



## A VENTILAÇÃO HÍBRIDA COMO ESTRATÉGIA DE RENOVAÇÃO DO AR DE EDIFÍCIOS DE SERVIÇOS COM OCUPAÇÃO PERMANENTE

ANTÓNIO M. RAIMUNDO<sup>1</sup>, OCTÁVIO N. CARDOSO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Mecânica, FCTUC  
Pólo II da Universidade de Coimbra

Rua Luís Reis Santos, 3030 - 788 Coimbra, Portugal

<sup>2</sup>Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Viseu  
Campus Politécnico de Repeses, 3510-504 Viseu, Portugal

(Recibido 12 de noviembre de 2011, para publicación 11 de febrero de 2012)

**Resumo** – O objectivo deste trabalho é analisar o desempenho dos sistemas de ventilação híbrida na renovação de ar dos edifícios não residenciais com ocupação contínua, dos quais se escolheu como representativo um lar de terceira idade. O cálculo dos vários fluxos de ar é efectuado com um *software* que recorre a modelos assentes sobre redes multizona, o programa CONTAM. A origem e o caudal de ar que entra em cada divisão do edifício são analisadas e comparadas com as exigências da regulamentação Portuguesa. O primeiro passo consiste na selecção dos espaços em que irá existir ventilação mecânica (espaços produtores de contaminantes, a manter em depressão) e nos quais haverá ventilação natural. Segue-se a determinação dos caudais de ar novo de insuflação e de extracção recomendados. A optimização da área e localização das grelhas é efectuada para as condições climáticas locais mais prováveis em termos de temperatura e de velocidade e direcção do vento. Por fim, a renovação do ar no edifício é estudada para todas as condições climáticas possíveis para o local de implantação do edifício. Através da análise de resultados será demonstrado que é viável garantir a renovação de ar dos edifícios não residenciais através de sistemas de ventilação híbrida, desde que os elementos do sistema de ventilação responsáveis por assegurar a ventilação natural dos espaços (sejam eles grelhas, condutas ou chaminés) sejam auto-reguláveis ou então estejam equipados com sistemas mecânicos de controlo dos caudais de ar.

**Palavras-chave** – Ventilação híbrida, ventilação de baixo consumo de energia, projecto de sistemas de ventilação, simulação numérica de sistemas de ventilação.

### 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos houve um aumento crescente de preocupação e exigência da sociedade relativamente à QAI (qualidade de ar no interior) dos edifícios e à eficiência energética dos mesmos. Essas preocupações baseiam-se em diversos factores, entre os quais podemos destacar a saúde pública, o conforto dos ocupantes e a limitação de recursos energéticos. Para dar resposta a estes problemas foram tomadas medidas com o intuito de salvaguardar as necessidades de conforto, sem recurso a consumos excessivos e desnecessários de energia.

Com o objectivo de forçar os seus membros a tomarem medidas neste sentido a União Europeia surgiu com uma nova directiva EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*) [1]. Esta Directiva impõe que o mais tardar a partir de 31-12-2020 todos os edifícios novos construídos na União Europeia sejam “Edifícios com necessidades quase nulas de energia”. Ora, isto só será possível se estes edifícios adoptarem soluções construtivas com muito elevada qualidade térmica, os equipamentos existentes no seu interior apresentarem altos rendimentos, existirem nestes edifícios sistemas de produção de energia eléctrica e térmica a partir de fontes renováveis e se forem equipados com sistemas de iluminação, de climatização e de ventilação altamente eficientes.

## 1.1. Enquadramento

Recorrendo à ventilação mecânica é possível assegurar que, independentemente da situação, os espaços interiores dos edifícios são ventilados com os caudais de ar recomendados pelas normas internacionais [2, 3] e/ou os exigidos pela legislação nacional em vigor, como sejam no caso Português o RSECE [4], a norma NP 1037 [5] e o SCIE [6]. No entanto, os sistemas de ventilação mecânica têm elevados custos de aquisição, de manutenção e fundamentalmente custos relacionados com os seus elevados consumos energéticos.

A ventilação natural poderá surgir como alternativa por ser um processo menos dispendioso. No entanto é necessário perceber a “dependência” da ventilação natural relativamente a factores tais como a localização do edifício, a forma do edifício, a orientação das fachadas e a exposição do edifício ao vento. Por outro lado, existem espaços em que não é possível garantir a qualidade do ar interior sem recorrer à ventilação mecânica, nomeadamente as zonas do edifício com forte produção de poluentes e/ou de contaminantes, para as quais é recomendado um funcionamento em depressão. Deste modo, a ventilação híbrida apresenta-se como a alternativa mais interessante, garantindo o funcionamento em depressão dos espaços ditos “sujos”, através de ventilação mecânica e assegurando a renovação do ar dos espaços conhecidos como “limpos”, através de ventilação natural.

## 1.2. A ventilação híbrida e os edifícios de serviços

O interesse pelos sistemas de ventilação híbrida, que alguns autores identificam como ventilação mista, tem crescido de forma cada vez mais acentuada. Este facto está na origem do grande número de publicações relacionada com esta temática. A grande maioria refere que estes sistemas só terão um funcionamento adequado se houver uma integração adequada dos dispositivos responsáveis por assegurar a componente mecânica e a natural.

Bourgeois *et al.* [7] identificam problemas na aplicação de sistemas de ventilação natural aos edifícios de serviços localizados no Canadá, apresentando como solução a sua substituição por sistemas de ventilação híbrida controlada mecanicamente.

Heinonen e Kosonen [8] descrevem e analisam vários tipos alternativos de renovação do ar dos espaços por ventilação híbrida. Identificam as vantagens e desvantagens de cada um deles e defendem que devem existir sempre sistemas de controlo, de preferência comandados por sensores de CO<sub>2</sub>. No mesmo sentido, Kosik 2001 [9] revê várias estratégias de ventilação híbrida identificando vantagens e desvantagens, discute o seu potencial de poupança de energia, a sua flexibilidade e cuidados a ter na sua aplicação aos edifícios com elevadas densidades de ocupação. Por sua vez, Li e Heiselberg [10] apresentam um resumo exaustivo da literatura dedicada aos sistemas de ventilação natural e híbrida e descrevem os métodos que actualmente são utilizados no estudo destes fenómenos, identificando as situações em que cada um deve ser aplicado.

Ferreira [11] propôs e analisou vários sistemas de ventilação híbrida inovativos capazes de conduzir a condições de QAI aceitáveis, com baixos consumos energéticos e reduzidas perdas energéticas devidas à ventilação. Para o efeito propôs sistemas capazes de tirar proveito das principais características de cada um dos tipos de ventilação envolvidos (natural e mecânica), que associados a diversas estratégias de controlo permitiu a obtenção de caudais de ar controlados e, consequentemente, propiciadores de ambientes interiores confortáveis.

Emmerich [12] apresenta um estudo com vista a determinar a aplicação da ventilação híbrida aos edifícios localizados nos Estados Unidos. Este autor identificou dificuldades de controlo de humidade e de caudais de ar com a aplicação de ventilação natural aos edifícios de serviços. Por outro lado verificou que com sistemas de ventilação híbrida é viável ventilar este tipo de edifícios com menores consumos de energia do que com ventilação mecânica e, mesmo assim, garantindo níveis idênticos de conforto térmico e, nalguns casos, com uma melhor QAI.

Villi *et al.* [13] apresentam um projecto em que são utilizados os conceitos da ventilação híbrida para a renovação de um edifício de serviços a construir no Nordeste da Itália. Com recurso aos softwares CONTAM e TRNSYS simularam o comportamento do edifício para as condições climáticas características dessa zona. Previram bons níveis de conforto térmico e de QAI com baixos consumos de energia para climatização e para ventilação.

Com o objectivo de analisar a possibilidade de melhorar a eficiência energética dos edifícios, Ji *et al.* [14] descrevem o projecto de um edifício de serviços de baixo consumo de energia supostamente localizado no Sul da China. Devido à severidade do clima optaram por um sistema de ventilação híbrida equipado com um sistema de controlo que impõe um limite aos caudais de ar vindos do exterior e que os reduz nas situações em que são previsíveis elevadas necessidades de energia para climatização. Os resultados que obtiveram em termos de consumos energéticos, de QAI e de conforto térmico permitiram-lhe assegurar que os sistemas de ventilação híbrida são boas soluções técnicas para a renovação de ar dos edifícios, mesmo em climas subtropicais como era o caso.

