



# AVALIAÇÃO DO USO E CALIBRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO DE CAUDAL DE AR EM INSTALAÇÕES AERÁULICAS

**FRANCISCO GONÇALO CARDOSO ANDRADE**

julho de 2020

# **AVALIAÇÃO DO USO E CALIBRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO DE CAUDAL DE AR EM INSTALAÇÕES AERÁULICAS**

Francisco Gonçalo Cardoso Andrade  
1150562

**2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

# **AVALIAÇÃO DO USO E CALIBRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO DE CAUDAL DE AR EM INSTALAÇÕES AERÁULICAS**

Francisco Gonçalo Cardoso Andrade

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação da Engenheira Isabel Sarmento.

**2º ano de Mestrado de Energia**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica





## JÚRI

### **Presidente**

Doutorado Rui Filipe Neves Araújo Rego  
Professor adjunto, ISEP

### **Orientador**

Especialista Isabel Maria Garcia Sarmiento Pereira  
Professor Adjunto, ISEP

### **Co-orientador**

Mestre Filipe Miguel Moita Marques Rodrigues  
Responsável técnico do LAC, INEGI

### **Arguente**

Pós-Graduado José Carlos Matos  
Diretor da área de Energia Eólica, INEGI



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao INEGI (Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial) por me ter acolhido nas suas instalações, ao Engenheiro Miguel Marques pela sua orientação e ajuda na agregação de conhecimento sobre área estuda, bem como ao Técnico Luís Mendes.

À Engenheira Isabel Sarmiento, pela sua orientação e pelo apoio prestado no esclarecimento de dúvidas.

À minha família que me ajudou em tudo, realçando a sua paciência.

À Clarisse pelo suporte, bem como o seu empenho na leitura e correção do documento.



## RESUMO

O caudal de ar, como outro qualquer tipo de caudal, existe quando uma determinada área se encontra com maior energia/pressão que outra. A correta medição do caudal de ar é um fator essencial para uma boa avaliação da qualidade do ar interior (QAI) e diminuição do consumo energético associado à ventilação. A QAI é um fator fulcral, sendo que uma das formas de garantir uma boa gestão do ar é através da ventilação, a qual é usualmente praticada através de uma máquina de fluxo. Em Portugal existe legislação que relaciona a QAI com o Caudal/renovações de ar efetuadas por espaço, sendo necessário um controlo bastante rigoroso do mesmo. Esta referida máquina de fluxo tem necessidade energética, sendo esta predefinida em projeto pelo caudal a transportar e rendimento da máquina. Por consequente, a má avaliação do caudal que é transportado implica um sobredimensionamento do equipamento (maior investimento) ou uma sobre utilização da máquina já dimensionada (diminuição do rendimento).

Daqui surge a necessidade de um equipamento de medição calibrado, para a necessidade pretendida (caudal de ar). A calibração tem de ser efetuada em laboratório, para que seja possível medir e regularizar parâmetros que afetam o funcionamento do equipamento e se obtenha assim um menor erro e uma melhor certeza possível. Como tal, a criação de uma instalação para a calibração de equipamentos de medição de caudal de ar foi requisitada para este projeto.

Começou-se por determinar a gama do caudal de ar a atravessar a instalação, compreendido entre 45 m<sup>3</sup>/h a 5000 m<sup>3</sup>/h, resultante da ventilação de edifícios de serviço e comércio. Conhecendo a gama de caudal de ar, pesquisaram-se equipamentos de medição deste caudal utilizados em ventilação, dos quais o balómetro e a “*air station*”, que serão calibrados na instalação projetada. Com a finalidade de os calibrar, realizou-se um estudo de métodos de calibração, concluindo-se que o mais favorável se trata do caudalímetro de referência, através de um conjunto de bocais. O dimensionamento dos bocais foi efetuado conforme a (AMCA 210-99 & 51-99, 1999) e através da ajuda da ferramenta “*solver*” do Excel. Foram propostas alterações a um túnel de vento existente, inicialmente projetado para a medição de velocidade, de modo a se obter uma instalação capacitada para a calibração de equipamentos de medição de caudal de ar.

Foi então possível fazer o projeto da instalação e dos bocais, possível de ser implementado futuramente, mas com possíveis alterações/correções.

**PALAVRAS CHAVE**

Caudal de ar, QAI, Equipamento de medição de caudal de ar, calibração, bocais e instalação.

## ABSTRACT

The air flow, like any other type of flow, exists when one area is at higher energy/pressure than another. The correct measurement of air flow is an essential factor for a good evaluation of indoor air quality (IAQ) and reduction of energy consumption associated with ventilation. The IAQ is a key factor, and one way to ensure good air management is through ventilation, which is usually done using a flow machine. In Portugal there is legislation that relates the IAQ with the flow/renovations of air carried out by space, being necessary a very strict control of it. This flow machine has an energy requirement, which is predefined in design by the flow to be transported and the efficiency of the machine. Consequently, the poor evaluation of the flow that is transported implies an overdimensioning of the equipment (higher investment) or an over utilization of the already dimensioned machine (reduction of the efficiency).

From this arises the need for a calibrated measuring equipment, for the required need (air flow). Calibration has to be carried out in the laboratory in order to measure and regulate parameters that affect the operation of the equipment, so as to obtain the least error and the best possible certainty. As such, the creation of an installation for the calibration of air flow measurement equipment was requested for this project.

It was first determined the range of air flow through the installation, from 45 m<sup>3</sup>/h to 5000 m<sup>3</sup>/h, resulting from the ventilation of service and commercial buildings. Knowing the range of air flow, we researched the measurement equipment of this flow rate used in ventilation, of which the balometer and the "air station" that will be calibrated in the projected installation. In order to calibrate them, a study of calibration methods was carried out, concluding that the most favorable is the reference flow meter, through a set of nozzles. The dimensioning of the nozzles was done according to (AMCA 210-99 & 51-99, 1999) and with the help of Excel's "solver" tool. Changes had been proposed to an existing wind tunnel, initially designed for the measurement of speed, to obtain an installation capable of calibrating air flow measurement equipment.

It was then possible to design the installation and the nozzles, which could be implemented in the future, but with possible changes/corrections.

### **KEYWORDS**

Air flow, IAQ, measuring equipment, calibration, nozzles and installation



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

AMCA	Air Movement and Control Association
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar condicionado
CH <sub>2</sub> O	Formaldeído
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Monóxido de Carbono
COVID	coronavírus
COVs	Composto orgânico volátil
D	Dimensão
DEGI	Engenharia e Gestão Industrial
DEMec	Departamentos de Engenharia Mecânica
D <sub>h</sub>	Diâmetro hidráulico
EM	Equipamento de medição
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HSM	Hierarquia do sistema metrológico
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPQ	Instituto Português da Qualidade
LAC	Laboratório de Aerodinâmica e Calibração
NP	Norma Portuguesa
PM	Partículas em Suspensão
QAI	Qualidade do ar interior
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
Rehva	Representatives of European Heating and Ventilating Associations
SEC	Sistema de Certificação dos Edifícios
UTA	Unidade de Tratamento de Ar
UTAN	Unidade de Tratamento de Ar Novo
VAV	Volume de ar variável

### Lista de Unidades

%	Percentagem
°C	Graus celsius
atm	Atmosférica

h	Horas
K	Kelvin
Kg	Quilograma
Kpa	Quilo Pascal
l	Litro
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
mg	Miligrama
mm	Milímetro
Pa	Pascal
s	Segundos
µg	Micrograma
Ω	Ohm

#### Lista de Símbolos

A	Área da secção
a	Largura da conduta
At	Área da secção do túnel de vento
b	Altura da conduta
C	Coeficiente de descarga
Ce	Coeficiente de descarga arbitrado
D	Diâmetro da conduta circular
d	Diâmetro
D <sub>c</sub>	Diâmetro ou diâmetro hidráulico da conduta
D <sub>h</sub>	Diâmetro hidráulico
E	Fator de energia
Ef	Erro de leitura
Efe	Erro de fim da escala
εv	Valor de eficácia de remoção de poluentes
g	Aceleração da gravidade
H	Altura da secção retangular
H <sub>0</sub>	Altura de coluna de líquido sobre a tomada de pressão
L <sub>e</sub>	Comprimento mínimo inicial
N <sub>d</sub>	Número de dígitos menos significativos
p	Pressão
P	Pressão
P <sub>1</sub>	Pressão no ponto 1
P <sub>2</sub>	Pressão no ponto 2
Q	Caudal volumétrico

---

$Q_2$	Caudal obtido a partir da validação do método
$Q_{AN}$	Caudal de ar novo final corrigido da eficácia (caudal efetivo)
$Q_{ANF}$	Caudal de ar novo (mínimo regulamentar)
$Q_s$	Caudal medido pelo tubo de pitot
$Q_t$	Caudal medido no túnel de vento
$R$	Constante do gás
$Re$	Número de Reynolds
$T$	Temperatura
$T$	Tolerância
$U$	Percentagem da irregularidade do perfil de velocidade
$v$	Velocidade
$V_1$	Velocidade no ponto 1
$V_2$	Velocidade no ponto 2
$v_{max}$	Velocidade média máxima de todos os quadrantes
$v_{min}$	Velocidade média mínima de todos os quadrantes
$V_t$	Velocidade obtida no túnel
$W$	Largura da secção retangular
$X$	Distância recomendada
$Y$	Coeficiente de expansão
$\alpha$	Rácio entre pressão absoluta à saída e à entrada do bocal
$\beta$	Rácio entre o diâmetro da garganta do bocal e do diâmetro da conduta
$\gamma$	Peso específico do fluído
$\Delta h$	Altura da coluna de líquido
$\Delta P$	Varição da pressão
$\mu$	Viscosidade dinâmica
$v$	Volume específico
$\pi$	Constante de Pi
$\rho$	Massa volúmica

---



# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-CRONOLOGIA DE TRABALHO	3
FIGURA 2-LIMIAR DE PROTEÇÃO E MARGEM DE TOLERÂNCIA PARA OS POLUENTES FÍSICO-QUÍMICOS, PORTARIA N.º 353-A/2013 DE 4 DE DEZEMBRO	6
FIGURA 3- CRITÉRIOS DE CONFORMIDADE, PORTARIA N.º 353-A/2013 DE 4 DE DEZEMBRO	7
FIGURA 4- LIMIARES DE PROTEÇÃO PARA COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS ESPECÍFICOS A CONSIDERAR NA VERIFICAÇÃO DA CONFORMIDADE DOS COVS, PORTARIA N.º 353-A/2013 DE 4 DE DEZEMBRO	7
FIGURA 5-PRINCÍPIO GERAL DE FUNCIONAMENTO DE SISTEMA DE VENTILAÇÃO VMC COM ADMISSÃO DE AR NA FACHADA, VENTILACAO_MECANICA_DE_EDIFICIOS_DE_HABITACAO	11
FIGURA 6-VENTILAÇÃO MECÂNICA, CERTIFICAÇÃO ENERGÉTICA E AR INTERIOR EDIFÍCIOS	11
FIGURA 7-VALOR DE EFICÁCIA DE REMOÇÃO DE POLUENTES, PORTARIA Nº. 353-A/2013 DE 4 DEZEMBRO	13
FIGURA 8-CAUDAL MÍNIMO DE AR NOVO DETERMINADO EM FUNÇÃO DA CARGA POLUENTE DEVIDA À OCUPAÇÃO, PORTARIA Nº. 353-A/2013 DE 4 DEZEMBRO	13
FIGURA 9-CAUDAL MÍNIMO DE AR NOVO DETERMINADO EM FUNÇÃO DA CARGA POLUENTE DEVIDA AO EDIFÍCIO, PORTARIA Nº. 353-A/2013 DE 4 DEZEMBRO	13
FIGURA 10-CAUDAIS MÍNIMOS DE EXTRAÇÃO DE AR A ASSEGURAR PARA LOCAIS E INSTALAÇÕES ESPECÍFICAS, PORTARIA Nº. 353-A/2013 DE 4 DEZEMBRO	14
FIGURA 11-UTA E SEUS COMPONENTES, EVAC	16
FIGURA 12-GRELHA INSTALADA NO CHÃO, TROX	16
FIGURA 13-GRELHA INSTALADA EM CONDUTAS, TROX	16
FIGURA 14-GRELHA INSTALADA EM PAREDES, TROX	16
FIGURA 15-GRELHA INSTALADA EM PORTAS, TROX	16
FIGURA 16-GRELHA PARA CONTROLAR O CAUDAL, TROX	17
FIGURA 17-VISTA CORTADA DO "DEFLETING VANE", ALNOR, 2014	18
FIGURA 18-HÉLICE, TESTO	19
FIGURA 19-ANEMÓMETRO DE COPOS, BANGGOOD	19
FIGURA 20-ANEMÓMETRO TÉRMICO, TESTO	20
FIGURA 21-ANEMÓMETRO LASER DOPPLER, DANTEC DYNAMICS A/S	20
FIGURA 22-VELOCÍMETRO POR IMAGEM DE PARTÍCULAS, WILLIAM THIELICKE AND EIZE J. STAMHUIS	21
FIGURA 23-TUBO DE PITOT, ALNOR, 2014	22
FIGURA 24-CAUDALÍMETRO ULTRASSÓNICO, PCE INSTRUMENTS UK	22
FIGURA 25-MEASURING POINTS FOR RECTANGULAR AND ROUND DUCT TRAVERSE, ASHAE 2017	23
FIGURA 26-MODEL 6200D, TSI	24
FIGURA 27-MICROMANÓMETRO DIGITAL, ALNOR, 2014	24
FIGURA 28-DIMENSÕES DA ASME <i>LONG-RADIUS</i> ESCOAMENTO EM BOCAL, ASHRAE 2017	29
FIGURA 29-TYPICAL HERSCHEL-TYPE VENTURI METER, ASHAE 2017	29
FIGURA 30-ORIFÍCIO CALIBRADO, ASHRAE 2017	30

FIGURA 31-VARIABLE-AREA FLOWMETER, ASHAE 2017	31
FIGURA 32-CORIOLIS MASTER FCB300 CAUDALÍMERO, BHB	32
FIGURA 33-CAUDALÍMETRO DESLOCAMENTO POSITIVO, OMEGA	32
FIGURA 34-CAUDALÍMETRO TURBINA, CONTIMETRA	33
FIGURA 35-PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO CAUDALÍMETRO ELETROMAGNÉTICO, TECFLUID	33
FIGURA 36-CAUDALÍMETRO VÓRTICE, NONCON	34
FIGURA 37-ESQUEMA DE UM GASÓMETRO, JOÃO PEDRO PEREIRA DE OLIVEIRA DE CASTRO MARTINS	34
FIGURA 38-CALIBRAÇÃO GRAVIMÉTRICA, UTILIZANDO BOCAIS DE MEDIÇÃO, <i>FLOW MEASUREMENT HANDBOOK</i>	38
FIGURA 39-EXEMPLO DE PRÁTICO DE UMA CALIBRAÇÃO PELO MÉTODO PVT, <i>FLOW MEASUREMENT HANDBOOK</i>	38
FIGURA 40-EXEMPLO DO MÉTODO DE CALIBRAÇÃO DE BOLHAS DE SABÃO UTILIZANDO UMA BURETA, <i>FLOW MEASUREMENT HANDBOOK</i>	39
FIGURA 41-INSTALAÇÃO DE BOCAIS DE VENTURI, <i>FLOW MEASUREMENT HANDBOOK</i>	39
FIGURA 42-HIERARQUIA DO SISTEMA METROLÓGICO, INMETRO	42
FIGURA 43-PROCESSO DE CONFIRMAÇÃO METROLÓGICA DE EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO, ISO 10012, 2005	43
FIGURA 44-MODELO DE SISTEMA DE GESTÃO DA MEDIÇÃO, ISO 10012, 2005	44
FIGURA 45-AIRFLOW TRAVERSE STATION, THE VOLU-PROBE/VIS, AMACA	50
FIGURA 46-INSTALAÇÃO DA VOLU-PROBE/VIS, VOLU-PROBE/VIS, AMACA	51
FIGURA 47-DISPOSIÇÃO DOS SENSORES, AMCA	52
FIGURA 48-DESENVOLVIMENTO DE UM ESCOAMENTO NUM TUBO, FRANK WHITE	53
FIGURA 49-BOCAIS, HYFLUID TECHNOLOGY	55
FIGURA 50- ESTRUTURA DO BOCAL, (AMCA 210-99 & 51-99, 1999)	60
FIGURA 51-CUMPRIMENTOS DE REGRAS PARA A DISPOSIÇÃO 1	60
FIGURA 52- CUMPRIMENTOS DE REGRAS PARA A DISPOSIÇÃO 2	61
FIGURA 53-DISPOSIÇÃO 1 COTADA	61
FIGURA 54-DISPOSIÇÃO 2 COTADA	62
FIGURA 55-DESENHO 2D DA INSTALAÇÃO PARTE 1	64
FIGURA 56- DESENHO 2D DA INSTALAÇÃO PARTE 2	65
FIGURA 57- EXEMPLO DE UMA INSTALAÇÃO PRETENDIDA, HYFLUID TECHNOLOGY, 2020	65
FIGURA 58-EXEMPLO DE UM TUBO DE PITOT, DELMÉE, 1982	67
FIGURA 59-EXEMPLO DA DIVISÃO DE ÁREAS E PONTOS DE MEDIÇÃO, AIR FLOW MEASUREMENTS IN DUCTS ACCORDING TO DIN EN 12599, 2020	69
FIGURA 60- PERCENTAGEM TEÓRICA DA IRREGULARIDADE DO PERFIL	70
FIGURA 61- ALOCAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO E DIVISÃO DE QUADRANTE NA SECÇÃO	71
FIGURA 62-INCERTeza DA MEDIÇÃO	72
FIGURA 63-MONTAGEM DO BALÓMETRO	74
FIGURA 64-MONTAGEM DO BALÓMETRO	74

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1-FONTES LIBERTADORAS DE POLUENTES, APA, 2009	8
TABELA 2-EXEMPLO DE ODORES INDICADORES DE PROBLEMAS NOS EDIFÍCIOS, APA (AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE)	8
TABELA 3-METODOS DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO AR, ASHRAE 2017	25
TABELA 4-CAUDALIMETROS VOLUMÉTRICOS E MÁSSICOS, ASHRAE 2017	35
TABELA 5-EXPLICAÇÃO DO TIPO DE RESISTÊNCIA "PT-100"	45
TABELA 6-ESPECIFICAÇÕES DO BALÓMETRO, TSI	50
TABELA 7-QUANTIDADE MÍNIMA DE SENSORES, AMCA	52
TABELA 8-ESCOLHA DE DIÂMETROS	56
TABELA 9-VARIAÇÃO DA PRESSÃO E SEUS COEFICIENTES ASSOCIADOS PARA CADA BOCAL	58
TABELA 10-VALIDAÇÃO DO MÉTODO UTILIZADO	59
TABELA 11-RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DE VELOCIDADE	71
TABELA 12-PERCENTAGEM DA IRREGULARIDADE DO PERFIL DE VELOCIDADE E VELOCIDADES MÉDIAS DE CADA QUADRANTE	71
TABELA 13-ERRO RELATIVO E DADOS RELATIVOS À MEDIÇÃO	73
TABELA 14-CONDIÇÕES AMBIENTE DA CALIBRAÇÃO	73
TABELA 15-DADOS CARACTERÍSTICOS AO BALÓMETRO ALNOR EBT 721	73
TABELA 16- MÉTODO DE AJUSTE E VELOCIDADES AJUSTADAS	74
TABELA 17-RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO BALÓMETRO PARA A INSTALAÇÃO	75



# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Objetivo .....	2
1.1.1	Objetivo principal .....	2
1.1.2	Objetivos secundários .....	2
1.2	Apresentação da instituição- INEGI .....	2
1.3	Metodologia .....	3
1.4	Cronologia .....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Enquadramento .....	5
2.2	Qualidade do Ar Interior .....	5
2.2.1	Fontes poluidoras a controlar .....	6
2.2.2	Indicadores gerais na deteção de fontes poluidoras.....	8
2.3	Ventilação.....	9
2.3.1	Ventilação natural .....	9
2.3.1.1	Ventilação transversal .....	9
2.3.1.2	Ventilação unilateral .....	10
2.3.2	Ventilação mecânica .....	10
2.3.2.1	Ventilação Mecânica Centralizada (VMC).....	10
2.3.3	Ventilação híbrida .....	11
2.3.4	Legislação e Normas .....	11
2.3.4.1	RECS e Portaria n.º 353-A/2013 de 4 dezembro .....	11
2.3.4.2	REH e NP-1037-2.....	14
2.3.5	Composição de um sistema de ventilação .....	15
2.3.5.1	Equipamentos usados em ventilação .....	15
2.4	Metrologia.....	17
2.4.1	Equipamento de medição (EM).....	17
2.4.1.1	Seleção do equipamento .....	17
2.4.2	Métodos e equipamentos de medição.....	18
2.4.3	Medição do caudal de ar .....	28
2.4.4	Calibração.....	37
2.4.5	Rastreabilidade.....	41
2.4.6	Confirmação metrológica .....	42
2.4.7	Erros e incertezas numa medição .....	44

2.4.7.1	Erros de medição .....	45
2.4.7.2	Importância em laboratório.....	45
2.4.7.3	Tolerância em instrumentos de medição .....	46
2.4.8	Requisitos técnicos.....	46
2.4.8.1	Competência técnica .....	46
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>49</b>
<b>3.1</b>	<b>Considerações e Procedimento de ensaio .....</b>	<b>49</b>
3.1.1	Caudal de ar.....	49
3.1.1.1	Escala da grandeza.....	49
3.1.1.2	Métodos e equipamentos utilizados .....	49
3.1.1.3	Balómetro .....	49
3.1.1.4	Airflow Traverse Station .....	50
3.1.2	Calibração.....	52
3.1.2.1	Escoamento estável .....	53
3.1.2.2	Escoamento completamente desenvolvido.....	53
3.1.2.3	Caudalímetro de referência .....	55
3.1.2.4	Instalação para a calibração de equipamentos de medição de caudal de ar .....	62
<b>3.2</b>	<b>Medição do caudal pela velocidade.....</b>	<b>66</b>
3.2.1	ISO 3966 .....	66
<b>3.3</b>	<b>Medição através de um tubo de Pitot .....</b>	<b>68</b>
3.3.1	Considerações a ter segundo a DIN EN 12599 .....	68
3.3.1.3	Leitura e erros associados.....	69
3.3.1.4	Medição do caudal.....	72
3.3.2	Medição com balómetro .....	73
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>77</b>
<b>4.1</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>77</b>
4.1.1	Objetivo principal .....	77
4.1.2	Medição de caudal pelo tubo de Pitot, segundo o guia prático.....	78
4.1.3	Medição de caudal pelo balómetro .....	78
<b>4.2</b>	<b>PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>79</b>
4.2.1	Objetivo principal .....	79
4.2.2	Medição pelo tubo de Pitot segundo um guia prático .....	79
4.2.3	Medição pelo balómetro .....	79
<b>5</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>81</b>

# INTRODUÇÃO

- 1.1 Objetivo
- 1.2 Apresentação da instituição- INEGI
- 1.3 Metodologia
- 1.4 Cronologia

## 1 INTRODUÇÃO

No tempo atual, os seres humanos passam muito tempo em ambientes interiores (casas, locais de trabalho...), e por esta razão a qualidade do ar interior (QAI) é de extrema importância. O ar interior é exposto a poluentes criados tanto pela ocupação humana, bem como os bens materiais que os rodeiam, materiais de construção, de revestimento e de mobiliário e a utilização de produtos de limpeza. A negligência na ventilação e renovação do ar é também responsável pela má qualidade do ar interior.

De modo a prevenir a má qualidade do ar interior, são desenvolvidos pelas entidades competentes regulamentos relativos à ventilação, regras de boas práticas na higienização dos espaços e implementação dos planos de manutenção dos edifícios. Através de uma avaliação da QAI é possível saber se um edifício apresenta condições propícias à sua ocupação ou atividade. Caso não as demonstre, é possível promover a QAI através de algumas medidas mitigadoras e/ou corretivas, nomeadamente: mudança de hábitos dos ocupantes, alguns produtos de limpeza e materiais decorativos devem ser alterados e haver um ajustamento/regularização das taxas de ventilação dos espaços interiores, medida de prevenção que será aprofundada neste relatório.

A ventilação, como já referido, é um fator que garante uma boa gestão da QAI. Esta deve-se principalmente à renovação do ar do espaço a controlar. A forma mais simples de aumentar a renovação do ar é promovendo a entrada de ar novo, através de uma simples abertura de uma janela ou o uso de equipamentos mecânicos, que providenciam uma maior e controlada entrada de ar novo. Não se pode deixar de se referir a situação atual do COVID-19 (coronavírus), sendo este um vírus contagioso, assume-se a inalação, por via aérea, de gotículas projetadas por um doente infetado. Como tal (ASHRAE, 2020) e a (Rehva, 2020) publicaram algumas estratégias que poderão diminuir o contágio do vírus, na qual uma dessas estratégias está relacionada com a ventilação.

É comum a calibração de equipamentos de medição de caudal, utilizando-se um equipamento de medição de velocidade na obtenção do valor de referência. No caso estudado (escoamento de ar), os dados obtidos pelo equipamento de medição de referência serão em caudal de ar volumétrico. Isto permite **diminuir** a ocorrência de **erros provenientes da conversão de velocidade para caudal**, como também erros do operador e dos equipamentos utilizados. Com isto pode-se aproximar os valores de projeto com os valores reais de funcionamento, aumentando assim a eficiência do sistema projetado no seu funcionamento.

## 1.1 Objetivo

### 1.1.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é, respondendo ao desafio lançado pelo Laboratório de Aerodinâmica e Calibração (LAC) do INEGI, projetar uma instalação com o intuito de calibrar equipamentos de medição de caudal de ar, e auxiliar na avaliação e na seleção de equipamento de medição de caudal de ar em ventilação.

No dimensionamento da instalação para a calibração de equipamentos de medição de caudal de ar é necessário cumprir os seguintes pontos:

- Baixo investimento;
- Possibilidade de uma grande gama/escala alargada de caudal de ar a medir, em ventilação de espaços interiores, de 45 m<sup>3</sup>/h a 5000 m<sup>3</sup>/h;
- Acreditação com a melhor incerteza associada;
- Flexibilidade de realização de ensaios de medição, pois tratando-se de um laboratório, pode ser necessário realizar diferentes ensaios de medição. Como se utilizou como base o túnel de vento, que tinha como objetivo inicial a realização de medições em velocidade de ar, é preciso retirar os elementos que interferem com a usual medição da velocidade de ar (bocais, “*settling means*” e a segunda parte da instalação, onde se encontram os caudalímetros a calibrar).

