



Rafael Samelo Cruz

ESTUDO DE SENSIBILIDADE SOBRE OS MECANISMOS DE VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFÍCIOS — IMPORTÂNCIA DA CARATERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

SENSITIVITY STUDY ON THE MECHANISMS OF NATURAL VENTILATION —
IMPORTANCE OF EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pelo Professor Doutor Nuno Simões

Coimbra, 06 de setembro de 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Rafael Samelo Cruz

ESTUDO DE SENSIBILIDADE SOBRE OS MECANISMOS DE VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFÍCIOS — IMPORTÂNCIA DA CARATERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

SENSITIVITY STUDY ON THE MECHANISMS OF NATURAL VENTILATION — IMPORTANCE OF EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pelo Professor Doutor Nuno Simões

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

Coimbra, 06 de setembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar o meu agradecimento a todos os que me ajudaram na realização deste trabalho.

Ao Professor Nuno Simões pela orientação, apoio, incentivo e colaboração fornecidos e pelos conhecimentos transmitidos.

Ao ITeCons e em particular ao Luís Ramos, Rúben Raimundo, António Vieira e os restantes colaboradores do ITeCons pela colaboração.

Este trabalho teve ainda o apoio do projeto NEXTSTEP (POCI-01-0247-FEDER-018006) para a realização da campanha laboratorial.

À minha família e aos meus amigos pelo apoio constante.

Colaboração institucional



RESUMO

Hoje em dia, devido às maiores necessidades de conforto térmico exigidas pelos utilizadores dos edifícios, existe uma maior preocupação pela redução das perdas energéticas dos mesmos. Uma das medidas de melhoria consiste em diminuir as infiltrações de ar da envolvente e, conseqüentemente, aumentar a estanquidade dos edifícios. Porém, aumentar a estanquidade dos edifícios conduz a uma degradação da qualidade do ar interior (QAI). De modo a encontrar um ponto de equilíbrio entre a eficiência energética o conforto térmico e a QAI, começaram a ser introduzidos sistemas de ventilação natural que aumentam as taxas de renovação de ar e ventilam o edifício de forma controlada

Mesmo com os avanços tecnológicos dos sistemas de ventilação, estimar a taxa de ventilação do edifício é complexo, pois esta depende de parâmetros que são variáveis ao longo do tempo e devido às incertezas associadas com o desempenho das várias componentes relacionadas com a ventilação. Assim sendo, é importante analisar de entre os vários parâmetros, quais os que têm mais influência na ventilação e, através de uma campanha experimental, caracterizar componentes e dispositivos que têm impacto na estimativa da ventilação natural dos edifícios através de ensaios laboratoriais segundo normas referenciadas.

Os parâmetros analisados incluem variáveis tais como a região, classe de exposição ao vento, presença de obstáculos, localização da fração no prédio, classe de permeabilidade ao ar das janelas, etc.

A campanha experimental compreende ensaios de determinação de caudais de ar de aberturas fixas com diferentes secções, numa abertura com uma grelha fixa instalada e em duas portas (nomeadamente com grelhas acopladas). Inclui uma parte em que se avalia os equipamentos utilizados.

Avaliou-se também o impacto da incerteza de medições, nomeadamente de grelhas fixas e portas e janelas, na estimativa das taxas de renovações horárias de edifícios.

Palavras-chave: Ventilação, taxas de renovação de ar, sistemas de ventilação, qualidade do ar interior e caudal de ar.

ABSTRACT

Nowadays, due to the bigger thermal needs required by users of buildings, there has been a greater demand for the reduction of energy losses in buildings. One of the solutions is to reduce the air leakage of the envelope and, consequently, increase the airtightness of buildings. However, increasing the tightness of buildings leads to a deterioration of indoor air quality, IAQ, which brings several problems for the occupants and to the building itself.

To find a balance between energy efficiency, thermal comfort and IAQ, natural ventilation systems were developed to increase the air renewal rates and to ventilate the building without compromising the airtightness of buildings.

But even with the advances of the ventilation systems, estimating the rate of ventilation of the building as a whole is a difficult and complex process because it depends on parameters that are not constant throughout the year and due to the uncertainties associated with the performance of various components related to ventilation. It is necessary then, through experimental campaign, characterize components and devices that have an impact on the estimate of the natural ventilation of buildings through laboratory tests according to referenced standards.

The parameters analyzed include variables such as region, wind exposure class, the presence of obstacles, location of the building, air permeability class of windows, etc.

The experimental campaign comprises tests for determination of air flow rates of fixed openings with different sections, in an opening with a fixed grid installed and of two doors (in particular with coupled grids). Includes a part on which evaluates equipment used.

Also evaluated the impact of uncertainty of measurements, in particular of fixed grilles and doors and windows, in the estimation of hourly rates of renewals of buildings.

Keywords: Ventilation, air renewal rates, ventilation systems, indoor air quality and air flow.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	1
RESUMO.....	1
ABSTRACT.....	1
ÍNDICE.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento e motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da dissertação.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Sustentabilidade dos edifícios.....	4
2.2 Estanquidade ao ar dos edifícios.....	5
2.3 Degradação da qualidade do ar interior.....	8
2.4 Sistemas de ventilação.....	9
2.4.1 Ventilação mecânica.....	9
2.4.2 Ventilação natural.....	10
2.4.3 Ventilação híbrida.....	13
2.4.4 Considerações finais.....	13
2.5 Janelas.....	15
2.6 Grelhas de ventilação.....	16
2.7 Exatidão na medição de caudal de ar.....	18
2.7.1 Instrumentos de medição de caudal.....	19
2.7.2 Placa de orifício.....	20
2.7.3 Exemplo de cálculo das placas de orifício.....	23
3. ESTUDO PARAMÉTRICO DE ESTIMATIVA DE TAXAS DE RENOVAÇÃO EM EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS.....	27
3.1 Descrição do método de cálculo.....	27
3.1.1 Introdução.....	27
3.1.2 Aspetos gerais.....	28
3.1.3 Enquadramento do edifício.....	28
3.1.4 Permeabilidade ao ar da envolvente.....	31
3.1.5 Sistemas de ventilação.....	32

3.2	Identificação de algumas soluções de dispositivos de ventilação existentes no mercado.....	32
3.3	Caso de estudo.....	36
3.3.1	Descrição do edifício de referência.....	36
3.3.2	Região e rugosidade.....	38
3.3.3	Alteração das características dimensionais do edifício em estudo.....	39
3.3.4	Permeabilidade ao ar da envolvente.....	41
3.3.5	Conduas de admissão e de evacuação natural do ar.....	43
3.3.6	Conduas de insuflação ou de evacuação mecânica do ar.....	45
3.3.7	Dimensionamento de grelhas de ventilação comerciais.....	46
4.	CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	48
4.1	Levantamento de procedimentos de ensaio de componentes da envolvente.....	48
4.1.1	Janelas e portas.....	48
4.1.2	Ventiladores estáticos.....	49
4.1.3	Grelhas de ventilação.....	49
4.1.4	Caixas de estore.....	49
4.1.5	Ventilação mecânica.....	49
4.2	Ensaio de determinação de caudal de ar de aberturas fixas de diferentes secções e de portas.....	49
4.2.1	Procedimento de ensaio.....	49
4.2.2	Componente de cálculo.....	55
4.3	Resultados e discussão.....	55
4.3.1	Ensaio de determinação do caudal de ar de aberturas fixas de diferentes secções.....	55
4.3.2	Ensaio de determinação do caudal de ar de portas.....	60
5.	AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA INCERTEZA DAS MEDIÇÕES NA ESTIMATIVA DAS TAXAS DE RENOVAÇÕES HORÁRIAS DE EDIFÍCIOS.....	63
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e motivação

A melhoria da qualidade dos edifícios tem conduzido a uma maior estanquidade ao ar da envolvente, e conseqüentemente, a uma maior redução das infiltrações de ar na envolvente dos edifícios. A utilização de sistemas de ventilação é atualmente uma necessidade para garantir uma adequada qualidade do ar interior sem comprometer o desempenho energético do edifício. Através da ventilação, ao contrário das infiltrações de ar, o caudal de ar escoado para dentro do edifício através de sistemas de ventilação é feito de maneira controlada. Dos tipos de sistema de ventilação existentes, a ventilação natural é a desejável, visto que a renovação do ar é conseguida sem gastos energéticos.

Verifica-se que é crescente a introdução de dispositivos de ventilação na envolvente dos edifícios, nomeadamente através da sua inserção em componentes como as janelas ou paredes. No entanto, reconhece-se a dificuldade de estimar as taxas de ventilação do edifício. É necessário, por um lado, caracterizar em detalhe todos as componentes e dispositivos com influência na taxa de renovação. É necessário contemplar, ainda, nessa estimativa, todas as características do edifício e a exposição ao vento das suas envolventes. A variação das condições ao longo do tempo introduzem um elevado grau de incerteza na estimativa das taxas de ventilação nos edifícios. Uma das preocupações nos estudos de ventilação é reduzir a incerteza associada ao desempenho de todas as componentes. Uma caracterização adequada das componentes, com maior exatidão, depende da cadeia de medição de ensaios experimentais, havendo a preocupação em reduzir as incertezas de medição.

Em termos laboratoriais, a estimativa da permeabilidade ao ar de componentes e dispositivos com influência na ventilação é realizada com recurso a câmaras acopladas a ventiladores e dispositivos de medição. O equipamento no seu todo tem que permitir que se determinem, com rigor, os caudais de ar que escoam através de elementos muito ou pouco permeáveis ao ar. É de extrema relevância a existência de normas harmonizadas para realizar os ensaios laboratoriais. A motivação subjacente a este trabalho prende-se com a necessidade de avaliar a importância da caracterização experimental das componentes e dispositivos e o impacto que podem ter na estimativa da ventilação natural dos edifícios. Para esse efeito, é necessário compreender os parâmetros com maior importância nas taxas de renovação.

1.2 Objetivos

O presente trabalho teve como objetivo principal efetuar um estudo de sensibilidade acerca da ventilação nos edifícios residenciais envolvendo as seguintes tarefas:

- Realizar uma revisão bibliográfica incidindo sobretudo nos desafios da caracterização e medição de componentes e dispositivos com impacto na ventilação.
- Efetuar um estudo paramétrico em que se avalia a influência de um conjunto de variáveis na taxa de ventilação de frações de habitação.
- Identificar as variáveis que dependem de caracterização laboratorial e proceder a um levantamento das normas de ensaio de componentes e dispositivos com impacto na taxa de ventilação.
- Realizar uma campanha experimental de vários sistemas associados à ventilação de edifícios incluindo a determinação do caudal de ar de várias aberturas fixas com diferentes seções e de uma abertura com uma grelha fixa instalada. Estudar ainda portas destinadas a espaços com elevadas necessidades de ventilação. Executar ainda um estudo de validação dos equipamentos utilizados.
- Proceder a uma análise de sensibilidade em relação às incertezas das medições das componentes com influência na ventilação e o seu impacto na estimativa das taxas de renovação horária de edifícios.

1.3 Estrutura da dissertação

Além deste primeiro capítulo em que se introduz e enquadra o tema, e se apresenta a motivação e os objetivos desta dissertação, a presente dissertação encontra-se organizada em mais 6 capítulos.

O capítulo 2 engloba uma revisão bibliográfica em que se destaca a importância da ventilação na sustentabilidade energética dos edifícios e na sua qualidade do ar. Identifica-se sucintamente os diferentes sistemas de ventilação utilizados, particularmente no setor residencial. Abordam-se duas das componentes da envolvente com grande impacto na ventilação, janelas e grelhas de ventilação. E, dada a importância dos métodos de determinação de caudais de ar associados a cada componente, apresentam-se instrumentos de medição e discutem-se métodos de verificação dos equipamentos laboratoriais, como é o caso do método da placa de orifício. Na parte final deste capítulo, apresenta-se inclusive um exemplo de cálculo teórico dos caudais para uma placa de orifício, útil na validação dos métodos experimentais.

No capítulo 3 é elaborado um estudo paramétrico relativo à estimativa das taxas de ventilação de frações residenciais. Incluíram-se variáveis tais como a região, classe de exposição ao vento,

presença de obstáculos, localização da fração no prédio, classe de permeabilidade ao ar das janelas, entre outras.

Tendo por base a importância dos métodos de determinação de caudais, no capítulo 4 faz-se um levantamento das normas relacionadas com sistemas da envolvente com impacto na taxa de ventilação dos edifícios. De seguida, apresentam-se resultados de algumas das campanhas laboratoriais realizadas. Incluem-se, neste trabalho, resultados de caudais para aberturas com diferentes secções e também em portas com permeabilidade elevada ao ar. No âmbito deste capítulo efetuou-se ainda uma comparação de resultados entre duas câmaras de ensaio e dois ventiladores no sentido de contribuir para a validação do método. Também se apresenta o método de cálculo teórico de caudais de aberturas fixas para servir de comparação com os resultados do ensaio e estimar a incerteza.

No capítulo 5 é efetuada uma avaliação teórica do impacto da incerteza das medições na estimativa das taxas de renovação horária de edifícios, nomeadamente das incertezas na medição de caudais de ar em aberturas fixas com grelhas instaladas e na classificação de janelas e portas quanto à permeabilidade ao ar.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sustentabilidade dos edifícios

Atualmente vários fatores direcionam o foco da construção na procura de edifícios sustentáveis. Laverge *et al.* (Laverge, Bossche, Heijmans, & Janssens, 2011) referiram que o aumento do aquecimento global e os seus efeitos negativos no meio-ambiente, o facto da principal fonte de energia utilizada estar limitada na natureza e os prejuízos humanos e económicos causados por doenças que advêm da poluição têm indicado uma necessidade de pesquisar projetos e ideias que permitam uma melhoria da qualidade dos edifícios. Essa melhoria consiste em manter ou até mesmo aumentar o nível de conforto habitual, ao passo que a energia necessária nas tarefas do dia a dia seja reduzida significativamente (Laverge *et al.*, 2011).

Reduzir a energia utilizada é bastante importante atendendo a que a produção de eletricidade através de combustíveis fósseis é uma ameaça em virtude das altas emissões de gases com efeito de estufa que produz e da relativa escassez dos combustíveis. Para reduzir esta dependência, existe uma aposta nas energias renováveis, que funcionam como alternativa aos recursos não-renováveis. Mas, apesar da forte aposta nos recursos renováveis, presentemente, esta não é suficiente para satisfazer a atual exigência energética (Bangalee, Lin, & Miao, 2012).

Awbi (Awbi, 2017) afirma que, das energias que são baseadas sobretudo em energias fósseis, a energia utilizada para o aquecimento, arrefecimento e ventilação dos edifícios, na maioria dos países, representa a maior parcela. Esta afirmação é corroborada com a figura 2.1, em que é possível observar que, na Europa, os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC), no geral, contabilizam sempre a maior parte da energia consumida quando comparados com os outros serviços, como os sistemas de águas quentes sanitárias (AQS), a energia gasta na iluminação, nos equipamentos, na preparação da comida e na refrigeração.

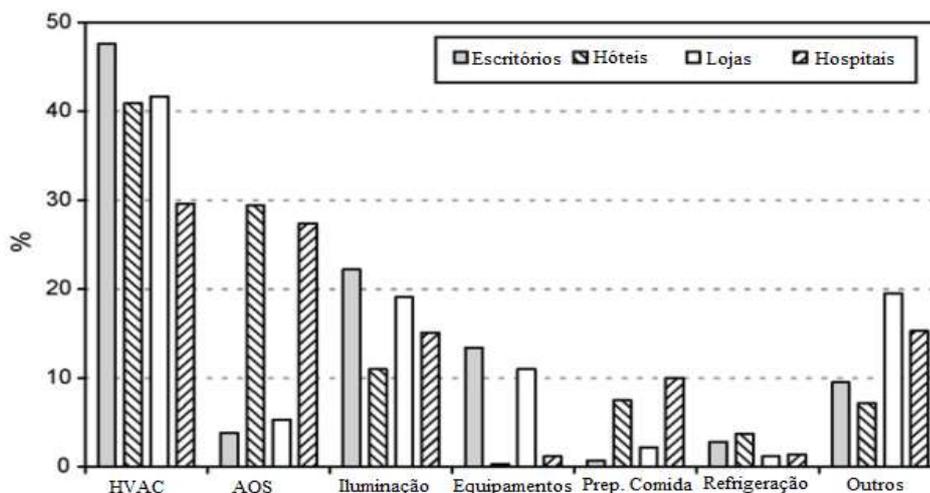


Figura 2.1 – Distribuição do consumo de energia de vários serviços para diferentes tipos de edifícios (Pérez-Lombard, Ortiz, & Pout, 2008)

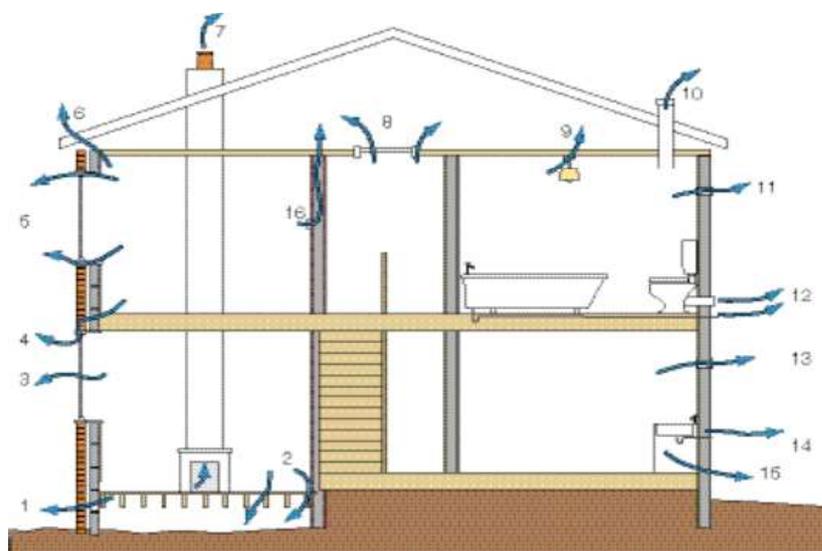
Deste modo, a solução encontrada para diminuir a energia consumida nos edifícios foi aumentar a estanquidade dos mesmos com o objetivo de melhorar o isolamento no seu invólucro e, conseqüentemente, selá-lo contra possíveis fugas de ar (Salehi, Torres, & Ramos, 2017).

2.2 Estanquidade ao ar dos edifícios

Pela definição dada por Ji *et al.* (Ji, Duanmu, & Li, 2017), estanquidade ao ar de um edifício é a resistência do invólucro do edifício ao fluxo de ar e é o fator determinante na infiltração e exfiltração de ar nas fachadas do edifício. Infiltração é o fluxo de ar que entra no edifício através de frinchas na envolvente de maneira não controlada, produzindo assim efeitos indesejados como o desperdício de energia utilizada no aquecimento do edifício. As exfiltração, por oposto à infiltração, é o caudal de ar que escoar para fora do edifício. Ter em conta que, para grandes taxas de infiltrações de ar na envolvente devido às grandes perdas de calor para o exterior, geralmente, é preciso um elevado requisito energético de aquecimento nas estações frias e de arrefecimento nas estações quentes (Jin, Zhang, & He, 2015), para manter o conforto térmico no interior do edifício. Portanto, é importante limitar as infiltrações de ar e, por conseguinte, aumentar a estanquidade dos edifícios para reduzir essa necessidade energética (Ji *et al.*, 2017).

Encontra-se representado na figura 2.2 as zonas mais relevantes de infiltrações de ar na envolvente dos edifícios. Note-se que a estanquidade depende de várias componentes do edifício, tais como as portas e as janelas (se têm caixilharias ou juntas bem vedadas), chaminés, lareiras, tubagem, condutas de climatização ou de sistemas elétricos e ligações ao sótão, cave ou garagem. Além desses parâmetros, refere a tipologia do edifício os materiais e tipo de

construção, o ano de construção, idade e estado de conservação, condições climáticas e imediações dos edifícios que intervêm na estanquidade de um edifício (Filipa 2018).



Legenda:

- | | |
|--|--|
| 1- Grelhas de ventilação para pisos; | 9- Aberturas de serviço existentes no teto; |
| 2- Brechas em pisos suspensos de madeira; | 10- Aberturas que penetrem o teto/telhado; |
| 3- Fissuras nas janelas ou portas; | 11- Respiradores nas casas de banho; |
| 4- Rotas através das caixas de ar nos pisos/tetos; | 12- Frinchas nas tubagens das casas de banho; |
| 5- Frinchas ao redor das janelas nomeadamente caixilharia e caixas de estores; | 13- Extratores nas cozinhas; |
| 6- Frinchas nas juntas entre o teto e as paredes; | 14- Frinchas nas tubagens das cozinhas; |
| 7- Chaminés abertas; | 15- Frinchas nas juntas entre o solo e as paredes; |
| 8- Frinchas nas zonas de acesso ao sótão; | 16- Frinchas em torno dos acessórios elétricos. |

Figura 2.2 – Representação esquemática das principais zonas de infiltração de ar na envolvente de um edifício (Jaggs & Scivyer, 2006)

Sendo influenciado por tantos parâmetros é evidente que quantificar todas as infiltrações de ar que entram nos edifícios pode ser complexo. Deste modo, para quantificar e avaliar “*in situ*” as infiltrações de ar e, conseqüentemente, a estanquidade ao ar do edifício são utilizados métodos, sendo os dois mais utilizados o método da pressurização e o método do gás traçador (Stabile, Dell, Frattolillo, Massimo, & Russi, 2016).

O método da pressurização encontra-se descrito na norma EN ISO 9972:2015 e é usado para medir a permeabilidade de ar de um edifício ou parte dele e identificar caudais de ar para diferenças de pressão específicas. Existem dois modos no método da pressurização, o ensaio de pressurização ou despressurização do edifício todo ou apenas de uma fração do mesmo.

Pressurização, ao contrário da despressurização, significa que a pressão no interior do edifício é superior à pressão exterior. A base do método de pressurização é registrar, para várias diferenças de pressão positivas ou negativas, consoante seja de despressurização ou pressurização, o caudal de ar necessário para garantir a pressão pretendida. Seguindo o processo que se encontra na norma EN ISO 9972:2015 e sabendo a diferença de pressão, o caudal de ar escoado para o edifício ou parte dele é obtido através da expressão (1).

$$Q_l = C_l(\Delta p)^n \quad (1)$$

em que:

- Q_l é o caudal de ar escoado [m^3/h];
- C_l é coeficiente de descarga de ar [$\text{m}^3/(\text{h.Pa})$];
- (Δp) é a diferença de pressão [Pa];
- n é o expoente de caudal de ar que deve estar compreendido entre 0,5 para escoamento turbulento e 1,0 para escoamento laminar (Pinto, Viegas, & de Freitas, 2011).

Além do caudal de ar, usando a expressão (2), é possível calcular o valor da taxa de renovação horária a 50 Pascals (n_{50}), que indica o número de vezes que o volume de ar num edifício ou parte dele é renovado por hora quando a pressão está nos 50 Pa (Hong & Kim, 2018).

$$n_{50} = \frac{Q_{50}}{V} \quad (2)$$

A norma que caracteriza o método do gás traçador é a ISO 12569:2017. No método do gás traçador, o gás é libertado numa única zona ou num espaço do edifício que seja devidamente isolado, e a sua concentração é monitorizada e relacionada com o caudal de infiltração (Seppänen, Brelih, Guillaume, & Lițiu, 2012). O dióxido de carbono é o gás mais utilizado visto que é o mais barato, é seguro e é produzido pelos ocupantes dos edifícios. Quando se comparam os dois métodos, o ensaio do gás traçador requer um maior custo e profissionais mais experientes, porém fornece resultados mais credíveis e exatos (Hong & Kim, 2018). A importância da estanquidade nos edifícios é tal, que existem países em que valores de estanquidade mínimos são recomendados ou até requeridos (d'Ambrosio Alfano, Dell'Isola, Ficco, Palella, & Riccio, 2016).

