFE - Teflon™ (new)
Tube length (L)	40 m
Tube internal diameter (D_t)	10 mm
Tube orientation	Horizontally laid on the lab floor
Turns and Bends	Rolled in a 80 cm circle
Nozzle probe sampling diameter (d_n)	1,3 mm
Volume flow of SMPS inlet	0,3 l/min
Sample substance	Inside lab ambient air
Analyzer	SMPS+C Grimm Model 5.420
Frequency of sampling	14 Cycles of 229 s each
Number of columns	144 Channels
Range of particle diameter	7,91 nm – 1357,73 nm
Air density (ρ)	1,184 kg/m ³ (25°C)
Dynamic viscosity of air (μ)	1,885.10 ⁻⁵ kg.s/m ² (25°C)

Cálculos

Velocidade de fluxo (ω):

$$Q_V = A \cdot \omega$$

$$Q_n = A_n \cdot \omega_n$$

$$\omega_n = \frac{Q_n}{A_n} = \frac{0,3 \frac{l}{min}}{\frac{\pi \cdot (1,3mm)^2}{4}} = 0,226 \frac{l}{min \cdot mm^2} = 3,76 \frac{m}{s}$$

Volume de Fluxo (Q_v):

$$Q_t = A_t \cdot \omega_t$$

For isokinetic sampling: $\omega_t = \omega_n$

$$Q_t = A_t \cdot \omega_n = \frac{\pi \cdot (10\text{mm})^2}{4} \cdot 0,226 \frac{\text{l}}{\text{min} \cdot \text{mm}^2} = 17,751 \frac{\text{l}}{\text{min}} = \mathbf{1,07 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}$$

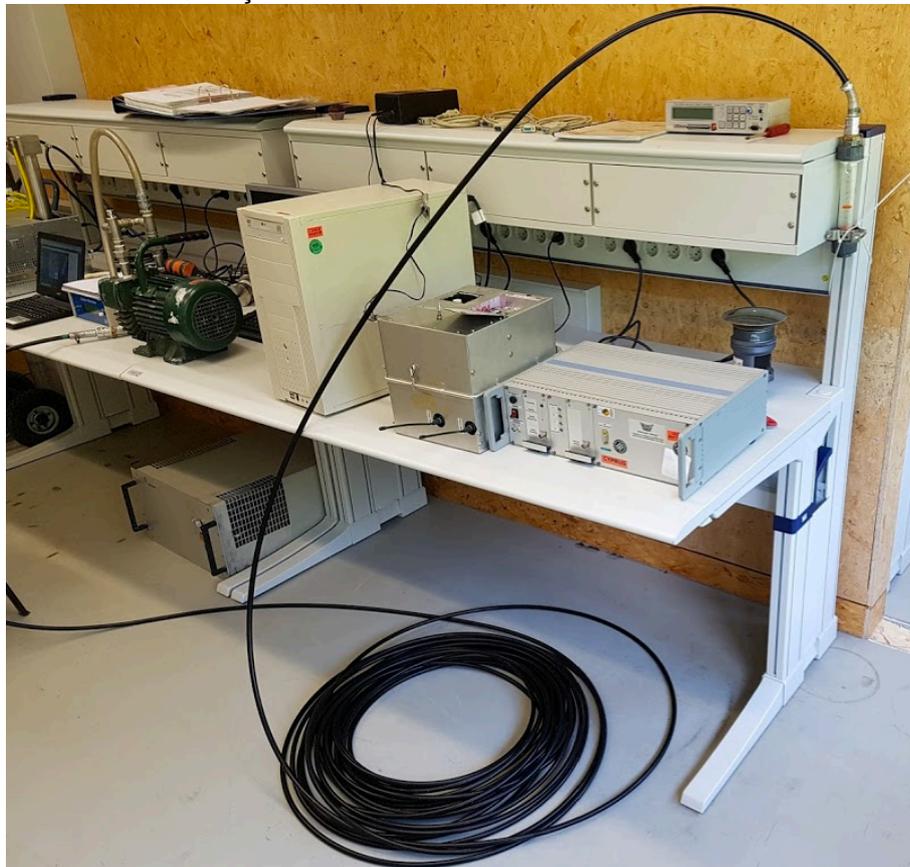
Reynolds Number (Re):

$$Re = \frac{\rho \cdot \omega_t \cdot D_t}{\mu} = \frac{1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3,76 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,01\text{m}}{1,885 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}} = \mathbf{2362}$$

$2300 < Re < 4000$ (Transient flow regime)

Na FIGURA 17 é possível ver a mangueira de Teflon enrolada horizontalmente no laboratório do IFK.

FIGURA 17 – CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO COM TUBO DE TEFLON ENROLADO



FONTE: O autor (2017)

3.2 EXPERIMENTO 2 – LABORATÓRIO – TEFLON

Este experimento foi realizado com o mesmo material do anterior, o Teflon flexível. A ideia era avaliar se a mangueira fosse esticada fora do edifício do IFK, os resultados seriam melhores do que com a mangueira enrolada dentro do laboratório.

Parâmetros

Time of the experiment	23.05.2017 (10:21 - 11:10)
Tube material	PTFE - Teflon™ (new)
Tube length (L)	40 m
Tube internal diameter (D_t)	10 mm
Tube orientation	Horizontally laid outside the building
Turns and Bends	Straight tube with two 90 degree bends
Nozzle probe sampling diameter (d_n)	1,3 mm
Volume flow of SMPS inlet	0,3 l/min
Sample substance	Outside ambient air
Analyzer	SMPS+C Grimm Model 5.420
Frequency of sampling	13 Cycles of 229 s each
Number of columns	144 Channels
Range of particle diameter	7,91 nm – 1357,73 nm
Air density (ρ)	1,184 kg/m ³ (25°C)
Dynamic viscosity of air (η)	1,885.10 ⁻⁵ kg.s/m ² (25°C)

Cálculos

Velocidade de fluxo (ω):

$$\omega_n = \frac{Q_n}{A_n} = \frac{0,3 \frac{l}{min}}{\frac{\pi \cdot (1,3mm)^2}{4}} = 0,226 \frac{l}{min \cdot mm^2} = 3,76 \frac{m}{s}$$

Volume de Fluxo (Q_V):

$$Q_t = A_t \cdot \omega_n = \frac{\pi \cdot (10mm)^2}{4} \cdot 0,226 \frac{l}{min \cdot mm^2} = 17,751 \frac{l}{min} = 1,07 \frac{m^3}{h}$$

Reynolds Number (Re):

$$Re = \frac{\rho \cdot \omega_t \cdot D_t}{\mu} = \frac{1,184 \frac{kg}{m^3} \cdot 3,76 \frac{m}{s} \cdot 0,01m}{1,885 \cdot 10^{-5} \frac{kg \cdot s}{m^2}} = 2362$$

$2300 < Re < 4000$ (*Transient flow regime*)

Na FIGURA 18 é possível ver a mangueira de Teflon esticada horizontalmente fora do prédio do IFK.

FIGURA 18 – CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO COM TUBO DE TEFLON ESTICADO



FONTE: O autor (2017)

3.3 EXPERIMENTO 3 – LABORATÓRIO – PVC

Nesta experiência, o objetivo foi avaliar o uso de outro material, uma mangueira flexível de PVC, tentando se aproximar da dimensão utilizada na experiência ZOTTO. Neste caso, foi utilizado uma mangueira de pequeno comprimento que havia disponível no laboratório do IFK.

Parâmetros

Time of the experiment	23.05.2017 (14:11 - 15:15)
Tube material	PVC (new)
Tube length (L)	4 m
Tube internal diameter (D_t)	24 mm
Tube orientation	Horizontally laid on lab desk
Turns and Bends	Rolled in a 80 cm circle
Nozzle probe sampling diameter (d_n)	2,7 mm
Volume flow of SMPS inlet	0,3 l/min
Sample substance	Inside lab ambient air
Analyzer	SMPS+C Grimm Model 5.420
Frequency of sampling	17 Cycles of 229 s each
Number of columns	144 Channels
Range of particle diameter	7,91 nm – 1357,73 nm
Air density (ρ)	1,184 kg/m ³ (25°C)
Dynamic viscosity of air (μ)	1,885.10 ⁻⁵ kg.s/m ² (25°C)

Cálculos

Velocidade de fluxo (ω):

$$\omega_n = \frac{Q_n}{A_n} = \frac{0,3 \frac{l}{min}}{\frac{\pi \cdot (2,7mm)^2}{4}} = 0,052 \frac{l}{min \cdot mm^2} = \mathbf{0,85 \frac{m}{s}}$$

Volume de Fluxo (Q_V):

$$Q_t = A_t \cdot \omega_n = \frac{\pi \cdot (24\text{mm})^2}{4} \cdot 0,052 \frac{\text{l}}{\text{min} \cdot \text{mm}^2} = 22,85 \frac{\text{l}}{\text{min}} = 1,37 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

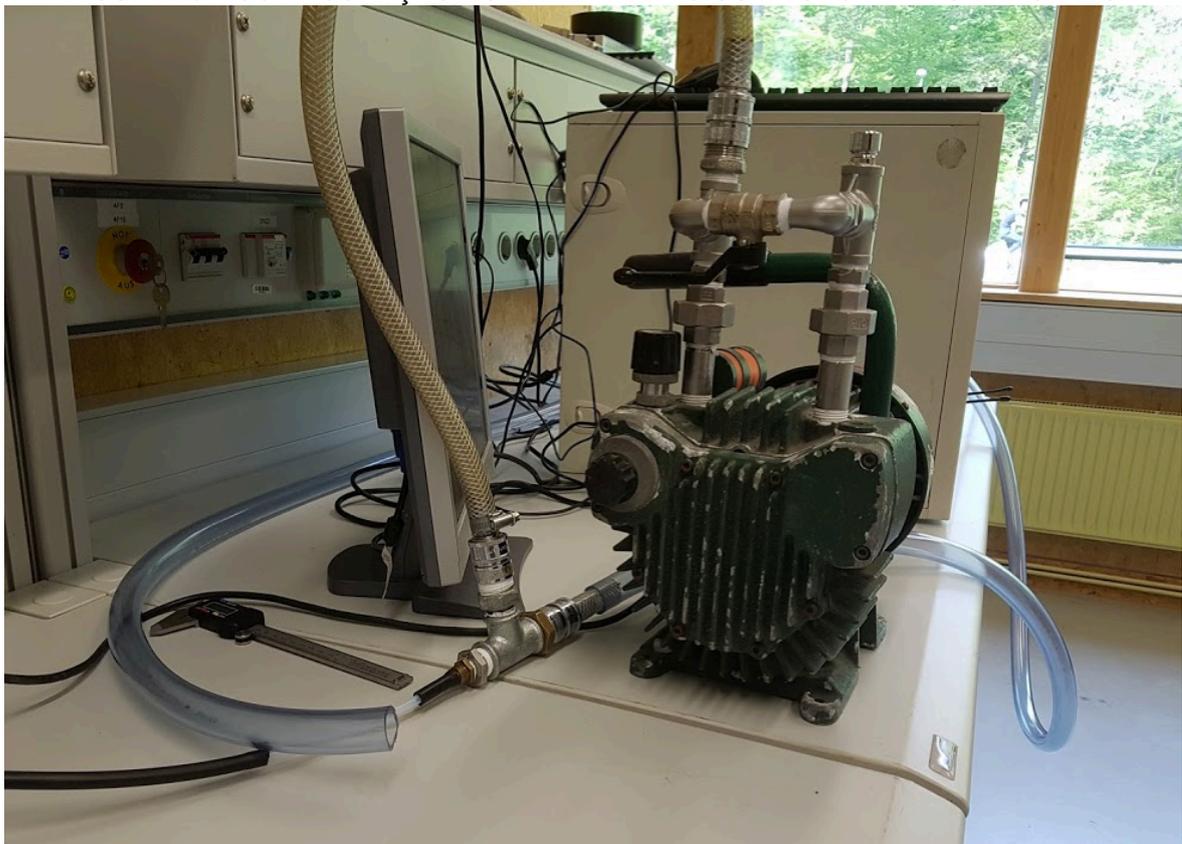
Reynolds Number (Re):

$$Re = \frac{\rho \cdot \omega_t \cdot D_t}{\mu} = \frac{1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,85 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,024\text{m}}{1,885 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}} = 1281$$

$Re < 2300$ (*Laminar flow regime*)

Na FIGURA 3.5 é possível ver a mangueira de PVC enrolada horizontalmente no laboratório do IFK.

FIGURA 19 – CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO COM TUBO DE PVC ENROLADO



FONTE: O autor (2017)

3.4 EXPERIMENTO 4 – LABORATÓRIO – COBRE

No experimento ZOTTO foi usado um tubo metálico de aço inox, então foi decidido que deveria ser usado um tubo metálico para este experimento. Assim, foi escolhido um tubo de cobre da marca Sanco[®]. Um problema era que o tubo de cobre de 50 m necessário para o experimento, estava disponível comercialmente somente em 2 tubos de 25 m de comprimento cada, e com 22 mm de diâmetro interno. Os tubos de cobre são relativamente flexíveis; disponível em longos comprimentos; fácil de trabalhar; tem juntas e acessórios prontamente disponíveis comercialmente; tem um coeficiente de rugosidade inferior ao aço inoxidável ou mangueiras de plástico; são muito bons condutores elétricos; e os preços de mercado no período da pesquisa, estavam custando metade do preço das mangueiras plástico tratadas com material condutivo ou dos tubos de aço inoxidável.

