

Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 20

Aula 20 Dimensionamento da Chaminé-Prática



Dimensionamento de Chaminé



Prof. Doutor Engº Jorge Nhambiu ♦ Sistemas Energéticos

3



Problema 20.1



Determine a altura da chaminé para um combustível líquido com a seguinte composição, dada em massa seca, que se queima num forno: Carbono 40%, Hidrogénio 15%, Nitrogénio 7%, Oxigénio 26%, Enxofre 7%, Cinzas 5%, Humidade 7% e com o excesso de ar de 10%.

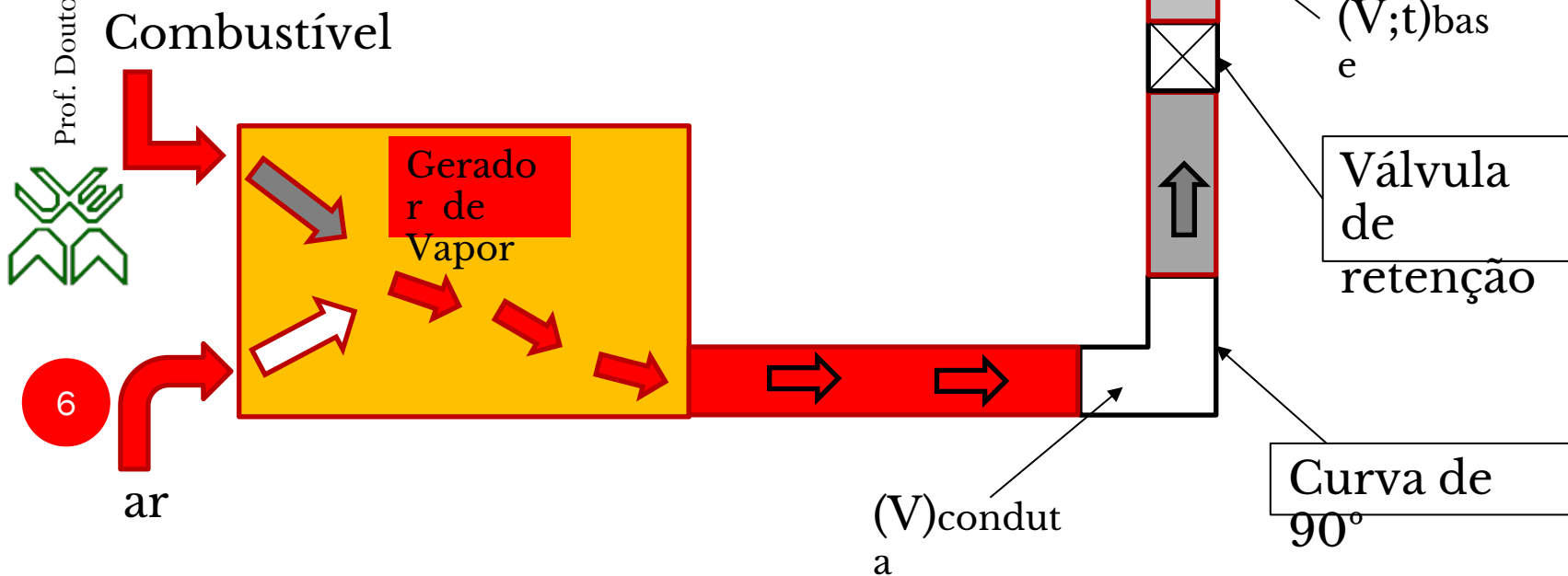
A conduta que leva os gases à chaminé tem uma curva de 90° de raio longo e uma válvula de retenção, para não permitir o retorno dos gases ao forno. As perdas de pressão ao longo da conduta, sem tomar em conta as localizadas são de 162,2 Pa.

O consumo de combustível é de 3,47 kg/s e são os seguintes os dados restantes:

Problema 20.1 (Continuação)

Velocidade dos gases na conduta	7 m/s
Velocidade dos gases na boca da chaminé	4 m/s
Temperatura na base da chaminé	400 °C
Densidade do gás	1,30 Kg/m ³
Densidade do ar	1,29 Kg/m ³
Pressão dos gases	$1,05 \cdot 10^5$ Pa
Perdas de temperatura com a altura ΔT	1,15 °C/m
Coeficiente de viscosidade cinemática	0,00007 m ² /s
Rugosidade relativa	0,01
Coeficiente de resistência da chaminé	1,06
Temperatura do ar ambiente	30 °C
Aceleração gravitacional	9,81 m/s ²





Problema 20.1 – Resolução

1. A massa de trabalho do combustível calcula-se de:

$$C^t = C^d \frac{100 - W^t}{100} = 37,2\%$$

$$H^t = H^d \frac{100 - W^t}{100} = 13,95\%$$

$$N^t = N^d \frac{100 - W^t}{100} = 6,51\%$$

$$O^t = O^d \frac{100 - W^t}{100} = 24,18\%$$



$$S^t = S^d \frac{100 - W^t}{100} = 6,51\%$$

$$A^t = A^d \frac{100 - W^t}{100} = 4,65\%$$

7

$$W^t = 7,0\%$$

Problema 20.1 – Resolução

2. Cálculo do volume teórico de ar.

$$V_{ar}^0 = 0,0889(C^t + 0,375 \cdot S^t) + 0,269 \cdot H^t - 0,0336 \cdot O^t = 6,416 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

3. O volume teórico dos Gases Biatómicos calcula-se de:

$$V_{RN_2}^0 = 0,79 \cdot V_{ar}^0 + 0,008 \cdot N^t = 5,12 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

4. O volume teórico de água obtém-se de:


$$V_{H_2O}^0 = 0,1116 \cdot H^t + 0,0124 \cdot W^t + 0,0161 \cdot V_{ar}^0 = 1,747 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

5. Volume dos Gases Triatómicos:


$$V_{RO_2} = 1,867 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t) / 100 = 0,74 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

Problema 20.1 – Resolução

6. O volume real dos Gases Biatómicos calcula-se de:

$$V_{R_2} = V^{\circ}_{N_2} + (\alpha - 1) \cdot 0,79 \cdot V^{\circ}_{ar} = 5,627 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

7. O volume real de água obtém-se de:

$$V_{H_2O} = V^{\circ}_{H_2O} + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^{\circ}_{ar} = 1,757 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

8. O volume dos Gases Triatómicos calcula-se de:

$$V_{RO_2} = 1,867 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t) / 100 = 0,74 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$



9. O volume do Oxigénio Excedente obtém-se de:

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^{\circ}_{ar} = 0,135 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

Problema 20.1 – Resolução

10. O volume dos Gases de Combustão calcula-se de:

$$V_{gNor} = V_{R0_2Nor} + V_{RONor} + V_{H_2ONor} + V_{0_2Nor} = 8,259 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

11. O fluxo volumétrico dos gases que passam pela chaminé calcula-se de:

$$\dot{V}_g^{ch} = \dot{B}_c \left[V_{gNor}^o + (\alpha_{ch} - 1) V_{ar} \right] \frac{t_{gB}^{ch} + 273}{273} \cdot \frac{1,01 \cdot 10^5}{P_B} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

ou

$$\dot{V}_g^{ch} = \dot{B}_c \cdot V_{gNor} \cdot \frac{t_{gB}^{ch} + 273}{273} \cdot \frac{1,01 \cdot 10^5}{P_B} = 70,65 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$



Problema 20.1 – Resolução

12. O diâmetro da saída da chaminé é dado por:

$$d_{boca} = 1,13 \sqrt{\dot{V}_g^{ch} / c_{g_{boca}}} = 4,739 \text{ [m]}$$

13. O diâmetro da base da chaminé é dado por:

$$d_{base} = 1,5 \cdot d_{boca} = 7,109 \text{ [m]}$$

14. O diâmetro médio da chaminé é dado por:

$$d_{médio} = \frac{d_{base} + d_{boca}}{2} = 5,924 \text{ [m]}$$



15. A velocidade na base da chaminé é dada por:

$$c_{g_{base}} = \frac{c_{g_{boca}} \cdot d_{boca}^2}{d_{base}^2} = 1,778 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Problema 20.1 – Resolução

16. A velocidade média dos gases na chaminé é dada por:

$$c_{medio} = 0,5 \cdot (c_{boca} + c_{base}) = 2,889 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

