

# Sistemas Energéticos

**3º ano 6º semestre**

**Aula 21**



# ***Aula 21: Dimensionamento da Chaminé-Prática***

# *Dimensionamento de Chaminé*

Prof. Doutor Eng° Jorge Nhambiu ◊ Sistemas Energéticos



3



## Problema 21.1



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%.

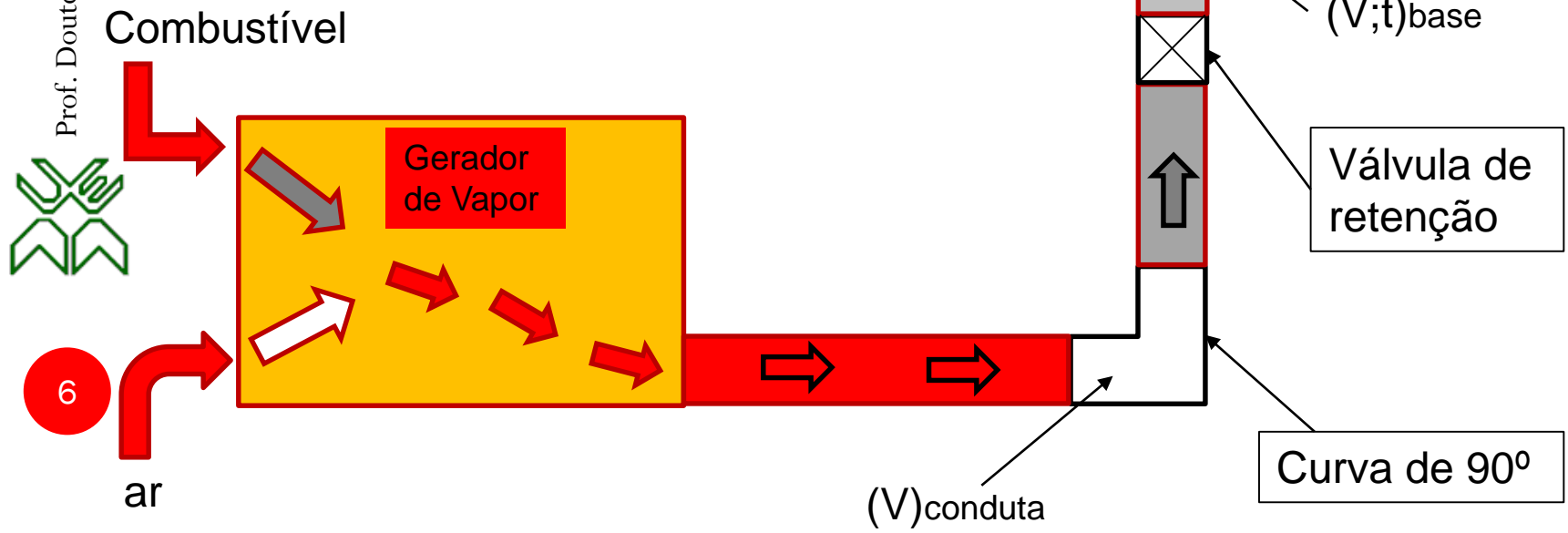
A conduta que leva os gases à chaminé tem uma curva de 90° de raio longo e uma válvula de retenção, para não permitir o retorno dos gases ao forno. As perdas de pressão ao longo da conduta, sem tomar em conta as localizadas são de 162,2 Pa.

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

## Problema 21.1 (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 <sup>3</sup>
Densidade do ar	1,29 Kg/m <sup>3</sup>
Pressão dos gases	1,05·10 <sup>5</sup> Pa
Perdas de temperatura com a altura $\Delta T$	1,15 °C/m
Coefficiente de viscosidade cinemática	0,00007 m <sup>2</sup> /s
Rugosidade relativa	0,01
Coefficiente de resistência da chaminé	1,06
Temperatura do ar ambiente	30 °C
Aceleração gravitacional	9,81 m/s <sup>2</sup>





## Problema 21 .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 21.1 – Resolução


2. Cálculo do volume teórico de ar.

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


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

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

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


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

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 21 .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 21.1 – Resolução

