

## CAPÍTULO 5

# ENSAIOS, MÉTODOS DE AVALIAÇÃO E MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR

## 5. ENSAIOS, MÉTODOS DE AVALIAÇÃO E MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR

### 5.1. MÉTODO DO GÁS TRAÇADOR

- 5.1.1. Princípios do Método
- 5.1.2. Características do Gás Traçador
- 5.1.3. Descrição e Classificação das Técnicas
- 5.1.4. Metodologia

### 5.2. MÉTODO DE PRESSURIZAÇÃO

- 5.2.1. Princípios do Método
- 5.2.2. Metodologia

### 5.3. ANEMOMETRIA

### 5.4. OUTROS MÉTODOS DE ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR INTERIOR

### 5.5. CONCLUSÕES GERAIS

## 5. ENSAIOS, MÉTODOS DE AVALIAÇÃO E MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR

### 5.1. MÉTODO DO GÁS TRAÇADOR

O método do gás traçador permite determinar todos os caudais de fluxos de ar, uma medição directa mas pontual das infiltrações, para condições particulares como o vento, a temperatura, a humidade do ar, entre outros. Para além dos caudais de ar, este método também permite o cálculo de eficiências de ventilação e a remoção dos contaminantes.

No entanto este método apresenta algumas desvantagens, como todos os outros, nomeadamente a utilização de equipamentos dispendiosos e custos de funcionamento bastante elevados, além de pessoal qualificado para a sua implementação.

#### 5.1.1. Princípios do Método

Este método adoptou uma técnica estandardizada para determinar a taxa de renovação do ar em edifícios, através da diluição de um gás traçador. O método consiste na injeção de uma determinada quantidade de um gás com propriedades específicas no interior do compartimento. O objectivo é “marcar” o ar do edifício com algo facilmente identificável, de maneira a que o movimento do ar possa ser “traçado”. Os tipos de traçadores usados nas medições são normalmente gases sem cores e sem cheiro, e normalmente não presentes no ar ambientes.

O método do gás traçador fundamenta-se na lei da conservação da massa do ar e do gás traçador, traduzida pela equação de balanço mássico. Neste método verificam-se as seguintes condições <sup>[14]</sup>:

- a concentração do gás traçador é homogénea no espaço em estudo;
- existe uma mistura perfeita e imediata entre o ar e o gás traçador (homogeneização completa);
- a produção do gás traçador não altera a densidade do ar.

A aplicação desta técnica permite executar vários tipos de medições quantitativas da ventilação. Estas medições incluem medidas da infiltração e renovação do ar, eficiência na extracção de fumos e gases em chaminé, e propagação dos poluentes. Um ponto bastante

importante destas medições é que elas podem ser efectuadas em edifícios ocupados, é conveniente e bastante mais exacto.

A renovação de ar de um compartimento ou de um edifício é normalmente avaliada usando um dos três métodos do gás traçador: o método da concentração e queda (Método do Decaimento), o método da emissão constante e o método da concentração constante.

Estes três métodos são baseados na simplificação da equação da continuidade (2) [10]:

$$V \frac{dC}{dt} = \underbrace{F(c)}_{\text{Mudança na quantidade de gás traçador num compartimento}} + \underbrace{q(t) \times C_{oa}}_{\text{quantidade de gás traçador introduzido num compartimento}} - \underbrace{q(t) \times C(t)}_{\text{quantidade de gás traçador que deixa um compartimento}} \quad (2)$$

- V → volume de ar no interior do compartimento [m<sup>3</sup>]
- C → concentração do gás traçador no ar do compartimento [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]
- t → tempo [h]
- F → taxa de injeção do gás traçador no compartimento [m<sup>3</sup>/h]
- C<sub>oa</sub> → concentração do gás traçador no ar exterior [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]
- q → caudal de ventilação do compartimento [h/m<sup>3</sup>]

A equação (2) ainda pode ser escrita da seguinte forma [53]:

$$q_v(\tau) = \frac{F(\tau) - V \frac{dC}{d\tau}}{C(\tau) - C_{oa}} \quad (3)$$

Para encontrar a taxa de renovação do ar, N, o fluxo de ar através do compartimento é dividido pelo volume efectivo da sala. Isto é, a taxa de renovação do ar é o quociente entre o caudal de ventilação do compartimento e o seu volume, conforme a equação (4) [10]:

$$N = \frac{q}{V} \quad (4)$$

A aplicação deste método requer um conhecimento dos princípios de análise do gás e instrumentação.

### 5.1.2. Características do Gás Traçador

O gás traçador, para que a determinação da renovação do ar possa ser efectuada com sucesso, deve, em primeiro lugar, ser fácil de detectar e constituir uma mistura homogénea com o ar num intervalo muito curto de tempo depois de libertado. Para além desses requisitos, a escolha do gás traçador deve basear-se também no seguinte conjunto de características [10] [14].

- não deve ser tóxico e não deve apresentar risco para a saúde, com os valores de concentração usados;
- deve ser inerte;
- deve estar de preferência ausente (ou presente em concentrações muito baixas) no ar interior e exterior;
- deve ter um valor de massa molar não muito diferente do valor médio do ar ( $29\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ );
- não deve ser inflamável nem explosivo;
- não deve ser dispendioso;
- não deve sofrer decomposição ou reagir com o ar ou com componentes do edifício.

Os gases mais frequentemente utilizados como gases traçadores são [14].

- Hexafluoreto de enxofre,  $\text{SF}_6$ ;
- Dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ ;
- Peróxido de azoto (óxido nitroso),  $\text{N}_2\text{O}$ ;
- Perfluorbenzeno (PB),  $\text{C}_6\text{F}_6$ ;
- Perfluormetilbenzeno (PMB),  $\text{C}_7\text{F}_8$ .

Para um gás ser apropriado como um marcador deve ter uma densidade semelhante à do ar, normalmente não deve estar presente no ar, em recintos fechados ou ao ar livre, e sua concentração deve ser medida com uma boa ordem de precisão, mesmo quando altamente diluídos [53].

Para considerações de segurança, o gás traçador não deve ser nem inflamável nem explosivo e, como muitas vezes as medições são realizadas em edifícios ocupados, ele não deve ter cheiro ou quaisquer efeitos adversos à saúde [53]. E, finalmente, uma vez que as análises do gás traçador baseiam-se na equação do balanço de massa, é importante garantir que todos os marcadores deixam o recinto pelo sistema de ventilação. Isso significa que o gás escolhido não deve ser absorvido pelas paredes ou móveis e não deve reagir com superfícies do edifício ou do ar ambiente nem se decompor durante as medições.