Algumas das medidas que melhoram a estanquidade ao edifício incluem a introdução de uma barreira impermeável ao ar. O sucesso desta medida é maior caso se contemple estas soluções ainda na fase de projeto (Wahlgren & Sikander, 2010). Barreiras de passagem ao ar são sistemas projetados e construídos para limitar os fluxos de ar entre os espaços que dispõem de conforto térmico e os outros espaços, como as garagens ou o exterior (Buildingscience@2018). No caso

de ser um edifício já construído, as componentes responsáveis por infiltrações de ar devem ser tratadas e as juntas e frinchas restauradas e reparadas nomeadamente com mástiques com base em silicone, espumas ou selantes à base de polímeros (Soudal@2018).

Verifica-se então que o aumento da estanquidade ao ar da envolvente dos edifícios traz melhorias a nível do conforto térmico, desempenho acústico e energético, mas observou-se uma tendência de degradação da qualidade do ar interior (QAI) dos mesmos (D'Ambrosio Alfano, Ficco, Palella, Riccio, & Ranesi, 2015).

2.3 Degradação da qualidade do ar interior

A QAI depende de vários fatores como a temperatura, a humidade relativa, a velocidade do ar, a existência de odores, a concentração de microrganismos ou poeiras suspensas no ar, entre outros (Amaral, 2008). Segundo Stabile *et al.* (Stabile *et al.*, 2016), a QAI é considerada umas das questões mais preocupantes dos edifícios para a saúde humana. O facto da população, nos países desenvolvidos, passar em média mais de 90 % do seu tempo diário em ambientes interiores e existir uma maior poluição gerada pelos ocupantes e os equipamentos que usam nas atividades do dia-a-dia, aliado às medidas para melhorar a estanquidade ao ar dos edifícios, como o aumento do isolamento térmico na envolvente, têm aumentado as evidências resultantes da má QAI (Canha, Lage, Candeias, Alves, & Almeida, 2017).

Tham (Tham, 2016) menciona que os efeitos adversos causados pela má QAI, nomeadamente problemas respiratórios, sobretudo em crianças, problemas imunológicos, caso haja alergia aos ácaros de pó, síndrome do edifício doente e até mesmo cancro, devido à maior exposição de tabaco, rádio e os seus derivados, são alguns dos exemplos de problemas provenientes da má qualidade do ar em ambientes interiores (Tham, 2016). Conforme referido no artigo de Norhidayah *et al.* (Norhidayah, Chia-kuang, Azhar, & Nurulwahida, 2013), a Organização Internacional do Trabalho define síndrome do edifício doente como um fenómeno que ocorre quando 20 % dos inquiridos apresentam sintomas relacionados com os seus locais de trabalho e com relação específica à qualidade do ar incluindo irritação nos olhos e na pele, alergias nasais, cansaço e dificuldades de concentração. Em adição às contrariedades na saúde e no trabalho, a má QAI pode afetar também os edifícios, havendo a possibilidade de surgirem humidades que provoquem condensações e bolores nos espaços interiores (Salehi *et al.*, 2017).

Constata-se, portanto, que aumentar a estanquidade de um edifício, ainda que ofereça benefícios relativamente ao desempenho energético e acústico e ao conforto térmico, tem adversidades, principalmente devido à degradação da QAI. Para fazer face à má QAI, é necessário que haja uma constante renovação de ar nos ambientes interiores dos edifícios. A Portaria n.º 349-

B/2013 estabelece 0,4 renovações por hora como o valor mínimo da taxa de renovação horária de ar nos edifícios de habitação, sendo que a permeabilidade ao ar da envolvente, em Portugal, exhibe valores em média entre 2 e 8 renovações de ar por hora (Martins, 2013). A taxa de renovação de ar (R_{ph}) nos edifícios é conseguida através da ventilação e das infiltrações de ar. A diferença é que, nas infiltrações de ar, o caudal de ar que entra no edifício é de forma descontrolada e na ventilação, a renovação do ar, é controlada e com um propósito positivo. Logo, a fim de se encontrar um equilíbrio na relação discutível entre a distribuição de ar, a QAI, o conforto térmico e a eficiência energética (G. Cao *et al.*, 2014), houve a necessidade de analisar e desenvolver sistemas de ventilação para edifícios (Awbi, 2017).

2.4 Sistemas de ventilação

A ventilação permite que os poluentes sejam removidos ou diluídos e é muito relevante na preservação de uma boa QAI dos edifícios (Dimitroulopoulou, 2012). Abrir e fechar as janelas para ventilar o edifício é uma boa solução, mas nem sempre é possível dado que os utilizadores estão regularmente fora de casa e as condições no exterior nem sempre estão favoráveis. Assim sendo, os métodos e sistemas de ventilação dos edifícios deverão ser capazes de fornecer uma boa QAI e, ao mesmo tempo, garantir um bom funcionamento energético capaz de cumprir os regulamentos energético, mesmo quando as janelas estão fechadas (Awbi, 2017). Conforme se encontra na norma EN 13142:2004, sistema de ventilação é a combinação de todas as componentes indispensáveis para gerar ventilação e podem ser sistemas mecânicos, passivos (ventilação natural) ou híbridos.

2.4.1 Ventilação mecânica

Na ventilação mecânica, como o nome indica, a renovação do ar é realizada com ajuda de meios mecânicos (Seppänen *et al.*, 2012). (Seppänen *et al.*, 2012) separam a ventilação mecânica em extração mecânica, insuflação mecânica e um sistema que tenha, em conjunto, a extração e a insuflação mecânica:

- Extração mecânica: o ar vindo do exterior entra no edifício através de aberturas e possíveis fugas que possam haver no invólucro sendo depois extraído, normalmente utilizando condutas, para fora do edifício com a ajuda de ventiladores (figura 2.3).
- Insuflação mecânica: consiste em fornecer ar para dentro do edifício com a ajuda de ventiladores. O ar é posteriormente extraído para fora do edifício pelas aberturas que existam (figura 2.4).
- Sistema combinado: é um sistema balanceado entre a extração e a insuflação mecânica que têm ventiladores que fornecem e expulsam o ar do edifício. O ventilador de admissão, por vezes, é acompanhado de um sistema de aquecimento, para aquecer o ar que entra no edifício. Pode-se também incluir, neste sistema, um recuperador de calor

que aproveita o quente do ar extraído e, utilize esse calor, para aquecer o ar novo que entra com temperaturas mais baixas (figura 2.5).

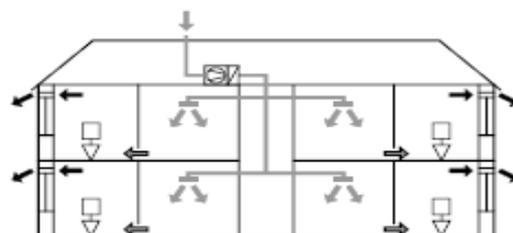
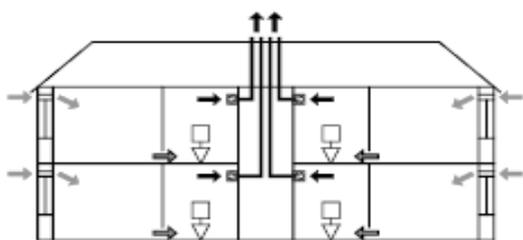


Figura 2.3 – Exemplo de extração mecânica Figura 2.4 – Exemplo de insuflação mecânica

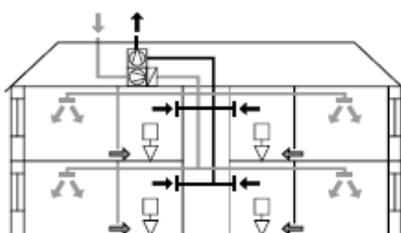


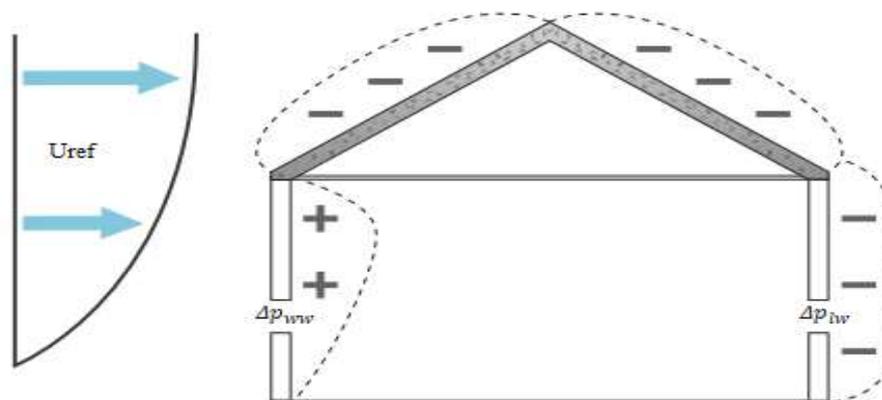
Figura 2.5 Exemplo de um sistema combinado

2.4.2 Ventilação natural

Quando são comparados os sistemas de ventilação mecânica e natural, a redução do ruído mecânico, do síndrome do edifício doente e do consumo de energia e a menor necessidade de manutenção e substituição são algumas das vantagens dos sistemas de ventilação natural (Sacht, Bragança, Almeida, & Caram, 2016).

Como se encontra referido por Stavrakakis *et al.* (Stavrakakis, Zervas, Sarimveis, & Markatos, 2012), um edifício ventilado naturalmente, em geral, tem menos de 40 % do custo energético quando comparado a um edifício com um sistema de ventilação mecânico. Essa diminuição é possível porque, enquanto os sistemas de ventilação mecânica usam uma quantia considerável de energia na sua utilização (Bangalee *et al.*, 2012), a ventilação natural usa os recursos naturais, como o vento ou a diferença de temperatura do ar, para produzir uma diferença de pressão que impulsiona ar ventilado para dentro do edifício (Bibby & Hodgson, 2013). No caso do vento, a pressão diferencial é conseguida graças à diminuição da velocidade do ar quando o vento bate no edifício. Como se vê na figura 2.6, a diminuição da velocidade do ar causa um aumento de pressão nessa face e, por consequência, um aumento da velocidade do ar e um

decréscimo de pressões no topo e nas outras faces do edifício. Barlavento é o lado onde o vento sopra e o sotavento o lado oposto ao barlavento.



em que:

- U_{ref} é o diagrama da velocidade do vento;
- Δp_{ww} é a diferença de pressão entre o exterior e o interior do edifício no barlavento;
- Δp_{lw} é a diferença de pressão entre o exterior e o interior do edifício no sotavento.

Figura 2.6 – Diferenças de pressão causadas pelo vento (Priceindustries@2018)

A norma portuguesa NP 1037-1:2002 indica que os compartimentos principais e a orientação das aberturas para o exterior devem estar, de preferência, localizadas na fachada orientada na direção do vento predominante, para beneficiarem de uma melhor admissão de ar exterior. Normalmente a ventilação natural é dividida em ventilação unilateral, cruzada e por efeito de chaminé. Na ventilação natural unilateral, a renovação de ar é conseguida através de uma única abertura enquanto que a ventilação natural cruzada tem, pelo menos, duas aberturas em posições opostas ou adjacentes, que funcionam como entrada e saída de ar (figura 2.7) (Salehi *et al.*, 2017).

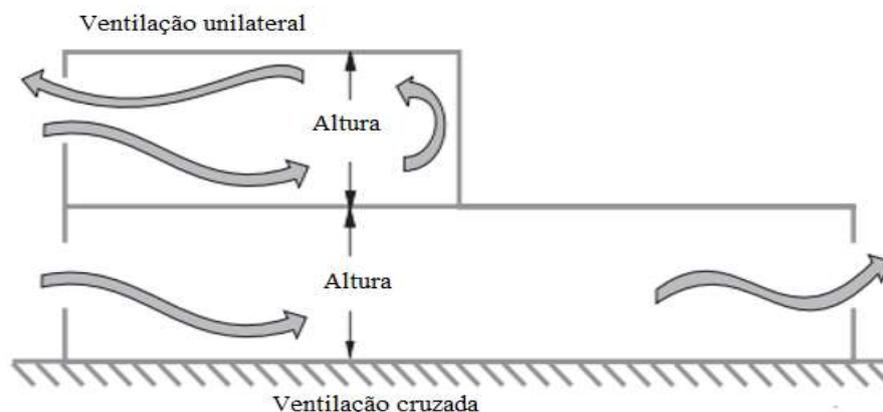


Figura 2.7 – Ventilação unilateral e ventilação cruzada (Liddament, 1996)

Já a ventilação natural por efeito de chaminé é produzida tanto pelo vento como pelos ganhos internos (Graça & Linden, 2016), que criam uma discrepância térmica garantindo assim uma diferença entre as densidades do exterior e do interior (Gładyszewska-fiedoruk & Gajewski, 2012). Como se constata na figura 2.8, o ar entra no edifício devido à pressão no interior ser inferior à do exterior. Com os ganhos internos, o ar que entrou fica mais quente e menos denso, tendo tendência a subir, gerando pressões positivas no topo e negativas na parte inferior do edifício (Seppänen *et al.*, 2012). Como consequência, o ar que se encontra no exterior entra pelas zonas baixas do edifício e o ar interior, mais quente, sai pela parte superior do edifício onde a pressão do interior é superior à pressão do exterior (Salehi *et al.*, 2017). O efeito da impulsão térmica, em geral, apenas acontece quando a temperatura exterior é menor que a temperatura interior, ou seja, nas estações frias. Dessa forma, a norma NP 1037-1:2002, separa o efeito térmico em situação de Inverno e de Verão. O plano neutro é um fator importante na conceção de edifícios com ventilação natural, pois indica a altura que o fluxo de ar deixa de entrar, isto é, que a pressão no exterior deixa de ser superior à pressão inferior (Priceindustries@2018).

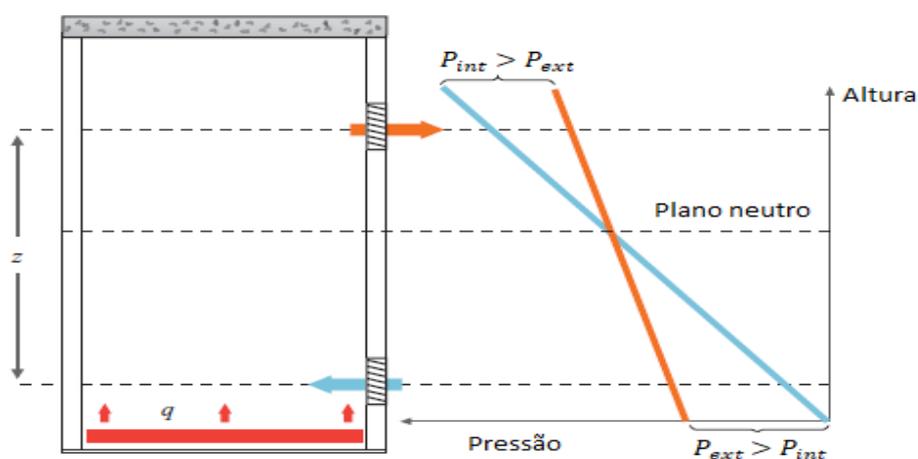


Figura 2.8 – Ventilação por efeito de chaminé - Representação em corte (Priceindustries@2018)

Ainda que a ventilação por efeito de chaminé seja menor que a ventilação cruzada, é mais fiável uma vez que não precisa de vento (Salehi *et al.*, 2017) para se realizar e o vento é um fator instável pois sofre oscilações ao longo do tempo (Graça & Linden, 2016). A ventilação natural é afetada por vários elementos entre os quais a velocidade e a direção do vento, a topografia, a configuração da abertura e a presença de obstáculos vizinhos, como a vegetação ou edifícios

vizinhos (Sacht & Lukiantchuki, 2017). A configuração da abertura deve ser projetada de modo a que o tamanho e o posicionamento da abertura potenciem a ventilação natural (Dimitroulopoulou, 2012).

2.4.3 Ventilação híbrida

Os sistemas de ventilação híbrida são uma boa solução caso a ventilação natural seja insuficiente. Ventilação híbrida possibilita o uso do sistema de ventilação natural, mas com a garantia que, se for necessário, o sistema de ventilação mecânica funcione para cumprir os requisitos de ventilação. A ventilação híbrida é muito benéfica, principalmente na situação de se encontrarem condições extremas no exterior do edifício (Zhai, Johnson, & Krarti, 2011). O facto de a ventilação natural depender totalmente do clima exterior pode ser visto como uma desvantagem em relação à ventilação mecânica.

2.4.4 Considerações finais

Mesmo com os avanços recentes na ventilação dos edifícios e nos sistemas de distribuição de ar, a QAI, continua a piorar (Awbi, 2017). Na comunidade científica, existe um consenso em afirmar que a melhoria e aposta da ventilação natural é a resposta para se obterem edifícios mais sustentáveis (Graça & Linden, 2016), visto que é uma das melhores estratégias para reduzir o consumo de energia de um edifício (Nomura & Hiyama, 2017) e, que essa redução, é conseguida através da renovação do ar interior que por sua vez também beneficia a QAI (Bangalee *et al.*, 2012). Outro motivo para a maior utilização de sistemas de ventilação natural nos edifícios resulta dos avanços em relação ao isolamento térmico e do aumento dos ganhos térmicos internos, sendo cada vez menos preciso aquecimento no Inverno, enquanto que o arrefecimento é cada vez mais imprescindível (Graça & Linden, 2016).

Mas, apesar da unanimidade na comunidade científica e das várias vantagens que têm, a ventilação natural é normalmente dispensada nos edifícios modernos. Esta rara utilização deve-se a vários problemas que ocorrem na fase de projeto, derivadas do envolvimento tardio de peritos relacionados com a eficiência energética, da falta de pessoas qualificadas e experientes na conceção de sistemas de ventilação natural e das quantias monetárias serem insuficientes para suportar uma análise mais complexa (Graça & Linden, 2016). A norma NP 1037-1:2002 “tem por objetivo definir as regras a que devem obedecer os sistemas de ventilação” e é muito importante quando se projetam sistemas de ventilação natural. É importante estar do lado da segurança, ou seja, projetar o edifício para as piores condições climáticas como um dia quente de Verão sem vento e considerar apenas a ventilação causada pelos ganhos internos (Priceindustries@2018).

Quando se projeta um sistema de ventilação natural, deve-se analisar a permeabilidade ao ar de toda a envolvente do edifício para que não existam caudais de ar devido a infiltrações de ar que afetem os sistemas. A norma NP 1037-1:2002 afirma que, se todas as juntas fixas entre os elementos que constituem a envolvente forem bem executadas, estas não são consideradas no cálculo do caudal que atravessa a envolvente do edifício. Por outro lado, certas componentes têm uma permeabilidade ao ar considerável e são sempre contabilizadas. São assim, regularmente, testadas as permeabilidades ao ar de certas componentes como as janelas ou as portas. O ensaio mais utilizado nesses testes é o ensaio de pressurização referido anteriormente, embora realizado previamente em laboratório.

De acordo com a norma NP 1037-1:2002, na ventilação natural existem dois tipos de aberturas de admissão de ar, em parede de fachada ou através de condutas. As aberturas de admissão de ar em parede de fachada representam as grelhas de ventilação instaladas nas fachadas e são dispositivos responsáveis pela interação direta entre o exterior e o interior da habitação. Um exemplo de um sistema de ventilação natural com admissão de ar através de condutas é o ventilador estático. A norma NP 1037-1:2002 define ventilador estático como um elemento terminal exterior colocado no extremo superior da conduta, com o objetivo de gerar uma depressão no interior da conduta, devido à ação do vento independentemente da sua direção. A depressão causa uma evacuação natural do ar que se encontra no edifício.

Além da instalação de sistemas de ventilação que promovam a entrada de ar novo vinda do exterior, é fundamental a circulação do ar pelos vários compartimentos do edifício, entre os quais os espaços não úteis como as garagens e as arrumações que, normalmente, não usufruem de sistemas de ventilação ou janelas em contacto com o exterior. Duas soluções recorrentes que favorecem a movimentação de ar no edifício são a utilização, nas portas, de folgas na parte inferior ou de grelhas de ventilação. As portas interiores, ao contrário das portas exteriores que são bem vedadas para que a estanquidade da envolvente do edifício não seja afetada, devem promover a passagem de ar nas zonas interiores e garantir que o ar circule pelos vários compartimentos, mesmo quando as portas se encontrem fechadas.

Os sistemas de ventilação natural estão diretamente relacionados com as componentes responsáveis pelas infiltrações de ar, porque se estes forem instalados nessas componentes podem servir-se das infiltrações de ar para escoar o caudal de ar vindo do exterior de modo controlado. d'Ambrosio Alfano *et al.* (d'Ambrosio Alfano *et al.*, 2016) afirma que, das componentes existentes nos edifícios, as janelas são a principal causa de infiltrações de ar nos edifícios e esta afirmação é corroborada por um estudo divulgado por Zhang *et al.* (Zhang, Wang, Xu, Zou, & Yu, 2016). Zhang *et al.* alegam que a perda de energia, respeitante às fugas devido às janelas, pode chegar até aos 60% da perda de energia total do invólucro do edifício.

2.5 Janelas

As janelas são fundamentais para qualquer edifício pois são responsáveis pela entrada da luz natural no edifício, pela transparência para permitir ver o exterior, pelos ganhos solares de forma passiva e pelo fornecimento de ar exterior para os ambientes interiores e consequente renovação do ar. Em particular, é uma das componentes mais fraca termicamente do invólucro do edifício (Cuce & Riffat, 2015). A orientação da fachada envidraçada é muito importante pois influencia a quantidade de radiação solar que receberá, sendo que em Portugal, a orientação Sul é a que recebe um maior nível de radiação solar, enquanto é a orientação Norte a que recebe menos.

Em climas em que as temperaturas à noite não sejam muito elevadas, a abertura das janelas durante a noite, refresca significativamente os espaços interiores no Verão sendo que, na Passive House, simples estratégias como sombrear o edifício durante o dia, através de persianas por exemplo, e abrir as janelas e ventilar o edifício durante a noite é o suficiente para manter a temperatura interior dentro do nível de conforto térmico (Fokaides, Christoforou, Ilic, & Papadopoulos, 2016). Segundo (Passivhaus@2018), Passive House é “um conceito construtivo que define um padrão de elevado desempenho que é eficiente, sob o ponto de vista energético, saudável, confortável, economicamente acessível e sustentável”. A janela, por ser uma componente tão condicionante na ventilação, a sua permeabilidade ao ar pode ser classificada segundo a norma EN 12207:2016.

A janela tem o maior coeficiente de transmissão térmica quando comparada com os outros elementos construtivos do edifício e, por isso, é o elemento com a menor resistência térmica (Carlos, 2017). Para contrariar a debilidade da janela, têm sido desenvolvidas janelas mais eficientes, com grandes níveis de isolamento térmico e competentes contra grandes variações de radiação solar ou seja, janelas com menos ganhos solares nas estações quentes e menos perdas de calor nas estações frias (Zhang *et al.*, 2016). Têm sido concebidos também, com a ajuda dos avanços na tecnologia, novos sistemas para envidraçados com nanomateriais ou materiais inteligentes, que permitem que a luz solar passe enquanto apresentam valores baixos de transmissão térmica (Casini, 2018), de fugas de ar e um valor de fator solar adequado (Cuce & Riffat, 2015). Janelas duplas ou triplas com vácuo ou aerogel a separar os vidros são exemplos de inovações usadas para aumentar o isolamento térmico do vidro (Zhang *et al.*, 2016).