Parâmetros

Time of the experiment	12.06.2017 (18:43 – 19:59)
Tube material	Copper (new)
Tube length (L)	50 m
Tube internal diameter (D_t)	22 mm
Tube orientation	Horizontally laid on moving cart
Turns and Bends	Rolled in a 80 cm circle
Nozzle probe sampling diameter (d_n)	2,7 mm
Volume flow of SMPS inlet	0,3 l/min
Sample substance	Inside lab ambient air
Analyzer	SMPS+C Grimm Model 5.420
Frequency of sampling	20 Cycles of 229 s each
Number of columns	144 Channels
Range of particle diameter	7,91 nm – 1357,73 nm
Air density (ρ)	1,184 kg/m ³ (25°C)
Dynamic viscosity of air (μ)	1,885.10 ⁻⁵ kg.s/m ² (25°C)

Cálculos

Velocidade de fluxo (ω):

$$\omega_n = \frac{Q_n}{A_n} = \frac{0,3 \frac{l}{min}}{\frac{\pi \cdot (2,7mm)^2}{4}} = 0,052 \frac{l}{min \cdot mm^2} = 0,85 \frac{m}{s}$$

Volume de Fluxo (Q_V):

$$Q_t = A_t \cdot \omega_n = \frac{\pi \cdot (22mm)^2}{4} \cdot 0,052 \frac{l}{min \cdot mm^2} = 19,92 \frac{l}{min} = 1,2 \frac{m^3}{h}$$

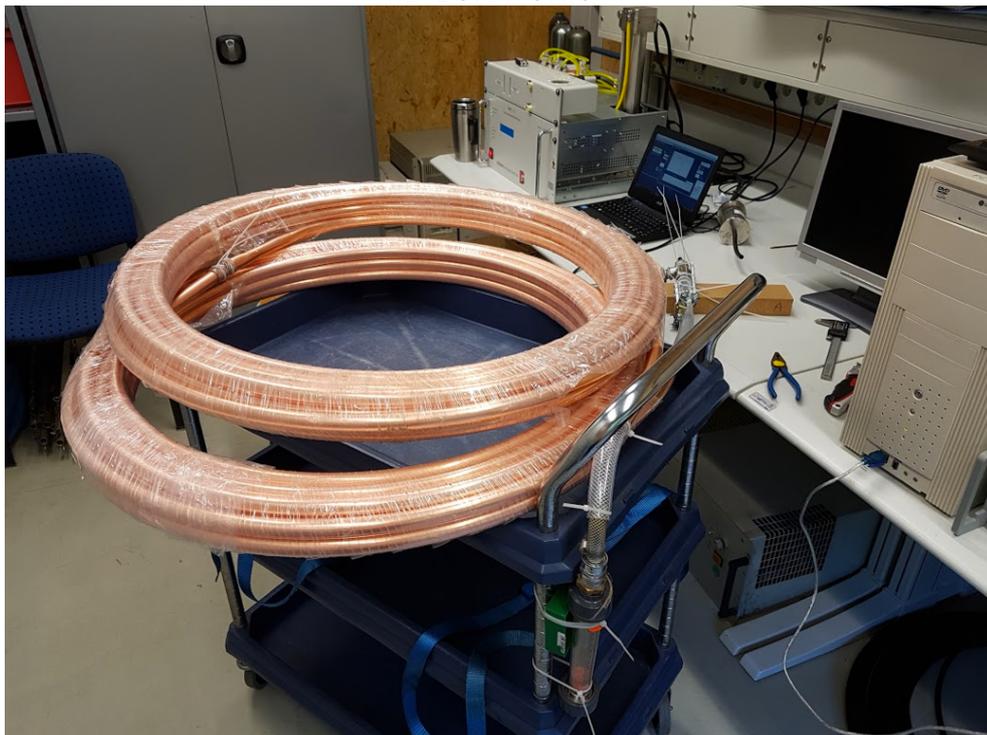
Reynolds Number (Re):

$$Re = \frac{\rho \cdot \omega_t \cdot D_t}{\mu} = \frac{1,184 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,85 \frac{m}{s} \cdot 0,022m}{1,885 \cdot 10^{-5} \frac{kg \cdot s}{m^2}} = 1175$$

$Re < 2300$ (*Laminar flow regime*)

Na FIGURA 20 é possível ver os tubos de cobre enrolados horizontalmente no laboratório do IFK.

FIGURA 20 – CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO COM TUBO DE COBRE ENROLADO NO LABORATÓRIO



FONTE: O autor (2017)

3.5 EXPERIMENTO 5 – LABORATÓRIO – COBRE

A proposta deste experimento foi realizar uma experiência com o tubo de cobre com ar ambiente externo. O pátio interno ao ar livre do IKF foi usado como local de amostragem para ter condições de ar mais estáveis.

Parâmetros

Time of the experiment	14.06.2017 (12:10 – 12:40)
Tube material	Copper (new)
Tube length (L)	50 m
Tube internal diameter (D_t)	22 mm
Tube orientation	Horizontally laid over boxes on the ground
Turns and Bends	Rolled in a 80 cm circle
Nozzle probe sampling diameter (d_n)	2,7 mm
Volume flow of SMPS inlet	0,3 l/min
Sample substance	Outside ambient air
Analyzer	SMPS+C Grimm Model 5.420
Frequency of sampling	8 Cycles of 229 s each
Number of columns	144 Channels
Range of particle diameter	7,91 nm – 1357,73 nm
Air density (ρ)	1,184 kg/m ³ (25°C)
Dynamic viscosity of air (μ)	1,885.10 ⁻⁵ kg.s/m ² (25°C)

Cálculos

Velocidade de fluxo (ω):

$$\omega_n = \frac{Q_n}{A_n} = \frac{0,3 \frac{l}{min}}{\frac{\pi \cdot (2,7mm)^2}{4}} = 0,052 \frac{l}{min \cdot mm^2} = \mathbf{0,85 \frac{m}{s}}$$

Volume de Fluxo (Q_V):

$$Q_t = A_t \cdot \omega_n = \frac{\pi \cdot (22mm)^2}{4} \cdot 0,052 \frac{l}{min \cdot mm^2} = 19,92 \frac{l}{min} = \mathbf{1,2 \frac{m^3}{h}}$$

Reynolds Number (Re):

$$Re = \frac{\rho \cdot \omega_t \cdot D_t}{\mu} = \frac{1,184 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,85 \frac{m}{s} \cdot 0,022m}{1,885 \cdot 10^{-5} \frac{kg \cdot s}{m^2}} = 1175$$

$Re < 2300$ (*Laminar flow regime*)

Na FIGURA 21 é possível ver os tubos de cobre enrolados horizontalmente no pátio interno do IFK amostrando ar exterior.

FIGURA 21 – CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO COM TUBO DE COBRE ENROLADO NO PÁTIO INTERNO DO IFK



FONTE: O autor (2017)

3.6 EXPERIMENTO 6 – LABORATÓRIO – COBRE

Seguindo o experimento anterior, neste caso, um Espectrômetro de Aerossol portátil foi montado na linha de amostragem com um conector de tipo T para avaliar o desempenho do tubo de cobre no transporte de partículas maiores para amostragem com ar ambiente externo. Novamente, o pátio interno do IKF foi usado como local de amostragem para ter uma condição de ar mais estável.

Parâmetros

Time of the experiment	14.06.2017 (16:29 - 17:33)
Tube material	Copper (new)
Tube length (L)	50 m
Tube internal diameter (D_t)	22 mm
Tube orientation	Horizontally laid over boxes on the ground
Turns and Bends	Rolled in a 80 cm circle
Nozzle probe sampling diameter (d_n)	2,7 mm
Volume flow of SMPS inlet	0,3 l/min
Sample substance	Outside ambient air
Analyzers	SMPS+C Grimm Model 5.420 and Aerosol Spectrometer Grimm Model 1.100
Frequency of sampling	18 Cycles of 229 s each
Number of columns	144 Channels
Range of particle diameter	7,91 nm – 1357,73 nm
Air density (ρ)	1,184 kg/m ³ (25°C)
Dynamic viscosity of air (μ)	1,885.10 ⁻⁵ kg.s/m ² (25°C)

Cálculos

Velocidade de fluxo (ω):

$$\omega_n = \frac{Q_n}{A_n} = \frac{0,3 \frac{l}{min}}{\frac{\pi \cdot (2,7mm)^2}{4}} = 0,052 \frac{l}{min \cdot mm^2} = \mathbf{0,85 \frac{m}{s}}$$

Volume de Fluxo (Q_v):

$$Q_t = A_t \cdot \omega_t = \frac{\pi \cdot (22\text{mm})^2}{4} \cdot 0,052 \frac{1}{\text{min} \cdot \text{mm}^2} = 19,92 \frac{1}{\text{min}} = 1,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Reynolds Number (Re):

$$Re = \frac{\rho \cdot \omega_t \cdot D_t}{\mu} = \frac{1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,85 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,022\text{m}}{1,885 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}} = 1175$$

$Re < 2300$ (*Laminar flow regime*)

Na FIGURA 22 é possível ver os tubos de cobre enrolados horizontalmente no pátio interno do IFK amostrando ar exterior com o SMPS+C e o espectrômetro de aerossol.

FIGURA 22 – CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO COM TUBO DE COBRE ENROLADO NO PÁTIO INTERNO DO IFK



FONTE: O autor (2017)

3.7 EXPERIMENTO 7 – LABORATÓRIO – COBRE

Depois de analisar os resultados do experimento anterior, foram realizados cálculos de dinâmica de fluidos e, a partir disso, foram feitos alguns ajustes para obter o fluxo de volume o mais próximo possível de 40 l / min, com base no experimento ZOTTO, mas mantendo o Re em fluxo laminar. A partir desses cálculos, foram feitos ajustes na entrada da sonda do bocal para a amostragem do SMPS. Além disso, muitos conectores foram substituídos com o objetivo de ter os tubos de plástico o menor possíveis nas uniões de juntas, evitando pontos de turbulência. Outro ajuste importante foi o posicionamento do medidor de fluxo que agora estava em operação constante, conectado à mangueira vertical ligada à bomba de vácuo logo após o fluxo de ar ter passado no ponto de entrada do bico para o SMPS, não perturbando a velocidade isocinética e tendo um controle da velocidade de fluxo mais precisa na sonda de bico de entrada de amostragem do SMPS.

Parâmetros

Time of the experiment	27.06.2017 (18:32 – 19:44)
Tube material	Copper (new)
Tube length (L)	50 m
Tube internal diameter (D_t)	22 mm
Tube orientation	Horizontally laid over boxes on the ground
Turns and Bends	Rolled in a 80 cm circle
Nozzle probe sampling diameter (d_n)	2,2 mm
Volume flow of SMPS inlet	0,3 l/min
Sample substance	Inside lab ambient air
Analyzer	SMPS+C Grimm Model 5.420
Frequency of sampling	19 Cycles of 229 s each
Number of columns	144 Channels
Range of particle diameter	7,91 nm – 1357,73 nm
Air density (ρ)	1,184 kg/m ³ (25°C)
Dynamic viscosity of air (μ)	1,885.10 ⁻⁵ kg.s/m ² (25°C)

Cálculos

Cálculo do diâmetro interno da sonda do bico (d_n), se:

$$\underline{Q_t = 40 \text{ l/min}}$$

Velocidade de fluxo (ω):

$$Q_t = A_t \cdot \omega_t$$

$$\omega_t = \frac{Q_t}{A_t} = \frac{40 \frac{\text{l}}{\text{min}}}{\frac{\pi \cdot (22\text{mm})^2}{4}} = 0,105 \frac{\text{l}}{\text{min} \cdot \text{mm}^2} = \mathbf{1,75 \frac{m}{s}}$$

Diâmetro interno da sonda do bico (d_n):

$$Q_n = A_n \cdot \omega_n$$

$$\text{For isokinetic sampling: } \omega_t = \omega_n$$

$$Q_n = A_n \cdot \omega_t$$

$$d_n = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_n}{\pi \cdot \omega_t}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0003 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}}{\pi \cdot 105 \frac{\text{m}}{\text{min}}}} = 0,0019\text{m} = \mathbf{1,9\text{mm}}$$

Reynolds Number (Re):

$$Re = \frac{\rho \cdot \omega_t \cdot D_t}{\mu} = \frac{1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,75 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,022\text{m}}{1,885 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}} = \mathbf{2418}$$

$$2300 < Re < 4000 \text{ (Transient flow regime)}$$

$$\underline{d_n = 2,0\text{mm}}$$

Velocidade de fluxo (ω):

$$Q_V = A \cdot \omega$$

$$Q_n = A_n \cdot \omega_n$$

$$\omega_n = \frac{Q_n}{A_n} = \frac{0,3 \frac{\text{l}}{\text{min}}}{\frac{\pi \cdot (2,0\text{mm})^2}{4}} = 0,095 \frac{\text{l}}{\text{min} \cdot \text{mm}^2} = \mathbf{1,59 \frac{m}{s}}$$

Volume de Fluxo (Q_v):

$$Q_t = A_t \cdot \omega_t$$

For isokinetic sampling: $\omega_t = \omega_n$

$$Q_t = A_t \cdot \omega_n = \frac{\pi \cdot (22\text{mm})^2}{4} \cdot 0,095 \frac{1}{\text{min} \cdot \text{mm}^2} = 36,11 \frac{1}{\text{min}} = 2,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Reynolds Number (Re):

$$Re = \frac{\rho \cdot \omega_t \cdot D_t}{\mu} = \frac{1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,59 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,022\text{m}}{1,885 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}} = 2197$$

$Re < 2300$ (Laminar flow regime)

(Re) para diferentes sondas de entrada de bico para amostragem:

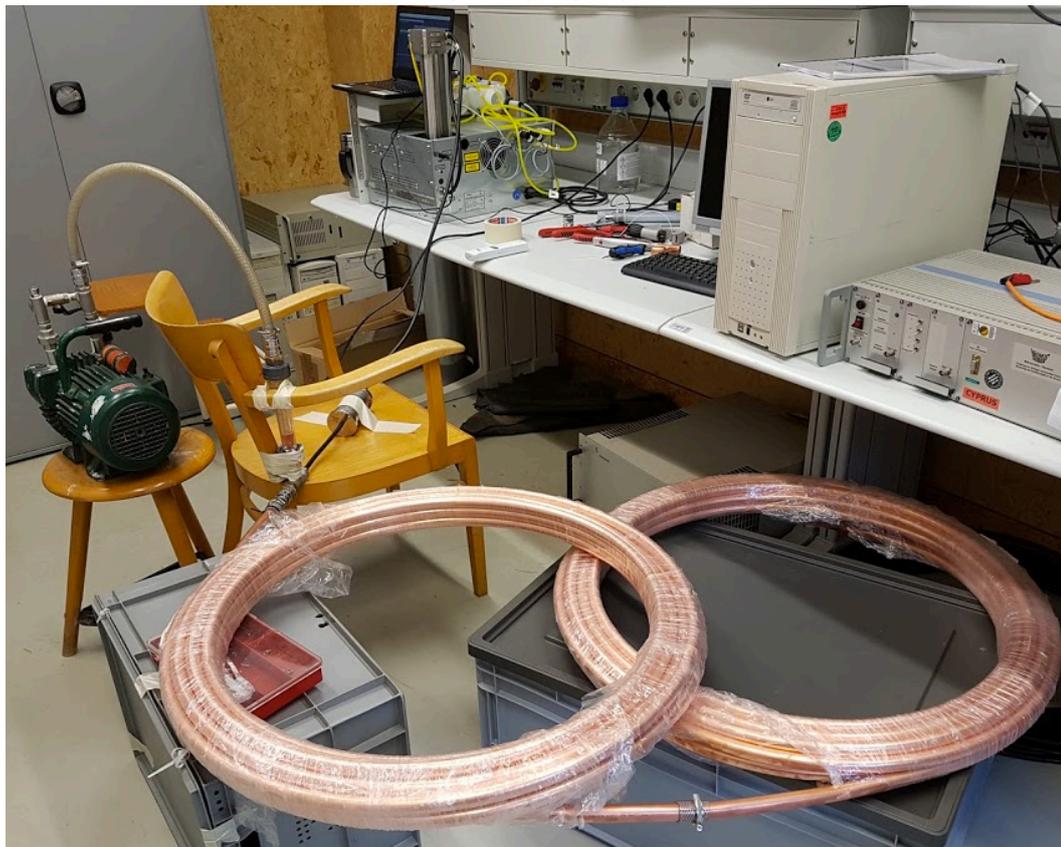
TABELA 2 – (Re) PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE FLUXO DE AMOSTRAGEM

d_n (mm)	Q_t $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)$	Q_t $\left(\frac{\text{l}}{\text{min}}\right)$	Re
1,9	2,4	40,0	2418
2,0	2,2	36,3	2197
2,1	2,0	32,9	1994
2,2	1,8	30,0	1824

FONTE: O autor (2017)

Na FIGURA 23 é possível ver os tubos de cobre enrolados horizontalmente no laboratório do IFK.