Nenhum gás preenche todos os requisitos referidos anteriormente, mas vários gases são utilizados com sucesso como marcadores.

Antes de iniciar a análise do gás traçador, é importante sempre verificar que o ar e em torno do edifício em que a análise deve ser realizada não contém nenhum do gás marcador que pretende utilizar, ou qualquer outro gás que é susceptível de interferir com a medição do gás marcador pretendido. Se o ar é encontrado para conter um gás traçador destinado ou interferir provavelmente um gás traçador alternativa deve ser escolhida.

<i>Nome</i>	<i>Fórmula química</i>	<i>Peso molecular [g/mol]</i>	<i>Densidade / Densidade do ar</i>	<i>Concentração exterior [ppm]</i>	<i>Limite mínimo de detecção [ppm]</i>	<i>Limite de exposição permitido<sup>(g)</sup> [ppm]</i>
Dióxido de carbono <sup>(a)</sup>	CO <sub>2</sub>	44	1,53	360	3 <sup>(e)</sup>	5000
Óxido nítrico ou Protóxido de azoto <sup>(b)</sup>	N <sub>2</sub> O	44	1,53	0,315	0,05 <sup>(e)</sup>	25 - 100
Hexafluoreto de enxofre	SF <sub>6</sub>	146	5,10	0,85 - 1,5x10 <sup>-6</sup>	0,005 <sup>(e)</sup>	1000
Perfluorobenzeno - PB <sup>(c)</sup>	C <sub>6</sub> F <sub>6</sub>	186	6,4 <sup>(d)</sup>	< 1x10 <sup>-6</sup>	5x10 <sup>-5</sup> <sup>(f)</sup>	-
Perfluorometilbenzeno - PMB <sup>(c)</sup>	C <sub>7</sub> F <sub>8</sub>	236	8,1 <sup>(d)</sup>	< 1x10 <sup>-6</sup>	5x10 <sup>-5</sup> <sup>(f)</sup>	-

Notas:

- a:** deve ser usado com especial cuidado devido às fontes normalmente presentes nos locais habitados. A concentração exterior deve ser tida em conta;
- b:** o N<sub>2</sub>O é produzido pelos aparelhos de combustão normalmente existentes nos edifícios residenciais;
- c:** gases usados na técnica da emissão constante passiva (PFT);
- d:** nas condições normais (PTN) os gases estão na fase líquida;
- e:** com detector fotoacústico;
- f:** com cromatografia gasosa e detector de captura de electrões;
- g:** concentração máxima média permitida nos locais de trabalho (8 horas de exposição);

Quadro 16 - Propriedades dos gases mais frequentes utilizados. [10]

<i>Gás traçador</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Densidade em relação ao ar</i>	<i>Concentração Máxima</i>		<i>Observações</i>
			Densidade <sup>(1)</sup> [ppm]	Segurança <sup>(2)</sup> [ppm]	
Óxido Nítrico	N <sub>2</sub> O	1,53	640	25	Gás anestésico. Amplamente utilizado como marcador
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	1,53	640	5000	Alta variação da concentração de fundo, devido aos ocupantes. Prontamente disponíveis
Hexafluoreto de Enxofre	SF <sub>6</sub>	5,11	83	1000	Deteção afectada por outros compostos halogéneos no ar. Decompõe-se em componentes tóxicos em 550 ° C. Amplamente utilizado como marcador
R - 12	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	4,18	107	1000	Deteção afectada por outros compostos halogéneos no ar. Possíveis níveis de fundo. Utilizado em trabalho de multi-traçadores. Decompõe os componentes tóxicos em altas temperaturas
R - 13B1	CF <sub>3</sub> Br	5,13	83	1000	
R - 115	CClF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	5,31	80	1000	

Notas:

(1) Em termos de densidade, a concentração máxima foi definida um nível de concentração do marcador do ar / mistura do marcador seria diferente por 0,03%. Essa diferença de densidade (equivalente a uma diferença de temperatura de  $\approx 0,1$  ° C) é pouco provável que tenha um efeito significativo sobre o fluxo de ar ou a taxa de troca de ar de um espaço;

(2) Estes limites de segurança geralmente variam com o tempo e de país para país. Deve-se sempre verificar quais os limites de exposição locais quando se utiliza qualquer gás marcador dentro de um edifício ocupado;

Quadro 17 - Outras propriedades de uma selecção gases marcadores. Adaptado de <sup>[53]</sup>

### 5.1.3. Descrição e Classificação das Técnicas

O método do gás traçador tem por objectivo “marcar” o ar que está a ser estudado de modo a que se possa “seguir-lo” no decurso da experiência e assim registar a história da sua evolução. As técnicas de gás traçador são a única maneira de fazer muitos tipos de medidas quantitativas de ventilação. Estes incluem a infiltração e as medidas da troca de ar, eficiência do exaustor e difusão de poluentes. Em outros casos, os métodos de análise de gás traçador são escolhidos em detrimento de outros métodos de análise, porque são mais convenientes e mais precisos. Este é um caso frequentemente quando se mede as taxas de fluxo de ar em sistemas de ventilação <sup>[53]</sup>.

Consiste na introdução no compartimento a ser testado de uma determinada quantidade de um gás pouco comum na atmosfera (gás traçador), registando-se a evolução da sua concentração ao longo do tempo. Em edifícios que recorram à ventilação natural, com infiltrações, o método do gás traçador é o único que pode ser usado para medir a distribuição dos fluxos pelos espaços dos edifícios.

Podem-se dividir as diferentes técnicas de implementação do método do gás traçador por categorias. Dependendo do objectivo da medição, podem ser usadas técnicas transitáveis ou permanentes/estacionárias <sup>[10]</sup>:

- técnicas transitáveis , são usadas para determinar a constante de tempo nominal,  $\tau_n$ , ou a renovação horária ( $R_{PH}$  [ $\text{h}^{-1}$ ]). O gás traçador é injectado de modo a se obterem variações da sua concentração ao longo do tempo;
- técnicas estacionárias, têm por objectivo obter ou manter uma concentração aproximadamente constante do gás traçador com o fim de estimarem directamente os fluxos de ar.

Os resultados das medições realizadas, correctamente, com o gás traçador em um sistema de ventilação podem fornecer informações sobre a quantidade de ar que entra em cada compartimento, a eficiência das unidades de recuperação de calor, a quantidade de ar extraído, que é redistribuído em condutas de abastecimento de ar, e distribuição de troca de ar nos quartos.