### 1.3. Objectivos

Pretende-se com este trabalho demonstrar que é viável projectar um sistema de ventilação híbrida de baixo consumo energético mas capaz de garantir a qualidade do ar no interior de um lar de terceira idade. Demonstra-se que a sua implementação adequada exige cuidados com a arquitectura proposta para o edifício, como sejam a inclusão de aberturas na sua envolvente e entre espaços interiores, e também, a utilização de chaminés de exaustão e, em casos pontuais, condutas de insuflação.

Para definir os critérios a utilizar na verificação do nível de renovação de ar de cada espaço do edifício começa-se por identificar os caudais recomendados. Para o efeito, neste trabalho recorreu-se a normas e à legislação Portuguesa actualmente em vigor. Considera-se a taxa de ventilação de uma zona aceitável desde que a sua média anual seja igual ou ligeiramente superior ao recomendado pela legislação e que a sua variação ao longo do ano esteja compreendida entre 60% e 140% desse valor.

## 2. O EDIFÍCIO E SEUS REQUISITOS DE AR NOVO

O edifício, um lar de terceira idade com 3 pisos (cave, rés-do-chão e primeiro andar), cujo sistema de ventilação será projectado, situa-se na zona suburbana de Coimbra, uma região Portuguesa com clima moderado.

### 2.1. Descrição do edifício

O edifício, representado na Fig. 1, situa-se a uma altitude de 152 metros, apresentando um formato em L, estando servido a Nordeste por um estacionamento exclusivo a funcionários e por uma zona de cargas e descargas, a Sudeste por um estacionamento para visitantes e a Sudoeste por uma estrada de acesso a Coimbra. A Sudeste existe uma colina que surge como um obstáculo ao vento. Nas restantes orientações não existem obstáculos naturais ou construções relevantes que façam obstrução ao vento nas redondezas. A fachada principal está orientada a Noroeste, que, conforme se apresenta adiante, corresponde à direcção mais frequente do vento.

A cave do edifício apresenta as suas fachadas enterradas, com excepção da fachada a Noroeste e uma parte da fachada a Nordeste. Este piso tem um pé-direito médio de 3m, uma área de pavimento de 171.7 m<sup>2</sup> e é constituído exclusivamente por zonas técnicas: armazém 1, armazém 2, sala de roupa suja, sala de roupa limpa, arrecadação, sala de caldeiras, corredor, escadas interiores, elevador. O piso do Rés-do-chão possui um pé-direito médio de 3 m, uma área de pavimento de 596.9 m<sup>2</sup> e encontra-se dividido em: 4 quartos simples (com IS privada,) 5 quartos duplos (com IS privada), sala de estar, sala do pessoal (com 2 IS privadas), sala de refeições, gabinete médico (com IS privada), 5 instalações sanitárias (IS) com duche, 4 IS sem duche, cozinha com copa, despensa, sala para equipamentos de refrigeração, sala de sujus, corredores, escadas interiores e elevador. O piso Superior possui um pé-direito médio de 3 m, uma área de pavimento de 558.5 m<sup>2</sup> e é formado por: 4 quartos simples (com IS privada), 5 quartos duplos (com IS privada), sala de estar, sala de convívio, sala de reuniões, 2 gabinetes, IS com duche, 4 IS sem duche, 2 arrumos, sala de sujus, corredores, escadas interiores e elevador.

### 2.2. Requisitos de ar a assegurar em cada espaço

Para definir as taxas de renovação de ar recomendadas para cada espaço interior seguiu-se a legislação Portuguesa em vigor e as normas, mais especificamente o RSECE [4] (quartos, gabinetes, salas, circula-

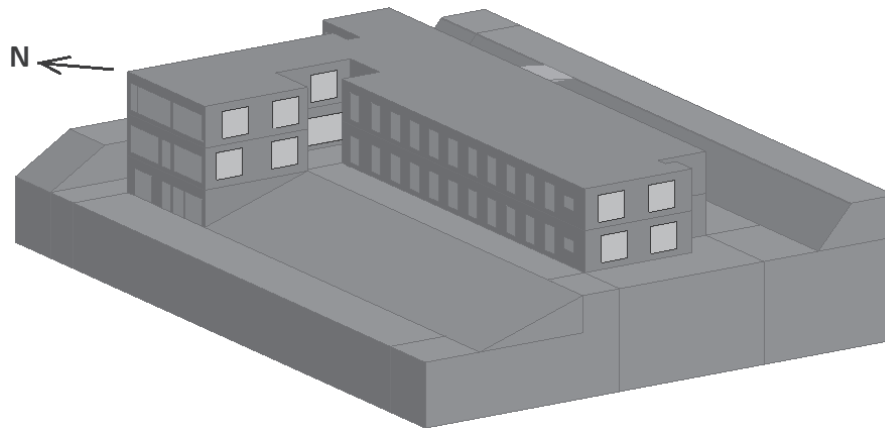


Fig. 1. Edifício em estudo.

ções interiores, armazéns, arrumos), a norma NP 1037 [5] (instalações sanitárias) e a norma EN 13779 [2] (cozinha).

Tendo em conta a área de pavimento de cada espaço ( $A_p$ , em  $m^2$ ) e o número máximo de ocupantes previsto para o mesmo ( $N_p$ ), obtiveram-se os seguintes caudais de ar novo a garantir nesse espaço ( $Q_{AN}$ , em  $m^3/h$ ):

- Quartos e suites –  $Q_{AN} = \text{máximo } (30 N_p, 2 A_p)$ ;
- Salas de estar e afins –  $Q_{AN} = \text{máximo } (30 N_p, 5 A_p)$ ;
- Salas de reuniões –  $Q_{AN} = \text{máximo } (30 N_p, 20 A_p)$ ;
- Salas de convívio –  $Q_{AN} = \text{máximo } (35 N_p, 20 A_p)$ ;
- Salas de refeições –  $Q_{AN} = \text{máximo } (35 N_p, 5 A_p)$ ;
- Gabinetes –  $Q_{AN} = \text{máximo } (35 N_p, 5 A_p)$ .

Para os restantes espaços do edifício em análise é recomendado assegurar pelo menos os seguintes caudais de ar ( $Q_A$ , em  $m^3/h$ ), o qual tem de ser limpo mas não necessariamente novo:

- Circulações interiores –  $Q_A = \text{máximo } (5 A_p, 30)$ ;
- Cozinhas –  $Q_A = \text{máximo } (25 N_R, 15 Vol, 60)$ ;
- Armazéns e afins –  $Q_A = \text{máximo } (5 A_p, 20)$ ;
- IS sem duche –  $Q_A = \text{máximo } (4 Vol, 30)$ ;
- IS com duche –  $Q_A = \text{máximo } (5 Vol, 45)$ ;
- Sala das caldeiras –  $Q_A = \text{máximo } (5 P_T, 5 Vol, 60)$ ,

em que  $N_R$  representa o número máximo de refeições confeccionadas em simultâneo,  $Vol$  o volume do espaço (em  $m^3$ ) e  $P_T$  a soma das potências térmicas das caldeiras instaladas (em kW).

Para evitar a degradação da QAI (qualidade do ar interior) é necessário assegurar que os poluentes produzidos não migram de uns espaços para os outros. Este facto exige que não existam transferências de ar das cozinhas, das IS e dos estacionamento para os restantes espaços. Isto consegue-se através da ausência de passagens de ar entre estes espaços e os restantes ou, alternativamente, mantendo-os em depressão relativamente aos espaços adjacentes. Neste último caso basta impor uma extracção de ar do espaço superior à admissão, recomendando-se que  $Q_{\text{Extracção}} \geq 1.15 Q_{\text{Admissão}}$  [2]. Adicionalmente, entre espaços em que exista uma porta entre eles devem evitar-se diferenças de pressão superiores a  $10 \text{ N/m}^2$ .

### 3. PARAMETRIZAÇÃO DA VENTILAÇÃO DO EDIFÍCIO E SUA SIMULAÇÃO COM O PROGRAMA CONTAM

#### 3.1. Parametrização da ventilação do edifício

Para levar em consideração o tipo de ventilação recomendada, os espaços são classificados segundo uma de três categorias diferentes: (i) espaços ventilados naturalmente sem requisitos de caudal de ar novo; (ii) espaços ventilados naturalmente com requisitos de caudal de ar novo; e (iii) espaços ventilados mecanicamente.

Para garantir os caudais de ar recomendados e o seu funcionamento em depressão, de modo a assegurar a ausência de migração de poluentes aí produzidos para os restantes espaços, a cozinha e a sala de caldeiras são ventiladas mecanicamente.

