

Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 10



Aula 10: Balanços Térmicos e Consumo de combustível - Prática

Tópicos

- *Características de Funcionamento do Forno*
- *Condições Térmicas*
- *Balanço de Calor*
- *Consumo de combustível*



Características De Funcionamento Do Forno

- O funcionamento de um forno pode ser caracterizado por um grande numero de características. As mais importantes são:
 - A temperatura
 - As condições térmicas
 - O coeficiente de utilização
 - A produtividade



A TEMPERATURA

A temperatura do forno depende do número de factores, em primeiro lugar da temperatura de combustão do combustível usado no forno e a natureza de absorção incluindo as perdas de calor que normalmente são dadas por:

$$t_a = \eta \cdot t_c$$

Onde:

t_a é a temperatura actual do forno;

t_c é a temperatura de combustão do combustível e

η é o coeficiente do pirómetro que varia de 0,65 - 0,80 e que depende o do projecto do forno.



A TEMPERATURA

A temperatura é a característica mais importante do desempenho do forno. Por isso, o termo TEMPERATURA DO FORNO é uma condição vital. O ponto de análise é a chama, (gases incandescentes), o metal, a direcção da chama, e os elementos que estão em troca mútua de calor talvez à temperaturas diferentes.

A temperatura do interior do forno não é determinada apenas por um destes elementos mas sim pelo valor médio denominado TEMPERATURA DO FORNO.



Exemplo 10.1

- Para um forno com as seguintes características

| | |
|---------------------------------|--------------------------|
| Temperatura final do metal | 1250 °C |
| Temperatura inicial do metal | 20 °C |
| Temperatura dos gases de escape | 800 °C |
| Temperatura exterior | 25 °C |
| Calor específico do metal | 0,68 kJ/kgK |
| Produtividade do forno | 50000 kg/h |
| Temperatura do combustível | 120 °C |
| Densidade do Combustível | 1,3 kg/m ³ |
| Calor específico dos gases | 1,4 kJ/m ³ K |
| Calor específico do ar | 1,32 kJ/m ³ K |
| Temperatura do ar | 140 °C |
| Excesso de ar | 30% |



Exemplo 10.1 (Continuação I)

- Que utiliza um combustível gasoso com a seguinte composição em percentagem:
- Calcular o consumo de combustível

| | |
|--------------------------------|------|
| H ₂ | 18 |
| CO | 10 |
| H ₂ S | 5 |
| CH ₄ | 5 |
| C ₂ H ₆ | 7 |
| C ₃ H ₈ | 5 |
| C ₂ H ₄ | 7,5 |
| C ₄ H ₁₀ | 2 |
| C ₅ H ₁₂ | 2 |
| C ₃ H ₆ | 6 |
| C ₄ H ₈ | 9 |
| CO ₂ | 6,49 |
| N ₂ | 17 |
| Oxigénio | 0 |
| Cinzas | 0 |
| Humidade | 0,01 |



Exemplo 10.1 (Continuação)

O volume de ar teórico calcula-se de:

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

$$V_{ar}^o = 10,163 \frac{m^3}{m_{comb}^3}$$

O volume teórico de Nitrogénio

$$V_{N_2}^o = 0,79 \cdot V_{ar}^o + 0,01 \cdot N_2$$

$$V_{N_2}^o = 8,198 \frac{m^3}{m_{comb}^3}$$

O volume teórico de vapor de água

$$V_{H_2O}^o = 0,01 \cdot \left[H_2S + H_2 + \sum (n/2) C_m H_n + 0,0124 d_{comb} \right] + 0,0161 V_{ar}^o$$

$$V_{H_2O}^o = 1,814 \frac{m^3}{m_{comb}^3}$$



Exemplo 10.1 (Continuação)

Volume dos Gases Biatómicos

$$V_{R_2} = V^{\circ}_{N_2} + (\alpha - 1) \cdot V^{\circ}_{ar} \cdot 0,79$$

$$V_{R_2} = 10,607 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3_{\text{comb}}}$$

Volume Real dos Gases Biatómicos

$$V_{R_{O_2}} = 0,01 \cdot [CO_2 + CO + H_2S + \sum mC_m H_m]$$

$$V_{R_{O_2}} = 1,425 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3_{\text{comb}}}$$



Volume Real do Vapor de Água

$$V_{H_2,0} = V^{\circ}_{H_2,0} + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^{\circ}_{ar}$$

$$V_{H_2,0} = 1,863 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3_{\text{comb}}}$$