A janela, como foi referido previamente, trata-se de uma componente preponderante na ventilação dos edifícios, sendo por isso benéfico instalar um sistema de ventilação natural na janela e assim, de forma controlada, renovar o ar e melhorar a QAI.

2.6 Grelhas de ventilação

Grelhas de ventilação são aberturas que separam dois ambientes com diferentes pressões de ar (D'Ambrosio Alfano *et al.*, 2015) que podem ser instaladas na caixilharia da janela, na padieira, na folha do caixilho, na caixa de estore ou na parede (Freitas, V. Pinto, M. & Guimarães, S., 2007). A norma NP 1037-1:2002 refere que a instalação deve ser feita a um nível elevado para evitar desconforto visto que, a cotas baixas, podem introduzir poluição nesses espaços e D'Ambrosio Alfano *et al.*, 2015 indica que a colocação de rede para evitar a entrada de insetos nos edifícios pelas grelhas de ventilação não pode afetar a entrada de ar (D'Ambrosio Alfano *et al.*, 2015). Nas grelhas de ventilação, o caudal de ar não depende só da diferença de pressão, mas também das perdas por ação do atrito. A norma NP 1037-1:2002 menciona as grelhas anti-retorno, grelhas com a vantagem de não permitirem que o fluxo de ar seja invertido, ou seja, a única trajetória possível do caudal de ar é do exterior para o interior do edifício.

A diferença entre as grelhas fixas e passivas é que, nas passivas, é possível limitar o fluxo de ar que atravessa para que não ultrapasse um certo valor máximo de caudal (D'Orazio, Fontana, & Salata, 2011). As grelhas passivas podem ser do tipo manual, quando o caudal de ar que atravessa a secção transversal da grelha é regulado manualmente, ou do tipo auto-regulável, em que um sensor ou mecanismo de pressão diferencial controla o ar que entra com o propósito de assegurar um caudal de ar praticamente uniforme, mesmo em situações que a velocidade do ar e a intensidade do vento atinjam valores muito altos (D'Ambrosio Alfano *et al.*, 2015). A aba de ventilação, no sistema regulado manualmente, deve ser concebida de maneira a que o ar novo que entra no edifício seja direcionado para cima, garantindo assim uma boa dispersão no compartimento (Figura 2.9) (Renson, SEM DATA).

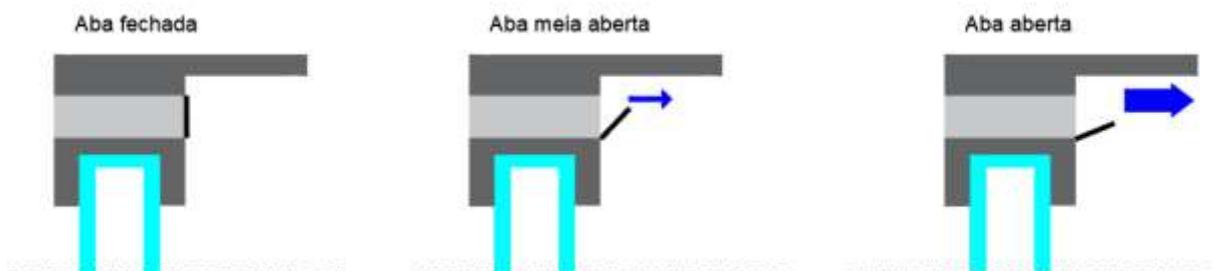


Figura 2.9 – Sistema de ventilação com regulação manual (Renson, SEM DATA)

No sistema auto-regulável, a posição da aba é ajustável de acordo com a preferência dos utilizadores e quando existem correntes de ar fortes, a aba roda e flete, bloqueando a entrada de ar excessiva e mantendo o volume de ar que entra no edifício constante (Figura 2.10).



Figura 2.10 – Sistema de ventilação auto-regulável (Renson, SEM DATA)

Na figura 2.11 são comparados o caudal de ar que entra em função da diferença de pressão para um sistema auto-regulável e um não regulável. A vantagem do sistema auto-regulável é que evita correntes de ar quando o vento está muito forte e os utilizadores podem estar ausentes do edifício e, mesmo assim, a ventilação ser regulada. Já no sistema não regulável, o caudal de entrada vai sempre aumentando em função da diferença de pressão.

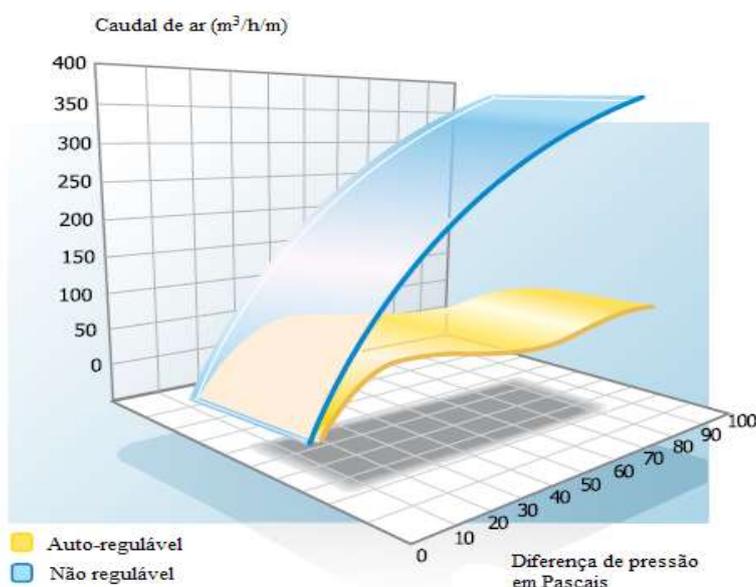


Figura 2.11 – Comparação do caudal de ar de um sistema auto-regulável e um não regulável para diferentes diferenças de pressão (Beslagskonsult@2018)

Em último, as grelhas sensíveis à humidade são um caso específico em que as grelhas estão acompanhadas de sensores de humidade em que, com o auxílio de *dampers*, controlam a secção transversal. Estas grelhas podem ser aplicadas em espaços com maiores níveis de humidade, como as cozinhas e as casas-de-banho (D’Ambrosio Alfano *et al.*, 2015).

Dentro dos sistemas de ventilação natural, as grelhas passivas têm sido apontadas como uma boa solução para se atingir um equilíbrio favorável entre a QAI, os custos de instalação e a poupança da energia (D'Ambrosio Alfano *et al.*, 2015). No entanto, as grelhas passivas, e de forma geral todos os sistemas de ventilação, padecem de um problema relacionado com a falta de exatidão na medição do caudal de ar que atravessa a grelha. A falta de exatidão conduz a uma incerteza na estimativa das taxas de renovação do ar das várias componentes e, por consequência, do edifício.

2.7 Exatidão na medição de caudal de ar

Como refere Cui, Cai, & Chen (Cui, Cai, & Chen, 2018), uma intensa investigação com a finalidade de melhorar a exatidão das medições de caudais de ar de sistemas de ventilação possibilita um desenvolvimento e dimensionamento mais adequado dos sistemas, e em sequência, uma possível poupança da energia utilizada. A dificuldade encontrada em medir o caudal de ar de forma exata está associada com as baixas velocidades do ar que atravessam os sistemas de ventilação e as perturbações instáveis provenientes dos ocupantes (X. Cao, Liu, Jiang, & Chen, 2014) que, por conseguinte, originam nos ambientes interiores um fluxo de ar geralmente de grande escala, turbulento e instável (Fu, Biwole, & Mathis, 2015).

Presentemente, os dois métodos principais para a obtenção de caudais de ar são as medições experimentais, como os ensaios da porta ventiladora e do gás traçador, e a simulação numérica (X. Cao *et al.*, 2014). Amaral (Amaral, 2008) refere os modelos empíricos, multi-zona, zonais e *Computational Fluid Dynamics* (CFD) como exemplos de modelos que têm por base a simulação numérica. Citando X. Cao *et al.* (X. Cao *et al.*, 2014), a simulação numérica é bastante útil na conceção e análise dos sistemas de ventilação interiores, pois fornece valores de caudais de ar com custos relativamente baixos, mas deve-se ter em conta que os resultados simulados apenas podem ser considerados fiáveis se forem validados com dados experimentais de elevada qualidade. Em ambientes interiores, a simulação numérica pode ser considerada um método incompleto, já que é impossível, usando-a, prever com exatidão os caudais de ar com certas características, como a tridimensionalidade, a turbulência, ou o efeito da baixa velocidade do ar (Fu *et al.*, 2015).

Dessa forma, a obtenção de caudais de ar através de medições experimentais é considerado um método necessário e muito importante tanto na obtenção de caudais de ar em ambientes interiores como na simulação numérica, pois são cruciais para a validação e desenvolvimento de modelos numéricos (Fu *et al.*, 2015). Nas medições experimentais, a fim de melhorar a estimativa dos caudais de ar nos edifícios, têm sido desenvolvidos instrumentos de medição cada vez mais exatos.

2.7.1 Instrumentos de medição de caudal

Na escolha do medidor de caudal a utilizar, realçam-se alguns aspetos como o custo, a exatidão, a manutenção, os requisitos para a sua operação, entre outros, para que o dispositivo de medição satisfaça, da maneira mais eficaz, as exigências do ensaio (Engineeringtoolbox-Flowmeters@2018).

Dentro das medições dos caudais de ar, os instrumentos de medição são designados medidores de fluxo e são divididos entre medidores volumétricos, medidores mássicos ou medidores híbridos. Alguns exemplos de medidores volumétricos são os medidores ultrassónicos ou os medidores com turbinas que se incluem nos medidores de velocidade. Os medidores de velocidade medem a velocidade do fluido em um ou mais pontos e integram a velocidade do fluido com a área do escoamento para calcular o caudal do fluxo. Os medidores mássicos, como os medidores tipo Coriolis e os medidores térmicos, medem diretamente o fluxo mássico (Malheiro, SEM DATA).

Nos medidores híbridos estão compreendidos os medidores de caudal por pressão diferencial. Os medidores por pressão diferencial são dispositivos que medem a diferença de pressão causada pela inserção de obstruções no escoamento e, com a aplicação da equação de Bernoulli, calculam o caudal de ar (Engineeringtoolbox-Flowmeters@2018). A equação de Bernoulli encontra-se referida na expressão (3) (Princeton-bernoulli@2018).

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gh = \text{constante} \quad (3)$$

em que:

- p é a pressão [Pa];
- ρ é a densidade [m^3/s];
- V é a velocidade [m/s];
- h é a elevação [m];
- g é a aceleração gravitacional [m^2/s].

A equação da continuidade (Princeton-continuity@2018), expressão (4), refere que o valor do produto da velocidade pela área é igual em qualquer secção da conduta.

$$\rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2 \quad (4)$$

em que:

- A_1 e A_2 representam a área de duas secções aleatórias da conduta, denominadas 1 e 2, em $[m^2]$;
- V_1 e V_2 representam a velocidade, das secções 1 e 2, em $[m^2/s]$.

O escoamento, sendo considerado horizontal e desprezando a gravidade, se forem relacionadas as expressões (3) e (4), pode concluir-se que diminuir a área leva a um aumento de velocidade e conseqüente diminuição da pressão. Estas relações são fundamentais nos medidores de caudal por pressão diferencial. A medição da diferença de pressão, nos medidores de caudal por pressão diferencial, é conseguida através de duas tomadas de pressão que se encontram a jusante e a montante do dispositivo (Malheiro, SEM DATA).

Os principais medidores de caudal por pressão diferencial são o tubo de Venturi e a placa de orifício. Na figura 2.12, constata-se que a diferença de pressão, nos tubos de Venturi, provém de uma redução da área onde ocorre o escoamento do fluido. Pela equação de Bernoulli, essa redução de área promove uma diminuição da pressão. Depois do fluido passar a secção com área reduzida, há uma zona de recuperação, da qual é recuperada até 80 % da pressão diferencial proveniente do estreitamento da área (Engineeringtoolbox-Flowmeters@2018).

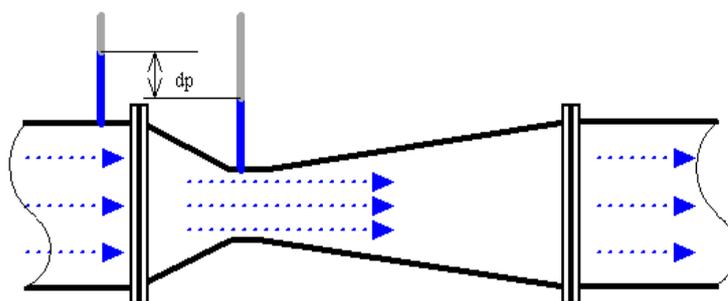


Figura 2.12 – Esquema de um Tubo de Venturi (Engineeringtoolbox-Flowmeters@2018)

O outro medidor de caudal por pressão diferencial referenciado anteriormente é a placa de orifício, uma placa perfurada que se instala em condutas (Beck & Mazille, 2002).

2.7.2 Placa de orifício

Na presente dissertação, há um maior destaque nas placas de orifício porque, como mencionam Reader-Harris, Barton, & Hodges (Reader-Harris, Barton, & Hodges, 2012), a placa de orifício é o medidor de fluxo mais comum, devido à relação custo/benefício ser favorável, facilidade de construção, simplicidade e confiabilidade. Antes de descrever e caracterizar as placas de orifício, é necessário definir dois parâmetros, β e o Número de Reynolds (Re) (Liptak, 1995), em que:

- β é a razão entre o diâmetro do orifício da placa (d) e o diâmetro interno da conduta em que a placa está instalada (D);
- (Re) é uma unidade adimensional que expressa a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas através expressão (5).

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (5)$$

em que:

- V é a velocidade média [m/s];
- D é o diâmetro interno da conduta [m];
- ρ é a massa volúmica [m^3/s];
- μ é a viscosidade dinâmica [Pa.s];
- ν é a viscosidade cinemática [m^2/s].

Como se verifica na expressão (5), quando o Re apresenta valores baixos, as forças viscosas são predominantes e o fluxo é considerado laminar. Já no caso do Re ser muito alto, as forças de inércia são dominantes e o fluxo é considerado turbulento. A figura 2.13 mostra o impacto que uma placa de orifício instalada na conduta tem no escoamento de um fluido. A presença da placa de orifício causa um aumento da velocidade do fluxo e, conseqüentemente, uma diminuição da pressão. Essa diminuição mantém-se até uma distância entre $0,35D$ e $0,85D$ a jusante da placa, dependendo do β e do número de Reynolds, onde atinge a velocidade máxima e, conseqüente, pressão mínima. A partir desse ponto, a velocidade e a pressão voltam a estabilizar (Liptak, 1995).

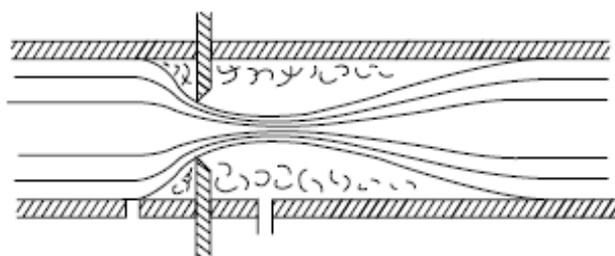
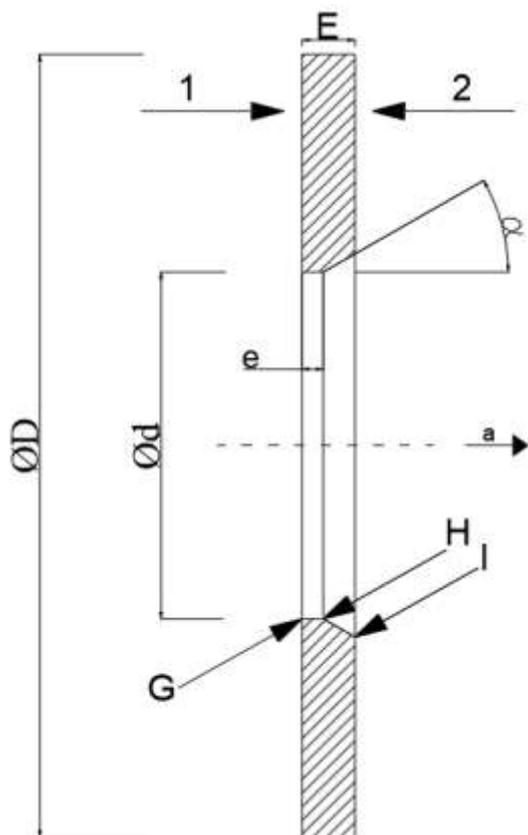


Figura 2.13 – Placa de orifício instalada numa conduta (Liptak, 1995)

Com o auxílio de tomadas de pressão, uma a jusante da placa e outra a montante, é possível conhecer a pressão diferencial provocada pela placa. As placas de orifício, como se verifica na norma ISO 5167-2:2003, consoante as distâncias das tomadas de pressão à placa, são denominadas por placas de orifício com tomadas de pressão no canto, no flange e a D e $D/2$, sendo que D é o diâmetro da conduta. A ISO 5167-2:2003 descreve a geometria e as condições de utilização e de funcionamento das placas de orifício com bordo reto. Na figura 2.14 é

apresentado o modelo de uma placa de orifício com bordo reto segundo a norma ISO 5167-2:2003.



em que:

- E é a espessura da placa;
- e é a espessura do orifício;
- α é o ângulo do bisel;
- ØD é o diâmetro da placa;
- Ød é o diâmetro do orifício;
- a é a direção do fluxo;
- 1 é a face virada para montante;
- 2 é a face virada para jusante.

Figura 2.14 – Modelo de uma placa de orifício com bordo reto

As partes não são completamente independentes umas das outras, visto que os métodos de medição e as incertezas das partes 2, 3 e 4 estão relacionadas com a parte 1, que apresenta informações gerais que funcionam como suporte para as outras partes. Os medidores de fluxo nas partes 3 e 4 são, respectivamente, os bocais e os tubos de Venturi. Uma alternativa à norma ISO 5167 é a norma ASTM MFC-3M-2004, que é bastante semelhante. Na norma ISO 5167-2:2003m encontram-se também descritos, em conjunto com a ISO 5167-1:2003, os requisitos de instalação que devem ser seguidos e aplicados. Para casos específicos, que a norma ISO 5167:2003 não engloba, e para placas de orifício com outras geometrias que não o bordo reto, a norma ISO/TR 15377:1998 dá recomendações e descreve a geometria de concepção e os métodos de uso. Alguns exemplos de geometrias que se encontram na norma ISO/TR 15377:1998 estão representadas na figura 2.15.

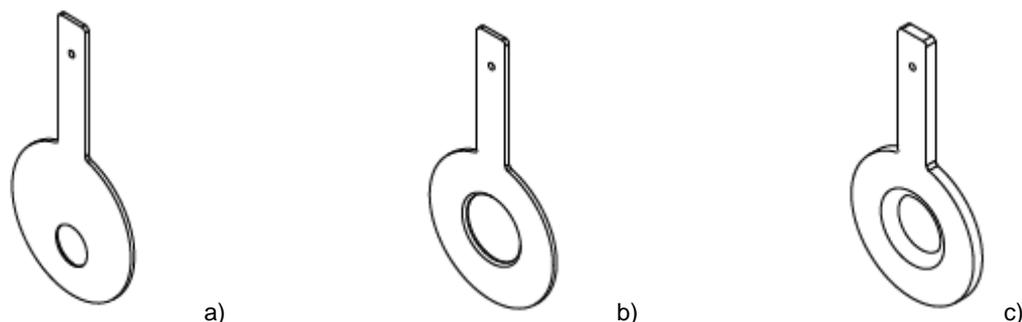


Figura 2.15 – Tipos de placas de orifício presentes na norma ISO/TR 15377:1998: (a) Placa de orifício excêntrica, (b) placa de orifício cônica e (c) placa de orifício com bordo quadrante.

2.7.3 Exemplo de cálculo das placas de orifício

Para uma melhor compreensão sobre as placas de orifício, realizou-se um cálculo teórico do caudal de ar que atravessaria uma placa de orifício segundo o método enunciado nas normas ISO 5167-1:2003 e ISO 5167-2:2003. Assume-se que a placa de orifício é de bordo reto e que têm tomadas de pressão no canto. No quadro 2.1, é apresentada a geometria da placa de bordo reto utilizada no cálculo. A geometria da placa, e o resto do método de cálculo cumprem as condições enunciadas na norma ISO 5167-2:2003.

Quadro 2.1 – Geometria da placa de bordo reto utilizada no cálculo

D (m)	d (m)	β	e(mm)	E(mm)	α (°)
0,195	0,05	0,25641	2	6	30

Nas placas de orifício, o caudal do fluido ou neste caso específico, do ar, é conseguido dividindo o caudal mássico pela densidade do ar. Já o caudal mássico, é obtido a partir da expressão (6), onde são substituídos os termos na direita da equação pelos seus valores numéricos.

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \varepsilon * d^2 * \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad (6)$$

em que:

- q_m é o caudal mássico em [kg/s];
- C é o coeficiente de descarga;
- Δp é a diferença de pressão [Pa];
- d é o diâmetro do orifício [m];

- ε é o fator de expansibilidade;
- ρ_1 é a densidade volúmica a montante da placa
- β é a razão entre o diâmetro do orifício da placa (d) e o diâmetro interno da conduta em que a placa está instalada (D).

O coeficiente de descarga é um coeficiente utilizado para fluidos incompressíveis que relaciona o caudal real com o caudal teórico que atravessa um dispositivo. Para o seu cálculo, é usada a equação de Reader-Harris/Gallagher (1998), indicada na expressão (7).

$$C = 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,261\beta^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6\beta}{Re(D)} \right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063A)\beta^{3,5} \quad (7)$$

$$* \left(\frac{10^6}{Re(D)} \right)^{0,3} + (0,043 + 0,080e^{-10L_1} - 0,123e^{-7L_1})(1 - 0,11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4}$$

$$- 0,031(M_2' - 0,8M_2'^{1,1})\beta^{1,3}$$

em que:

$$Re(D) = \frac{4q_m}{\pi\mu D} \quad (8)$$

expressa a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas a montante da conduta
 μ é o coeficiente de viscosidade

$$M_2' = \frac{2L_2'}{1 - \beta} \quad (9)$$

L_2' é o quociente da distância entre a tomada de pressão a jusante e a face a jusante da placa de orifício e o diâmetro da conduta

L_1 é o quociente da distância entre a tomada de pressão a montante e face a montante da placa de orifício e o diâmetro da conduta

$$A = \left(\frac{19000\beta}{Re(D)} \right)^{0,8} \quad (10)$$

Para placas de orifício com tomadas de pressão no canto:

$$L_1=L_2'=0$$

Para placas de orifício com tomadas de pressão a D e D/2:

$$L_1 = 1$$

$$L_2' = 0,47$$

Para placas de orifício com tomadas de pressão no flange:

$$L_1=L_2 = \frac{25,4}{D}$$

D em mm.