17. As perdas locais calculam-se de:

Na curva $\Delta P_l = \xi_l \frac{c_{cond}^2}{2} \rho = 12,74 \text{ [Pa]}$

Na válvula $\Delta P_l = \xi_l \frac{c_{cond}^2}{2} \rho = 79,625 \text{ [Pa]}$

18. As perdas totais calculam-se de:

$$\Delta P = \Delta P_{at} + \sum \Delta P_l = 254,565 \text{ [Pa]}$$

12

19. As perdas são multiplicadas por um coeficiente de segurança :

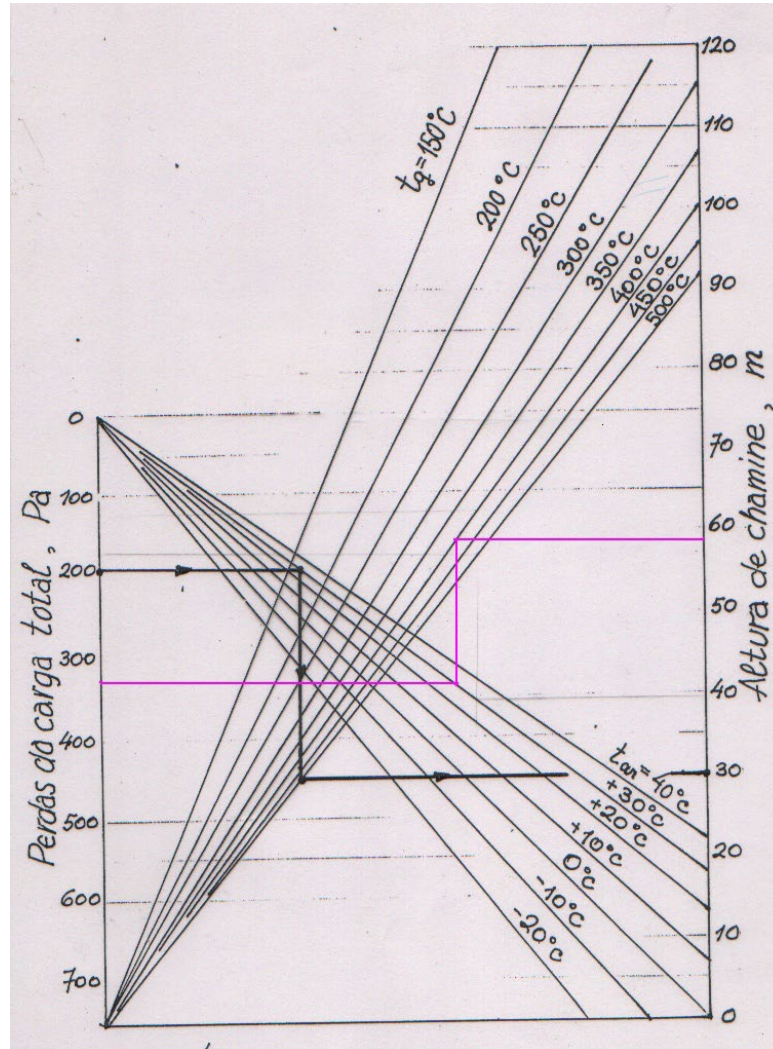
$$\Delta P = (1,2 - 1,3) \sum \Delta P = 330,93 \text{ [Pa]}$$





Problema 20.1 – Resolução

20. Do ábaco retira-se a altura aproximada da chaminé que é de aproximadamente 58 m.



Problema 20.1 – Resolução

21. A temperatura dos gases a saída da chaminé determina-se de:

$$t_{boca} = t_{base} - \Delta t \cdot H = 333,30 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

22. A temperatura média dos gases na chaminé determina-se de:

$$t_{média} = \frac{t_{base} + t_{boca}}{2} = 366,65 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

23. Calcula-se o número de Reynolds de:

$$\text{Re} = \frac{c_{média} \cdot d_{medio_{eq}}}{\nu} = \frac{\rho \cdot c_{média} \cdot d_{medio_{eq}}}{\mu}$$

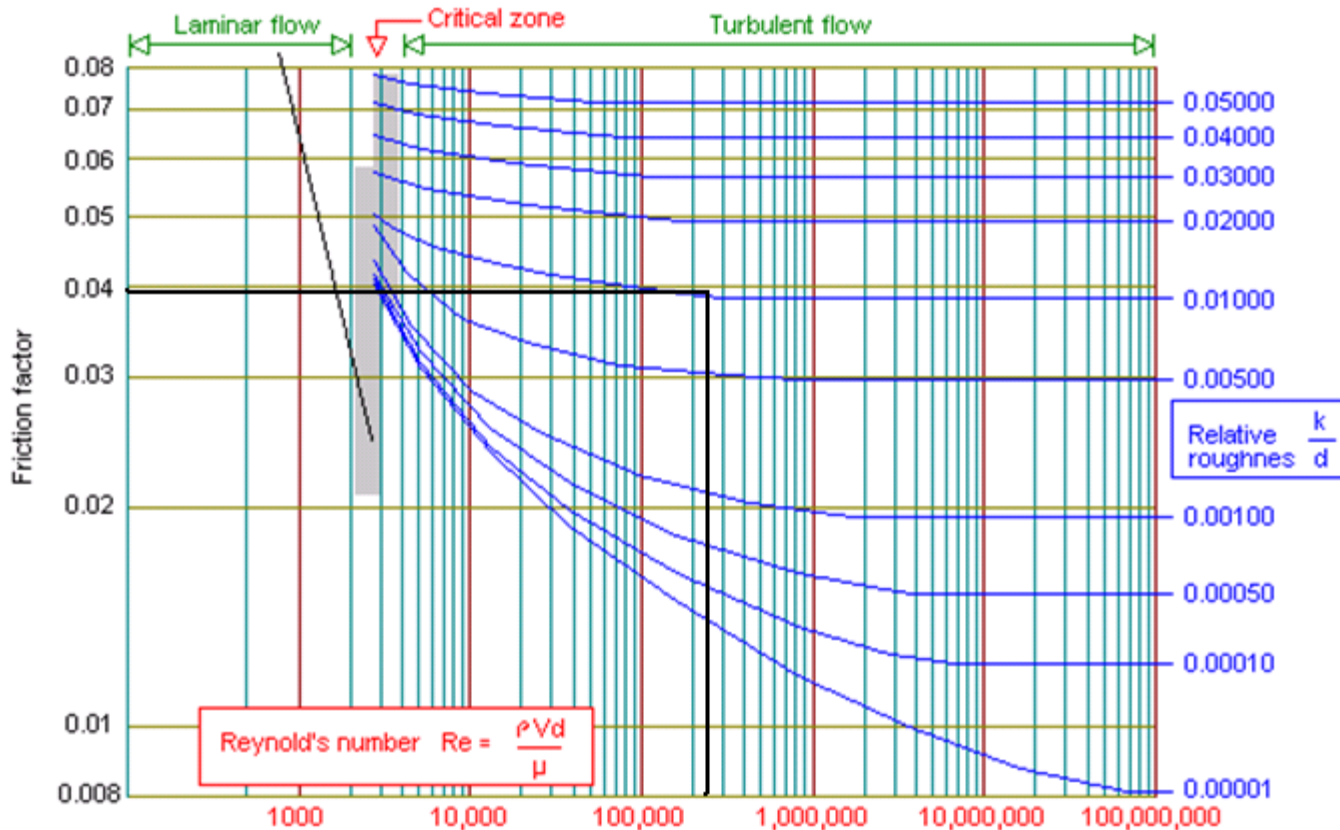
$$\text{Re} = \frac{1,3 \cdot 2,889 \cdot 5,924}{0,00007} = 455000$$





Problema 20.1 – Resolução

24. Pelo diagrama de Moody obtém-se o factor de fricção λ



O factor de fricção λ aproximadamente igual a 0,039

Problema 20.1 – Resolução

25. A altura da chaminé calcula-se da fórmula empírica:

$$H = \frac{\Delta P + \zeta \frac{c_{boca}^2}{2} \rho_{gás} (1 + \beta \cdot t_{boca})}{g \left(\frac{\rho_{ar}}{1 + \beta \cdot t_{ar}} - \frac{\rho_{gás}}{1 + \beta \cdot \bar{t}_g} \right) - \frac{\lambda}{3d_{médio}} \frac{c_{médio}^2}{2} \rho_{gás} (1 + \beta \cdot \bar{t}_g)}$$

$$H = \frac{330,93 + 1,06 \frac{4^2}{2} 1,3 (1 + 0,0037 \cdot 333,30)}{g \left(\frac{1,29}{1 + 0,0037 \cdot 30} - \frac{1,30}{1 + 0,0037 \cdot 366,65} \right) - \frac{0,039}{3 \cdot 5,924} \frac{2,889^2}{2} 1,3 \cdot (1 + 0,0037 \cdot 366,65)}$$

$$= \mathbf{60,213 \text{ [m]}}$$



26. Verificação do erro relativo entre a altura lida no ábaco e a calculada.

$$erro = \frac{|60,213 - 58|}{60,213} = 3,7 \%$$

16

Sendo o erro inferior a 10% aceita-se o valor calculado. Caso contrário, aproxima-se o valor lido no ábaco e repetem-se os cálculo a partir do Ponto 21.

Problema 20.2



Determinar a altura da chaminé para um gerador de vapor flamotubular compacta que fornece vapor saturado, funcionando com combustível gasoso .
Com os seguintes dados:

Capacidade de trabalho 4500 kg/h

Pressão de trabalho (pressão manométrica) 18 MPa

Temperatura do ar pré-aquecido 200 °C

Temperatura do ar ambiente 30 °C

Tipo de combustível GPL

Coeficiente de excesso de ar $\alpha=1,10$

A conduta que leva os gases à chaminé tem uma curva de 90° de raio longo e uma válvula de retenção, para não permitir o retorno dos gases ao forno. As perdas de pressão ao longo da conduta, sem tomar em conta as localizadas são de 162,2 Pa.