FIGURA 23 – CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO COM TUBO DE COBRE ENROLADO NO LABORATÓRIO DO IFK



FONTE: O autor (2017)

3.8 EXPERIMENTO 8 – CAMPO – COBRE

Após os ajustes no experimento 7 e os bons resultados alcançados, agora o experimento foi instalado no campo junto ao *Moss Wall*. Os parâmetros são os mesmos que o experimento de laboratório 7 conforme listado abaixo.

Parâmetros

Time of the experiment	24.07.2017 (12:54 – 14:55)
Tube material	Copper (new)
Tube length (L)	50 m
Tube internal diameter (D_t)	22 mm
Tube orientation	Horizontally laid over boxes on the ground
Turns and Bends	Rolled in a 80 cm circle
Nozzle probe sampling diameter (d_n)	2,2 mm
Volume flow of SMPS inlet	0,3 l/min
Sample substance	Ambient air by the Moss Wall
Analyzer	SMPS+C Grimm Model 5.420
Frequency of sampling	32 Cycles of 229 s each
Number of columns	144 Channels
Range of particle diameter	7,91 nm – 1357,73 nm
Air density (ρ)	1,184 kg/m ³ (25°C)
Dynamic viscosity of air (μ)	1,885 · 10 ⁻⁵ kg.s/m ² (25°C)

Cálculos

Velocidade de fluxo (ω):

$$\omega_n = \frac{Q_n}{A_n} = \frac{0,3 \frac{\text{l}}{\text{min}}}{\frac{\pi \cdot (2,7\text{mm})^2}{4}} = 0,052 \frac{\text{l}}{\text{min} \cdot \text{mm}^2} = \mathbf{0,85 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

Volume de Fluxo (Q_v):

$$Q_t = A_t \cdot \omega_n = \frac{\pi \cdot (22\text{mm})^2}{4} \cdot 0,052 \frac{\text{l}}{\text{min} \cdot \text{mm}^2} = 19,92 \frac{\text{l}}{\text{min}} = \mathbf{1,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}$$

Reynolds Number (Re):

$$Re = \frac{\rho \cdot \omega_t \cdot D_t}{\mu} = \frac{1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,85 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,022\text{m}}{1,885 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}} = \mathbf{1175}$$

$Re < 2300$ (*Laminar flow regime*)

Na FIGURA 24 é possível ver a configuração do experimento em campo, no local do *Moss Wall*.

FIGURA 24 – CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO COM TUBO DE COBRE ENROLADO EM CAMPO NO LOCAL DO *MOSS WALL*



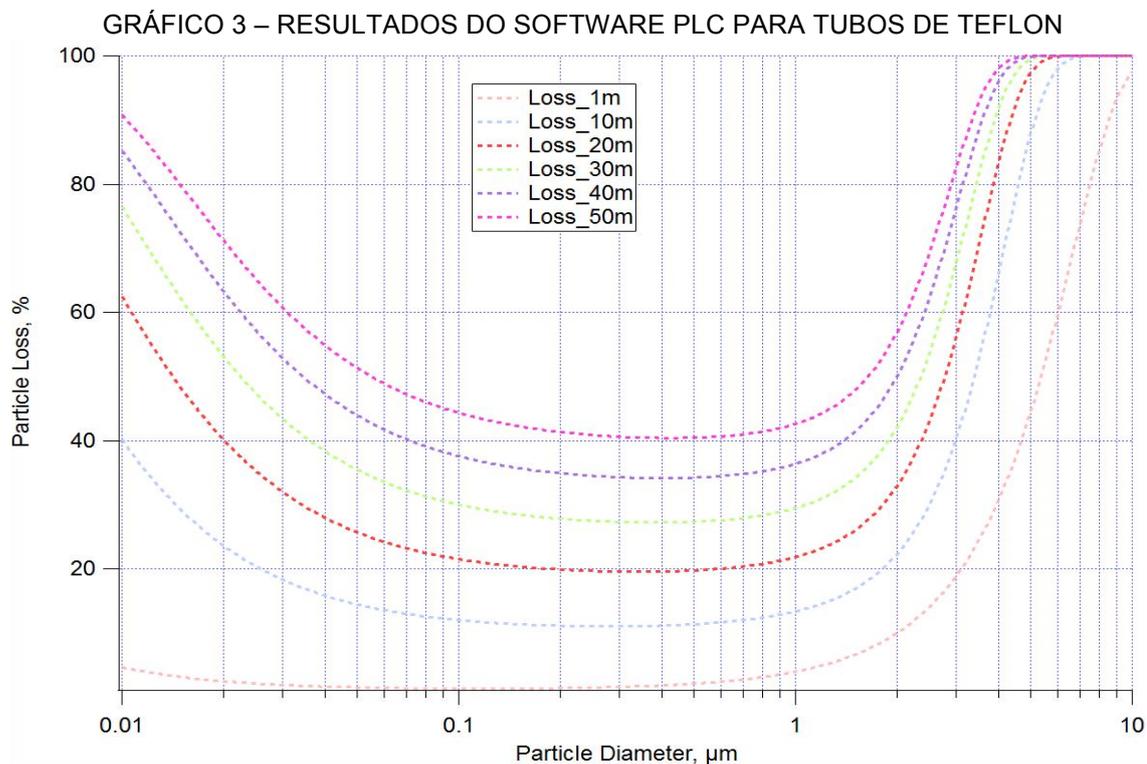
FONTE: O autor (2017)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EXPERIMENTO 1 – LABORATÓRIO – TEFLON

Os resultados deste experimento foram simulados no software PLC e a medição da concentração e o diâmetro das partículas com o SMPS+C.

No GRÁFICO 3, é possível observar a tela de resultado do software PLC onde as linhas gráficas mostram as perdas esperadas de partículas para a faixa de partículas $0,001 < dp < 10 \mu\text{m}$.

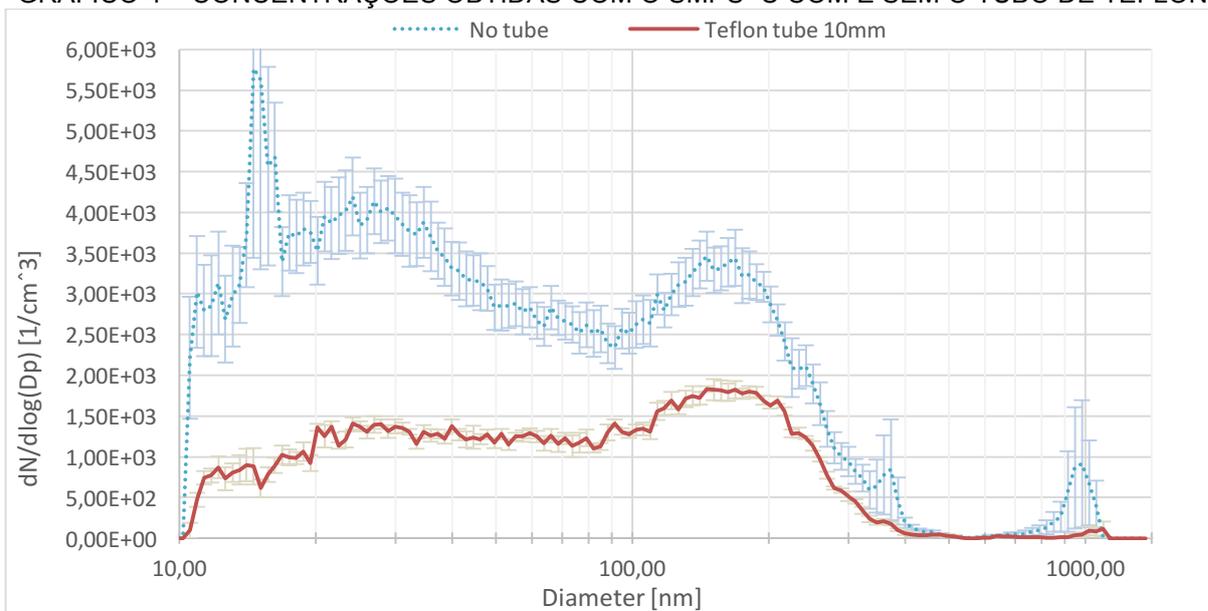


FONTE: PLC SOFTWARE SIMULATOR (2017)

Como esperado, partículas maiores com $dp > 3 \mu\text{m}$ apresentam uma perda expressiva de partículas devido a mecanismos sedimentares, mais de 40 % até 100 % para PM_{10} . Mesmo que uma boa resposta seja esperada para partículas finas e ultrafinas, o software mostrou um aviso de mensagem explicando que o fluxo estava no regime de transição ($\text{Re} = 2362$), e neste caso os cálculos do PLC não seriam válidos totalmente.

Os resultados do experimento mostrados no GRÁFICO 4 demonstram as medidas de concentração de partículas para diferentes diâmetros de partículas com o SMPS+C realizado usando o tubo de Teflon ligado e as medidas diretas sem o tubo.

GRÁFICO 4 – CONCENTRAÇÕES OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE TEFLON

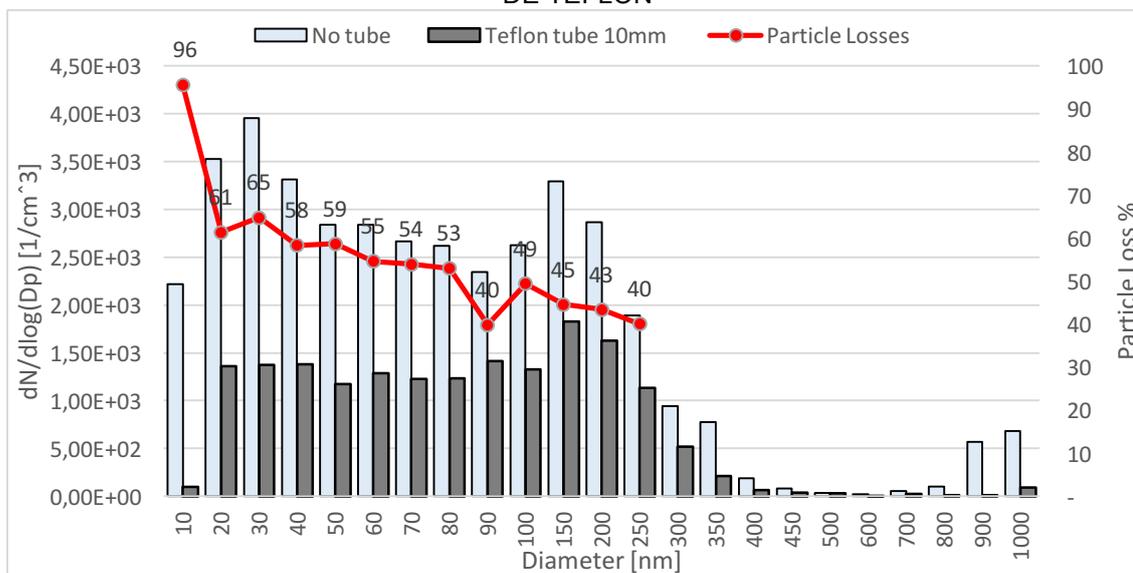


FONTE: O autor (2017)

As finas marcas verticais nos pontos de medição no GRÁFICO 4 representam a média padrão de erro dos dados da série. As linhas longas representam grande variação de dados. Isso pode ser explicado porque o ar ambiente foi usado para realizar o experimento de amostragem e que pode mudar durante o tempo, mesmo que o teste da sala de laboratório tenha as aberturas fechadas.

No GRÁFICO 5 é mostrada a diferença em % de perda de partículas no SMPS+C realizada usando o tubo de Teflon e medições diretas sem o tubo.

GRÁFICO 5 – PERDA DE PARTÍCULAS EM % OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE TEFLON



FONTE: O autor (2017)

Os números em % representam a diferença absoluta entre as duas medidas. Um aspecto importante é a ordem de grandeza do eixo Y como a concentração medida pelo SMPS+C.

O GRÁFICO 5 mostra grandes perdas em % em comparação com a medição sem tubulação. Existem algumas explicações para essas perdas:

- O tubo de Teflon foi todo enrolado horizontalmente criando grandes voltas e, portanto, grandes perdas foram esperadas pela deposição inercial nas curvas e também na difusão;
- Os cálculos teóricos relataram um $Re = 2362$, onde o fluxo está no regime transitório entre laminar e turbulento, não recomendado para amostras de partículas ultrafinas em aerossol para causar perdas por difusão.

