

EXAME

SEMESTRE 2

Data: 11 de Junho, 9:00 horas

MIEEA

Sistemas Energéticos em Edifícios

(Duração máxima permitida: 120 + 30 minutos)

ATENÇÃO: Leia com atenção o enunciado e procure responder às questões justificando as opções tomadas. Sempre que necessário utilize os seguintes valores para:

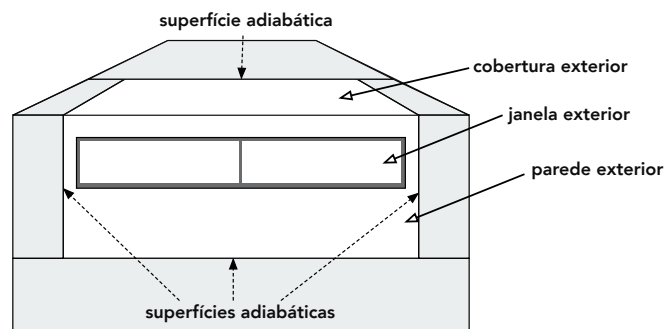
Propriedades do ar $\rho \simeq 1.2 \text{ kg/m}^3$; $c \simeq 1 \text{ kJ/(kg.K)}$

Calor latente de vaporização da água $h_{fg} \simeq 2500 \text{ kJ/Kg}_a$

EXERCÍCIO

Considerar uma sala de aulas posicionada no último piso de um edifício em Lisboa com as seguintes dimensões: largura 10 m, profundidade 7 m e altura 3 m. Todas as superfícies são adiabáticas à exceção da fachada orientada a sudoeste (SW) e da cobertura exterior. A janela tem as seguintes dimensões largura 8.5 m e altura 1.2 m. O caixilho representa 5% da área total. As restantes propriedades da envolvente encontram-se na tabela:

	U [W/(m ² K)]	absortividade solar/factor solar
Cobertura exterior	0.80	$\alpha = 0.4$
Parede exterior	0.60	$\alpha = 0.4$
Janela exterior com cortinas	3.80	$\bar{g} = 0.4$



Considerar que a sala tem uma capacidade total de 25 pessoas com uma actividade sedentária (1.2 met) e com vestuário de Verão (0.5 clo). O sistema de iluminação dissipa uma potência de 8 W/m^2 . A carga térmica devido à ocupação é 80 W/pessoa (calor sensível) + 50 W/pessoa (calor latente).

CONTINUA

As condições exteriores de projecto para o Verão em Lisboa são:

Temperatura de bolbo seco do ar (DB)	32.2°C
Temperatura média coincidente do ar húmido (MCWB)	19.3°C
Irradiância máxima global na fachada SW	641 W/m ²
Irradiância máxima global na horizontal	946 W/m ²

1. Sabe-se que a concentração de CO₂ no exterior é de 400 ppm e que cada pessoa produz cerca de 20 litros por hora de dióxido de carbono (CO₂).

(a) Em condições de regime permanente, calcular o **caudal de ar novo total** a fornecer ao espaço para que a concentração máxima de CO₂ no interior não exceda 1200 ppm.

Em condições de regime permanente, o caudal de ar novo calcula-se por:

$$\dot{V} = \frac{P}{C_i - C_o}$$

com P a taxa de produção de poluente que, neste caso, equivale ao CO₂ produzido pelos ocupantes. Assim:

$$\dot{V} = \frac{20 \times 10^{-3} \times 25}{(1200 - 400) \times 10^{-6}} = 625 \text{ m}^3/\text{h}$$

Este caudal equivale a 0.1736 m³/s.

(b) Após um tempo elevado de desocupação da sala de aulas, qual seria a **concentração de CO₂ no interior**, para as condições de caudal de ar novo calculadas em (a), após 90 minutos de aula?

Em condições de regime não permanente, a concentração de CO₂ no interior varia com tempo com a seguinte função:

$$C_i(t) = C_e + \frac{P}{\dot{V}} \left[1 - \exp\left(-\frac{\dot{V}}{V}t\right) \right]$$

com o volume da sala calculado por $V = 10 \times 7 \times 3 = 210 \text{ m}^3$ e $t = 1.5 \text{ h}$, pelo que

$$C_i = 400 \times 10^{-6} + \frac{20 \times 10^{-3} \times 25}{625} \left[1 - \exp\left(-\frac{625}{210} \times 1.5\right) \right] = 1191 \times 10^{-6}$$

A concentração de CO₂ no interior depois de 1.5 h é 1191 ppm.