A composição do combustível em percentual de massa seca é a seguinte:

Problema 20.2

Hidrogénio $H_2=6$

Monóxido De Carbono $CO=4$

Acido Sulfúrico $H_2S=3$

Metano $CH_4=65$

Etano $C_2H_6=1$

Propano $C_3H_8=2$

Etileno $C_2H_4=3$

Butano $C_4H_{10}=1$

Pentano $C_5H_{12}=2$

Propileno $C_3H_6=3$

Ciclobutano $C_4H_8=3$

Dióxido De Carbono $CO_2=4$

Nitrogénio $N_2=3$

Oxigénio $O_2=0$

Cinzas $A=0$

Humidade $W=0$



Problema 20.2 (Continuação)

Velocidade dos gases na conduta	7 m/s
Velocidade dos gases na boca da chaminé	4 m/s
Temperatura na base da chaminé	420 °C
Densidade do gás	1,30 Kg/m ³
Densidade do ar	1,29 Kg/m ³
Pressão dos gases	$1,15 \cdot 10^5$ Pa
Perdas de temperatura com a altura ΔT	1,15 °C/m
Coeficiente de viscosidade cinemática	0,00007 m ² /s
Rugosidade relativa	0,01
Coeficiente de resistência da chaminé	1,06
Temperatura do ar ambiente	30 °C
Aceleração da gravidade	9,81 m/s ²



Problema 20.2 – (Resolução I)

1. Volume Teórico De Ar

$$V_{ar}^o = 0,0476 \left[0,5.CO + 0,5.H_2 + 1,5.H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) . C_m H_n - O_2 \right] \left[\frac{m^3 N}{m^3_{comb}} \right]$$

$$V_{ar}^o = 10,282 \left[\frac{m^3 N}{m^3_{comb}} \right]$$

2. Volume Real De Ar

$$V_{ar} = \alpha V_{ar}^o \left[\frac{m^3 N}{m^3_{comb}} \right]$$

$$V_{ar} = 11,310 \left[\frac{m^3 N}{m^3_{comb}} \right]$$



Problema 20.2 – (Resolução II)

• 3. Volume Teórico Dos Gases Biatômicos

$$V_{RO}^o = 0,79 \cdot V_{ar}^o + 0,01 \cdot N^t \left[\frac{m^3 N}{m_{comb}^3} \right]$$

$$V_{RO}^o = 8,152 \left[\frac{m^3 N}{m_{comb}^3} \right]$$

• 4. Volume Real Dos Gases Biatômicos

$$V_{RO} = 0,79 \cdot V_{RO}^o + (\alpha - 1) \cdot 0,79 \cdot V_{ar}^o \left[\frac{m^3 N}{m_{comb}^3} \right]$$

$$V_{RO} = 8,965 \left[\frac{m^3 N}{m_{comb}^3} \right]$$

• 5. Volume Teórico Dos Gases Triatômicos

$$V_{RO2}^o = 0,01 \left[CO_2 + CO + H_2S + \sum m(C_m H_n) \right] \left[\frac{m^3 N}{m_{comb}^3} \right]$$

$$V_{RO2}^o = 1,250 \left[\frac{m^3 N}{m_{comb}^3} \right]$$



Problema 20.2 – (Resolução III)

- 6. Volume Teórico Do Vapor De Agua

$$V_{H_2O}^o = 0,01 \cdot \left\{ H_2S + H_2 + \sum \left[\left(\frac{n}{2} \right) C_m H_n \right] + 0,012 \cdot W^t \right\} + 0,0161 \cdot V_{ar}^o \left[\frac{m^3 N}{m_{comb}^3} \right]$$

$$V_{H_2O}^o = 2,106 \left[\frac{m^3 N}{m_{comb}^3} \right]$$

- 7. Volume Real Do Vapor De Água

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^o + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{ar}^o \left[\frac{m^3 N}{m_{comb}^3} \right]$$

$$V_{H_2O} = 2,122 \left[\frac{m^3 N}{m_{comb}^3} \right]$$

- 8. Volume Do Oxigénio Excedente

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{ar}^o \left[\frac{m^3 N}{m_{comb}^3} \right]$$

$$V_{O_2} = 0,216 \left[\frac{m^3 N}{m_{comb}^3} \right]$$



Problema 20.2 – (Resolução IV)

- 9. Volume Total Dos Gases De Escape

$$V_g = V_{RO} + V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{O_2}$$

$$V_g = 12,553 \left[\frac{m^3 N}{m^3_{comb}} \right]$$

- 10. Fracção Volúmica Dos Gases Triatómicos

$$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_g}$$

$$r_{RO_2} = 0,100$$

- 11. Fracção Volúmica Dos Gases Biatómicos

$$r_{R_2} = \frac{V_{R_2}}{V_g}$$

$$r_{R_2} = 0,714$$



Problema 20.2 – (Resolução V)

- 12. Fracção Volúmica Da Água

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_g}$$

$$r_{H_2O} = 0,169$$

- 13. Fracção Volúmica Do Oxigénio Excedente

$$r_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_g}$$

$$r_{O_2} = 0,017$$

- 14. Soma Das Fracções

$$\sum r = r_{R_2} + r_{RO_2} + r_{H_2O} + r_{O_2}$$

$$\sum r = 1$$



q_2 - Perdas de calor com as cinzas

As perdas de calor com as cinzas calculam-se da seguinte relação:

$$q_2 = P_{cv} + P_{cf} \quad [\%]$$

P_{cv} – são as perdas associadas ao combustível nas cinzas volantes;

$$P_{cv} = \frac{A \cdot F_{cv} \cdot C_{cv} \cdot 33820 \cdot 100}{(1 - C_{cv}) \cdot Q_i}$$

$$P_{cv} = 0$$

P_{cf} – são as perdas associadas ao combustível nas cinzas de fundo.

$$P_{cf} = \frac{A \cdot F_{cf} \cdot C_{cf} \cdot 33820 \cdot 100}{(1 - C_{cf}) \cdot Q_i}$$

$$P_{cf} = 0$$

$$q_2 = P_{cv} + P_{cf} = 0 \quad [\%]$$



q₂ - Perdas de calor com as cinzas

- P_{cf} – são as perdas associadas ao combustível nas cinzas de fundo.

$$P_{cf} = \frac{A \cdot F_{cf} \cdot C_{cf} \cdot 33820 \cdot 100}{(1 - C_{cf}) \cdot Q_i}$$

Em que:

P_{cf} - são as perdas associadas ao combustível nas cinzas de fundo (%);

A – é a fracção em peso de inertes no combustível (com base na sua composição às condições de queima);

F_{cf} – é a fracção em peso das cinzas volantes em relação ao total de inertes do combustível;

C_{cf} – é a fracção em peso do combustível nas cinzas volantes;

Q_i – é o Poder Calorífico Inferior do combustível nas condições de queima (kJ/kg).

$$q_2 = P_{cv} + P_{cf} = 0 \quad [\%]$$



q_3 - Perdas com gases de efluentes (de escape)

$$q_3 = P_{gc} + P_{H_2O} \quad [\%]$$

$$P_{gc} = \frac{k_1 \cdot (T_g - T_a) \cdot [1 - (P_{cv} + P_{cf})/100]}{CO_2}$$

$$P_{gc} = \frac{k_1 \cdot (T_g - T_a) \cdot [1 - (0 + 0)/100]}{CO_2}$$

$$P_{gc} = \frac{k_1 \cdot (T_g - T_a)}{CO_2}$$

Combustível	Valor de k_1
Carvão betuminoso	0,66
Gasóleo	0,51
“Thick”, “Thin” e “burner” oleos	0,54
GPL (Propano)	0,45
Gás Natural	0,395

$$k_1 = 0,45$$



q_3 - Perdas com gases de efluentes (de escape)

$$\text{CO}_2 = \left(1 - \frac{\text{O}_2}{21}\right) \times \text{CO}_2 \text{t}$$

Combustível	% de CO ₂ t nos gases secos
Bagaçó	20,3
Madeira	19,9
“Thick”, “thin” e “burner” óleos	15,8
Gasóleo	15,5
GPL (Propano)	13,8
Gás Natural	12,1



q_3 - Perdas com gases de efluentes (de escape)

$$CO_2 = \left(1 - \frac{0,017 \cdot 100}{21}\right) \times 13,8 = 12,67$$

$$P_{gc} = \frac{k_1 \cdot (T_g - T_a)}{CO_2}$$

$$P_{gc} = \frac{0,45 \cdot (257,11 - 30)}{12,67} = 8,066 [\%]$$

- P_{H_2O} - perdas associadas à entalpia do vapor de água nos gases de combustão (%)

$$P_{H_2O} = \frac{(m_{H_2O} + 9H) \cdot [210 - 4,2 \cdot T_a + 2,1 \cdot T_g]}{Q_i}$$

$$P_{H_2O} = \frac{(0 + 9 \cdot 6) \cdot [210 - 4,2 \cdot 30 + 2,1 \cdot 257,11]}{40494,20} = 0,851$$

$$q_3 = P_{gc} + P_{H_2O} \quad [\%]$$

$$q_3 = 8,066 + 0,851 = 8,917 \quad [\%]$$



q₅- Perdas de calor associadas à combustão incompleta química

As perdas relacionadas com o Monóxido de Carbono, de princípio devem-se anular, por quase sempre se tratar de uma combustão com excesso de ar. No entanto, se for estabelecida a percentagem deste gás na chaminé, as perdas correspondentes determinam-se da seguinte expressão:

$$P_{CO} = \frac{k_2 \cdot CO \cdot [1 - 0,01 \cdot (P_{cv} + P_{cf})]}{CO + CO_2}$$

$$P_{CO} = 0 \%$$



q_6 - Perdas de calor ao meio ambiente

- - Para caldeiras industriais flamotubulares compactas = 1,5 a 2,5%
- - Para caldeiras industriais aquatubulares = 2 a 3%
- - Para caldeiras de centrais térmicas = 0,4 a 1%.