Exemplo 10.1 (Continuação)

Volume do Oxigénio excedente

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{ar}^o$$

$$V_{O_2} = 0,640 \frac{\text{m}^3}{\text{m}_{\text{comb}}^3}$$

Volume dos Gases de Combustão

$$V_g = V_{R_{O_2}} + V_{R_2} + V_{H_2O} + V_{O_2}$$

$$V_g = 14,535 \frac{\text{m}^3}{\text{m}_{\text{comb}}^3}$$



Exemplo 10.1 (Continuação)

Fracção Volúmica dos Gases Produtos de Combustão

$$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_g} = 0,098$$

$$r_{R_2} = \frac{V_{R_2}}{V_g} = 0,730$$

$$r_{H_2O} = \frac{V_{RH_2O}}{V_g} = 0,128$$

$$r_{O_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_g} = 0,044$$



A entalpia dos produtos de combustão será:

$$I_g = r_{RO_2} \cdot (C\theta)_{RO_2} + r_{N_2} \cdot (C\theta)_{N_2} + r_{H_2O} \cdot (C\theta)_{H_2O} + r_{O_2} \cdot (C\theta)_{H_2O}$$

$$I_g = 2960,332 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

Exemplo 10.1 (Continuação)

Entalpia da combustão

$$I_q = \frac{Q_i}{V_g} = 2780,89 \text{ kJ/m}^3$$

Entalpia do ar

$$I_a = \frac{Q_a}{V_g} = 167,97 \text{ kJ/m}^3$$

Entalpia do combustível

$$I_c = \frac{Q_c}{V_g} = 11,558 \text{ kJ/m}^3$$

Entalpia dos gases de escape

$$I_g = I_q + I_a + I_c = 2960,425 \text{ kJ/m}^3$$



Exemplo 10.1 (Continuação)

O Poder Calorífico do combustível gasoso calcula-se de:

$$Q^i = 108,3 H_2 + 126,8 CO + 234,6 H_2S + 359,3 CH_4 + 639,5 C_2H_6 + 915,4 C_3H_8 + 592,5 C_2H_4 + 1190,2 C_4H_{10} + 1465,4 C_5H_{12} + 862,7 C_3H_6 + 1138,7 C_4H_8 + 126,4 O_2$$

$$Q^i = 40419,85 \text{ kJ/m}^3$$

Calcula-se a temperatura comparando:



$$I = t_c \cdot c_v = \frac{(Q_w + Q_a + Q_c)}{V_{cp}} \quad \text{com} \quad I_g = r_{RO_2} \cdot (C\theta)_{RO_2} + r_{N_2} \cdot (C\theta)_{N_2} + r_{H_2O} \cdot (C\theta)_{H_2O} + r_{O_2} \cdot (C\theta)_{H_2O}$$

$$I_g = 2960,425 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

14

Onde

Q_a é o calor usado para o aquecimento do ar

Q_c é o calor usado para o aquecimento do combustível

Exemplo 10.1 (Continuação)

Obtém-se:

$$t_c = 1815,25 \text{ °C}$$

A temperatura real do forno obtém-se de:

$$t_a = \eta \cdot t_c$$

$$t_a = 1270,68 \text{ °C}$$

Onde:

t_a - é a temperatura real do forno;

η é o coeficiente pirométrico que varia de 0,65 - 0,80 e que depende do projecto do forno. (usou-se 0,7)



1. Calor químico da combustão

$$Q_q = BQ_i^t = B \cdot 40419,85 \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde

B é o caudal do combustível, em kg/h ou m³/h;

Q_i^t é o poder calorífico inferior do combustível em massa de trabalho dado em kJ/kg ou kJ/m³.



2. Calor físico do ar pré-aquecido

$$Q_a = \dot{B} c_a t_a \alpha V_{ar}^o = \dot{B} \cdot 2441,46 \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde

t_a é a temperatura do ar de pré-aquecimento em °C

C_a é o calor específico do ar dos 0°C até t_a kJ/(m³°C)

α é o coeficiente de excesso de ar

V_{ar}^o é a quantidade teórica de ar requerida para queimar uma unidade de combustível em m³/kg ou m³/m³.



3. Calor físico do combustível pré-aquecido

$$Q_c = \dot{B}c_f t_f = \dot{B} \cdot 168 \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde:

c_f é o calor específico do combustível em °C até t_f em $\text{kJ}(\text{m}^3\text{°C})$

t_f é a temperatura de pré-aquecimento de combustível em °C.