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

$$V_{gNor} = V_{RO_2Nor} + V_{RONor} + V_{H_2ONor} + V_{O_2Nor} = 8,259 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

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

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

ou

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



## Problema 21.1 – 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 21.1 – 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  $\Delta P_l = \xi_l \frac{c_{cond}^2}{2} \rho = 12,74 [Pa]$

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

18. As perdas totais calculam-se de:

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

12

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

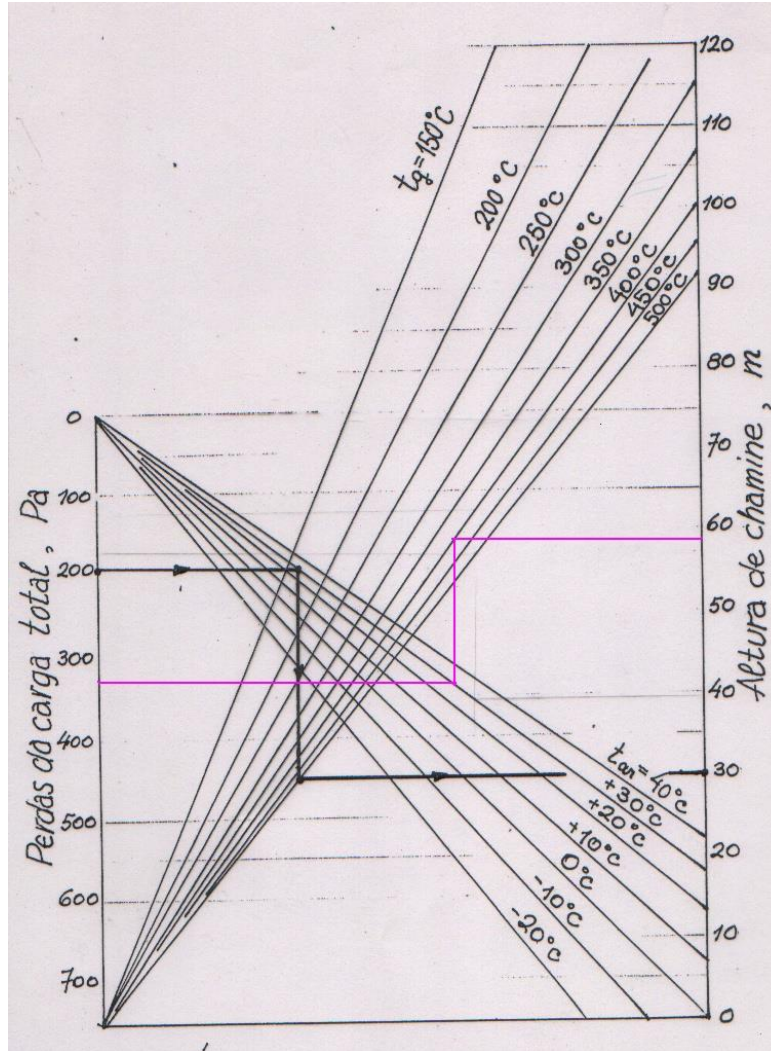
$$\Delta P = (1,2 - 1,3) \sum \Delta P = 330,93 [Pa]$$