Atendendo o facto de a caldeira ser flamotubular e os valores variarem de 1,5 a 2,5% toma-se o valor intermédio de 2%.

Deste modo $q_6 = 2 \%$



q_7 - Perdas associadas às purgas (I)

As perdas associadas as purgas são somente aplicáveis às caldeiras de vapor

$$q_7 = \frac{(T_p - T_{H_2O}) \cdot p \cdot (100 - EP)}{(T_p - T_{H_2O}) \cdot p + (100 - p) \cdot (660 - T_{H_2O})} \quad [\%]$$

$$q_7 = 0 \%$$

15. O rendimento térmico da caldeira calcula-se de:

$$\eta_v = 100 \frac{Q_1}{Q_{disp}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7)$$

$$\eta_v = 100 - (0 + 8,917 + 2 + 0 + 2 + 0) = 87,082 [\%]$$



q_7 - Perdas associadas às purgas (II)

- 16. O consumo de combustível obtêm-se de:

$$\dot{B} = \frac{G_o (I_v - I_{aa})}{\eta_v \cdot Q_{disp}}$$

$$\dot{B} = \frac{4500(2794,8 - 884,6)}{0,871 \cdot 42677,885} = 231,290 \text{ m}^3/h \approx 0,064 \text{ m}^3 / s$$



Problema 20.2 – (Resolução VI)

17. O fluxo volumétrico dos gases que passam pela chaminé calcula-se de:

$$\dot{V}_g^{ch} = \dot{B}_c \left[V_g^o + (\alpha_{ch} - 1) V_{ar} \right] \frac{t_{g1}^{ch} + 273}{273} \cdot \frac{1,01 \cdot 10^5}{P_B} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$\dot{V}_g^{ch} = 0,028 \left[11,508 + (1,1 - 1) 10,282 \right] \frac{420 + 273}{273} \cdot \frac{1,01 \cdot 10^5}{1,15 \cdot 10^5} = 0,78 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$



18. O diâmetro da saída da chaminé é dado por:

$$d_{boca} = 1,13 \sqrt{\dot{V}_g^{ch} / c_{g_{boca}}} \quad [\text{m}]$$

$$d_{boca} = 1,13 \sqrt{0,78 / 4} = 0,5 \quad [\text{m}]$$

Problema 20.2 – (Resolução VII)

19. O diâmetro da base da chaminé é dado por:

$$d_{base} = 1,5 \cdot d_{boca} \quad [\text{m}]$$

$$d_{base} = 1,5 \cdot 0,5 = 0,749 \quad [\text{m}]$$

20. O diâmetro médio da chaminé é dado por:

$$d_{médio} = \frac{d_{base} + d_{boca}}{2} \quad [\text{m}]$$

$$d_{médio} = \frac{1,134 + 0,756}{2} = 0,625 \quad [\text{m}]$$



Problema 20.2 – (Resolução VIII)

21. A velocidade na base da chaminé é dada por:

$$c_{g_{base}} = \frac{c_{g_{boca}} \cdot d_{boca}^2}{d_{base}^2} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$c_{g_{base}} = \frac{4 \cdot 0,5^2}{0,749^2} = 1,778 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

22. A velocidade média dos gases na chaminé é dada por:

$$c_{medio} = 0,5 \cdot (c_{boca} + c_{base}) \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$c_{medio} = 0,5 \cdot (4 + 1,778) = 2,889 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$





Problema 20.2 – (Resolução IX)

Tabela 19.3 Factor de perdas de carga localizadas

Nº	Peça	ζ_l
1	Ampliação gradual	0,30
2	Controlador de vazão	2,50
3	Cotovelo de 90° (raio curto)	0,90
4	Cotovelo de 45° (raio curto)	0,40
5	Crivo	0,75
6	Curva de 90° (raio longo)	0,40
7	Curva de 45° (raio longo)	0,20
8	Curva de 22,5° (raio longo)	0,10
9	Entrada normal em canalização	0,50
10	Entrada de borda	1,00
11	Existência de pequena derivação	0,03
12	Junção	0,40

Nº	Peça	ζ_l
13	Medidor de venturi	2,50**
14	Redução gradual	0,15*
15	Contador de ângulo aberto	5,00
16	Contador de gaveta, aberto	0,20
17	Contador de globo, aberto	10,00
18	Saída de canalização	1,00
19	T, passagem directa	0,60
20	T, saída de lado	1,30
21	T, saída bilateral	1,80
22	Válvula de pé	1,75
23	Válvula de retenção	2,50

* Com base na velocidade maior (secção menor)

** Relativamente a velocidade na canalização

Problema 20.2 – (Resolução X)

23. As perdas locais calculam-se de:

Na curva

$$\Delta P_{l1} = \xi_1 \frac{c_{cond}^2}{2} \rho \quad [Pa]$$

$$\Delta P_{l1} = 0,4 \frac{7^2}{2} 1,3 = 12,74 \quad [Pa]$$



$$\Delta P_{l2} = \xi_2 \frac{c_{cond}^2}{2} \rho \quad [Pa]$$

Na válvula

$$\Delta P_{l2} = 2,5 \frac{7^2}{2} 1,3 = 79,625 \quad [Pa]$$

Problema 20.2 – (Resolução XI)

24. As perdas totais calculam-se de:

$$\Delta P = \Delta P_{at} + \sum \Delta P_l \quad [Pa]$$

$$\Delta P = 162,2 + 92,365 = 254,565 \quad [Pa]$$

25. As perdas são multiplicadas por um coeficiente de segurança :

$$\Delta P = (1,2 - 1,3) \sum \Delta P \quad [Pa]$$

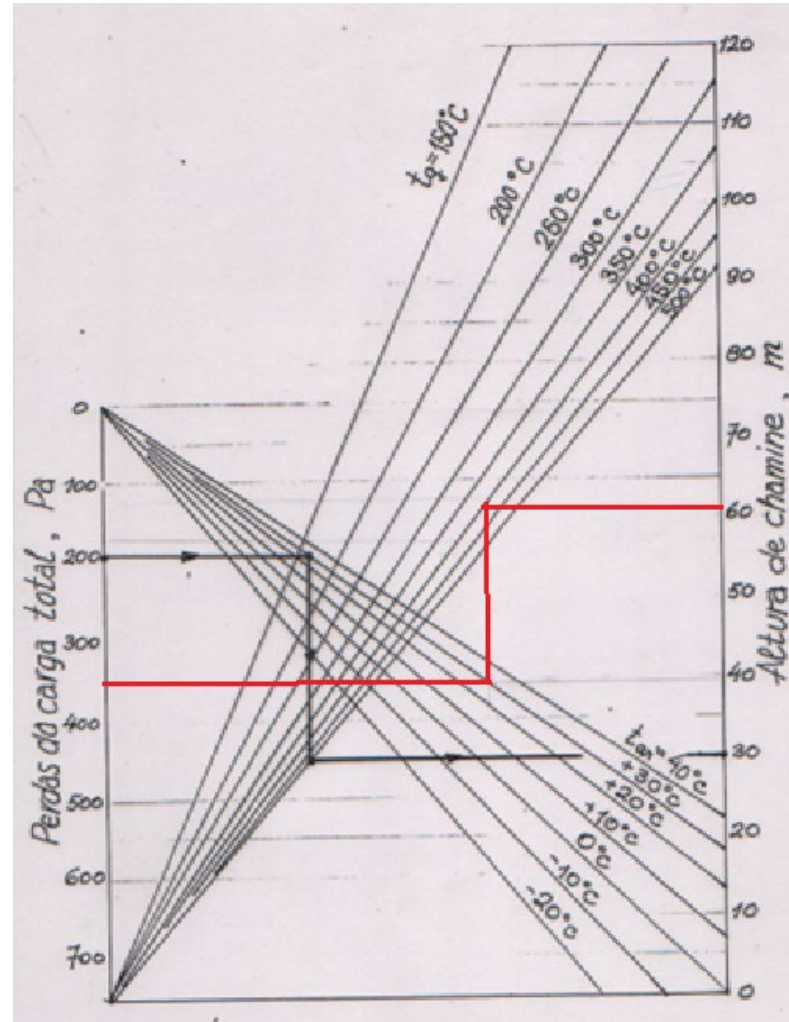
$$\Delta P = 1,3 \cdot 254,565 = 330,935 \quad [Pa]$$





Problema 20.2 – (Resolução XII)

26. Do ábaco retira-se a altura aproximada da chaminé de aproximadamente 62 m.



Problema 20.2 – (Resolução XIII)

27. A temperatura dos gases a saída da chaminé determina-se de:

$$t_{boca} = t_{base} - \Delta t \cdot H \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$t_{boca} = 420 - 1,15 \cdot 62 = 348,70 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

28. A temperatura média dos gases na chaminé determina-se de:

$$t_{média} = \frac{t_{base} + t_{boca}}{2} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$t_{média} = \frac{420 + 348,7}{2} = 384,35 \quad [^{\circ}\text{C}]$$



Problema 20.2 – (Resolução XIV)