A constante de tempo nominal é definida como sendo a idade média do ar nos pontos de extracção do sistema de ventilação <sup>[10]</sup>:

$$q \times \tau_n = V \quad (5)$$

$q \rightarrow$  caudal volúmico de ar exterior [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$\tau_n \rightarrow$  constante de tempo nominal [s]

$V \rightarrow$  volume efectivo da zona (espaço ventilado, retirando mobília, equipamentos, etc.) [ $\text{m}^3$ ]

A renovação horária é definida como sendo o caudal volúmico de ar exterior que entra (ou sai) do espaço dividido pelo volume efectivo do espaço. Uma renovação por hora quer dizer que o volume total de ar que atravessa um espaço fechado em uma hora é igual ao volume desse espaço. No entanto, isto não quer dizer necessariamente que todo o ar interior seja completamente renovado.

Ambos os tipos de técnicas, transitárias ou estacionárias, podem ser usadas na determinação dos caudais. Contudo, o erro na determinação dos caudais por via indirecta é maior (obtendo primeiro a constante de tempo nominal - técnicas transitárias), devido à

incerteza na obtenção do volume efectivo. Dependendo do tipo de controlo e emissão, podem-se classificar as técnicas do gás traçador da seguinte forma <sup>[10] [14] [53]</sup>:

- Técnica do declive (ou concentração decrescente)

Uma quantidade de gás é injectada no espaço a medir. É estabelecida uma concentração inicial uniforme recorrendo a ventiladores. O decaimento da concentração do gás ao longo do tempo é registado de forma a obter a renovação horária (*Rph*). Trata-se de uma técnica em que se obtém grandes variações da concentração do gás traçador no tempo. Quando o gás traçador usado na técnica do declive é o dióxido de carbono produzido pelo metabolismo dos ocupantes, as medições da concentração em função do tempo iniciam-se no instante de saída dos ocupantes do espaço em estudo.

A taxa de renovação do ar, nesta técnica, é expressa pela equação (6):

$$N = \frac{\ln C(0) - \ln C(\tau_1)}{\tau_1} \quad (6)$$

$N \rightarrow$  taxa de renovação do ar [ $\text{h}^{-1}$ ]

$C(0) \rightarrow$  concentração em tempo = 0 [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]

$C(\tau_1) \rightarrow$  concentração em tempo =  $\tau_1$  [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]

$\tau_1 \rightarrow$  período total de medição [h]

O único equipamento necessário para este método de medição é um monitor de gás, uma garrafa de gás traçador e uma ventoinha de mistura. Isso torna o método mais barato e fácil de executar. É a técnica mais usada, mas tem como desvantagem a pequena duração do ensaio pelo que a taxa de renovação de ar obtida é característica somente daquele intervalo de tempo;

- Técnica da fonte (ou concentração crescente)

O gás é injectado a uma taxa constante e a variação da concentração ao longo do tempo é registada. A técnica da fonte só se aplica enquanto a concentração crescer;

- Técnica da emissão constante

O gás é injectado a uma taxa constante e somente se aplica a técnica após a obtenção de uma concentração aproximadamente constante (fase final da técnica da fonte). A concentração do gás traçador vai aumentando ao longo do tempo. A curva de crescimento obtida é tanto mais acentuada quanto maior for a taxa de produção do gás traçador por unidade de volume do espaço e quanto menor for a taxa de renovação,  $R_{ph}$ .

A taxa de renovação,  $N$ , é dada pela seguinte expressão:

$$N = \frac{F}{V \times C} \quad (7)$$

$N \rightarrow$  taxa de renovação do ar [ $h^{-1}$ ]

$F \rightarrow$  taxa de injeção do gás traçador no compartimento [ $m^3/h$ ]

$V \rightarrow$  volume efectivo da zona (espaço ventilado, retirando mobília, equipamentos, etc.) [ $m^3$ ]

$C \rightarrow$  concentração do gás traçador no ar do compartimento [ $m^3/m^3$ ]

Este método é usado para medições de longo prazo, para a medição do fluxo de ar através de ductos de ventilação e são medidas contínuas da taxa de renovação do ar em zonas singulares;

- Técnica da emissão constante com emissão e recolha passiva (PFT)

É uma variante de recolha passiva, normalmente designada por método PFT (Perfluorcarbon tracer). O gás traçador normalmente utilizado é o perfluorbenzeno (PB) ou um seu derivado, o perfluormetilbenzeno (PMB). Esta técnica consiste na libertação contínua do gás traçador por cápsulas emissoras, dentro das quais se encontra no estado líquido. A substância traçadora é espalhada no meio ambiente por difusão das suas moléculas pela membrana permeável das cápsulas ou através de tubos capilares, nos quais, numa versão mais recente, tem sido introduzido um fio metálico para mais facilmente controlar a emissão.

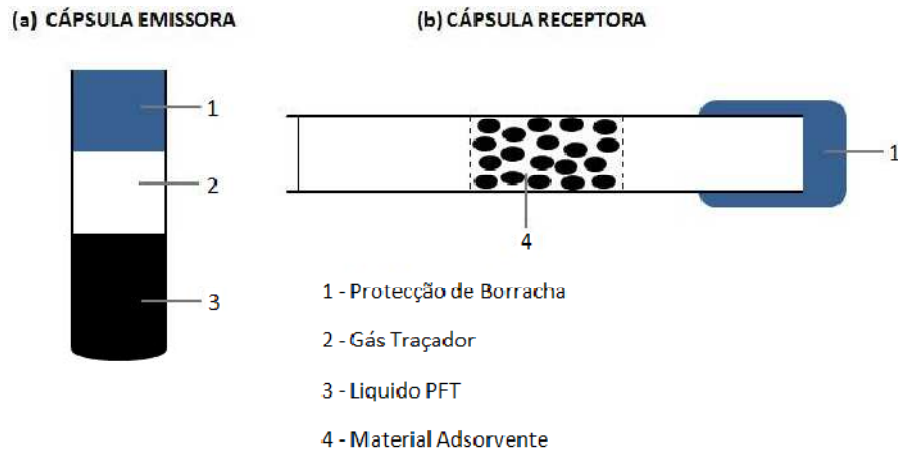


Figura 47 - Cápsulas da técnica PFT. <sup>[14]</sup>

- Técnica da emissão pulsada (ou pulso)

Uma pequena quantidade de gás é injectada no espaço. A evolução da concentração do gás ao longo do tempo é registada. Devido à pequena quantidade de gás aplicada, não é aconselhada a utilização desta técnica para o cálculo das renovações de ar, quando estas são elevadas no espaço em estudo;

- Técnica da concentração constante

Este método é usado para as medições de ar contínuo da taxa de renovação do ar em uma ou mais zonas. É particularmente útil para a realização de análises em prédios ocupados.

