

Artigo de Revisão

Revision Article

João FP Gomes¹

Métodos expeditos de estimativa da concentração de poluentes gasosos no interior de edifícios

Simple methods for estimating the concentration of toxic pollutants inside buildings

Recebido para publicação/received for publication: 06.05.03

Aceite para publicação/accepted for publication: 06.06.14

Resumo

Neste trabalho apresentam-se métodos, de fácil aplicação, que permitem determinar, de forma expedita, as concentrações, no interior de edifícios, de substâncias tóxicas devidas a emissões extemporâneas. Apresentam-se, igualmente, exemplos de aplicação que permitem responder ainda a problemas típicos que se colocam relativamente à ventilação de edifícios, como seja a quantificação das taxas de renovação necessárias para fazer a exaustão de gases tóxicos acumulados no interior dos edifícios, ou como proceder para evitar a contaminação de gases vindos do exterior.

Rev Port Pneumol 2006; XII (4): 447-453

Palavras-chave: Ar interior, ventilação, renovação de ar.

Abstract

This paper presents simple methods for determining the concentration of toxic substances inside buildings, due to immediate release. Some case studies are also presented, showing that these methods could go towards solving typical problems involved in building ventilation, such as the quantification of the number of air renovations necessary to exhaust toxic gases from inside buildings or to avoid the contamination by toxic gases coming from outside.

Rev Port Pneumol 2006; XII (4): 447-453

Key-words: Indoor air quality, ventilation, air renovation.

¹ Eng. Químico, Doutor Eng.ª Química, Consultor do *Center for Indoor Air Research* (Linthicum, CO, EUA), Professor Coordenador Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, R. Conselheiro Emídio Navarro, 1 1949-014 Lisboa, Portugal
CEBQ – Centro de Engenharia Biológica e Química, Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior Técnico, Torre Sul, Av. Rovisco Pais, 1 1049-001 Lisboa, Portugal

Introdução: situação do problema

Conhecidos que são os efeitos de determinados compostos voláteis sobre a saúde humana¹, e para poder actuar no sentido de uma protecção eficaz dos indivíduos expostos, há que conhecer, com um razoável grau de rigor, as concentrações dessas mesmas substâncias no ar ambiente interior.

Só deste modo é que será possível fazer a comparação entre as concentrações existentes e as concentrações máximas admissíveis, o que é conhecido como avaliação da conformidade¹, tendo em conta o actual estado da arte da toxicologia, o que consta, geralmente, de documentos normativos, legislação aplicável ou recomendações emitidas por entidades de reconhecida competência.

A título de exemplo, refira-se, no panorama nacional, a existência de uma norma portuguesa, a NP 1796², que define a concentração máxima admissível para substâncias tóxicas existentes no ar dos locais de trabalho. Para o caso do ar ambiente no interior dos edifícios, a legislação nacional passou a incluir, recentemente, através do Decreto-Lei N.º 78/2006, de 4 de Abril³, concentrações máximas admissíveis para algumas substâncias tóxicas (físicas, químicas e biológicas).

Naturalmente que, como sempre acontece em problemas desta natureza, e para poder efectuar avaliações de conformidade, haverá, à partida, pelo menos dois modos possíveis de obter concentrações de poluentes nas atmosferas interiores: proceder à quantificação das concentrações das substâncias tóxicas por medição directa *in situ*, ou, em alternativa, proceder à estimativa dessas mesmas concentrações por métodos de cálculo, mais ou menos aproximados.

Se bem que ambas as metodologias possuam determinadas limitações, prefere-se, geralmente, recorrer às medições directas, desde que a sua representatividade possa ser assegurada, para poder efectuar as análises de conformidade¹.

Contudo, há determinadas situações, como seja avaliações na fase de projecto, ou durante a fase de construção, em que não é, de todo, possível efectuar medições directas, à semelhança da metodologia de avaliação de impacto ambiental nas fases de pré-projecto⁴. Assim, para estas últimas situações, é absolutamente fundamental dispor de técnicas de estimativa adequadas, capazes de conduzir a valores fiáveis para as concentrações expectáveis.