### 1.1.2 Objetivos secundários

Realização de ensaios de medição em caudal e velocidade do escoamento de ar, com o intuito de obter experiência e conhecimento na área da medição, análise de incertezas e erros de medição.

## 1.2 Apresentação da instituição- INEGI

INEGI- Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, foi iniciado em 1986 no cerne dos Departamentos de Engenharia Mecânica (DEMec) e de Engenharia e Gestão Industrial (DEGI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). O trabalho realizado insere-se em 4 eixos de intervenção:

- Investigação;
- Inovação e Transferência de Tecnologia;
- Consultoria Científica e Tecnológica;
- Prestação de Serviços.

A missão do INEGI é apoiar o desenvolvimento da indústria e da economia no global, com o auxílio da inovação de base científica e tecnológica, juntamente com a melhoria pessoal e profissional dos colaboradores.

Visa crescer e ser reconhecida como a melhor instituição que transforma conhecimento em valor, sempre cumprindo os seguintes valores:

- Orientação ao cliente;
- Ambição;
- Responsabilidade;
- Cooperação;
- Paixão pela inovação.

Não podendo deixar de referir o Laboratório de Aerodinâmica e Calibração (LAC), acreditado pelo Instituto Português de Acreditação (IPAC) para a calibração de equipamentos de medição da velocidade do escoamento do ar com anemómetros e tubos de Pitot, para uma gama de velocidade de 0,125 m/s a 28 m/s.

### 1.3 Metodologia

Na sequência do objetivo principal, é necessário conhecer os seguintes tópicos:

- Conceitos de ventilação;
- Domínio da legislação associada à ventilação para edifícios de comércio e serviços;
- Conceitos associados à metrologia (medição, validação de métodos e calibração);
- Estudo de equipamentos de medição de velocidade e caudal de escoamento de ar;
- Estabelecimento de escala/gama de medição a realizar, associado à ventilação;
- Escolha de equipamento de medição para a gama pretendida;
- Escolha do método de calibração a utilizar e posteriormente o equipamento de medição de caudal associado;
- Pesquisa sobre dimensionamento de uma instalação própria para a medição de caudal de ar;
- Dimensionamento da instalação e do equipamento de medição, a partir do qual se obtém o valor de referência;
- Realização de ensaio de medição de caudal, aproveitando uma instalação montada para outro propósito, comparação e análise dos métodos utilizados.

### 1.4 Cronologia

Apresenta-se a ordem cronologia e a divisão de trabalho realizados, na Figura 1.

Meses		Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho
Pesquisa	Conceitos de metrologia	x	x								
	Métodos de medição		x	x	x						
	Métodos de calibração				x						
	Ventilação		x	x							
Revisão do estado de arte		x	x	x	x	x					
Determinação	Escala de caudal					x					
	Método e equipamentos medição						x	x			
	Método e equipametos de calibração							x			
Realização dos ensaio									x		
Comparação de resultados e conclusões										x	x
Elaboração do relatório		x	x	x	x	x		x	x	x	x

Figura 1-Cronologia de trabalho

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Enquadramento
- 2.2 Qualidade do Ar Interior
- 2.3 Ventilação
- 2.4 Metrologia

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Enquadramento

A QAI de um espaço a ser ocupado é de grande importância, para que os seus ocupantes se sintam confortáveis e não comprometa a saúde dos mesmos. De forma a melhorar essa qualidade, é necessário renovar o ar que circula no espaço.

A renovação do ar é efetuada através da ventilação, a qual se pode efetuar de três formas:

1. Ventilação natural;
2. Ventilação mecânica;
3. Ventilação híbrida.

No caso da ventilação mecânica, é necessário o recurso a equipamentos responsáveis por realizar a renovação em caudal para um determinado espaço e atividades realizadas no mesmo. A existência de métodos regulamentados, cuja adequada aplicação permite um maior conforto e um menor dispêndio da energia, decorrente do recurso a esses mesmos equipamentos, é fundamental.

O uso de **equipamentos corretos**, e que meçam corretamente na escala do caudal que irá ser fornecido ao local, é de grande importância, sendo necessário confirmar se os valores observados são semelhantes aos valores expressos em projeto. Contudo, os equipamentos possuem erros de medição, sendo necessário a sua calibração em laboratório para diminuir esses mesmos erros e aferir a incerteza dos resultados apreendidos

### 2.2 Qualidade do Ar Interior

Segundo (ASHRAE Standard 62.1, 2013), a definição da qualidade de ar interior aceitável é a inexistência, na sua constituição, de contaminantes conhecidos, cujas concentrações nocivas são determinadas por autoridades competentes, de modo a que 80% das pessoas expostas ao ar não expressem insatisfação.

Na avaliação da QAI e seus métodos de medição é necessário ter em conta (Portaria n.º 353-A, 2013), em que a avaliação de poluentes é mais utilizada em Edifícios de Comércio e Serviços, nos quais se realizam mais atividades humanas e onde há maior ocupação em espaços interiores. Não se terá em conta habitações, pois na sua maioria são renovadas através de fissuras ou aberturas controladas, ligados com o exterior.

### 2.2.1 Fontes poluidoras a controlar

- Poluentes físico-químicos:
  - Partículas em suspensão (frações PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>);
  - Compostos orgânicos voláteis totais (COVs Totais);
  - Monóxido de carbono (CO);
  - Formaldeído (CH<sub>2</sub>O);
  - Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).
- Poluentes microbiológicos no ar:
  - Bactérias;
  - Fungos;
  - Vírus (coronavírus).

Na Figura 2 é possível consultar os limiares de proteção (Portaria n.º 353-A, 2013) para os poluentes físico-químicos, estes valores têm em conta os seguintes parâmetros:

- a) As concentrações em µg/m<sup>3</sup> e mg/m<sup>3</sup> foram estipuladas para condições padrão, a uma temperatura de 20 °C e à pressão de 1 atm (101,325 kPa);
- b) Estes limiares de proteção são retirados depois de uma média de 8 horas de utilização;
- c) Os valores na coluna referente à margem de tolerância são admissíveis a edifícios existentes e edifícios novos sem sistemas mecânicos de ventilação.

Poluentes	Unidade	Limiar de proteção	Margem de tolerância (MT) [%]
Partículas em suspensão (fração PM <sub>10</sub> )	[µg/m <sup>3</sup> ]	50	100
Partículas em suspensão (fração PM <sub>2,5</sub> )	[µg/m <sup>3</sup> ]	25	100
Compostos Orgânicos Voláteis Totais (COVs)	[µg/m <sup>3</sup> ]	600	100
Monóxido de carbono (CO)	[mg/m <sup>3</sup> ]	10	-
	[ppmv]	9	
Formaldeído (CH <sub>2</sub> O)	[µg/m <sup>3</sup> ]	100	-
	[ppmv]	0,08	
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	[mg/m <sup>3</sup> ]	2250	30
	[ppmv]	1250	
Radão	[Bq/m <sup>3</sup> ]	400	-

Figura 2-Limiar de proteção e margem de tolerância para os poluentes físico-químicos, Portaria n.º 353-A/2013 de 4 de dezembro

Poluentes físico-químicos:	$[\text{Poluente}]_{\text{Max}} \leq [\text{Poluente}]_{\text{LP}}$ <p>em que</p> <p><math>[\text{Poluente}]_{\text{LP}}</math> corresponde ao limiar de proteção do poluente;</p> <p><math>[\text{Poluente}]_{\text{Max}}</math> corresponde ao valor máximo das concentrações médias <math>[\text{Poluente}]_{\text{Med}}</math> obtidas em todos os pontos de amostragem;</p> <p><math>[\text{Poluente}]_{\text{Med}}</math> é a concentração média do poluente em cada ponto de amostragem correspondendo à média temporal dos valores de concentração medidos no ponto de amostragem.</p> <p>No caso de edifícios existentes e de edifícios novos sem sistemas mecânicos de ventilação, assim como nas situações de grande intervenção, previstas na alínea b), do número 3 do artigo 44 do Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 agosto, poderá ser considerada uma margem de tolerância (MT), sendo o critério de conformidade verificado quando:</p> $[\text{Poluente}]_{\text{Max}} \leq [\text{Poluente}]_{\text{LP}} \times (1 + \text{MT})$
----------------------------	--

Figura 3- Critérios de conformidade, Portaria n.º 353-A/2013 de 4 de dezembro

Tendo como base a (Portaria n.º 353-A, 2013), deve-se proceder a uma verificação da conformidade legal dos resultados das medições dos poluentes físico-químicos, com o auxílio dos critérios gerais representados na Figura 3.

Caso a concentração medida de COVs seja superior aos limiares de proteção apresentados na Figura 2, é necessário que a sua verificação de conformidade siga os seguintes critérios:

- a) É obrigatório realizar a avaliação dos compostos ilustrados na Figura 4 e a comprovação de que as suas concentrações são inferiores aos valores limiares de proteção aí ilustrados.

Poluentes	Limiar de proteção [ug/m <sup>3</sup> ]
Benzeno	5
Tricloroetileno	25
Tolueno	250
Estireno	260
Tetracloroetileno	250

Figura 4- Limiares de proteção para compostos orgânicos voláteis específicos a considerar na verificação da conformidade dos COVs, Portaria n.º 353-A/2013 de 4 de dezembro

Tabela 1-Fontes libertadoras de poluentes, APA, 2009

<b>Poluente</b>	<b>Fonte</b>
<b>Partículas em suspensão</b>	Fumo, cozinhar e equipamentos de escritório (impressoras, etc)
<b>COV`s</b>	Materiais de construção, mobiliários e processos metabólicos
<b>CO<sub>2</sub></b>	Expiração humana e processos de combustão
<b>CO</b>	Combustão com carbono e baixos níveis de oxigénio como exemplo fumo de tabaco
<b>Formaldeído</b>	Madeira prensada, isolamento de espuma de ureia
<b>Microbiológicos</b>	Materiais húmidos e molhados, torres de arrefecimento e refrigeração

Abaixo estão descritos alguns parâmetros recomendados medir, de forma a conseguir uma melhor avaliação da QAI.

- Temperatura do ar;
- Temperatura média de radiação das superfícies;
- Humidade relativa do ar;
- Pressão atmosférica;
- Velocidade/**Caudal do ar** à saída de difusores e grelhas.

São de conhecimento algumas fontes que libertam os poluentes já referidos, como possível de observar na Tabela 1.

### 2.2.2 Indicadores gerais na deteção de fontes poluidoras

Abaixo estão descritos os indicadores gerais que conseguem identificar as fontes mais comuns de poluição.

- Odor (Tabela 2);
- Superlotação;
- Más condições sanitárias;
- Poeiras;
- Problemas de humidade;
- Crescimento de fungos.

Tabela 2-Exemplo de odores indicadores de problemas nos edifícios, APA (Agência Portuguesa do Ambiente)

<b>Indicador</b>	<b>Fonte</b>	<b>Sintomas</b>
<b>Exaustão de produtos de combustão</b>	Monóxido de carbono.	Dores de cabeça, cansaço e náuseas.
<b>Odores corporais</b>	Superlotação, baixa taxa de renovação de ar.	Dores de cabeça, cansaço e falta de ar.

<b>Cheiro a mofo</b>	Materiais com micróbios e fungos.	Alergias.
<b>Cheiro a químicos</b>	Formaldeído, pesticidas, etc.	Irritação dos olhos, nariz e garganta.
<b>Cheiro a solventes, perfumes</b>	(COVs).	Alergias, dores de cabeça e vertigens.
<b>Cheiro a pó, calcário e cimento molhado</b>	Partículas, má regulação da humidade relativa.	Olhos secos, irritação do nariz, garganta e pele, problemas respiratórios, tosse e espirros.

## 2.3 Ventilação

A ventilação permite a renovação do ar interior e segundo (Awbi, 2003) ocupa uma importante posição no projeto de edifícios, com o objetivo de promover uma boa qualidade do ar interior. Cada vez mais as pessoas mostram preocupação com o ambiente que as rodeia, o que é esperado devido à divulgação de problemas ambientais e como estes têm um grande impacto na saúde do ser humano.

De modo proporcionar conforto aos utentes dos edifícios, a ventilação é fundamental para promover esse conforto, ao renovar o ar viciado, ar concentrado de poluentes prejudiciais ao bem-estar do ser humano, mas também eliminação de maus cheiros, para satisfação de exigência da salubridade dos residentes (Viegas, 2010).

A ventilação pode ser efetuada de 3 formas, natural e mecânica ou até mesmo pelas duas formas ao mesmo tempo.

### 2.3.1 Ventilação natural

A ventilação natural é realizada através da deslocação de ar do interior para exterior e vice-versa, efetuada mediante o diferencial de temperatura e pressão. Este escoamento natural do ar é efetuado em espaços interiores de edifícios, provocados por aberturas permanentes ou controláveis, com área propícia para o efeito.

#### 2.3.1.1 Ventilação transversal

Um modo de ventilação natural é a ventilação transversal, ou por vezes titulada como ventilação cruzada. Ao posicionar aberturas ao mesmo patamar em lados contrários do edifício o ar atravessa o interior do edifício através de portas e corredores interiores, que por sua vez garante a ventilação das zonas, dissipa os poluentes existentes no ar e a acumulação de carga térmica. Para garantir que o fluxo de vento ocorra transversalmente, pode-se colocar aberturas de admissão com uma secção de passagem de fluxo menor que a das aberturas de extração. (Mayer, 2012)

### 2.3.1.2 *Ventilação unilateral*

O recurso à ventilação unilateral, é frequentemente usada quando os edifícios possuem aberturas numa única fachada. Deste modo, a renovação do ar interior é realizada por uma fachada, sendo esta sujeita apenas às condições climatéricas da zona exposta ao exterior. É possível que um edifício com mais que uma fachada exposta ao exterior utilize este método de ventilação, embora não seja muito normal. Para tal acontecer é necessário considerar cada zona do edifício como um só, isolar as zonas para minimizar os caudais existentes entre secções interiores, obrigando a que o ar seja admitido apenas quando está na presença de pressões positivas nas fachadas, e extraído quando está na presença de pressões negativas. (Mayer, 2012)

### 2.3.2 *Ventilação mecânica*

A ventilação mecânica utiliza meios mecânicos para a realização da ventilação, os sistemas e equipamentos servem para assegurar uma renovação do ar interior por intermédio da extração de ar do espaço e/ou insuflação de ar exterior ou de ar tratado numa mistura com ar novo proveniente do exterior. Existem alguns pontos que devem ser cumpridos na utilização a recursos mecânicos para a realização da ventilação, que o são cumpridos pela ventilação natural. De entre eles destacam-se a distribuição homogénea de ar novo em toda a zona ocupada do espaço e a utilização de sistemas de ventilação adequados para a renovação de ar interior, que assegurem o caudal mínimo de ar novo em conformidade como previsto no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). (Portaria n.º 353-A, 2013)

Este projeto irá se focar na medição de caudal de ar em edifícios de habitação e edifícios de comércio e serviços, excluindo casos específicos onde é preciso mais rigor, como hospitais e fábricas com elevada produção de poluentes.

#### 2.3.2.1 *Ventilação Mecânica Centralizada (VMC)*

Os sistemas VMC mais utilizados, a admissão de ar é realizada através de aberturas na fachada diretas para o exterior e a exaustão de ar por condutas coletivas, em que no topo dos edifícios/apartamentos se juntam à caixa de ventilação por meio de condutas horizontais, exemplo representado pela Figura 5.

O sistema representado pela Figura 5 é designado, de acordo com a terminologia francesa por sistema VMC de fluxo simples. Em localidades com condições exteriores destoantes, como por exemplo devido ao ruído ou à poluição, é necessário o recurso a sistemas VMC de duplo fluxo. Além da extração se realizar por meio de equipamentos mecânicos, a insuflação irá recorrer ao uso dos mesmos, exemplo Figura 6. (Pinto, 2006)

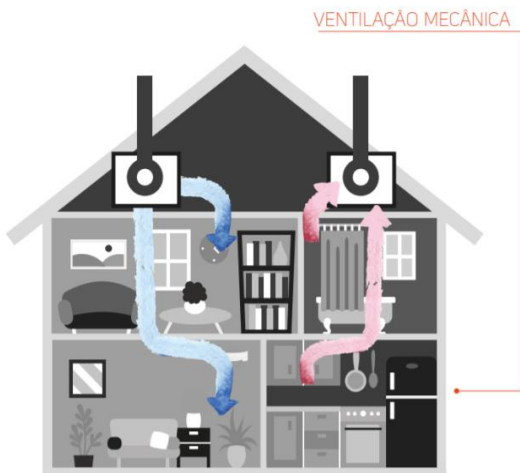


Figura 6-Ventilação mecânica, Certificação Energética e Ar interior Edifícios

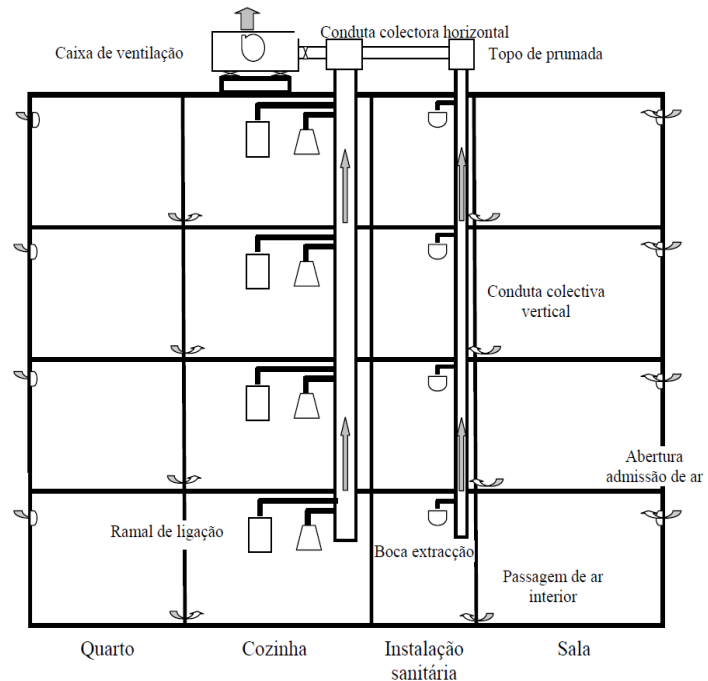


Figura 5-Princípio geral de funcionamento de sistema de ventilação VMC com admissão de ar na fachada, Ventilação\_mecânica\_de\_edifícios\_de\_habitacao

### 2.3.3 Ventilação híbrida

Na ventilação em edifícios/habitações é, na sua maioria, utilizado o recurso a ventilação híbrida, sendo esta a combinação de ventilação natural e mecânica. Em geral, a ventilação natural é usada como o cerne do sistema de ventilação e o recurso à ventilação mecânica é utilizada quando o fluxo de ar natural não possui força suficiente para garantir a sua distribuição, mas também para controlar certos requisitos determinados em projeto, como exemplo a temperatura e humidade. (AERECO, 2019)

Este método de ventilação apresenta algumas vantagens, como:

- Fácil manutenção;
- Poupança de energia;
- Redução do barulho dos equipamentos;
- Diminuição do espaço ocupado pelos equipamentos.

### 2.3.4 Legislação e Normas

O (Decreto-Lei N°118, 2013) tem como objetivo certificar e promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios através do Sistema de Certificação dos Edifícios (SCE), que integra o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), e o RECS. O controlo do caudal de ar mínimo recomendado para os edifícios em estudo é dado pelas portarias descritas abaixo.

#### 2.3.4.1 RECS e Portaria n.º 353-A/2013 de 4 dezembro

O objetivo do RECS é estabelecer as regras a observar no projeto, construção, alteração, operação e manutenção de edifícios de comércio e serviços e seus sistemas técnicos, tal

como os requisitos do seu desempenho, de modo a promover a eficiência energética e a qualidade do ar interior. (Decreto-Lei N°118, 2013)

Para o caso em estudo irá dar-se mais atenção à (Portaria n.º 353-A, 2013), que é responsável por regulamentar o caudal mínimo para espaços interiores de edifícios de comércio e serviços.

A Portaria tem em conta alguns parâmetros que influenciam a quantidade mínima de caudal de ar. No caso da Figura 7, esta representa o  $\varepsilon_v$  (valor de eficácia de remoção de poluentes), que através da equação (1) irá ter impacto no valor final de ar mínimo.

$$Q_{ANF} = \frac{Q_{AN}}{\varepsilon_v} \quad (1)$$

Sendo:

$Q_{ANF}$  – Caudal de ar novo final corrigido da eficácia (caudal efetivo), ( $m^3/h$ );

$Q_{AN}$  – Caudal de ar novo (mínimo regulamentar), ( $m^3/h$ );

$\varepsilon_v$  – Valor de eficácia de remoção de poluentes.

Precedendo-se à utilização do valor de eficácia de remoção de poluentes, os mínimos de caudal dependem da taxa de ocupação e atividade física ilustrada pela Figura 8, pelo material construtivo do edifício (revestimentos e mobiliário) ilustrado pela Figura 9 e no caso de se realizar extração em locais específicos ilustrada na Figura 10.

Configuração da distribuição de ar na zona	$\epsilon_v$
Insuflação pelo teto, ar frio	1
Insuflação pelo teto e extração junto ao pavimento, ar quente	1
Insuflação pelo teto, de ar quente pelo menos 8°C acima da temperatura do local e extração/retorno pelo teto	0,8
Insuflação pelo teto, de ar quente pelo menos 8°C acima da temperatura do local e extração/retorno pelo teto, desde que o jato de ar de insuflação, tenha velocidade superior a 0,8m/s e alcance até 1,4m do pavimento (nota: para velocidades mais baixas, $\epsilon_v = 0,8$ )	1
Insuflação de ar frio junto ao pavimento e extração/retorno junto ao teto, desde que o jato de ar de insuflação com uma velocidade de 0,8m/s, tenha um alcance de 1,4m ou mais, em relação ao pavimento.	1
Insuflação de ar frio a baixa velocidade junto ao pavimento e extração junto ao teto, numa estratégia de ventilação do tipo deslocamento, proporcione um fluxo unidirecional e estratificação térmica	1,2
Insuflação de ar quente junto ao pavimento e extração junto ao pavimento, no lado oposto do compartimento	1
Insuflação de ar quente junto ao pavimento e extração/retorno junto ao teto	0,7
Admissão natural de ar no lado oposto do compartimento em relação ao ponto de extração/retorno mecânica	0,8
Admissão natural de ar junto ao ponto de extração/retorno mecânica	0,5
Insuflação de ar quente junto ao pavimento e extração/retorno junto ao teto, no mesmo lado do compartimento ou em localização próxima	0,5
Insuflação de ar frio junto ao teto e extração/retorno junto ao pavimento, do mesmo lado do compartimento ou em localização próxima	0,5

Figura 7-valor de eficácia de remoção de poluentes, portaria nº. 353-A/2013 de 4 dezembro

Tipo de atividade	Taxa de metabolismo dos ocupantes - M (met)	Exemplos de tipo de espaço	Caudal de ar novo [m <sup>3</sup> /(hora.pessoa)]
Sono	0,8	Quartos, Dormitórios e similares	16
Descanso	1,0	Salas de repouso, Salas de espera, Salas de conferências, Auditórios e similares, Bibliotecas.	20
Sedentária	1,2	Escritórios, Gabinetes, Secretarias, Salas de aula, Cinemas, Salas de espetáculo, Salas de Refeições, Lojas e similares, Museus e galerias, Salas de convívio, Salas de atividade de estabelecimentos de geriatria e similares.	24
Moderada	1,75 (1,4 a 2,0)	Salas de jardim de infância e pré-escolar e Salas de creche. Laboratórios, Ateliers, Salas de Desenho e Trabalhos Oficiniais, Cafés, Bares, Salas de Jogos e similares.	28
Ligeiramente Alta	2,5 (2,0 a 3,0)	Pistas de dança, Salas em ginásios, Salas de ballet e similares	35
Alta	5,0 (3,0 a 9,0)	Salas de musculação, Salas em ginásios e pavilhões desportivos e similares	49
			98

Figura 8-Caudal mínimo de ar novo determinado em função da carga poluente devida à ocupação, portaria nº. 353-A/2013 de 4 dezembro

O caudal de ar novo utilizado irá ser determinado pela taxa de ocupação e atividade física, comparando-se com o do material construtivo do edifício. Dos dois caudais obtidos o de maior valor irá ser o utilizado.

Situação do edifício	Caudal de ar novo [m <sup>3</sup> /(hora.m <sup>2</sup> )]
Sem atividades que envolvam a emissão de poluentes específicos	3
Com atividades que envolvam a emissão de poluentes específicos	5

Figura 9-Caudal mínimo de ar novo determinado em função da carga poluente devida ao edifício, portaria nº. 353-A/2013 de 4 dezembro

Tipo de utilização	Caudal [m <sup>3</sup> /h]
Instalação sanitária pública	Max (90 x (n.º urinóis + n.º sanitas); 10 x A <sub>pav</sub> )
Instalação sanitária privada Balneários	Max (45 x (n.º urinóis + n.º sanitas); 10 x A <sub>pav</sub> ) <sup>(a)</sup> Max (90 x (n.º urinóis + n.º sanitas); 10 x A <sub>pav</sub> ) <sup>(b)</sup> Max (45 x n.º duche; 10 x A <sub>pav</sub> ) <sup>(a)</sup> Max (90 x n.º duche; 10 x A <sub>pav</sub> ) <sup>(b)</sup>

<sup>(a)</sup> quando o sistema de extração tem funcionamento contínuo.

<sup>(b)</sup> quando o sistema de extração não está em contínuo

Figura 10-Caudais mínimos de extração de ar a assegurar para locais e instalações específicas, portaria nº. 353-A/2013 de 4 dezembro

Em suma, os valores mínimos de caudal de ar novo por espaço estão de acordo com a ocupação das características do próprio edifício e dos seus sistemas de climatização.(Decreto-Lei N°118, 2013)

#### 2.3.4.2 REH e NP-1037-2

Segundo o (Decreto-Lei N°118, 2013), o objetivo do REH é normalizar os requisitos para edifícios de habitação, novos ou sujeitos a intervenção, assim como os parâmetros e metodologias de tipificação do desempenho energético, em condições nominais, de todos os edifícios de habitação e dos seus sistemas técnicos. Isto permite fomentar a melhoria relativamente ao comportamento térmico, a eficiência dos seus sistemas técnicos e a diminuição do risco de ocorrência de condensações superficiais nos elementos da envolvente.