2. Considerando o gráfico da temperatura operativa em função da actividade e do vestuário:

- (a) indicar qual o **intervalo de temperatura** em que se podem esperar condições de conforto térmico;

Para actividade de 1.2 met e vestuário de 0.5 clo, através da leitura do gráfico, a temperatura operativa é

$$T_{op} \simeq 24.5 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$$

pelo que o intervalo em que se podem esperar condições de conforto térmico é 23 a 26°C.

- (b) discutir que **temperatura de projeto para o ar interior** deverá adoptar, considerando que a temperatura das superfícies interiores é, em média, mais elevada do que o ar em cerca de 2°C e que a velocidade do ar é 1 m/s.

A temperatura operativa relaciona-se com a temperatura do ar (T_a) e das superfícies interiores (T_r) por

$$T_{op} = aT_a + (1 - a)T_r$$

com a calculado por

$$a = 0.5 + 0.25v_a = 0.5 + 0.25 \times 1 = 0.75$$

Sabemos que $T_r = T_a + 2$, pelo que:

$$T_{op} = 0.75T_a + 0.25(T_a + 2) = 24.5$$

$$0.75T_a + 0.25T_a + 0.5 = 24.5$$

$$T_a = 24.5 - 0.5 = 24^{\circ}\text{C}$$

A temperatura do ar interior a adoptar deverá ser 24°C.

3. Em condições de regime permanente, para a sala de aula, considerando todos os dados do enunciado e a temperatura de projecto para o ar interior definida em 2(b), calcular a **carga de calor sensível no espaço**, considerando que **não** existe entrada directa de ar exterior.

Em condições de regime permanente $\frac{dT_i}{dt} = 0$ pelo que, em condições de verão ($T_o > T_i$)

$$q_{cool,s} + q_{int} + q_{sol} + q_{vent} + \sum_n A_n U_n (T_o - T_i) = 0$$

A carga de calor sensível no espaço sem entrada directa de ar exterior ($q_{vent} = 0$), calcula-se por:

$$q_{cool,s} = -q_{int} - q_{sol} - \sum_n A_n U_n (T_o - T_i)$$

Os três termos desta equação correspondem aos ganhos internos, ganhos solares e ganhos por transmissão através da envolvente. Esses são assim calculados separadamente.

Ganhos internos

Para a ocupação, consideram-se apenas os ganhos de calor sensível:

$$q_{int,oc} = 80 \times 25 = 2000 \text{ W}$$

Para a iluminação:

$$q_{int,il} = 8 \times 70 = 560 \text{ W}$$

pelo que

$$q_{int} = 2000 + 560 = 2560 \text{ W}$$

Ganhos solares

Para os ganhos solares através das janelas, a área efectiva de captação solar é

$$A_{sol,jan} = \bar{g} F_g A_{jan} = 0.4 \times 0.95 \times 8.5 \times 1.2 = 3.876 \text{ m}^2$$

Para os ganhos solares através da parede e da cobertura, a área efectiva de captação solar é

$$A_{sol,par} = \alpha R''_{se} U_{par} A_{par} = 0.4 \times 0.04 \times 0.6(10 \times 3 - 8.5 \times 1.2) = 0.19 \text{ m}^2$$

$$A_{sol,cob} = \alpha R''_{se} U_{cob} A_{cob} = 0.4 \times 0.04 \times 0.8t \times 10 = 0.896 \text{ m}^2$$

Os ganhos solares são calculados por:

$$q_{sol} = G_{sol,SW}(A_{sol,jan} + A_{sol,par}) + G_{sol,H} A_{sol,cob} = 641(3.876 + 0.19) + 946 \times 0.896 = 3454 \text{ W}$$

Ganhos por transmissão

Para os ganhos de calor por transmissão adoptou-se uma temperatura do ar interior de projecto $T_i = 24^\circ\text{C}$.