O calor útil será a soma dos calores de 1 a 3

$$Q_{util} = Q_q + Q_a + Q_c$$

$$Q_{util} = B \cdot 43029,31 \text{ kJ/h}$$



4. O calor das reacções exotérmicas

Este item do balanço de calor engloba todas as reacções químicas dando um efeito térmico positivo, excepto as reacções de combustão do combustível. Nos fornos de aquecimento de metal o calor libertado pela sua oxidação é também tomado em conta. Um quilograma de metal liberta 5652 kJ de calor por causa do qual:

$$Q_{ex} = 5652 \cdot P \cdot a \quad [\text{kJ/h}]$$

$$Q_{ex} = 2825000 \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde:

P é a produtividade do forno em kg/h

a são perdas por oxidação do metal em kg/kg do metal. (usou-se 1%)



I. O calor requerido para o aquecimento e fusão do material

Com material frio a ser carregado no forno

$$Q_{us} = Gc_m t_{m.f} \quad [\text{kJ/h}]$$

Com material pré-aquecido a ser carregado no forno

$$Q_{ust} = G(c_m t_{m.f} - c_m t_{m.in}) = 41820000 \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde

G é o fluxo mássico do material em kg/h

$t_{m.f}$ é a temperatura final do material a aquecer em °C

$t_{m.in}$ é a temperatura inicial do material em °C

c_{mf} é o calor específico médio do metal no intervalo de temperaturas de 0°C a $t_{m.f}$ em kJ/kg

c_m é o calor específico médio do metal no intervalo de temperaturas de 0°C ate $t_{m.in}$ em kJ/kg

nos fornos de fusão de metal o calor latente de fusão do material também dever ser considerado



II. Calor perdido com a escória

$$Q_{sl2} = G_{sl} c_{sl} t_{sl} \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde

G_{sl} é a massa da escória em kg

t_{sl} é a temperatura da escória em °C

c_{sl} é o calor específico da escória em kJ/kg°C.



III. O calor Q_3 é típico dos fornos destinados à fusão do material, geralmente apenas inclui o calor perdido na decomposição de argilas.

IV. Calor perdido com os gases de escape

$$Q_4 = B v_{wg} c_{wg} t_{wg} \quad [\text{kJ/h}]$$

$$Q_4 = B \cdot 17281,590 \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde:

t_{wg} é a temperatura dos gases de escape a saída do forno em °C

c_{wg} é o calor específico dos gases em $\text{kJ}/(\text{m}^3\text{°C})$.

Uma certa quantidade de gases sai do forno através da boca do forno, fendas etc. por esta razão v_{wg} deve ser usado somente condicionalmente como a quantidade total de gases produzidos na combustão de uma unidade massa ou volume de combustível.



V. Calor químico devido à combustão incompleta de combustível

Numa combustão com chama virtualmente não há perda de calor devido à combustão incompleta. Numa combustão com chama usualmente os gases da combustão tem 0,5 a 3 por cento de gases não queimados, (CO e H₂). Assume-se que 0.5% de H₂ diminuem em 1% CO.

O valor do calor de uma mistura dessas é de 12 142kJ/m³. Definindo por *a* a proporção de CO não queimado, o calor perdido fica:

$$Q_5 = Bv_{wg} a \cdot 12142 \quad [\text{kJ/h}]$$

$$Q_5 = B \cdot 1764,820 \quad [\text{kJ/h}]$$

ou

$$Q_5 = Bv_{wg} a \cdot 2900 \quad [\text{kcal/h}]$$

Onde v_{wg} é a quantidade dos gases de escape a saída do forno em m³/m³.

(usou-se a=0,01)



VI. Calor da combustão mecânica incompleta

Este item engloba muitas perdas de combustível. Por exemplo as perdas mecânicas na combustão de combustível sólido normalmente variam de 3 a 5% logo:

$$Q_6 = (0,03 - 0,05) B Q_i^t \quad [\text{kJ/h}]$$

Com combustível gasoso devido ao escapamento do gás

$$Q_6 = (0,02 - 0,03) B Q_i^t \quad [\text{kJ/h}]$$

$$Q_6 = \dot{B} \cdot 808,397 \quad [\text{kJ/h}]$$

Com combustível líquido normalmente é perdido cerca de 1% do combustível

$$Q_6 = 0,01 B Q_i^t \quad [\text{kJ/h}]$$



VII. Calor perdido por condução através do revestimento

O calor perdido através do tecto, paredes e parte da soleira do forno é calculado pela equação

$$Q_{l7} = \frac{t_1 - t_a}{s_1 / \lambda_1 + s_2 / \lambda_2 + 1 / \alpha} \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde:

t_1 é a temperatura da superfície interna do forno em °C;

t_a é a temperatura ambiente em °C;

s_1 e s_2 são as espessuras do forro de material refractário e do isolamento em m;