Este trabalho visa, assim, apresentar uma metodologia de cálculo das concentrações de substâncias voláteis em atmosferas interiores, respondendo, então, aos dois problemas mais frequentes que ocorrem nesta situação:

- a) Estimar concentrações de substâncias no ar ambiente interior devidas a emissões súbitas no interior dos edifícios;
- b) Estimar as concentrações de substâncias no ar ambiente interior devidas a contaminações provenientes do exterior.

Métodos de estimativa de concentrações de poluentes

Estimativa das concentrações de substâncias tóxicas no ar ambiente interior devidas a emissões súbitas no interior dos edifícios

A estimativa do caudal de emissão pode fazer-se com base na Equação 1, que se apresenta em seguida, que foi desenvolvida para estimar as libertações de líquidos voláteis a

A NP 1796 (...) define a concentração máxima admissível para substâncias tóxicas existentes no ar dos locais de trabalho

partir de tanques de armazenagem⁵, mas que pode ser utilizada nesta situação:

Equação 1.

$$q = [8,24 \times 10^{-8} M^{0,835} P (1/29 + 1/M)^{0,25} U^{0,5} A] / (T^{0,05} L^{0,5} Pt^{0,5}),$$

em que:

A = área da superfície de exposição, a partir da qual se faz a emissão (cm²)

L = espessura da superfície (cm), podendo tomar-se \sqrt{A}

M = peso molecular da substância emitida (g/g-mole)

P = pressão de vapor da substância emitida (mm Hg)

Pt = pressão atmosférica no local (atm)

q = caudal de emissão (g/s)

T = temperatura do ar (K)

U = velocidade do ar (ft/min), pode tomar-se 100 ft/min (com T=298K e Pt= 1 atm)

Uma vez estimado o caudal de emissão a partir da Equação 1, a concentração daí resultante, na zona respiratória, pode ser obtida através da Equação 2, conforme sugerido pela EPA americana⁶:

Equação 2.

$$C = 1,7 \times 10^5 T q / M Vt K,$$

em que:

C = concentração no ar interior (ppm)

K = factor de mistura, entre o ar e a substância tóxica, que, geralmente, varia entre 0,1 e 0,5

Vt = caudal de ventilação (ft³/min), que, geralmente, varia entre 500 e 3500 ft³/min

Se for mais conveniente obter essa concentração em mg/Nm³ em vez de ppm, pode efectuar-se a respectiva conversão através da Equação 3, para T=25° C e P=1 atm:

Equação 3.

$$C \text{ (mg/m}^3\text{)} = C \text{ (ppm)} M / 24,45$$

Estimativa das concentrações de substâncias tóxicas no ar ambiente interior devidas a contaminações provenientes do exterior

Caso se verifique uma libertação súbita de substâncias tóxicas no exterior do edifício, a concentração de gases nas imediações deste irá ficar elevada, o que poderá resultar num aumento da concentração dessas mesmas substâncias no interior do edifício, devido a entrada através do sistema de captação de ar exterior⁷.

Nestas condições o acréscimo da concentração será dado, simplesmente, pela Equação 4:

Equação 4.

$$C_i(t) = C_i(0) + C_i(t).$$

Como esta equação tem carácter exponencial, a sua forma integrada resulta na Equação 5:

Equação 5.

$$C_i(t) = C_0 [1 - \exp(-r t)],$$

em que:

C_i(t) = concentração, no interior, no tempo t, após a emissão (ppm)

$C_i(0)$ = concentração residual, no interior, antes da emissão (ppm)

$C_i(t)$ = incremento na concentração no tempo t , após a emissão (ppm)

r = taxa de renovação de ar (r/h), em geral: 4 a 12 r/h em escritórios

C_0 = concentração no exterior resultando de uma emissão (ppm)

b) *Outros dados do problema:*

Estes são apenas os dados do problema:

$$A = 2 \text{ m}^2 = 20\,000 \text{ cm}^2$$

$$L = \sqrt{A} = 141,4 \text{ cm}$$

$$P_t = 1 \text{ atm}$$

$$T = 15^\circ \text{ C} = 288 \text{ K}$$

$$U = 100 \text{ ft/min}$$

Resultados

Apresentam-se, de seguida, dois exemplos de aplicação que ilustram os métodos anteriormente enunciados, que evidenciam os resultados que se podem obter.