$$\sum_n A_n U_n (T_o - T_i) = (A_{jan} U_{jan} + A_{par} U_{par} + A_{cob} U_{cob})(T_o - T_i)$$

$$\sum_n A_n U_n (T_o - T_i) = (8.5 \times 1.2 \times 3.8 + (10 \times 3 - 8.5 \times 1.2)0.6 + 7 \times 10 \times 0.8)(32.2 - 24)$$

$$\sum_n A_n U_n (T_o - T_i) = 106.64(32.2 - 24) = 874 \text{ W}$$

Por fim

$$q_{cool,s} = -2560 - 3454 - 874 = -6888 \text{ W}$$

A carga de calor sensível de arrefecimento, o que justifica o sinal negativo, é aproximadamente 6.9 kW.

4. Para o processo de arrefecimento e desumidificação do ar da sala em estudo, definido no esquema, calcular:

- (a) o **caudal de ar a ser fornecido** ao espaço (\dot{m}_{a2}), considerando que o ar entra no espaço a 15°C ;

O caudal de ar a fornecer ao espaço deve ser o suficiente para extrair a carga de calor sensível calculada, ou seja, 6.9 kW, e manter as condições do ar interior de projecto ($T_i = 24^\circ\text{C}$) com a ar a ser fornecido ao espaço a $T_s = 15^\circ\text{C}$.

$$q_{cool,s} = \dot{m}_{a2} c_p (T_i - T_s)$$

$$\dot{m}_{a2} = \frac{q_{cool,s}}{c_p (T_i - T_s)} = \frac{6888}{1000 \times (24 - 15)} = 0.765 \text{ kg/s}$$

- (b) a **fracção de ar recirculado** relativamente ao caudal de ar total ($\dot{m}_{a4}/\dot{m}_{a1}$);

Tem-se que $\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = 0.765 \text{ kg/s}$.

O caudal de ar novo (\dot{m}_{a0}) é calculado a partir do valor encontrado em 1, ou seja:

$$\dot{m}_{a0} = \frac{\dot{V}}{\nu_0}$$

O volume específico é encontrado a partir da carta psicrométrica para os valores de temperatura indicados, $T_{db} = 32.2^\circ\text{C}$ e $T_{wb} = 19.3^\circ\text{C}$:

$$\nu_0 \simeq 0.88 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\dot{m}_{a0} = \frac{0.1736}{0.88} = 0.197 \simeq 0.2 \text{ kg/s}$$

Na unidade de mistura tem-se

$$\dot{m}_{a0} + \dot{m}_{a4} = \dot{m}_{a1}$$

Pelo que

$$\dot{m}_{a4} = \dot{m}_{a1} - \dot{m}_{a0} = 0.765 - 0.197 = 0.568 \text{ kg/s}$$

A fracção de ar recirculado é então

$$\frac{\dot{m}_{a4}}{\dot{m}_{a1}} = \frac{0.568}{0.765} = 0.74$$

- (c) a **potência de arrefecimento total** da unidade de arrefecimento e desumidificação, considerando que o teor de vapor de água no interior do espaço não deverá exceder 10 g/kg_a ;

Para conhecer a potência de arrefecimento de calor sensível é necessário conhecer a temperatura do ar à saída da unidade de mistura, ou seja, no ponto 1.

Na unidade de mistura sabe-se que

$$\dot{m}_{a0}h_0 + \dot{m}_{a4}h_4 = \dot{m}_{a1}h_1$$

$$\dot{m}_{a0}W_0 + \dot{m}_{a4}W_4 = \dot{m}_{a1}W_1$$

Para tal é necessário conhecer as propriedades do ar exterior à entrada. Através da carta psicrométrica sabe-se que:

$$h_0 = 54.782 \text{ kJ/kg}_a$$

$$W_0 = 8.750 \text{ g/kg}_a$$

O ar recirculado encontra-se a $T_{db,4} = 24^\circ\text{C}$ e $W_4 = 10 \text{ g/kg}_a$ pelo que

$$h_4 = 49.584 \text{ kJ/kg}_a$$

Assim:

$$h_1 = \frac{\dot{m}_{a0}h_0 + \dot{m}_{a4}h_4}{\dot{m}_{a1}} = 50.924 \text{ kJ/kg}_a$$

$$W_1 = \frac{\dot{m}_{a0}W_0 + \dot{m}_{a4}W_4}{\dot{m}_{a1}} = 9.678 \text{ g/kg}_a$$