O recurso ao REH deve estar presente em edifícios de habitação que contemplem as seguintes características:

- Na condição de edifícios de habitação unifamiliares, para a totalidade do edifício;
- Na condição de edifícios de habitação multifamiliares, para cada fração constituída, em edifícios em projeto ou em construção, para cada fração prevista constituir;
- Na condição de edifícios mistos, para as frações destinadas a habitação, independentemente da execução do RECS às restantes frações.

Normalmente em edifícios de habitação não é recorrente o uso a ventilação através de equipamentos mecânicos, mas sim através de ventilação natural, pela existência de fendas localizadas em janelas, portas, chaminés. Pelo contrário, para extrair em espaços (cozinhas e casa de banho) onde a produção de odores e/ou poluentes é mais significativa, deve-se utilizar a (NP 1037-2, 2002) para regulamentar o caudal mínimo que se deve garantir na extração desses locais.

### 2.3.5 Composição de um sistema de ventilação

Na composição de um sistema de ventilação é necessário a existência de uma máquina de fluxo [(menos complexa, através de um ventilador; ou mais complexa, pelo uso de uma UTA (Unidade de tratamento de ar) com módulo de mistura e recuperação de calor, a par de todos os filtros necessários e tratamento térmico, higrométrico e acústico)] e por uma cadeia de condutas (menos ou mais complexa), à qual estão acoplados elementos de admissão e extração de ar nos espaços (respetivamente grelhas e difusores) e outros objetos de regulação (registos de regulação de caudal de ar) ou de segurança (registos corta-fogo), de climatização [caixas VAV (volume de ar variável)], ou ainda resistências e serpentinas para o reaquecimento terminal).

#### 2.3.5.1 Equipamentos usados em ventilação

Utilizou-se como base (EVAC, 2016). Em geral, é normal num sistema de ventilação a utilização destes 3 equipamentos:

1. Ventilador/UTA (Unidade de tratamento de ar, Figura 11);
2. Condutas;
3. Grelhas.

A utilização da UTA é necessária de forma a alcançar os valores desejados de renovação de ar, filtragem do ar e tratamento térmico e higrométrico do ar. Na sua composição é possível encontrar os seguintes componentes:

- 1) Ventilador;
  - a) O recurso ao ventilador tem como função fornecer energia sob a forma de velocidade, ao escoamento de ar.
- 2) Permutador de calor;
  - a) O recurso ao permutador de calor é usado para controlar a temperatura a que se deseja que o local esteja. Podem encontrar-se diferentes tipos de permutadores de calor, o mais comum é em baterias de água.
- 3) Registo de caudal;
  - a) O recurso ao registo de caudal é uma forma de regular o caudal que se pretende que passe através da UTA.
- 4) Filtros;
  - a) O recurso ao filtro serve para controlar a qualidade do ar interior desejada, a necessidade da aposta/investimento do componente, que é dependente do local exterior onde se encontra o espaço e as necessidades interiores. De modo a conhecer as gamas necessárias para a sua utilização em Portugal, é utilizado a (Portaria n.º 353-A, 2013), assim podendo monitorizar os mesmos para que cumpram o seu papel, não comprometendo a QAI e a eficiência energética do sistema.
- 5) Atenuadores.
  - a) O recurso aos atenuadores é necessário para proporcionar conforto acústico e mesmo diminuir as vibrações causadas pelo funcionamento da UTA.

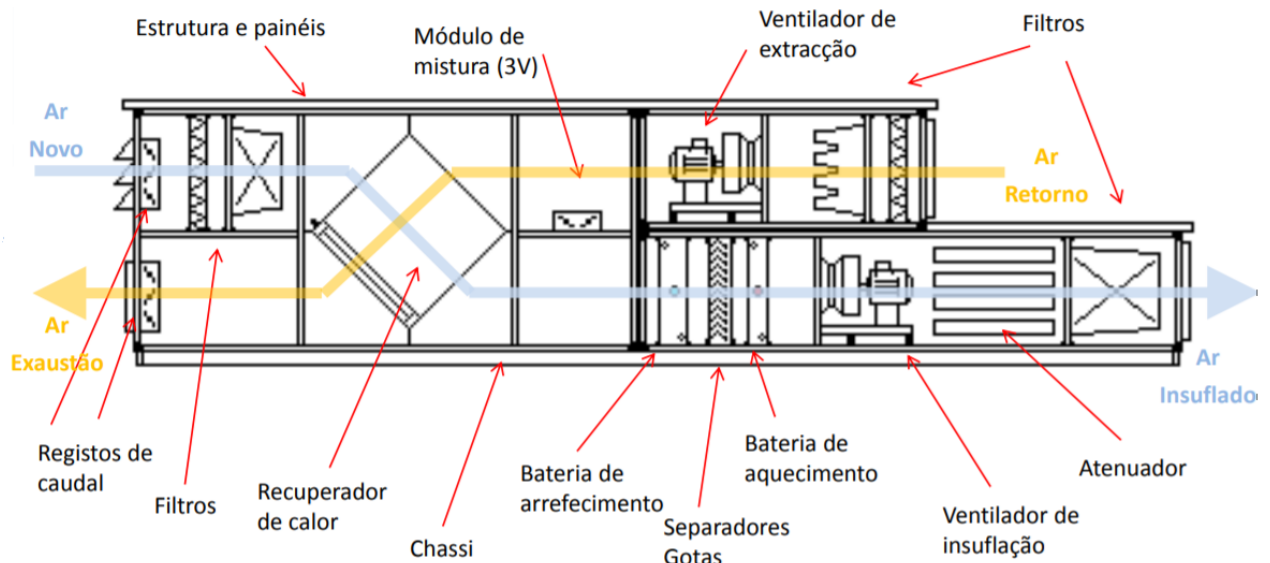


Figura 11-UTA e seus componentes, EVAC

Dependendo do sistema de ventilação pretendido não é necessário utilizar todos os componentes em cima descritos, no caso de não se desejar controlar a temperatura do espaço interior, não é necessário que tenha um permutador de calor, por exemplo. A função de uma conduta é transportar o ar desde o ventilador/UTA até ao local a que se destina renovar ou/e vice-versa.

De um modo aplicável, as grelhas servem de ligação da conduta para o local desejado onde se pretende insuflar ou/e extrair ar. Existe vários tipos de grelhas, com colocação em portas (Figura 15), paredes (Figura 14), condutas (Figura 13) e chão (Figura 12). As lâminas alocadas nas grelhas podem estar fixas a um ângulo relativamente ao seu próprio eixo, ou podem variar esse mesmo ângulo de forma a controlar mais especificamente a direção do escoamento de ar, é possível de observar na Figura 16. (TROX, 2019)

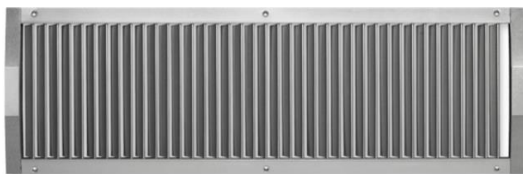


Figura 13-Grelha instalada em condutas, TROX



Figura 12-Grelha instalada no chão, TROX



Figura 15-Grelha instalada em portas, TROX



Figura 14-Grelha instalada em paredes, TROX

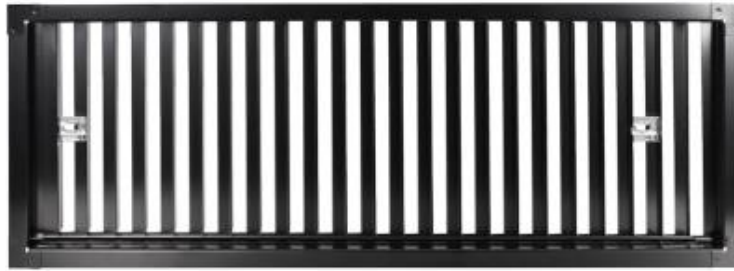


Figura 16-Grelha para controlar o caudal, TROX

## 2.4 Metrologia

A metrologia é a ciência da medição, que ainda não é muito conhecida pelas pessoas e até por alguns engenheiros que a praticam (Sousa, 2011).

*NOTA: "A metrologia engloba todos os aspetos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição e o campo de aplicação." (IPQ, 2009)*

### 2.4.1 Equipamento de medição (EM)

#### 2.4.1.1 Seleção do equipamento

Segundo (ISO/IEC 17025, 2018) na seleção de um EM é importante conhecer a grandeza que se pretende medir. De tal modo, deve-se ter em atenção os seguintes tópicos:

- A **grandeza base**. É de tremenda ajuda conhecer o elemento físico pretendido;
- A **grandeza derivada** envolvida;
- As unidades a manusear. É de realçar que é obrigatório o uso do Sistema Internacional de Unidades;
- O princípio de medição;
- O método de medição;
- As grandezas de influência;
- Tolerância admissível;
- Competência técnica em serviço;
- Rastreabilidade.

Para além de conhecer o que se deseja medir, devemos ainda conhecer alguns fatores de decisão, como por exemplo:

- Capacidade para medir a grandeza derivada envolvida;
- Gama compatível com os valores a medir da grandeza derivada;
- Classe de exatidão compatível com as tolerâncias que se querem cumprir;
- Incerteza;
- Incomplexidade de calibração;
- Robustez do equipamento;
- Custo;
- Prudência na manutenção.

## 2.4.2 Métodos e equipamentos de medição

A descrição dos métodos e equipamentos de medição têm como base (ASHRAE handbook, 2017) e (Schneider, 2011).

### 2.4.2.1 *Medição da velocidade do ar*

Os equipamentos responsáveis por medir a velocidade dos fluidos e sua escala de valores e precisão estão presentes na Tabela 3.

#### 2.4.2.1.1 *Técnicas de marcadores transportados pelo ar*

Estas técnicas são regularmente usadas para a medição da velocidade direcional em espaços amplos (dentro de edifícios e sistemas de ventilação). Estão incluídos nestas técnicas o fumo, penas, peças de algodão, gases radioativos e não radioativos. O procedimento é realizado na seguinte forma: registando-se a taxa de movimento do detetor sólido ou monitorizando-se a variação do nível de concentração do gás detetor. Neste último, o ar é “marcado” por um ou mais detetores de gás e a sua medição de concentração é realizada em vários pontos. Ao se interpretar a evolução da detecção de concentração, é possível calcular o caudal do ar, eficiência da ventilação, a idade do ar e fugas de ar. Porém, o método presente apresenta alguma dificuldade na hora de medição, como requer um específico conhecimento na medição e análise das concentrações. A chave para o sucesso do método é uma boa mistura do detetor e do ar, que tende a ser difícil de obter em condutas em que o espaço é limitado.

#### 2.4.2.1.2 *Anemómetros*

##### 2.4.2.1.2.1 *“Deflecting vane”*

Este EM é constituído por um cata-vento dentro de um perfil circular. O ar, ao passar pelo EM, exerce uma pressão no cata-vento enquanto o seu movimento é impedido por uma mola e um íman de amortecimento, sendo possível observar as velocidades direcionais instantâneas na escala indicada no EM. É usualmente utilizado no estudo do ar em salas, em projetos duvidosos, na medição em difusores e grelhas para extração e insuflação e também em alguns laboratórios. Exemplo do equipamento na Figura 17.



Figura 17-Vista cortada do "Deflecting Vane", Alnor, 2014

#### 2.4.2.1.2.2 Anemómetro de hélice

Consiste num conjunto de hélices, sendo estas movidas pela entrada do escoamento de ar. Possibilitando assim a leitura da velocidade ligeiramente direcional do mesmo escoamento, através da conversão da rotação em relação ao eixo central circular do equipamento de medição das hélices para a velocidade do escoamento, proporcionada por um leitor magnético.

São necessárias calibrações para cada instrumento. Exemplo do equipamento na Figura 18.



Figura 18-Hélice, testo

#### 2.4.2.1.2.3 Anemómetro de copos

Frequentemente usado na medição em espaços abertos e na metrologia em turbinas eólicas. É constituído por 3 a 4 copos/taças hemisféricas, alocados radialmente ao veio vertical. O vento incide no copo, forçando a sua rotação de modo a se descobrir a velocidade radial em relação à componente do copo. Exemplo do equipamento na Figura 19.



Figura 19-Anemómetro de copos, banggood

#### 2.4.2.1.2.4 Anemómetro térmico

O anemómetro termal é usado na determinação direta e simples da velocidade direcional do ar num ponto do escoamento. O procedimento é realizado ao colocar a sonda no escoamento do ar, sendo que este, ao passar pela cabeça da sonda tende a arrefecê-la de maneira proporcional à velocidade do ar. O sinal é interpretado e é no providenciado a velocidade no visor. Exemplo do equipamento na Figura 20.

O EM microcontrolador de dispersão térmico é configurado como instrumento unidirecional, mas possui elementos sensoriais que permitem detetar a direção do escoamento. Este instrumento consegue também medir a fuga de ar entre dois espaços ou através de um orifício. É usado em controlo de pressão e para estimar caudais volumétricos através do orifício pela equação da pressão dinâmica.



Figura 20-Anemómetro térmico, testo

#### 2.4.2.1.2.5 Anemómetro laser “doppler”

Este anemómetro laser baseia-se no efeito “doppler”, que consiste na alteração da frequência através da relação entre o movimento do recetor e do emissor. Esta alteração da frequência é notória num fluido em movimento à medida que as ondas são refletidas pelas partículas em relação ao plano criado pelo movimento das partículas com a interceção do laser, sendo possível determinar a velocidade direcional. Exemplo do equipamento pela Figura 21.

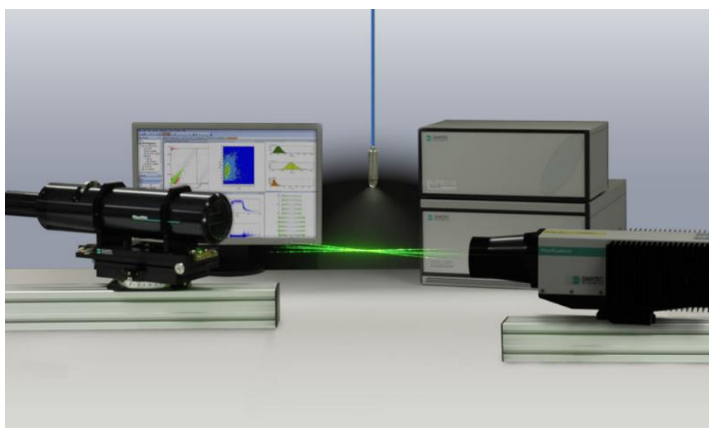


Figura 21-Anemómetro laser doppler, Dantec Dynamics A/S

#### 2.4.2.1.3 Velocímetro por imagem da partícula

O método do velocímetro da imagem da partícula é usado na medição da velocidade direcional do fluido, ao alocar partículas pequenas que irão seguir o escoamento e iluminá-lo, sendo possível visualizá-las. Através disto consegue-se conhecer o movimento das partículas, e assim determinar o campo de velocidades do escoamento. Uma vantagem deste método é a possibilidade de testar domínios 2D e 3D de velocidade no escoamento. Exemplo do método pela Figura 22.

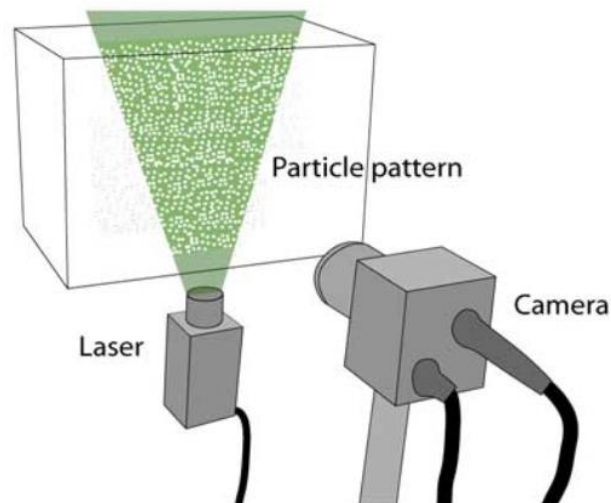


Figura 22-Velocímetro por imagem de partículas, William Thielicke and Eize J. Stamhuis

#### 2.4.2.1.4 Tubos de Pitot

O Tubo de Pitot é um equipamento de medição ao se conectar a manómetros. É capaz de determinar a pressão total ou a pressão estática em condutas ou *plenums*. Tal como é possível observar na Figura 23, o EM apresenta dois furos com propósitos diferentes, um conhecer a pressão estática e outro para a pressão total. Através da diferença da pressão total com a pressão estática, conhece-se a pressão dinâmica, sendo possível determinar a velocidade direcional do escoamento no ponto de medição. (Alnor, 2014)

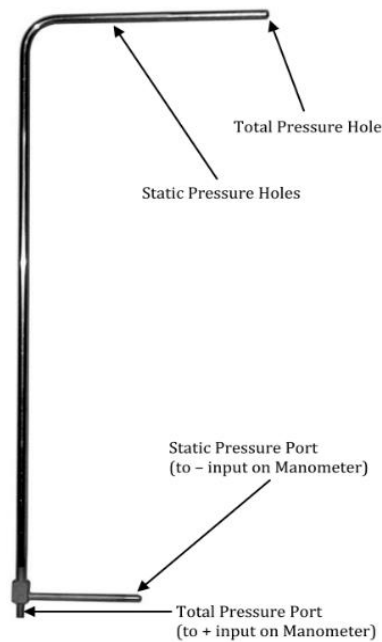


Figura 23-Tubo de Pitot, Alnor, 2014

#### 2.4.2.1.5 Medição por Ultrassom

O dispositivo de medição ultrassônica é baseado no efeito de “Doppler”: o movimento relativo em relação a um recetor e a uma fonte influencia a frequência de percepção que a fonte realmente apresenta (Paula, 2007). Através desta medição, é possível monitorizar o caudal, tanto a variar com tempo e sem variar com o tempo, a uma larga escala de velocidades, porque se obtém resultados de mudanças de velocidade do escoamento no seu percurso. Este método apresenta vantagem quando a velocidade direcional é baixa e quando é realizada para registos de volume de ar variável em novos edifícios, com o objetivo de baixa utilização de energia para ventiladores. Exemplo do EM na Figura 24.



Figura 24-Caudalímetro ultrassônico, PCE Instruments UK

#### 2.4.2.1.6 Medição de escoamento em condutas

O método da medição de escoamento em condutas é usado para determinar a velocidade média direcional e é aconselhado para condutas devido à sua raramente uniforme secção ao longo da conduta. A velocidade é baixa perto das paredes da conduta e máxima no centro.

De modo a determinar a velocidade num plano transversal, é necessário um conjunto de pontos que resultem de velocidades satisfatórias. A sua localização é representada pela Figura 25.

A turbulência causada pelo ventilador, cotovelos, transições e conduta com curto comprimento, resulta numa menor precisão. Assim, deve-se aumentar o número de pontos de medição. Uma desvantagem deste método é não conseguir capturar as rápidas variações do caudal com uma avaliação, considerando-se um caudal constante em relação ao tempo.

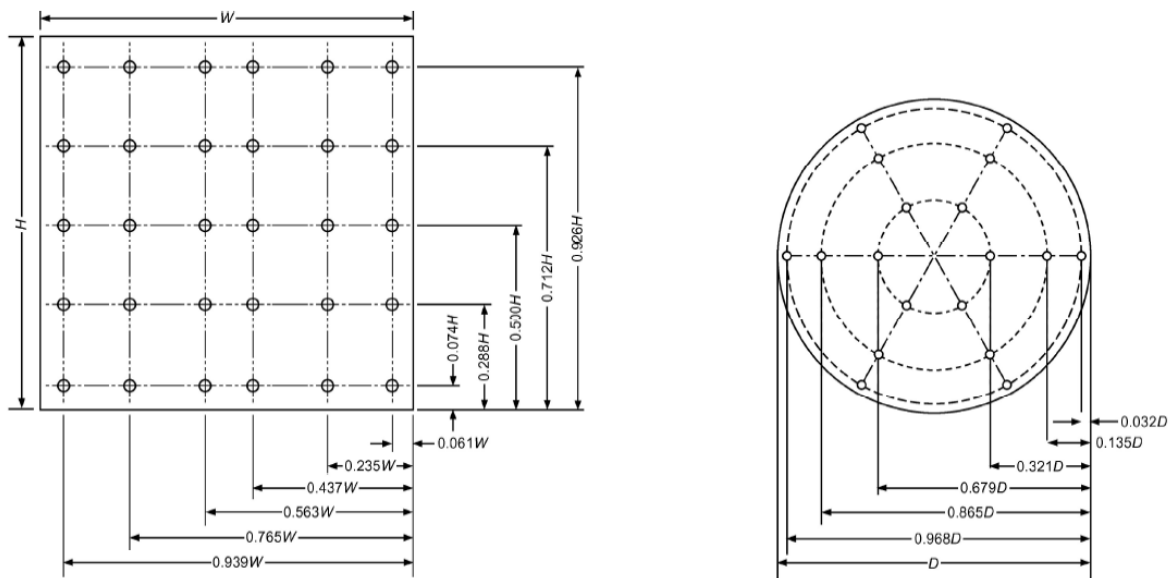


Figura 25-Measuring Points for Rectangular and Round Duct Traverse, ASHAE 2017

#### 2.4.2.1.7 Medição do escoamento através de um capuz de captura

Neste EM para se realizar a medição é necessário colocar-se em grelhas ou difusores. O equipamento é constituído por um conjunto de tubos dispostos na secção do capuz de captura com orifícios a jusante e a montante da grelha/difusor. A sua medição é realizada por um sensor em cada tubo que mede o diferencial de pressão do escoamento a jusante e a montante obtendo a velocidade direcional, posteriormente o caudal. Exemplo do EM na Figura 26.



Figura 26-Model 6200D, TSI

#### 2.4.2.1.8 Manómetro

Este EM é utilizado para medir baixas pressões, como pressão estática e diferenças de pressões, entre filtros ou espaços. Ao ser conectado a um tubo de Pitot é possível determinar a pressão dinâmica em condutas. (Alnor, 2014)

Exemplo do EM na Figura 27.



Figura 27-Micromanómetro digital,  
Alnor, 2014

Tabela 3-Metodos de medição da velocidade do ar, ASHRAE 2017

<b>Equipamentos de medição</b>	<b>Aplicações</b>	<b>Escala, m/s</b>	<b>Precisão, %</b>	<b>Limitações</b>
<b>Marcadores solidos e gasosos</b>	A baixa velocidades de ar em quartos; altamente direcional.	0,025 a 0,25	10 a 20	Difícil de usar; Útil na detecção de movimento de ar.
<b>Anemómetro “Deflecting vane”</b>	A velocidades em quartos, lojas; direcional.	0,15 to 120	5	Verificação periódica através de calibrações.
<b>Anemómetro hélice</b>	A velocidade moderada em condutas e quartos; ligeiramente direcional.	0,5 a 120	2 a 5	Variação de velocidade com o espaço e o tempo-erros significativos.
<b>Anemómetro termico</b>	A baixa velocidade; direcional e omnidirecional. A velocidade em regime transitório e turbulento.	0,05 a 50	2 a 10	Necessidade de calibração frequentemente e relativamente caras.
<b>Tubo Pitot</b>	Medição por pontos de velocidades em condutas.	0.9 a 50 com micromanómetros; 3 a 50 com “draft gages”; 50 mais com manómetros.	2 a 5	A precisão diminui na sua escala mais baixa e alta, devido à raiz quadrada da relação da velocidade e da pressão dinâmica. Também afetado pelo alinhamento da direção do fluxo.

<b>Tudo de impacto</b>	A altas velocidades, tubos pequenos e aonde a direção do ar varia.	0,6 a 50 com micromanómetros; 3 a 50 com “draft gages”; 50 mais com manómetros.	2 a 5	A precisão depende da constância da pressão estática pela secção.
<b>Anemómetro de copos</b>	Meteorológico.	60 mais	2 a 5	Baixa precisão quando a velocidade é inferior a 2.5 m/s.
<b>Ultrassom</b>	Grandes instrumentos: meteorológicos.	0,005 a 30	1 a 2	Alto custo.
<b>Velocímetro de laser dopper</b>	Calibração de instrumentos de medição da velocidade de ar.	0,005 a 30	1 a 3	Custo alto e limitação do LDV para aplicações em laboratórios.
<b>Velocímetro por imagem da partícula</b>	Domínio completo (2D, 3D) da velocidade em quartos e lojas.	0,005 a 30	10	Custo alto e limitações complexas na medição em laboratórios. Requer adição de fluido com partículas e uma janela para a visualização.
<b>Manómetro</b>	Entrada de ventiladores centrífugos em cone.	3 a 50	$\pm 5 a > 40$ de leitura	A performance depende da qualidade e escala do diferencial da pressão do emissor. Suscetível a erros de medição causados pela colocação do cone e obstruções na entrada e pela mudança de temperatura.

<b>Velocímetro vórtices</b>	Na conexão de condutas, condutas e sensores na entrada dos ventiladores.	2 a 30	$\pm 2.5 a > 10$ de leitura	Alto custo por cada ponto de detecção. Grande tamanho. Precisão questionável a baixa temperatura.
<b>Anemómetro térmico analógico elétrico</b>	Na conexão de condutas ou em sensores de condutas.	0.25 a 25	$\pm 2 a > 40$ de leitura	Erros matemáticos causados por curtos circuitos, quando na presença de sinais não lineares. Deve ser calibrado regularmente para neutralizar possíveis desvios.
<b>Força de arrasto</b>	Condutas com escoamento.	0.1 a 50	$\pm 2$	Os métodos " <i>Piezoelectric</i> " ou " <i>strain-gage</i> " são usados para perceber a variação dinâmica da " <i>drag force</i> ".
<b>Anemómetro térmico dispersão</b>	Em sensores na entrada de ventiladores e em condutas, na purga dos sensores de velocidade.	0.1 a 50	$\pm 2 a > 10$ de leitura	Custo aumenta consoante o número de conjunto de sensores. Verificação de precisão apenas a $-29^{\circ}\text{C}$ . Não é adequado para ambientes quentes e abrasivos.
<b>Anemómetro térmico utilizando sensores termorresistência</b>	Em sensores de condutas e conexões das mesmas; aço inoxidável e platina RTDs ( <i>resistance temperature detectors</i> ) tem capacidade para ambientes industriais.	0.5 a 90	$\pm 1 a > 20$ de leitura	Requere longas condutas e tubagens. Sensível à condição da colocação. Bastante experiência.