O gás é injectado, sob controlo, no espaço de modo a que se obtenha uma concentração constante ao longo do tempo. A medição do gás traçador na zona é medida por um monitor de gás. Esta informação é então enviada para um computador que controla a quantidade de gás traçador "administrado" para a zona a fim de manter sua concentração constante. Uma pequena ventoinha é normalmente usada para ajudar a misturar o marcador com o quarto de ar. Na maioria dos casos, no entanto, o ar em cada zona não tem de estar perfeitamente misturados. Desde que a concentração do gás traçador na zona é constante, ao longo do tempo, a equação da continuidade se reduz a:

$$N(\tau) = \frac{F(\tau)}{V \times C} \quad (8)$$

$N \rightarrow$  taxa de renovação do ar [ $h^{-1}$ ]

$F \rightarrow$  taxa de injeção do gás traçador no compartimento [ $m^3/h$ ]

$V \rightarrow$  volume efectivo da zona [ $m^3$ ]

$C \rightarrow$  concentração em tempo  $\tau$  [ $m^3/m^3$ ]

Pode ser usada para medições prolongadas. Este método oferece duas grandes vantagens: não só pode ser usado para obter uma precisão de longo prazo da taxa de renovação do ar em situações em que a taxa varia mas também pode ser usada para documentar essas variações em detalhe. Tal como acontece com o método de emissão constante, os custos do gás traçador pode ser uma consideração importante;

As duas primeiras técnicas são complementares, isto é, consegue-se retirar a mesma informação realizando um procedimento ou outro, sendo, preferível, na prática, a técnica do declive, já que nesta não se necessita do conhecimento do valor da massa do gás traçador injectado.

No quadro seguinte mostram-se as técnicas mais utilizadas, evidenciando-se o tipo de emissão, recolha, o resultado directo, o tipo de medição e o custo.

<i>Técnica</i>	<i>Emissão</i>	<i>Recolha</i>	<i>Resultado directo</i>	<i>Medições contínuas</i>	<i>Custos</i>
T1: Declive	Pequena emissão (antes do ensaio)	Contínua	$R_{ph}$ ou $\tau_n$	Não	Moderado
T3: Emissão constante	Constante	Contínua	q	Sim <sup>(c)</sup>	Moderado
T4: PFT	Constante (passiva)	Contínua (passiva)	$R_{ph}^{local(a)}$ ou $\tau_p^{(b)}$	Não	Moderado
T6: Concentração constante	Controlada	Contínua	q	Sim <sup>(c)</sup>	Alto
Notas: <b>a:</b> taxa local de ventilação específica [ $h^{-1}$ ]; <b>b:</b> idade média do ar num determinado ponto [h]; <b>c:</b> à excepção do caso de multi-zona com um único gás;					

Quadro 18 - Técnicas utilizadas. <sup>[10]</sup>

#### 5.1.4. Metodologia

Assim como existem diversas classificações de técnicas do gás traçador, cada uma delas tem a sua metodologia. Seguidamente apresenta-se a metodologia de algumas das técnicas de classificação:

- *Método do gás traçador - técnica do declive (ou concentração decrescente)* <sup>[10]</sup>

Alguns dos procedimentos aconselhados para a execução correcta desta técnica experimental são:

- antes de injectar o gás, é necessário verificar a concentração de “fundo” do gás a medir de maneira a corrigir as medições, caso seja necessário;
- usar um ventilador rotativo (30 W) em cada zona, a rodar a baixa velocidade, posicionado a jusante da sonda de emissão de gás e direccionado para o centro do compartimento. Caso os compartimentos sejam de maiores dimensões (ex.: sala) devem ser utilizados dois ventiladores;
- a emissão de gás pode ser colocada no ventilador rotativo devidamente fixada;
- a recolha do gás pode ser localizada a metade da altura da zona e afastada da emissão e de janelas;
- após a emissão do gás e com o ventilador a funcionar, devemos esperar 2 a 3 minutos até se iniciar o ensaio propriamente dito (tempo estimado para se obter uma concentração uniforme);
- cada tubo de recolha ou emissão deve ser usado somente numa destas funções.

Para determinar a concentração de um gás num espaço recorre-se, frequentemente, a um dispositivo de medição baseado no princípio da medição fotoacústica.

O sistema de medição funciona através do princípio da espectroscopia fotoacústica de radiação infravermelha. Para efectuar esta técnica é recolhida uma amostra de ar e mais tarde é retida numa câmara fechada, que é iluminada por um feixe de radiação infravermelha pulsada que passou através de um filtro óptico numa banda estreita do espectro. A irradiação reflecte-se num aumento da amplitude das flutuações de pressão no interior da câmara que é proporcional à concentração do componente, ou seja, as moléculas do componente analisado absorvem energia e aumentam a agitação molecular e a respectiva temperatura. Estas flutuações de temperatura provocam

oscilações de pressão que são medidas por meio de dois microfones de alta exactidão, colocados em paredes opostas na câmara.

Como é um método de elevada sensibilidade, pode-se obter a concentração de gases com um nível bastante elevado de fiabilidade. Seguidamente apresenta-se, esquematicamente, o princípio de funcionamento descrito.