Para estas condições

$$T_{db,1} = 26.11^\circ\text{C}$$

A potência da unidade de arrefecimento, na parte de calor sensível, calcula-se por:

$$q_{arr,s} = \dot{m}_{a1}c_p(26.11 - 15) = 8503 \text{ W}$$

Para desumidificar o ar às condições requeridas na sala (10 g/kg_a) é necessário calcular quais as condições à entrada, uma vez que existe produção de vapor de água a uma taxa de 50 W de calor latente por pessoa.

Essa corresponderá a

$$\dot{m}_w = \frac{q_{cool,l}}{h_{fg}} = \frac{50 \times 25}{2500000} = 0.0005 \text{ kg/s} = 0.5 \text{ g/s}$$

Assim, caso não houvesse desumidificação do ar $W_2 = W_1$

$$W_3 = W_2 + \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_{a2}} = 9.678 + \frac{0.5}{0.765} = 10.331 \text{ g/kg}_a$$

O que excede em 0.331 g/kg_a o limite de teor de vapor de água imposto para a sala. A desumidificação na unidade de arrefecimento deverá diminuir a temperatura até atingir o ponto de orvalho que é para as condições em (1) $T_{dew,1} = 13.49^\circ\text{C}$.

A potência de desumidificação equivalerá a

$$q_{arr,l} = \dot{m}_{a1}(W_i - W_{max})h_{fg} = 0.765 \times (0.010331 - 0.01)2500000 = 633 \text{ W}$$

A potência de arrefecimento corrigida equivalerá a

$$q_{arr,s} = \dot{m}_{a1}c_p(26.11 - 13.49) = 9659 \text{ W}$$

Pelo que a potência total será dada por

$$q_{arr,t} = 633 + 9659 = 10292 \approx 10.3 \text{ kW}$$

Neste caso poderá haver necessidade de reaquecimento do ar.

- (d) Com base nos resultados obtidos, concluir quanto à necessidade de arrefecer e/ou desumidificar o espaço.

Os resultados indicam que, nas condições de utilização da sala e para as condições de projeto, é fundamental arrefecer a sala. A potência de desumidificação não é muito elevada nestas condições exteriores com $\phi_0 \simeq 30\%$.

Um método alternativo de arrefecimento, sem recurso a desumidificação do ar, é um aumento do caudal de ar novo para garantir a diluição do vapor de água produzido pelos ocupantes.

Nesse caso a nova condição seria:

$$\dot{m}_{a0} = \frac{\dot{m}_w}{W_{max} - W_0} = \frac{0.0005}{0.01 - 0.00875} = 0.4 \text{ kg/s}$$

pelo que

$$\dot{m}_{a4} = 0.765 - 0.4 = 0.365 \text{ kg/s}$$

As condições em (1) com a nova mistura são

$$h_1 = \frac{\dot{m}_{a0}h_0 + \dot{m}_{a4}h_4}{\dot{m}_{a1}} = 52.3 \text{ kJ/kg}_a$$

$$W_1 = \frac{\dot{m}_{a0}W_0 + \dot{m}_{a4}W_4}{\dot{m}_{a1}} = 9.347 \text{ g/kg}_a$$

Para estas condições

$$T_{db,1} = 28.281^\circ\text{C}$$

A potência da unidade de arrefecimento total, sem necessidade de desumidificação, calcula-se por:

$$q_{arr,s} = \dot{m}_{a1}c_p(28.281 - 15) = 10165 \text{ W}$$

no que resulta em 10.2 kW, o que não difere significativamente do valor indicado anteriormente.

5. No diagrama psicrométrico indicar/desenhar:

- as condições do ar exterior (ponto 0);
- as condições do ar após a unidade de mistura (ponto 1);
- as condições do ar fornecido ao espaço (ponto 2);
- as condições do ar interior (ponto 3);
- o processo de arrefecimento e desumidificação do ar (transição de 1 para 2).

Resolução anexa em pdf.