4.2 EXPERIMENTO 2 – LABORATÓRIO – TEFLON

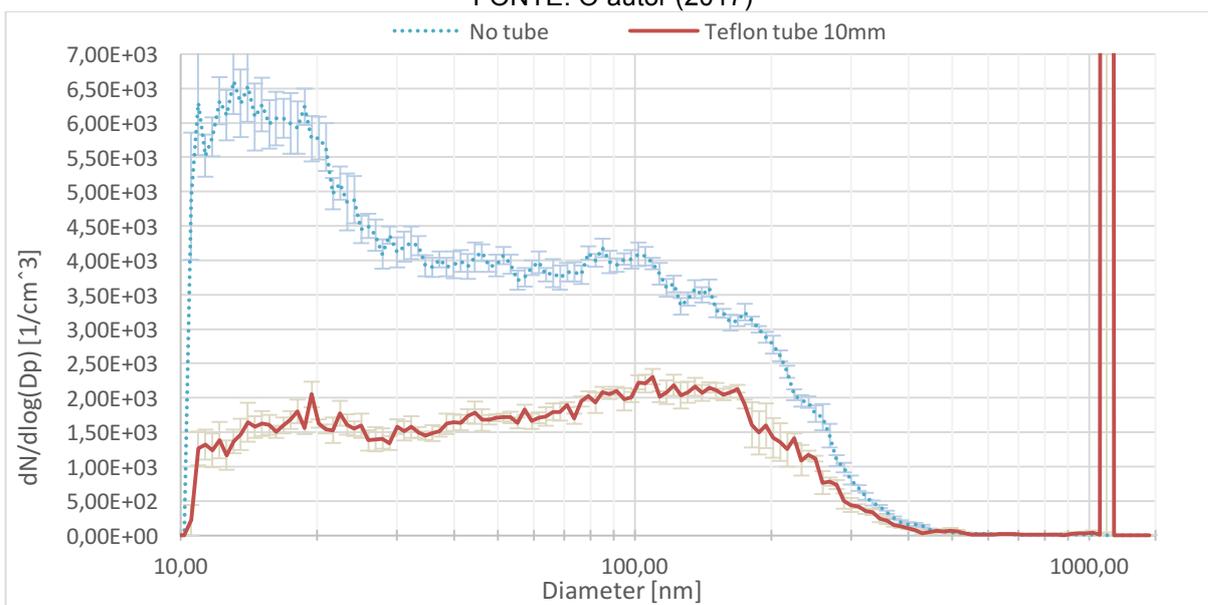
Os resultados deste experimento foram simulados no software PLC e a medição da concentração e o diâmetro das partículas com o SMPS+C.

Neste experimento, usando o simulador de software do PLC, os mesmos resultados foram observados porque o fluxo estava no regime de transição ($Re =$

2362) e o software mostrou uma mensagem dizendo que os cálculos não seriam válidos.

Os resultados do experimento mostrados no GRÁFICO 6 demonstram as medidas de concentração para diferentes diâmetros de partículas com o SMPS+C realizado sem tubo e com o tubo de Teflon.

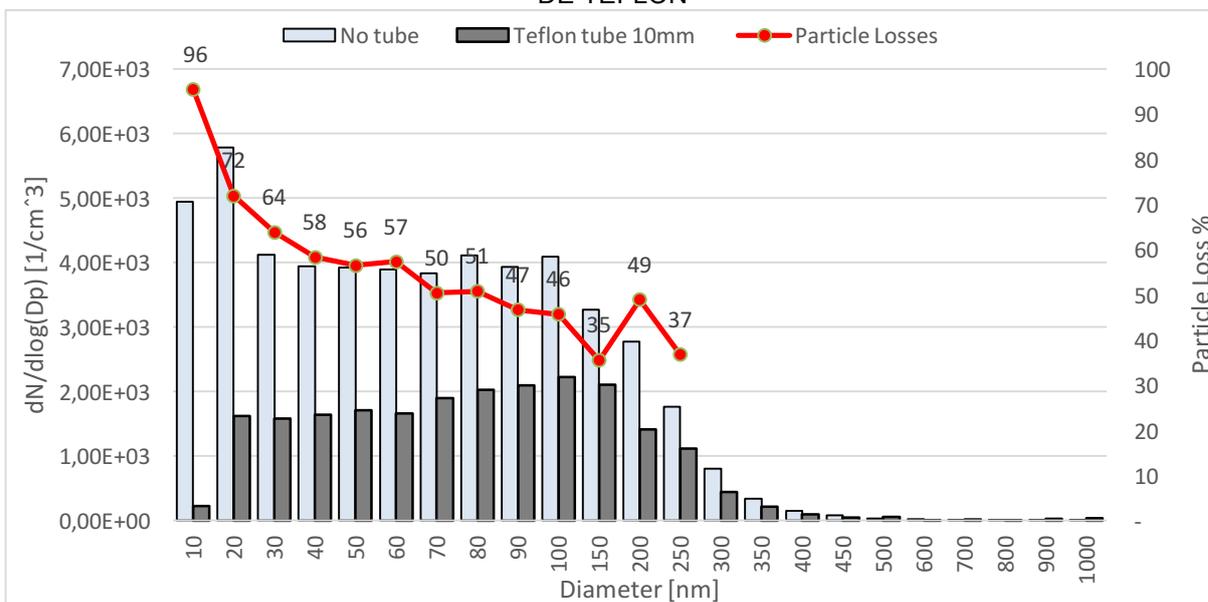
GRÁFICO 6 – CONCENTRAÇÕES OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE TEFLON
FONTE: O autor (2017)



FONTE: O autor (2017)

No GRÁFICO 7 é mostrada a diferença percentual de perda de partículas no SMPS+C realizada usando o tubo de Teflon e medições diretas sem o tubo.

GRÁFICO 7 – PERDA DE PARTÍCULAS EM % OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE TEFLON



FONTE: O autor (2017)

Com a mesma configuração que o experimento 1, os testes de laboratório com o SMPS+C apresentaram melhores resultados do que as perdas anteriores, mas ainda consideráveis, de partículas ultrafinas de aerossol com $dp < 100$ nm em leituras de amostragem. As explicações para isso são:

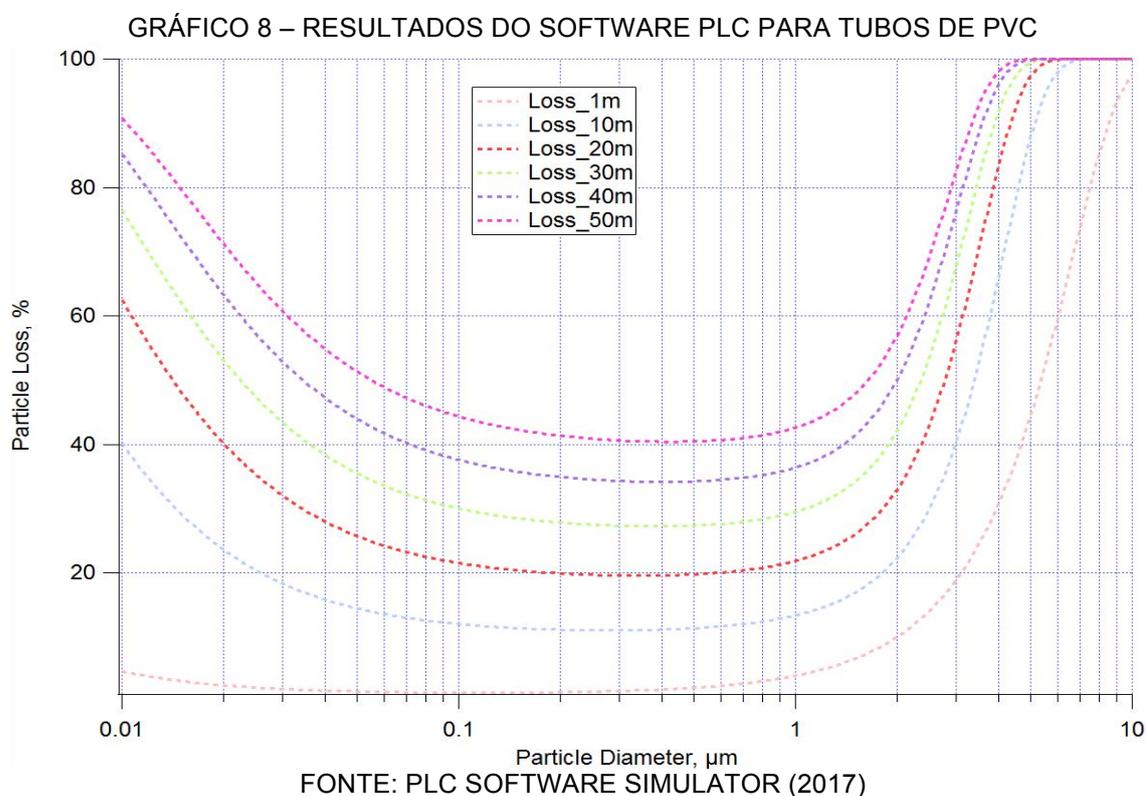
- O tubo de Teflon foi colocado diretamente no chão fora do prédio do IFK, mas ainda pode existir perdas devido à difusão;
- O tubo de Teflon ainda pode ter algumas perdas de partículas que podem ser associadas ao efeito eletrostático nas paredes do tubo.
- Como o experimento anterior, o fluxo do regime está na transição entre laminar e turbulento, não recomendado para a amostragem de partículas ultrafinas em aerossol devido a perdas por difusão.

4.3 EXPERIMENTO 3 – LABORATÓRIO – PVC

Os resultados deste experimento foram simulados no software PLC e a medição da concentração e do diâmetro das partículas com o SMPS+C.

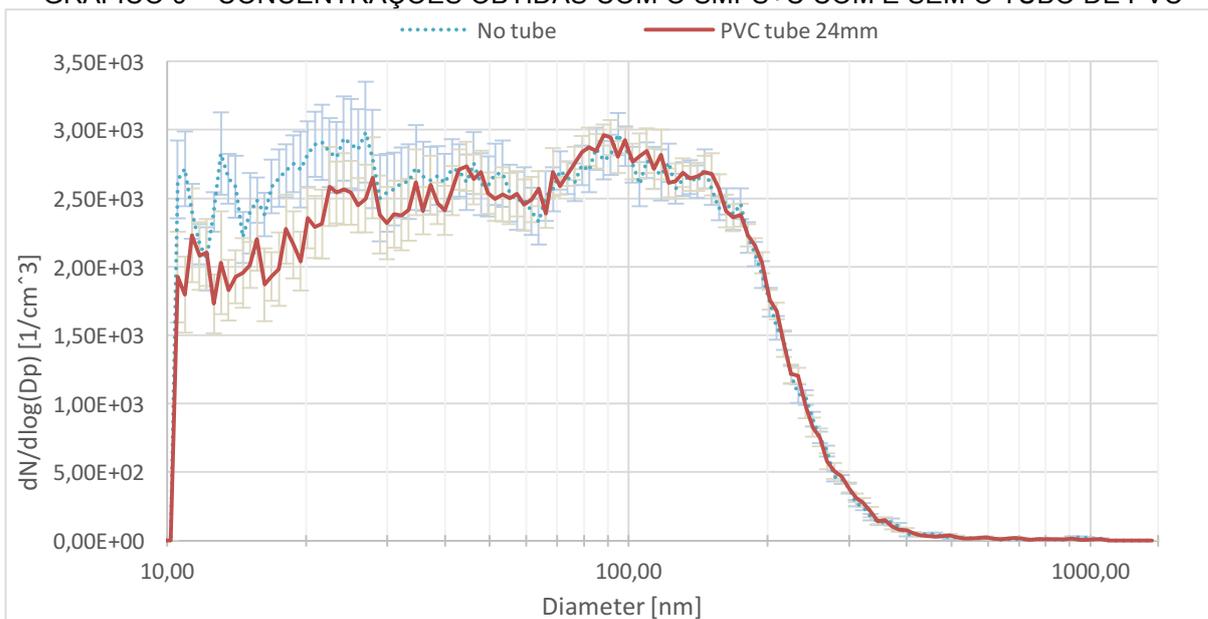
O GRÁFICO 8 apresenta os resultados do software PLC com o conjunto de parâmetros do experimento. É possível ver a linha gráfica que representa as perdas

de partículas no intervalo de $0,01 < dp < 10 \mu\text{m}$. Após $3 \mu\text{m}$, as perdas representam mais de 50 % como esperado para partículas maiores devido à deposição gravitacional no tubo.



Os resultados da experiência mostrados no GRÁFICO 9 demonstram as medidas de concentração para diferentes diâmetros de partículas com o SMPS+C realizado sem tubo e com o tubo de PVC. O cálculo do número de Reynolds foi $Re = 1281$, onde o fluxo é dito estar no regime laminar.

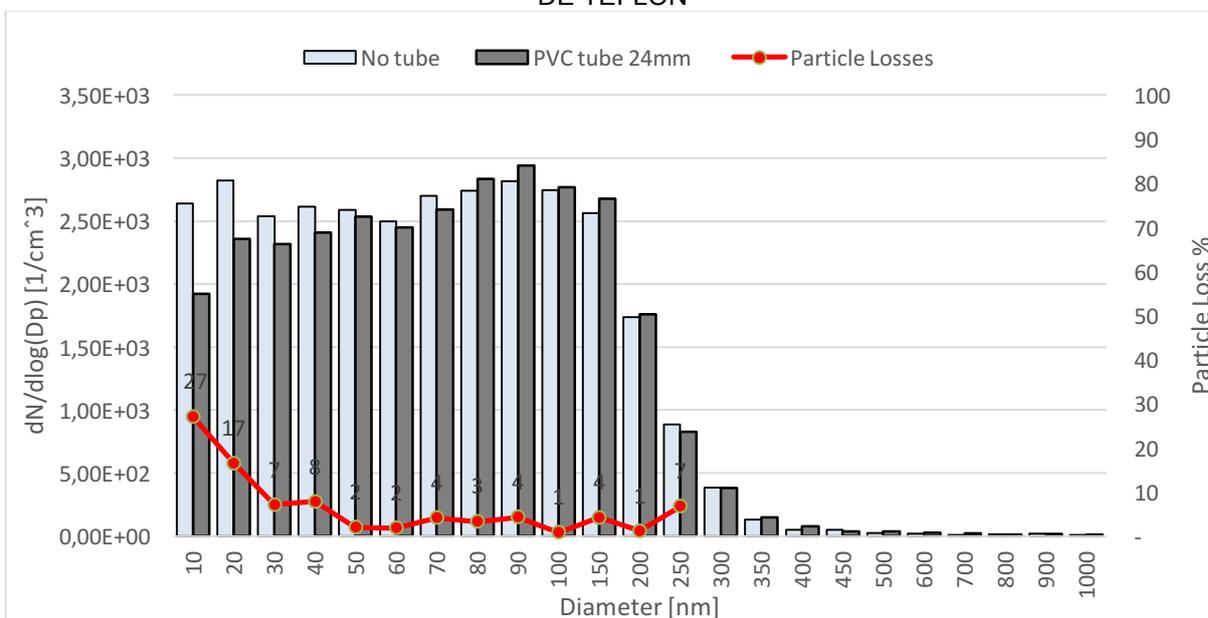
GRÁFICO 9 – CONCENTRAÇÕES OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE PVC



FONTE: O autor (2017)

No GRÁFICO 10 é mostrada a diferença de % de perda de partículas no SMPS+C realizada usando o tubo de PVC e medições diretas sem o tubo.