A ventilação da cozinha (localizada no rés-do-chão) é assegurada por uma hotte compensada com uma insuflação de compensação de 60% do caudal de extracção, com o resto do ar de compensação a ser assegurado por grelhas de transferência com a sala de refeições e com o exterior.

A renovação de ar da sala de caldeiras (localizada na cave e sem elementos construtivos em contacto com o exterior) é efectuada por ventilação mecânica com insuflação assegurada por ventilador e conduta de admissão e exaustão por ventilador e chaminé. Para além destes dispositivos não existem grelhas entre este espaço e o exterior. O caudal em falta vem da circulação da cave através de uma grelha de transferência.

Nas situações em que a temperatura do ar exterior é mais elevada do que a do ar interior, existe a possibilidade de existir inversão do sentido da circulação do ar. Ou seja, nestas situações o ar tem tendência a entrar pelas aberturas a maior cota e a abandonar o espaço pelas de menor. Esta inversão de sentido do fluxo de ar é indesejável, já que impossibilita a ventilação natural das IS a partir de ar com origem nos espaços adjacentes (quartos, circulações, etc.). Para evitar o recurso à ventilação mecânica, a renovação de ar das IS será efectuada por ventilação natural a partir de ar exterior, não existindo grelhas de transferência entre as IS e os restantes espaços. Em caso de necessidade as grelhas de admissão são equipadas com condutas e as grelhas de exaustão com chaminés.

A renovação de ar dos quartos, das salas, dos gabinetes e dos armazéns e afins é assegurada por ventilação natural com admissão de ar novo através de grelhas com o exterior e extracção por grelhas com o exterior ou com as circulações interiores. Sempre que necessário as grelhas estão equipadas com condutas de admissão ou chaminés de exaustão.

As circulações interiores são ventiladas naturalmente por grelhas para com os outros espaços e por grelhas de extracção para com o exterior equipadas com chaminés.

#### 3.2. Ferramenta de cálculo – programa CONTAM

O software CONTAM (ou CONTAMW) é um programa de simulação multizona do comportamento dos edifícios em termos de QAI (qualidade do ar interior), da ventilação de espaços interiores e da exposição dos ocupantes aos contaminantes existentes no ar [15]. Trata-se de uma ferramenta de cálculo extensivamente validada e testada [16-19], foi desenvolvida pelo NIST (U.S. *National Institute of Standards and Technology*), é de uso livre e fácil de utilizar.

O programa CONTAM pode ser utilizado assumindo regime permanente ou transitório normal ou transitório cíclico. No caso de regime transiente podem impor-se condições ambientais exteriores constantes ou variáveis (impostas pelo operador ou recorrendo a uma base de dados climática do local). Neste trabalho as simulações foram efectuadas assumindo regime permanente.

#### 3.3. Representação do edifício

A modelação do edifício em apreço envolveu a sua repartição em 84 zonas distribuídas por quatro níveis (cave, rés-do-chão, piso superior e cobertura). A cave foi repartida por 9 zonas e a sua representação no *SketchPad* encontra-se na Fig. 2. Ao rés-do-chão foram associadas 41 zonas conforme se apresenta na Fig. 3. O piso superior foi supostamente dividido em 34 zonas conforme se apresenta na Fig. 4. A cobertura, representada na Fig. 5, não tem associada nenhuma zona mas a sua representação é necessária para

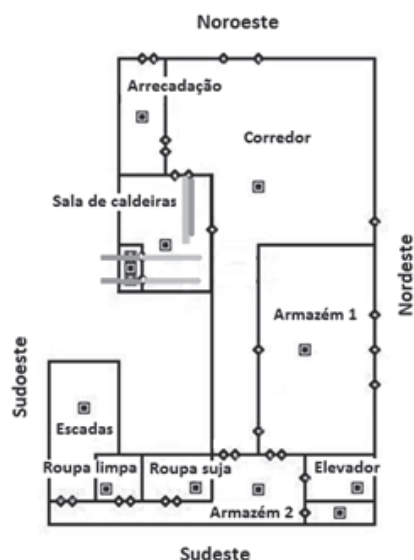


Fig. 2. Representação esquemática da cave.

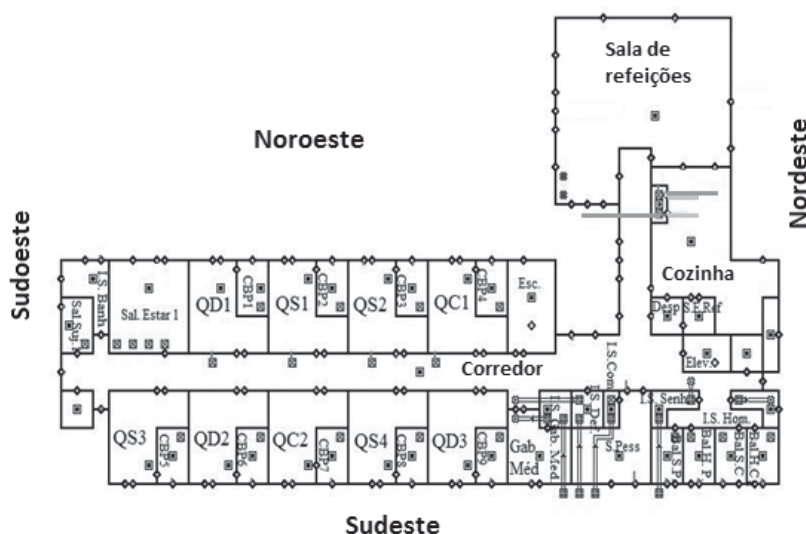


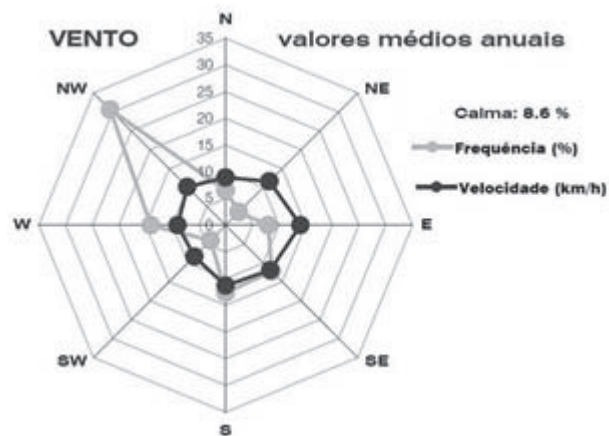
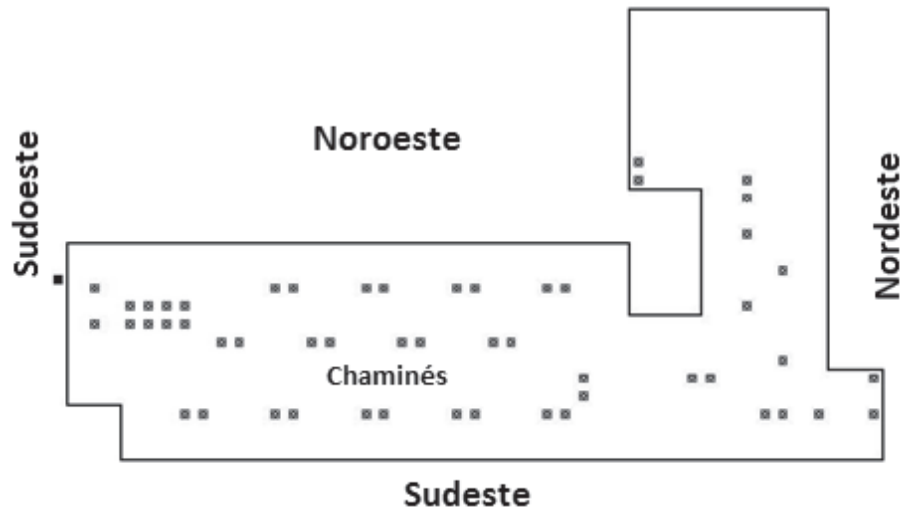
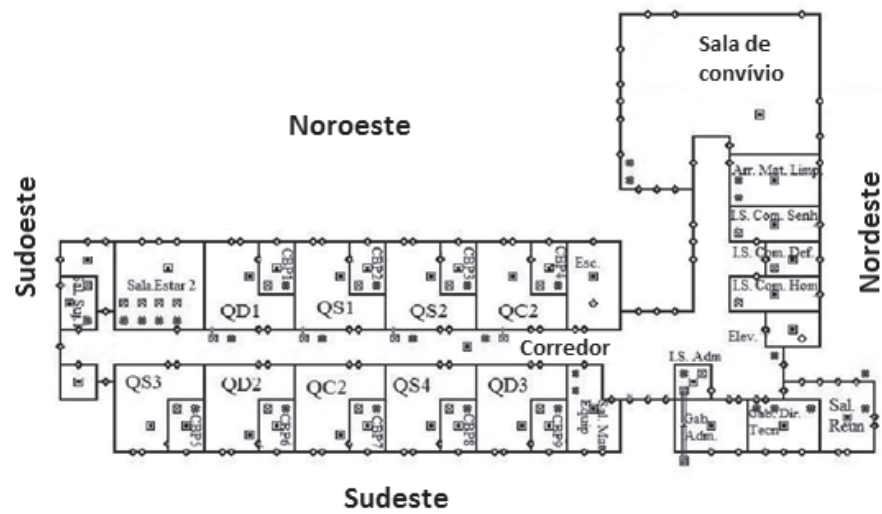
Fig. 3. Representação esquemática do rés-do-chão.