29. Calcula-se o número de Reynolds de:

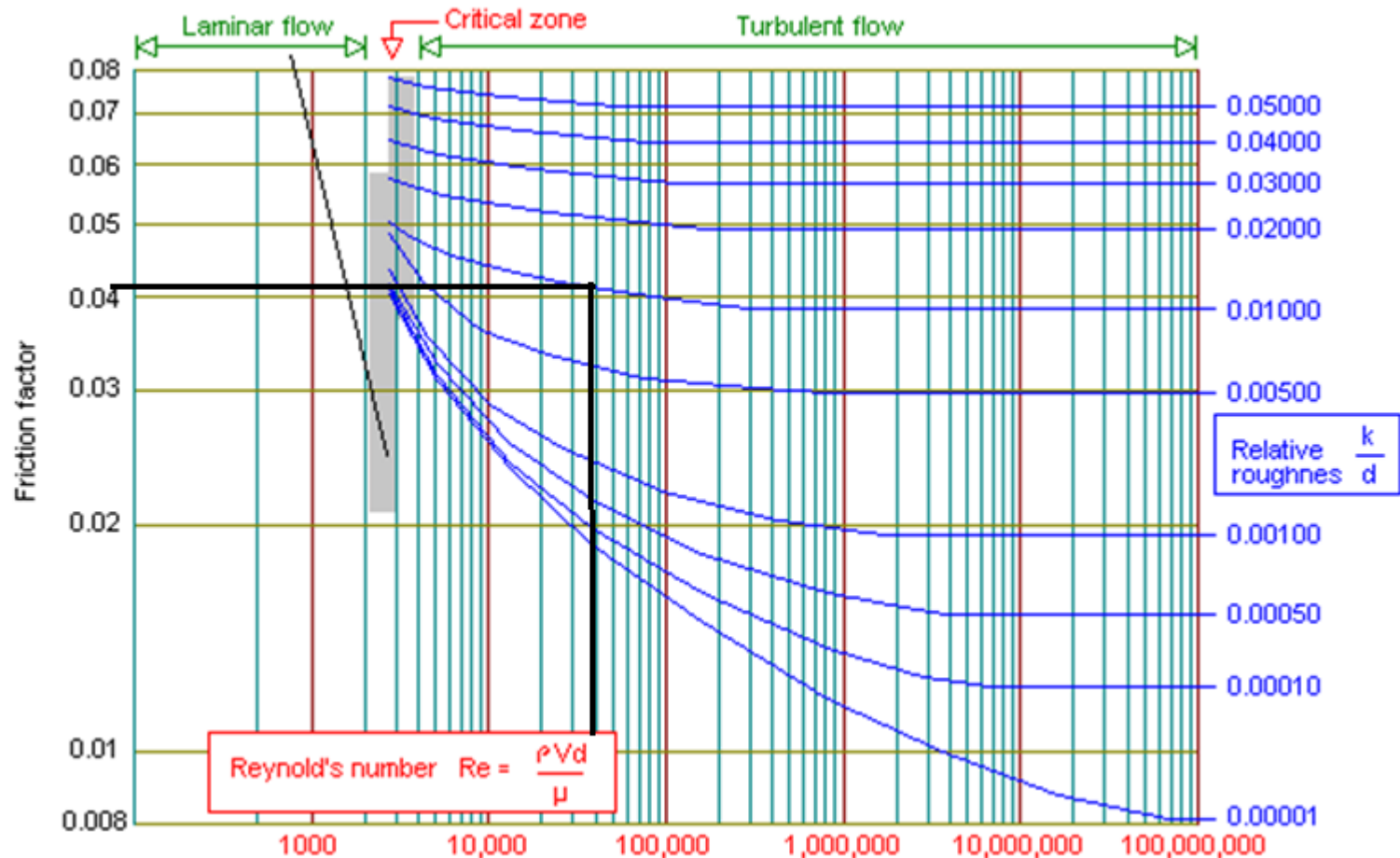
$$\text{Re} = \frac{c_{\text{média}} \cdot d_{\text{medio}_{eq}}}{\nu} = \frac{\rho \cdot c_{\text{média}} \cdot d_{\text{medio}_{eq}}}{\mu}$$

$$\text{Re} = \frac{1,3 \cdot 2,889 \cdot 0,945}{0,00007} = 317836,47$$



Problema 20.2 – (Resolução XV)

30. Pelo diagrama de Moody obtém-se o factor de fricção λ



O factor de fricção λ aproximadamente igual a 0,042

Problema 20.2 – (Resolução XVI)

31. A altura da chaminé calcula-se da fórmula empírica:

$$H = \frac{\Delta P + \zeta \frac{c_{boca}^2}{2} \rho_{gás} (1 + \beta \cdot t_{boca})}{g \left(\frac{\rho_{ar}}{1 + \beta \cdot t_{ar}} - \frac{\rho_{gás}}{1 + \beta \cdot \bar{t}_g} \right) - \frac{\lambda}{3d_{médio}} \frac{c_{médio}^2}{2} \rho_{gás} (1 + \beta \cdot \bar{t}_g)} \quad [\text{m}]$$

$$H = \frac{330,93 + 1,06 \frac{4^2}{2} 1,3 (1 + 0,0037 \cdot 348,70)}{g \left(\frac{1,29}{1 + 0,0037 \cdot 30} - \frac{1,30}{1 + 0,0037 \cdot 384,35} \right) - \frac{0,42}{3 \cdot 0,945} \frac{2,889^2}{2} 1,3 \cdot (1 + 0,0037 \cdot 384,35)}$$

$$= 61,251 \quad [\text{m}]$$



Problema 20.2 – (Resolução XVII)

32. Verificação do erro relativo entre a altura lida no ábaco e a calculada.

$$erro = \frac{|61,251 - 62|}{61,251} \times 100 = 1,22 [\%]$$



Sendo o erro de 1,22% inferior a 10% aceita-se o valor calculado. Caso contrário, substitui-se o valor no ábaco pelo calculado e repetem-se os cálculos a partir do Ponto 27.

Problema 20.3

O forno do Problema 20.1 foi ampliado com um pré-aquecedor de ar e um economizador e passou a funcionar com extracção forçada: um ventilador insufla o ar e a fornalha trabalha pressurizada, sem infiltrações de ar.

Mantêm-se o combustível, o consumo de 3,47 kg/s e o excesso de ar de 10%. Por exigência ambiental, a chaminé tem 50 m de altura. A conduta até à chaminé tem uma curva de 90° de raio longo, uma válvula de retenção e 162,2 Pa de perdas distribuídas.

Determine:

- as dimensões da chaminé;
- a extracção útil da chaminé;
- a pressão, o caudal e a potência do ventilador;
- a altura que a chaminé teria de ter com extracção natural.

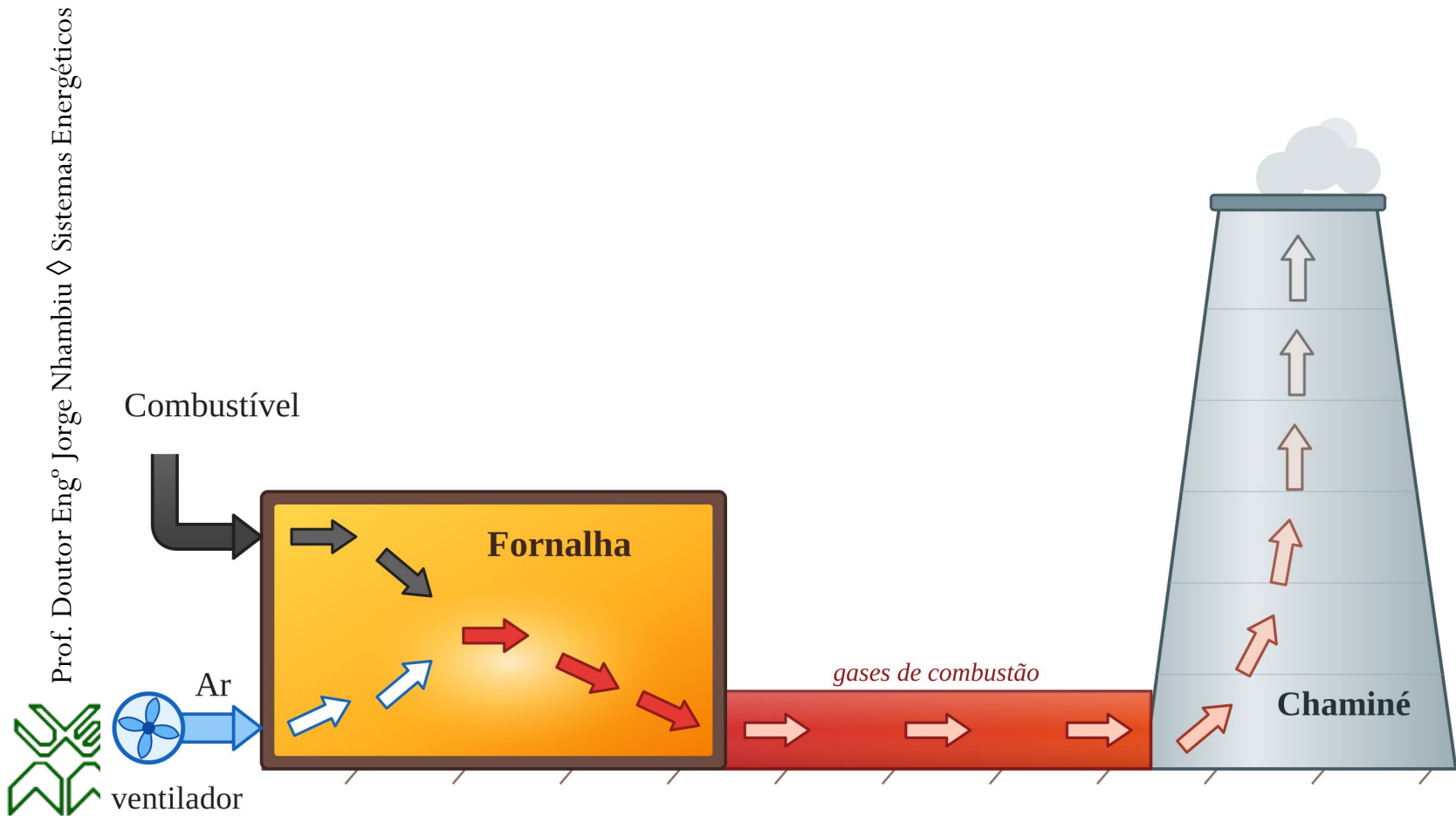


Problema 20.3 (Continuação)