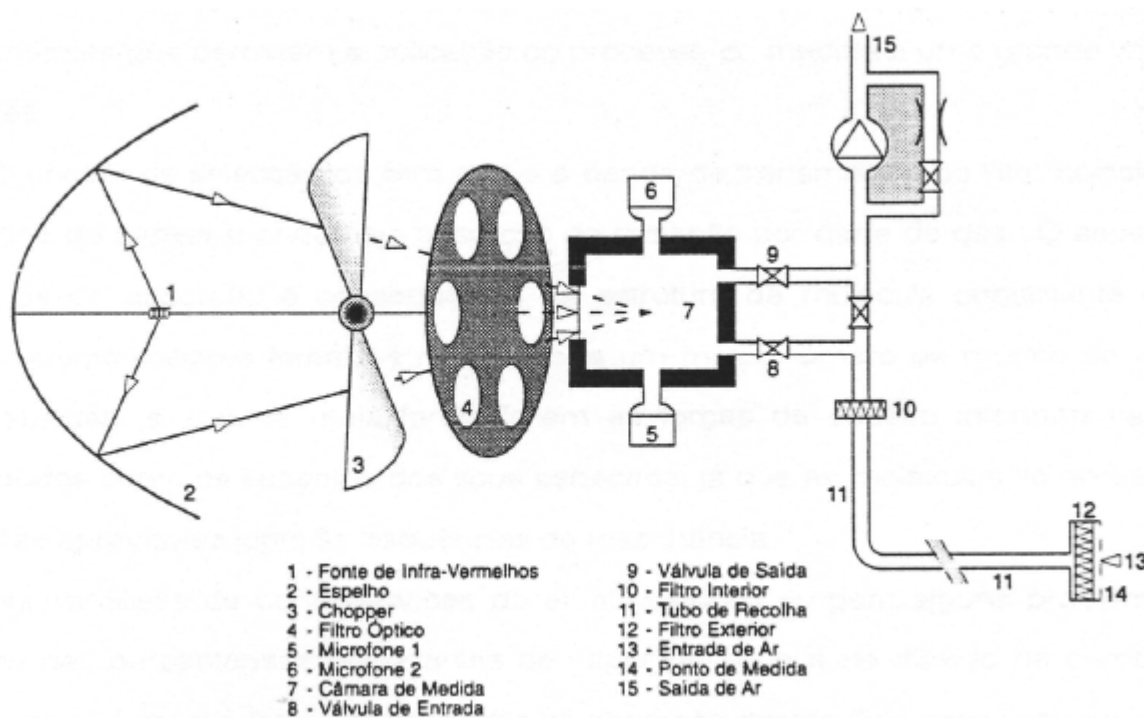


Figura 48 - Representação esquemática do princípio de funcionamento do analisador de gases. <sup>[10]</sup>

- *Método do gás traçador - técnica da emissão constante* <sup>[10]</sup>

Procedimentos aconselhados para a aplicação desta técnica:

- registar no mínimo cinco valores;
- as leituras devem começar aproximadamente entre  $3 \times \tau_n$  a  $5 \times \tau_n$  e espaçadas de 5 a 10 minutos.

A emissão de gás traçador deve-se realizar nos compartimentos com maior entrada de ar e a recolha deve ser efectuada nos compartimentos com maior saída de ar. Quando a entrada e a saída não são bem definidas, como é o caso da ventilação natural, a emissão deve ser realizada num local central e a recolha deve ser em todos os compartimentos.

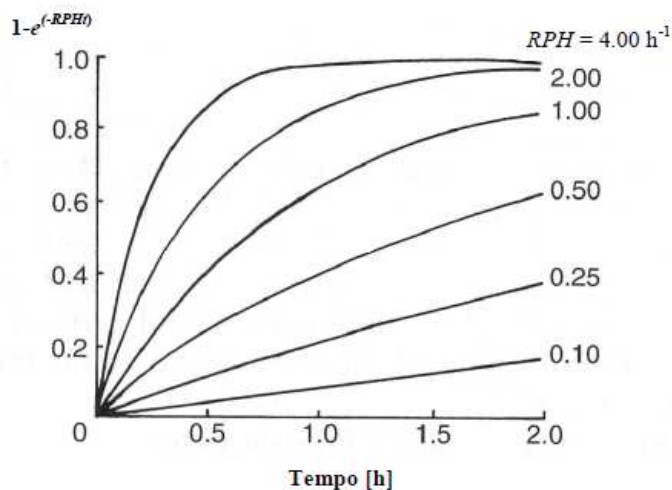


Gráfico 2 - Tempo para se atingir uma concentração de equilíbrio em função do número de renovações horárias. <sup>[10]</sup>

- *Método do gás traçador - técnica da emissão constante com emissão e recolha passiva (PFT)* <sup>[10]</sup>

Devem ser seguidos os seguintes princípios desta técnica:

- colocar, no mínimo, uma cápsula em cada compartimento com entrada directa do ar exterior, excluindo os compartimentos somente com saída de ar;
- calcular o número de cápsulas com base nas taxas de admissão de ar exterior, ou, no caso da emissão homogénea, ter em conta o volume da zona;
- posicionar as cápsulas na proximidade (0,5 - 1,0 m) das paredes exteriores ou dos elementos de insuflação de ar, mas afastadas das superfícies frias ou quentes e da radiação solar directa. É necessário conhecer a temperatura média do edifício, uma vez que a taxa de emissão é sensível a esta temperatura.

A recolha do gás é realizada passivamente, por difusão capilar, através de cápsulas receptoras contendo um adsorvente (carvão poroso).

As cápsulas receptoras têm o objectivo de recolher uma amostra representativa do ar que sai do espaço em questão. Caso seja um número limitado de locais de extracção, colocam-se as cápsulas receptoras junto a estes, já no caso de não se conhecer o número de extracções, ou o seu local, as cápsulas receptoras devem ser colocadas no centro dos compartimentos.

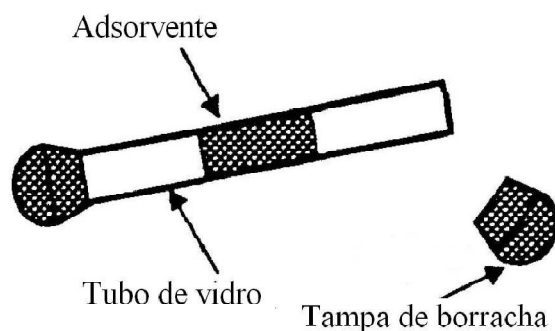


Figura 49 - Exemplo de uma cápsula receptora. <sup>[10]</sup>

Primeiramente o adsorvente contido nas cápsulas (carvão poroso) é misturado com 1 ml de tolueno purificado. Em seguida, uma parte da solução de tolueno (1 ml) é injectada para o cromatógrafo com o objectivo de separar os vários gases da amostra. Estes gases são separados, recorrendo a um gás de arrasto (hélio), de acordo com a afinidade com a fase estacionária líquida. Assim, os gases com maior afinidade migram a uma velocidade mais baixa que os gases com menor afinidade.

Por fim quantifica-se o gás traçador da amostra, realizada por um detector de captura de electrões. Neste detector, um cátodo de níquel radioactivo emite electrões, de forma a manter uma corrente contínua constante, que são recebidos pelo ânodo de platina. Os gases capturam estes electrões, baixando a corrente eléctrica recebida pelo ânodo. Este abaixamento leva a que a frequência de emissão de electrões aumente e esta é proporcional à quantidade de gás na amostra.