especificar a saída das chaminés de exaustão. Nas Figuras 2 a 5 as linhas a cor verde e a rosa representam a especificação dos sistemas mecânicos de ventilação.

### 3.4. Condições ambientais exteriores

Para a localização do edifício (Coimbra, Portugal), a temperatura média anual é de 16°C, sendo a temperatura média de Inverno e Verão respectivamente de 13 °C e 20°C [20]. As temperaturas máxima e mínima de Inverno são respectivamente de 20°C e -5°C, enquanto no Verão a temperatura varia entre 42°C e 5°C. Através da Fig. 6, pode observar-se que o vento sopra com maior frequência de Noroeste a uma velocidade média anual de 2.8 m/s e que, salvo situações pontuais, varia entre 2.2 e 4.2 m/s [21].





Conforme se pode constatar, a fachada principal do edifício está orientada a Noroeste, precisamente a direcção mais frequente do vento. As fachadas de menores dimensões estão orientadas a Nordeste e a Sudoeste, enquanto a fachada oposta, à frente da qual existe um obstáculo natural, está orientada a Sudeste.

### 3.5. Algoritmo de simulação

Existem na actualidade um grande número de modelos de simulação dos escoamentos de ar em edifícios. O *software* utilizado neste trabalho utiliza o método das “zonas” (multizona) proposto por Walton [22]. Esta metodologia assenta numa rede de “zonas” ligadas entre si por “caminhos de escoamento” (frestas, grelhas, condutas, chaminés, simples aberturas, etc.). As “zonas” representam espaços interiores, zonas de ligação entre condutas ou o ambiente exterior.

Considerando o edifício supostamente dividido em  $N_z$  zonas e que o regime é permanente, em cada zona (representada pelo índice  $i$ ) é nula a variação de massa de ar nela contida. Se cada zona for servida por  $nc_i$  “caminhos de escoamento”, é possível utilizar uma adaptação da equação da continuidade para determinar as transferências de ar através dos mesmos, vindo [22, 23]

$$\sum_{j=1}^{nc_i} F_{j,i} + F_i = 0 \quad (1)$$

em que  $F_{j,i}$  é o caudal mássico de ar introduzido na zona  $i$  pelo “caminho de escoamento”  $j$  (kg/s) e  $F_i$  representa outros tipos de processos que possam adicionar ou retirar ar dessa zona. Conforme recomendado no manual [22, 23], seleccionou-se sempre o modelo em potência, que relaciona o caudal mássico ( $F$ , em kg/s) que atravessa o elemento com a sua área efectiva à passagem de ar ( $A_{ef}$ , em  $m^2$ ), o seu coeficiente de descarga ( $C_d$ ), a diferença de pressão entre os seus dois lados ( $\Delta P$ , em  $N/m^2$ ) e o expoente do tipo de escoamento ( $n$ ). Neste caso, o caudal mássico de ar introduzido através do “caminho de escoamento”  $j$ , que liga a zona  $i$  com a zona  $k$ , é determinado por

$$F_{j,i} = C_{d,j} A_{ef,j} \rho_j \Delta P_j^{n_j} \quad (2)$$

O coeficiente de descarga está relacionado com a dinâmica do escoamento pela abertura, tendo sido considerado igual a 0.6 no caso de frestas de portas e de janelas e de 0.8 nas grelhas. O expoente do tipo de escoamento varia entre 0.5 para aberturas amplas, em que o escoamento é dominado pela inércia, e 1 para os orifícios dos materiais porosos, com o escoamento a ser regulado pela viscosidade. Neste estudo escolheu-se  $n = 0.5$  para as grelhas,  $n = 0.7$  para as frestas das portas e  $n = 0.8$  para as frinchas das janelas.

A diferença de pressão entre as extremidades de cada “caminho de escoamento” é obtida recorrendo a uma adaptação da equação de Bernoulli [22, 23]

$$\Delta P_j = P_k - P_i + g \rho_j (Z_k - Z_i) + \Delta P_{w,j} + \Delta P_{t,j} - \Delta P_{c,j} \quad (3)$$

Na equação anterior  $P_k$  e  $Z_k$  representam, respectivamente, a pressão estática e a cota do centro geométrico da zona  $k$  e  $P_i$  e  $Z_i$  os correspondentes valores do lado da zona  $i$ . As diferenças de pressão devem-se à influência do vento ( $\Delta P_w$ ), à impulsão térmica ( $\Delta P_t$ ) e à perda de carga originada pela passagem do escoamento de ar por esse elemento ( $\Delta P_c$ ). Para não retirar significância aos valores dos  $\Delta P$ , as pressões em cada zona são definidas relativamente à pressão no ambiente exterior, para o qual é assumido  $P=0$   $N/m^2$ .

Para os “caminhos de escoamento” equipados com sistemas de ventilação mecânica (neste caso, alguns dos da cozinha e da sala de caldeiras) é imposto o correspondente caudal volúmico, podendo o caudal mássico  $F_{j,i}$  variar com a massa específica  $\rho_j$ .

Para determinar os caudais mássicos em cada “caminho de escoamento” e a pressão em cada zona é necessário resolver em conjunto os sistemas de equações algébricas não lineares (1), (2) e (3). A partir de valores conhecidos (ou arbitrados) para as pressões em cada zona, os sistemas de equações anteriores são resolvidos iterativamente recorrendo a uma versão adequada do método de Newton-Raphson. Para analisar a convergência do processo iterativo são determinados, em cada iteração e para todas as zonas, o erro



relativo relacionado com a conservação de massa ( $E_r$ ) e a variação entre iterações da soma dos valores absolutos dos caudais mássicos ( $V_{ar}$ ). O processo iterativo é considerado convergido quando se verificar cumulativamente em todas as zonas que os valores de  $E_r$  e de  $V_{ar}$  são inferiores a determinados limites máximos admissíveis ( $E_{adm}$  e  $V_{adm}$ ). Neste trabalho foram impostos  $E_{adm}=10^{-6}$ ,  $V_{adm}=10^{-7}$  e um número máximo de iterações de 1000.

## 4. RESULTADOS

Como o objectivo deste trabalho é a preconização de um sistema de ventilação híbrida capaz de garantir uma renovação adequada do ar dos espaços interiores do edifício, minimizando ao mesmo tempo os consumos de energia do sistema de ventilação, optou-se por renovar o ar da maioria dos espaços por ventilação natural. Recorreu-se apenas a sistemas de ventilação mecânica em dois dos espaços que é necessário manter em funcionamento em depressão (a cozinha e a sala das caldeiras). Para cada uma das IS foi previsto um sistema de ventilação autónomo e sem trocas de ar com os restantes.

Na cozinha foi considerada a existência de uma hotte compensada com um caudal de extracção de 1500 m<sup>3</sup>/h (0.417 m<sup>3</sup>/s) e um de insuflação de 1000 m<sup>3</sup>/h (0.278 m<sup>3</sup>/s), com o resto do ar a ter origem na sala de refeições (através de uma grelha de 80 cm<sup>2</sup> de área efectiva) e no exterior (por uma grelha de 400 cm<sup>2</sup> de área efectiva). O sistema de ventilação mecânica da sala de caldeiras garante uma extracção de 300 m<sup>3</sup>/h (0.08 m<sup>3</sup>/s) e uma insuflação de 220 m<sup>3</sup>/h (0.06 m<sup>3</sup>/s), com o resto do ar a ter origem no corredor da cave (por uma grelha de 600 cm<sup>2</sup> de área efectiva).