Perdas no circuito do ar (condutas, pré-aquecedor, queimadores)	650	Pa
Perdas na fornalha, feixes, economizador e pré-aquecedor (lado dos gases)	980	Pa
Velocidade dos gases na conduta	10	m/s
Velocidade dos gases na boca da chaminé	10	m/s
Temperatura na base da chaminé	200	°C
Densidade do gás / do ar	1,30 / 1,29	kg/m ³
Perdas de temperatura com a altura Δt	1,15	°C/m
Viscosidade cinemática dos gases	0,00003	m ² /s
Rugosidade relativa	0,01	
Coeficiente de resistência da chaminé	1,06	
Temperatura do ar ambiente	30	°C
Coeficiente de segurança das perdas k_s	1,2	
Rendimento do ventilador η_v / reserva de potência β_2	0,70 / 1,1	



Problema 20.3 (Continuação)



48

Extracção forçada: o ventilador vence as perdas dos circuitos do ar e dos gases que a chaminé não cobre.

Problema 20.3 – Resolução (I)

1. Os volumes de ar e de gases são os do Problema 20.1 ($\alpha = 1,10$):

$$V^{\circ}_{\text{ar}} = 6,416 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ e } V_g = 8,259 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

2. O fluxo volumétrico dos gases que passam pela chaminé:

$$\dot{V}_g^{ch} = B_c V_g \frac{t_{base} + 273}{273} = 3,47 \cdot 8,259 \cdot \frac{200 + 273}{273} = 49,65 \text{ m}^3/\text{s}$$

3. O diâmetro da boca da chaminé ($c_{\text{gás}} = 10 \text{ m/s}$, extracção artificial):

$$d_{boca} = 1,13 \sqrt{\dot{V}_g^{ch} / c_{boca}} = 1,13 \sqrt{49,65 / 10} = 2,518 \text{ m}$$



Problema 20.3 – Resolução (II)

4. Os diâmetros da base e médio da chaminé:

$$d_{base} = 1,5 \cdot d_{boca} = 3,777 \text{ m} \quad d_{médio} = \frac{d_{base} + d_{boca}}{2} = 3,147 \text{ m}$$

5. As velocidades dos gases na base e média:

$$c_{base} = c_{boca} \frac{d_{boca}^2}{d_{base}^2} = 4,432 \text{ m/s} \quad c_{médio} = 0,5 (c_{boca} + c_{base}) = 7,202 \text{ m/s}$$

6. As temperaturas na boca e média dos gases ($H = 50 \text{ m}$):

$$t_{boca} = t_{base} - \Delta t \cdot H = 200 - 1,15 \cdot 50 = 142,5 \text{ °C} \quad \bar{t}_g = \frac{t_{base} + t_{boca}}{2} = 171,25 \text{ °C}$$



Problema 20.3 – Resolução (III)

7. O número de Reynolds e o factor de fricção:

$$\text{Re} = \frac{c_{\text{médio}} d_{\text{médio}}}{\nu} = \frac{7,202 \cdot 3,147}{0,00003} \approx 7,6 \cdot 10^5$$

$$\frac{k}{d} = 0,01 \Rightarrow \lambda \approx 0,038 \quad (\text{regime rugoso, diagrama de Moody})$$

8. A tiragem por metro de altura da chaminé:

$$g \left(\frac{\rho_{ar}}{1 + \beta t_{ar}} - \frac{\rho_{gás}}{1 + \beta \bar{t}_g} \right) = 9,81 \left(\frac{1,29}{1 + 0,0037 \cdot 30} - \frac{1,30}{1 + 0,0037 \cdot 171,25} \right) = 3,584 \text{ Pa/m}$$



Problema 20.3 – Resolução (IV)

9. A perda por atrito por metro e a perda à saída da chaminé:

$$\frac{\lambda}{3d_{\text{médio}}} \frac{c_{\text{médio}}^2}{2} \rho_{\text{gás}} (1 + \beta \bar{t}_g) = \frac{0,038}{3 \cdot 3,147} \frac{7,202^2}{2} 1,30 (1 + 0,0037 \cdot 171,25) = 0,221 \text{ Pa/m}$$

$$\zeta \frac{c_{\text{boca}}^2}{2} \rho_{\text{gás}} (1 + \beta t_{\text{boca}}) = 1,06 \frac{9,97^2}{2} 1,30 (1 + 0,0037 \cdot 142,5) = 104,6 \text{ Pa}$$

10. A extracção útil da chaminé (19.34):

$$\Delta P_{ch}^{\text{útil}} = H (3,584 - 0,221) - 104,6 = 50 \cdot 3,363 - 104,6 = 63,5 \text{ Pa}$$

A chaminé de 50 m fornece apenas cerca de 64 Pa ; o resto das perdas tem de ser compensado pelo ventilador.



Problema 20.3 – Resolução (V)

11. As perdas locais na conduta ($c_{\text{conduta}} = 10 \text{ m/s}$):

$$\Delta P_{\text{curva}} = 0,40 \frac{10^2}{2} 1,30 = 26,0 \text{ Pa} \quad \Delta P_{\text{válv}} = 2,50 \frac{10^2}{2} 1,30 = 162,5 \text{ Pa}$$

12. As perdas totais no circuito dos gases:

$$\Sigma \Delta P_g = 980 + 162,2 + 26,0 + 162,5 = 1\,330,7 \text{ Pa}$$

13. A pressão do ventilador (19.35):



$$H_{\text{vent}} = k_s (\Sigma \Delta P_{\text{ar}} + \Sigma \Delta P_g) - \Delta P_{\text{ch}}^{\text{útil}} = 1,2 (650 + 1\,330,7) - 63,5 = 2\,313 \text{ Pa}$$

Problema 20.3 – Resolução (VI)

14. O caudal do ventilador (19.10), com o coeficiente de reserva β_1 :

$$G_o = B_c V_{ar}^o \alpha \rho_{ar}^o = 3,47 \cdot 6,416 \cdot 1,10 \cdot 1,293 = 31,7 \text{ kg/s} > 5,6 \Rightarrow \beta_1 = 1,05$$

$$\dot{V}_v = \beta_1 B_c V_{ar}^o \alpha_f \frac{t_{arfrio} + 273}{273} = 1,05 \cdot 3,47 \cdot 6,416 \cdot 1,10 \cdot \frac{303}{273} = 28,54 \text{ m}^3/\text{s}$$

15. A potência do motor do ventilador (19.11):

$$N_v = \frac{\beta_2 \dot{V}_v H_{vent}}{\eta_v} = \frac{1,1 \cdot 28,54 \cdot 2\,313}{0,70} = 103,7 \text{ kW}$$



Problema 20.3 – Resolução (VII)

16. Para comparação, a altura necessária com extracção natural (19.29 e 19.30), mantendo as temperaturas e velocidades:

$$\Delta P = 1,25 (650 + 1\,330,7) = 2\,476 \text{ Pa}$$

$$H = \frac{\Delta P + \zeta \frac{c_{boca}^2}{2} \rho_{gás} (1 + \beta t_{boca})}{g(\dots) - \frac{\lambda}{3d_{médio}} \frac{c_{médio}^2}{2} \rho_{gás} (1 + \beta \bar{t}_g)} = \frac{2\,476 + 104,6}{3,584 - 0,221} \approx 767 \text{ m}$$

Uma chaminé de cerca de 770 m é inviável. Com pré-aquecedor e economizador a extracção natural não serve: o ventilador fornece cerca de 2 300 Pa e a chaminé de 50 m contribui com apenas 64 Pa.



Problema 20.4

Na instalação do Problema 20.3 instala-se um exaustor na base da chaminé e a extracção passa a ser balanceada, com a fornalha a -20 Pa. A chaminé mantém a altura e os diâmetros do Problema 20.3.

Com a fornalha em depressão entra ar por infiltração: $\Delta a_f = 0,05$ na fornalha e, no total, $0,15$ até ao exaustor, pelo que $a_{ex} = a_{ch} = 1,25$. Considere as mesmas perdas de carga do Problema 20.3.

Determine:

- a) a pressão, o caudal e a potência do ventilador;
- b) a extracção útil da chaminé com o novo caudal de gases;
- c) a pressão, o caudal e a potência do exaustor;
- d) a potência total, comparando-a com a da extracção forçada.