### 2.4.3 Medição do caudal de ar

#### 2.4.3.1 Direto

Este método é usado. Normalmente, em calibração de outros dispositivos, sendo o seu uso mais predestinado para caudais baixos ou intermédios e para uma alta precisão. Estes sistemas normalmente são grandes e lentos, considerando-se dispositivos primários.

#### 2.4.3.2 Indireto

A **medição de thomas** é usada em laboratórios para medir altos caudais com baixa queda de pressão. Através de aquecedores elétricos, o gás é aquecido e utiliza dois termómetros para medir a subida de temperatura.

A **velocidade transversal** utiliza um tubo Pitot ou outros equipamentos de medição na medição de caudal dentro do seu domínio ou em calibração de grandes bocais. O método pode ser imprevisível a baixas velocidades e inconcessível quando existem vários testes a decorrer.

Perda de pressão entre elementos é outro método de medição que utiliza na base a previsão do domínio, nomeadamente, ao atravessar equipamentos quentes ou frios, como ventiladores e resistências.

#### 2.4.3.3 Tubo de Venturi, tubo convergente e orifício calibrado

Nestes 3 aparelhos assume-se um fluido incompressível, líquido ou gás, com um perfil de velocidade uniforme, baixa fricção e que não sofra efeitos de gravidade, o princípio da energia, através da equação (2 de *Bernoulli's*, entre a jusante e a montante do elemento e assim descobrir os diferenciais de pressão, podendo retirar a velocidade, e com a conservação da massa retirar o caudal.

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gh = \text{constante} \quad (2)$$

P- Pressão, (Pa);

V- Velocidade, (m/s);

P- Massa volúmica, (kg/m<sup>3</sup>);

h- Altura, (m);

g- Aceleração gravítica, (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>).

Na Figura 29 está ilustrado tubo de *venturi*, e na Figura 28 está ilustrado um bocal, bem como a pressão do fluido ao longo do tubo. Na equação (3 é enunciada de forma simplificada a obtenção do caudal do escoamento ao atravessar os bocais e o tubo de *venturi*.

$$w = CA_2 \sqrt{\frac{2\rho(p_1 - p_2)}{1 - \beta^4}} \tag{3}$$

w- Caudal mássico, (kg/s);

A-Área, (m<sup>2</sup>);

P- Massa volúmica, (kg/m<sup>3</sup>);

P- Pressão, (Pa);

$\beta$ - Rácio entre o diâmetro da zona teste e o diâmetro da entrada do tubo de venturi, ou no caso da medição realizada em bocais é referente ao diâmetro da conduta.

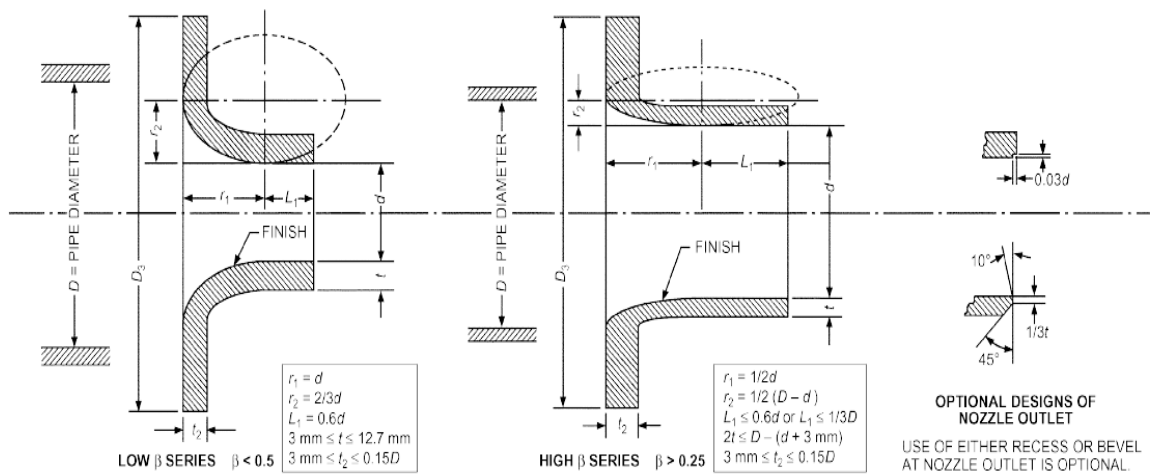


Figura 28-Dimensões da ASME long-radius escoamento em bocal, ASHRAE 2017

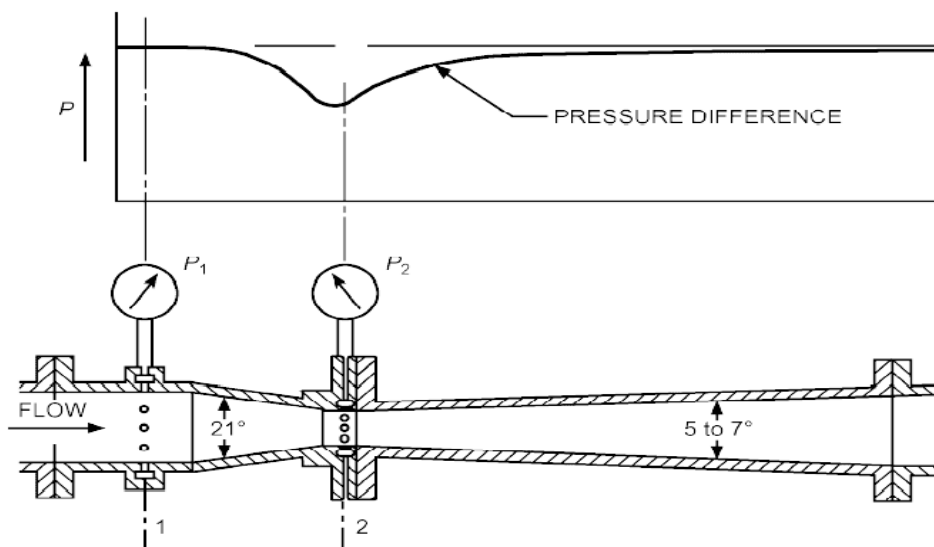


Figura 29-Typical herschel-Type venturi Meter, ASHAE 2017

Na Figura 30 está ilustrado um orifício calibrado, onde é possível obter o seu caudal através da equação (4, sendo K uma constante obtida através da combinação do número de *Reynolds* e a sua geometria.

$$Q = KA_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (4)$$

Q- Caudal volúmico, (m<sup>3</sup>/s);

A-Área, (m<sup>2</sup>);

P- Massa volúmica, (kg/m<sup>3</sup>);

P- Pressão, (Pa).

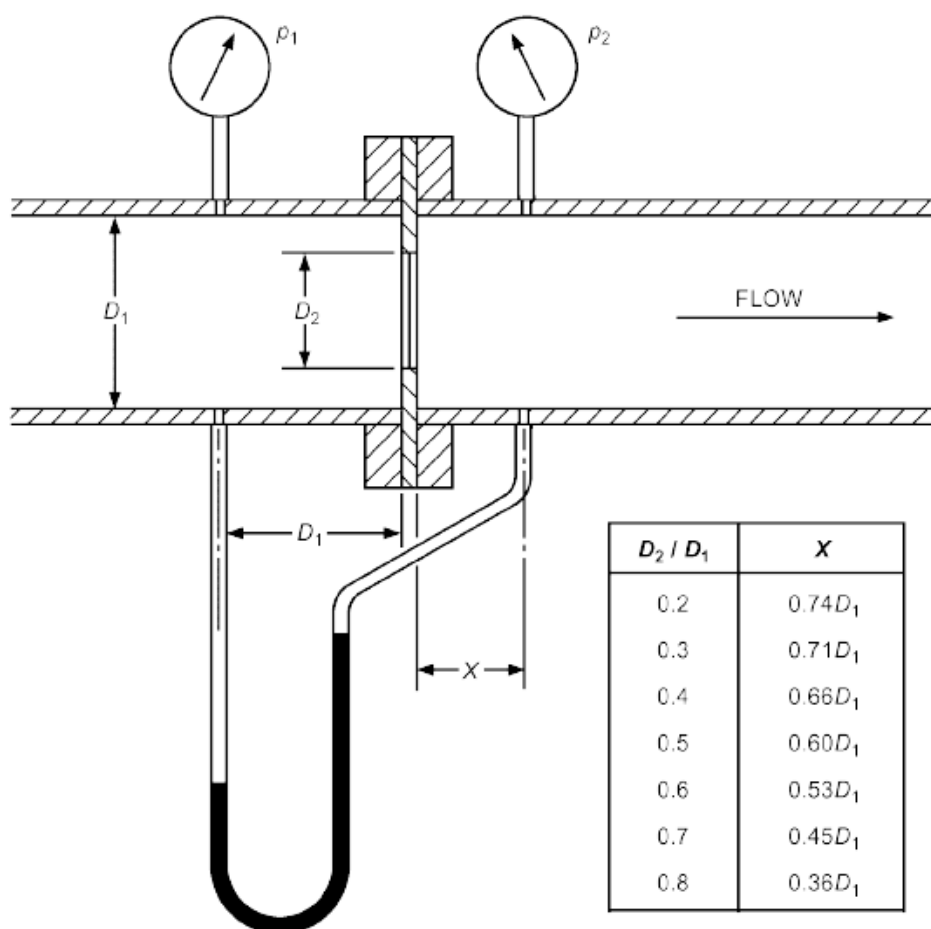


Figura 30-Orifício calibrado, ASHRAE 2017

#### 2.4.3.4 Caudalímetro de área variável (rotâmetro)

O caudalímetro de área variável da Figura 31 consiste numa boia, a qual se pode mover verticalmente num tubo transparente. O fluido entra por um canal estreito em baixo e desloca-se para cima, passando pelo anel formado pelo interior do tubo e o exterior da boia. Dependendo do caudal, o fluido assume diferentes posições no tubo. A escala no tubo mostra a localização do fluido e o seu caudal. A posição da boia é equilibrada entre a gravidade e a força de arrasto.

A calibração do tubo é necessária porque o escoamento para cada fluido é proporcional à área. De modo a reduzir a dependência da calibração do caudal mássico na massa volúmica do fluido, pode-se variar o material da boia.

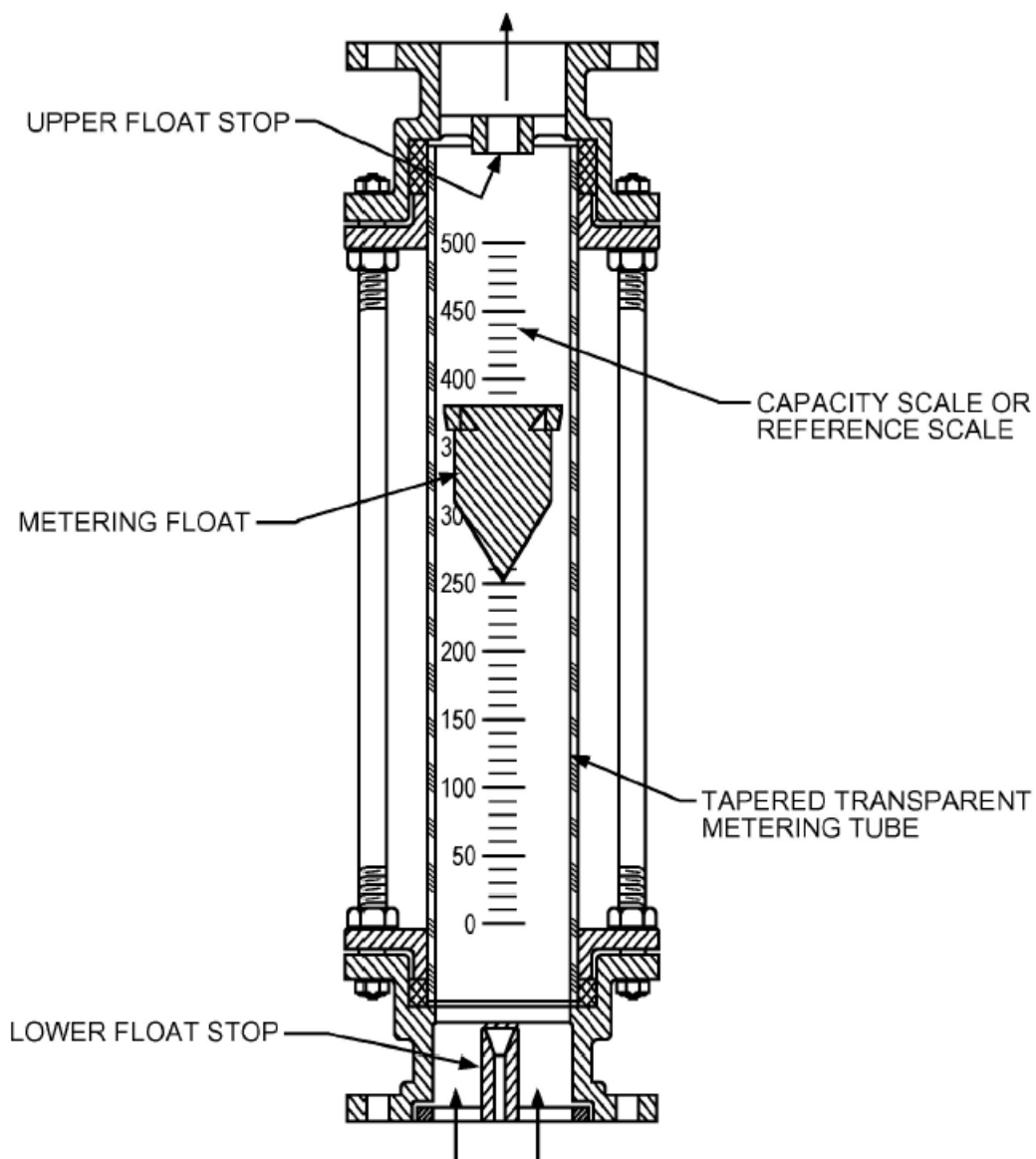


Figura 31-Variable-Area Flowmeter, ASHAE 2017

#### 2.4.3.5 Caudalímetros pelo efeito de “Coriolis”

O líquido escoar através de um sensor vibrante dentro do EM e, de modo a se conhecer a frequência da vibração, é colocada uma bobina eletromagnética perto do sensor vibrante. O líquido entra no tubo vibrante (frequência oscilatória) no qual exerce uma força, pelo efeito “Coriolis”, criando uma alteração da frequência do tubo. O caudal mássico é determinado pela alteração dessa frequência. Exemplo do EM na Figura 32. Caso haja uma mudança do fluido dentro do tubo, corresponde uma mudança da frequência, e através desta mudança é possível determinar a massa volúmica do fluido.



Figura 32-CoriolisMaster FCB300 caudalímetro, BHB

#### 2.4.3.6 Caudalímetro deslocamento positivo

À medida que o compartimento se preenche, cria-se uma rotação para que o fluido se distancie do medidor. O caudal volumétrico é equivalente ao produto do volume do compartimento pelo número de compartimentos e pela velocidade de rotação do motor menos as fugas, representado pela Figura 33. É normal a existência de um contador mecânico de forma a calibrar o caudal total. (Positive Displacement ( PD ) Flow Meters, 2015)

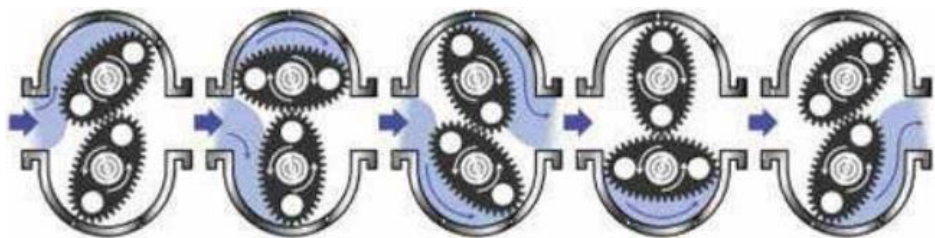


Figura 33-Caudalímetro deslocamento positivo, OMEGA

### 2.4.3.7 Caudalímetro turbina

Neste EM, o escoamento ao atravessar o tubo, exerce uma força nas pás da turbina. Criando-se um momento na turbina, no qual a velocidade linear do escoamento será convertida em velocidade angular. O que se pretende obter a partir da turbina é uma velocidade de rotação proporcional à velocidade do fluido, obtendo-se assim um caudal volumétrico. Exemplo na do EM Figura 34.



Figura 34-Caudalímetro turbina, CONTIMETRA

### 2.4.3.8 Caudalímetros eletromagnéticos

Este EM opera segundo o princípio da lei de “Faraday” (uma força eletromotriz induzida num circuito, que equivale à negatividade da taxa da variação do fluxo magnético através do circuito).

Este EM considera o fluido como um condutor elétrico, o que provoca uma variação na massa volúmica de fluxo eletromagnético. Através dessa variação é possível determinar o caudal volumétrico, pelo princípio da lei de “Faraday” como se pode ver na Figura 35. É necessário que exista uma condutividade elétrica mínima para a realização do método, a qual grande parte dos líquidos usado em AVAC possuem.

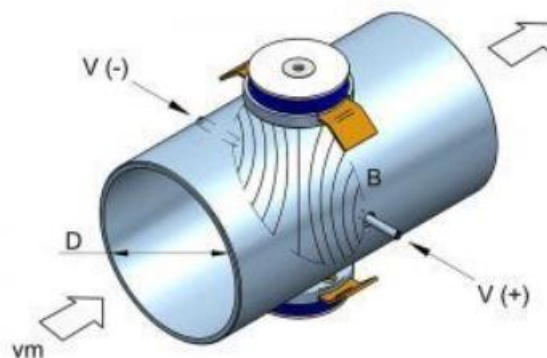


Figura 35-Princípio de funcionamento do caudalímetro eletromagnético, Tecfluid

### 2.4.3.9 Caudalímetro Vortex

Este método utiliza como base o efeito de geração de vórtices, onde o escoamento na sua deslocação irá encontrar um obstáculo sólido, que provoca vórtices. Os sensores irão ler os vórtices criados e irão criar um sinal de frequência sendo assim possível determinar o caudal. Exemplo do EM na Figura 36.



Figura 36-Caudalímetro vórtice, NONCON

### 2.4.3.10 Gasómetro

Neste procedimento são necessários dois reservatórios, um dentro do outro, onde o que está de fora possui uma abertura em cima e o que está dentro uma abertura em baixo. O volume entre os dois reservatório deve ser preenchido com óleo vedante. O peso do reservatório interior é contrabalançado por uma roldana e por pesos de forma a controlar o volume desejado de gás.(Pedro, Oliveira, & Martins, 2017)

Exemplo do EM na Figura 37.

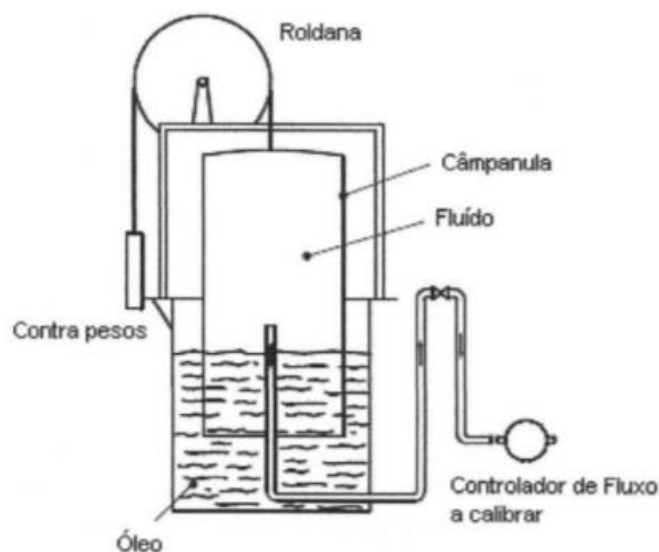


Figura 37-Esquema de um Gasómetro, João Pedro Pereira de Oliveira de Castro Martins

Tabela 4-Caudalímetros volumétricos e mássicos, ASHRAE 2017

Equipamentos de medição	Aplicação	Escala	Precisão, %	Limitações
<b>Sistema de medição da diferença de pressão por um orifício</b>	Escoamento através de tubagens, condutas e “ <i>plenums</i> ” para todos os fluídos.	Número de Reynolds superior a 5000.	1 a 5	Coeficiente de descarga e precisão são influenciados pela instalação.
<b>Sistema de medição da diferença de pressão por um bocal</b>	Escoamento através de tubagens, condutas e “ <i>plenums</i> ” para todos os fluídos.	Número de Reynolds superior a 5000.	0.5 a 2	Coeficiente de descarga e precisão são influenciados pela instalação.
<b>Sistema de medição da diferença de pressão por um tubo de Venturi</b>	Escoamento através de tubagens, condutas e “ <i>plenums</i> ” para todos os fluídos.	Número de Reynolds superior a 5000.	0.5 a 2	Coeficiente de descarga e precisão são influenciados pela instalação.
<b>Escoamento volumétrico</b>	Líquidos ou gases; usado para calibrar caudalímetros.	Qualquer.	0.1 a 0.5	O sistema é lento e volumoso.
<b>Rotâmetro</b>	Líquidos ou gases.	Qualquer.	0.5 a 5	Deve ser calibrado para cada fluido medido.
<b>Coriolis</b>	Mássico ou volumétrico; massa volúmica variável para líquidos ou gases.	A partir de 907 kg/s.	0.05 a 1.5	-
<b>Deslocamento positivo</b>	Pequeno caudal volumétrico com grande perda de pressão.	A partir de 500 L/s dependendo do tipo.	0.1 a 2, dependendo do tipo.	Maior parte do tipo, requer uma calibração para cada fluido medido.
<b>Gasômetro</b>	Usado para calibrar caudalímetros; Duração pequena de teste.	Fluido é limitado pelo tamanho do recipiente.	0.5 a 1	-

<b>Medição de thomas</b>	Configuração elaborada por necessidade para uma boa precisão.	Qualquer.	1	Velocidade uniforme; normalmente usado em gases.
<b>Elemento de resistência ao escoamento e diferencial de pressão</b>	Usado para verificar quando o sistema conter uma resistência.	Baixo limite ajustado para queda de pressão.	1 a 5	Leitura secundária depende da precisão de calibração
<b>Caudalímetros turbina</b>	Líquidos ou gases.	Qualquer.	0.25 a 2	Usa um visor eletrônico.
<b>Um ou vários pontos de Instrumento de medição da velocidade num ponto específico do escoamento</b>	Principalmente para instalação de sistemas de tratamento de ar sem fornecimento específico de ar para a medição.	Baixo limite configurado pela precisão do velocímetro.	2 a 10	Precisão depende da uniformidade do fluido e complexidade do fluido ao atravessar
<b>Entrada de calor e variação de temperatura com o vapor</b>	Verifica valores em testes de calor e frio.	Qualquer.	1 a 3	-
<b>Sistema de medição da diferença de pressão através de um escoamento laminar</b>	Mede caudal volumétrico em gás e líquidos; razão aproximadamente linear com a queda de pressão; simples e fácil de usar.	50 mm <sup>3</sup> /s a 1 m <sup>3</sup> /s.	1	O fluido não pode conter sujidade, óleo e ou outras impurezas que podem afetar a medição da “plug” ou a calibração.
<b>Caudalímetros eletromagnéticos</b>	Mede fluido eletronicamente condutíveis; não cria resistência à passagem do fluido.	0.006 a 600 L/s.	1	A condutividade do fluido deve ser superior a 5 µmho/cm
<b>Caudalímetro Vórtices</b>	Mede líquidos ou gases em tubos;	Número de Reynolds superior a 10 <sup>4</sup> .	1	-

#### 2.4.4 Calibração

##### Definição

*“Operação que estabelece, numa primeira etapa e sob condições especificadas, uma relação entre os **valores** e as **incertezas de medição** fornecidos por **padrões** e as **indicações** correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando à obtenção de um **resultado de medição** a partir de uma indicação.”*(IPQ, 2009)

Através dos valores obtidos pela calibração, pode-se estimar uma grandeza de valores do objeto em estudo. É necessário que se conheça um valor verdadeiro, de modo a designar uma escala de valores para os quais se utiliza os equipamentos de medição mais corretos. O valor verdadeiro depende de processo para processo e é obtido através de padrões de referência. Estes devem ser calibrados com base em vários padrões, de tal modo a obter uma grandeza de valores o mais confiáveis possível, denominado padrão primário.

De um modo geral, a calibração é usada para detetar erros associados ao Equipamento de Medição e, de modo consequente, apresentar medidas de melhorias a fazer perante os valores obtidos (Sousa, 2011).

Um padrão ou padrão primário é:

*“**Padrão** estabelecido com auxílio de um **procedimento de medição primário** ou criado como um artefacto, escolhido por convenção.”*(IPQ, 2009)

##### 2.4.4.1 Métodos de calibração de equipamentos de medição de caudal

Segundo (Furness, 2001) existe muitos métodos de calibrar um caudalímetro a gás. Apesar de não o ser explorado neste relatório, deve-se calibrar equipamentos de medição de velocidade, utilizando como exemplo o Túnel de vento disponível no LAC.

###### 2.4.4.1.1 Medição volumétrica

É necessário um tanque calibrado, e utilizando o conceito *“Standing start and stop”*, permitindo que o fluido passe pelo equipamento de medição por um intervalo de tempo já estabelecido, enquanto se compara o valor total com o valor de referência. Um equipamento utilizado neste processo é o gasómetro.

###### 2.4.4.1.2 Medição mássica

A calibração mássica utiliza o mesmo conceito que o volumétrico, mas mede o caudal mássico. Esta medição não é recomendada quando se possui gases com baixa massa volúmica. A Figura 38 apresenta um exemplo de uma calibração gravimétrica.