As áreas efectivas das frestas de portas e de janelas dependem do grau de estanquidade das mesmas, tendo-se assumido valores típicos referidos na bibliografia [24]. Em cada folha de porta (interior e exterior) considerou-se a existência de uma fresta com 2 mm em todo o seu perímetro, tendo-se obtido áreas efectivas de fuga ( $A_{ef}$ ) entre 0.011 e 0.028 m<sup>2</sup>. Assumiu-se a existência em cada janela de uma fresta com 0.3 mm em todo o seu perímetro, resultando áreas efectivas de frestas variando entre 0.001 e 0.004 m<sup>2</sup>. Considerou-se que as frestas das portas estão localizadas a meio da zona inferior das mesmas e que as das janelas se situam no seu centro geométrico.

Para assegurar a renovação de ar dos espaços interiores por ventilação natural foram assumidas grelhas com o exterior e grelhas entre espaços interiores, com o centro geométrico das mesmas localizado ou a 30 cm acima da cota do pavimento ou a 30 cm abaixo da cota do tecto. A área efectiva destes elementos ( $A_{ef}$ ) foi retirada a partir dos catálogos de um fabricante e cada um está equipado com um filtro de partículas. Realça-se que todas as áreas dos “caminhos de escoamento” referidas a partir deste ponto são áreas efectivas de passagem de ar.

Para realizar a troca de ar entre alguns espaços interiores e o exterior é necessário o recurso a condutas (horizontais) e a chaminés (verticais). A área efectiva destes elementos foi retirada dos catálogos de um fabricante. As condutas, com o centro geométrico da abertura interior a 30 cm acima da cota do pavimento ou a 30 cm abaixo da cota do tecto, encontram-se equipadas com uma grelha em cada topo, têm uma curva a 90° e estão munidas com um filtro de partículas. As chaminés partem do tecto do espaço e terminam 1 m acima da cota superior da cobertura, têm uma grelha no lado interior e um “chapéu” de protecção do lado exterior, são direitas e não estão equipadas com filtro.

Considerou-se que os filtros utilizados nas grelhas e nas condutas de admissão de ar podem ser caracterizados por um coeficiente de perda de carga localizada  $K=10$ , as curvas a 90° por  $K=1$ , que a rugosidade das condutas é  $\varepsilon=10^{-4}$  m e desprezou-se a eventual renovação do ar interior promovida pela abertura esporádica de portas e de janelas.

A análise do comportamento do sistema de ventilação preconizado é efectuada para todas as situações climatéricas específicas possíveis de ocorrer no local de implantação do edifício. Deste modo é necessário efectuar apenas simulações considerando a hipótese de regime permanente.

### 4.1. Dimensionamento do sistema de ventilação

Com o objectivo de analisar o nível de renovação de ar do edifício que seria conseguido se não fossem previstas grelhas, simulou-se a ventilação do edifício considerando apenas os sistemas de ventilação me-

cânica da cozinha e da casa de caldeiras e as frestas de portas e janelas. Para as condições climatológicas mais prováveis para o local ( $T_{ext}=16^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{vento}=V_{mel}=10\text{ km/h}=2.8\text{ m/s}$  e rumo NW) e uma temperatura do ar interior  $T_{int}=20^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta T=T_{ext}-T_{int}=-4^{\circ}\text{C}$ ) obtiveram-se taxas de renovação do ar para os espaços entre 5 e 20 % do valor recomendado, ou seja manifestamente insuficientes. Os maiores valores obtiveram-se nos espaços adjacentes à cozinha e à sala das caldeiras (onde existem sistemas de ventilação mecânica). Para além disto verificaram-se diferenças de pressão entre os espaços ventilados mecanicamente e os seus vizinhos imediatos superiores a  $100\text{ N/m}^2$ , o que é altamente não recomendável.

Mantendo as condições anteriores, foi assumida a existência de grelhas com o exterior e entre espaços interiores. Em caso de necessidade, as grelhas com o exterior foram “complementadas” com condutas de admissão ou chaminés de exaustão. De entre as grelhas, condutas e chaminés constantes no catálogo consultado, começou-se por escolher as de menor área efectiva. A partir da análise dos resultados obtidos com a simulação, escolheu-se, para os espaços cuja renovação de ar era ainda insuficiente, elementos de ventilação com área efectiva imediatamente superior. Este processo foi repetido as vezes necessárias até obter para todos os espaços interiores uma taxa de renovação de ar próxima do valor recomendado. Este processo levou à obtenção de “sistemas de ventilação natural” com características diferentes para espaços com a mesma utilização e área de pavimento. Este facto está relacionado com as fachadas a partir das quais cada espaço está a ser ventilado e com os espaços interiores com os quais faz trocas de ar.

Apresentam-se na Tabela 1 o valor médio (e o desvio padrão para um nível de confiança de 95%) do rácio entre as áreas efectivas de passagem de ar das grelhas (em  $\text{cm}^2$ ) e o número de ocupantes máximo previsto para os quartos, as salas e os gabinetes. “Interior a 30 cm” representa os elementos de troca de ar com outros espaços interiores e cujo centro geométrico da abertura está a 30 cm acima da cota do pavimento, repetindo-se a lógica para os restantes elementos. Os valores apresentados não incluem as áreas das frestas das portas e das janelas.

Apresentam-se nas Tabelas 2 e 3 o valor médio (e o desvio padrão) do rácio entre as áreas efectivas das grelhas (em  $\text{cm}^2$ ) e a área de pavimento do espaço que servem (em  $\text{m}^2$ ) para as IS sem duche, as IS com duche, as circulações, os armazéns, a sala de caldeiras e a cozinha.

Tabela 1. Áreas efectivas por ocupante dos elementos de ventilação natural (grelhas, condutas e chaminés) dos espaços: QS (quartos simples), QD (quartos duplos), Salas (salas de estar, de refeições, etc.), Gab (gabinetes). Frestas de portas e janelas não incluídas.

Grelhas com:	QS	QD	Salas	Gab
Interior a 30 cm ( $\text{cm}^2/\text{pessoa}$ )	0 (0)	0 (0)	1 (1)	0 (0)
Interior a 270 cm ( $\text{cm}^2/\text{pessoa}$ )	123 (34)	112 (36)	36 (58)	212 (66)
Exterior a 30 cm ( $\text{cm}^2/\text{pessoa}$ )	210 (43)	200 (51)	165 (73)	233 (29)
Exterior a 270 cm ( $\text{cm}^2/\text{pessoa}$ )	0 (0)	0 (0)	122 (116)	0 (0)
Exterior + Interior ( $\text{cm}^2/\text{pessoa}$ )	333 (57)	312 (85)	324 (145)	445 (95)

Tabela 2. Áreas efectivas por área de pavimento dos elementos de ventilação natural dos espaços: IS-sD (instalações sanitárias sem duche), IS-cD (instalações sanitárias com duche), Circ-C (circulação da cave), Circ-S (circulações do rés-do-chão e do piso superior). Não incluídas as áreas dos sistemas mecânicos e de frestas de portas e de janelas.

Grelhas com:	IS-sD	IS-cD	Circ-C	Circ-S
Interior a 30 cm ( $\text{cm}^2/\text{m}^2$ )	0 (0)	0 (0)	46 (0)	4 (5)
Interior a 270 cm ( $\text{cm}^2/\text{m}^2$ )	0 (0)	0 (0)	39 (0)	22 (12)
Exterior a 30 cm ( $\text{cm}^2/\text{m}^2$ )	62 (16)	75 (19)	0 (0)	0 (0)
Exterior a 270 cm ( $\text{cm}^2/\text{m}^2$ )	47 (9)	61 (29)	0 (0)	16 (1)
Exterior + Interior ( $\text{cm}^2/\text{m}^2$ )	109 (14)	136 (48)	85 (0)	42 (8)

Tabela 3. Áreas efectivas por área de pavimento dos elementos de ventilação natural dos espaços complementares. Não incluídas as áreas dos sistemas mecânicos e de frestas de portas e de janelas.