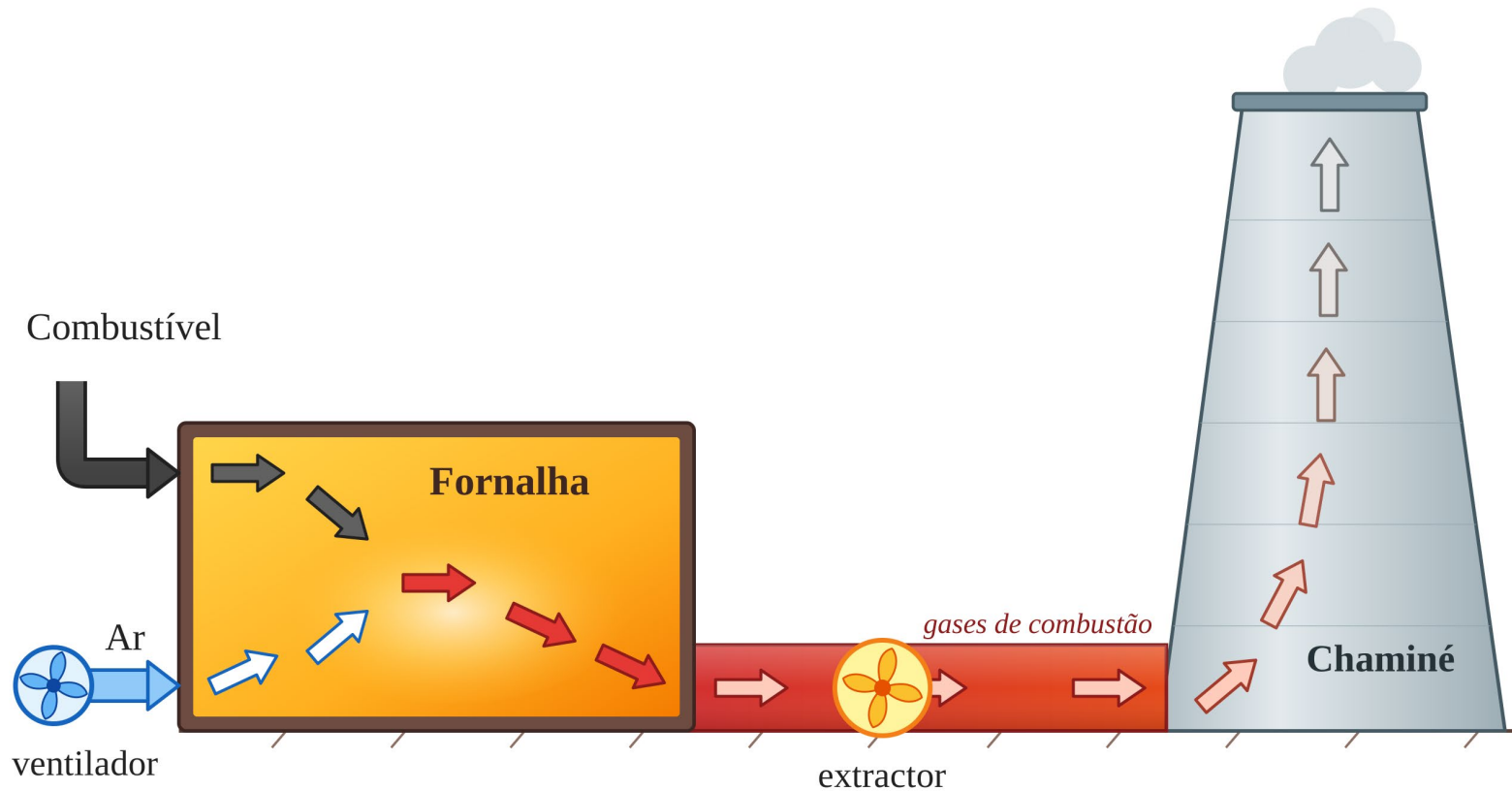
Problema 20.4 (Continuação)



Pressão na fornalha p_f	-20	Pa
Infiltração de ar na fornalha Δa_f	0,05	
Excesso de ar no exaustor e na chaminé a_{ex}	1,25	
Temperatura dos gases no exaustor t_{ex}	200	°C
Altura da chaminé	50	m
Diâmetros da chaminé d_{boca} / d_{base} (Problema 20.3)	2,518/3,777	m
Rendimento do ventilador η_v	0,70	
Rendimento do exaustor η_{ex}	0,65	
Coeficiente de reserva da potência β_2	1,1	
Volume teórico dos gases V^o_g (Problema 20.1)	7,607	m³/kg

Os restantes dados são os do Problema 20.3.

Problema 20.4 (Continuação)



Extracção balanceada: o ventilador vence o circuito do ar e o exaustor o circuito dos gases; a fornalha fica em depressão.

Problema 20.4 – Resolução (I)

1. O caudal do ventilador (19.10). O ventilador só fornece o ar que não entra por infiltração ($\alpha_f - \Delta\alpha_f = 1,05$):

$$\dot{V}_v = \beta_1 B_c V_{ar}^o (\alpha_f - \Delta\alpha_f) \frac{t_{ar\text{frio}} + 273}{273} = 1,05 \cdot 3,47 \cdot 6,416 \cdot 1,05 \cdot \frac{303}{273} = 27,24 \text{ m}^3/\text{s}$$

2. A pressão do ventilador (19.37):

$$H_{vent} = k_s \Sigma \Delta P_{ar} - |p_f| = 1,2 \cdot 650 - 20 = 760 \text{ Pa}$$

3. A potência do motor do ventilador (19.11):

$$N_v = \frac{\beta_2 \dot{V}_v H_{vent}}{\eta_v} = \frac{1,1 \cdot 27,24 \cdot 760}{0,70} = 32,5 \text{ kW}$$



Problema 20.4 – Resolução (II)

4. O volume de gases com o ar infiltrado ($\alpha_{ex} = 1,25$):

$$V_g = V_g^o + (\alpha_{ex} - 1) V_{ar}^o = 7,607 + 0,25 \cdot 6,416 = 9,211 \text{ m}^3/\text{kg}$$

5. O fluxo volumétrico na chaminé:

$$\dot{V}_g^{ch} = B_c V_g \frac{t_{base} + 273}{273} = 3,47 \cdot 9,211 \cdot \frac{473}{273} = 55,38 \text{ m}^3/\text{s}$$

6. As velocidades na chaminé (mesmos diâmetros do Problema 20.3):

$$c_{boca} = \frac{4 \dot{V}_g^{ch}}{\pi d_{boca}^2} = 11,12 \text{ m/s} \quad c_{base} = 4,94 \text{ m/s} \quad c_{médio} = 8,03 \text{ m/s}$$



Problema 20.4 – Resolução (III)

7. As temperaturas não mudam, logo a tiragem mantém-se em 3,584 Pa/m. A perda por atrito e a perda à saída com o novo caudal:

$$\frac{\lambda}{3d_{\text{médio}}} \frac{c_{\text{médio}}^2}{2} \rho_{\text{gás}} (1 + \beta \bar{t}_g) = 0,275 \text{ Pa/m} \quad \zeta \frac{c_{\text{boca}}^2}{2} \rho_{\text{gás}} (1 + \beta t_{\text{boca}}) = 130,1 \text{ Pa}$$

8. A extracção útil da chaminé (19.34):

$$\Delta P_{ch}^{\text{útil}} = 50 (3,584 - 0,275) - 130,1 = 35,3 \text{ Pa}$$

O ar infiltrado aumenta o caudal e as perdas na própria chaminé: a extracção útil desce de 63,5 Pa para 35,3 Pa.



Problema 20.4 – Resolução (IV)

9. A pressão do exaustor (19.38):

$$H_{ex} = k_s \Sigma \Delta P_g + |p_f| - \Delta P_{ch}^{útil} = 1,2 \cdot 1\,330,7 + 20 - 35,3 = 1\,582 \text{ Pa}$$

10. O caudal do exaustor (19.12):

$$\dot{V}_{ex} = \beta_1 B_c [V_g^o + (\alpha_{ex} - 1)V_{ar}^o] \frac{t_{ex} + 273}{273} = 1,05 \cdot 3,47 \cdot 9,211 \cdot \frac{473}{273} = 58,15 \text{ m}^3/\text{s}$$

11. A potência do motor do exaustor (19.13):

$$N_{ex} = \frac{\beta_2 \dot{V}_{ex} H_{ex}}{\eta_{ex}} = \frac{1,1 \cdot 58,15 \cdot 1\,582}{0,65} = 155,6 \text{ kW}$$



Problema 20.4 – Resolução (V)

12. A potência total e a comparação com a extracção forçada:

$$N_{total} = N_v + N_{ex} = 32,5 + 155,6 = 188,2 \text{ kW}$$

Esquema	Ventilador	Exaustor	Total
Forçada (Problema 20.3)	2 313 Pa · 103,7 kW	—	103,7 kW
Balanceada (Problema 20.4)	760 Pa · 32,5 kW	1 582 Pa · 155,6 kW	188,2 kW

A extracção balanceada consome mais energia, porque o exaustor move gases quentes e o ar infiltrado. Em troca, a fornalha fica em depressão e não há fugas de gases para a sala.



Problema 20.5

Na instalação do Problema 20.3 retira-se o ventilador e a extracção passa a ser induzida pura: um exaustor na base da chaminé aspira os gases e o ar de combustão entra na fornalha por depressão. A chaminé mantém a altura e os diâmetros do Problema 20.3.