Quando $D < 71,12$ mm, deve-se adicionar à equação de de Reader-Harris/Gallagher (1998) a seguinte parcela:

$$+0,011(0,75 - \beta) \left(2,8 - \frac{D}{25,4} \right);$$

D em mm.

O fator de expansibilidade é um coeficiente que tem em conta a compressibilidade do fluido. Este é calculado através da expressão (11) e é apenas válida se $p_2/p_1 \geq 0,75$.

$$\varepsilon = 1 - (0,351 + 0,256\beta^4 + 0,93\beta^8) \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/\kappa} \right] \quad (11)$$

em que:

- p_1 é a pressão a montante da placa de orifício em [Pa];
- p_2 é a pressão a jusante da placa de orifício em [Pa];
- κ é o coeficiente adiabático e expressa a razão entre a capacidade térmica do gás a pressão constante e a capacidade térmica do gás a volume constante.

Quando se consultam as expressões (6), (7) e (8), verifica-se que o $Re(D)$ depende do caudal mássico, que por sua vez depende do coeficiente de descarga e o coeficiente de descarga está dependente de $Re(D)$. Deste modo, para calcular o caudal mássico, é necessário realizar um processo iterativo de acordo com o anexo A da norma ISO 5167-1:2003. A iteração funciona a partir de estimativas, sendo, em primeiro, colocadas no primeiro membro da expressão de cálculo do caudal mássico as incógnitas que se pretendem calcular e, no segundo membro, o invariante, que são as incógnitas que são conhecidas. Depois, são consideradas estimativas para calcular as incógnitas pretendidas de forma sucessiva até que duas iterações sucessivas tenham um resultado praticamente igual.

De modo a se obterem valores reais em relação às condições ambientais do ensaio, optou-se por escolher uma temperatura ambiente de 14 °C e uma pressão atmosférica de 101760 Pascals, ambas registadas num dos ensaios realizados na campanha experimental. Com os valores da temperatura ambiente e da pressão atmosférica, calcula-se o coeficiente de viscosidade, coeficiente adiabático e a massa volúmica. O coeficiente adiabático para 14 °C é 1,401

(Engineeringtoolbox-specific-heat-ratio@2018), o coeficiente de viscosidade é igual a $1,807E-05$ e foi calculado usando a fórmula de Sutherland (Lmnoeng@2018). A massa volúmica é calculada através da lei dos gases ideais em que, para o ar, a constante universal dos gases perfeitos, R , é de $287 \text{ Joule}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ (Web.mit.edu@2018), T são $287,15 \text{ Kelvin}$ e a pressão contabilizada é a montante da placa, ou seja, 101760 Pascais mais a diferença de pressão registada (Brighthubengineering@2018). No quadro 2.2, encontram-se os resultados do caudal mássico e caudal de ar utilizando o processo iterativo para várias diferenças de pressão. Não se realizou o cálculo para uma diferença de pressão de 50 Pascais porque o $Re(D)$ obtido é inferior aos 5000 e, uma das condições referidas na norma, afirma que o $Re(D)$ tem de ser superior a 5000 .

Quadro 2.2 – Resultados do processo iterativo para o exemplo de cálculo

p_1 (Pa)	p_2 (Pa)	Δp (Pa)	ρ (kg/m^3)	q_m (kg/s)	q_v (m^3/s)	q_v (m^3/h)
101860	101760	100	1,2358	0,0183	0,0148	53,429
101910	101760	150	1,2364	0,0224	0,0181	65,269
101960	101760	200	1,237	0,0258	0,0209	75,233
102010	101760	250	1,2376	0,0288	0,0233	83,999
102060	101760	300	1,2382	0,0315	0,0255	91,914
102210	101760	450	1,2401	0,0385	0,0312	112,287
102360	101760	600	1,2419	0,0444	0,0359	129,411
102760	101760	1000	1,2467	0,0571	0,0462	166,44

3. ESTUDO PARAMÉTRICO DE ESTIMATIVA DE TAXAS DE RENOVAÇÃO EM EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS

Neste capítulo pretende-se realizar um estudo paramétrico com o objetivo de avaliar a variabilidade de parâmetros com influência na taxa de ventilação de frações. Para esse efeito, será utilizada uma ferramenta de cálculo, baseada no método analítico do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), o Despacho (extrato) nº 15793-K/2013, que funciona como alternativa ao ensaio de pressurização e aos casos abrangidos pela norma NP 1037-1, para a ventilação natural, e NP 1037-2 para a ventilação mecânica. Para o estudo paramétrico optou-se pela utilização das ferramentas de cálculo disponibilizadas pelo LNEC e pelo ITeCons que aplicam o Despacho (extrato) nº 15793-K/2013.

3.1 Descrição do método de cálculo

3.1.1 Introdução

Como se encontra no Despacho (extrato) nº 15793-K/2013, a taxa de renovação de ar (R_{ph}) na folha de cálculo corresponde à soma dos caudais de ar admitidos no edifício a dividir pelo volume interior útil do edifício e é conseguida de acordo com o método previsto na norma EN 15242:2007. A folha de cálculo determina a pressão interior e os respetivos caudais de ventilação usando a expressão (12), citada na norma EN 15242:2007:

$$\sum_i q_{janelas}(\Delta p_i) + \sum_i q_{caixas\ de\ estore}(\Delta p_i) + \sum_i q_{grelhas}(\Delta p_i) + \sum_i q_{condutas}(\Delta p_i) + \sum_i V_{fi} = 0 \quad (12)$$

em que:

- $q_{janelas}(\Delta p_i)$ corresponde à soma dos caudais de ar escoados através das frinchas das janelas para a diferença de pressão (Δp_i);
- $q_{caixas\ de\ estore}(\Delta p_i)$ corresponde à soma dos caudais de ar escoados através das frinchas das caixas de estores para a diferença de pressão (Δp_i);
- $q_{grelhas}(\Delta p_i)$ corresponde à soma dos caudais de ar escoados através das grelhas de ventilação para a diferença de pressão (Δp_i);

- $q_{condutas}(\Delta p_i)$ corresponde à soma dos caudais de ar escoados através das condutas de ventilação para a diferença de pressão (Δp_i)
- $\sum_i V_{fi}$ corresponde à soma dos caudais de ar através dos ventiladores.

A expressão pode ser dividida em 3 parcelas, em que $q_{janelas}(\Delta p_i)$ e $q_{caixas\ de\ estore}(\Delta p_i)$ correspondem às infiltrações e exfiltrações, $q_{grelhas}(\Delta p_i)$ e $q_{condutas}(\Delta p_i)$ representam também componentes de ventilação natural e $\sum_i V_{fi}$ exprime a ventilação mecânica existente no edifício. A folha de cálculo, além de calcular as taxas de renovação de ar, consegue identificar o caudal nominal das grelhas necessárias para obter o caudal mínimo de ar novo definido e estimar características de isolamento sonoro das grelhas, atendendo ao compartimento mais desfavorável. As características dos edifícios, na folha de cálculo, variam consoante vários parâmetros citados no n.º 3 do ponto 12.1 do Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, como a rugosidade, a região, a área, a presença de obstáculos, etc.

3.1.2 aspetos gerais

Como introdução, e com base no Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, serão indicados alguns aspetos gerais e, de seguida, os vários parâmetros que entram na folha de cálculo para que exista um conhecimento geral da mesma.

Antes da execução da ferramenta de cálculo deve-se ter em conta os seguintes aspetos:

- o edifício tem uma fachada exposta ao vento quando, para determinada orientação, a área dessa fachada representa mais de 70 % da área total de fachadas de fração e quando existem aberturas de ventilação apenas nessa fachada.
- os elementos permeáveis da envolvente e as aberturas para ventilação são situados a barlavento e são repartidos por duas alturas diferentes, a 0,25 e a 0,75 do pé direito em causa.
- nos edifícios com duas ou mais fachadas expostas ao exterior, considera-se que os elementos permeáveis da envolvente e as aberturas para ventilação são distribuídas de maneira igual na fachada a sotavento e a barlavento e a dois níveis distintos, a 0,25 e 0,75 do pé direito. Para efeitos de proteção dos edifícios é admitida a condição de melhor exposição ao vento.
- para verificação do valor mínimo de taxa de renovação de ar definido no Anexo da Portaria n.º 349-B/2013, de 29 de novembro, não se devem considerar no cálculo da taxa de renovação as infiltrações de ar associadas às caixas de estore e às janelas de classe inferior ou igual à 2.

3.1.3 Enquadramento do edifício

A expressão para calcular a velocidade média do vento no local, u , varia consoante a região e uns parâmetros relacionados com a rugosidade sendo:

- Na região A:

$$u = 11,5 * \left(\frac{H_{edif}}{Z_u}\right)^\alpha \quad (13)$$

-Na região B:

$$u = 12,6 * \left(\frac{H_{edif}}{Z_u}\right)^\alpha \quad (14)$$

em que:

- H_{edif} é a altura do edifício em estudo, correspondente à maior distância vertical entre ponto do teto da fração mais elevada do edifício (nível da cobertura) e o nível do terreno [m];
- Z_u e α são parâmetros que estão relacionados com a rugosidade.

A rugosidade ou classe de exposição ao vento encontra-se separada em:

- Rugosidade I pertencem os edifícios situados no interior de uma zona urbana;
- Rugosidade II englobam os edifícios situados na periferia de uma zona urbana ou numa zona rural;
- Rugosidade III compreendem os edifícios situados em zonas muito expostas.

A velocidade média do vento será menor na região A, uma vez que a região B envolve localidades mais propícias ao vento como as zonas situadas nas ilhas, junto à costa ou a altitudes elevadas. Já os parâmetros, sendo inversamente proporcionais à velocidade média do vento, serão menores em edifícios pertencentes à rugosidade III em comparação com zonas urbanas, onde é menos sentido o vento. Na figura 3.1 é possível observar a influência que a rugosidade tem na velocidade do vento, verificando-se também a existência de uma camada limite atmosférica, que é originada no solo, onde a velocidade horizontal é nula, prolongando-se até uma altura em que os efeitos dos obstáculos na velocidade do vento não sejam sentidos (Amaral, 2008).

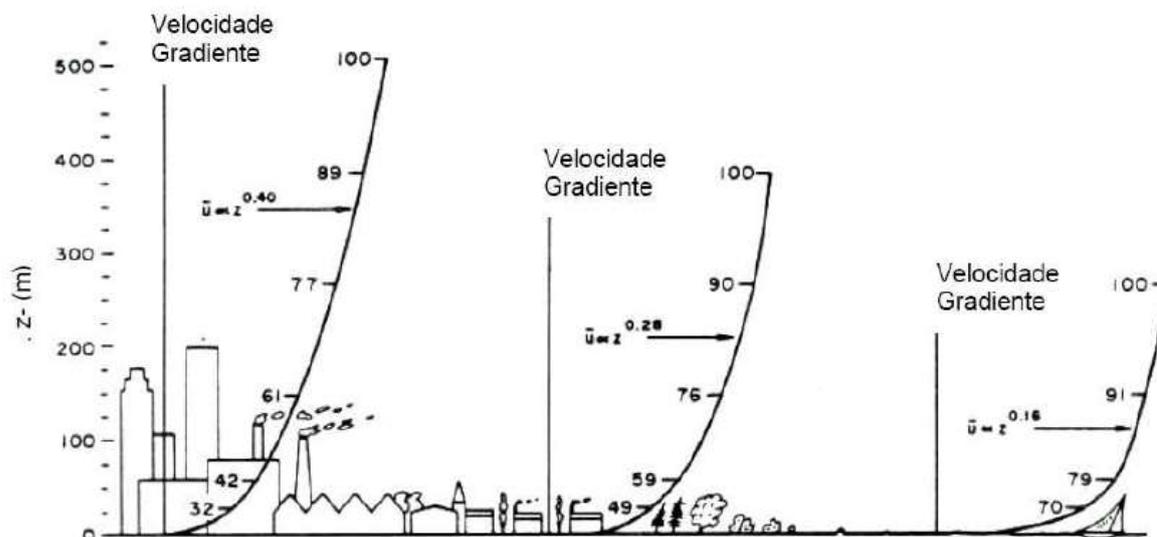


Figura 3.1 – Influência da rugosidade do terreno nos perfis do tipo potência da velocidade do vento (Amaral, 2008)

A renovação de ar num edifício, como está referido no capítulo anterior, é efetuada através do vento e do efeito da impulsão térmica, no caso da ventilação se realizar por efeito de chaminé. A expressão (15) traduz a diferença de pressão exercida na envolvente que é causada pela impulsão térmica.

$$\Delta P = -\rho g H \left(\frac{273,15 + \theta_{ext,i}}{273,15 + \theta_{ref,i}} \right) \quad (15)$$

em que:

- ρ é a massa volúmica do ar exterior [kg/m^3];
- g é a aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m}/\text{s}^2$);
- H é a diferença de cotas entre aberturas, [m];
- $\theta_{ext,i}$ é a temperatura exterior média mensal do mês mais frio [$^{\circ}\text{C}$];
- $\theta_{ref,i}$ é a temperatura interior de referência na estação de aquecimento, igual a $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Na figura 2.6 do capítulo 2, é caracterizada a distribuição de pressões provocada pelo vento quando embate num edifício. Essas pressões, como se encontra indicado no anexo I do Decreto Lei n.º 235/83, são definidas através de coeficientes de pressão, C_p , e podem ser interiores e exteriores conforme as pressões sejam interiores ou exteriores. Os coeficientes de pressão são positivos caso a pressão local seja maior que a pressão atmosférica e negativos, caso contrário, (Gomes, 2010) como se comprova na expressão (16) (Amaral, 2008).

$$C_p = \frac{p_i - p_\infty}{\rho * \frac{1}{2} u_{ref}^2} \quad (16)$$

em que:

- p_i é pressão estática local [Pa];
- p_∞ é a pressão atmosférica [Pa];
- u_{ref} é a velocidade média do vento no local [m/s];
- ρ é a massa volúmica do ar [kg/m^3].

Os coeficientes de pressão utilizados pela ferramenta de cálculo estão indicados no Despacho (extrato) nº 15793-K/2013 e são determinados em função da altura da fração e da presença de obstáculos dado que, quando o vento é obrigado a contornar algum obstáculo, como consequência, existe uma variação no campo de velocidades que cria uma distribuição de pressões não uniforme (Gomes, 2010). Conhecendo os coeficientes de pressão, com a expressão (17), é possível calcular o efeito da ação do vento na envolvente da fração.

$$P_w = C_p * \frac{1}{2} \rho * u^2 \quad (17)$$

A classe de proteção do edifício é definida com base no valor resultante da razão da maior distância entre a fachada do edifício em estudo e a fachada do obstáculo/edifício situado em frente com a altura do obstáculo situado em frente à fachada. Sempre que existam vários obstáculos às fachadas, é considerado o obstáculo que traduza a maior distância e, se não se verificarem nenhuma das condições anteriores ou na ausência de obstáculos ou informação necessária, a classe de proteção do edifício é considerada desprotegido.

3.1.4 Permeabilidade ao ar da envolvente

A caracterização da permeabilidade ao ar da envolvente pode ser efetuada de duas formas, usando o ensaio de pressurização EN 13829: 2001 para medir o valor n_{50} e estimar o caudal de infiltrações de ar com a expressão (18) ou considerar que as principais frinchas na envolvente exterior correspondem à caixilharia relativa às portas e janelas e, caso hajam, às caixas de estores em que:

- q_v é o caudal de infiltrações de ar em [m^3/h];

$$q_v = n_{50} * A_p * P_d * \left(\frac{\Delta P}{50}\right)^{0.67} \quad (18)$$

- ΔP é a diferença de pressões [Pa];
- A_p é a área do pavimento [m^2];

- P_d é o pé direito [m].

Para calcular o caudal de infiltrações de ar pelas janelas e portas, como se verifica na expressão (19), é necessário saber as classes de permeabilidades ao ar de ambas. Considera-se caixilharia sem classe de permeabilidade ao ar caso haja ausência de classes determinadas de acordo com as normas enunciadas.

$$q_v = W * \left(\frac{\Delta P}{100} \right)^{0,67} * A_{v\tilde{a}os} \quad (19)$$

em que:

- W é o coeficiente que toma o valor de 100, 50, 27, 9 ou 3 para janelas e portas sem classificação, classe 1, classe 2, classe 3, classe 4, respetivamente;
- $A_{v\tilde{a}os}$ é a área total de vãos [m²].

Comparando as classes todas, a classe 4 é a mais estanque visto que o coeficiente e, consequentemente, o caudal de ar são menores. A caixa de estore, em termos de permeabilidade ao ar, é classificada como baixa, elevada ou sem classificação. Uma caixa de estore sem classificação, no cálculo do caudal de infiltrações de ar, não é considerada.

3.1.5 Sistemas de ventilação

O Despacho (extrato) nº 15793-K/2013 classifica as aberturas de admissão de ar na envolvente exterior como aberturas fixas, reguláveis manualmente ou aberturas auto-reguláveis. O caudal de ar escoado nas aberturas fixas ou reguláveis manualmente é conseguido pela expressão (20).

$$q_v = 0,281 * \Delta P * A \quad (20)$$

em que:

- A é a área livre da abertura em [m²].

Segundo a norma EN 13141-1:2006, área livre é a “soma das áreas das secções de todas as aberturas livres medidas no plano de restrição máxima e ângulos retos em relação ao escoamento através das aberturas”. No caso das aberturas auto-reguláveis, a regulação do caudal, x , é iniciada a uma diferença de pressão que usualmente toma os valores de 2, 10 ou 20 Pa. A relação entre o caudal e a diferença de pressão aberturas auto-reguláveis, é calculada utilizando as expressões (21) e (22).

Se $\Delta P \leq x$,

$$q_v = M * \left(\frac{\Delta P}{x}\right)^{0,5} \quad (21)$$

Caso contrário,

$$q_v = M * 1 + 0,5 \left(\frac{\Delta P - x}{100 - x}\right) \quad (22)$$

em que:

- M é o caudal nominal em [m³/h].

No caso de existirem chaminés que funcionem como condutas de admissão ou de exaustão de ar, estas devem ser englobadas no cálculo da R_{ph} . No cálculo do escoamento natural do ar através dessas condutas são consideradas as perdas de carga na chaminé e o efeito da localização da sua saída na cobertura. Nas frações abastecidas de sistemas mecânicos ou híbridos que garantam a insuflação de um caudal de ar contínuo, não é preciso definir as respetivas condutas visto que, se considera que se encontra garantido esse valor do caudal de ar. No caso de caudal de ar variável, para efeitos de cálculo é considerado o caudal de ar médio diário. Na ausência de projeto, como está definido no Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, “podem ser considerados os caudais de ar definidos no n.º 3.2 do despacho que procede à publicação das regras de simplificação a utilizar nos edifícios sujeitos a grandes intervenções, bem como existentes, com um valor mínimo de 0,4 h⁻¹.”

3.2 Identificação de algumas soluções de dispositivos de ventilação existentes no mercado

Com o objetivo de tornar o estudo mais completo e realista, realizou-se uma identificação de algumas soluções de dispositivos de ventilação existentes no mercado de modo a aplicá-los na folha de cálculo. Para o estudo, foram escolhidos ventiladores estáticos e grelhas de ventilação, um ventilador centrífugo extrator em linha para condutas e um ventilador com assistência híbrida e servem assim de exemplo a sistemas de ventilação natural, mecânica e híbrida, respetivamente. As dimensões dos ventiladores estáticos selecionados encontram-se nas figuras 3.2 e 3.3 e são, respetivamente, o modelo 1SV.0200 da série 1 e o 5OV.0350 da série 5, ambos da Airocle.

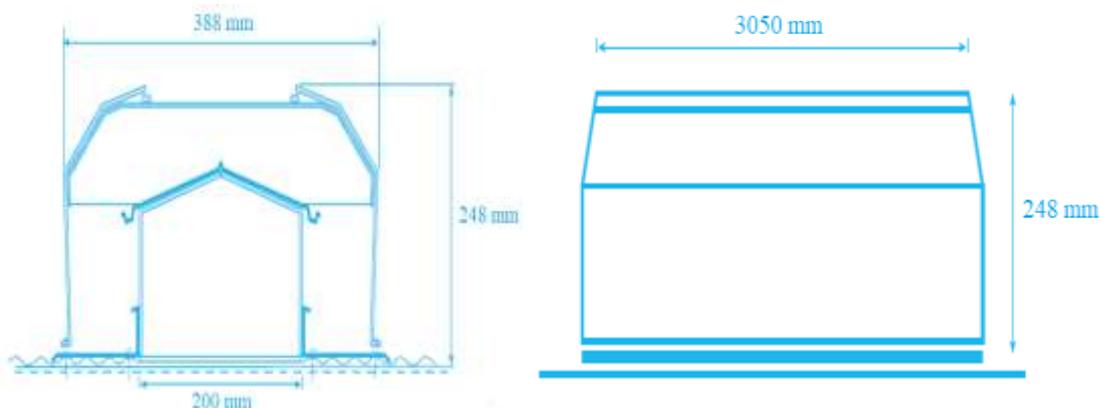


Figura 3.2 – Dimensões do modelo 1SV.0200 da série 1 (Airocle1Series@2018)

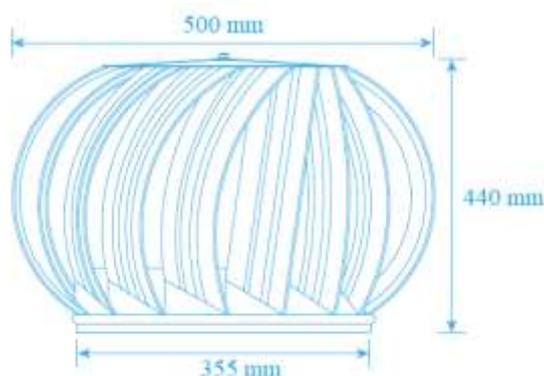


Figura 3.3 – Dimensões do modelo 5OV.0350 da série 5 (Airocle5Series@2018)

Em relação às grelhas de ventilação, optou-se pela escolha de uma grelha fixa, com as seguintes dimensões, 13.1X33X0,5 cm, da Leroy Merlin (Leroymerlin@2018) e com uma passagem de ar de 188 cm², e de três grelhas auto-reguláveis fabricadas pela empresa Renson, a Invisivent EVO, a THM90 EVO e a Transivent (Vento@2018). Na figura 3.4, verifica-se que a InvisiventEVO é instalada no aro acima da caixilharia, a THM90 EVO na folha dos caixilhos substituindo parte do vidro e a Transivent nas caixas de estore. Além da Renson, algumas empresas que fabricam e comercializam grelhas de ventilação são a Schüco, a Aralco, a France Air.



Figura 3.4 – Grelhas auto-reguláveis utilizadas no estudo (Vento@2018)

As características das grelhas auto-reguláveis são apresentadas no quadro 3.1, sendo que $D_{n,e,w}$ é o índice de isolamento normalizado de um elemento e C e C_{tr} são o factor de adaptação do espectro do ruído rosa e do espectro do ruído de tráfego, respetivamente (Tadeu & Mendes, 2016) e U , o coeficiente de transmissão térmica.