GRÁFICO 10 – PERDA DE PARTÍCULAS EM % OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE TEFLON



FONTE: O autor (2017)

Com uma configuração diferente em comparação com o experimento anterior, este experimento com o SMPS+C mostrou resultados muito bons com apenas algumas perdas aceitáveis de partículas ultrafinas de aerossol, abaixo de 5 %, na

faixa de $10 < dp < 50$ nm nas leituras de amostragem. Embora o experimento tenha mostrado bons resultados, algumas considerações devem ser feitas:

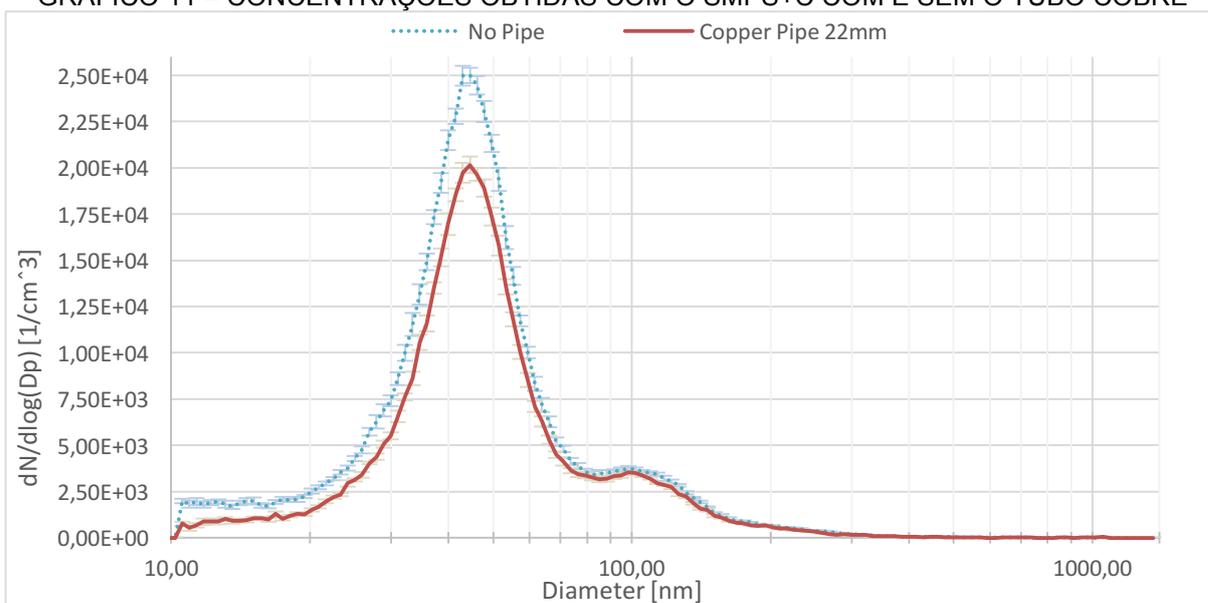
- O tubo era de material do tipo PVC condutor com apenas 4,8 m de comprimento, portanto muito curto. Isso evidencia que o comprimento do tubo tem grande influência sobre as perdas de partículas;
- O tubo possuía 24 mm de diâmetro interno, maior do que o diâmetro de 10 mm na experiência anterior;
- O número de Reynolds calculado foi de $Re = 1281$, portanto, sob regime de fluxo laminar, recomendado para amostragem de partículas ultrafinas em aerossol.

4.4 EXPERIMENTO 4 – LABORATÓRIO – COBRE

Os resultados deste experimento foram adquiridos com o SMPS+C. O simulador de software do PLC usado na versão de teste de experimentos anteriores expirou e, para outros experimentos, nenhuma simulação de software foi realizada, mas sim, o teste de laboratório com as diferentes configurações de tubulações.

Os resultados do experimento mostrados no GRÁFICO 11 demonstram as medidas de concentração para diferentes diâmetros de partículas com o SMPS+C realizado sem tubulação e com o tubo de cobre. O número calculado de Reynolds era $Re = 1175$, então o fluxo é dito estar no regime laminar.

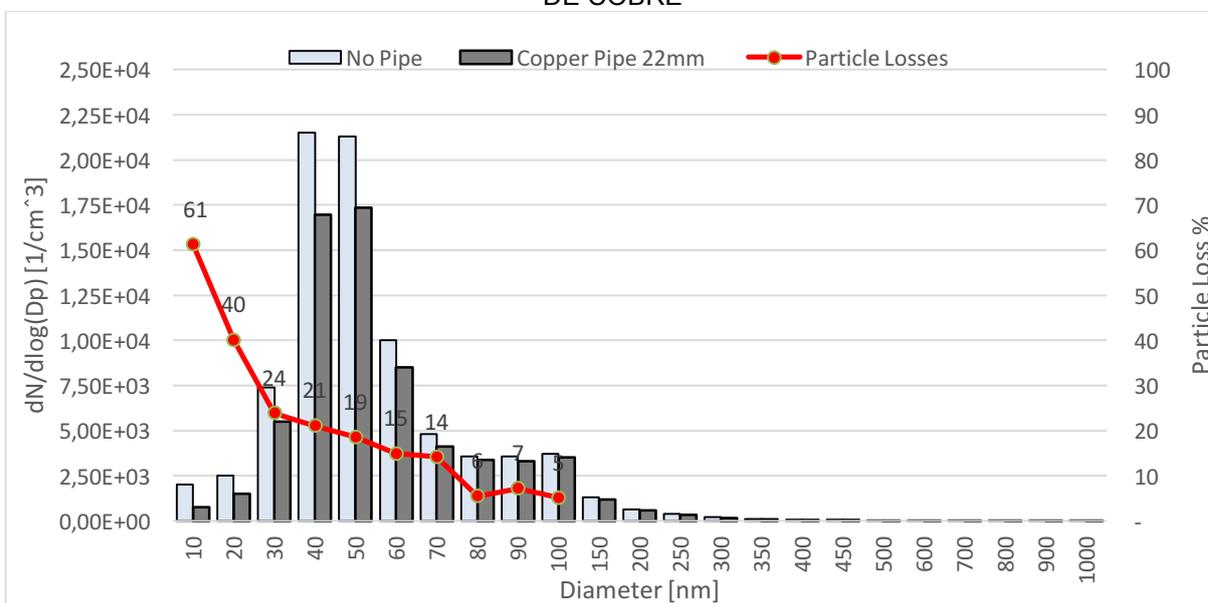
GRÁFICO 11 – CONCENTRAÇÕES OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO COBRE



FONTE: O autor (2017)

No GRÁFICO 12 mostra-se a diferença de % de perda de partículas no SMPS+C realizada usando o tubo de cobre e as medidas diretas sem o tubo.

GRÁFICO 12 – PERDA DE PARTÍCULAS EM % OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE COBRE



FONTE: O autor (2017)

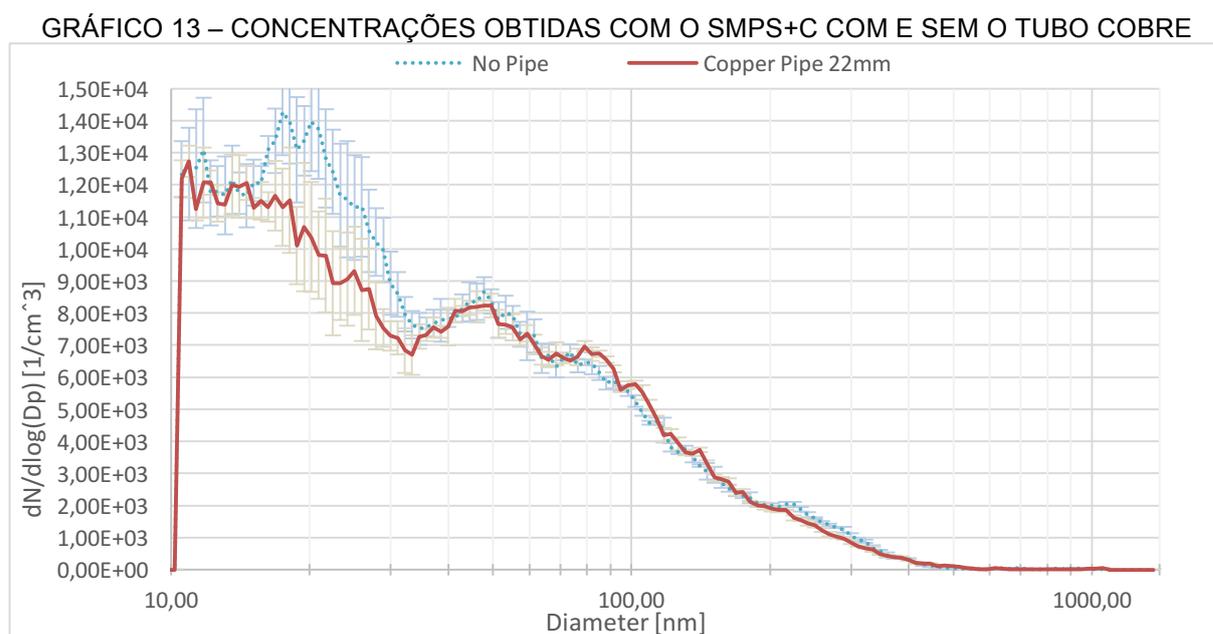
Com base no experimento ZOTTO, um tubo metálico foi testado, mas em vez de um aço inoxidável ou qualquer outro tubo de plástico, a escolha foi o tubo de cobre. O experimento foi realizado com o tubo enrolado como a maioria dos testes anteriores. A primeira experiência de laboratório com o tubo de cobre para

transportar o ar de amostragem para o SMPS+C mostrado é exibida no GRÁFICO 11. As linhas de tendência são semelhantes, mas no GRÁFICO 12, algumas grandes perdas são apresentadas especialmente para as partículas de aerossol ultrafinas com $dp < 50$ nm. Algumas justificativas podem ser apontadas:

- Embora o número de Reynolds calculado fosse $Re = 1175$, portanto, sob regime de fluxo laminar, poderiam haver algumas perdas devido a alguns tubos de plástico usados para fazer as articulações;
- Poderia haver algumas variações no volume de fluxo quando o tubo estava ligado ao SMPS+C porque o medidor de fluxo de volume estava na entrada do tubo e a queda de pressão poderia ser o problema.

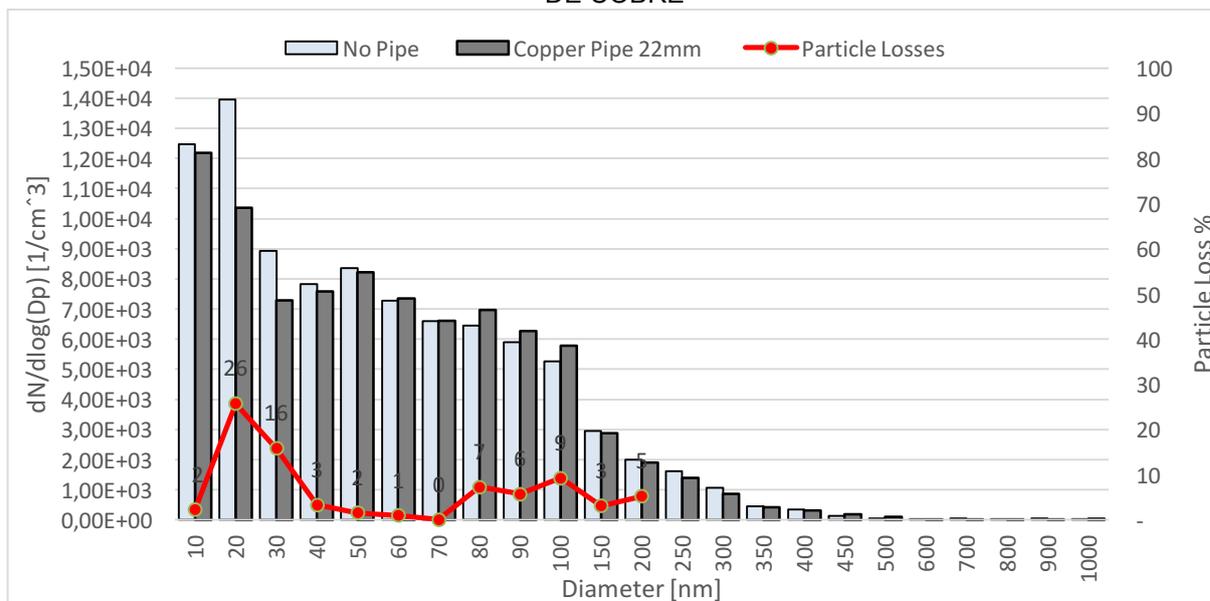
4.5 EXPERIMENTO 5 – LABORATÓRIO – COBRE

Os resultados deste experimento foram adquiridos usando o SMPS+C. No GRÁFICO 13 estão apresentadas as medidas de concentração para diferentes diâmetros de partículas com o SMPS+C realizado sem tubulação e com o tubo de cobre. O número calculado de Reynolds foi $Re = 1175$, estando o fluxo no regime laminar.



No GRÁFICO 14 é mostrada a diferença em percentual de perda de partículas no SMPS+C realizada usando o tubo de cobre e as medidas diretas sem o tubo.