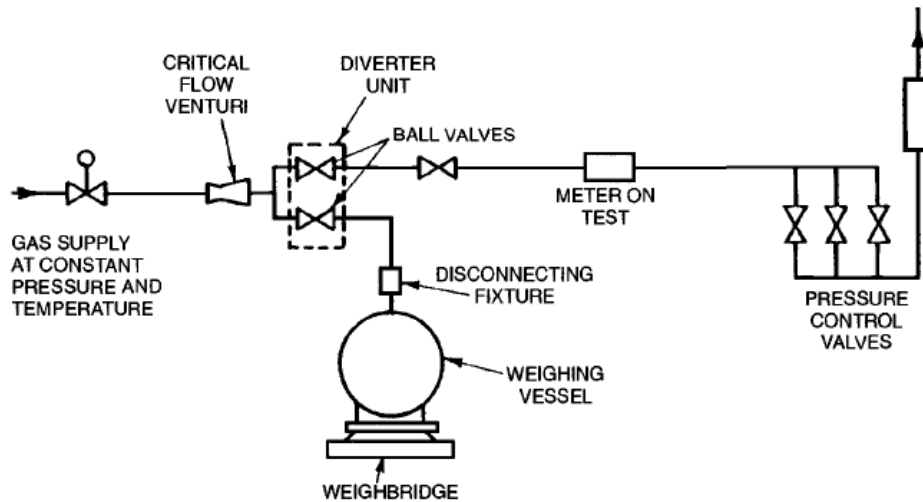


Figura 38-Calibração gravimétrica, utilizando bocais de medição, *flow measurement handbook*

#### 2.4.4.1.3 Deslocamento de gás

Neste método é necessário um pistão, onde um líquido com uma pressão já definida é colocado num orifício e no outro local está um gás, o volume e tempo que o êmbolo demora a chegar a um certo local é registado.

Um problema desta calibração é a troca de um dispositivo (pistão), que em vez de medir o caudal líquido por volume mede em caudal gasoso por volume. O gás é controlado pela temperatura e pressão que é utilizado para calibrar o equipamento de medição.

#### 2.4.4.1.4 Método pvT

Este método deduz que o gás a ser calibrado obedece à relação pressão  $p$ , volume específico  $v$  e temperatura  $T$ . Esta relação é ilustrada pela equação (5).

$$pv = RT \quad (5)$$

$p$ - Pressão, (Pa);

$v$ - Volume específico, ( $m^3/kg$ );

$R$ - Constante do gás, ( $Pa.m^3/ K. kg$ );

$T$ - Temperatura, (K).

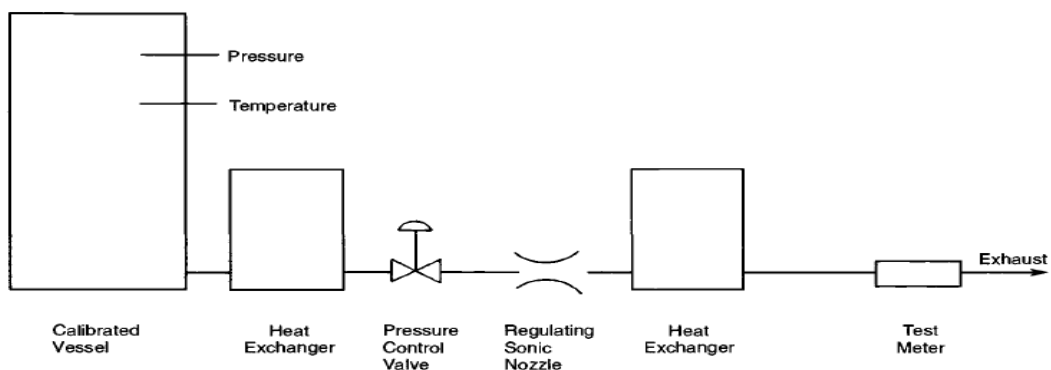


Figura 39-Exemplo de prático de uma calibração pelo método pvT, *flow measurement handbook*

A Figura 39 apresenta um exemplo pratico do método utilizado, onde é possível ver o controlo efetuado de temperatura pressão e regulação de caudal.

#### 2.4.4.1.5 Método de bolhas de sabão utilizando uma bureta

O gás depois de atravessar o equipamento de medição e as bolhas de sabão entra na bureta. É possível ver o volume na bureta do gás. Exemplo na Figura 40.

Este método é recomendado para caudais baixos.

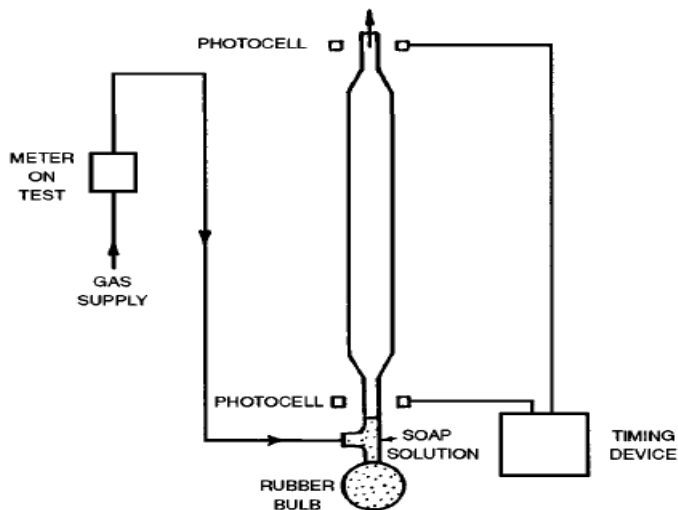


Figura 40-Exemplo do método de calibração de bolhas de sabão utilizando uma bureta, *flow measurement handbook*

#### 2.4.4.1.6 Bocais críticos

A velocidade do gás cresce até encontrar o local onde a área de secção é menor, atingindo a velocidade do som, e diminuindo logo de seguida. Através da conservação da energia é possível relacionar a variação da velocidade no bocal com a perda de pressão. Na Figura 41 é possível reparar alguns detalhes na instalação de bocais de venturi.

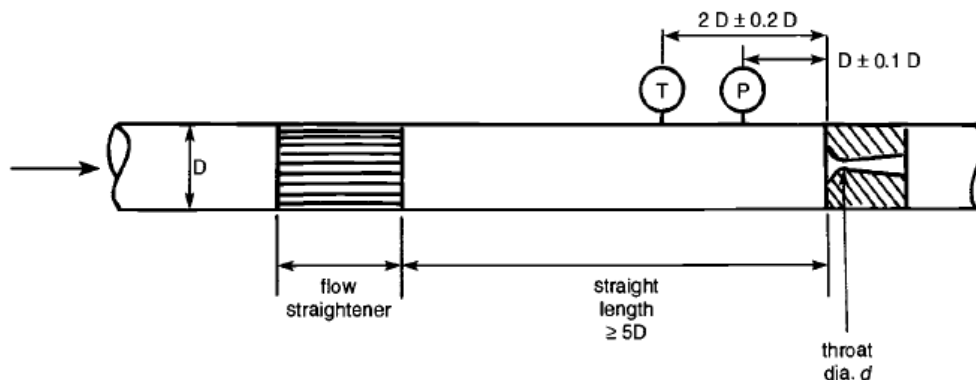


Figura 41-Instalação de bocais de venturi, *flow measurement handbook*

#### 2.4.4.1.7 Calibração com caudalímetro mestre

Neste método é utilizado um caudalímetro em série com o equipamento de medição.

A instalação onde se realizará o teste é cumprir alguns aspetos:

- Escoamento estável;
- Escoamento completamente desenvolvido a montante do caudalímetro mestre e do equipamento a ser calibrado;
- Escala da grandeza corretamente utilizada;
- Instalação que permite uma boa colocação dos equipamentos;
- Sistemas e sensores com alta qualidade, de forma a comparar os resultados dos equipamentos de medição.

##### 2.4.4.1.7.1 Calibração de caudalímetro segundo a norma AMCA 210-99

A norma (AMCA 210-99 & 51-99, 1999) providencia regulamentos para testar ventiladores, sobre condições laboratoriais. Os parâmetros a determinar para assegurar o funcionamento destes equipamentos por este documento são:

- Medição do caudal de ar;
- Pressão;
- Potência;
- Massa volúmica do ar;
- Velocidade de rotação;
- Eficiência.

Na determinação do caudal de ar, é pedido que a medição seja realizada pela pressão dinâmica obtida pelo tubo de Pitot ou pela pressão diferencial do escoamento ao atravessar os bocais. Este mesmo documento apresenta algumas condições que se deve ter em atenção antes da realização da medição, como por exemplo:

- Para medição ser realizada pelo tubo de Pitot, deve ser deliberado pelo ventilador um escoamento de ar com uma velocidade igual ou superior a 12 m/s no local da realização da medição. No entanto, ao se utilizar os bocais é necessária uma velocidade de, pelo menos, 14 m/s no local da realização da medição.
- Quando a conduta é conectada à entrada do bocal, o rácio do diâmetro do bocal em relação ao da conduta não pode exceder 0.5;
- O bocal apresenta-se calibrado, quando este apresenta o  $L=0,6D$  e respeita as especificações de construção da Figura 50.

#### 2.4.4.2 Validação de métodos de medição/calibração

Com base no guia da aplicação norma (ISO/IEC 17025, 2018), quando se realiza um ensaio/calibração conforme um método normalizado, não desobriga a evidência de documentos que comprovem a sua implementação e que respeitem as características de desempenho do mesmo.

Aconselha-se que a validação de métodos seja ajustada caso a caso, tornando-se gradualmente mais exigente e exaustiva para os cenários indicados:

- 1) Método normalizado;

- 2) Uma menor modificação da técnica, do EM ou do tipo de produto a ensaiar no que se refere à norma existente; as alterações não podem pressupor ambiguidade sobre a equivalência técnica de resultados;
- 3) Uma menor modificação da técnica, do EM ou do tipo de produto a ensaiar no que se refere à norma existente; as alterações podem pressupor ambiguidade sobre a equivalência técnica de resultados;
- 4) Método fundamentado em técnicas de ensaio/calibração ou medição conhecidas, da qual a sua aplicação ao ensaio/calibração pretendida provenha descrita em literatura científica, norma de ensaio/calibração inexistente;
- 5) Método fundamentado em técnicas de ensaio/calibração ou medição conhecidas, da qual a sua aplicação ao ensaio/calibração pretendida não provenha descrita em literatura científica;
- 6) Método fundamentado em técnicas de ensaio/calibração ou medição inovadora, da qual a sua aplicação ao ensaio/calibração pretendida não provenha descrita em literatura científica.

De modo a realizar a validação do método, é recomendado realizar alguns dos estudos abaixo.

Avaliação indireta:

- Que características correspondem ao objetivo do ensaio/calibração;
- Investigação de fontes de erros e interferências para traçar a sua finalidade e dominar a sua execução;
- Investigação de otimização das condições operatórias e/ou robustez do método para permitir uma melhoria e harmonia da sua execução;
- Investigação dos parâmetros característicos do método para compreender a qualidade dos seus resultados.

Avaliação direta, por comparação com referências aceites:

- Analogia com métodos normalizados ou de referência;
- Analogia com padrões ou materiais de referência certificados;
- Analogia de métodos entre laboratórios.

De modo a escolher o melhor método, deve-se primeiro fazer uma avaliação indireta para compreender as características a tirar da medição e depois realizar uma avaliação direta para que a metrologia seja realizada segundo referências acreditadas.

#### 2.4.5 Rastreabilidade

##### Definição

*“Propriedade de um **resultado de medição** pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência através de uma cadeia ininterrupta e documentada de **calibrações**, cada uma contribuindo para a **incerteza de medição**.” (IPQ, 2009)*

A calibração é realizada com base num padrão de referência, tendo estas melhores qualidades metrológicas que o EM como mostra a Figura 42. O Padrão tem como fundamento o valor verdadeiro convencional da grandeza. O valor verdadeiro será danificado, em fidelidade, ao ser passado de padrão a padrão. De modo geral, é importante conhecer o caminho que o valor verdadeiro passou até se encontrar no valor obtido. (Sousa, 2011)

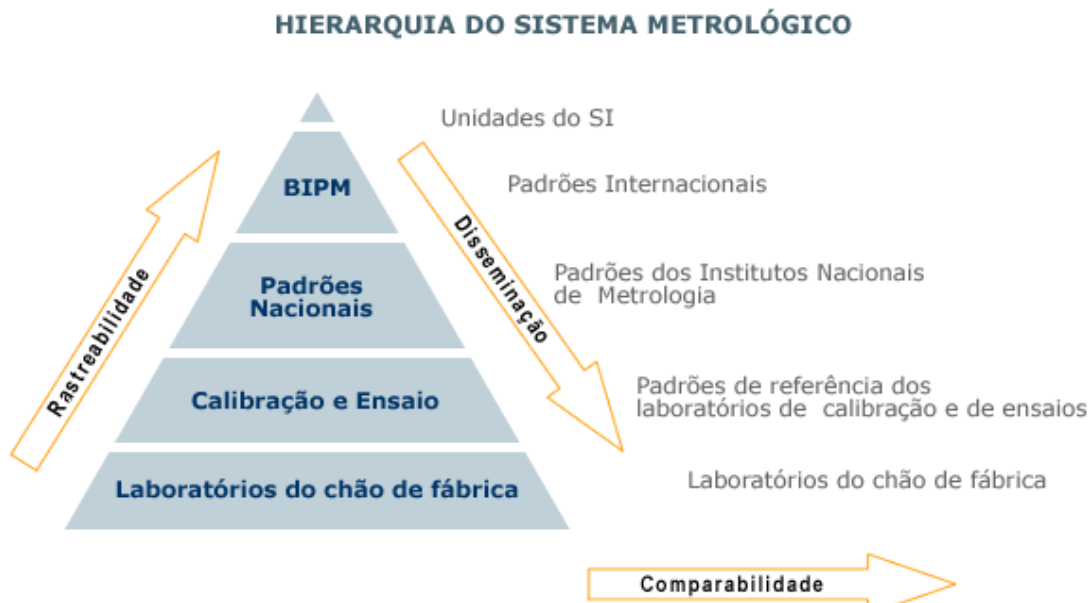


Figura 42-Hierarquia do sistema metrológico, Inmetro

Na presente Figura 42 é representada a hierarquia do sistema metrológico (HSM). A HSM é descrita pelo (IPQ, 2009), uma sucessão de calibrações a partir de uma referência até ao sistema de medição final, na qual a solução de cada calibração deriva da solução da calibração anterior. A incerteza de medição inevitavelmente aumenta no decorrer da sequência de calibrações, por vezes, a referência utilizada pode ser obtida através de um padrão, realização prática, ou um procedimento de medição. Caso um padrão seja comparado a outro ou a outros, pode-se exprimir como uma calibração se posteriormente ela for usada para corrigir o valor e a incerteza de medição outorgados a um dos padrões.

#### 2.4.6 Confirmação metrológica

A confirmação metrológica é um agregado de procedimentos necessários para garantir a conformidade de um EM, caso a exigência de utilização pretendida tiver sido demonstrada e documentada, pode também albergar a calibração e a verificação do EM. (NP EN ISO 10012, 2005)

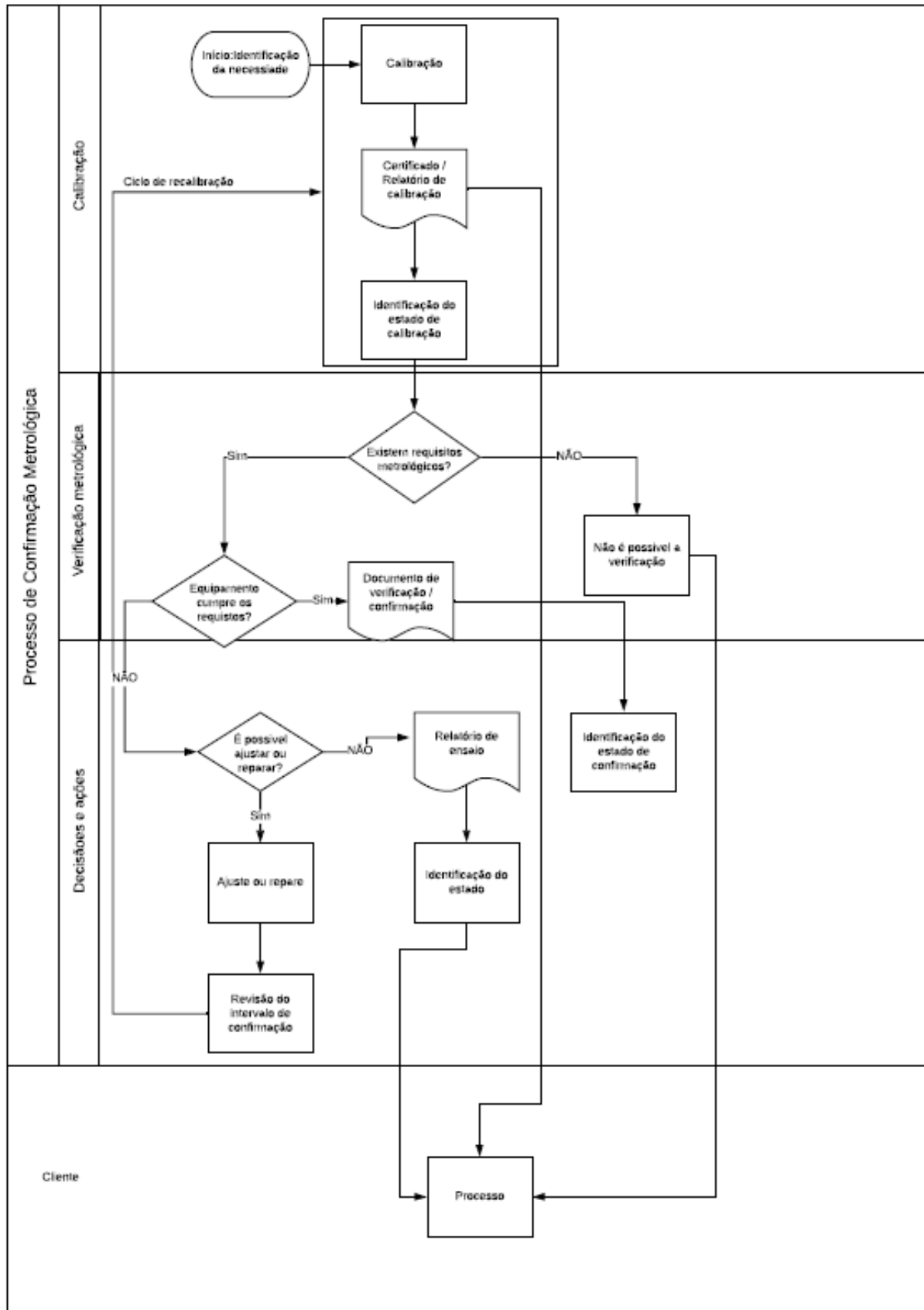


Figura 43-Processo de confirmação metrológica de equipamento de medição, ISO 10012, 2005



À dúvida existente na medição é designada por **incerteza**. Não confundido com **erro de medição**, cujo representa a distância entre o valor medido e o valor verdadeiro (nem sempre conhecido). (Cabral, 2004)

#### 2.4.7.1 Erros de medição

É possível classificar os tipos de erros, segundo a influência nas medições:

1. Erro grosseiro- Associados à distração e falta de experiência do executante na realização da medição. Fácil de reconhecer e eliminar;
2. Erro sistemático- Associado à contínua repetição no erro durante todo ensaio, como por exemplo erro de leitura. Não podem ser eliminados, apenas reduzido ou corrigido;
3. Erro aleatório- Associado a processos físicos e naturais, como por exemplo fórmulas/modelos teóricos. Inconcebível de eliminar ou corrigir, apenas de reduzir.

#### 2.4.7.2 Importância em laboratório

Os laboratórios responsáveis por medir e calibrar equipamentos, serão julgados pela certeza que apresentam na medição realizada. Assim é necessário conhecer os parâmetros de incerteza e reduzir o seu impacto que gera na certeza indicada. Exemplos de parâmetros de incerteza:

- Certificado de calibração;
- Especificação do fabricante;
- Uso de aparelhos elétricos analógicos;
- Norma;
- Uso de aparelhos digitais;
- Medição da humidade do ar com um psicrométrico;
- Medição da temperatura, com um termómetro de resistência de platina do tipo "Pt-100" (Tabela 5).

Tabela 5-Explicação do tipo de resistência "Pt-100"

$\Omega$	$^{\circ}\text{C}$
100,00	0
107,79	20
115,54	40
123,24	60
130,90	80
138,51	100

### 2.4.7.3 Tolerância em instrumentos de medição

Esta tolerância corresponde ao limite esperado para os erros gerados nas medições realizadas pelos equipamentos de medição. Esses limites são estipulados por normas ou pelo fabricante do equipamento, em catálogos ou folhas de especificações.

A partir desses limites é possível verificar se o instrumento ainda se encontra aceitável, pois o valor nominal  $\pm$  tolerância indica os erros máximos admissíveis. Fora destes limites é possível afirmar que o equipamento não se encontra em bom estado pelo fabricante.

Caso a medição seja efetuada por um equipamento de medição analógico, existe uma forma normalizada de mostrar esses limites. O contrário não acontece para os equipamentos digitais, onde o próprio fabricante a apresenta um modo único de mostrar essas particularidades do aparelho.

Levando em conta a maioria dos aparelhos, é possível indicar duas formas gerais. A primeira é retratada pela equação (6) onde o  $N_d$  é obtido pela multiplicação do número indicado na especificação pela resolução da escala do equipamento, a segunda é apresentada pela equação (7).

$$\mathbf{T = \pm(E_1 + N_d)} \quad (6)$$

T = Tolerância;

$E_1$  = Erro de leitura, (%);

$N_d$  = Número de dígitos menos significativos.

$$\mathbf{T = \pm(E_1 + E_{fe})} \quad (7)$$

T = Tolerância;

$E_1$  = Erro de leitura, (%);

$E_{fe}$  = Erro de fim da escala, (%).

## 2.4.8 Requisitos técnicos

### 2.4.8.1 Competência técnica

Em relação à competência do pessoal, a norma (ISO/IEC 17025, 2018) refere que a competência do mesmo deve estar devidamente documentada juntamente com as suas qualificações mínimas exigidas para os diferentes cargos/postos de trabalho no laboratório. O responsável técnico deve possuir experiência profissional, é recomendado que possua licenciatura ou bacharelato nas áreas em atividade.



# DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Considerações e Procedimento de ensaio
- 3.2 Medição do caudal pela velocidade
- 3.3 Realização ensaio

## 3 DESENVOLVIMENTO

### 3.1 Considerações e Procedimento de ensaio

Este tópico descreve todas as considerações tidas para a criação da instalação de calibração de equipamentos de medição de caudal de ar, com o objetivo de calibrar esses equipamentos para uma gama/escala de caudal de ar associada à ventilação.

#### 3.1.1 Caudal de ar

##### 3.1.1.1 Escala da grandeza

Neste projeto deve-se ter conhecimento de valores de referência de caudal volumétrico de ar mínimo e máximo.

No caso estudado não existem valores que indiquem o volume dos espaços a ventilar, então estimou-se o caudal mínimo, tendo como base (NP 1037-2, 2002), e considerando-se uma instalação sanitária com extração de um caudal de ar constante. A partir dessa informação retirou-se o valor de quatro renovações por hora ou 12,5 l/s, equivalente a 45 m<sup>3</sup>/h. Por outro lado, o caudal máximo foi retirado através de uma recolha de vários modelos de UTA de grandes marcas de instalação, ao qual se estimou o valor de 5000 m<sup>3</sup>/h.

##### 3.1.1.2 Métodos e equipamentos utilizados

Neste trabalho realizou-se um ensaio de medição de caudal, em que o método utilizado foi o capuz de medição de caudal, e o equipamento o balómetro. Outro método possível seria a medição de caudal em condutas, com o equipamento “*Airflow traverse Station*”. Ambos os métodos, segundo a (ASHRAE handbook, 2017), estão alocados na medição de velocidade, devido ao uso da velocidade em determinados pontos predefinidos. Deste modo, considerou-se que, apesar do método referenciado ser em função da velocidade, tem o intuito de determinação do caudal.

##### 3.1.1.3 Balómetro

Este equipamento possui uma resposta em metros e tem um indicador fácil de ler, dispondo de uma grande escala de leitura, o que faz dele um equipamento ideal para os engenheiros, profissionais de medição e calibração de ventilação, como é observável na Tabela 6.(TSI, 2019)

É um equipamento elétrico com múltiplos objetivos em relação ao caudal de ar, primariamente usado na eficiência ao retirar o caudal diretamente em grelhas e difusores, sem utilizar programas de integração da velocidade.

Tabela 6-Especificações do balómetro, TSI

Especificações	
Escala	42 a 4250 m <sup>3</sup> /h
Incerteza	±3% de leitura e ±12 m <sup>3</sup> /h para caudais <85 m <sup>3</sup> /h
Unidades	m <sup>3</sup> /h
Resolução	1 m <sup>3</sup> /h

### 3.1.1.3.1 Montagem do equipamento

A instalação do equipamento deve seguir os seguintes passos recomendado pela TSI:

1. Montagem do suporte do equipamento de medição;
2. Ligação do EM com o suporte;
3. Ajuste do EM com a grelha/difusor.

### 3.1.1.4 Airflow Traverse Station

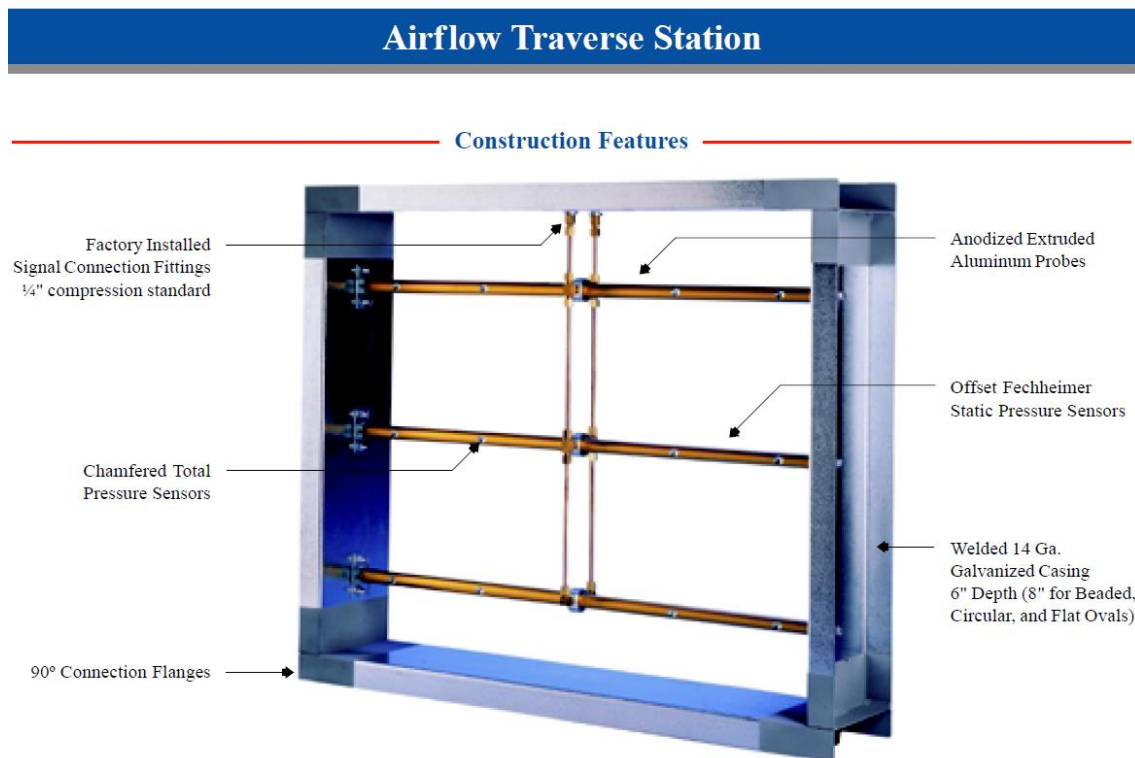


Figura 45-Airflow Traverse Station,The VOLU-probe/VS, AMACA

Na Figura 45 está representado o modelo construtivo de uma “Airflow traverse Station”, no qual se nota o designer “Fechheimer” da disposição dos sensores da pressão estática em alumínio anodizado e pequenos furos alocados para a determinação da pressão total “chamfered”. O suporte é galvanizado e apresenta um auxílio para o encaixe da conduta/UTA. (air movement and control association international inc, 2019)

Este aparelho de medição permite que o fluxo de ar não seja restringido à volta e entre os sensores de pressão, minimizando-se a resistência ao escoamento.