## Problema 21.1 – Resolução

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



## Problema 21.1 – 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:

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

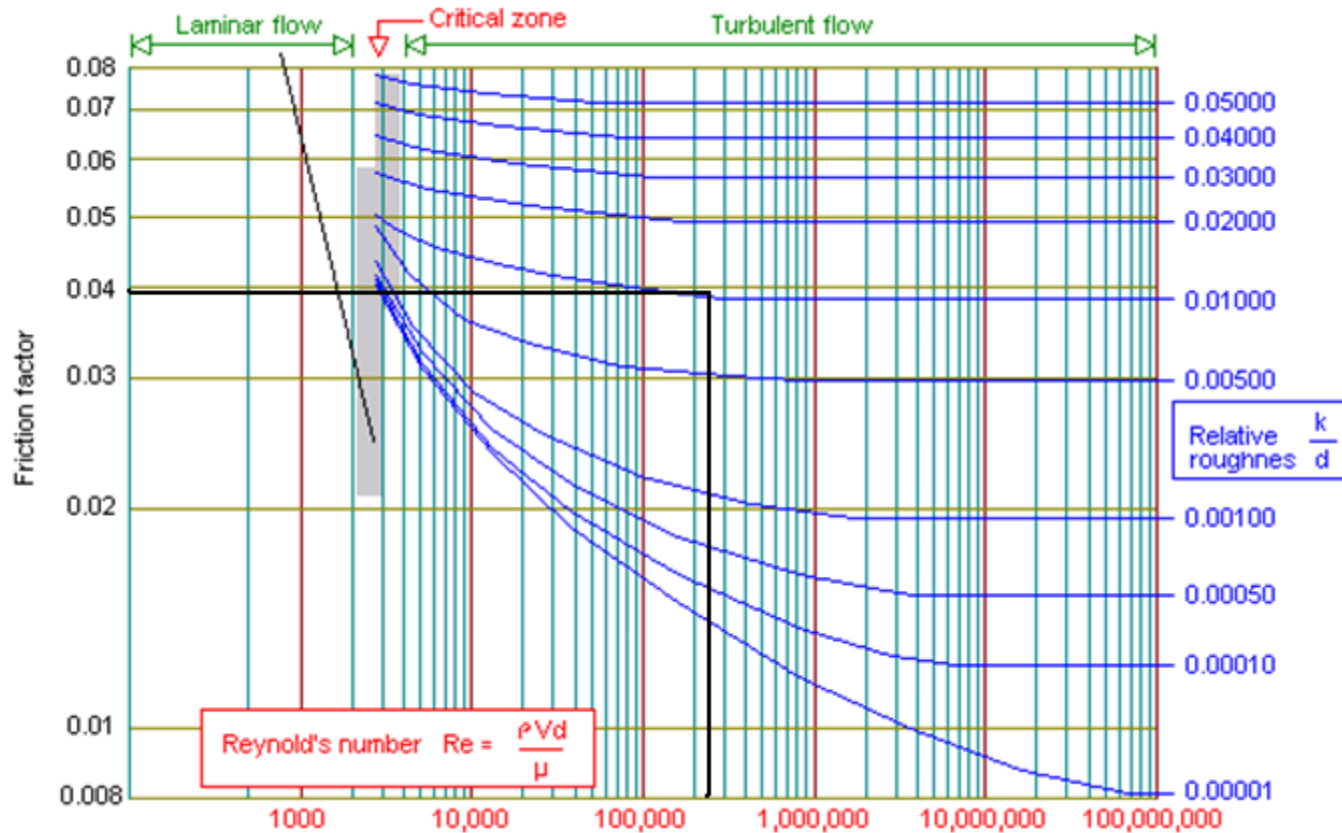
23. Calcula-se o número de Reynolds de:


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


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

## Problema 21.1 – Resolução

24. Pelo diagrama de Moody obtém-se o factor de fricção  $\lambda$



O factor de fricção  $\lambda$  aproximadamente igual a 0,039

## Problema 21.1 – Resolução

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

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

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

= **60,213 [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 cálculos a partir do Ponto 21.



## Problema 21.2

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

Coefficiente 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 21.2

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 21.2 (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 <sup>3</sup>
Densidade do ar	1,29 Kg/m <sup>3</sup>
Pressão dos gases	1,15·10 <sup>5</sup> Pa
Perdas de temperatura com a altura $\Delta T$	1,15 °C/m
Coeficiente de viscosidade cinemática	0,00007 m <sup>2</sup> /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 <sup>2</sup>



# Problema 21 .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 21 .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 Triatómicos**

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

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



# Problema 21 .2 – (Resolução III)

- **6. Volume Teórico Do Vapor De Agua**

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

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

- **7. Volume Real Do Vapor De Água**

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

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

- **8. Volume Do Oxigénio Excedente**

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

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



# Problema 21 .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 21 .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.