Caso 1

No interior de um edifício, limpam-se, com benzeno, 2 ecrãs metálicos a 15° C . Cada ecrã tem uma área de 2 m^2 . Se o caudal de ventilação for de $2000 \text{ ft}^3/\text{min}$ e o factor de mistura de 0,4, estimar a concentração interior na zona respiratória, no interior do edifício.

a) *Propriedades físico-químicas do benzeno:*

Os dados termodinâmicos requeridos, que neste caso são a tensão de vapor do benzeno em função da temperatura, podem obter-se, por exemplo, a partir da referência⁸.

$$P = 60 \text{ mm Hg a } 15^\circ \text{ C}$$

Naturalmente que o peso molecular da substância pode ser calculado a partir da sua composição molecular (C_6H_6) utilizando os pesos atômicos que constam da tabela periódica dos elementos⁸.

$$M = 6 \times 12 + 6 \times 1 = 78 \text{ g/g-mol}$$

O cálculo do caudal de emissão no interior faz-se, agora, recorrendo à Equação 1:

$$q = 8,24 \times 10^{-8} \times 78^{0,835} \times 60 \times (1/29 + 1/78)^{0,25} \times 100^{0,5} \times 20\,000 / (288^{0,05} \times 141,4^{0,5} \times 1^{0,5})$$

$$q = 8,24 \times 10^{-8} \times 38,01 \times 60 \times 0,466 \times 10 \times 20\,000 / (1,33 \times 11,9 \times 1)$$

$$q = 1,106 \text{ g/s para cada ecrã,}$$

ou seja, para um total de 2 ecrãs:

$$q = 2 \times 1,106 = 2,21 \text{ g/s.}$$

A concentração de benzeno, na zona respiratória, pode agora ser calculada através da Equação 2:

$$C = 1,7 \times 10^5 \times 288 \times 2,21 / (78 \times 2000 \times 0,4) = 1734 \text{ ppm}$$

ou, usando a Equação 3:

$$C = 1734 \times 78 / 24,45 = 5532 \text{ mg/m}^3.$$

Obtido este resultado, pode fazer-se a avaliação de conformidade recorrendo, por exemplo, à NP 1796. Desta norma consta para o benzeno uma concentração máxima admissível (TLV = *Threshold Limit Value*) de 30 mg/Nm^3 .

Note-se que este resultado permite, ainda, responder a uma importante questão: conhecida a contaminação, como actuar para resolver o problema? Naturalmente que a resposta mais óbvia é proceder à diluição da substância tóxica, com ar fresco, o que significa que há que aumentar o caudal de renovação de ar.

A comparação entre o valor obtido de concentração e o valor-limite permite responder, agora quantitativamente, à questão, calculando o número de renovações de ar (r) necessário para se conseguir a diluição do gás, através de:

$$r = 5532 / 30 = 184,4 = 185 \text{ renovações de ar.}$$

Se se pretender calcular o caudal de renovação de ar a insuflar para o interior do edifício, expresso por exemplo em m^3/h , bastará multiplicar o número de renovações r , assim obtido pela cubicagem, ou seja, pelas dimensões da sala do edifício, expressa em m^3 .

Caso 2

Se a concentração de SO_2 no exterior de um edifício, devido a uma libertação súbita, for de 100 ppm, quais os incrementos de concentração deste gás, no ar interior, depois de 20, 40 e 60 minutos? Considere-se uma taxa de renovação de 6 r/h.

Qual a concentração global após 60 minutos? E se as taxas de renovação forem, respectivamente, de 4 r/h e de 12 r/h?