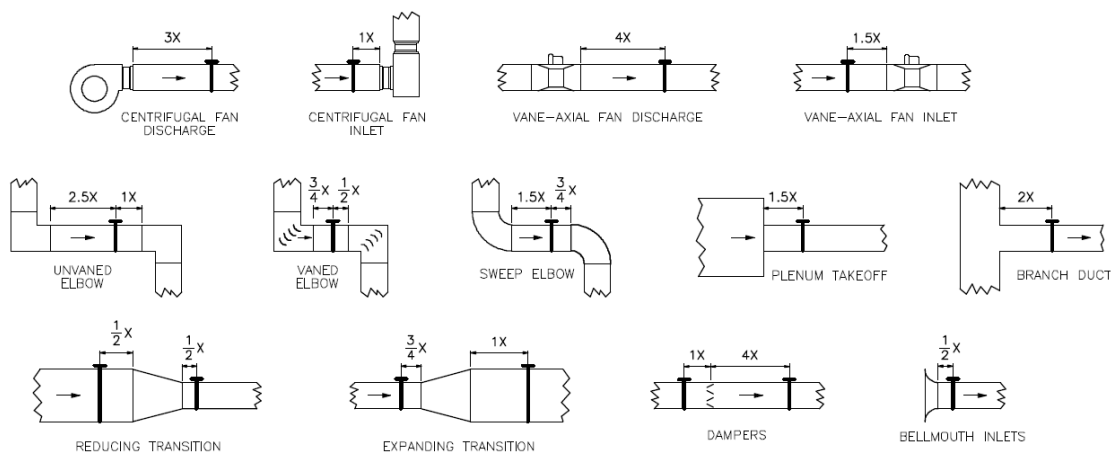


Figura 46-Instalação da VOLU-probe/VS, VOLU-probe/VS, AMACA

As localizações ilustradas na Figura 46 não são ideais, mas representam as distâncias recomendadas pela (air movement and control association international inc, 2019) para que o escoamento seja turbulento, para cada situação definida na Figura 46. Caso a secção da conduta apresente forma diferente, o valor de X varia. Para tal, recorre-se à equação (8) e (9).

$$X = D \quad (8)$$

D= Diâmetro da conduta circular, (u.m).

$$X = \frac{2(H * W)}{H + W} \quad (9)$$

H=Altura da secção retangular, (u.m);

W=Largura da secção retangular, (u.m);

X=Distância recomendada, (u.m).

A (ASHRAE handbook, 2017) recomenda que exista uma distância de 7,5 diâmetros hidráulicos a montante, e a jusante de 3 diâmetros hidráulicos de todos os acessórios que podem causar perturbação no escoamento.

#### 3.1.1.4.1 Localização

Este EM permite a medição de uma grande escala de caudal, podendo medir uma gama superior à escala pretendida. Idealmente colocado depois de uma UTA ou ventilador.

#### 3.1.1.4.2 Montagem do equipamento

A “air station” apresenta 4 tipos de sensores possíveis que melhor satisfazem as necessidades de medição, que são:

1. Montagem externa;
2. Montagem interna;
3. Sensor removível;
4. Sensor auto suportável.

#### 3.1.1.4.3 Quantidade de sensores

O número de sensores necessários depende da configuração da conduta, expressa na Tabela 7. A disposição dos sensores deve ser semelhante à da Figura 47.

Tabela 7-Quantidade mínima de sensores, AMCA

Altura, mm	Quantidade de sensores
203,2 a 304,8	1
>304,8 a 762	2
>762 a 1371,6	3

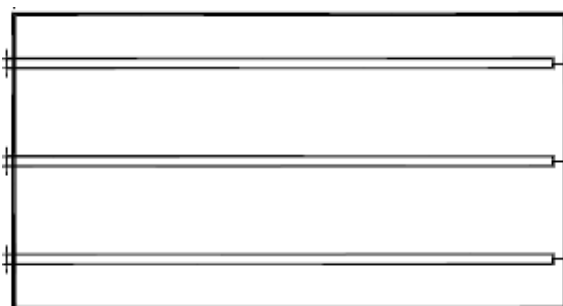


Figura 47-Disposição dos sensores, AMCA

Como a instalação possui 610 por 610 mm, então a quantidade mínima de sensores utilizáveis é 2.

#### 3.1.2 Calibração

O Método escolhido teve como principal objetivo obter a maior precisão para a gama de caudal utilizado. Também se teve em consideração que o local escolhido (túnel de vento) é utilizado frequentemente na realização de testes de vários equipamentos de medição, como também o possível orçamento que seria dado na realização deste estudo.

O método considerado, tendo em conta os pontos já referidos, foi a calibração com caudalímetro de referência. Para tal, é necessário cumprir com os pontos referidos em 2.4.4.1.7.

### 3.1.2.1 *Escoamento estável*

Na realização do teste, considerou-se que as propriedades do ar se irão manter constantes, pois muitos equipamentos de medição são afetados por escoamentos instáveis, criando erros de leitura.

### 3.1.2.2 *Escoamento completamente desenvolvido*

O propósito de se querer um escoamento completamente desenvolvido é conhecer o perfil de velocidades do escoamento dentro do tubo, em que a velocidade paralela à direção do escoamento será afetada com a variação do raio do tubo. A Figura 48 mostra o desenvolvimento do escoamento, até que este seja completo.

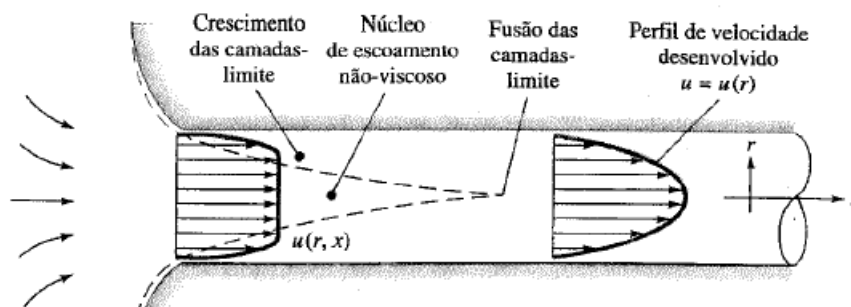


Figura 48-Desenvolvimento de um escoamento num tubo, Frank White

O número de Reynolds, dado pela equação (10) é o único parâmetro que afeta o comprimento inicial da conduta depois de um acessório, tanto para escoamento laminar (uniforme e estável) como turbulento (instável e variável). (Frank White, 2009)

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (10)$$

Re- Número de Reynolds;

$\rho$ - Massa volúmica, ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

d- Diâmetro, (m);

$\mu$ - Viscosidade dinâmica, (Pa.s);

v-Velocidade, (m/s).

Devido ao facto do estudo se realizar em caudal volumétrico e não em velocidade do escoamento, utilizou-se a relação da equação (11) de forma a converter velocidade em caudal volumétrico, obtendo-se a equação (12).

$$v = \frac{Q}{A} \quad (11)$$

v-Velocidade, (m/s);  
A-Área da secção, (m<sup>2</sup>);  
Q-Caudal volumétrico, (m<sup>3</sup>/s).

$$Re = \frac{4\rho Q}{\mu d \pi} \quad (12)$$

Re- Número de Reynolds;  
ρ- Massa volúmica, (kg/m<sup>3</sup>);  
d- Diâmetro, (m);  
μ- Viscosidade dinâmica, (Pa.s);  
v-Velocidade, (m/s);  
π-Constante de Pi.

O comprimento inicial mínimo, ao qual o escoamento é completamente desenvolvido para escoamento laminar, é dado pela equação (13), e para escoamento turbulento é dado pela equação (14), considerando que as paredes da conduta de secção circular apresentam baixa rugosidade.

$$\frac{L_e}{d} = 0,06Re \quad (13)$$

L<sub>e</sub>- Comprimento mínimo inicial, (m);  
d- Diâmetro, (m);  
Re- Número de Reynolds.

$$\frac{L_e}{d} = 4,4Re^{\frac{1}{6}} \quad (14)$$

L<sub>e</sub>- Comprimento mínimo inicial, (m);  
d- Diâmetro, (m);  
Re- Número de Reynolds.

No caso da secção da conduta não possuir secção circular, é possível converter outras secções, como quadrada ou retangular, que possivelmente serão utilizadas nos testes de medição. Com base na seguinte equação (15) é possível saber o diâmetro hidráulico que resulta das medidas de uma secção quadrada e retangular.

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (15)$$

$D_h$ - Diâmetro hidráulico, (m)

A- Área da secção, (m<sup>2</sup>);

P- Perímetro da secção, (m).

### 3.1.2.3 Caudalímetro de referência

Na escolha do caudalímetro de referência teve-se em consideração os mesmos pontos referidos em 3.1.2. Chegou-se à conclusão de que a melhor opção é o Sistema de medição da diferença de pressão por um conjunto de bocais.

Como explicado em 2.4.3.3, a medição do caudal pelos bocais provem da diferença de pressão devido à variação do diâmetro, por onde atravessa o escoamento, medida por manómetros colocados antes e depois dos mesmos. A Figura 49 apresenta um exemplo de um bocal concebido segundo a (AMCA 210-99 & 51-99, 1999).



Figura 49-Bocais, Hyfluid Technology

É necessário que se tenha cuidado na calibração e instalação do bocal. O INEGI, está equipado com os meios de fabrico e maquinação, irá construir de raiz o bocal utilizado no procedimento.

#### 3.1.2.3.1 Dimensionamento

Segundo (ASHRAE 41.2, 2005), a velocidade em bocais deve compreendido entre 15 a 35 m/s, para uma instalação de medição de caudal. Assim, utilizou-se a equação (11 de modo a criar o menor número de bocais (diminuindo o investimento) que consiga medir a escala de caudal de valor pretendido (45 a 5000 m<sup>3</sup>/h), bem como respeitar a relação de velocidades. É possível reparar na Tabela 8 os valores de Caudal e velocidade para cada diâmetro proposto, bem como o número de bocais utilizado para cada um deles. Obtendo na sua totalidade um conjunto de 11 bocais, estes quando combinados conseguem medir na sua totalidade 5066,33 m<sup>3</sup>/h.

Tabela 8-Escolha de diâmetros

Número de bocais	Q (m <sup>3</sup> )	V (m/s)	D (m)
3	45	15,5	0,032
	101,34	35	
3	101,3	15,6	0,048
	228	35	
3	228	15,1	0,073
	532	35	
2	532	15	0,112
	1241,33	35	

Utilizou-se como base (AMCA 210-99 & 51-99, 1999), de forma a conhecer as variações de pressão associadas a cada bocal para exemplo de caudal, através dos seguintes passos:

- 1) Na equação (16) que relaciona o caudal e o diâmetro com a variação de pressão, para conhecer os parâmetros que se têm de determinar;

$$Q = \sum (CA) Y \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (16)$$

Q- Caudal volumétrico, (m<sup>3</sup>/s);

C- Coeficiente de descarga;

A- Área da secção da garganta do bocal, (m<sup>2</sup>);

Y- Coeficiente de expansão;

$\rho$ - Massa volúmica, (kg/m<sup>3</sup>);

$\Delta P$ - Variação da pressão, (Pa).

Para determinação da variação de pressão é preciso conhecer os seguintes parâmetros:

- O caudal utilizado está entre 45 a 5000 m<sup>3</sup>/h;
- Área da secção da garganta do bocal;
- Coeficiente de expansão;
- Massa volúmica, valor base de 1,2 kg/m<sup>3</sup> segundo a norma;
- Coeficiente de descarga.

- 2) A determinação do coeficiente de descarga é com base na equação (17), que só é viável quando a equação (18), recomendada pela norma, é cumprida;

$$C = 0,9986 - \frac{7,006}{\sqrt{Re}} + \frac{134,6}{Re} \quad (17)$$

C- Coeficiente de descarga;

Re- Número de Reynolds;

O Re é determinado pela equação (12).

$$\frac{L}{D} = 0,6 \quad (18)$$

L- Comprimento do bocal, (m);

D- Diâmetro do bocal, (m).

- 3) A determinação do coeficiente de expansão é calculado com base na equação, que segundo a norma é uma simplificação utilizada com boa precisão para o ar.

$$Y = 1 - (0,584 + 0,71\beta^4)(1 - \alpha) \quad (19)$$

Y- Coeficiente de expansão;

$\alpha$ - Rácio entre pressão absoluta à saída e à entrada do bocal;

$\beta$ - Rácio entre o diâmetro da garganta do bocal e do diâmetro da conduta.

O valor de  $\alpha$  é obtido a partir da equação (19), considerando-se que a temperatura do ar é de 20°C e a constante dos gases é 278,1 J/kg.K.

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta P}{\rho R(t + 273,15)} \quad (20)$$

$\alpha$ - Rácio entre pressão absoluta à saída e à entrada do bocal;

$\Delta P$ - Variação da pressão, (Pa);

$\rho$ - Massa volúmica, (kg/m<sup>3</sup>);

R- Constante dos gases, (J/Kg.K);

t- Temperatura do ar, (°C).

O valor de  $\beta$  é obtido pela equação (21).

$$\beta = \frac{D}{D_c} \quad (21)$$

$\beta$ - Rácio entre o diâmetro da garganta do bocal e do diâmetro da conduta;

D- Diâmetro do bocal, (m);

D<sub>c</sub>- Diâmetro ou diâmetro hidráulico da conduta, (m).

Como o coeficiente de expansão depende da variação de pressão entre a entrada e a saída do bocal, a obtenção do  $\Delta P$  realizou-se através da ferramenta “solver” no Excel. É possível observar na Tabela 9 para cada bocal e caudal, a sua  $\Delta P$ , bem como os seus coeficientes associados a essa mesma queda de pressão. Não foi efetuado o cálculo para combinações de bocais com o mesmo diâmetro, pois os valores obtidos serão exatamente iguais aos valores obtidos ( $\Delta P$ ) se utilizasse apenas um bocal, com base na equação (16). Efetuou-se para o mesmo método de cálculo, mas agora combinando

bocais com diferentes diâmetros, de forma a alvejar o caudal máximo de 5066,3 m<sup>3</sup>/h, obtendo-se um valor muito parecido tanto de coeficientes como de  $\Delta P$  das restantes combinações.

Tabela 9-Variação da pressão e seus coeficientes associados para cada bocal

Bocais	Q (m <sup>3</sup> /h)	D (m)	V (m/s)	Re	C	$\beta$	Y	$\Delta p$ (Pa)
1	45,0	0,032	15,54	32942	0,96	0,032	0,999	156,2
1	101,3	0,032	34,99	74157	0,97	0,032	0,996	779,8
1	101,3	0,048	15,55	49438	0,97	0,048	0,999	154,5
1	228,0	0,048	35,00	111272	0,98	0,048	0,996	773,6
1	228,0	0,073	15,13	73165	0,97	0,073	0,999	144,9
1	532,0	0,073	35,31	170718	0,98	0,073	0,996	781,6
1	532,0	0,112	15,00	111272	0,98	0,112	0,999	141,1
1	1241,0	0,112	34,99	259564	0,99	0,112	0,996	762,9
11	5066,3	-	142,85	1059659	0,99	0,112	0,996	771,3

A validação do método resultou da utilização do valor do  $\Delta P$  para o diâmetro definido e da determinação do caudal. Na equação (16), o valor que depende do caudal é o coeficiente de descarga, C. Utilizou-se um método iterativo, exemplificado pela norma, que se compreende pelos seguintes passos:

- 1) Arbitrio de um coeficiente de descarga (C<sub>e</sub>);
- 2) Determinação do Número de Reynolds pela equação (22) (desprezou-se a multiplicação do fator de energia E com o rácio dos diâmetros à quarta, devido ao mínimo impacto que possui na iteração);
- 3) Determinação do Novo coeficiente de descarga pela equação (17);
- 4) Cálculo do valor da diferença absoluta entre o novo e o antigo coeficiente de descarga;
- 5) Repetir o processo a partir do ponto 2 até que a diferença dos valores dos coeficientes de descarga seja menor que 0,001;
- 6) Verificação do valor do caudal obtido pela iteração e pelo método acima.

$$Re = \frac{CDY}{\mu} \sqrt{\frac{2\Delta P}{1 - E\beta^4}} \quad (22)$$

Re- Número de Reynolds;

C- Coeficiente de descarga;

D- Diâmetro do bocal, (m);

Y- Coeficiente de expansão;

$\mu$ -Viscosidade absoluta do ar, (Pa.s);

$\Delta P$ - Variação da pressão, (Pa);

E- Fator de energia;

$\beta$ - Rácio entre o diâmetro da garganta do bocal e do diâmetro da conduta.

É possível observar os valores obtidos pela validação do método na Tabela 10, acrescentando que estes valores provam que o método usado é de confiança, uma vez que existe um erro relativo, calculado pela equação (23), de 0%, para cada medição testada.

Tabela 10-Validação do método utilizado

Re	Y	ce	D6 (m)	c	$\Delta c$	Re2	C2	$\Delta c2$	Q2 (m <sup>3</sup> /h)	E <sub>f</sub>
<b>33828</b>	,999	,99	,032	,96	,0255	32956	,96	,0004	45,0	0%
<b>75324</b>	,996	,99	,032	,97	,0151	74172	,97	,0002	101,3	0%
<b>50468</b>	,999	,99	,048	,97	,0199	49453	,97	,0003	101,3	0%
<b>112544</b>	,996	,99	,048	,98	,0111	111283	,98	,0001	228,0	0%
<b>74326</b>	,999	,99	,073	,97	,0153	73178	,97	,0002	228,0	0%
<b>172034</b>	,996	,99	,073	,98	,0075	170730	,98	,0001	532,0	0%
<b>112544</b>	,999	,99	,112	,98	,0111	111284	,98	,0001	532,0	0%
<b>260785</b>	,996	,99	,112	,99	,0046	259572	,99	,0000	1241,0	0%

$$E_f = \frac{Q - Q_2}{Q} \quad (23)$$

E<sub>f</sub>- Erro relativo da validação do método, (%);

Q-Caudal pretendido, (m<sup>3</sup>/h);

Q<sub>2</sub>- Caudal obtido a partir da validação do método, (m<sup>3</sup>/h).

### 3.1.2.3.2 Restrições a cumprir segundo a AMCA 2010-99

Ao conhecer-se o diâmetro de cada bocal, a (AMCA 210-99 & 51-99, 1999) dita algumas restrições em relação à sua disposição na secção da instalação:

- Não deve estar localizado a menos de 1,5D entre o centro do bocal e a parede da instalação;
- Não deve estar localizado a menos 3D (diâmetro maior dos bocais a relacionar) entre o centro de cada bocal.

Além da restrição em relação à sua disposição, existe outro ponto a respeitar. Trata-se da fabricação do bocal, que deve seguir o exemplo da Figura 50, onde o valor de L= 0,6D e sua rugosidade não pode exceder o valor de 0,001D de pico a pico.

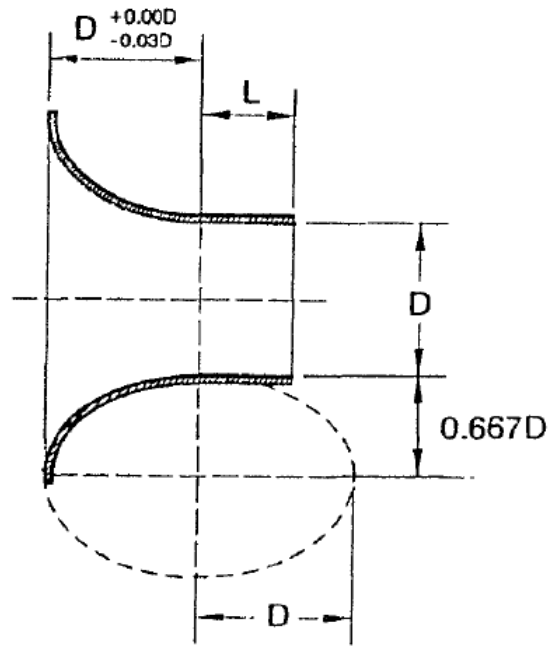


Figura 50- Estrutura do bocal, (AMCA 210-99 & 51-99, 1999)