- *Método do gás traçador - técnica da concentração constante* <sup>[10]</sup>

A implementação desta técnica requer um algoritmo que possa controlar a taxa de injeção de gases, para que se mantenha uma concentração constante numa dada zona do edifício.

Esta técnica requer uma recolha periódica e sequencial da amostra, e posteriormente é necessário recorrer à análise e cálculo da taxa de injeção para manter a concentração desejada. No caso de um sistema de controlo totalmente automatizado, este pode ser programado para trabalhar e armazenar dados durante um período alargado de tempo, permitindo calcular continuamente o caudal de ar exterior “instantâneo” em cada zona.

- *Método do gás traçador - utilizando o dióxido de carbono produzido pelos próprios ocupantes* <sup>[14]</sup>

As medições decorrem ao longo de um período de tempo e são realizadas de modo a não causar alterações significativas na rotina dos moradores, não só por se pretender causar o mínimo incómodo mas também para se obter resultados baseados nos hábitos diários dos ocupantes.

Para a medição da temperatura e da humidade relativa do ar exterior podem-se usar diversos aparelhos, tais como o que se apresenta em seguida.



Figura 50 - Termo - higrómetro digital. <sup>[14]</sup>

A concentração de dióxido de carbono no interior dos compartimentos é medida usando um detector por absorção não - dispersiva de infravermelhos, modelo Telaire 7001.



Figura 51 - Detector de CO<sub>2</sub>. <sup>[14]</sup>

Os sensores de CO<sub>2</sub> são colocados a uma altura de 70 cm e localizados de modo a que os aquecedores existentes e a eventual estagnação do ar não influenciem os valores das medições.

## 5.2. MÉTODO DE PRESSURIZAÇÃO

O método de pressurização tem como principal fundamento a medição da área de fendas e de outros indicadores que permitem fazer comparações entre edifícios com maior ou menor facilidade de trocas de ar com o exterior <sup>[54]</sup>.

Através deste método retiram-se valores essenciais para proceder com a análise, mas também é possível prever valores médios da taxa de infiltração sazonal num determinado edifício, através de correlações apropriadas.

### 5.2.1. Princípios do Método

Este método consiste na imposição de diferenciais de pressão conhecidos entre os dois lados de um elemento construtivo, medindo os caudais e estabelecendo uma correlação ( $q$ ,  $\Delta p$ ) entre os resultados obtidos <sup>[10]</sup>.

A quantificação das infiltrações através das fendas é uma tarefa difícil se não impossível, pois é difícil identificar e caracterizar todas as fendas existentes na envolvente de um edifício. Para ultrapassar esta dificuldade, correntemente, ensaiam-se elementos construtivos “in situ” ou em laboratório.

Existem vários métodos quantitativos para avaliar a permeabilidade de componentes. O mais simples recorre somente ao uso de um ventilador, é designado por método indirecto e consiste essencialmente em obter a diferença de caudal entre duas situações distintas. Considerando um edifício na sua globalidade, é possível estimar directamente a área total das fendas e a respectiva permeabilidade. Este ensaio é conhecido por ensaio da “porta-ventiladora”.

A porta ventiladora é composta pelas seguintes partes <sup>[55]</sup>:

- ventilador e respectivos acessórios calibrados em túnel de vento;
- manómetro diferencial com escala 0 - 60 Pa;
- manómetro diferencial com escala 0 - 150 Pa;
- manómetro diferencial com escala 0 - 500 Pa;
- tubos flexíveis de ligação e acessórios;
- porta extensível com caixilho e tela impermeável;
- grampo de suporte para manómetros;
- barra extensível para fixação do caixilho/porta.



Figura 52 - Exemplo de uma porta ventiladora. <sup>[10]</sup>

### 5.2.2. Metodologia

O ensaio da “porta-ventiladora” consiste em substituir uma das portas ou janelas do compartimento a ser testado. O ventilador, quando está em funcionamento, cria um diferencial de pressões positivo ou negativo entre o interior e o exterior do edifício, consoante esteja a ser pressurizado ou despressurizado. Este ensaio pode ser usado para localizar e reparar as fendas da envolvente, comparar a permeabilidade ao ar entre edifícios ou para verificar a eficiência da reabilitação da envolvente (comparando os valores das infiltrações antes e após a reabilitação), mas, actualmente, é mais usado para, a partir dos valores obtidos das infiltrações, realizar estimativas do consumo de energia e da qualidade do ar interior. Estas estimativas podem ser usadas para comparar normas ou para fundamentar programas ou políticas energéticas ou da qualidade do ar. Outra aplicação do método é a previsão de valores médios da taxa de infiltração ( $R_{ph}$ ). O princípio da medição é o apresentado na figura 53.

O ventilador quando em funcionamento cria uma sobrepressão, ou uma depressão, no interior do edifício, sendo então possível obter curvas (em escala linear). As duas curvas, a de pressurização e a de despressurização são distintas. Isto deve-se ao comportamento diferente de certas fendas, que, conforme a pressão é aplicada de um ou de outro lado, são comprimidas ou descomprimidas, tendendo a contrair-se ou expandir-se. Estas curvas características permitem conhecer qual o caudal do ar trocado para um determinado diferencial de pressões. Após a obtenção das curvas é necessário ajustar uma equação a cada uma das curvas, de pressurização e despressurização.