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

$$P_{cf} = 0$$

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



# $q_2$ - 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
<b>GPL (Propano)</b>	<b>0,45</b>
Gás Natural	0,395

$$k_1 = 0,45$$



# q<sub>3</sub> - 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 <sub>2</sub> t nos gases secos
Bagaço	20,3
Madeira	19,9
“Thick”, “thin” e “burner” óleos	15,8
Gasóleo	15,5
<b>GPL (Propano)</b>	<b>13,8</b>
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 (%)

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



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

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

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

## $q_5$ - 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 21 .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 21 .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 21 .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 21.2 – (Resolução IX)

Tabela 20.3 Factor de perdas de carga localizadas

Nº	Peça	$\zeta_l$
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	$\zeta_l$
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 21.2 – (Resolução X)

23. As perdas locais calculam-se de:

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

Na curva

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

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

Na válvula

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



# Problema 21 .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 :

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

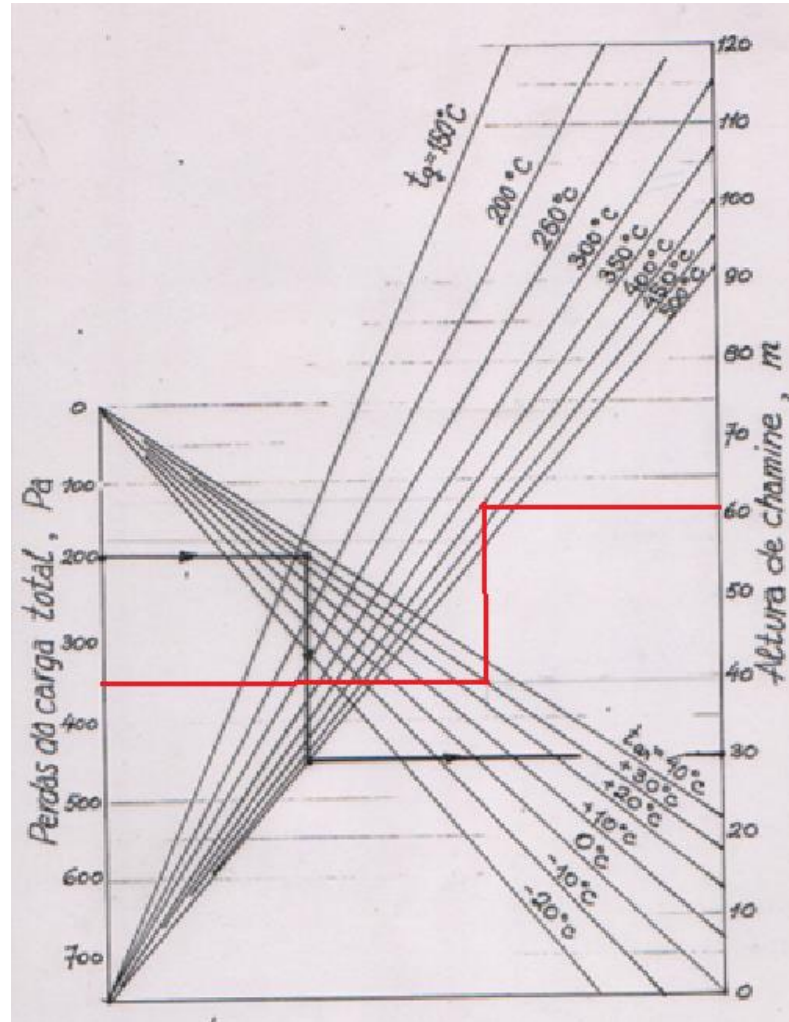
$$\Delta P = 1,3 \cdot 254,565 = 330,935 \quad [Pa]$$