GRÁFICO 14 – PERDA DE PARTÍCULAS EM % OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE COBRE



FONTE: O autor (2017)

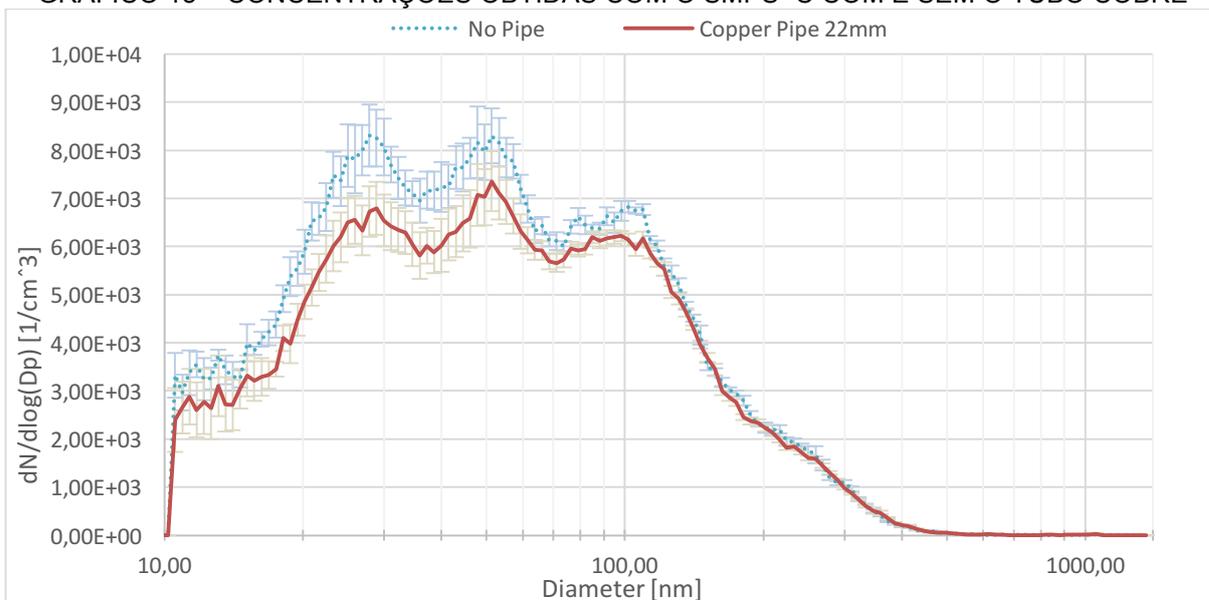
Seguindo a mesma configuração do experimento de laboratório 4, mas agora este experimento foi realizado no pátio interno do IKF. Algumas anomalias observadas foram corrigidas e os resultados melhoraram significativamente, como a reparação das ligações dos tubos e alinhamentos das tubulações. Os resultados foram, em certa medida bons, com algumas perdas aumentando para o diâmetro ultrafino da partícula de aerossol $dp < 30$ nm.

4.6 EXPERIMENTO 6 – LABORATÓRIO – COBRE

Os resultados deste experimento foram adquiridos usando o SMPS+C. A montagem do experimento segue o mesmo modelo do anterior, porém neste teste, um conector T foi montado na linha para conduzir a amostra de ar para o SMPS+C e na saída perpendicular, para o espectrômetro de aerossol para medir partículas maiores com $0,5 < dp < 10$ μm .

Os resultados da experiência no GRÁFICO 15 mostram as medidas de concentração para diferentes diâmetros de partículas com o SMPS+C realizado sem tubulação e com o tubo de cobre. O número calculado de Reynolds foi $Re = 1175$, então o fluxo se diz estar no regime laminar.

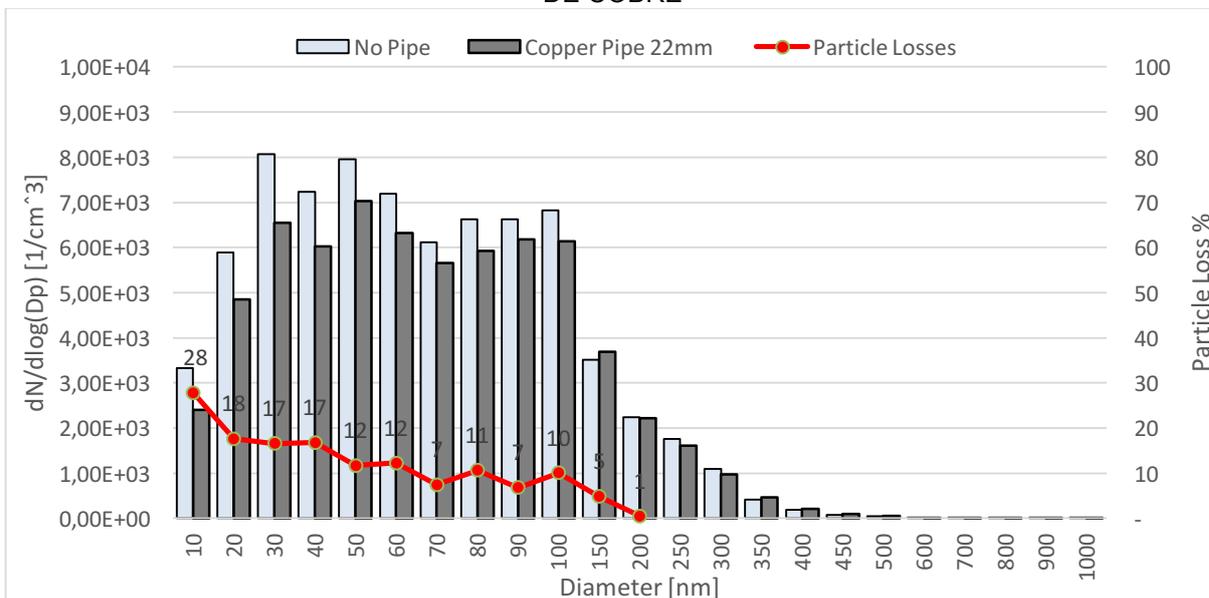
GRÁFICO 15 – CONCENTRAÇÕES OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO COBRE



FONTE: O autor (2017)

No GRÁFICO 16 é mostrada a diferença de % de perda de partículas no SMPS+C realizada usando o tubo de cobre e medições diretas sem o tubo.

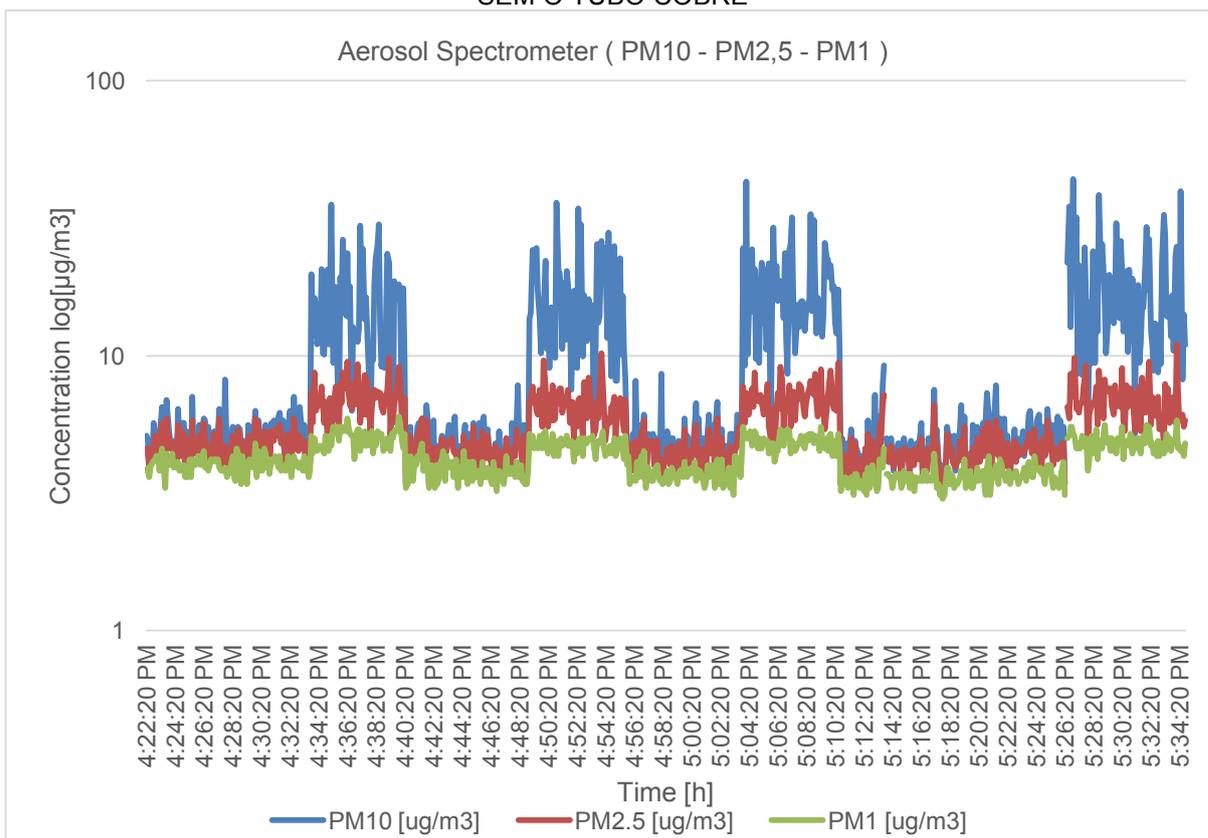
GRÁFICO 16 – PERDA DE PARTÍCULAS EM % OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE COBRE



FONTE: O autor (2017)

O GRÁFICO 17 mostra o resultado da leitura da concentração das partículas do espectrômetro de aerossol onde pode-se verificar os momentos onde a longa tubulação é acoplada a linha de amostragem e notam-se a grande perda de partículas, especialmente as maiores, devido a ação gravitacional.

GRÁFICO 17 – CONCENTRAÇÕES OBTIDAS COM O ESPECTRÔMETRO DE AEROSSOL, COM E SEM O TUBO COBRE

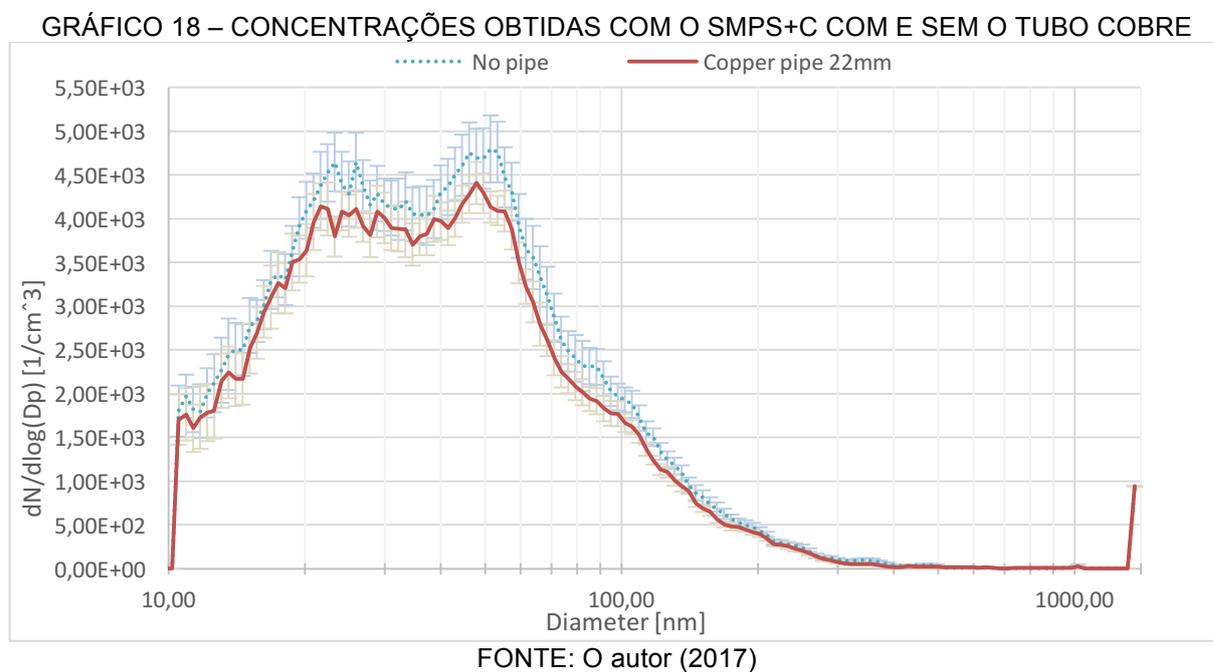


FONTE: O autor (2017)

Realizado no mesmo local e com a mesma configuração, mas o espectrômetro de aerossol ligado perpendicular à linha, este experimento mostrou algumas perdas relevantes, especialmente a partir de partículas de aerossol ultrafinas com $dp < 100$ nm. Isso pode ser associado à instalação do conector T e também algumas perdas de pressão no tubo devido a uma linha extra. O objetivo do experimento foi verificar a possibilidade de ter ambos os instrumentos conectados à mesma linha e medir através das amostras de ar do tubo de cobre de 50 m de distância. Era claro, como esperado, que as partículas maiores com $dp > 3$ µm sofreriam uma grande perda devido à sedimentação gravitacional em longos tubos horizontais.

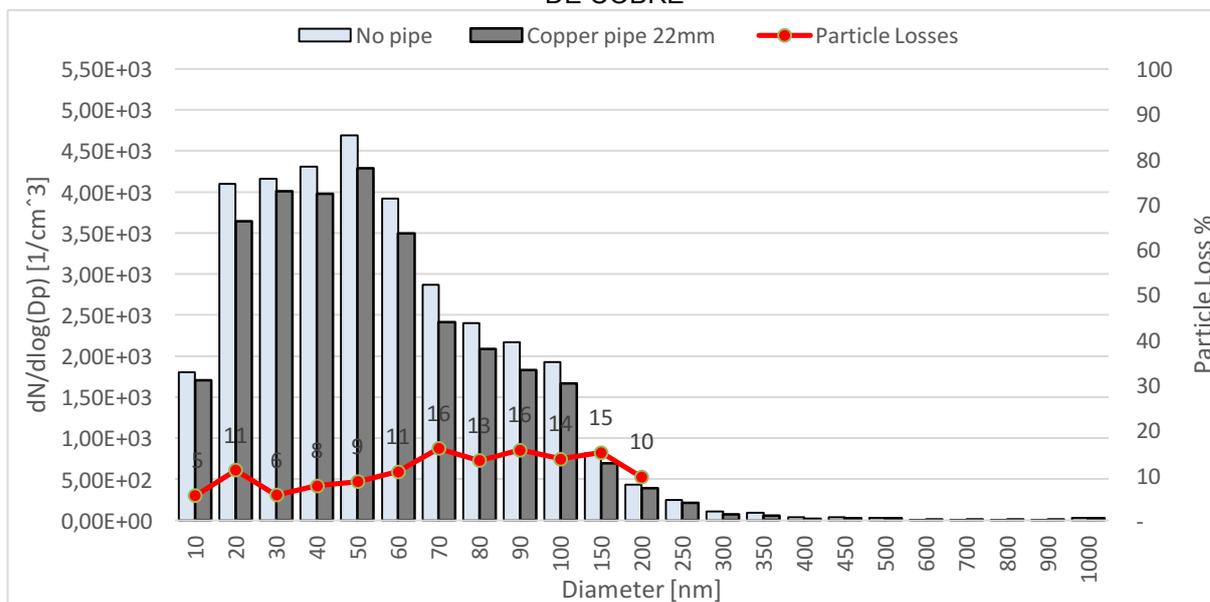
4.7 EXPERIMENTO 7 – LABORATÓRIO – COBRE

Este experimento foi realizado após alguns ajustes para evitar qualquer possível distúrbio no fluxo de amostragem. Os resultados do experimento mostrados no GRÁFICO 18 mostram as medidas de concentração para diferentes diâmetros de partículas com o SMPS+C realizado sem tubulação e com o tubo de cobre. O número calculado de Reynolds foi $Re = 1824$, então o fluxo se diz estar no regime laminar.