Com a fornalha em forte depressão as infiltrações aumentam: $\Delta a_f = 0,10$ na fornalha e, no total, 0,25 até ao exaustor, pelo que $a_{ex} = a_{ch} = 1,35$. Considere as mesmas perdas de carga do Problema 20.3.

Determine:

- a) a pressão na fornalha;
- b) a extracção útil da chaminé com o novo caudal de gases;
- c) a pressão, o caudal e a potência do exaustor;
- d) a potência total, comparando-a com a das extracções forçada (20.3) e balanceada (20.4).



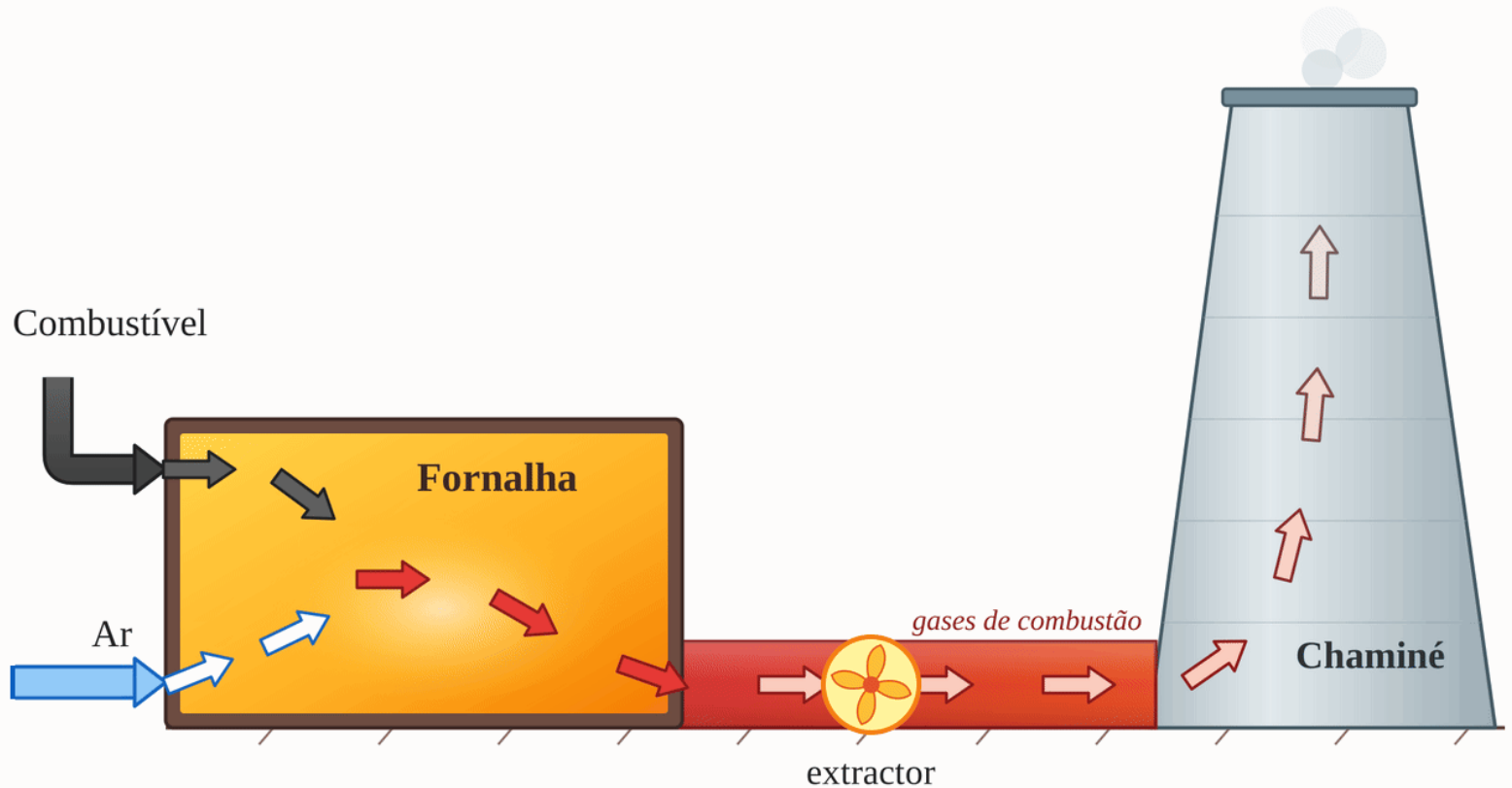
Problema 20.5 (Continuação)



Excesso de ar na fornalha α_f	1,10	
Infiltração de ar na fornalha $\Delta\alpha_f$	0,10	
Ar admitido pelo circuito do ar $\alpha_f - \Delta\alpha_f$	1,00	
Excesso de ar no exaustor e na chaminé α_{ex}	1,35	
Temperatura dos gases no exaustor t_{ex}	200	°C
Altura da chaminé	50	m
Diâmetros da chaminé d_{boca} / d_{base} (Problema 20.3)	2,518/3,777	m
Rendimento do exaustor η_{ex}	0,65	
Coeficiente de reserva da potência β_2	1,1	
Volume teórico dos gases V°_g (Problema 20.1)	7,607	m ³ /kg

Os restantes dados são os do Problema 20.3.

Problema 20.5 (Continuação)



Extracção induzida: não há ventilador; o exaustor vence os circuitos do ar e dos gases e toda a fornalha fica em depressão forte.

Problema 20.5 – Resolução (I)

1. O volume de gases com o ar infiltrado ($\alpha_{ex} = 1,35$):

$$V_g = V_g^o + (\alpha_{ex} - 1) V_{ar}^o = 7,607 + 0,35 \cdot 6,416 = 9,853 \text{ m}^3/\text{kg}$$

2. O fluxo volumétrico na chaminé:

$$\dot{V}_g^{ch} = B_c V_g \frac{t_{base} + 273}{273} = 3,47 \cdot 9,853 \cdot \frac{473}{273} = 59,24 \text{ m}^3/\text{s}$$

3. As velocidades na chaminé (mesmos diâmetros do Problema 20.3):

$$c_{boca} = \frac{4 \dot{V}_g^{ch}}{\pi d_{boca}^2} = 11,90 \text{ m/s} \quad c_{base} = 5,29 \text{ m/s} \quad c_{médio} = 8,59 \text{ m/s}$$



Problema 20.5 – Resolução (II)

4. As temperaturas não mudam, logo a tiragem mantém-se em 3,584 Pa/m. O número de Reynolds e o factor de fricção:

$$\text{Re} = \frac{c_{\text{médio}} d_{\text{médio}}}{\nu} = \frac{8,591 \cdot 3,147}{0,00003} \approx 9,0 \cdot 10^5 \quad \Rightarrow \quad \lambda \approx 0,038$$

5. A perda por atrito por metro e a perda à saída com o novo caudal:

$$\frac{\lambda}{3d_{\text{médio}}} \frac{c_{\text{médio}}^2}{2} \rho_{\text{gás}} (1 + \beta \bar{t}_g) = 0,315 \text{ Pa/m} \quad \zeta \frac{c_{\text{boca}}^2}{2} \rho_{\text{gás}} (1 + \beta t_{\text{boca}}) = 148,9 \text{ Pa}$$

6. A extracção útil da chaminé (19.34):

$$\Delta P_{ch}^{\text{útil}} = 50 (3,584 - 0,315) - 148,9 = 14,5 \text{ Pa}$$



Problema 20.5 – Resolução (III)

7. A pressão na fornalha. Sem ventilador, o ar é aspirado através de todo o circuito do ar:

$$p_f \approx -\Sigma \Delta P_{ar} = -650 \text{ Pa} \quad (\text{com } k_s : \approx -780 \text{ Pa})$$

8. A pressão do exaustor (19.36):

$$H_{ex} = k_s(\Sigma \Delta P_{ar} + \Sigma \Delta P_g) - \Delta P_{ch}^{útil} = 1,2(650 + 1\,330,7) - 14,5 = 2\,362 \text{ Pa}$$

9. O caudal do exaustor (19.12):

$$\dot{V}_{ex} = \beta_1 B_c \left[V_g^o + (\alpha_{ex} - 1) V_{ar}^o \right] \frac{t_{ex} + 273}{273} = 1,05 \cdot 3,47 \cdot 9,853 \cdot \frac{473}{273} = 62,20 \text{ m}^3/\text{s}$$



Problema 20.5 – Resolução (IV)

10. A potência do motor do exaustor (19.13) e a comparação dos três esquemas:

$$N_{ex} = \frac{\beta_2 \dot{V}_{ex} H_{ex}}{\eta_{ex}} = \frac{1,1 \cdot 62,20 \cdot 2\,362}{0,65} = 248,6 \text{ kW}$$

Esquema	Ventilador	Exaustor	Total
Forçada (Problema 20.3)	2 313 Pa · 103,7 kW	—	103,7 kW
Balanceada (Problema 20.4)	760 Pa · 32,5 kW	1 582 Pa · 155,6 kW	188,2 kW
Induzida (Problema 20.5)	—	2 362 Pa · 248,6 kW	248,6 kW



A extracção induzida pura é a que consome mais: o exaustor vence sozinho todas as perdas e move o maior caudal (gases quentes com 25% de ar infiltrado). A fornalha fica a ≈ -650 Pa, o que agrava as infiltrações. Por isso as grandes instalações preferem a extracção balanceada.