Quadro 3.1 – Características das grelhas utilizadas no estudo

Grelha de ventilação	Q (m ³ /h/m)			Área equivalente (mm ² /m)	U (W/m ² .°C)	D _{n,e,w} (C;C _{tr})	
	2 Pa	10 Pa	20 Pa			Fechada	Aberta
Invisivent EVO	51,4	47,1	51,8	13728	2,8	49 dB	27 dB
THM90 EVO (FlatAir EPC)	50	48,6	54,3	11841	3,8	45 dB	26 dB
Transivent	54,7	72,3	71,6	13748	3,0	44 dB	28 dB

A norma NP EN 13141-1:2006 define área equivalente como a “área de um orifício circular com arestas vivas que deixaria passar o mesmo caudal de ar que o produto ou dispositivo submetido a ensaio quando sujeito às mesmas diferenças de pressão”. As soluções de mercado que funcionam como exemplo de sistema de ventilação mecânica e híbrida, nesta ordem, são o SVE-125/H da Sodeca (Sodeca@2018), figura 3.5, e o VBP+ da Aereco (Aereco@2018), figura 3.6.



Figura 3.5 - SVE-125/H (Sodeca@2018)



Figura 3.6 - VBP+ (Aereco@2018)

3.3 Caso de estudo

Depois de indicados os parâmetros que fazem parte da folha de cálculo, é importante observar a influência que os mesmos têm na ventilação dos edifícios. Com esse propósito, devem ser comparadas entre o edifício de referência e os edifícios com os parâmetros modificados, as alterações que existam nas R_{ph} e o caudal de ar novo necessário para alcançar a ventilação pretendida.

3.3.1 Descrição do edifício de referência

O edifício utilizado como base apresenta as seguintes características:

- Edifício existente;
- Localizado em Coimbra;
- Região A;
- Rugosidade I;
- 2 ou mais fachadas expostas ao exterior;
- Moradia multifamiliar com 3 pisos;
- Fração em estudo é o rés-do-chão;
- Sem obstáculos à frente da fachada;
- Área útil da fração é 100 m²;
- Velocidade do vento média definida na metodologia do Regulamento dos Edifícios de Habitação (REH);
- 15 % de área envidraçada;
- Caixas de estores sem classe de permeabilidade ao ar;
- Caixilharia com classe 4 de permeabilidade ao ar

- É considerado que as principais frinchas na envolvente exterior correspondem à caixilharia relativa às portas e janelas e, caso hajam, às caixas de estores;
- Caudal mínimo de ar novo pretendido é $0,6 \text{ h}^{-1}$;
- Não são consideradas frinchas no dimensionamento das grelhas;
- Não dispõe de condutas de ventilação natural e exaustão ou insuflação por meios mecânicos e híbridos.

Como simplificação, as alturas do edifício em estudo, da fração e de possíveis obstáculos são consideradas 3 metros vezes o número de pisos. Ou seja, a moradia de 3 pisos tem uma altura de 9 metros e a fração em estudo, um pé-direito de 3 metros. O edifício base é um edifício existente dado que, para edifícios novos ou grandes reabilitações, não é considerado, pela folha de cálculo, o efeito de janelas sem classificação, de classe 1 e 2 e a existência de caixas de estores no cálculo da R_{ph} estimada.

O requisito mínimo de ventilação, como foi referido no capítulo anterior, é de $0,4 \text{ h}^{-1}$, sendo que o Despacho (extrato) nº 15793-F/2013 refere que “estação de arrefecimento exclusivamente para folhas de cálculo, não deverá ser utilizado um valor de $R_{ph,v}$ inferior a $0,6 \text{ h}^{-1}$ ”. Considerou-se assim um caudal mínimo de ar novo pretendido igual a $0,6 \text{ h}^{-1}$, visto que é o valor mínimo de $R_{ph,v}$. Os resultados da folha de cálculo exigidos em termos de renovação de ar são apresentados no quadro 3.2. A $R_{ph,i \text{ REF}}$ está relacionada com o edifício base e estará sempre, neste estudo, entre os $0,4$ e os $0,6 \text{ h}^{-1}$. A folha de cálculo calcula a área necessária de grelhas fixas ou reguláveis manualmente e o caudal nominal necessário de grelhas auto-reguláveis a 2 Pa, 10 Pa e 20 Pa para o edifício atingir a ventilação pretendida. As grelhas a 2 Pa, dado que são mais caras, precisas e eficientes, o caudal de ar necessário para atingir a ventilação pretendida será sempre menor quando comparadas com as grelhas a 10 Pa e 20 Pa.

Quadro 3.2 – Resultados em termos de renovação de ar do edifício base

$R_{ph,i}$	$R_{ph,v}$	$R_{ph,i \text{ REF}}$	R_{ph} Estimada	Requisito mínimo	Critério R_{ph} mínimo
0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	Satisfatório

em que:

- $R_{ph,i}$ é a taxa de renovação de ar nas estações de aquecimento [h^{-1}];
- $R_{ph,v}$ é a taxa de renovação de ar nas estações de arrefecimento [h^{-1}];
- $R_{ph,i \text{ REF}}$ é a taxa de renovação de ar do edifício de referência [h^{-1}];
- R_{ph} estimada em condições nominais [h^{-1}].

3.3.2 Região e rugosidade

A fim de aferir se a região em que se encontra o edifício e a rugosidade perturbam a ventilação do mesmo, é comparado o desempenho do edifício base com edifícios idênticos que se localizem noutros municípios e, em sítios rurais e urbanos. Os municípios foram escolhidos consoante a sua temperatura exterior média do mês mais frio da estação de aquecimento ($\theta_{ext, i}$), que é conseguida com a ajuda das tabelas 01 e 04 do Despacho (extrato) nº 15793-F/2013. A partir da tabela 04 foram escolhidas as zonas Alto-Trás-os-Montes e Algarve, já que têm, respetivamente, a $\theta_{ext, i}$ menor e maior de Portugal Continental e a Região Autónoma da Madeira por ter um clima moderado o ano todo. Os municípios escolhidos, a partir da tabela 01, além de Coimbra, foram Mirandela, pertencentes à Região A e Funchal, que faz parte da Região B. Da zona do Algarve, foi analisado o município de Albufeira como Região A e B, para averiguar as diferenças entre o edifício estar situado perto da costa ou não. No quadro 3.3, encontram-se as taxas de renovação de ar para as várias classes de exposição ao vento para o município de Coimbra.

Quadro 3.3 - Resultados em termos de renovação de ar para as várias classes de exposição ao vento no município de Coimbra

Classe de exposição ao vento	$R_{ph,i}$	$R_{ph,v}$	$R_{ph,i REF}$	R_{ph} Estimada	Requisito mínimo	Critério R_{ph} mínimo
Rugosidade I	0,6	0,6	0,6	0,5	0,4	Satisfatório
Rugosidade I	0,6	0,6	0,6	0,5	0,4	Satisfatório
Rugosidade I	0,62	0,62	0,6	0,62	0,4	Satisfatório

Quando o edifício pertence à rugosidade III, como seria de esperar, a R_{ph} estimada é ligeiramente maior e é preciso menos área de grelha fixa ou regulável manualmente e caudal nominal das grelhas auto-reguláveis para se atingir a renovação de ar pretendida, em comparação com a rugosidade II e I. Entre os resultados da rugosidade I e II, as alterações não são tão evidentes. Quando se comparam os resultados do município da Albufeira para a Região A e Região B, constata-se que, tanto nos edifícios de rugosidade II, como os de rugosidade III, existe um pequeno aumento da R_{ph} estimada e, conseqüentemente, uma redução na área de grelha fixa ou regulável manualmente e nos caudais nominais das grelhas auto-reguláveis necessárias para ventilar edifícios pertencentes à Região B como por exemplo, perto da costa. Nas zonas urbanas, não há alteração entre a Região A e B para o município de Albufeira.

Verifica-se, no entanto, que para todas as rugosidades, as diferenças entre os vários municípios são mínimas, ou seja, alterar o município não afeta de maneira significativa a ventilação do edifício.

3.3.3 Alteração das características dimensionais do edifício em estudo

De modo a verificar a influência do volume do edifício na ventilação do edifício, foi aumentada e diminuída a área útil da fração, respetivamente, para 150 m² e 75 m². Os resultados obtidos para as taxas de renovação de ar e para a área e caudais de ar necessários para atingir 0,6 h⁻¹ encontram-se, na devida ordem, no quadro 3.4 e 3.5.

Quadro 3.4 - Resultados em termos de taxas de renovação de ar para várias áreas úteis de fração

Área útil[m ²]	Resultados em termos da renovação de ar [h-1]					
	Rph _i	Rph _v	Rph _{REF}	Rph estimada	Requisito mínimo	Critério Rph mínimo
100	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	Satisfatório
150	0,4	0,6	0,4	0,4	0,4	Satisfatório
75	0,8	0,8	0,6	0,8	0,4	Satisfatório

Quadro 3.5 - Caudal de ar novo e área necessários para alcançar 0,6 h⁻¹

Área útil [m ²]	Grelha fixa ou regulável manualmente	Grelhas auto-reguláveis		
		2 Pa	10 Pa	20 Pa
Área necessária [cm ²]		Caudal nominal necessário [m ³ /h]		
100	574	349	511	727
150	878	523	780	1104
75	439	262	383	545

O aumento da área útil da fração de 100 m² para 150 m² provoca uma diminuição da R_{ph} estimada de tal modo, que atinge um valor no limite do requisito mínimo. Deste modo, para uma área útil da fração de 150 m², são precisos uma área de grelha fixa ou regulável manualmente e caudais de ar novo das grelhas auto-reguláveis muito maiores para obter a renovação de ar pretendida. Pelo contrário, uma redução da área conduz a uma diminuição da ventilação necessária para a fração atingir os 0,6 h⁻¹. Assim sendo, alterar o volume do edifício influencia significativamente a ventilação do edifício. A área útil da fração e o caudal nominal necessário são praticamente lineares, mas ter em conta que ferramenta de cálculo não entra com

o fator de forma do edifício. Esta linearidade também é verificada entre área útil da fração e a área necessária de grelha fixa ou regulável manualmente.

Como se pode ver no quadro 3.6 e na figura 3.7, considerar apenas uma fachada exposta, ou melhor, que existam aberturas de ventilação apenas nessa fachada afeta de forma expressiva e negativa a ventilação do edifício quando comparados com os resultados do edifício base, com duas fachadas expostas.

Quadro 3.6 - Resultados em termos de taxas de renovação de ar para um edifício com uma fachada exposta

Município	Resultados em termos da renovação de ar [h^{-1}]					
	$R_{ph,i}$	$R_{ph,v}$	$R_{ph,i}$ REF	R_{ph} estimada	Requisito mínimo	Critério R_{ph} mínimo
Albufeira (A)	0,4	0,6	0,4	0,19	0,4	Não satisfatório
Coimbra	0,4	0,6	0,4	0,21	0,4	Não satisfatório
Mirandela	0,4	0,6	0,4	0,26	0,4	Não satisfatório
Funchal	0,4	0,6	0,4	0,19	0,4	Não satisfatório
Albufeira (B)	0,4	0,6	0,4	0,13	0,4	Não satisfatório

Em todos os municípios, com a alteração, a R_{ph} estimada registou valores inferiores aos $0,4 h^{-1}$, e não cumpre os requisitos mínimos de renovação de ar enunciados na Portaria n.º 349-B/2013.

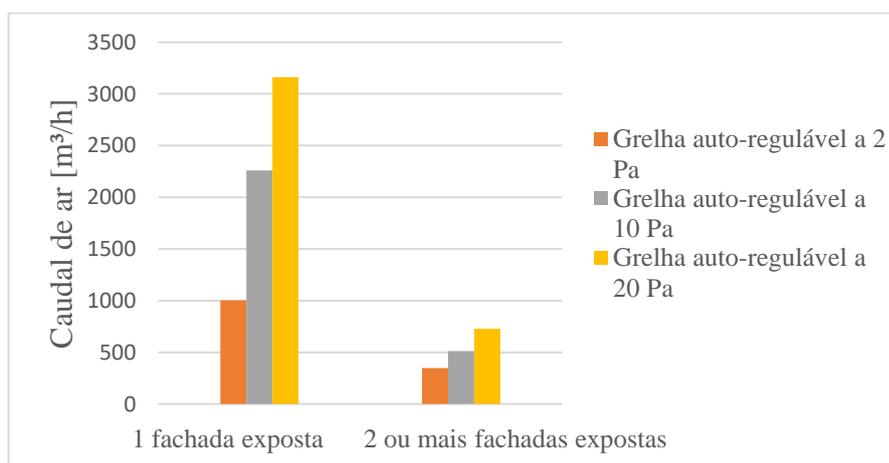


Figura 3.7 – Caudal de ar necessário para uma fachada exposta e duas fachadas expostas para o município de Coimbra

É notável também, na figura 3.7, o aumento substancial do caudal de ar novo necessário das grelhas auto-reguláveis para obter a ventilação desejada na fração para apenas uma fachada exposta para o município de Coimbra. Para todos os municípios com uma fachada exposta, o caudal de ar necessário das grelhas auto-reguláveis, para alcançar os $0,6 \text{ h}^{-1}$, quase que atinge os $1000 \text{ [m}^3/\text{h]}$ sendo que, para o Funchal, o caudal de ar preciso com uma grelha de 20 Pa ultrapassa os $5000 \text{ [m}^3/\text{h]}$ em comparação com os $736 \text{ [m}^3/\text{h]}$ quando se têm duas fachadas expostas. Em Mirandela, o caudal de ar novo necessário é menor em comparação com as outras localidades referidas, sendo Funchal a localidade que precisa de mais ventilação. Nas grelhas fixas ou reguláveis manualmente os resultados demonstram o mesmo que os resultados das grelhas auto-reguláveis, sendo preciso mais de 2000 cm^2 de grelha fixa para os edifícios dos vários municípios alcançarem os $0,6 \text{ h}^{-1}$, atingindo o valor máximo de 4140 cm^2 para o edifício localizado no Funchal. O tipo de rugosidade não influencia a ventilação do edifício quando se trata apenas de uma fachada exposta.

3.3.4 Permeabilidade ao ar da envolvente

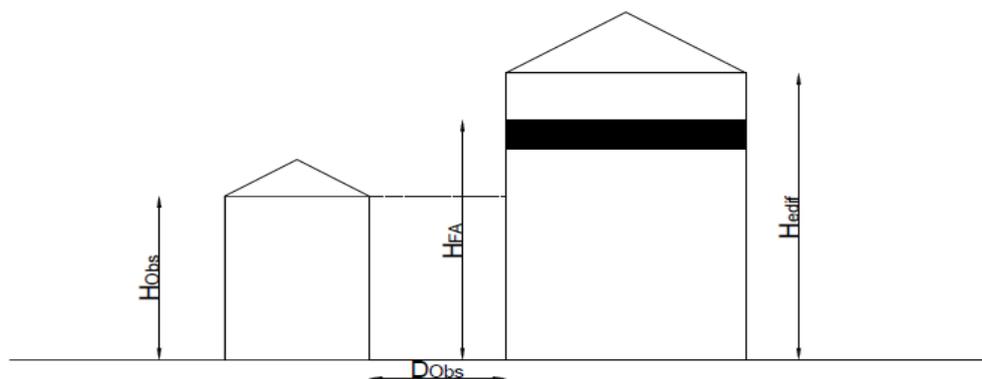
A folha de cálculo, para não valorizar a utilização de janelas e caixas de estores de elevada permeabilidade ao ar como forma de ventilação, as infiltrações de ar associadas às caixas de estore e às janelas de classe inferior ou igual à 2 não são consideradas na identificação do caudal de ar das grelhas necessário para obter uma renovação de ar de $0,6 \text{ h}^{-1}$. No entanto, devido a ser um edifício existente, no quadro 3.7, observa-se que, introduzir uma caixa de estore com permeabilidade alta ou uma caixilharia sem classe de permeabilidade ao ar aumenta significativamente a R_{ph} , estimada.

Quadro 3.7 - Resultados em termos de taxa de renovação de ar para o edifício base, uma caixa de estore com permeabilidade alta e uma caixilharia sem classe de permeabilidade ao ar

Parâmetro alterado	Resultados em termos da renovação de ar [h^{-1}]					
	$R_{ph,i}$	$R_{ph,v}$	$R_{ph,i \text{ REF}}$	R_{ph} estimada	Requisito mínimo	Critério R_{ph} mínimo
Edifício base	0,60	0,60	0,60	0,60	0,40	Satisfatório
Caixa de estore com permeabilidade alta	0,98	0,98	0,60	0,98	0,40	Satisfatório
Caixilharia sem classe de permeabilidade ao ar	0,91	0,91	0,60	0,91	0,40	Satisfatório

3.4.5 Presença de obstáculos

As distâncias e alturas definidas pela folha de cálculo encontram-se na figura 3.8.



em que:

- H_{obs} é altura do obstáculo situado em frente à fachada [m];
- D_{obs} é a maior distância entre a fachada do edifício em estudo e a fachada do obstáculo/edifício situado em frente;
- H_{FA} é a altura da fração em estudo;
- H_{edif} é a altura do edifício em estudo.

Figura 3.8 - Distâncias e alturas definidas pela folha de cálculo do Despacho (extrato) nº 15793-K/2013

Com o intuito de observar a influência de obstáculos e a distância que se encontram do edifício em estudo, foram avaliados vários casos com obstáculos com diferentes alturas e distâncias (Figura 3.9 e 3.10)

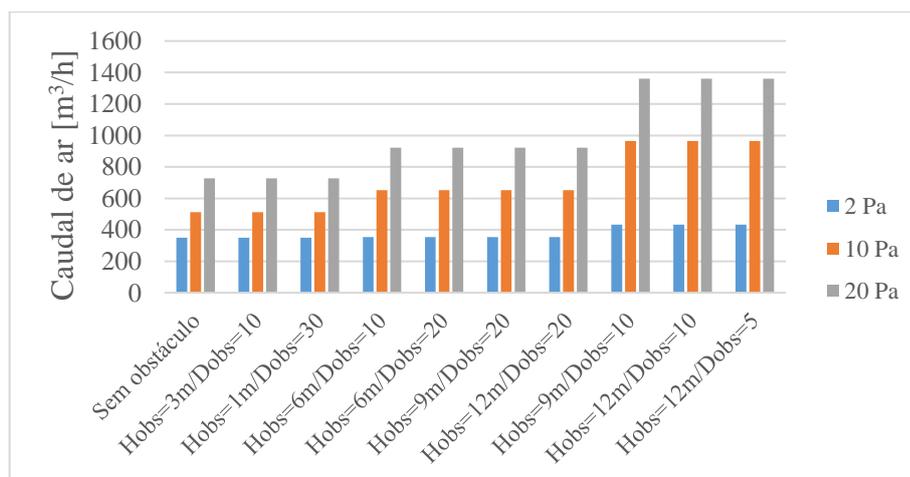


Figura 3.9 – Caudal de ar de grelhas auto-reguláveis a 2 Pa, 10 Pa e 20 Pa necessário para atingir os $0,6 \text{ h}^{-1}$ para um edifício sem obstáculo e na presença de vários obstáculos

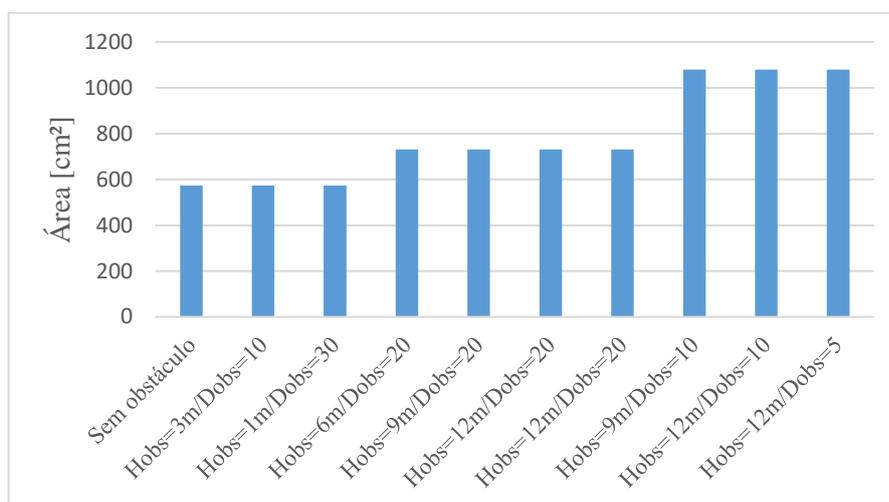


Figura 3.10 – Área de grelha fixa ou manualmente regulável necessária para atingir os $0,6 \text{ h}^{-1}$ para um edifício sem obstáculo e na presença de vários obstáculos

Como era expetável, a presença de um obstáculo interfere com a ventilação do edifício e quanto mais alto é e mais perto está, menor é a R_{ph} estimada e maior é a área de grelha fixa e o caudal de ar novo de grelhas auto-regulável necessários para atingirem os requisitos mínimos. Porém, quando a classe de proteção do edifício em estudo é considerada desprotegido, como nos três primeiros exemplos da figura 2.10, diminuir a distância ou reduzir a altura do obstáculo ou até mesmo a presença do obstáculo, em nada afeta a ventilação do edifício. Já, quando a classe de proteção do edifício em estudo é considerada protegido (três últimos exemplos da figura 2.10), o aumento da altura do obstáculo de 9 para 12 metros e a diminuição a sua distância de 10 para 5 metros, não interfere com a área de grelha fixa e com o caudal de ar novo de grelha auto-regulável necessário para atingir a ventilação pretendida.

Mudar a fração em estudo do rés-do-chão para o 2º andar e, consecutivamente, a altura da fração em estudo de 3 para 9 metros, não altera a taxa de renovação de ar da fração. No entanto, considerar um edifício de 7 pisos com uma altura de 21 metros e localizar a fração em estudo no último piso, melhora ligeiramente a taxa de renovação do ar do edifício e a ventilação do edifício.

3.3.5 Conduitas de admissão e de evacuação natural do ar

Os ventiladores estáticos dependem do tipo de escoamento de ar, da perda de carga, da altura da conduta, do tipo de cobertura e do número de condutas semelhantes. O quadro 3.8,

fundamentado pelas figuras 3.2 e 3.3 e pelo Despacho (extrato) nº 15793-K/2013, mostra as características necessárias para determinar o tipo de carga dos ventiladores.

Quadro 3.8 - Características dos ventiladores

Ventilador estático	a [m]	b [m]	D [m]	W [m]	H [m]	Área _{livre} [m ²]	Área _{conduta} [m ²]	Área _{livre} / Área _{conduta}	Perda de carga
1SV.0200	0,20	3,05	0,71	0,388	0,248	1,18	0,40	2,98	Baixa
5OV.0350			0,31	0,50	0,44	0,20	0,07	2,69	

A área livre do modelo 5OV.0350, bem como as áreas das condutas, são calculadas através do seu diâmetro pela expressão (23). O modelo 1SV.0200, embora tenha uma conduta retangular, segundo o Despacho (extrato) nº 15793-K/2013 considera-se que, tem um diâmetro equivalente.

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (23)$$

A área livre, no modelo 1SV.0200, ao contrário das outras áreas, é calculada multiplicando o b e o W e como a razão da área livre e da área da conduta, nos dois modelos, é superior a 0,7 a perda de carga é denominada baixa. A altura da conduta consegue-se somando 3 metros ao desnível entre o teto da fração e a altura do edifício. Deste modo, os dois modelos serão considerados iguais na folha de cálculo, pois ambos têm a mesma altura de fração e uma baixa perda de carga. Na figura 3.11 é apresentado o caudal de ar necessário para as grelhas a 2 Pa, 10 Pa e 20 Pa atingirem a ventilação pretendida de 0,6 h⁻¹ de um edifício sem ventilador estático, o edifício base com ventiladores estáticos instalados.