# Problema 21.2 – (Resolução XII)

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





# Problema 21 .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 21 .2 – (Resolução XIV)***

29. Calcula-se o número de Reynolds de:

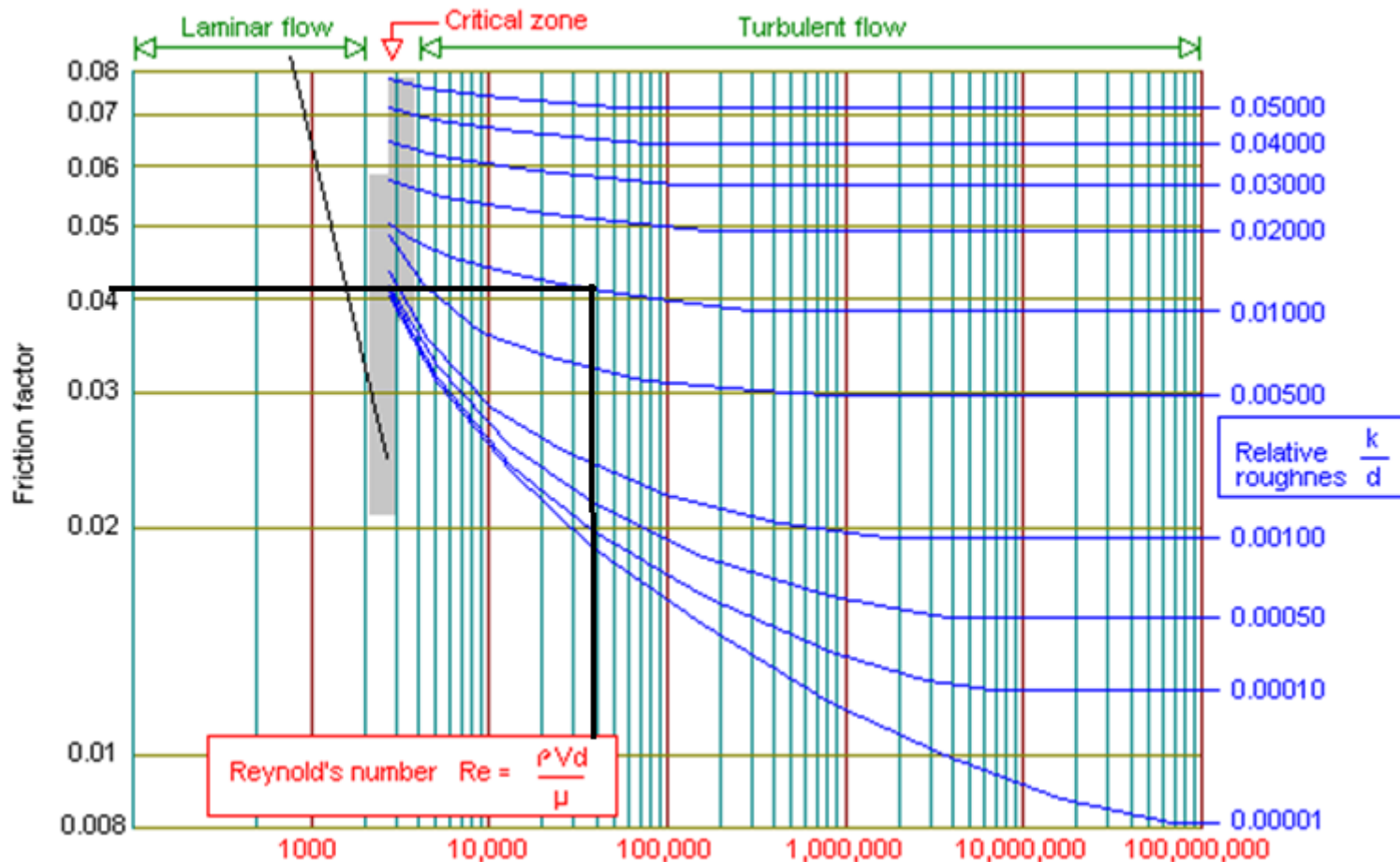
$$\text{Re} = \frac{c_{\text{média}} \cdot d_{\text{medio}_{eq}}}{\nu} = \frac{\rho \cdot c_{\text{média}} \cdot d_{\text{medio}_{eq}}}{\mu}$$

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



# Problema 21.2 – (Resolução XV)

30. Pelo diagrama de Moody obtém-se o factor de fricção  $\lambda$



O factor de fricção  $\lambda$  aproximadamente igual a 0,042

# Problema 21 .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 [m]**



# ***Problema 21 .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 cálculo a partir do Ponto 27.