No GRÁFICO 19 é mostrada a diferença em % de perda de partículas no SMPS+C realizada usando o tubo de cobre e as medidas diretas sem o tubo.

GRÁFICO 19 – PERDA DE PARTÍCULAS EM % OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE COBRE



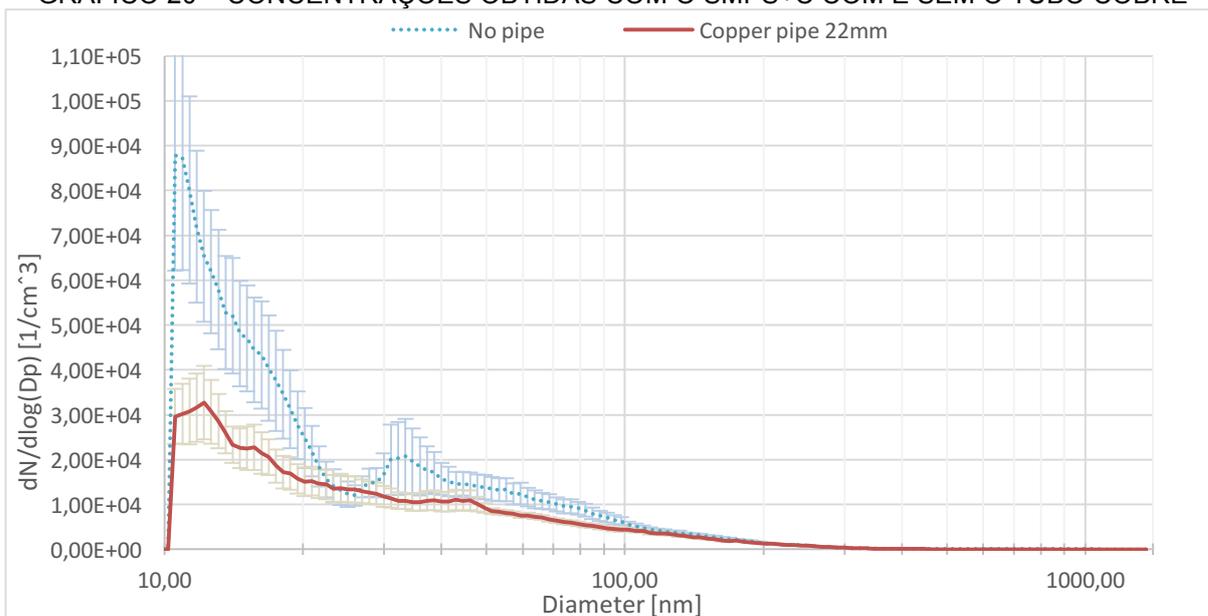
FONTE: O autor (2017)

Este experimento mostrou bons resultados por resultar em menos perdas para amostragem de partículas ultrafinas de aerossol quando se verifica a diferença de concentração em cada diâmetro de partícula. Foram feitos ajustes em todas as conexões para evitar interferências de materiais plásticos. A sonda do bico foi inserida dentro do tubo de cobre; o medidor de fluxo foi posicionado após o fluxo ter passado o ponto de amostragem isocinética do bico. Outra grande modificação foi o ajuste no diâmetro interno do bocal para 2,2 mm. Com isso, o número de Reynolds foi $Re = 1824$, estando no regime de fluxo laminar. A velocidade do fluxo foi de 30 l / min e o diâmetro interno do tubo $D_t = 22$ mm.

4.8 EXPERIMENTO 8 – LABORATÓRIO – COBRE

Os resultados dessa experiência foram adquiridos usando apenas o SMPS+C. Este experimento foi realizado em campo no local do experimento *Moss Wall*. Os resultados do experimento são apresentados no GRÁFICO 20 e mostram as medidas de concentração para diferentes diâmetros de partículas.

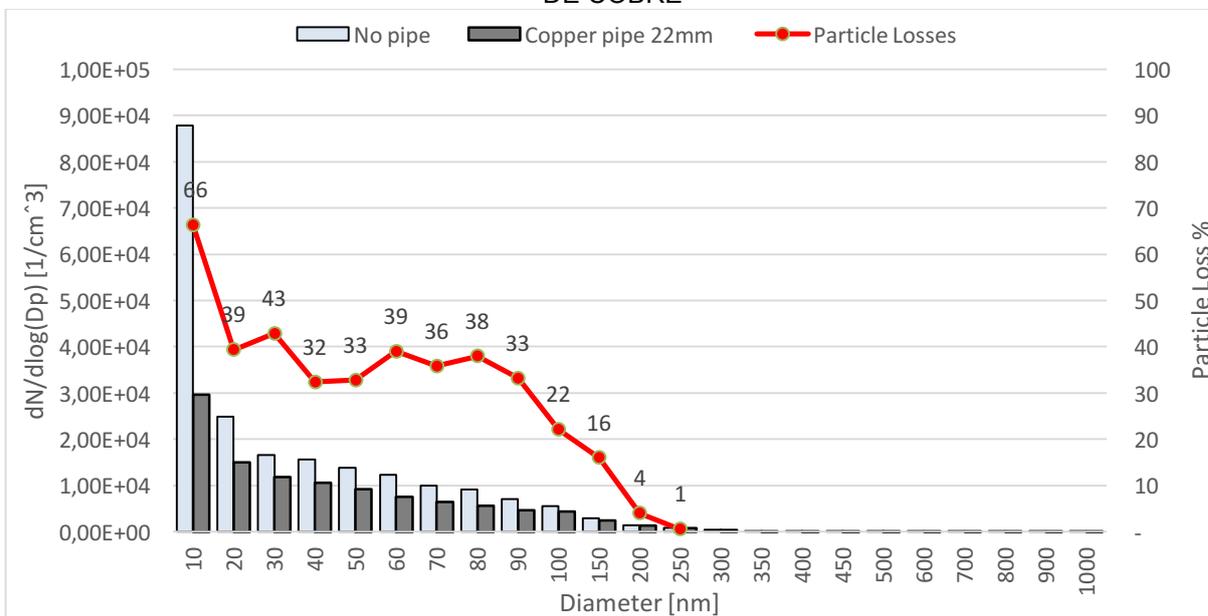
GRÁFICO 20 – CONCENTRAÇÕES OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO COBRE



FONTE: O autor (2017)

No GRÁFICO 21 é mostrada a diferença em % de perda de partículas no SMPS+C realizada usando o tubo de cobre e medições diretas sem o tubo.

GRÁFICO 21 – PERDA DE PARTÍCULAS EM % OBTIDAS COM O SMPS+C COM E SEM O TUBO DE COBRE



FONTE: O autor (2017)

Este experimento de campo mostrou resultados piores do que o experimento anterior realizado no laboratório do IFK, especialmente para as partículas na faixa de 10 nm < dp < 100 nm. Isso pode ser explicado porque, no campo, as condições do

ar são muito mais dinâmicas e por alguns períodos, grandes distúrbios, quando notado nas leituras como um comboio de caminhões pesados, passou pelo site do experimento, como mostrado na FIGURA 25. Este experimento mostrou que podem ocorrer distúrbios na medição das concentrações de partículas durante o tempo, porém, se forem analisados longos períodos de tempo, os dados tenderão a apresentar curvas de medição mais regulares.

FIGURA 25 – MONITOR DO EXPERIMENTO DE CAMPO MOSTRANDO GRANDE PERTURBAÇÃO NAS LEITURAS DAS CONCENTRAÇÕES DE MP CAUSADAS PELO TRÁFEGO PESADO



FONTE: O autor (2017)

Uma observação importante é manter todos os tubos de entrada de amostras o mais idêntico possível e, se possível, testar os tubos antes da instalação. Portanto, estas recomendações são importantes para observar ao instalar o equipamento para avaliar o uso da vegetação para capturar poluentes do ar e experimentar os resultados desejados.

5 CONCLUSÃO

Os experimentos realizados neste projeto de pesquisa mostraram boa evolução dos testes, resultando em menos perdas para amostragem e transporte de partículas através de longas tubulações horizontais. Alguns ajustes foram implementados nas conexões para evitar turbulência e interferência elétrica nas partículas no fluxo. Alguns outros ajustes importantes foram feitos e podem ser citados: a sonda do bico foi inserida dentro do tubo de cobre; o medidor de fluxo foi posicionado após o fluxo ter passado o ponto de amostragem isocinético do bocal; foram feitos ajustes no diâmetro interno do bocal de acordo com os cálculos de fluxo dinâmico. O propósito do ajuste do bocal era adquirir um maior volume de fluxo e ainda manter o número de Reynolds sob regime de fluxo laminar. Para isso, a configuração final foi de 30 l / min para o volume de fluxo e o número Reynolds $Re = 1824$, com o diâmetro interno do bocal de 2,2 mm. Esse é o melhor cálculo de fluxo para este diâmetro interno do tubo $D_t = 22$ mm. Outra explicação para manter o número de Reynolds num intervalo seguro são os parâmetros do ar como a viscosidade dinâmica e a densidade, que variam de acordo com a temperatura.

O melhor resultado foi alcançado usando um novo tubo de cobre com 22 mm de diâmetro interno com 2 seções de 25 m de comprimento, fazendo com que os 50 m sejam necessários para a experiência no local *Moss Wall*. O volume de fluxo máximo de $Q_t = 30$ l / min e o número de Reynolds $Re = 1824$ foi alcançado sob regime de fluxo laminar usando um tubo de entrada de amostragem de sonda de bico de 2,2 mm de diâmetro interno.

Os resultados mostraram uma forma de tendência semelhante na linha gráfica de distribuição de tamanho de partícula. As diferenças nas medidas de concentração sem tubulação fixa ao analisador SMPS+C e com o tubo de cobre representam a eficiência na penetração de partículas. Para a faixa de partículas ultrafinas de aerossol, os resultados foram: 10 nm = 95%; 20 nm = 90%; 30 nm = 96%. 50 nm = 91%; e 100 nm = 87%.

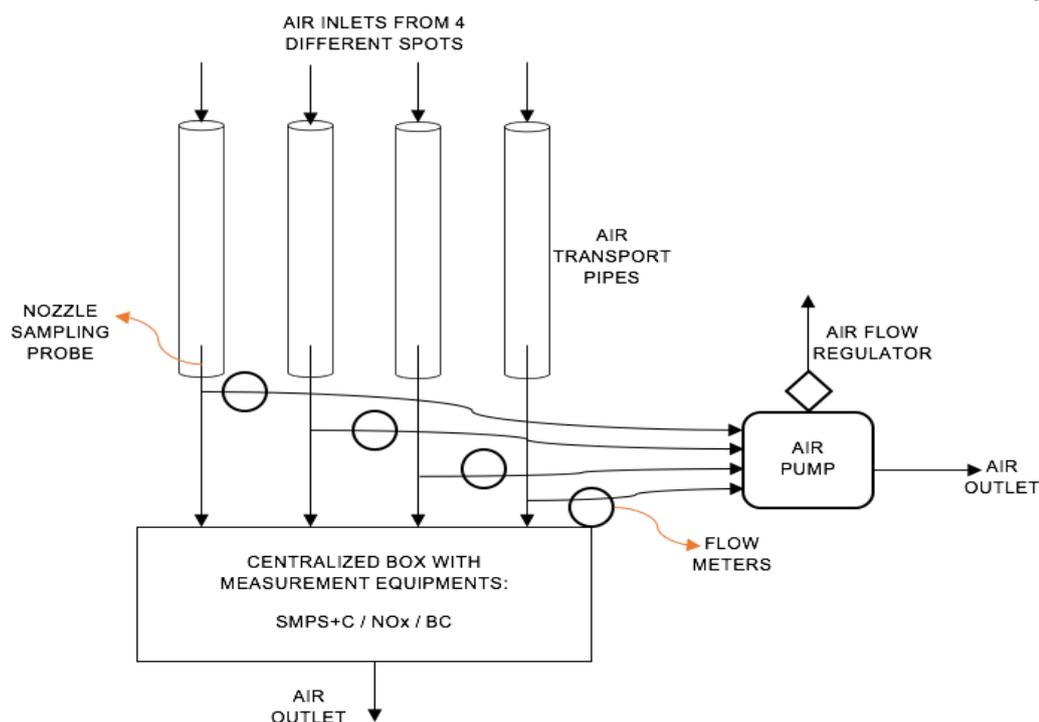
As diferenças encontradas nos valores dos experimentos com a mesma configuração podem ser atribuídas à variação na concentração de partículas no ar ambiente. Para resolver isso, os gases de aerossol padrão e um gerador de aerossol podem ser usados para conseguir melhores resultados, tal como realizados nos

institutos de calibração de aerossóis. Outro ganho de eficiência seria alcançado ao endireitar o tubo para que as perdas devido a geometrias radicais fossem excluídas. Se fosse utilizado um tubo de cobre com 28 mm como o diâmetro do experimento ZOTTO, um volume de fluxo de 40 l / min seria alcançado, porém as perdas devido a juntas e ligações seriam outra importante questão a ser tratada devido ao aumento de pontos de turbulência. Outro aspecto importante é o preço da tubulação, pois o cobre apresentou metade do custo dos outros materiais.

Algumas recomendações importantes ao projetar experiências envolvendo entradas de aerossol e tubos de amostragem são publicadas no Centro Mundial de Calibração de Física de Aerossóis (WCCAP) em Leipzig, Alemanha (BIRMILI *et al.*, 2017): Deve-se ter especial cuidado para evitar um excesso de umidade na entrada de amostragem; os materiais de tubulação devem ter uma alta condutividade elétrica e estar devidamente aterrados; manter o máximo possível de linhas curtas e evitar múltiplas voltas e juntas para minimizar as perdas de partículas; e estabelecer um regime de fluxo laminar.