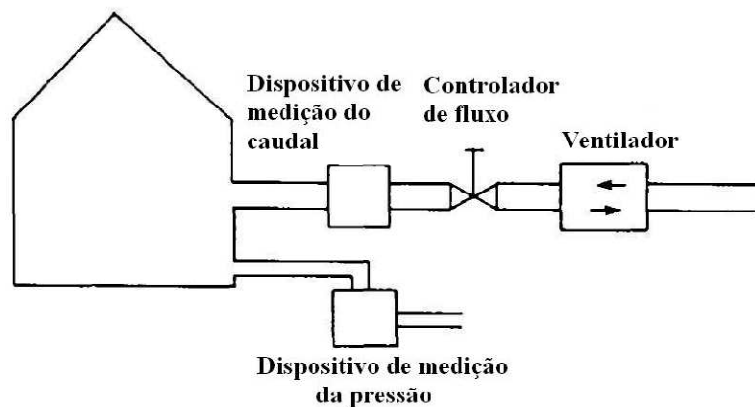


Figura 53 - Esquema do princípio do método da porta ventiladora. [10]

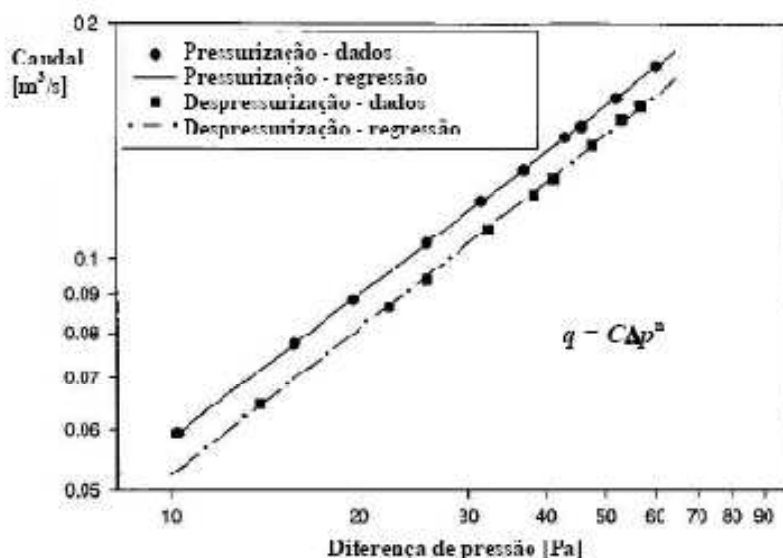


Gráfico 3 - Gráfico de permeabilidade ao ar. [10]

O intervalo de medição, normalmente, situa-se entre os 10 e os 60 Pa, com incrementos entre 5 e 10 Pa e com medição no mínimo de 5 pontos. Não se medem caudais para diferenças de pressão inferiores a 10 Pa de forma a minimizar a influência criada pelo vento e pelo diferencial térmico aquando da realização dos ensaios (para condições climáticas normais, a pressão induzida pelo efeito combinado das diferenças de temperatura e do vento anda na gama de  $\pm 10$  Pa). Também se recomenda a abertura das janelas e portas dos apartamentos adjacentes. A pressão induzida anda na gama de  $\pm 10$  Pa e tal deve-se essencialmente a dois motivos [54]:

- Para  $|\Delta P| < 10$  Pa, os erros nas medições tornam-se importantes, pois podem conduzir a resultados com uma margem de confiança reduzida;
- os valores medidos do diferencial de pressões, gerado pelo ventilador através da envolvente do edifício, e do caudal de ar são da mesma ordem de grandeza dos

respectivos valores induzidos pelas infiltrações numa situação normal. Assim sendo, não se pode quantificar qual a contribuição real do ventilador nos valores medidos. Para diferenciais de pressão fora da gama dos  $\pm 10$  Pa, a influência do ventilador é dominante, podendo-se desprezar o efeito das infiltrações.

Os ensaios sofrem a influência das condições atmosféricas exteriores. Assim sendo, só se deve levar a efeito este tipo de ensaio quando o produto da diferença de temperatura entre o exterior e o interior pela altura do edifício for menor ou igual que  $200 \text{ m}^\circ\text{C}$  ou menor que  $500 \text{ mK}$  (os critérios de ensaio variam consoante a norma). As condições preferenciais de ensaio devem ser tais que a velocidade do vento se situe entre 0 e 2 m/s e a temperatura exterior se situe entre 5 e  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 5.3. ANEMOMETRIA

O método da anemometria destina-se à medição de caudais de ar trocados entre os compartimentos e baseia-se no facto de que, sob as condições de estacionaridade, as diferentes temperaturas podem integrar-se de forma a obter um caudal que passa em cada direcção <sup>[54]</sup>.

Quando são conhecidas as dimensões das portas e as diferenças de temperaturas entre compartimentos é possível calcular os caudais de ar que se cruzam nos dois sentidos. A implementação deste método passa pela medição das velocidades do ar em cada uma das passagens existentes nas habitações. Assim sendo, este facto constitui um dos inconvenientes deste método, visto que o próprio equipamento (anemómetros) provoca alterações ao escoamento do ar.

O método apresenta ainda uma dificuldade adicional e que tem a ver com o próprio equipamento, pois não permite medir os caudais de ar que ocorrem nas fendas. Isto deve-se à dimensão da ponta de prova do anemómetro que pode ultrapassar o valor da largura das fendas, não permitindo obter um valor representativo da velocidade do ar.

Existem diversos tipos de anemómetros e cada um com as suas características. Em seguida apresenta-se alguns dos aparelhos utilizados para executar este método:

- *Medidor de Fluxo de Ar FLUKE 922*



Figura 54 - Medidor de fluxo de ar FLUKE 922. <sup>[56]</sup>

Este aparelho, medidor de pressão, temperatura e velocidade do ar com tubo Pitot, tem as seguintes características <sup>[56]</sup>:

- mede a pressão diferencial e estática de:  $\pm 4000$  Pa,  $\pm 16,00$  em H<sub>2</sub>O,  $\pm 400,0$ mm H<sub>2</sub>O,  $\pm 40,00$  mbar e  $\pm 0,6000$  PSI;
- medição de velocidade do ar de 0,000 a 80 m/s com tubo Pitot
- medição de fluxo de ar de 0 a 99,999 (cfm, m<sup>3</sup>/hr, l/s)
- medição de temperatura de 0 a 50 °C
- exactidão: 1% (pressão); 2,5% (m/s); 0,1 °C
- definição da forma e tamanho do ducto pelo usuário
- display com retro-iluminação
- armazena até 99 leituras

- *Anemómetro METERMAN TMA10*



Figura 55 - Anemómetro METERMAN TMA10. <sup>[56]</sup>

O medidor de velocidade, fluxo e temperatura com sensor tipo ventoinha tem as seguintes características [56]:

- velocidade do ar de 0,40 a 25,00 m/s e de 125 a 4900 pés/min
- fluxo de ar de 0,01 a 99,99 m<sup>3</sup>/s e de 1,0 a 9999 pés<sup>3</sup>/min
- temperatura do ar de 0,0 °C a 50,0 °C
- precisão: 2% (velocidade e fluxo) e 0,8°C (temperatura)
- área de superfície da entrada para a medida do fluxo de ar
- sensor de aletas flexíveis com 70 mm de diâmetro
- termistor para medidas da temperatura
- display duplo de 4 dígitos
- média de movimento contínuo por até 2 horas
- média da velocidade do ar para pontos múltiplos