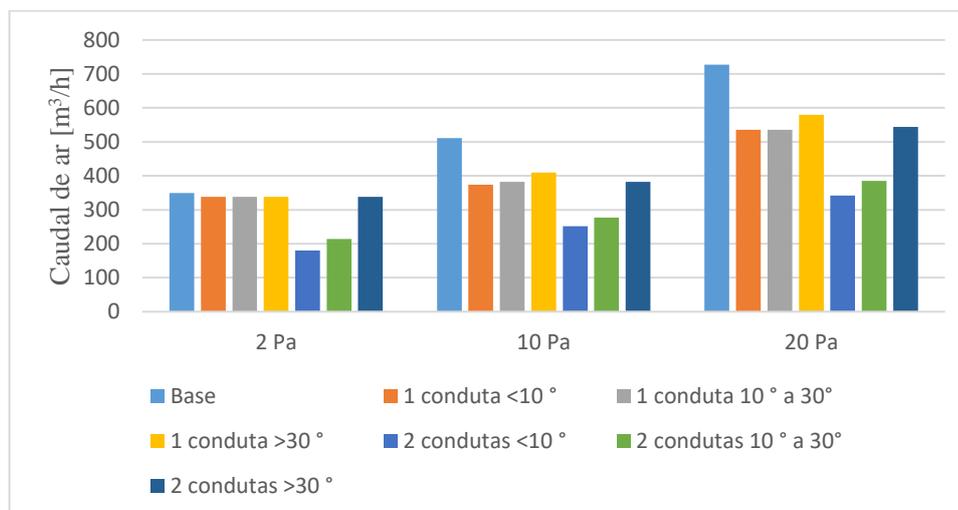


Figura 3.11 - Caudal de ar necessário de grelhas a 2 Pa, 10 Pa e 20 Pa para o edifício base e vários tipos de ventiladores estáticos 1SV.0200 atingirem os $0,6 \text{ h}^{-1}$

Nota-se, na figura 3.11, que instalar uma conduta com um ventilador estático 1SV.0200 melhora ligeiramente a ventilação do edifício quando comparado com o edifício sem ventilador estático sendo a melhoria mais nítida nas grelhas a 10 Pa e 20 Pa. Aumentar o número de condutas com ventilador estático para duas, melhora substancialmente a ventilação, particularmente quando a inclinação da cobertura é inferior a 10° ou entre os 10° e os 30° . Os resultados obtidos utilizando as grelhas fixas ou reguláveis manualmente indicam o mesmo que os resultados das grelhas auto-reguláveis. Assim, quanto menos inclinada for a cobertura, menor é a área de grelha fixa e o caudal necessários, sobretudo, quando existem duas condutas com ventilador estático.

Para verificar a influência da altura da conduta na ventilação do edifício, foi alterada a altura do edifício de 9 para 20 metros e instalada uma conduta com um ventilador estático. Essa alteração conduz a uma melhoria substancial na ventilação e na respetiva R_{ph} e reduz a área de grelha fixa e o caudal de ar das grelhas auto-reguláveis necessários para atingir os $0,6 \text{ h}^{-1}$. Embora os resultados dos dois modelos na folha de cálculo sejam iguais, na realidade, o modelo 5OV.0350, tendo uma altura superior em relação ao 1SV.0200, gera uma renovação de ar superior.

3.3.6 Condutas de insuflação ou de evacuação mecânica do ar

Os fatores indicados pela folha de cálculo como relevantes nos sistemas de ventilação mecânica são o tipo de escoamento de ar, o caudal nominal, a pressão total e o rendimento total do ventilador. Nos sistemas de ventilação mecânica, além dos enunciados, ainda é importante

conhecer se tem sistema de recuperação de calor e, caso tenha, o seu rendimento. Uma vez que nos sistemas de ventilação SVE-125/H e VBP+, não são conhecidos a pressão total do ventilador e o seu rendimento, apenas será analisado a influência na ventilação do edifício através do caudal nominal. Os caudais máximos dos sistemas SVE-125/H e VBP+ a 20 Pa são, respetivamente, de 370 m³/h e 1000 m³/h.

A adição do SVE-125/H é de tal maneira benéfica na ventilação, que o edifício não precisa de dispositivos específicos de ventilação natural para atingir a taxa de renovação de ar de 0,6 h⁻¹, ou seja, não são necessárias grelhas fixas ou auto-reguláveis. Do mesmo modo, a incorporação do VBP+ provoca um valor de R_{ph} estimada de 2 h⁻¹ e também não precisa de grelhas fixas ou de caudal de ar escoado das grelhas auto-reguláveis para alcançar a ventilação pretendida.

3.3.7 Dimensionamento de grelhas de ventilação comerciais

Para concluir o estudo, realizou-se uma análise utilizando as grelhas de ventilação do mercado com o intuito de obter valores mais realistas e práticos. Essa análise é conseguida através da razão entre o caudal nominal das grelhas necessárias para obter o caudal mínimo de ar novo pretendido a partir da folha de cálculo e os valores de caudal de ar por metro de grelha a 2 Pa, 10 Pa e 20 Pa, divulgados para cada grelha de ventilação sendo o valor da razão equivalente aos metros de grelha que serão necessários para atingir a ventilação pretendida. Como era esperado por escoar mais caudal de ar, a Transivent é a mais eficiente das três grelhas auto-reguláveis. Pelo contrário, a grelha auto-regulável a 20 Pa da Invisivent EVO, é a menos eficiente e a que precisa de mais metros de grelha quando comparadas com as outras, como se pode observar no quadro 3.9.

Quadro 3.9 – Metros de grelha necessários para atingir uma renovação de ar horária de 0,6 h⁻¹

Tipo de grelha	Invisivent EVO			THM90 EVO (FlatAir EPC)			Transivent		
	2 Pa	10 Pa	20 Pa	2 Pa	10 Pa	20 Pa	2 Pa	10 Pa	20 Pa
Metros necessários	6,79	10,85	14,03	6,98	10,51	13,39	6,38	7,07	10,15

Como foi referido anteriormente, nota-se que as grelhas auto-reguláveis a 2 Pa são muito mais eficientes e necessitam de menos metros de grelha que as grelhas de 10 e 20 Pa sendo que, para a Invisivent EVO e a THM 90, uma grelha a 2 Pa precisa de aproximadamente metade dos metros que uma grelha de 20 Pa para conseguir a mesma ventilação. O tipo de grelha também pode influenciar bastante já que, utilizando a Invisivent EVO a 20 Pa, o edifício base necessita por volta de 14 metros de grelha para garantir a ventilação desejada e se utilizarmos a Transivent a 20 Pa, esta precisa de aproximadamente 10 metros. As grelhas auto-reguláveis a 2 Pa, uma

vez que são de grande qualidade, os seus valores nunca variam muito à medida que os parâmetros são alterados sendo exceção os casos em que a ventilação é afetada significativamente como quando o edifício dispõe apenas de uma fachada exposta, se altera a área útil da fração, existem obstáculos que levam o edifício ser considerado protegido ou são adicionados sistemas de ventilação adicionais.

Alterar o número de fachadas expostas ao exterior de duas para uma conduz a uma necessidade, em certos casos, de dezenas de metros de grelha para obter a mesma renovação de ar que o edifício base. A situação mais gravosa observou-se quando se alterou para uma fachada exposta ao exterior no município do Funchal. Neste cenário, são precisos mais de 99 metros de grelha auto-regulável a 20 Pa (da Invisivent EVO) para assegurar um caudal mínimo de ar novo de $0,6 \text{ h}^{-1}$. Conclui-se então, que dos parâmetros avaliados, alterar o número de fachadas expostas ao exterior de duas para uma, é o mais prejudicial para a ventilação. O ventilador mecânico SVE-125/H e o ventilador híbrido VBP+, por si só, garantem a ventilação pretendida, mas tem a desvantagem de consumir eletricidade para o conseguirem. Já colocar duas condutas de exaustão de ar acompanhados de dois ventiladores estáticos com uma inclinação da cobertura inferior a 10° diminui para praticamente metade os metros de grelhas que são precisos.

Em relação à grelha fixa comercial de dimensões de 13.1X33 cm, os resultados demonstram o mesmo que os resultados das grelhas auto-reguláveis. O parâmetro que mais afeta a ventilação é novamente a alteração do número de fachadas expostas de duas ou mais para uma. No edifício base, para alcançar os $0,6 \text{ h}^{-1}$, são necessárias aproximadamente 3 grelhas fixas mas, quando se altera para apenas uma fachada exposta, para os vários municípios são precisas mais de 10 grelhas fixas para se atingir a mesma taxa de renovação de ar. Dos vários municípios a situação mais desfavorável acontece de novo no Funchal onde são necessárias cerca de 22 grelhas fixas para se conseguir os $0,6 \text{ h}^{-1}$.

4. CAMPANHA EXPERIMENTAL

Na ventilação, existem variáveis que não podem ser controladas pelos utilizadores tais como a presença de obstáculos, a altura do edifício e o tipo de rugosidade da zona em que o edifício se encontra. Todavia, as componentes e os sistemas de ventilação da envolvente têm a possibilidade de serem caracterizadas laboratorialmente. Neste capítulo será feita uma análise de sensibilidade relativa à caracterização laboratorial de sistemas da envolvente com impacto na taxa de ventilação. Inicialmente, serão referidas as normas de ensaio existentes para as janelas e as portas, duas componentes da envolvente do edifício indispensáveis na ventilação, para as caixas de estore, para dois sistemas de ventilação natural, o ventilador estático e as grelhas de ventilação, e para a ventilação mecânica e híbrida.

A componente experimental envolve dois ensaios: a determinação de caudais de ar de aberturas de diferentes secções, incluindo a instalação de uma grelha fixa numa das aberturas, e de portas destinadas a espaços com elevadas necessidades de ventilação. Os objetivos do ensaio com as aberturas fixas de diferentes secções incluem a verificação da influência da grelha fixa no caudal de ar que atravessa as aberturas, a validação do equipamento utilizado e a averiguação das incertezas do ensaio através do erro proveniente do ensaio. No ensaio com as portas, pretende-se classificar as portas quanto à permeabilidade ao ar.

4.1 Levantamento de procedimentos de ensaio de componentes da envolvente

- A EN 12792:2003 indica os símbolos, terminologia e simbologia gráfica relacionada com a ventilação dos edifícios e é utilizada por todos os dispositivos e componentes de ventilação enunciados;
- A NP 1037-1:2002 define as regras a que devem obedecer os sistemas de ventilação natural, nomeadamente portas, janelas, grelhas de ventilação e ventiladores estáticos;
- A EN 15242:2007 descreve o método para calcular o caudal de ar escoado na ventilação dos edifícios para ser utilizado em aplicações como o cálculo de energia, conforto de verão, avaliação da qualidade do ar interior. Aplicável a edifícios com ventilação mecânica, condutas passivas, sistemas híbridos, e janelas abertas manualmente.

4.1.1 Janelas e portas

- A EN 1026:2016 descreve o método usado para determinar a permeabilidade ao ar de janelas e portas de qualquer material quando sujeitas a pressões positivas ou negativas.

Ter em conta que a norma não se aplica a juntas entre as janelas ou portas e o edifício em si;

- A EN 12207:2016 define a classificação de resultados de testes realizados em janelas e portas de acordo com a norma BS EN 1026:2016.

4.1.2 Ventiladores estáticos

- A EN 13141-5:2004 descreve métodos para medir as características de extratores e dispositivos de saída de teto usados na ventilação natural e mecânica. A norma só aborda extratores e dispositivos de saída de teto instalados em condutas.

4.1.3 Grelhas de ventilação

- A EN 13141-1:2004 especifica os procedimentos laboratoriais a aplicar no ensaio dos dispositivos de passagem de ar montados no exterior e no interior que funcionam por diferença de pressão como as grelhas de ventilação.

4.1.4 Caixas de estore

- A ISO 10077-1:2017 especifica métodos usados para calcular a transmissão térmica de janelas e portas com ou sem estores;
- A ISO 10077-2:2017 especifica um método utilizado para calcular a transmissão térmica de janelas, portas e estores e as características térmicas das caixas de estores e de componentes semelhantes, como as persianas.

4.1.5 Ventilação mecânica

- A EN 13779:2007 aplica-se à conceção e implementação de sistemas de ar condicionado para edifícios não residenciais;
- A EN 15251:2007 especifica os parâmetros de ambientes interiores que têm impacto no desempenho energético do edifício e como se estabelecem esses parâmetros na conceção dos sistemas do edifício e no cálculo do desempenho energético;
- A NP 1037-2:2002 tem como objetivo definir as regras a que devem obedecer as instalações de ventilação de mecânica centralizada dos edifícios de habitação.

4.2 Ensaio de determinação de caudal de ar de aberturas fixas de diferentes secções e de portas

4.2.1 Procedimento de ensaio

Os ensaios referidos foram realizados segundo a norma EN 1026:2016, tendo como base a execução de uma série de testes de pressões positivas e negativas e, para cada teste, medir a permeabilidade ao ar. Para cada teste com uma distinta diferença de pressão, deve existir uma

duração suficiente de forma a permitir que a pressão estabilize antes da determinação do caudal de ar. A norma refere que os testes devem ser efetuados em etapas de 50 Pascais até os 300 Pascais, e a partir desse valor, em etapas de 150 Pascais. Durante o ensaio, devem ser medidas a temperatura ambiente e a pressão atmosférica.

Realizaram-se ensaios em duas câmaras semelhantes com capacidades diferentes, denominadas câmaras 1 e 2. As câmaras utilizadas estão equipadas com uma conduta para fornecer ar à câmara, para pressões positivas, e retirar ar, quando são geradas pressões negativas. O caudal ar que é abastecido ou retirado das câmaras é determinado com um programa de aquisição de dados, o LW, auxiliado por um transdutor de pressão instalada na conduta usado para medir a velocidade do ar que circula na conduta. As câmaras são abertas de um lado, para a amostra ser instalada, e devem ser capazes de resistir às pressões criadas, de modo a não deflectirem e influenciarem os resultados.

Para a determinação do caudal de ar de aberturas fixas de diferentes secções foi utilizada uma placa de madeira de espessura igual a 2,5 centímetros e com várias aberturas. Na figura 4.1 são apresentadas as dimensões da placa e das aberturas.

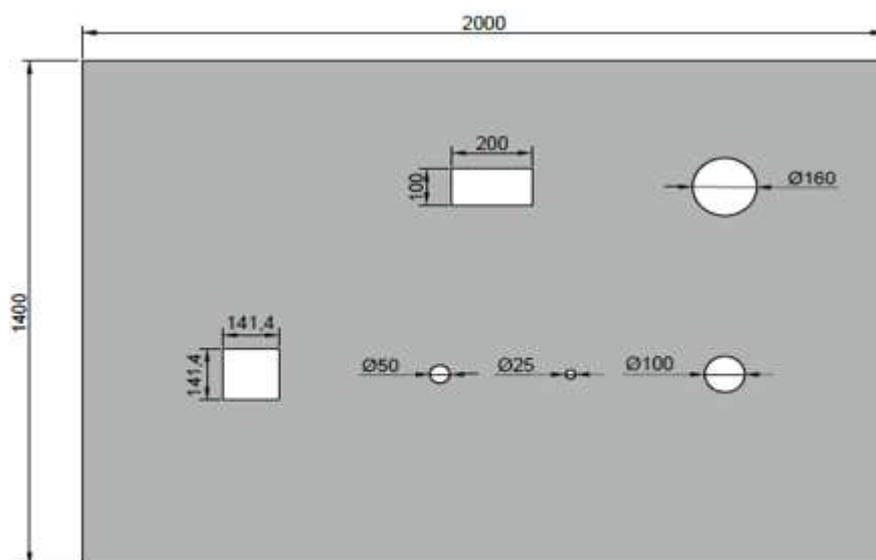


Figura 4.1 – Dimensões da placa utilizada nos ensaios e das suas várias aberturas em [mm]

Ter em conta que a escolha das dimensões das aberturas não é aleatória. Como se pode observar no quadro 4.1, foram colocadas 3 aberturas de forma diferente, mas áreas aproximadamente iguais, o círculo de diâmetro 160 mm, um retângulo de $200 \times 100 \text{ mm}^2$ e um quadrado de $141,4 \times 141,4 \text{ mm}^2$. Por fim as aberturas com os diâmetros de 25, 50 e 100 mm, são aberturas

utilizadas para validar o equipamento utilizado e, no caso da abertura de 100 mm de diâmetro, comparou-se com resultado teórico.

Quadro 4.1 – Áreas das várias aberturas

Abertura	Quadrado	Retângulo	Ø160	Ø100	Ø50	Ø25
Área [cm ²]	190,0	200,0	201,1	78,5	19,6	4,9

Como indica a norma EN1026:2016, a placa de madeira estava seca e limpa sendo devidamente instalada num dos lados câmara. Uma vez que não se conhece a permeabilidade ao ar da câmara de teste com a placa instalada, é necessário selar todas as aberturas da placa com fita adesiva e medir as fugas de ar da câmara, figura 4.2, tendo em consideração que estas não devem exceder os 30 % do caudal de ar determinado nos vários testes. Depois de conhecida a permeabilidade ao ar da câmara, os ensaios foram realizados para as várias aberturas e para as diferenças de pressão estabelecidas. Em todos os ensaios, a única abertura destapada é a que esta a ser ensaiada (Figura 4.3).



Figura 4.2 – Ensaio com as aberturas todas seladas



Figura 4.3 – Ensaio à abertura retangular

A cada resultado dos testes deve ser subtraído o valor das fugas de ar da câmara correspondente à mesma diferença de pressão. Depois de determinado o caudal de ar escoado, o resultado deve ser corrigido se as condições do ensaio forem diferentes que as condições normais, ou seja, se a temperatura e a pressão atmosférica não são iguais a 20 ° e 101325 Pa. Para ser corrigido é preciso aplicar a expressão (24), que se encontra na EN 1026:2016 ou na norma EN 13141-1.

$$q_{v\ cor} = q_{v\ meas} * \frac{293}{273 + \theta_a} * \frac{P_a}{101325} \quad (24)$$

em que:

- P_a é a pressão atmosférica [Pa];
- θ_a é a temperatura ambiente [°C];
- $q_{v\ meas}$ é o valor medido do caudal de ar [m³/h];
- $q_{v\ cor}$ é o caudal corrigido [m³/h].

Foram também efetuados dois ensaios de determinação a duas portas. Nas figuras 4.4 e 4.5 são apresentadas as duas portas ensaiadas, uma sem grelha e outra com uma grelha de ventilação.



Figura 4.4 - Porta sem grelha de ventilação ensaiada



Figura 4.5 – Porta com grelha de ventilação ensaiada

Para facilitar os ensaios, foi fixado ao redor das portas, pré-aços para terem as duas a mesma área e serem instaladas na câmara da mesma maneira. Também antes da realização dos ensaios

foram determinadas as fugas de ar da. A norma EN 1026:2016 refere que os dispositivos de ventilação, como as grelhas de ventilação, devem apenas ser destapados quando se pretende determinar o caudal de ar que atravessa o dispositivo. Após a determinação das fugas de ar, realizou-se o ensaio para as duas portas para avaliar a permeabilidade ao ar das portas (Figura 4.6).



Figura 4.6 – Ensaio com as duas portas instaladas na câmara

A sequência de testes usada nos dois ensaios encontra-se enunciada no anexo A da norma EN 1026:2016 (Figura 4.7). São atingidas, por três vezes, pressões iguais ao maior entre 500 Pascals e um valor superior por 10 % à maior pressão a testar e em seguida, para as diferenças de pressão estabelecidas, é medida a permeabilidade ao ar das portas. Este processo é efetuado para diferenças de pressão positivas e negativas.

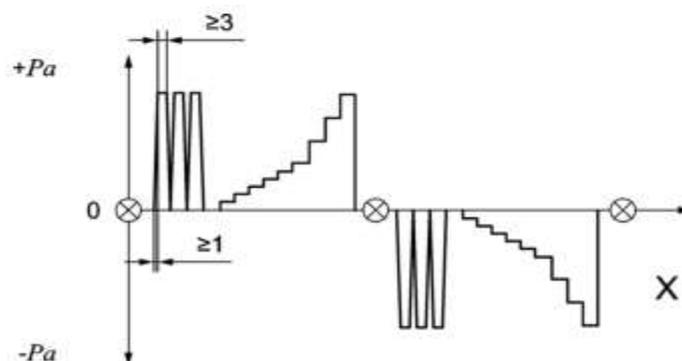


Figura 4.7 – Sequência de testes utilizada

Neste caso em particular, ainda foi realizado um ensaio adicional com a grelha de ventilação destapada para medir o caudal de ar que atravessa a grelha. Aos resultados obtidos devem ser subtraídas as fugas de ar determinadas e ser corrigidos para as condições normais de temperatura e pressão atmosférica através da expressão referida anteriormente. A norma EN 1026:2016 refere que a análise da permeabilidade ao ar deve ser feita em termos de área total da porta, $m^3/(h.m^2)$ e da largura das juntas de abertura, $(m^3/(h.m))$. Tendo como base a figura 4.8, retirada da norma EN 1026:2016, a área total da abertura é conseguida multiplicando H_T por B_T e a largura das juntas de abertura somando H_0 e B_0 por duas vezes.

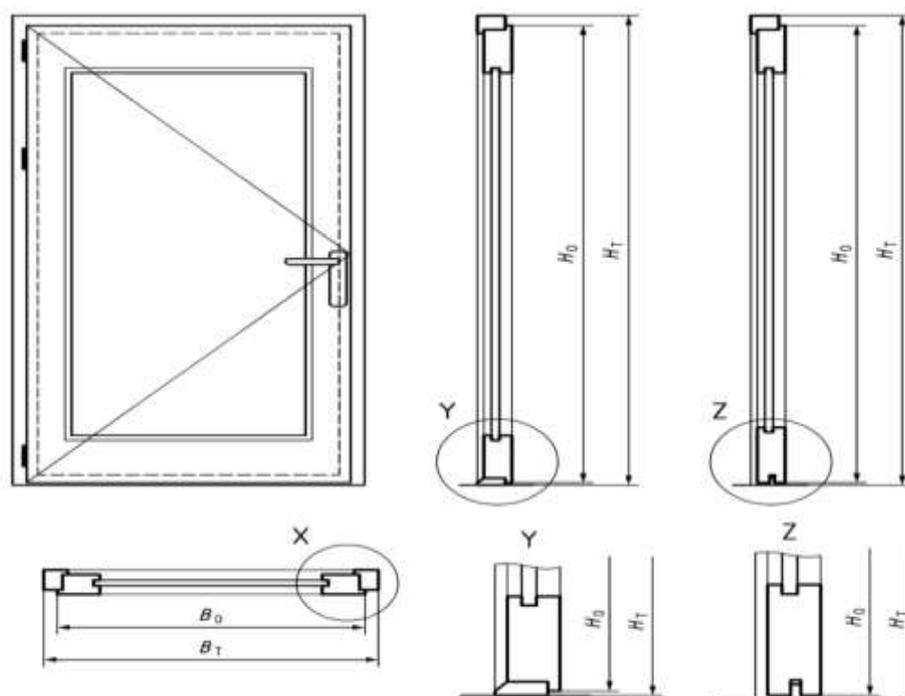


Figura 4.8 – Dimensões necessárias para a análise da permeabilidade ao ar das portas

Devido às ripas de madeira, não é possível diferenciar H_T e B_T de H_0 e B_0 e, portanto, considera-se que as distâncias são iguais. No quadro 4.2, são enunciadas as características das duas portas ensaiadas. A grelha de ventilação tem 1,10 metros de largura e 0,745 metros de altura.