Grelhas com:	Armazéns	Caldeiras	Cozinha
Interior a 30 cm (cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	6 (13)	20 (0)	2 (0)
Interior a 270 cm (cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	5 (13)	0 (0)	0 (0)
Exterior a 30 cm (cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	25 (20)	0 (0)	17 (0)
Exterior a 270 cm (cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	27 (25)	0 (0)	0 (0)
Exterior + Interior (cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	63 (36)	20 (0)	19 (0)

#### 4.2. Influência das condições climatológicas no comportamento do sistema de ventilação

A área efectiva dos elementos do sistema de ventilação natural foi optimizada para as condições médias mais prováveis para o funcionamento do edifício ( $\Delta T = T_{\text{ext}} - T_{\text{int}} = -4^\circ\text{C}$ ,  $V_{\text{vento}} = 2.8$  m/s e rumo Noroeste). Torna-se agora necessário verificar a qualidade da renovação do ar dos espaços para outras condições climatológicas menos prováveis mas possíveis de ocorrer. Para o efeito foi realizado um conjunto de simulações com o objectivo de analisar a influência da variação do rumo do vento, da velocidade do vento e da diferença de temperatura  $\Delta T$ . Nesta fase assumiu-se que os elementos do sistema de ventilação não dispõem de qualquer mecanismo de regulação de caudal. De modo a sistematizar a apresentação e a análise dos resultados, as taxas de renovação de ar são representadas pelo valor médio (e o desvio padrão para um nível de confiança de 95%) para essa tipologia de espaço da razão entre o valor de caudal de ar previsto pela simulação ( $Q_{\text{previsto}}$ ) e o recomendado ( $Q_{\text{recomendado}}$ , definido anteriormente)

$$R_c = Q_{\text{previsto}} / Q_{\text{recomendado}} \quad (4)$$

Consideram-se como aceitáveis valores deste rácio compreendidos entre 0.60 e 1.40.

Considerando rumos possíveis para o vento coincidentes com os 8 octantes geodésicos, simulou-se a ventilação do edifício para  $\Delta T = -4^\circ\text{C}$  e  $V_{\text{vento}} = 2.8$  m/s. Apresenta-se na Fig. 7 o valor médio (e o desvio padrão) do rácio de ventilação ( $R_c$ ) obtido para os espaços com requisitos de ar novo (quartos, salas e gabinetes) em função da orientação do vento. Na Fig. 8 apresenta-se os correspondentes valores para as IS, as circulações e os espaços classificados como armazéns. Analisando as Figuras 7 e 8 verifica-se que, salvo raras excepções, o valor médio do rácio  $R_c$  encontra-se dentro dos limites de aceitabilidade. Por outro lado o desvio padrão indica uma grande dispersão de valores, existindo sempre espaços com caudais de ar acima e abaixo do desejável. A menos que se usem elementos de ventilação reguláveis, este facto é muito difícil de evitar pois está relacionado com a orientação relativa entre a fachada a partir da qual se faz a ventilação do espaço em questão e a direcção do vento. Um espaço subventilado passa a sobreventilado quando o sentido do vento é o oposto e vice-versa.

Para o rumo do vento mais provável para o local (Noroeste,  $\beta = 315^\circ$ ) e uma diferença de temperatura  $\Delta T = -4^\circ\text{C}$  simulou-se a ventilação do edifício para velocidades do vento entre 0 e 8 m/s (28.8 km/h). Apresentam-se na Fig. 9 os resultados obtidos para os espaços com requisitos de ar novo (quartos, salas e gabinetes) e na Fig. 10 para as IS, as circulações e os espaços classificados como armazéns. Verifica-se que existe uma dependência muito forte das taxas de renovação de ar dos espaços para com a velocidade do vento. No entanto, o efeito de chaminé evita que a renovação de ar seja nula nas situações de ausência de vento. Para velocidades do vento elevadas obtêm-se taxas de renovação de ar excessivas, as quais dão origem a desconforto térmico e/ou a grandes consumos de energia em climatização. Conforme se pode observar na Fig. 6, para o local de implantação do edifício são improváveis velocidades do vento superiores a 4.2 m/s (15 km/h), mas elas podem ocorrer nomeadamente no Inverno. O desvio padrão continua a revelar uma grande dispersão de valores de caudais de ar entre espaços com a mesma função.

Mantendo constantes as características do vento ( $V_{\text{vento}} = 2.8$  m/s e rumo Noroeste) simulou-se a ventilação do edifício para valores da diferença de temperaturas  $\Delta T$  prováveis de ocorrer no local de implantação do edifício (entre  $-25^\circ\text{C}$  e  $+17^\circ\text{C}$ ). De realçar que, embora possível, é muito improvável a ocorrência de

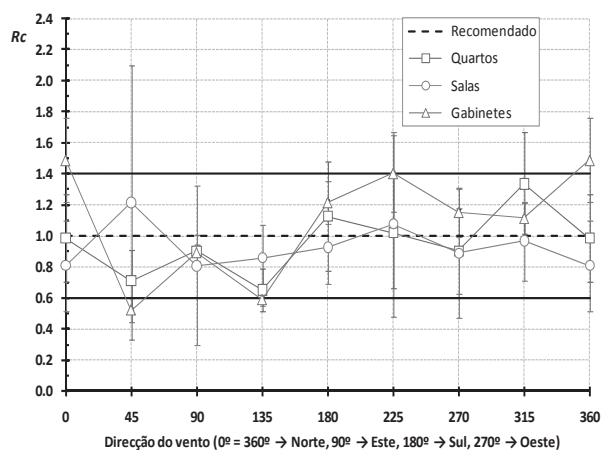


Fig. 7. Rácio entre o caudal de ar previsto e o recomendado para espaços com requisitos de ar novo quando  $\Delta T = -4^\circ\text{C}$  e  $V_{\text{vento}} = 2.8\text{ m/s}$ .

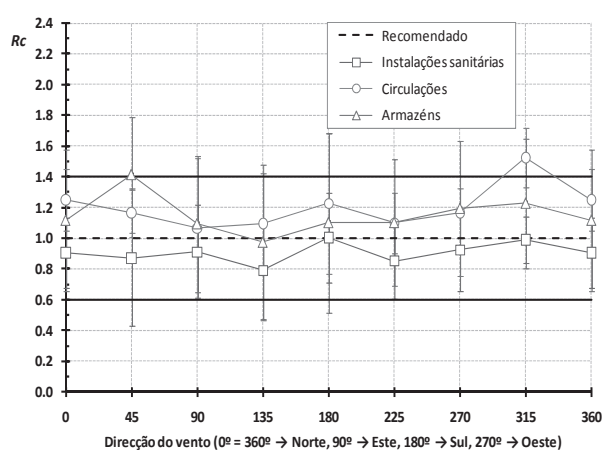


Fig. 8. Rácio entre o caudal de ar previsto e o recomendado para alguns espaços auxiliares quando  $\Delta T = -4^\circ\text{C}$  e  $V_{\text{vento}} = 2.8\text{ m/s}$ .

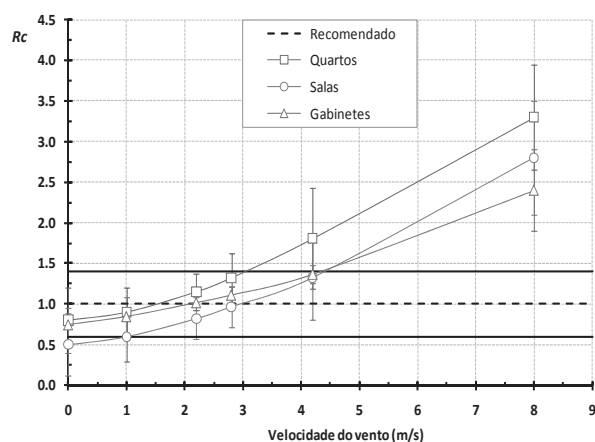


Fig. 9. Rácio entre o caudal de ar previsto e o recomendado para os espaços com requisitos de ar novo quando  $\Delta T = -4^\circ\text{C}$  e rumo do vento Noroeste ( $\beta = 315^\circ$ ).