- *Anemómetro TESTO 425*



Figura 56 - Anemómetro TESTO 425. [56]

Este aparelho tem as seguintes características [56]:

- temperatura do ar de - 20,0 a 70,0 °C com sensor NTC
- velocidade do ar de 0 a 19,99 m/s
- display retro-iluminado
- empunhadura telescópica: máx. 820 mm
- certificação de calibração ISO

#### 5.4. OUTROS MÉTODOS DE ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR INTERIOR

A qualidade do ar interior pode ser avaliada por diversos aparelhos. Não é só através de métodos específicos que se conseguem analisar este parâmetro tão importante para a saúde

dos ocupantes de edifícios habitacionais. A qualidade do ar interior também pode ser analisada através do controlo dos factores que o poluem. Em seguida apresento alguns dos produtos, na área de amostragem e análise, de qualidade de ar interior que visam dar cumprimento ao Decreto-Lei 79/2006 <sup>[57]</sup>. Os equipamentos apresentados são todos portáteis, todos de medida directa e apropriados para a gama de medida e precisão exigida para avaliação deste.

Alguns dos aparelhos que avaliam os factores de poluição do ambiente interior são <sup>[57]</sup>:

- *Monitorização de Partículas - fracção PM<sub>10</sub>*



Figura 57 - Monitor de partículas PM<sub>10</sub>, modelo EPAM 5000, marca EDC. <sup>[57]</sup>

Este monitor portátil é de leitura directa, para ar interior, ar ambiente e higiene industrial. Faz a separação das fracções PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> e TSP e dá as suas concentrações em tempo real em mg/m<sup>3</sup>.

Gama de medida é um valor entre 0,001 a 20,0 mg/m<sup>3</sup>.

Resolução do aparelho é de 0,001 mg/m<sup>3</sup>.

Precisão é de 0,003 mg/ m<sup>3</sup>.

- *Monitorização de Compostos Orgânicos Voláteis - COV's*

Para monitorizar os compostos orgânicos voláteis é possível utilizar um aparelho como o apresentado na figura 50, que incorpora um detector de alta sensibilidade que permite leituras a nível dos ppb, ppm ou mg/m<sup>3</sup>.

Gama de medida varia entre 1 ppb a 40 ppm.

Resolução do aparelho é de 10 ppb.

Precisão é de 1% de calibração.



Figura 58 - Monitor de COV's, modelo 2020 ppb-PRO, marca Photovac. [57]

- *Monitorização de Formaldeído*



Figura 59 - Monitor portátil de formaldeído, modelo Formaldemeter htv, marca PPM. [57]

O monitor portátil para medição instantânea de formaldeído, temperatura e humidade relativa em ar ambiente inclui técnicas de compensação de humidade, de modo a medir, com precisão, baixos níveis de formaldeído, mesmo em condições extremas. Este inclui um padrão de verificação e calibração de formaldeído. As leituras são em ppm e  $\text{mg}/\text{m}^3$ .

Gama de medida varia entre 0 a 10 ppm.

Resolução do aparelho é de 0,01 ppm.

Precisão é de 2%.

- *Monitorização de Ozono*



Figura 60 - Monitor portátil de ozono, série 200, marca Aeroqual. [57]

Este aparelho contém uma bomba de aspiração da amostra (amostragem activa). As leituras aparecem em ppm e  $\text{mg/m}^3$ .

Gama de medida está entre 0 e 0,5 ppm.

Resolução é de 0,001 ppm.

Exactidão:  $< \pm 0.008$  ppm - 0 e 0.1 ppm.

$< \pm 10\%$  - 0.1 e 0.5 ppm.

- *Monitorização de  $\text{CO}_2$ , CO, Temperatura, Humidade e Velocidade do Ar*



Figura 61 - Monitor Multifunções, para QAI e VAC modelo 435-2, marca Testo, com sonda QAI ( $\text{CO}_2$ , temperatura e humidade) e sonda de CO. [57]

O monitor permite ainda incorporar sondas de velocidade ambiente.

Gama de medida está entre: 0 a  $+ 50 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

0 a  $100 \% \text{ HR} \pm 2\% \text{ HR}$ ;

0 a  $10.000 \text{ ppm de } \text{CO}_2 \pm 3\%$ ;

0 a  $500 \text{ ppm de CO} \pm 3\%$ .

- *Monitorização de Microrganismos, Bactérias e Fungos*



Figura 62 - Amostrador microbiológico de ar ambiente da marca PBI. <sup>[57]</sup>

O amostrador microbiológico serve para o controlo microbiológico do ar, avaliação de bactérias e fungos no ar ambiente.

O princípio de funcionamento está de acordo com o método de impacto sobre Agar ou o método tipo Anderson.

É muito versátil.

- *Determinação do Grau de Limpeza das Conduitas de Ar, CLEAN TEST,*

O Clean Test é um sistema multi-funções para amostragem de partículas. É especialmente recomendado para a avaliação da concentração de partículas depositadas nas condutas.



Figura 63 - Equipamento para determinação do grau de limpeza das condutas de ar, CLEAN TEST, marca ROBIMECH. <sup>[57]</sup>

## 5.5. CONCLUSÕES GERAIS

Os métodos utilizados para a determinação da qualidade do ar interior dos edifícios são: o método do gás traçador, o método da pressurização e o método da anemometria. Sendo que o método mais utilizado em Portugal é o método do gás traçador.

Na apresentação deste método referiram-se diversas técnicas, do qual pudemos retirar as seguintes conclusões:

- a técnica da concentração constante é adequada para determinar caudais “instantâneos” de ar novo em cada compartimento, mas é uma técnica bastante intrusiva;
- a técnica do declive (ou concentração decrescente) é adequada para obter resultados rápidos, permitindo a comparação de resultados entre diversos momentos, habitações ou sistemas de ventilação;
- a técnica da emissão constante com emissão e recolha passiva (PFT) é adequada para obter resultados médios com a vantagem de ser uma técnica não intrusiva;

O método de pressurização, não é muito aplicado no nosso país, é um auxiliar precioso na determinação da permeabilidade da envolvente dos edifícios, o que permite fazer comparações relativas da permeabilidade das habitações e da eficácia das operações de reabilitação.

Existem também um conjunto de equipamentos portáteis que permitem analisar, de uma forma mais expedita, os diferentes parâmetros de qualidade do ar.