A primeira questão resolve-se, pela aplicação directa da Equação 5, para os diversos incrementos de tempo considerados:

$$C_i(20 \text{ min}) = 100 \times [1 - \exp(-6 \times 20/60)] = 86 \text{ ppm}$$

$$C_i(40 \text{ min}) = 100 \times [1 - \exp(-6 \times 40/60)] = 98 \text{ ppm}$$

$$C_i(60 \text{ min}) = 100 \times [1 - \exp(-6 \times 60/60)] = 99,8 \text{ ppm}$$

Agora, a concentração global (acumulada) ao fim de 60 minutos obtém-se através da Equação 4, considerando $C_i(60 \text{ min}) = 100 \times [1 - \exp(-6 \times 60/60)] = 99,8 \text{ ppm}$

$$C_i(60 \text{ min}) = C_i(0 \text{ min}) + C_i(60 \text{ min}) = 0 + 99,8 = 99,8 \text{ ppm}$$

Para obter os mesmos valores de incrementos a outras taxas de renovação, basta resolver, novamente, a Equação 5 com esses novos valores.

Se: $r = 4 \text{ r/h}$:

$$C_i(20 \text{ min}) = 100 \times [1 - \exp(-4 \times 20/60)] = 73 \text{ ppm}$$

$$C_i(40 \text{ min}) = 100 \times [1 - \exp(-4 \times 40/60)] = 91 \text{ ppm}$$

$$C_i(60 \text{ min}) = 100 \times [1 - \exp(-4 \times 60/60)] = 98 \text{ ppm}$$

E, se: $r = 12 \text{ r/h}$:

$$C_i(20 \text{ min}) = 100 \times [1 - \exp(-12 \times 20/60)] = 98 \text{ ppm}$$

$$C_i(40 \text{ min}) = 100 \times [1 - \exp(-12 \times 40/60)] = 99,9 \text{ ppm}$$

$$C_i(60 \text{ min}) = 100 \times [1 - \exp(-12 \times 60/60)] = 99,99 \text{ ppm}$$

O que permite avaliar, quantitativamente, que quanto maior a taxa de entrada de ar fresco (neste caso contaminado), mais rápida será a contaminação global no interior do edifício. A Fig. 1 permite fazer a visualização deste fenómeno.

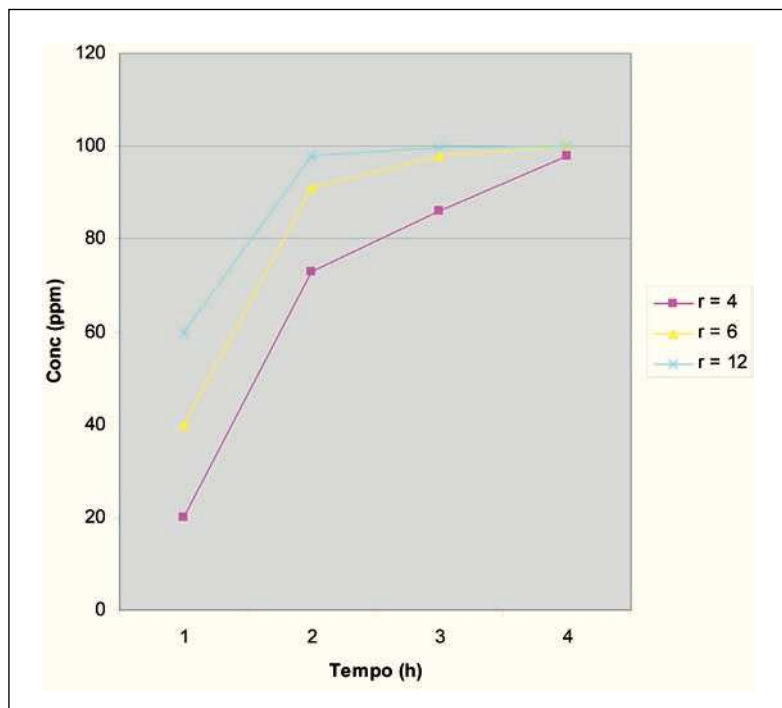


Fig. 1 – Exemplo de aplicação do caso 2: Evolução das concentrações de SO₂ no interior de um edifício a partir de contaminação exterior, em função de diversas taxas de renovação

Como anteriormente, também isto permite enunciar uma solução, que seria, por exemplo, baixar a taxa de renovação até se obterem concentrações inferiores aos valores limite admissíveis.