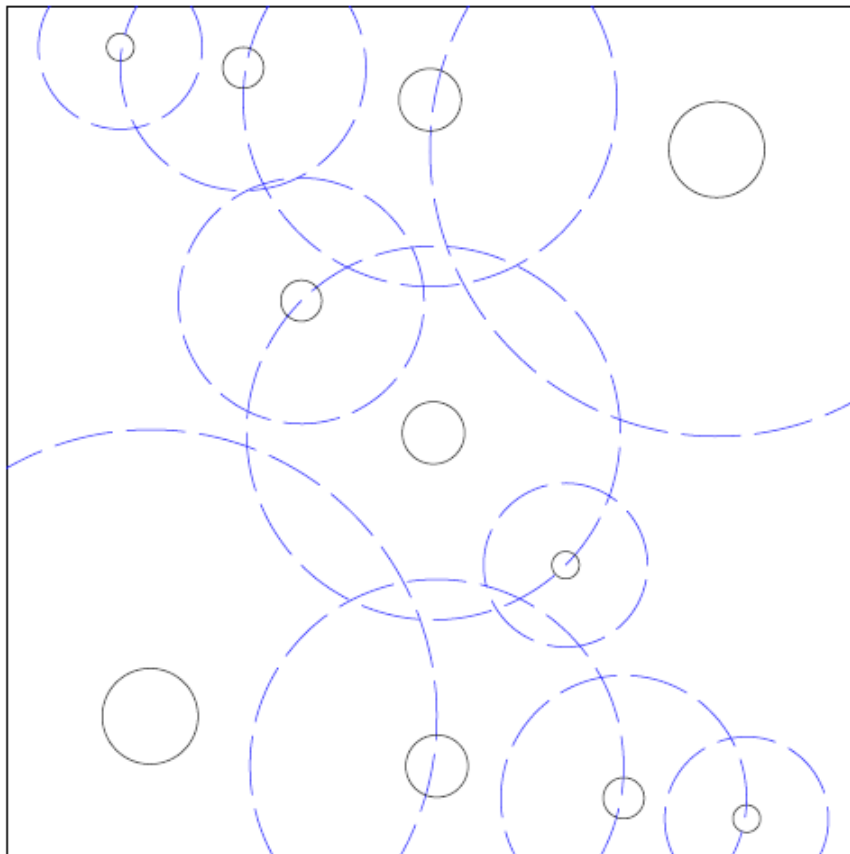


Figura 51-Cumprimentos de regras para a disposição 1

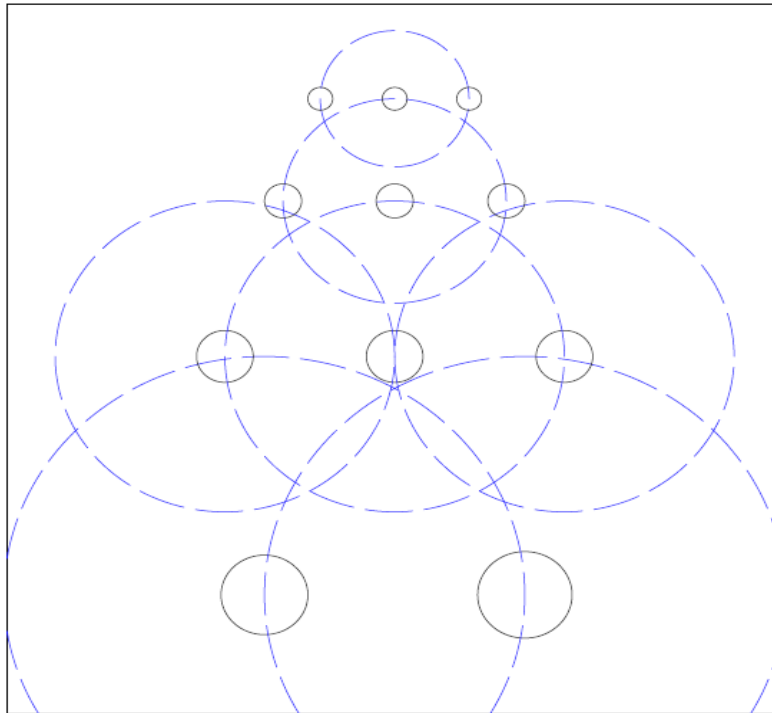


Figura 52- Cumprimentos de regras para a disposição 2

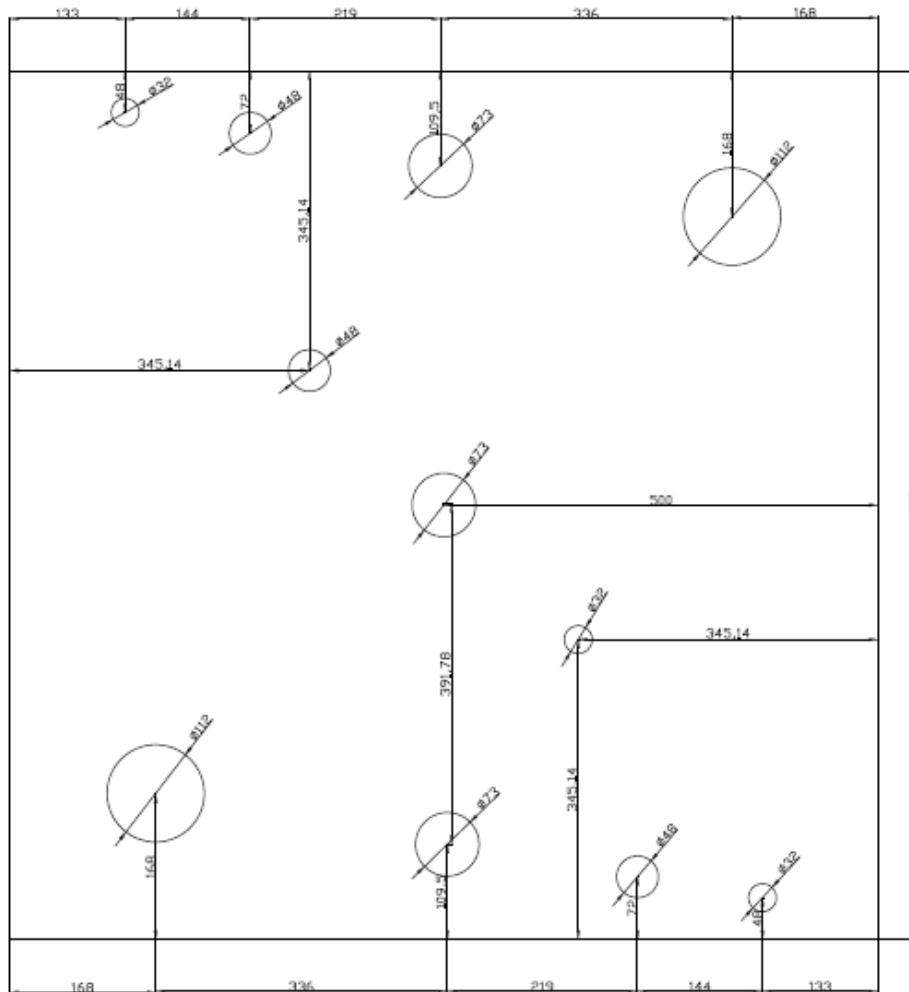


Figura 53-Disposição 1 cotada

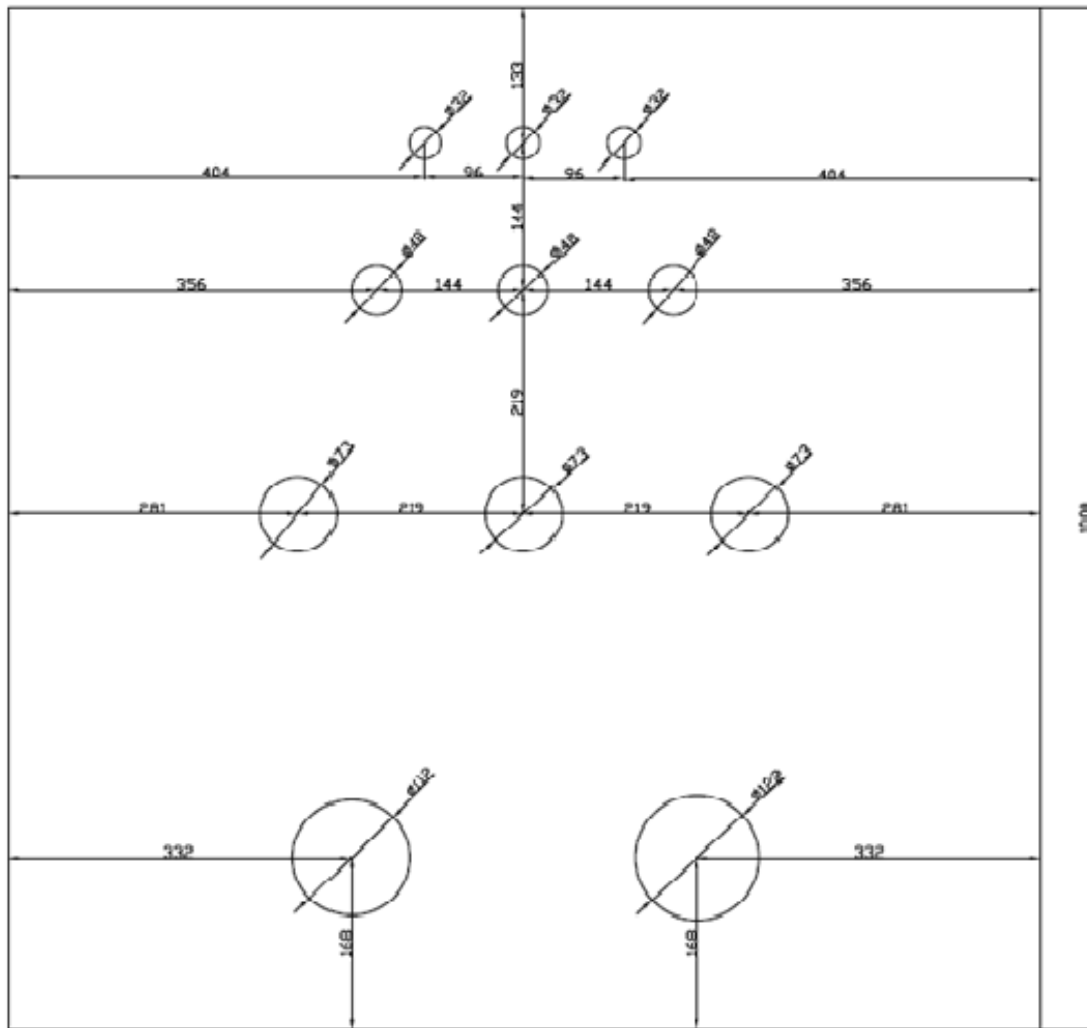


Figura 54-Disposição 2 cotada

Optou-se por criar duas disposições diferentes com o objetivo de conceber a melhor disposição possível. Tanto a Figura 51 como a Figura 52 apresentam, a tracejado preto com linha contínua, os bocais e secção da parede, enquanto que o tracejado com linha azul descontínua representa as distâncias a respeitar entre cada bocal.

A Figura 53 apresenta a primeira disposição, sendo esta uma disposição não tradicional, pois o seu objetivo é colocar alguns bocais em função de uma diagonal. Já a Figura 54 expõe uma disposição mais tradicional, apresentando uma simetria em relação a uma linha central da secção da parede. É possível criar mais disposições a partir do exemplo dado na Figura 54, ao rodar de  $90^\circ$  em  $90^\circ$  em relação ao centro da instalação.

A escolha será efetuada posteriormente pelo responsável do laboratório.

#### 3.1.2.4 Instalação para a calibração de equipamentos de medição de caudal de ar

O objetivo deste projeto é a criação de uma instalação própria para a calibração de equipamentos de medição de caudal de ar. Como o objetivo desta instalação é a sua versatilidade na realização de ensaios, decidiu-se a divisão da instalação em duas partes:

a parte de referência, onde é medido o caudal de referência; e a parte onde os equipamentos dos clientes são ensaiados/calibrados.

#### 3.1.2.4.1 Fontes e considerações no dimensionamento

A primeira parte é onde se encontra o caudalímetro de referência (bocais), e como tal deve garantir alguns requisitos para permitir o melhor uso dos mesmos. A medição em que se utilizou o tubo de *Pitot* foi realizada como sempre se efetuou no laboratório. Não é possível realizar um ensaio com os dois equipamentos, pois o local do plano de medição seria o mesmo, o que implica uma troca do equipamento em caso de necessidade.

Devido ao uso dos bocais, que originam uma formação de jatos, existem alguns requisitos, como por exemplo:

- Utilização de uma rede própria ("*Settling means*") para absorver a energia cinética do jato, deixando-o expandir-se. Esta norma aponta para uma distância mínima de 2,5 D (maior dos diâmetros) entre a saída do bocal de diâmetro maior com a rede e uma distância de 0,5 M (obtida pela equação (24)) até à parede final; (AMCA 210-99 & 51-99, 1999)

$$M = \sqrt{\frac{4ab}{\pi}} \quad (24)$$

a- Largura da conduta, (u.m);

b- Altura da conduta, (u.m);

$\pi$ - Constante de pi.

- A rede não é a única forma de diminuir a energia cinética ao ponto de considerar que não existe a formação de jato, pois segundo (Mi & Nathan, 2009) com uma distância de 8 D (maior dos diâmetros do bocal) desde a saída do maior bocal, é possível que o escoamento se tranquilize por si.

Em relação às tomas de pressão estática, é recomendado uma distância de  $(38 \pm 6)$  mm em relação à placa que suporta os bocais.

A instalação parte 1 deve, segundo (Castegnaro, Masi, & Lazzaretto, 2018), possuir no mínimo um comprimento da soma de 3,1 D (maior dos diâmetros do bocal), 0,2 Dh, 3th<sub>w</sub> (espessura da rede) e  $KM/5^{1/2}$  (sendo o valor de K uma constante).

Através do uso do AutoCAD, realizou-se um desenho ilustrativo em 2D da instalação parte 1, o qual é possível observar na Figura 55.

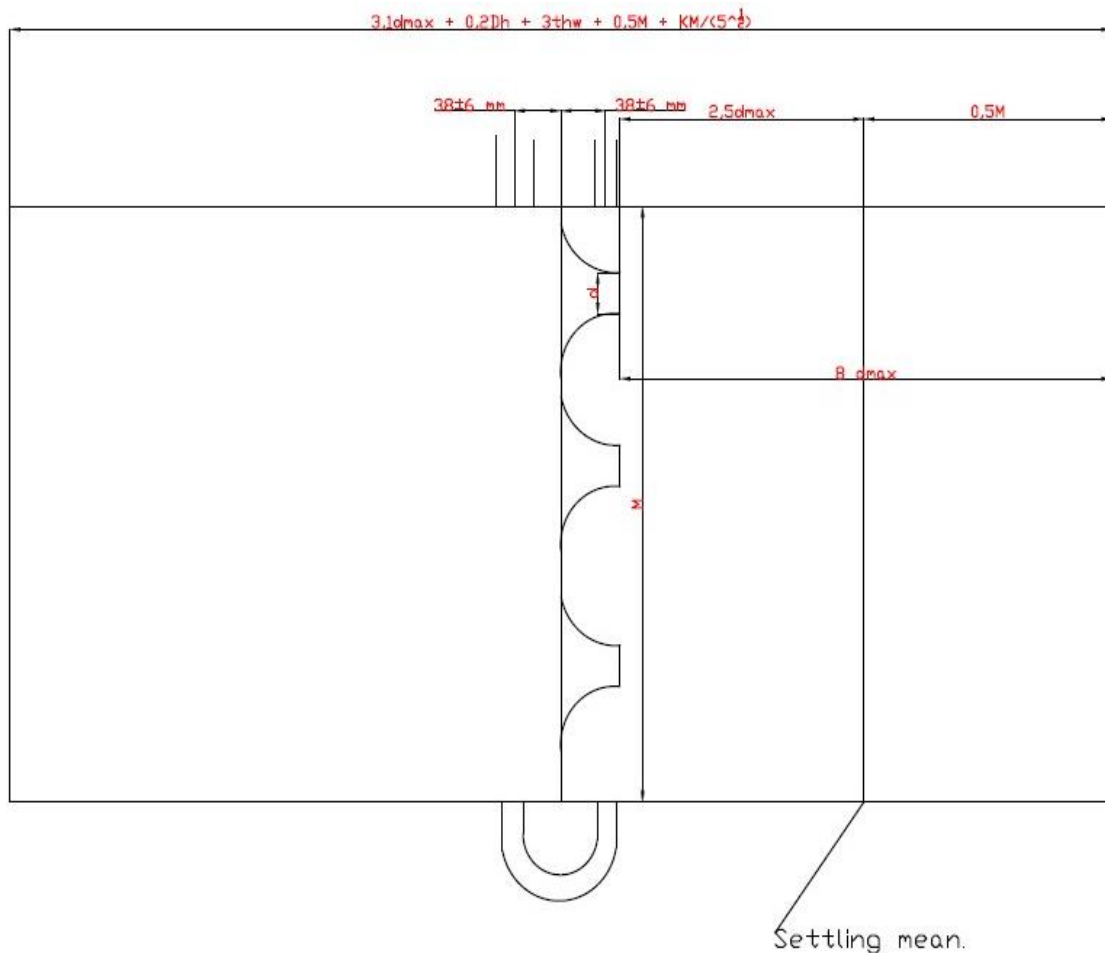


Figura 55-Desenho 2D da instalação parte 1

Quanto à segunda parte da instalação, será focada nos equipamentos de medição a calibrar, sendo necessário respeitar algumas distâncias devido à turbulência criada no escoamento, por obra de acessórios de ventilação (contrações, cotovelos, etc). Com base nos equipamentos descritos em 3.1.1.2, só um é que precisa cumprir essa distância, em que:

- Balómetro não apresenta distância, pois é utilizado em grelhas e difusores;
- Um equipamento, como por exemplo, o *air station*, deve estar localizado a  $7,5 D_h$  (diâmetro hidráulico da conduta) depois de um acessório, e a  $3 D_h$  antes de um acessório. (ASHRAE handbook, 2017)

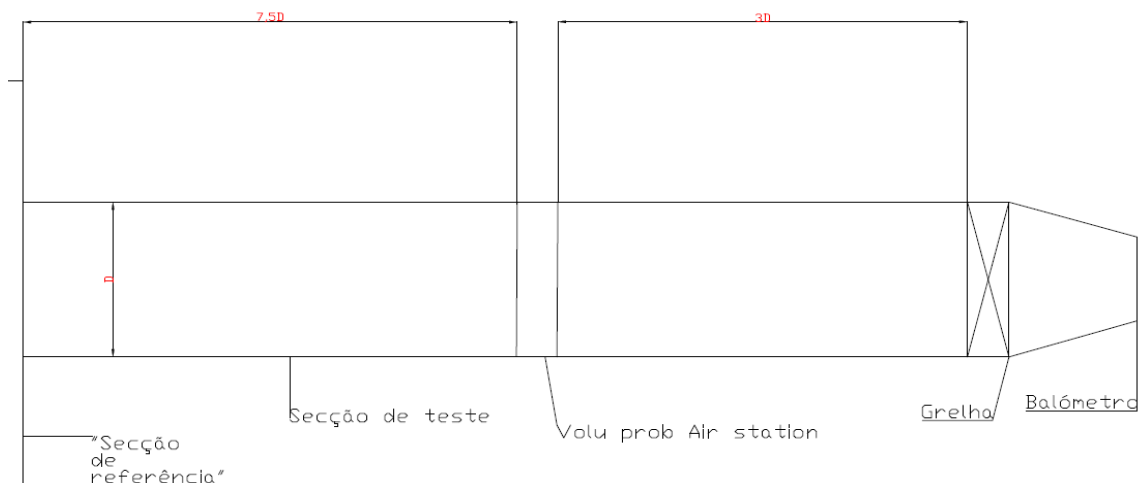


Figura 56- Desenho 2D da instalação parte 2

Através do AutoCAD, realizou-se um desenho ilustrativo em 2D da instalação parte 2, o qual é possível observar na Figura 56.

Combinou-se as duas partes, com o objetivo de criar uma instalação semelhante à apresentada pela Figura 57.



Figura 57- Exemplo de uma instalação pretendida, Hyfluid Technology, 2020

#### 3.1.2.4.2 Preocupações

Como se irá trabalhar com um ventilador no início da instalação, o resto da instalação irá estar sob pressão em relação à atmosfera, possivelmente criando stresse e instabilidade na instalação, o que pode afetar a medição.

Um fator que se deve ter em consideração quando se dimensiona uma estrutura é a pressão  $P$ , e como consequente, a tensão mecânica  $\sigma$  (esforços e cargas solicitados por unidade de área). Para tal, é recomendado, ao conhecer a pressão e tensão críticas da estrutura, multiplicar por um fator de segurança.

## 3.2 Medição do caudal pela velocidade

Ao utilizar um equipamento para medir a velocidade, é possível, através de um conjunto de pontos de medição, obter o caudal que irá passar pela conduta. Para a realização do ensaio respeitou-se a norma (ISO 3966, 2008), sendo esta muitas vezes utilizada neste laboratório. A determinação da velocidade tem o intuito de obter o valor de referência para a calibração dos bocais.

### 3.2.1 ISO 3966

A norma (ISO 3966, 2008) especifica um método de medição para determinar o caudal volumétrico em condutas fechadas. Este método é fiável caso se cumpra as seguintes especificações:

- a) Um fluido com uma massa volúmica constante, ou que não exceda o valor de 0,25 do número de Mach;
- b) Apresente uma temperatura substancialmente uniforme ao atravessar as secções da conduta;
- c) Esteja completamente desenvolvido;
- d) Apresente condições de regime estacionário.

#### 3.2.1.1 Tubos de Pitot

O método irá lidar com a tecnologia e manutenção do “Pitot static tubes”, com o cálculo da velocidade local através da medição de diferentes pressões, e com a computação do caudal através da integração da velocidade. Apesar da alta precisão, este método apresenta uma perda de pressão adicional e baixa sensibilidade a baixos caudais. Devido à perda de pressão adicional, este método é utilizado em grandes intervenções em sistemas de ventilação de edifícios.

Segundo a (DICO FILTRO, 2020) existem 3 tipos de tubos de Pitot:

- 1) Formato em L;
  - a. Com uma incerteza de 1%, quando a cabeça está alinhada com a direção do escoamento com um ângulo de  $\pm 10^\circ$ .
- 2) Formato em S;
  - a. Com uma incerteza 4%, quando a cabeça está alinhada com a direção do escoamento com um ângulo de  $\pm 15^\circ$ .
- 3) Formato em asas.
  - a. associadas a equipamentos de medição (transmissores e manómetros) e permite indicar, controlar e registar os valores de velocidade e caudal;
  - b. Incerteza de 3%.

### 3.2.1.2 Método da realização do ensaio

O princípio do método consiste em:

1. Medir as dimensões da secção da conduta, sendo esta a normal ao escoamento do fluido. Esta medição é necessária para definir a área da secção;
2. Determinar a posição onde se realiza a medição. O número total de pontos deve permitir determinar o perfil de velocidade na conduta;
3. Medir os diferenciais de pressão existente pela pressão total e estática do “Pitot tube” colocado nos pontos referidos no ponto anterior;
4. Determinar a velocidade local do escoamento pela expressão explicitada, baseando-se nas medições do ponto anterior;
5. Determinar a variação da velocidade entre os pontos;
6. Calcular o caudal do escoamento pelo produto da velocidade e área transversal.

No ponto 2, referente à determinação da posição dos pontos a colocar “Pitot tube”, a norma apresenta regras da localização desses mesmos pontos. Mas, independente do método usado na medição realizada pelos “Pitot tube”, a distância entre a ponta da cabeça do “Pitot tube” e a parede da conduta, não deve ser inferior ao diâmetro da cabeça do “Pitot tube”. Como se trata de uma secção quadrangular, é necessário realizar 25 medições em diferentes pontos.

A localização do “Pitot tube” deve ser calculada a partir da atual dimensão da conduta através da sua secção transversal, e deve ser medida por:

- a)  $\pm 0,005X$ , onde  $X$  é a distância da conduta paralela à posição do “Pitot tube”;
- b)  $\pm 0,005Y$ , onde  $Y$  é a distância do “Pitot tube” até à parede mais perto.

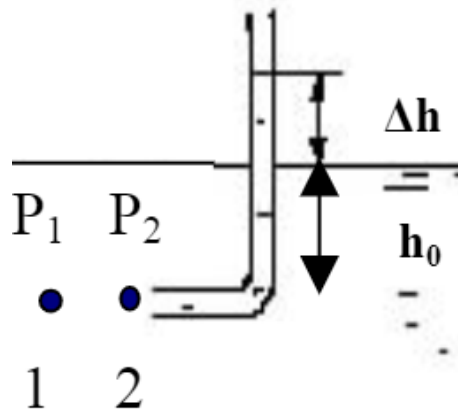


Figura 58-Exemplo de um tubo de Pitot, Delmée, 1982

No ponto 4, a expressão utilizada é equação de Bernoulli, mas de uma forma mais simplificada.

A sua simplificação é demonstrada, com base na Figura 58, utilizando-se a equação (25).

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} = h_0 + \Delta h \quad (25)$$

$g$ = Aceleração da gravidade, (m/s<sup>2</sup>);

$\Delta h$ = Altura da coluna de líquido, (mca);

$H_0$ =Altura de coluna de líquido sobre a tomada de pressão, (m);

$P_1$  e  $P_2$ = Pressão nos pontos 1 e 2, (Pa);

$V_1$  e  $V_2$ = Velocidade do fluido no ponto 1 e 2, (m/s);

$\gamma$ = Peso específico do fluido, (N/m<sup>3</sup>);

Considera-se a Velocidade do ponto 2 nula e a velocidade no ponto 1 igual à velocidade do fluido  $V$ , e como  $(P_1/\gamma)$  é igual a  $h_0$ , a equação (25) é simplificada para a equação (26).

$$V = \sqrt{2g\Delta h} \quad (26)$$

### 3.3 Medição através de um tubo de Pitot

Acompanhou-se a medição dos  $\Delta P$  em filtros, através do guia prático (Air flow measurements in ducts according to DIN EN 12599, 2020), com o instrumento de medição tubo de Pitot. De forma a complementar o estudo inicial, realizou-se a medição com outro equipamento disponibilizado pela empresa, o balómetro.

#### 3.3.1 Considerações a ter segundo a DIN EN 12599

##### 3.3.1.1 Instalação

A Norma DIN EN 12599 impõe que os equipamentos de medição devem estar localizados a uma distância de, pelo menos, 6 Dh (Diâmetro hidráulico) a jusante, e 2 Dh a montante de uma zona que possa perturbar o escoamento.

##### 3.3.1.2 Métodos de medição

Para determinação do caudal, é necessário obter uma velocidade média do escoamento que atravessa a secção da conduta. Dependendo do tipo de secção, existem dois métodos possível para determinar a velocidade:

- Método trivial para secção retangular e quadrangular;
- Método centroide axial para secção circular.

A secção da conduta estudada é quadrangular, logo, o método de medição é o trivial.

### 3.3.1.2.1 Método trivial

Dividir a secção da conduta quadrangular em pequenas áreas de medição com tamanhos parecidos, onde o ponto de medição é no centro das mesmas, como é possível observar na Figura 59.

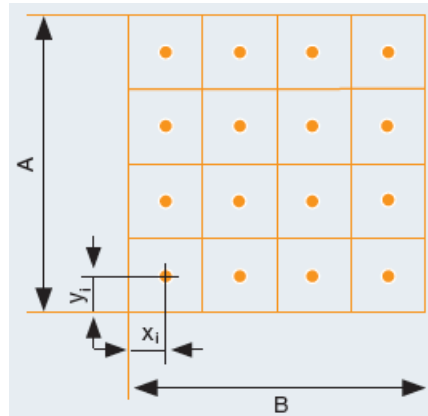


Figura 59-Exemplo da divisão de áreas e pontos de medição, Air flow measurements in ducts according to DIN EN 12599, 2020

O número de pontos de medição é influenciado pelo tamanho da secção. Quanto maior a sua dimensão, mais pontos é necessário para suavizar a discrepância de valores de leitura.

### 3.3.1.3 Leitura e erros associados

A medição do caudal de ar, segundo o guia prático, possui uma incerteza de medição de  $\pm 10\%$ . A mesma também fundamenta a causa desta incerteza estar associada aos seguintes parâmetros:

1. Irregularidade do perfil do escoamento;
2. Números de pontos de medição.

#### 3.3.1.3.1 Irregularidade do perfil do escoamento

A medição realizou-se com uma distância de  $6D_h$  depois de uma contração, o que, segundo a norma DIN EN 12599, nos permite relacionar a distância da medição em relação à última contração com a percentagem da irregularidade do perfil, através da Figura 60, na qual é possível reparar que quanto menor a distância maior é a percentagem da irregularidade do perfil de velocidade do escoamento. Para o ensaio, uma distância de  $6D_h$  corresponde uma percentagem de 10 %.

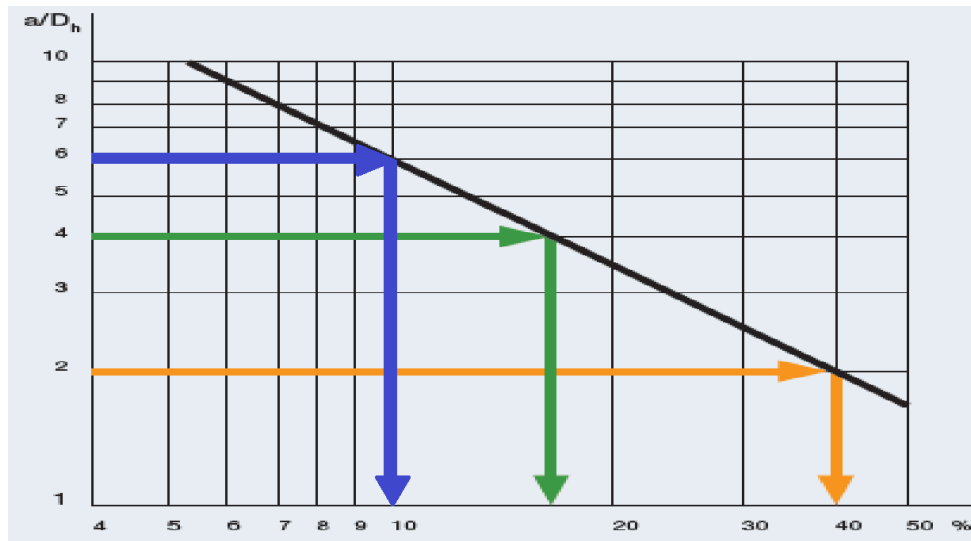


Figura 60- Percentagem teórica da irregularidade do perfil

### 3.3.1.3.2 Cálculo da irregularidade do perfil do escoamento

O procedimento de cálculo é o seguinte:

1. Realização do ensaio e registos das velocidades com a sua localização na secção;
2. Divisão da área de secção em 4 quadrantes;
3. Determinação da velocidade média para cada quadrante e toda a secção;
4. Comparação dos valores obtidos e cálculo da percentagem da irregularidade do perfil de velocidades através da equação (27).

$$U = \left| \frac{v_{\max} - v_{\min}}{v} \right| \quad (27)$$

U= Percentagem da irregularidade do perfil de velocidade, (%);  
 $v_{\max}$ = Velocidade média máxima de todos os quadrantes, (m/s);  
 $v_{\min}$ = Velocidade média mínima de todos os quadrantes, (m/s);  
 $v$ = Velocidade média da secção, (m/s).