Com base na literatura revisada e nos experimentos testados neste projeto de pesquisa, uma configuração final do sistema de medição de gás de medição e está apresentada na FIGURA 26.

FIGURA 26 – DIAGRAMA DE FLUXO DO SISTEMA COMUTADOR DE GASES DE MEDIÇÃO



FONTE: O autor (2017)

O resultado deste projeto de pesquisa para dissertação de mestrado foi a apresentação da configuração final do sistema de comutação de gás de medição com todos os componentes principais. Grande parte do componente da experiência de campo foi testada, menos a válvula que controla a ordem da amostra do tubo de amostragem de ar. Isso também foi abordado durante esta pesquisa para ser uma válvula eletrônica simples com abertura de fluxo cilíndrica, evitando assim a resistência das partículas que geram turbulência do fluxo e perturbando os resultados.

Espera-se que a instalação final seja executada no experimento do site Moss Wall como no laboratório e satisfaça os requisitos adequados para avaliar a eficiência do uso de musgos para ajudar a reduzir os poluentes do ar nas áreas urbanas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIR QUALITY EXPERT GROUP (AQEG). **Particulate matter in the UK**: Summary. London: Department for the Environment, Food and Rural Affairs, 2005, p. 1–28. Disponível em:

<http://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/aqeg/pm-summary.pdf>. Acesso em: 25 mai 2017.

BECKER, T. **Clean Air – Made in Germany**. Air Quality Plans: Planning For Clean Air In Cities. *German Partnership for Sustainable Mobility (GPSM): Eschborn, 2015*. Disponível em: http://www.german-sustainable-mobility.de/wp-content/uploads/2014/12/CleanAir-MadeInGermany_GPSM.pdf. Acesso em 21 jun 2017.

BELL, M. L.; DAVIS, D. L. Reassessment of the lethal London fog of 1952: novel indicators of acute and chronic consequences of acute exposure to air pollution. **Environmental health perspectives**, v. 109, n. Suppl 3, p. 389, 2001.

BIRMILI, W.; HOFFMANN, T. Environmental pollutants. Particulate and dust pollution: Inorganic and organic compounds. **Encyclopedia of Respiratory Medicine**. San Diego: Elsevier, 2006, Manuscript 133.

BIRMILI, W.; STOPFKUCHEN, K.; HERMANN, M.; WIEDENSOHLER, A.; HEINTZENBERG, J. Particle Penetration Through a 300 m Inlet Pipe for Sampling Atmospheric Aerosols from a Tall Meteorological Tower. **Aerosol Science and Technology**, 2007, v.41 (9), p. 811-817.

BIRMILI, W.; WIEDENSOHLER, A. **WCCAP/ ACTRIS Recommendation for aerosol inlets and sampling tubes**. Leibniz: Leibniz Institute for Tropospheric Research, 2017. Disponível em: <http://www.wmo-gaw-wcc-aerosol-physics.org/files/actris-recommendation-for-aerosol-inlets-and-sampling-tubes.pdf>. Acesso em: 20 jun 2017.

BROCKMANN, J. E. Aerosol Measurement: Principles, Techniques and Applications. **Sampling and Transport of Aerosols**. New York: Wiley, 2001. p. 129-151. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118001684.ch8/pdf>. Acesso em: 26 may 2017.

BUKOWIECKI; N. P.; LIENEMANN, M.; HILL, M.; FURGER, A.; RICHARD, F.; AMATO, A.S.H.; PRÉVÔT, U.; BALTENSPERGER, B.; BUCHMANN, R. PM10 emission factors for non-exhaust particles generated by road traffic in an urban street canyon and along a freeway in Switzerland Atmospheric Environment. **Issues in Environmental Research and Application**. Atlanta: Scholarly Editions, 2011, p. 2330-2340.

Disponível: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231010002657>. Acesso em: 10 jun 2017.

CENTRUM VOOR REGELGEVING EN ONDERZOEK IN DE GROND-, WATER- EN WEGENBOUW EN DE VERKEERSTECHNIEK (CROW); SOLVE -

LUCHTKWALITEIT EN VERKEER. **Urban Green-Blue Grids for sustainable and resilient cities**. Delft: Groenblauw, 2011. Disponível em: <http://www.urbangreenbluegrids.com/measures/roads-with-hedgerows/>. Acesso em: 05 mai 2017.

DELFINO, R.J.; SIOUTAS, C., MALIK, S. Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health. **Environ Health Perspectives**, 2005, n. 113(8), p. 934–946.

DOLOVICH, M.; NEWHOUSE, M. Generation, methods of administration and therapeutic applications in asthma. In: **Allergy: Principles and Practice**. St Louis: Mosby Year Book, Inc., 4th ed., p. 712–739, 1993.

EUROPEAN COMMISSION (EC). Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. **European Union**: EC, 11 jun. 2008, p. 1–44. Disponível em: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj>. Acesso em: 05 jun 2017.

EUROPEAN COMMISSION (EC). Air Quality - Existing Legislation. **European Union**: EC, 2017a. Disponível em: http://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/existing_leg.htm. Acesso em: 20 jun 2017.

EUROPEAN COMMISSION (EC). Air Quality - Air Quality Standards. **European Union**: EC, 2017b. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>. Acesso em: 20 jun 2017.

EUROPEAN COMMISSION (EC). Air Quality - Reduction of national emissions of atmospheric pollutants. **European Union**: EC, 2017c. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/air/pollutants/ceilings.htm>. Acesso em: 20 jun 2017.

EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (EEA). **Germany air pollution fact sheet**. Copenhagen: EEA, 2014. Disponível em: https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-pollution-country-fact-sheets-2014/germany-air-pollutant-emissions-country-factsheet/at_download/file. Acesso em: 25 jun 2017.

EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (EEA). **Air Quality in Europe - 2016 Report**. Copenhagen: EEA, 2016. Disponível em: https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2016/at_download/file. Acesso em: 20 jun 2017.

FEDERAL MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT, NATURE CONSERVATION, BUILDING AND NUCLEAR SAFETY (BMUB). **General information Air Pollution Control**. Berlin: BMUB, 2017. Disponível em: <http://www.bmub.bund.de/en/topics/air-mobility-noise/air-pollution-control/general-information/>. Acesso em: 25 jun. 2017.

FRAHM, J.; SABOLJEVIC, M. 2007. **Feinstaubreduzierung durch Moose**. Bonn: Nees Institut für Biodiversität der Pflanzen, 2007.

FRIEDRICH, A. **Clean Air – Made in Germany**. Improving Air Quality – the German Experience. *German Partnership for Sustainable Mobility (GPSM): Eschborn, 2015*. Disponível em: http://www.german-sustainable-mobility.de/wp-content/uploads/2014/12/CleanAir-MadeInGermany_GPSM.pdf. Acesso em 21 jun 2017.

GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY (GIT). **Sample Extraction and Transport**. Spring: School of Earth and Atmospheric Sciences Lab 4, 2007. Disponível em: <http://www.aerosols.eas.gatech.edu/EAS%20Undergrad%20Lab/Lab%204%20Sampling%20Transport.pdf>. Acesso em: 15 jun 2017.

GORMLEY, P. G.; KENNEDY, M. Diffusion from a Stream Following Through a Cylindrical Tube. **Proceedings of Royal Irish Academy**, 52, 163–169, 1949.

GRIMM AEROSOL. **Particle Measurement System**. Kontinuierliche Messung von Partikelgrößenverteilungen (wide range) am Hohenpeißenberg. Disponível em: http://www.analyticjournal.de/glossar_beitraege_einzeln/nanopartikel_aerosole_grimm_pesch.html. Acesso em: 10 jun 2017.

HARRISON R.; LEUNG P.; SOMERVILLE, L.; SMITH, R.; GILMAN, E. Analysis of incidence of childhood cancer in the West Midlands of the United Kingdom in relation to proximity to main roads and petrol stations. **Occup Environ Med**, 1999, n. 56 (11), p. 774–780.

HARRISON, R., JONES, M., COLLINS, G. Measurements of the physical properties of particles in the urban atmosphere. **Atmospheric Environment**, 1999, n. 33, p. 309–321.

HIEMSTRA, J.A., SCHOENMAKER E. B; TONNEIJCK, A.E.G. **Bomen een verademing voor de stad**. Plant Publicity Holland en Vereniging van Hoveniers en Groenvoorzieners. Boskoop, 2008.

HINDS, W. C. **Aerosol Technology**: Properties, Behaviour and Measurement of Airborne Particles. New York: Wiley, 1999, 2nd.ed.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) Energy and Air Pollution. **World Energy Outlook Special Report**. France: IEA, 2016. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyOutlookSpecialReport2016EnergyandAirPollution.pdf>. Acesso em: 23 jun 2017.

JUNKER, M.; KASPER, M.; ROOSLI, M.; CAMENZIND, M.; KUNZLI, N.; MONN, C.; THEIS, G.; BRAUN, C. Airborne particle number profiles, particle mass distribution and particle bound PAH concentrations within the city environment of Basle: an assessment of the BRISKA project. **Atmospheric Environment**, 2000, n. 43 (19), p.3171–3181.

KAPPIS, C. et al., 2007. **Studie zum wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotential (qualitativ und quantitativ) von Pflanzen**.

Berlin: Institute for Agricultural and Urban Ecological Projects at the Humboldt-Universität zu Berlin, 2007. Disponível em:

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:109-opus-72931>. Acesso em: 13 jun 2017.

KITTELSON, D.B. Engine and Nanoparticles: A Review. **J. Aerosol Sci.**, 1998, Vol. 29, n. 5/6, p. 575- 588.

KITTELSON, D.B.; WATTS JR., W. F.; ARNOLD, M. **Review of diesel particulate matter sampling methods**. Supplemental Environmental Protection Agency (EPA) Report 1. Diesel exhaust particle measurement instruments. Minneapolis: Department of Mechanical Engineering Center for Diesel Research, 1999.

KIRCHSTETTER, T. W. *et al.* Impact of California reformulated gasoline on motor vehicle emissions. 1. Mass emission rates. **Environmental Science & Technology**, 1999, 33 (2), p. 318-328.

KRAHL-URBAN, B., PAPKE, H.E., PETERS, K. **Forest Decline: Cause-Effect Research in the United States of North America and Federal Republic of Germany**. Germany: Assessment Group for Biology, Ecology and Energy of the Julich Nuclear Research Center, 1988.

KUMAR, P.; FENNELL, P.; SYMONDS, J.; BRITTER, R. Treatment of Losses of Ultrafine Aerosol Particles in Long Sampling Tubes During Ambient Measurements, *Atmos. Environ.*, 2008, v. 42, p. 8819– 8826.

LELIEVELD, J.; EVANS, J. S.; FNAIS, M.; GIANNADAKI, D.; POZZER, A. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. **Nature**, 2005, v. 525(7569), p. 367-371.

NEUMAN, J.A.; HUEY, L.G.; RYERSON, T.B.; FAHEY, W. Study of inlet materials for sampling atmospheric nitric acid, **Environ. Sci. Tech.**, 1999, v. 33, p.1133-1136.

PETROFF, A.; MAILLIAT, A.; AMIELH, M.; ANSELMET, F. Aerosol dry deposition on vegetative canopies. Part II: A new modeling approach and applications, *Atmos. Environ.*, 2008, v. 42, p. 3654–3683.

RAMANATHAN, V. C. P. J.; CRUTZEN, P. J.; KIEHL, J. T.; ROSENFELD, D. Aerosols, climate, and the hydrological cycle. **Science**, 2001, v. 294(5549), p. 2119-2124.

SCHADE, H.; KUNZ, E. **Strömungslehre**. Berlin, New York: De Gruyter Lehrbuch, 1989.

TSAI, C.J.; PUY, D. Y. H. Numerical Study of Particle Deposition in Bends of Circular Cross-Section-Laminar Flow Regime, *Aerosol. Environ. Sci. Tech.*, 1990, v. 12, p. 813–831.

UMWELTBUNDESAMT (UBA). **Clean Air – Made in Germany**. Improving Air Quality – the German Experience. *German Partnership for Sustainable Mobility (GPSM): Eschborn, 2015. Disponível em: <http://www.german-sustainable->*

mobility.de/wp-content/uploads/2014/12/CleanAir-MadeInGermany_GPSM.pdf.
Acesso em: 21 jun 2017.

VALLERO, D. **Fundamentals of Air Pollution**. 5th Edition. United States: Elsevier, 2014.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI). **VDI 3867**. Measurement of particles in ambient air Determination of the particle number concentration and particle size distribution of aerosols Optical aerosol spectrometer. Germany: VDI, 2011.

WANG, A.; KURDISTANI, S.K.; GRUNSTEIN, M. Requirement of Host histone deacetylase for gene activity in yeast. **Science**, 2002, V.15, 298 (5597), p.1412-1414.

WANG, J.; FLAGAN, R. C.; SEINFELD, J. H. Diffusional Losses in Particle Sampling Systems Containing Bends and Elbows. **Aerosol Sci.**, 2002, v. 33, p.843– 857.

WEIDEN, S.L.; DREWNICK, F.; BORRMANN, S. Particle Loss Calculator – a new software tool for the assessment of the performance of aerosol inlet systems. **Atmos. Meas. Tech.**, 2009, v.2, p.479–494.

WELLS, A. C.; CHAMBERLAIN, A. C. Transport of Small Particles to Vertical Surfaces. **Brit. J. Appl. Phys.**, 1967, v.18, p.1793–1799.

WHITE, F. M. **Fluid Mechanics**. Boston, Mass: WCB/McGraw-Hill, 1999.

WILLEKE, K.; BARON, P. **Aerosol Measurement: principles, techniques and applications**. New York: Van Nostrand Reinhold, 2005.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Burden of disease from Household Air Pollution for 2012**. Copenhagen: WHO, 2014. Disponível em: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/FINAL_HAP_AAP_BoD_24March2014.pdf. Acesso em: 22 jun 2017.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease**. Copenhagen: WHO, 2016. Disponível em: <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/250141/1/9789241511353-eng.pdf>. Acesso em: 21 jun 2017.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures, Guidelines and Recommendations**. Geneva: WMO, 2016, 2nd Edition. Disponível em: https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3073. Acesso em: 19 jun 2017.