Quadro 4.2 – Características geométricas das duas portas

Tipo de porta	Caraterísticas das portas					
	B_T [m]	H_T [m]	B_0 [m]	H_0 [m]	Área [m ²]	Largura da juntas [m]
Porta1	0,96	2,15	0,96	2,15	2,05	6,21
Porta2	1,3	2,15	1,3	2,15	2,80	6,9

em que:

- Porta 1 é a porta sem grelha de ventilação;
- Porta 2 possui grelha de ventilação;

4.2.2 Componente de cálculo

A fim de verificar a exatidão do ensaio realizado com as aberturas de diferentes secções, foram comparados os valores obtidos experimentalmente com os valores teóricos. Para tal, foi aplicada a expressão referente às aberturas fixas presente no Despacho (extrato) nº 15793-K/2013.

$$q_v = 0,281 * \Delta P * A \quad (25)$$

em que:

- q_v caudal de ar escoado [m³/h];
- A é a área livre da abertura [m²]
- ΔP é a diferença de pressão [Pa].

4.3 Resultados e discussão

4.3.1 Ensaio de determinação do caudal de ar de aberturas fixas de diferentes secções

O ensaio foi realizado com uma temperatura ambiente de 14 °C e com uma pressão atmosférica de 101760 Pascals e os valores das diferenças de pressão utilizados foram 50, 100, 150, 200, 250, 300, 450, 600 e 1000 Pascals. Os resultados apresentados a seguir já são corrigidos e com as fugas de ar subtraídas. Utilizando apenas uma câmara, efetuou-se um ensaio com a abertura de 25 mm de diâmetro para diferenças de pressão positivas e negativas. Como mostra a figura 4.9, as diferenças de pressão positivas e negativas são praticamente iguais com exceção do último ponto, para a diferença de pressão igual a 1000 Pascals.

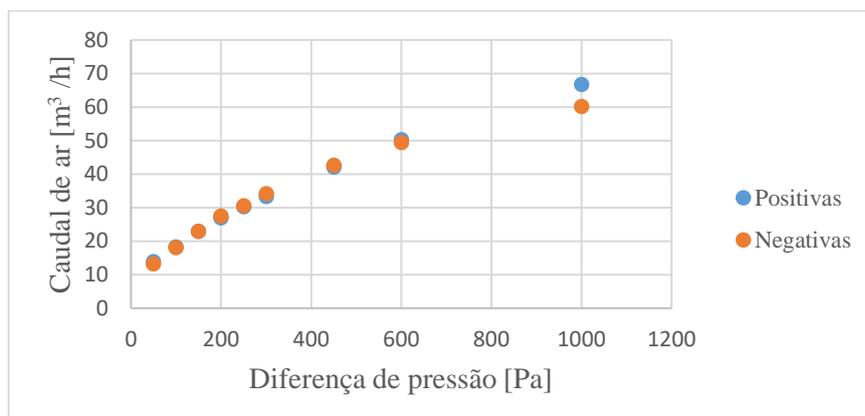


Figura 4.9 – Caudais de ar registados para diferenças de pressão positivas e negativas da abertura de 25 mm de diâmetro

De modo a validar o equipamento, realizou-se o ensaio para a abertura com um diâmetro de 50 mm nas duas câmaras e utilizando dois ventiladores diferentes. Os ventiladores não foram capazes de produzir caudal de ar suficiente para criar uma diferença de pressão dos 1000 Pascais e por esse motivo não se apresenta o último ponto. A figura 4.10 mostra que, os caudais de ar medidos, nas duas câmaras, são praticamente iguais.

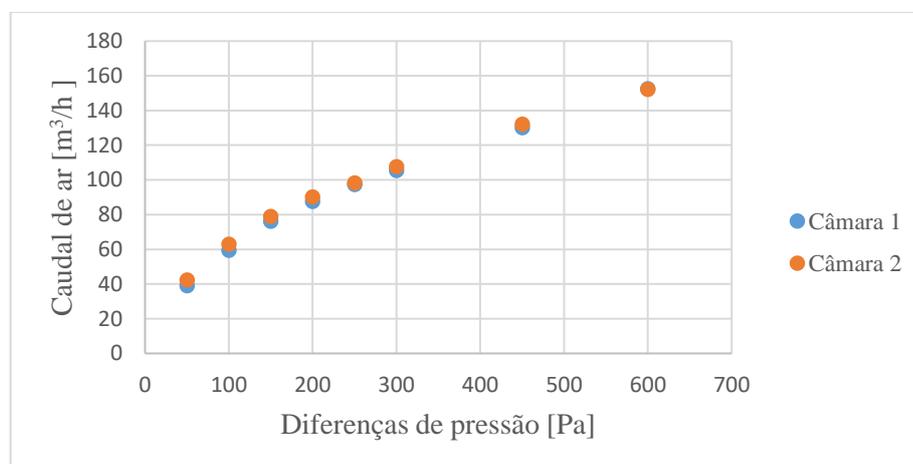


Figura 4.10 – Caudais de ar registados nas duas câmaras de ensaio para a abertura de 50 mm de diâmetro

Devido à placa ter uma espessura significativa (25 mm) em relação às aberturas de diâmetro igual a 50 mm e a 25 mm, os caudais de ar registados nestes ensaios não foram comparados com os valores teóricos esperados. Nas figuras 4.11 e 4.12 são apresentados, respetivamente, os caudais registados para as diferenças de pressão positivas e negativas nas duas câmaras e o

valor teórico esperado para a abertura de 100 mm. Não existem resultados para a diferença de pressão de 1000 Pascals por não ter sido possível atingir essa diferença de pressão.

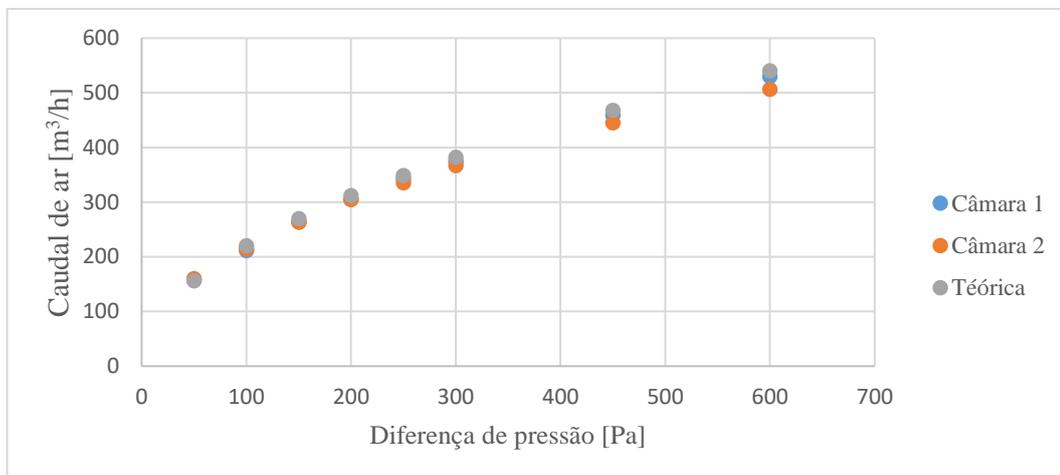


Figura 4.11 – Caudais de ar registados para as duas câmaras de ensaio e para diferenças de pressão positivas e o caudal de ar teórico esperado da abertura de 100 mm de diâmetro

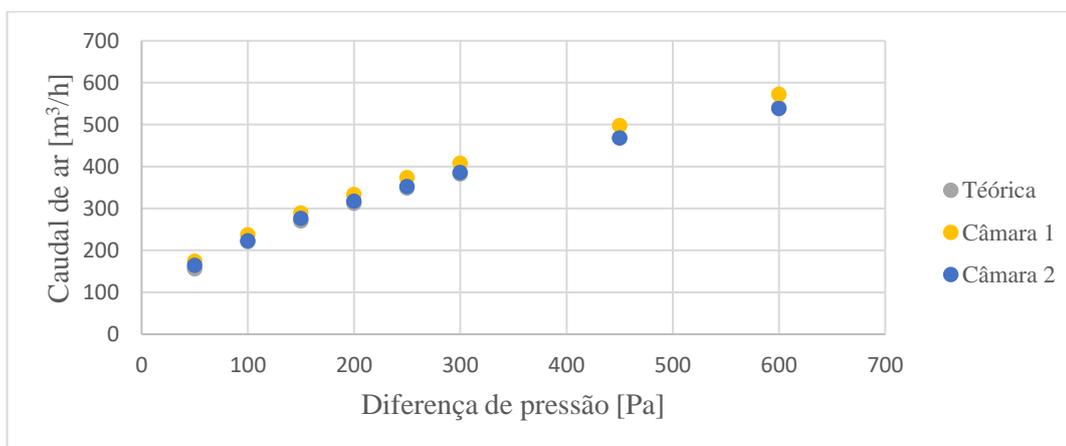


Figura 4.12 – Caudais de ar registados para as duas câmaras de ensaio e para diferenças de pressão negativas e o caudal de ar teórico esperado da abertura de 100 mm de diâmetro

É possível verificar que, para diferenças de pressão positivas e negativas, os resultados dos caudais de ar registados, em ambas as câmaras, são semelhantes, apesar de que, quanto maior a diferença de pressão mais se afastam. Em relação à comparação entre os valores experimentais e valores teóricos, constata-se nas figuras 4.8 e 4.9, que para ambas as câmaras os valores são parecidos e não existe grande incerteza. No entanto, para quantificar a incerteza, ou seja, a disparidade entre os valores calculados com a expressão teórica e os valores obtidos

experimentalmente das duas câmaras, nos quadros 4.3 e 4.4 são apresentados os erros experimentais, em percentagem, para as diferenças de pressão positivas e negativas da abertura de diâmetro igual a 100 mm.

Quadro 4.3 – Diferença em percentagem, do valor absoluto entre os resultados teóricos e experimentais para diferenças de pressão positivas da abertura de 100 mm de diâmetro

Ø100	Diferenças de pressão positivas							
	50	100	150	200	250	300	450	600
Câmara 1	1,76	4,06	2,35	2,20	1,72	2,01	1,83	1,97
Câmara 2	2,81	2,67	2,38	2,25	3,79	3,97	4,90	6,25

Quadro 4.4 – Diferença em percentagem, do valor absoluto entre os resultados teóricos e experimentais para diferenças de pressão positivas da abertura de 100 mm de diâmetro

Ø100	Diferenças de pressão negativas							
	50	100	150	200	250	300	450	600
Câmara 1	10,38	7,24	6,52	6,53	6,60	6,41	5,97	5,67
Câmara 2	5,02	1,20	2,30	1,61	1,13	0,99	0,03	0,37

Na abertura de diâmetro de 100 mm, instalou-se uma grelha fixa para verificar a influência que uma grelha tem no caudal de ar que atravessa essa mesma abertura. Na figura 4.13 e 4.14 são apresentados os caudais de ar medidos para a abertura com e sem grelha instalada com diferenças de pressão positivas e negativas respetivamente.

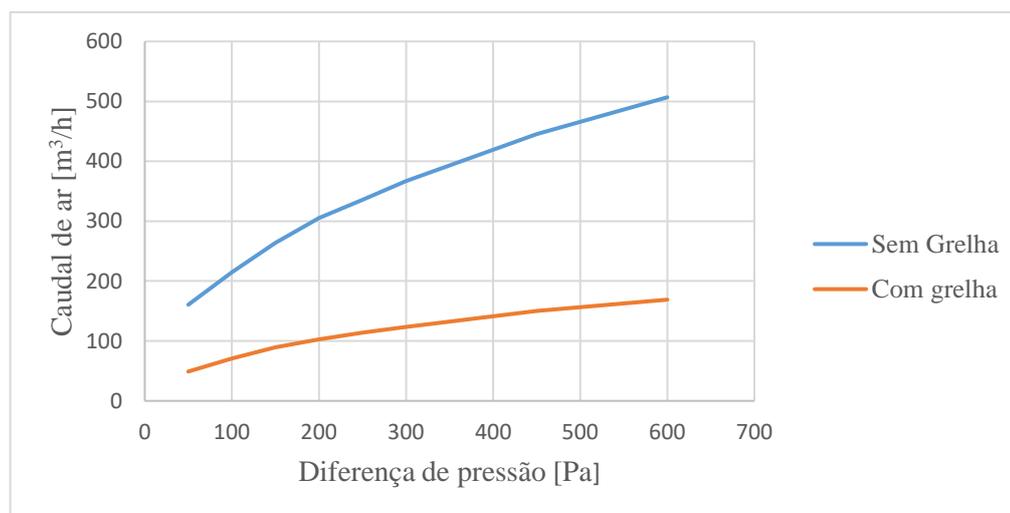


Figura 4.13 – Caudais de ar medidos para diferenças de pressão positivas da abertura de 100 mm de diâmetro com e sem grelha fixa instalada

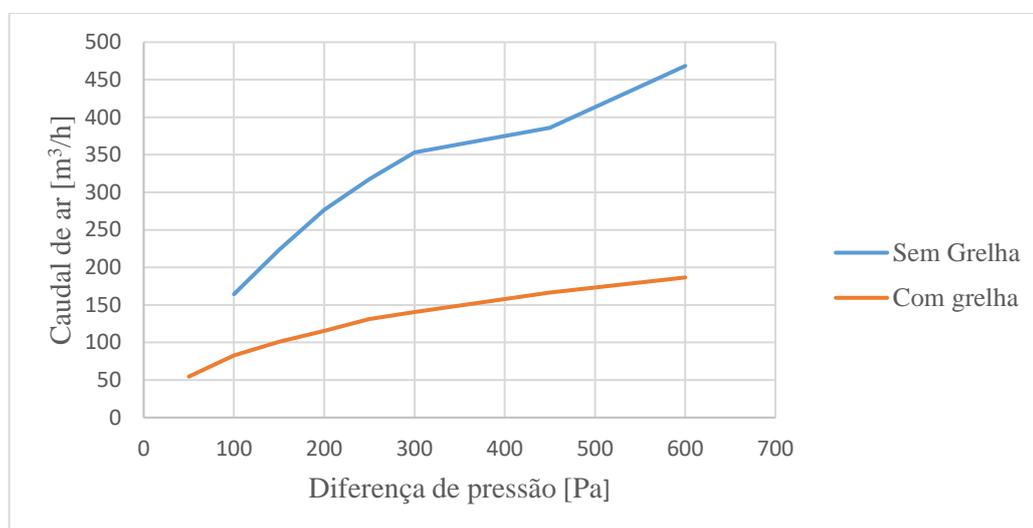


Figura 4.14 – Caudais de ar medidos para diferenças de pressão positivas da abertura de 100 mm de diâmetro com e sem grelha fixa instalada

Verifica-se que para ambos os casos, a grelha reduz significativamente o caudal de ar que atravessa a abertura e que, essa redução, é mais significativa com o aumentar da diferença de pressão.

Os resultados para as três aberturas com a mesma área, mas com forma diferente permitiu verificar que os caudais são muito semelhantes quer para as diferenças pressões positivas quer negativas (Figura 4.15). Conclui-se que a forma da abertura não influencia o caudal de ar que a atravessa.

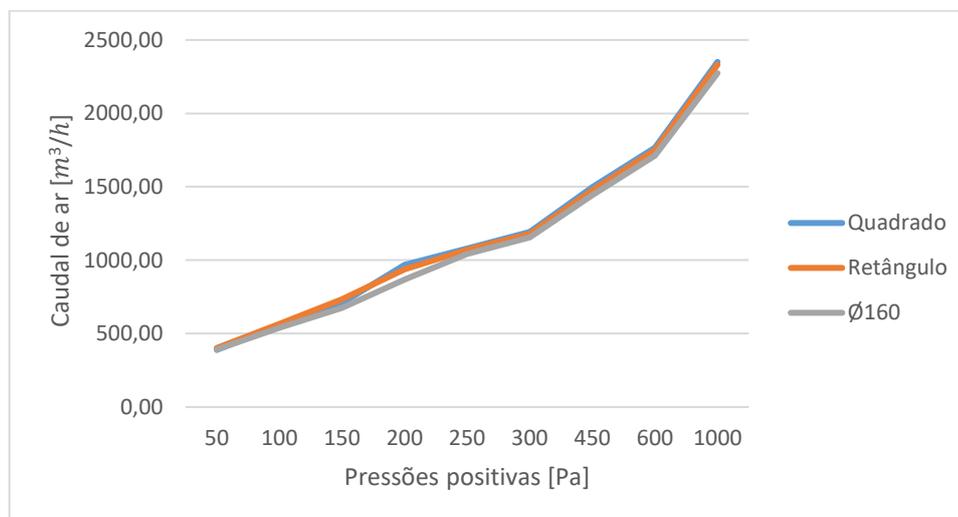


Figura 4.15 – Representação gráfica da função logarítmica do caudal de ar das várias aberturas consoante as várias diferenças de pressão positivas

4.3.2 Ensaio de determinação do caudal de ar de portas

Durante a realização do ensaio, a temperatura e a pressão atmosférica registadas foram de 18,9 °C e 101080 Pascals, respetivamente. No quadro 4.5, encontram-se os caudais de ar existentes no ensaio e os resultados com os caudais de ar subtraídos e corrigidos consoante a temperatura e a pressão atmosférica ($q_{v\text{ cor}}$). Dado que as portas ensaiadas são destinadas a espaços com elevadas necessidades de ventilação e têm uma grande permeabilidade ao ar, apenas se realizaram os ensaios para as diferenças de pressão de 50, 100 e 150 Pascals.

Quadro 4.5 – Resultados já corrigidos dos ensaios às portas

Diferença de pressão [Pa]		Fugas de ar [m³/h]	q _{cor} [m³/h]	
			Porta 1	Porta2
Positiva	50	3,12	265,45	101,94
	100	4,02	386,08	143,06
	150	4,55	420,34	162,70
Negativa	50	3,10	304,96	165,11
	100	4,84	455,64	243,98
	150	4,52	618,91	347,80

A porta 1 e a 2 continuam a ser, na devida ordem, a porta ensaiada sem grelha de ventilação e a porta ensaiada com grelha de ventilação. Os resultados, consoante a área total da porta e a largura das juntas de abertura, estão indicados no quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Resultados do ensaio às portas consoante a área total da porta e a largura das juntas de abertura

Diferença de pressão [Pa]		Q _A [m ³ /(h.m ²)]		Q _L [m ³ /(h.m)]	
		Porta 1	Porta2	Porta 1	Porta2
Positiva	50	129,33	36,45	42,77	14,78
	100	188,10	51,15	62,21	20,74
	150	204,79	58,17	67,73	23,59
Negativa	50	148,58	59,03	49,14	23,94
	100	221,99	87,22	73,42	35,37
	150	301,54	124,35	99,73	50,42

A partir dos resultados do quadro 4.7 e sabendo que, Q_A é o caudal de ar em função da área total da porta e Q_L é o caudal de ar em função da largura das juntas de abertura, é possível classificar as portas em relação à sua permeabilidade ao ar. A classificação é feita de acordo com a norma EN 12207:2016 e é realizada separadamente para as pressões positivas e negativas e com base na área total da abertura e na largura das juntas de abertura. Através da figura 4.16, são verificados os limites superiores das classes para janelas e portas exteriores. Na figura 4.16, o Q₁ e o Q₂ são, na mesma ordem, equivalentes ao Q_A e ao Q_L.

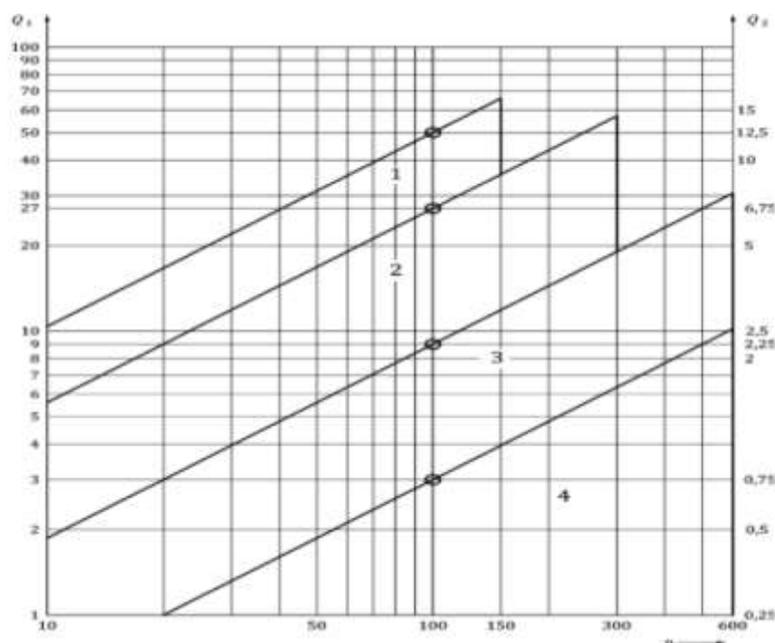


Figura 4.16 – Limites superiores das classes de janelas e portas exteriores

O provete pertence a uma classe se o caudal de ar medido não exceder os limites superiores dessa classe a qualquer pressão de teste. Observa-se que ambas as portas são consideradas sem classificação visto que, para diferenças de pressão positivas e negativas de 100 Pascais, os Q_A e Q_L das duas portas são superiores ao limite superior relativo à classe 1 de $50 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ e $12,50 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$, respetivamente. As portas, uma vez que são destinadas a espaços com elevadas necessidades de ventilação, é normal que deixem passar um caudal de ar significativo por metro quadrado de área e por metro de junta de abertura.

No último ensaio em que a grelha de ventilação foi destapada, a permeabilidade ao ar da porta era de tal maneira grande, que o máximo de diferença de pressão que se alcançou foi de 20 Pascais para um caudal de ar de $3104,55 \text{ m}^3/\text{h}$. As duas portas, tendo uma permeabilidade ao ar tão significativa, apenas devem ser usadas em espaços em que seja preciso uma renovação de ar constante, como espaços com muitas máquinas em que é fundamental evitar o sobreaquecimento dos engenhos.

5. AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA INCERTEZA DAS MEDIÇÕES NA ESTIMATIVA DAS TAXAS DE RENOVAÇÕES HORÁRIAS DE EDIFÍCIOS

Como foi referido anteriormente, existe uma preocupação em reduzir as incertezas de medição na estimativa das taxas de renovação horária de edifícios, nomeadamente associadas ao desempenho de todas as componentes envolvidas na ventilação dos mesmos. Neste capítulo, pretende-se avaliar o impacto que a incerteza das grelhas fixas ou de janelas e portas tem na ventilação dos edifícios. Para isso, será utilizado como caso de estudo, o edifício de referência indicado no capítulo 3. No quadro 5.1 são expostas as suas características principais.

Quadro 5.1 – Características principais do edifício de referência

Volume da fração [m ³]	Área de vãos [m ²]	Classe de permeabilidade ao ar	Q [m ³ /h]	R _{ph,i} [h ¹]	R _{ph,v} [h ⁻¹]	R _{ph} estimada [h ⁻¹]
300	15	4	180	0,5	0,6	0,6

Para analisar a incerteza das grelhas fixas é considerado que a grelha da Leroy Merlin, usada no estudo paramétrico, é o único sistema de ventilação instalado no edifício de referência e são verificadas as alterações que a incerteza introduz nas taxas de renovação de ar do edifício. Ao contrário das aberturas fixas, quando se tratam de ensaios em aberturas com grelhas instaladas, não existe uma expressão teórica em que se consiga avaliar a incerteza dos resultados. Deste modo, admitiu-se a maior incerteza calculada na campanha experimental, 10,38 %, proveniente do ensaio realizado na câmara 1 para a abertura de diâmetro igual a 100 mm e com uma diferença de pressão negativa de 50 Pascais.