É possível observar, pela **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, os locais da realização das 9 medições (ordenadas alfabeticamente) através do tubo de *Pitot*, e divisão da secção em 4 quadrantes (ordenados numericamente). As velocidades obtidas pelo ensaio estão representadas na Tabela 11. A percentagem da irregularidade do perfil de velocidades e todos os dados precisos para a determinação do mesmo são observáveis na Tabela 12.

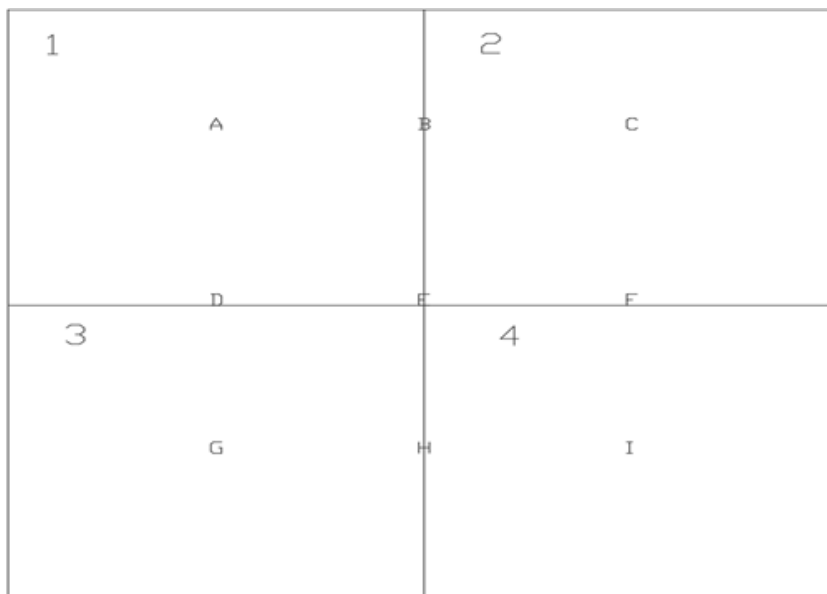


Figura 61- Alocação dos pontos de medição e divisão de quadrante na secção

Tabela 11-Resultados obtidos através da medição de velocidade

Simbologia	Velocidade (m/s)
A	1,23
B	1,26
C	1,21
D	1,20
E	1,20
F	1,13
G	1,20
H	1,16
I	1,13

Tabela 12-Percentagem da irregularidade do perfil de velocidade e velocidades médias de cada quadrante

Simbologia	Valor calculado	Unidades
$v_1$	1,223	m/s
$v_2$	1,200	m/s
$v_3$	1,190	m/s
$v_4$	1,155	m/s
$v_{max}$	1,223	m/s
$v_{min}$	1,155	m/s
$v$	1,192	m/s
U	5,705	%

### 3.3.1.3.3 Número de pontos de medição

O número de pontos é determinado a partir da percentagem da irregularidade do perfil com a incerteza da medição, como é possível de observar Figura 62.

Number of measuring points	Uncertainty of the measurement $\tau_u$ as a % Irregularity of the profile U as a %					
	2	10	20	30	40	50
4	6	12	20	28	36	42
5	5	11	17	24	31	36
6	5	10	15	21	27	32
8	4	8	13	18	23	27
10	3	7	12	16	20	24
20	2	5	8	11	14	16
30	2	4	7	9	11	14
50	1	3	5	7	8	10
100	1	2	3	5	6	7
200	1	1	2	3	4	5

Figura 62-Incerteza da medição

A realização do ensaio não seguiu esta ordem, pois a instalação e a medição realizou-se com outro propósito, utilizando-se 9 pontos de medição distribuídos pelo Método trivial em 3.3.1.2.1 para uma secção de 610x610 mm. Através da análise e comparação das percentagens da irregularidade do perfil de velocidades, optou-se por utilizar o maior dos dois, que é o referente aos 10 %. Através do número de medições e percentagem escolhida, pela Figura 62, considerou-se uma incerteza de medição de 7,5%.

### 3.3.1.4 Medição do caudal

A medição realizou-se tendo uma velocidade referência na secção de 1 m<sup>2</sup> do túnel de vento, medidos através dos transdutores alocados. Utilizando a equação (11), foi possível determinar o caudal na secção túnel.

Através do uso do método trivial e dos dados obtidos pela Tabela 11 e Tabela 12, bem como a utilização da equação (11), foi possível determinar o caudal medido.

#### 3.3.1.4.1 Resultados

Conhecendo os caudais medidos através da velocidade média da secção onde se realizou cada medição, para a análise mais aprofundada, optou-se por calcular o erro relativo dos caudais, através da equação (28). Dados relativos ao ensaio, bem como o erro relativo da medição estão expostos na Tabela 13.

$$E_f = \left| \frac{Q_s - Q_t}{Q_t} \right| * 100 \quad (28)$$

$E_f$ = Erro relativo da medição, (%);

$Q_t$ = Caudal medido no túnel, (m<sup>3</sup>/h);

$Q_s$ = Caudal medido pelo tubo de pitot, (m<sup>3</sup>/h).

Tabela 13-Erro relativo e dados relativos à medição

Secção	Túnel de vento	Ensaio realizado
Velocidades médias, m/s	1,192	0,454
Área, m <sup>2</sup>	0,3721	1
Caudal, m <sup>3</sup> /h	1596,76	1634,4
Erro relativo, %	2,35	

### 3.3.2 Medição com balómetro

É possível encontrar a descrição do funcionamento deste equipamento em 2.4.2.1.7.

#### 3.3.2.1 Descrição do equipamento

O balómetro alnor, modelo EBT 721, já se encontra calibrado para as condições descritas na Tabela 14, onde também é possível ver as suas características de calibração em relação ao caudal na Tabela 15, para insuflação, com uma tolerância de  $\pm (3\% + 11,9 \text{ m}^3/\text{h})$ .

Tabela 14-Condições ambiente da calibração

Temperatura (°C)	23,0
Humidade relativa (%)	53,5
Pressão barométrica (hPa)	998,0

Tabela 15-Dados característicos ao balómetro alnor EBT 721

Testes	Valor de referência da calibração, (m <sup>3</sup> /h)	Valor obtido na sua calibração, (m <sup>3</sup> /h)	Escala de valores aceitáveis, (m <sup>3</sup> /h)
1	3230	3232	3122-3338
2	2549	2540	2461-2637
3	2035	2024	1963-2107
4	1531	1522	1474-1588
5	1014	1013	972-1056
6	510	496	483-537
7	170	163	154-186

### 3.3.2.2 Montagem

O procedimento de montagem é igual ao do ponto 3.1.1.3.1, com o auxílio visual da Figura 63 e Figura 64.

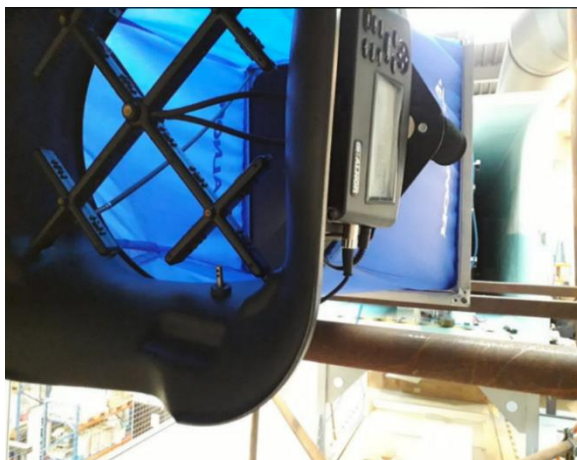


Figura 63-Montagem do balómetro



Figura 64-Montagem do balómetro

Como se pode reparar, a alocação do balómetro à conduta não é apropriada, pois não existe uma grelha com uma secção igual ou menor que a do balómetro. A conduta possui uma secção de 610x610 mm na sua parte interior, não deixando que o balómetro se encaixe de modo eficaz à conduta.

### 3.3.2.3 Procedimento de ensaio

A partir da medição dos transdutores situados no túnel de vento, foi possível relacionar a velocidade do túnel de vento 1x1 m que se obteria, para conseguir debitar o caudal pretendido para uma secção de 610x610 mm, com o recurso à conservação da massa e à equação (11). O software não possui uma resolução para pequenas casas decimais em relação à velocidade, logo, foi necessário fazer uns ajustes quanto aos valores de velocidade, e posteriormente caudais pretendidos, para estarem dentro da escala de calibração do balómetro. É possível observar as velocidades ajustadas na Tabela 16.

Tabela 16- Método de ajuste e velocidades ajustadas

<b>Caudal pretendido (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Velocidade teórica (m/s)</b>	<b>Velocidade observada pelo leitor do software (m/s)</b>
170	1	0,047222222	0,05
510	1	0,141666667	0,14
1014	1	0,281666667	0,27
1531	1	0,425277778	0,45
2035	1	0,565277778	0,58
2549	1	0,708055556	0,71
3230	1	0,897222222	0,89

Depois da realização dos ajustes de velocidade, o procedimento realizou-se pelos seguintes passos:

1. Preparação e alocação do balómetro;
2. Ligar o balómetro;
3. Através do software, realizou-se a regulação da velocidade debitada do ventilador do laboratório para a velocidade pretendida no túnel de vento, de modo a obter o caudal pretendido na instalação;
4. Fixar o valor do balómetro;
5. Leitura e registo do valor de caudal em m<sup>3</sup>/h;
6. Desbloquear o valor fixo;
7. Voltar a refazer os passos do 2 ao 6, até retirar todos os valores de caudal pretendidos;
8. Desligar o equipamento e arrumar;
9. Recolha das velocidades medidas por décima de segundo através do software, através de uma folha de Excel, e realização de uma média sob as mesmas, com o objetivo de aumentar a resolução da leitura, assim especificando com um maior rigor a velocidade que passa pelo túnel de vento.

#### 3.3.2.4 Resultados

Após conclusão dos passos citados em 3.3.2.3, obteve-se, com ajuda do Excel, os valores de caudal, e foi possível determinar, através das tomas de pressão estática situadas no túnel de vento, a tolerância para cada caudal pretendido (valor de referência), como se pode observar na Tabela 17.

Tabela 17-Resultados da utilização do balómetro para a instalação

<b>Escala de valores aceitáveis, (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Valor obtido pelo balómetro, (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Valor de velocidade no túnel de vento, (m/s)</b>	<b>Área do túnel de vento, (m<sup>2</sup>)</b>
176 ± (3% + 11,9)	191	0,048899	1
509 ± (3% + 11,9)	495	0,141318	1
955 ± (3% + 11,9)	925	0,265287	1
1618 ± (3% + 11,9)	1590	0,449372	1
2100 ± (3% + 11,9)	2060	0,58324	1
2561 ± (3% + 11,9)	2485	0,711414	1
3153 ± (3% + 11,9)	3043	0,875737	1

# CONCLUSÕES

- 4.1 CONCLUSÕES
- 4.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

## 4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 4.1 CONCLUSÕES

#### 4.1.1 Objetivo principal

O trabalho permitiu estudar a ciência da metrologia e aprofundar o conhecimento do caudal volumétrico.

O dimensionamento teórico da instalação para a calibração de equipamentos de medição de caudal de ar foi realizado consoante as variáveis pensadas:

- Escala de caudal de ar (45 m<sup>3</sup>/h a 5000 m<sup>3</sup>/h);
- Flexibilidade para a realização da medição de outros equipamentos de medição de caudal ou velocidade do escoamento de ar;
- Baixo investimento.

A calibração para equipamentos de medição de caudal de ar, para a escala compreendida entre 45 m<sup>3</sup>/h a 5000 m<sup>3</sup>/h, foi realizada com sucesso, através do uso de um conjunto de 11 bocais primordialmente obtidos pela conservação da massa, possível de observar na Tabela 8. Como é necessário que o caudalímetro de referência esteja calibrado, realizou-se o dimensionamento, através do método explicitado em 3.1.2.3.1 segundo (AMCA 210-99 & 51-99, 1999) apresentado pela Tabela 9, bem como a validação do método apresentado na Tabela 10. Concluindo-se que o erro relativo é praticamente igual a 0% em relação ao método utilizado em 3.1.2.3.1.

A solução para a flexibilidade de realização da medição de outros equipamentos de medição de caudal ou velocidade do escoamento de ar, foi possível através da divisão da instalação em duas partes, segundo as especificações em 3.1.2.4.1, onde a primeira parte foi designada para o caudalímetro de referência (bocais), de forma a calibrar outros caudalímetros para a escala pretendida. A segunda parte é projetada para os equipamentos de medição de caudal a calibrar (balómetro e “air station”).

Apesar de não ser apresentado um preço limite para a instalação de calibração de caudal de ar, pensada de modo a diminuir todos os custos, os quais vão desde a escolha do método e do caudalímetro de referência, em que se optou por um conjunto de bocais (possuem um custo menor em relação a outros equipamentos, como por exemplo o tubo de *venturi*), como também a possibilidade da sua construção se realizar no INEGI, e ainda aproveitando o túnel de vento disponível no LAC.

No entanto, não foi possível avaliar influências, correções necessárias ou pormenores operacionais, que serão a base da instalação.

#### 4.1.2 Medição de caudal pelo tubo de Pitot, segundo o guia prático

Utilizou-se o guia prático (Air flow measurements in ducts according to DIN EN 12599, 2020) com o objetivo principal de estudar a irregularidade do perfil de velocidades, na medição de caudal de ar. Para tal, seguindo os passos e procedimentos explicados em 3.3.1.3, foi possível analisar as incertezas de medição associadas, tanto em modelo teórico como experimental.

O valor teórico em relação ao valor experimental, apresenta aproximadamente o dobro da percentagem da irregularidade do perfil de velocidade do escoamento de ar. Uma possível justificação para este valor ser aproximadamente metade em relação ao teórico, pode ser evidenciada pelos seguintes pontos:

- O uso de um equipamento de medição com baixa resolução de leitura (poucas casas decimais);
- A disposição dos locais de medição (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**), obrigando a repetir valores de velocidades para quadrantes adjacentes, diminuindo a diferença entre a velocidade média alta para a velocidade média baixa dos quatro quadrantes. Esta disposição não é a melhor, pois o guia prático que ilustra a norma DIN EN 12599 é utilizado para a medição do caudal de ar em estruturas aerúlicas. No entanto, a realização da medição teve como base outra norma, com o intuito de determinar a irregularidade do perfil de velocidades para a medição do  $\Delta P$  em filtros.

O equipamento de medição é mais difícil de manusear, logo, é necessária mais experiência na área da medição, e requer um procedimento longo e exaustivo.

#### 4.1.3 Medição de caudal pelo balómetro

Através da consulta da Tabela 17, é possível reparar que o valor de caudal mais alto medido pelo balómetro não se encontra dentro da tolerância dada pelo fabricante. Apresenta uma diferença muito baixa, aproximadamente de 1 para 1000, da tolerância. Esta discrepância de valor para o caudal mais baixo pode ter sido resultado da má alocação do balómetro (existência de fugas), como também do executante da medição, pois este não possui experiência técnica na área.

Não se pode comprovar a fiabilidade do equipamento, pois não está indicado na folha de calibração a incerteza da calibração, bem como os parâmetros que afetam a medição de caudal, como por exemplo:

- Medição do valor de referência;
- Equipamentos de medição da humidade relativa e temperatura.

É um equipamento de medição muito simples de usar e prático para realizar medições na área de AVAC, apesar de tudo, não apresenta dados suficientes para uma boa medição do caudal de ar.

## 4.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

### 4.2.1 Objetivo principal

Implementação física da instalação para calibração de equipamentos de medição de caudal de ar, bem como:

1. Construção dos bocais (caudalímetro de referência);
2. Verificação das velocidades dos bocais, se cumprem ou não os requisitos da (AMCA 210-99 & 51-99, 1999);
3. Estudo sobre a implicação do rácio entre o diâmetro da garganta do bocal e o diâmetro hidráulico da instalação ( $\beta$ ), através das várias combinações possíveis de bocais, para a calibração de equipamentos de medição;
4. Realização de ensaios de calibração de equipamentos de medição de caudal, de preferência para o balómetro e “*air station*”.

Podendo, mais adiante, criar um equipamento de medição de caudal de referência para medições superiores a 5000 m<sup>3</sup>/h.

### 4.2.2 Medição pelo tubo de Pitot segundo um guia prático

Utilização do mesmo método para caudais muito altos e muito baixos, assim estudando a incerteza associada à medição e irregularidade do perfil de velocidades para várias gamas de caudal.

### 4.2.3 Medição pelo balómetro

Recomenda-se a realização de uma calibração para o Balómetro, com a utilização de uma grelha de secção menor ou igual a 610x610 mm, e indicando a incerteza da medição bem como os parâmetros considerados.

# BIBLIOGRAFIA

## 5 Referências

- AERECO. (2019). Sistemas de ventilação. Retrieved from <https://www.aereco.co.uk/ventilation/ventilation-systems-uk/hybrid-ventilation/>
- Air flow measurements in ducts according to DIN EN 12599. (2020). *Air flow measurements in ducts according to DIN EN 12599*. Retrieved from [https://static-int.testo.com/media/5e/bf/7203dd113db1/jp\\_practical\\_guide\\_testo-400-AirFlow.pdf](https://static-int.testo.com/media/5e/bf/7203dd113db1/jp_practical_guide_testo-400-AirFlow.pdf)
- air movement and control association international inc, A. (2019). VOLU-probe / VS Airflow Traverse Station. In *amca certified ratings-Airflow Measurement Station air performance*. Retrieved from [https://www.airmonitor.com/wp-content/uploads/2015/11/BRO\\_VOLUprobe\\_VS.pdf](https://www.airmonitor.com/wp-content/uploads/2015/11/BRO_VOLUprobe_VS.pdf)
- Alnor. (2014). *Alnor HVAC Handbook*. Retrieved from <https://www.kenelec.com.au/wp-content/uploads/2018/03/Airflow-Instruments-Alnor-HVAC-Assessment-Handbook.pdf>
- AMCA 210-99, & 51-99, A. (1999). Laboratory Methods of Testing Fans for Aerodynamic Performance Rating. *Air Movement and Control Association International, ...*, 552. <https://doi.org/10.1520/G0154-12A>
- APA. (2009). *Qualidade do Ar em Espaços Interiores*. Retrieved from [http://apambiente.pt/\\_zdata/Divulgacao/Publicacoes/Guias e Manuais/manual QArInt\\_standard.pdf](http://apambiente.pt/_zdata/Divulgacao/Publicacoes/Guias e Manuais/manual QArInt_standard.pdf)
- ASHRAE. (2020). *ASHRAE Position Document on*. Retrieved from [https://www.ashrae.org/file\\_library/about/position\\_documents/pd\\_infectiousaerosols\\_2020.pdf](https://www.ashrae.org/file_library/about/position_documents/pd_infectiousaerosols_2020.pdf)
- ASHRAE 41.2. (2005). ASHRAE 41.2. Retrieved from <https://www.eng-tips.com/viewthread.cfm?qid=117052>
- ASHRAE handbook. (2017). 2017 ASHRAE handbook : fundamentals. In *ASHRAE handbook : fundamentals*.
- ASHRAE Standard 62.1. (2013). *Fundamentals of ASHRAE Standard 62.1 - Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*. Retrieved from <http://www.myiaire.com/product-docs/ultraDRY/ASHRAE62.1.pdf>
- Awbi, H. (2003). Book Review - Ventilation of Buildings. *International Journal of Ventilation*, 2(3), 287–289. <https://doi.org/10.1080/14733315.2003.11683672>
- Cabral, P. (2004). *Paulo Cabral Erros e Incertezas nas Medições*. Retrieved from <http://www.peb.ufrj.br/cursos/ErrosIncertezas.pdf>
- Castegnaro, S., Masi, M., & Lazzaretto, A. (2018). Design and testing of an iso 5801 inlet chamber test rig and related issues with the standard. *Proceedings of Fan 2018 - International Conference on Fan Noise, Aerodynamics, Applications and Systems*, 1–12. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/324676563\\_Design\\_and\\_Testing\\_of\\_a\\_n\\_ISO\\_5801\\_Inlet\\_Chamber\\_Test\\_Rig\\_and\\_Related\\_Issues\\_with\\_the\\_Standard](https://www.researchgate.net/publication/324676563_Design_and_Testing_of_a_n_ISO_5801_Inlet_Chamber_Test_Rig_and_Related_Issues_with_the_Standard)
- Decreto-Lei Nº118. (2013). *Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto*. 4988–5005. Retrieved from <https://dre.pt/application/dir/pdf1s/2013/08/15900/0498805005.pdf>
- DICO FILTRO. (2020). DICO FILTRO. Retrieved April 5, 2020, from <https://www.dicofiltro.com/pt/catalogo/go/equipamentos-pessao-tubos-de-pitot>
- EVAC. (2016). UNIDADES DE TRATAMENTO DE AR Um fato à medida. Retrieved from [http://www.dem.isep.ipp.pt/uploads/DEM\\_PDFs/Laboratorios\\_Docs/AVAC/Eventos/ISEP\\_Nov2016\\_final.pdf](http://www.dem.isep.ipp.pt/uploads/DEM_PDFs/Laboratorios_Docs/AVAC/Eventos/ISEP_Nov2016_final.pdf)
- Frank White. (2009). Fluid Mechanics. In *Power*. Retrieved from

- [http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM240/Marchi/Bibliografia/White\\_2011\\_7ed\\_Fluid-Mechanics.pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM240/Marchi/Bibliografia/White_2011_7ed_Fluid-Mechanics.pdf)
- Furness, R. (2001). Flow Measurement Handbook. In *Flow Measurement and Instrumentation* (Vol. 12). [https://doi.org/10.1016/s0955-5986\(00\)00049-2](https://doi.org/10.1016/s0955-5986(00)00049-2)
- Hyfluid Technology. (2020). No Title. Retrieved from <http://www.hyfluid.com/articledetail.asp?id=116>
- IPQ. (2009). *Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados* (Vol. 2008). Retrieved from [http://repositorios.inmetro.gov.br/bitstream/10926/290/6/Conteudo\\_VIM\\_2008.pdf](http://repositorios.inmetro.gov.br/bitstream/10926/290/6/Conteudo_VIM_2008.pdf)
- ISO/IEC 17025. (2018). *GUIDE FOR ISO / IEC 17025 APPLICATION*.
- ISO 3966. (2008). *Measurement of fluid flow in closed conduits-Velocity area method using Pitot static tubes. 2008*. Retrieved from <https://www.sis.se/api/document/preview/910041/>
- Mayer, J. (2012). *A ventilação natural como melhoria do desempenho energético de edifícios residenciais*. Retrieved from [https://run.unl.pt/bitstream/10362/7789/1/Silva\\_2012.pdf](https://run.unl.pt/bitstream/10362/7789/1/Silva_2012.pdf)
- Mi, J., & Nathan, P. K. G. J. (2009). New Trends in Fluid Mechanics Research. *New Trends in Fluid Mechanics Research*, (January). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-75995-9>
- NP 1037-2. (2002). *Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás Parte 2: Edifícios de habitação Ventilação mecânica centralizada (VMC) de fluxo simples*. Retrieved from [https://docgo.net/view-doc.html?utm\\_source=np-1037-2](https://docgo.net/view-doc.html?utm_source=np-1037-2)
- NP EN ISO 10012. (2005). *Sistemas de gestão da medição*. 1–28.
- Paula, T. T. de. (2007). *Avaliação metrológica da medição de vazão com laser doppler anemométrico*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1843/SBPS-7B5NK6>
- Pedro, J., Oliveira, P. De, & Martins, D. C. (2017). *Implementação de um Padrão Primário para Medição de Caudais de Gás até 12 L / min*.
- Pinto, A. (2006). *Ventilação mecânica de edifícios de habitação*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/316279004\\_Ventilacao\\_mecanica\\_de\\_edificios\\_de\\_habitacao](https://www.researchgate.net/publication/316279004_Ventilacao_mecanica_de_edificios_de_habitacao)
- Portaria n.º 353-A. (2013). *Portaria n.º 353-A/2013 de 4 de dezembro*. (2), 2–9. Retrieved from <https://data.dre.pt/eli/port/353-a/2013/12/04/p/dre/pt/html>
- Positive Displacement ( PD ) Flow Meters. (2015). Positive Displacement ( PD ) Flow Meters. Retrieved from <https://www.omega.com/en-us/resources/positive-displacement-flow-meter>
- Rehva, O. dos E. (2020). *Como operar e usar os sistemas técnicos de edifícios para prevenir a propagação do vírus SARS-CoV-2 , responsável pela COVID-19 , em locais de trabalho ( versão 3 de abril , 2020 ) Enquadramento nacional Aviso importante : Vias de transmissão. 2020*. Retrieved from [https://www.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/rehva\\_oe\\_orientacoes\\_rehva\\_covid\\_19\\_vers2\\_20200403.pdf](https://www.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/rehva_oe_orientacoes_rehva_covid_19_vers2_20200403.pdf)
- Schneider, P. P. S. (2011). *Medição de Velocidade e Vazão de Fluidos*. Retrieved from [http://www.geste.mecanica.ufrgs.br/pss/medterm/vazao\\_mt.pdf](http://www.geste.mecanica.ufrgs.br/pss/medterm/vazao_mt.pdf)
- Sousa, C. (2011). *A Metrologia em Laboratório Fabril*. Retrieved from [https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/2416/1/PTE\\_CarlosSousa\\_2011.pdf](https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/2416/1/PTE_CarlosSousa_2011.pdf)
- TROX. (2019). Ventilation grilles | TROX GmbH. Retrieved December 31, 2019, from <https://www.trox.de/en/air-diffusers/ventilation-grilles-87788e10bb47e026>
- TSI. (2019). Air Capture Hoods. Retrieved January 2, 2020, from <https://tsi.com/products/ventilation-test-instruments/air-capture-hoods/>
- Viegas, J. (2010). Ventilação natural de edifícios de habitação. *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*.