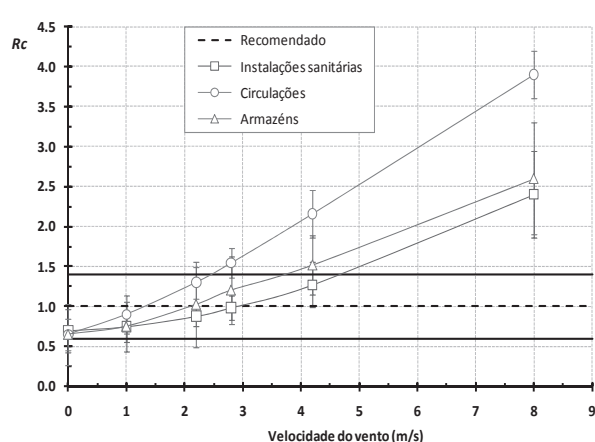


Fig. 10. Rácio entre o caudal de ar previsto e o recomendado para alguns espaços auxiliares quando  $\Delta T = -4^\circ\text{C}$  e rumo do vento Noroeste ( $\beta = 315^\circ$ ).

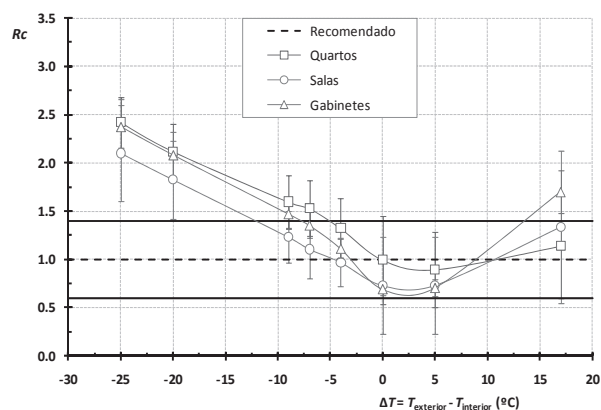


Fig. 11. Rácio entre o caudal de ar previsto e o recomendado para os espaços com requisitos de ar novo quando  $V_{\text{vento}} = 2.8\text{ m/s}$  e rumo do vento Noroeste ( $\beta = 315^\circ$ ).

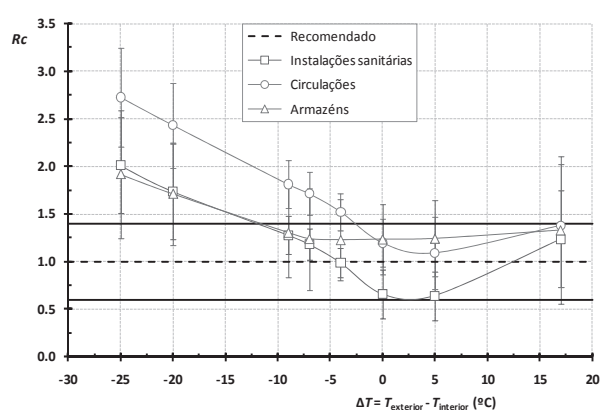


Fig. 12. Rácio entre o caudal de ar previsto e o recomendado para alguns espaços auxiliares quando  $V_{\text{vento}} = 2.8\text{ m/s}$  e rumo do vento Noroeste ( $\beta = 315^\circ$ ).

valores de  $\Delta T$  fora desta gama. Os valores obtidos do rácio de ventilação ( $R_c$ ) para os quartos, as salas e os gabinetes encontram-se representados na Fig. 11 e os para as IS, as circulações e os armazéns na Fig. 12. Observa-se uma acentuada dependência das taxas de renovação de ar dos espaços em relação à diferença de temperatura  $\Delta T$ . No entanto, para o mesmo valor em módulo de  $\Delta T$ , os caudais são maiores quando  $\Delta T$  é negativo do que quando é positivo. As menores taxas de renovação de ar verificam-se para valores de  $\Delta T$  entre 0 e +5°C. Para valores de  $\Delta T$  inferiores a -10°C (situação com grande probabilidade de ocorrer no Inverno) a ventilação dos espaços é excessiva, promovendo desconforto e/ou grandes consumos de energia para climatização. Para valores de  $\Delta T$  superiores a +5°C (situação com grande probabilidade de ocorrer no Verão) ocorre inversão do sentido do escoamento. Ou seja, o ar entra nos espaços pelos elementos de ventilação localizados a maior cota e sai pelos mais próximos do pavimento. O desvio padrão continua a sugerir que existem grandes diferenças de comportamento entre espaços do mesmo tipo.

## 5. DISCUSSÃO

O sistema de ventilação preconizado assegura que a renovação do ar dos espaços ocorre de acordo com as exigências. Ou seja, a cozinha e a sala das caldeiras funcionam em depressão (criada pelos sistemas de ventilação mecânica destes espaços). A renovação de ar da IS é executada de forma independente, não existindo praticamente qualquer troca de ar entre estes espaços e os restantes. Os quartos, as salas e os gabinetes são ventilados com ar novo vindo directamente do exterior. A renovação de ar nas circulações é efectuada com ar de transferência com origem nos quartos, salas e gabinetes.

Não é possível ventilar correctamente o edifício recorrendo a elementos de ventilação natural (grelhas, condutas e chaminés) com o mesmo valor de área efectiva, de área efectiva por pessoa ou de área efectiva por m<sup>2</sup> de pavimento, mesmo para espaços com o mesmo tipo de uso. Isto deve-se a que a renovação de ar de um espaço por ventilação natural depende da sua localização no edifício e da ventilação dos espaços com quais faz trocas de ar, que por sua vez depende da renovação de ar dos espaços com que estes últimos transferem ar (e assim sucessivamente). Ou seja, o projecto de um sistema de ventilação natural para um edifício exige a simulação simultânea da ventilação de todos os espaços que o compõem.

Da análise dos resultados obtidos para o comportamento do sistema de ventilação preconizado, considerado nesta fase como não regulável, verificou-se que a mudança de sentido de incidência do vento não altera significativamente a renovação de ar nos espaços (mesmo para um edifício com exposição ao vento das fachadas tão diverso como que acontece no que se está a analisar). Embora existam espaços que para determinados rumos do vento apresentam taxas de ventilação abaixo do valor recomendado, isso nunca acontece para o rumo do vento mais provável (Noroeste). Para os outros rumos, um espaço com poucas renovações de ar para uma direcção do vento normalmente compensa isso quando o rumo do vento muda.

Os sistemas de ventilação híbrida têm tendência para promover caudais de ar excessivos quando a velocidade do vento é elevada e/ou a temperatura do ar exterior é baixa. Ora, isto acontece com alguma frequência em Portugal, nomeadamente no Inverno. A ocorrer, levaria a situações de muito desconforto, mesmo que fossem consumidas grandes quantidades de energia para climatização. Deste modo, os componentes do sistema de ventilação responsáveis por assegurar a ventilação natural dos espaços não podem ser fixos, têm de ser auto-reguláveis ou em alternativa estarem equipados com sistemas mecânicos de limitação do caudal de ar exterior admitido no edifício. Por questões de poupança de energia, os sistemas de ventilação mecânica instalados na cozinha e na sala das caldeiras também devem estar equipados com sistemas de controlo e devem ser desligados nos períodos de não funcionamento.

O recurso a dispositivos de ventilação auto-reguláveis providencia caudais de ar relativamente constantes desde que a diferença de pressão entre as duas faces desses elementos de ventilação não ultrapasse um determinado limite [25, 26]. Afiguram-se assim como um meio prático, e relativamente barato, de controlo do caudal de ar que atravessa uma determinada abertura, com um funcionamento quase independente das condições climatológicas. No entanto, normalmente os programas de simulação (CONTAM incluído) não dispõem da possibilidade de seleccionar directamente a existência destes dispositivos. Mas isso não inibe que não se possam considerar nas simulações. Basta, para isso, defini-los do mesmo modo que as grelhas fixas e escolher uma função adequada para calcular o caudal que os atravessa. Por exemplo, Ax-



ley [26] sugere que se utilize a lei de potência, representada pela Equações (2), com um coeficiente de descarga ( $C_d$ ) entre 30 e 50 e um expoente do tipo de escoamento ( $n$ ) entre 0 e 0.2 (conforme o que melhor se adequar à curva característica do dispositivo seleccionado).

Neste momento já é consensualmente aceite que, com baixos consumos de energia, os sistemas de ventilação híbrida asseguram um nível razoável de conforto térmico dos ocupantes e uma QAI (qualidade do ar interior) igual ou mesmo superior à garantida pelos sistemas puramente mecânicos ou puramente naturais [12, 27]. Par além disto, se o sistema de ventilação híbrida for complementado com mecanismos de controlo dos sistemas de sombreamento de envidraçados, do nível de iluminação e da potência dos sistemas locais de climatização, permite a existência de uma gama de temperaturas do ar interior dentro da qual existem condições de conforto para os ocupantes [26, 28-30]. Deste modo é evidente que no futuro os sistemas com ventilação mecânica dos espaços produtores de contaminantes e com ventilação natural controlada (ou auto-controlada) nos restantes passem a ser cada vez mais utilizados.