No cenário em que a taxa de renovação horária é igual a 0,6 h⁻¹, são necessárias três grelhas da Leroy Merlin, um resultado indicado no estudo paramétrico referido no capítulo 3. Ao aplicar a incerteza referida, a taxa de renovação de ar da fração em estudo varia $\pm 0,06$ h⁻¹, não sendo uma variação muito significativa.

No caso das janelas e portas, de acordo com a norma EN 12207:2016, se a permeabilidade em relação à área total, para 100 Pascais, for superior a 50 m³/(h.m²), a porta ou janela é considerada

sem classificação, ou seja, ter uma porta ou janela com $51 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ ou com $90 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$, ambas são consideradas sem classificação. No entanto, na ferramenta de cálculo utilizada no capítulo 3 e na expressão (19) utilizada pelo Despacho (extrato) nº 15793-K/2013 para calcular a permeabilidade ao ar da envolvente, não existe diferenciação dentro da mesma classe e consideram todas as componentes com a mesma classe da mesma forma. É necessário, portanto, verificar, em todas as classes, se a simplificação referida não provoca uma incerteza na classificação das janelas e portas.

A incerteza, na classificação, será analisada variando o coeficiente definido pela classe, W , nos limites da classe usando a expressão (19) e averiguado o impacto que essa variação tem na taxa de renovação de ar da fração do edifício de referência, quando este tem as grelhas fixas instaladas. Dado que a classe de permeabilidade ao ar das janelas ou portas no edifício de referência é 4, supõe-se que o W é igual a 3. Sabendo que os valores de W , nos limites superiores das classes 4, 3, 2 e 1 são, respetivamente, 3, 9, 27 e 50, no quadro 5.2 são apresentados os caudais representativos e as taxas de renovação de ar para os valores de W nos limites superiores e inferiores de todas as classificações.

Quadro 5.2 – Caudais e taxas de renovação de ar do edifício de referência em função do W para as várias classificações de janelas ou portas quanto à permeabilidade ao ar

Classificação	Classe 4		Classe 3		Classe 2		Classe 1		Sem	
W	3	0,5	3,5	9	9,5	27	27,5	50	50,5	100
$Q \text{ [m}^3/\text{h]}$	180	177	187	203	260	413	623	988	1815	3421
$R_{ph} \text{ [h}^{-1}\text{]}$	0,60	0,59	0,62	0,68	0,87	1,38	2,08	3,29	6,05	11,40

Através dos resultados expostos no quadro 5.2, constata-se que, nas classificações com maior permeabilidade ao ar, a variação das taxas de renovação de ar, dentro da mesma classe, é considerável. Esta variação conduz a uma incerteza significativa já que, duas janelas ou portas com a mesma classe, podem ter um comportamento completamente diferente face à ventilação. Nas classes 3 e 4 existe uma incerteza menor, resultante da ligeira variação das taxas de renovação por hora sendo que na classe 3, a incerteza também é de $0,06 \text{ h}^{-1}$.

Por último, analisou-se a mesma situação, mas além da incerteza das janelas e das portas, considerando também a incerteza das três grelhas instaladas. No quadro 5.3, encontram-se as taxas de renovação de ar onde sem, corresponde a situação que se considera apenas a incerteza das janelas e portas e o superior e o inferior são, respetivamente, quando o valor da incerteza da grelha fixa é somado ou subtraído.

Quadro 5.3 – Taxas de renovação de ar com ambas as incertezas aplicadas para vários valores de W

Incerteza	$R_{ph} [h^{-1}]$									
	W=3	W=0,5	W=3,5	W=9	W=9,5	W=27	W=27,5	W=50	W=50,5	W=100
Superior	0,66	0,65	0,68	0,74	0,93	1,44	2,14	3,35	6,11	11,46
Sem	0,60	0,59	0,62	0,68	0,87	1,38	2,08	3,29	6,05	11,4
Inferior	0,54	0,53	0,56	0,62	0,81	1,32	2,02	3,23	5,99	11,34

A partir do quadro, verifica-se que a incerteza da grelha estabelece, de novo, uma variação de $0,06 h^{-1}$, sejam somados ou subtraídos, para qualquer valor de W. Constata-se que nas classes mais estanques, como as taxas de renovação de ar são mais reduzidas, a incerteza da grelha tem mais influência nos resultados. Nas classes com maior permeabilidade ao ar, a partir da classe 2, a incerteza da grelha não interfere com os resultados obtidos, e a incerteza das janelas e portas nestes casos é muito superior à incerteza das grelhas fixas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação teve como objetivo principal expor as dificuldades existentes na estimativa das taxas de ventilação dos edifícios, sobretudo as incertezas que daí advêm.

Do estudo paramétrico realizado, foram identificados e caracterizados os parâmetros que influenciam a estimativa das taxas de ventilação de uma fração de um edifício. A partir do estudo, pode concluir-se que os parâmetros com maior importância nas taxas de renovação de uma fração de um edifício são a presença de obstáculos consideráveis, a introdução de sistemas de ventilação, a alteração da área útil da fração e a alteração do número de fachadas em que exista ventilação. Embora a introdução de um sistema de ventilação mecânico ou híbrido tenha uma contribuição favorável na ventilação do edifício, deve-se optar, se possível, por sistemas de ventilação natural para evitar um gasto energético. Conclui-se também que ao utilizar uma grelha auto-regulável, a qualidade da grelha usada tem bastante influência na ventilação que fornece.

Dos vários parâmetros caracterizados no estudo paramétrico, muitos não podem ser caracterizados laboratorialmente como o caso da região ou da rugosidade. Deste modo, realizou-se um levantamento de normas de ensaio para as componentes relacionadas com a ventilação que podem ser caracterizadas experimentalmente. Tendo por base as normas referidas, foi efetuada uma campanha experimental para determinar caudais de ar de várias aberturas fixas de diferentes seções, incluindo um ensaio com uma grelha instalada numa dessas aberturas, e de portas destinadas a espaços com necessidades elevadas de ventilação.

Através dos ensaios realizados para as aberturas fixas, foi possível validar o equipamento utilizado devido aos ensaios em duas câmaras diferentes, com dois ventiladores diferentes, apresentarem resultados de caudais de ar semelhantes. Para a abertura de 25 mm de diâmetro, compararam-se os valores registados para as diferenças de pressão positivas e negativas, havendo apenas uma alteração mais acentuada entre eles quando a diferença de pressão era 1000 Pascals.

Depois de comparados os valores experimentais obtidos das duas câmaras para a abertura de 100 mm de diâmetro e os valores esperados pela fórmula teórica, quantificou-se a incerteza, sendo que esta foi relativamente baixa, com exceção para a diferença de pressão negativa de 50 Pa na câmara 1, em que atingiu os 10 % de erro. Usando a mesma abertura, e após a instalação da grelha fixa, os caudais de ar registados indicaram que a grelha reduz significativamente o

caudal de ar que atravessa a abertura. No ensaio das portas, os caudais de ar registados mostram que as portas, em relação à classe quanto à permeabilidade ao ar, não têm classificação. Era o esperado dado que, as portas, são utilizadas em espaços com grandes necessidades de ventilação.

Da análise do impacto que as incertezas têm na ventilação de edifícios, constata-se que, a alteração provocada pela incerteza da grelha fixa, não afetou de maneira significativa a taxa de renovação de ar do edifício em estudo. Já a incerteza resultante da classificação das janelas e portas quanto à permeabilidade ao ar, introduz alterações significativas nas taxas de renovação de ar dentro da mesma classe, nomeadamente nas classes com maior permeabilidade ao ar. Quando se consideraram ambas as incertezas ao mesmo tempo, verificou-se que a incerteza da grelha fixa, embora continue sucinta, tem maior influência nas classes mais estanques, já que nas classes de maior permeabilidade, a incerteza proveniente da classificação das janelas e portas é consideravelmente maior.

Com esta dissertação conclui-se que ainda existe muito trabalho a ser realizado de modo a reduzir as incertezas associadas à estimativa das taxas de ventilação do edifício, mas que, no futuro, ter sistemas de ventilação natural exatos podem trazer muitos benefícios à qualidade do ar interior dos edifícios e, conseqüentemente, à qualidade de vida das pessoas.

Como trabalhos futuros sugerem-se melhorar e tornar mais precisa a classificação das janelas e portas quanto à permeabilidade ao ar e realizar campanhas experimentais com as placas de orifício, visto que, quando comparados os resultados obtidos do exemplo teórico realizado através do método de cálculo da norma ISO 5167-1:2003, para um orifício de diâmetro de 25 mm, e a fórmula teórica do despacho, usada para uma abertura fixa de 25 mm de diâmetro, o erro em percentagem encontra-se entre os 3 e os 5%.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aereco@2018. Acedido em 7 de julho de 2008 em <https://www.aereco.co.uk/product/vbp-plus/>.
- Airocle1Series@2018. Acedido em 7 de julho de 2008 em https://www.airocle.com.au/wp-content/uploads/2018/03/Airocle_1Series_Web-V4.pdf.
- Airocle5Series@2018. Acedido em 7 de julho de 2008 em https://www.airocle.com.au/wp-content/uploads/2018/03/Airocle_5Series_Web-V3-20170823-sml-2.pdf.
- Amaral, M. A. P. S. (2008). SISTEMAS DE VENTILAÇÃO NATURAL E MISTOS EM EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO. Dissertação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- ASTM MFC-3M:2004, Measurement of Fluid Flow in Pipes Using Orifice, Nozzles and Venturi, The American Society of Mechanical Engineers.
- Awbi, H. B. (2017). Ventilation for Good Indoor Air Quality and Energy Efficiency. *Energy Procedia*, 112(October 2016), 277–286. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1098>
- Bangalee, M. Z. I., Lin, S. Y., & Miao, J. J. (2012). Wind driven natural ventilation through multiple windows of a building : A computational approach. *Energy & Buildings*, 45, 317–325.
- Beck, S. B. M., & Mazille, J. (2002). A study of a pressure differential flow meter that is insensitive to inlet conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*, 12(5–6), 379–384.
- Beslagskonsult@2018. Window Ventilators. Acedido a 18 de junho de 2018 em http://beslagskonsult.se/download/broschure/renson/window_ventilators.pdf.
- Bibby, C., & Hodgson, M. (2013). Field measurement of the acoustical and air flow performance of interior natural-ventilation openings and silencers. *Building and Environment*, 67, 265–273.
- Brighthubengineering@2018. Acedido em 26 de junho de 2018 em <https://www.brighthubengineering.com/hydraulics-civil-engineering/58510-find-the-density-of-air-with-the-ideal-gas-law/>.
- Buildingscience@2018. Acedido a 15 de junho de 2018 em <https://buildingscience.com/documents/digests/bsd-104-understanding-air-barriers>.
- Canha, N., Lage, J., Candeias, S., Alves, C., & Almeida, S. M. (2017). Indoor air quality during sleep under different ventilation patterns, 8, 1132–1142.

-
- Cao, G., Awbi, H. B., Yao, R., Fan, Y., Sirén, K., Kosonen, R., & Zhang, J. (2014). A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings. *Building and Environment*, 73, 171–186.
 - Cao, X., Liu, J., Jiang, N., & Chen, Q. (2014). Particle image velocimetry measurement of indoor airflow field: A review of the technologies and applications. *Energy and Buildings*, 69, 367–380. 2
 - Carlos, J. S. (2017). Optimizing the ventilated double window for solar collection. *Solar Energy*, 150, 454–462.
 - Casini, M. (2018). Active dynamic windows for buildings: A review. *Renewable Energy*, 119, 923–934.
 - Cuce, E., & Riffat, S. B. (2015). A state-of-the-art review on innovative glazing technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 695–714.
 - Cui, C., Cai, W., & Chen, H. (2018). Airflow measurements using averaging Pitot tube under restricted conditions. *Building and Environment*, 139, 17–26.
 - d'Ambrosio Alfano, F. R., Dell'Isola, M., Ficco, G., Palella, B. I., & Riccio, G. (2016). Experimental air-tightness analysis in mediterranean buildings after windows retrofit. *Sustainability (Switzerland)*, 8(10), 1–9.
 - D'Ambrosio Alfano, F. R., Ficco, G., Palella, B. I., Riccio, G., & Ranesi, A. (2015). An experimental investigation on the air permeability of passive ventilation grilles. *Energy Procedia*, 78, 2869–2874.
 - Decreto lei nº 235/83 de 31 de maio. Diário da República n.º 125/1983. Série I. Ministério da Habitação, Obras Públicas e Transportes.
 - Despacho (extrato) nº 15793-F/2013 de 2 de dezembro. Diário da República n.º 234/2013. Série II. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia - Direção-Geral de Energia e Geologia.
 - Despacho (extrato) nº 15793-K/2013 e 2 de dezembro. Diário da República n.º 234/2013. Série II. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia - Direção-Geral de Energia e Geologia.
 - D'Orazio, A., Fontana, L., & Salata, F. (2011). Experimental study of a semi-passive ventilation grille with a feedback control system. *Review of Scientific Instruments*, 82(8).
 - Dimitroulopoulou, C. (2012). Ventilation in European dwellings: A review. *Building and Environment*, 47(1), 109–125.
 - EN 13142:2004, Ventilation for buildings – Components/products for residential building – Required and optional performance characteristics, European Committee for Standardization.
 - EN 15242:2007, Ventilation for buildings – Calculation methods for the determination of air flow rates in buildings including infiltration, European Committee for Standardization.
-

-
- EN 13829:2001, Thermal performance of buildings – Determination of air permeability of buildings – Fan pressurization method (ISO 9972:1996, modified), European Committee for Standardization.
 - EN 13141-1:2004, Ventilation for buildings – Performance testing of components/products for residential ventilation – Part 1: Externally and internally mounted air devices, European Committee for Standardization.
 - EN 12792:2003, Ventilation for buildings – Symbols, terminology and graphical symbols, European Committee for Standardization.
 - EN 1026:2016, Windows and doors – Test method – Classification, European Committee for Standardization.
 - EN 12207:2016, Windows and doors – Air permeability – Classification, European Committee for Standardization.
 - EN 13141-5:2004, Ventilation for buildings – Performance testing of components/products for residential ventilation – Part 5: Cowls and roof outlet terminal devices, European Committee for Standardization.
 - EN 13779:2007, Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems, European Committee for Standardization.
 - EN 15251:2007, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lightning and acoustics, European Committee for Standardization.
 - EN ISO 9972:2015, Thermal performance of buildings – Determination of air permeability of buildings – Fan pressurization method, European Committee for Standardization.
 - Engineeringtoolbox-flowmeters@2018. Acedido a 18 de junho de 2018 em https://www.engineeringtoolbox.com/flow-meters-d_493.html.
 - Engineeringtoolbox-specific-heat-ratio@2018. Acedido em 26 de junho de 2018 em https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-ratio-d_602.html.
 - Freitas, V., Pinto, M., & Guimarães, S. (2007). Sistemas de ventilação natural/mistos em edifícios de habitação – Implicações construtivas. *Climatização*, 52, 40-56.
 - Fokaides, P. A., Christoforou, E., Ilic, M., & Papadopoulos, A. (2016). Performance of a Passive House under subtropical climatic conditions. *Energy & Buildings*, 133, 14–31.
 - Fu, S., Biwole, P. H., & Mathis, C. (2015). Particle tracking velocimetry for indoor airflow field: A review. *Building and Environment*, 87, 34–44.
 - Gładyszewska-fiedoruk, K., & Gajewski, A. (2012). Effect of wind on stack ventilation performance. *Energy & Buildings*, 51, 242–247.
 - Graça, G. C. da, & Linden, P. (2016). Ten questions about natural ventilation of non-domestic buildings. *Building and Environment*, 107, 263–273.
 - Gomes, R. D. F. (2010). Estudo e Concepção de Sistemas de Ventilação Natural em Edifícios de Habitação. Dissertação, Universidade da Madeira, Madeira, Portugal.
-

-
- Hong, G., & Kim, D. D. (2018). Airtightness of electrical, mechanical and architectural components in South Korean apartment buildings using the fan pressurization and tracer gas method. *Building and Environment*, 132(November 2017), 21–29.
 - ISO 12569:2017, Thermal performance of buildings – Determination of specific airflow rate in buildings – Tracer gas dilution method, ISO.
 - ISO 5167-1:2003, Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 1: General principles and requirement, ISO.
 - ISO 5167-2:2003, Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 2: Orifice plates, ISO.
 - ISO 10077-1:2017, Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 1: General (ISO 10077-1:2017), European Committee for Standardization.
 - ISO 10077-2:2017, Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 2: Numerical method for frames, ISO.
 - ISO/TR 15377:1998, Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices – Guidelines for specifications of nozzles and orifice plates beyond the scope of ISO 5167-1, ISO.
 - Jaggs, M., & Scivyer, C. (2006). Good Building Guide 67 Part 1. Achieving airtightness: general principles, 1–8.
 - Ji, Y., Duanmu, L., & Li, X. (2017). Building air leakage analysis for individual apartments in North China. *Building and Environment*, 122, 105–115.
 - Jin, W., Zhang, N., & He, J. (2015). Experimental Study on the Influence of a Ventilated Window for Indoor Air Quality and Indoor Thermal Environment. *Procedia Engineering*, 121, 217–224.
 - Laverge, J., Bossche, N. Van Den, Heijmans, N., & Janssens, A. (2011). Energy saving potential and repercussions on indoor air quality of demand controlled residential ventilation strategies. *Building and Environment*, 46(7), 1497–1503.
 - Leroymerlin@2018. Acedido em 7 de julho de 2008 em <http://www.leroymerlin.pt/Site/Produtos/Ferragens/Perfis-chapas-e-grelhas/Grelhas-de-ventilacao/14857815.aspx>.
 - Liddament, M. W. (1996). A guide to energy efficient ventilation. Air Infiltration and Ventilation Centre.
 - Liptak. B. G., 1995. Instrument Engineers' Handbook, Vol. 1: Process Measurement and Analysis 4th Edition: Orifices.
 - Lmnoeng@2018. Acedido em 26 de junho de 2018 em <https://www.lmnoeng.com/Flow/GasViscosity.php>.
-

-
- Malheiro M. (SEM DATA). INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL – MEDIÇÃO DE CAUDAL 1.ª PARTE – Classificação dos Caudalímetros; Pressão Diferencial: Placa de Orifício ou Diafragma. Acedido em 18 de junho de 2018 em <http://www.alphaengenharia.pt/pdf/robotica78.pdf>.
 - Martins, F. C. A. (2013). Avaliação da influência de janelas no comportamento acústico e térmico de espaços. Dissertação, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
 - Nomura, M., & Hiyama, K. (2017). A review: Natural ventilation performance of office buildings in Japan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(March), 746–754.
 - Norhidayah, A., Chia-kuang, L., Azhar, M. K., & Nurulwahida, S. (2013). Indoor Air Quality and Sick Building Syndrome in Three Selected Buildings. *Procedia Engineering*, 53(2010), 93–98.
 - NP 1037-1:2002, Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás – Parte 1: Edifícios de habitação. Ventilação natural, Instituto Português da Qualidade.
 - NP 1037-2:2002, Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás – Parte 1: Edifícios de habitação. Ventilação mecânica, Instituto Português da Qualidade.
 - Passivhaus@2018. Acedido a 18 de junho de 2018 em <http://passivhaus.pt/sobre?m=2>.
 - Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398.
 - Pinto, M., Viegas, J., & de Freitas, V. P. (2011). Air permeability measurements of dwellings and building components in Portugal. *Building and Environment*, 46(12), 2480–2489.
 - Portaria nº 349-B/2013 de 29 de novembro, Diário da República n.º 232/2013 - Série I. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia.
 - Priceindustries@2018. Acedido em a 15 de junho de 2018 em <https://www.priceindustries.com/content/uploads/assets/literature/engineering-guides/natural-ventilation-engineering-guide.pdf>.
 - Princeton-bernoulli@2018. Acedido em 21 de junho de 2018 em https://www.princeton.edu/~asmits/Bicycle_web/Bernoulli.html.
 - Princeton-continuity@2018. Acedido em 21 de junho de 2018 em https://www.princeton.edu/~asmits/Bicycle_web/continuity.html.
 - Reader-Harris, M., Barton, N., & Hodges, D. (2012). The effect of contaminated orifice plates on the discharge coefficient. *Flow Measurement and Instrumentation*, 25, 2–7.
 - Renson, SEM DATA. Invisivent® EVO – Renson.
 - Sacht, H., Bragança, L., Almeida, M., & Caram, R. (2016). Study of Natural Ventilation in wind Tunnels and Influence of the Position of Ventilation Modules and Types of Grids on a Modular Façade System. *Energy Procedia*, 96(October), 953–964.
-

-
- Sacht, H., & Lukiantchuki, M. A. (2017). Windows Size and the Performance of Natural Ventilation. *Procedia Engineering*, 196(June), 972–979.
 - Salehi, A., Torres, I., & Ramos, A. (2017). Assessment of ventilation effectiveness in existing residential building in mediterranean countries : Case study , existing residential building in Portugal. *Sustainable Cities and Society*, 32(March), 496–507.
 - Sodeca@2018. Acedido em 7 de julho de 2008 em http://www.sodeca.com/upload/imgCatalogos/PT/CT01_Centrifugs_2018_PT.pdf.
 - Seppänen, O., Brelih, N., Guillaume, G., & Liñu A. (2012). Healthvent: HEALTH-BASED VENTILATION GUIDELINES FOR EUROPE - WORK PACKAGE 5: EXISTING BUILDINGS, BUILDING CODES, VENTILATION STANDARDS AND VENTILATION IN EUROPE.
 - Stabile, L., Dell, M., Frattolillo, A., Massimo, A., & Russi, A. (2016). Effect of natural ventilation and manual airing on indoor air quality in naturally ventilated Italian classrooms. *Building and Environment*, 98, 180–189.
 - Stavrakakis, G. M., Zervas, P. L., Sarimveis, H., & Markatos, N. C. (2012). Optimization of window-openings design for thermal comfort in naturally ventilated buildings. *Applied Mathematical Modelling*, 36(1), 193–211.
 - Soudal@2018. Acedido a 15 de junho de 2018 em <http://www.soudal.com/soudalweb/products.aspx?w=250&p=639&g=884>.
 - Tadeu A., & Mendes P A. (2016). Acústica Aplicada, Área Científica de construções, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra.
 - Tham, K. W. (2016). Indoor air quality and its effects on humans — A review of challenges and developments in the last 30 years. *Energy & Buildings*, 130, 637–650.
 - Vento@2018. Acedido em 7 de julho de 2008 em http://www.vento.com.pt/1/admissao_grelhas_renson_1099183.html.
 - Wahlgren, P., & Sikander, E. (2010). Methods and Materials for an Airtight Building. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference*.
 - Web.mit.edu@2018. Acedido em 26 de junho de 2018 em http://web.mit.edu/calculix_v2.7/CalculiX/ccx_2.7/doc/ccx/node240.html
 - Zhai, Z., Johnson, M. H., & Krarti, M. (2011). Assessment of natural and hybrid ventilation models in whole-building energy simulations. *Energy and Buildings*, 43(9), 2251–2261.
 - Zhang, C., Wang, J., Xu, X., Zou, F., & Yu, J. (2016). Modeling and thermal performance evaluation of a switchable triple glazing exhaust air window. *Applied Thermal Engineering*, 92, 8–17.