Discussão

O método apresentado para efectuar a estimativa das concentrações de substâncias tóxicas no ar ambiente interior devidas a emissões súbitas no interior dos edifícios tem uma limitação óbvia que é a de, em rigor, só ser aplicável a substâncias voláteis puras. Contudo, para situações em que sejam utilizadas substâncias não puras, mas misturas de composição conhecida, poderá utilizar-se, do mes-

mo modo, a Equação 1, mas introduzindo as propriedades físico-químicas da mistura calculadas, em vez das propriedades das substâncias puras. Isto implica tomar propriedades médias⁹ para a mistura relativamente ao peso molecular (M) e à pressão de vapor (P). O peso molecular médio, M', será dado, simplesmente, por:

Equação 6.

$$M' = \sum x_i M_i$$

sendo:

M_i = peso molecular de cada substância pura i
x_i = fracção molar de cada substância i

e a pressão de vapor média, P', para a mistura, vem dada por:

Equação 7.

$$P' = \sum x_i P_i$$

em que:

P_i = pressão de vapor de cada substância pura.

Assim, no caso da utilização de misturas, bastará introduzir os valores calculados de M' e P' na Equação 1, em vez dos valores anteriormente referidos de M e P.

Para efectuar a avaliação de conformidade, pode recorrer-se, do mesmo modo, à estimativa de valores-limite de concentração médios para a mistura, através do método referido em², em que se considera que o valor-limite de exposição é excedido quando a soma dos quocientes da concentração de

cada componente da mistura pelo respectivo limite de exposição não excede a unidade, ou seja:

$$\Sigma (C_i / VLE_i) = C_1/VLE_1 + C_2/VLE_2 + \dots + C_n/VLE_n > 1$$

Conclusões

Os métodos apresentados baseiam-se em equações simples, de fácil aplicação, e que permitem determinar, de forma expedita, as concentrações, no interior de edifícios, de substâncias tóxicas devidas a emissões extemporâneas. Como se viu nos exemplos de aplicação apresentados, permitem responder ainda a problemas típicos que se colocam relativamente à ventilação de edifícios, como seja a quantificação das taxas de renovação necessárias para fazer a exaustão de gases tóxicos acumulados no interior dos edifícios, ou como proceder para evitar a contaminação de gases vindos do exterior.

Bibliografia

1. Gomes JFP. Poluição atmosférica: um manual universitário, Ed. Publindústria, Porto, 2001.
2. NP 1796 – Higiene e Segurança no Trabalho. Valores limite de exposição para substâncias nocivas nos locais de trabalho, IPQ, 1988.
3. Decreto-Lei N.º 78/2006, Diário da República, Iª Série – A, 2411-2415, 2006.
4. Gomes JFP. Meio Ambiente e Impacte Ambiental. Ed. IAPMEI, Coleção: O gestor: Área da Produção, Vol. 7, Lisboa, 1994.
5. Kumar A. Estimate emissions from atmospheric releases of hazardous substances. Environmental Engineering World 1996: Nov-Dec, 20-23.
6. USEPA. Cleaner technologies substitute assessment: a methodology resource guide. Ed. EPA 1996: 744-R-95-002.
7. Kumar A, Hoiem K. Estimate onsite concentration of hazardous substances, Chemical Engineering 1997: 167-170.
8. Perry RH, Green DW. Chemical Engineers' Handbook. Mc Graw Hill, New York, 1999.
9. Gomes JFP. Program calculates critical properties. Hydrocarbon Processing 1988: Sep, 110-112.