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho utilizou-se uma ferramenta de cálculo multizona (o programa CONTAM) para demonstrar que é viável garantir a renovação de ar dos edifícios não residenciais através de sistemas de ventilação híbrida, em que existem espaços ventilados mecanicamente e outros em que existe apenas ventilação natural. Identificaram-se também um conjunto de aspectos que é necessário ter em consideração para que este tipo de sistema de ventilação tenha um funcionamento adequado às necessidades.

A preconização do sistema de ventilação deve ser efectuada através de uma simulação da ventilação que envolva todos os espaços interiores do edifício, a qual deve ser efectuada para as condições climatológicas mais prováveis para a implantação do mesmo.

Para situações em que a velocidade do vento seja elevada e/ou a temperatura exterior seja muito baixa o sistema de ventilação tem tendência a promover taxas de renovação de ar dos espaços muito acima do valor recomendável. A ser assim, nestas alturas seria necessário consumir muita energia para climatização e, mesmo assim, não se evitaria por completo o desconforto sentido pelos ocupantes. Deste modo é imprescindível que os elementos do sistema de ventilação do edifício responsáveis por assegurar a ventilação natural dos espaços (sejam eles grelhas, condutas ou chaminés) sejam auto-reguláveis ou então estejam equipados com sistemas mecânicos de controlo dos caudais de ar.

## REFERÊNCIAS

- [1] Directiva 2010/31/EU de 19 de Maio de 2010, “Directiva Europeia relativa ao desempenho energético dos edifícios”, Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia (2010)
- [2] EN 13799, “Ventilation for non-residential buildings - performance requirements for ventilation and room-conditioning systems”, European standard, CEN/TC 156 (2007)
- [3] ANSI/ASHRAE 62, “Ventilation for acceptable indoor air quality (Parts 1 & 2)”, USA national standard, ASHRAE (2010)
- [4] RSECE, “Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios”, Decreto-Lei nº 79/2006 de 4 de Abril, Diário da República, Portugal (2006)
- [5] NP-1037, “Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás”, Norma Portuguesa, Parte 1 (2002), Parte 2 (2008), Parte 3 (2002), Parte 4 (2001)
- [6] SCIE, “Regime jurídico da segurança contra incêndios em edifícios”, Decreto-Lei n.º 220/2008 de 12 de Novembro e Portaria n.º 1532/2008 de 29 de Dezembro, Diário da República, Portugal (2008)
- [7] Bourgeois, D., Potvin, A., Haghighat, F., “Hybrid ventilation of Canadian non-domestic buildings – a procedure for assessing IAQ, comfort and energy conservation”, Proceedings, RoomVent 2000 – 7<sup>th</sup> International Conference on Air Distribution in Rooms, Reading, UK, July 9–12 (2000)
- [8] Heinonen, J., Kosonen, R., “Hybrid ventilation concepts for commercial buildings”, Proceedings of Healthy Building 2000, Espoo, Helsinki, Finland, August 6–10 (2000)
- [9] Kosik, W.J., “Design strategies for hybrid ventilation”, *ASHRAE Journal*, October 18–24 (2001)



- [10] Li, Y., Heiselberg, P., “Analysis methods for natural and hybrid ventilation – a critical literature review and recent developments”, *International Journal of Ventilation, Special edition Hybrid Ventilation*, **1**(4), 3–20 (2003)
- [11] Ferreira, P.V.M., “Sistemas de ventilação híbridos em edifícios – análise energética resultante da implementação de sistemas de ventilação inovativos”, Dissertação de mestrado, FEUP, Portugal (2006)
- [12] Emmerich, S., “Simulated performance of natural and hybrid ventilation systems in an office building”, *HVAC&R Research*, **12**(4), 975–1004 (2006)
- [13] Villi, G., de Carli, M., Ballestini, G., “Application of the hybrid ventilation concepts to a real building: a hospice sited in the North East region of Italy”, Proceedings, Indoor Air 2008 – 11<sup>th</sup> International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Paper 251 N, Copenhagen, Denmark, August 17–22 (2008)
- [14] Ji, Y., Lomas, K., Cook, M., “Hybrid ventilation for low energy building design in south China”, *Building and Environment*, **44**, 2245–2255 (2009).
- [15] Programa CONTAM – versão 3.0 de Janeiro de 2011, NIST multizone modeling free software (2011), <http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/index.htm>
- [16] Emmerich, S., “Validation of multizone IAQ modeling of residential-scale buildings – a review”, *ASHRAE Transactions*, **107**(2), 619–628 (2001)
- [17] Haghighat, F., Megri, A., “A comprehensive validation of two airflow models – COMIS and CONTAM”, *Indoor Air*, **6**(4), 278–288 (1996).
- [18] Emmerich, S., Nabinger, S., Gupta, A., Howard-Reed, C., Wallace, L., “Comparison of measured and predicted tracer gas concentrations in a townhouse”, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 7035, USA (2003)
- [19] Dutton, S., Shao, L., Riffat, S., “Validation and parametric analysis of Energyplus – air flow network model using CONTAM”, Proceedings, SimBuild 2008 – Third National Conference of IBPSA-USA, Berkeley, California, July 30 – August 1 (2008)
- [20] IM, Normais climatológicas de Coimbra, Instituto de Meteorologia de Portugal (2001), <http://www.meteo.pt/pt/oclima/clima.normais/>
- [21] Casimiro Mendes, J. *et al.*, “O Clima de Portugal”, Fascículo XLIX, Volumes 1 a 6 – normais climatológicas, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, Lisboa (1990)
- [22] Walton, G.N., “Airflow Network Models for Element-Based Building Airflow Modeling”, *ASHRAE Transactions*, **95**(2), 611–620 (1989)
- [23] Walton, G.N., Dols, W.S., “CONTAM 3.0 user guide and program documentation”, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 7251, USA (2010)
- [24] Liu, D.L., Nazaroff, W.W., “Particle Penetration Through Building Cracks”, *Aerosol Science and Technology*, **37**, 565–573 (2003)
- [25] Cavannal, G. *et al.*, “Experimental development of a natural controlled ventilation device”, Proceedings, Indoor Air 99 – 8<sup>th</sup> International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Edinburgh, Scotland, August 8–13 (1999)
- [26] Axley, J., Emmerich, S., Walton, G.N., “Modeling the performance of a naturally ventilated commercial building with a multizone coupled thermal/airflow simulation tool”, *ASHRAE Transactions*, **108**(2), 1–16 (2002)
- [27] Frank, T., Güttinger, H., van Velsen, S., “Thermal comfort measurements in a hybrid ventilated office room”, Proceedings, Clima 2007 – WellBeing Indoors, Helsinki, Finland, June 10–14 (2007)
- [28] de Dear, R.J., Brager, G.S., “Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference”, *ASHRAE Transactions*, **104**(1), 27–49 (1998)
- [29] Olesen, B.W., “Guidelines for comfort”, *ASHRAE Journal*, August, 41–46 (2000)
- [30] ISO 7730, “Ergonomics of the thermal environment – analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria”, International Standards Organisation, Geneva (2005)

## **HYBRID VENTILATION AS A STRATEGY FOR AIR RENEWING OF NON-RESIDENTIAL BUILDINGS WITH PERMANENT OCCUPATION**

**Abstract** – The main objective of this work is the evaluation of the capabilities of hybrid ventilation in air renewal of non-residential buildings with continuum occupation. For this purpose a common dwelling for elderly people was chosen. The simulation of the air fluxes was made by a multizone methodology, using the CONTAM program. The origin and the amount of the incoming air flux into each room is analyzed and compared with the requisites of the Portuguese standards. The first step is the selection of the rooms to be equipped with mechanical systems and those in which the air renewal is made by natural ventilation. Then, the recommended fluxes for air to be supplied and extracted are obtained. The optimization of grill localization and its effective area is done for the most probable local climacteric conditions. The next step is the evaluation of the capabilities of the ventilation system designed for the building air renewal accounting for all possible weather possibilities. The results obtained clearly demonstrate that hybrid ventilation is the recommended system for air renewal of non-residential buildings, but only if the elements responsible for natural ventilation were self-regulated or equipped with appropriate air flow control systems.

**Keywords** – Hybrid ventilation, Low energy ventilation, Design of ventilation systems, Numerical simulation of ventilation systems.