λ_1 e λ_2 são as condutividades do forro de material refractário e do isolamento em $\text{W}/(\text{m}^\circ\text{C})$.



VII.1 Calor Perdido pelo Teto

| | | |
|----------------------|---------|-------------------------|
| Área do Teto | 97 | m ² |
| Temperatura exterior | 25 | °C |
| Temperatura média | 647,837 | °C |
| Espessura do teto | 0,3 | m |
| k Tijolo | 1,1146 | W/(m°C) |
| k Tijolo (horas) | 4,01261 | kJ/(m.h°C) |
| h ambiente | 19,8 | W/(m ² °C) |
| h ambiente (horas) | 71,28 | kJ/(m ² h°C) |



$$Q_{l7} = \frac{t_l - t_a}{s_l / \lambda_1 + 1 / h} \quad [\text{kJ/h}]$$

$$Q_{l7} = 1360805,537 \quad [\text{kJ/h}]$$

VII.2 Calor Perdido pelas Paredes

| | | |
|--------------------------|-----------|-------------------------|
| Área da Parede | 77,4 | m ² |
| Temperatura média | 710,337 | °C |
| Espessura | 0,345 | m |
| k Tijolo | 1,154616 | W/(m°C) |
| k Tijolo (horas) | 4,15661 | kJ/(m.h°C) |
| Temperatura no interface | 150 | °C |
| Espessura | 0,115 | m |
| k deodolomite | 0,1483875 | W/(m°C) |
| k deodolomite (horas) | 0,534195 | kJ/(mh°C) |
| h ambiente | 19,8 | W/(m ² °C) |
| h ambiente (horas) | 71,28 | kJ/(m ² h°C) |



$$Q_{l7} = \frac{t_l - t_a}{s_l / \lambda_1 + s_2 / \lambda_2 + 1 / \alpha} \quad [\text{kJ/h}]$$

$$Q_{l7} = 308719,893 \quad [\text{kJ/h}]$$

VIII. Calor perdido por radiação quando as portas do forno são abertas

$$Q_8 = C_o (T/100)^4 F \Phi \varphi \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde

C_o é a emissividade do corpo negro, $5,768\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ou $4,96\text{ kcal}/(\text{m}^2\text{K}^4)$

T é a temperatura média no forno em K

F é a área da porta quando aberta em m^2

Φ é o coeficiente de defragmentação, (pode ser consultado na Tabela) φ é o tempo, (fracção de hora) em que a porta é mantida aberta

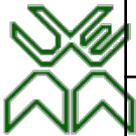


Valores do coeficiente de diafragmação

Tabela 10.1

| Largura da porta ⁽¹⁾ mm | Altura da porta em mm | | | | Largura da porta ⁽²⁾ mm | Altura da Porta em mm | | | |
|---------------------------------------|-----------------------|------|------|------|---------------------------------------|-----------------------|------|------|------|
| | 250 | 450 | 600 | 700 | | 250 | 450 | 600 | 700 |
| 300 | 0,70 | 0,73 | 0,76 | 0,78 | 600 | 0,49 | 0,53 | 0,56 | 0,58 |
| 600 | 0,78 | 0,8 | 0,82 | 0,84 | 900 | 0,52 | 0,57 | 0,60 | 0,62 |
| 900 | 0,79 | 0,83 | 0,85 | 0,87 | 1200 | 0,55 | 0,69 | 0,63 | 0,65 |
| 1200 | 0,81 | 0,85 | 0,87 | 0,89 | 1500 | 0,56 | 0,61 | 0,64 | 0,67 |
| 1500 | 0,82 | 0,86 | 0,89 | 0,91 | | | | | |

1 Espessura da parede 230 mm
2 Espessura da parede 460 mm



VIII. Calor perdido por radiação quando as portas do forno são abertas

| | | |
|------------------|----------|-------------|
| Temp gases | 1270,675 | °C |
| Co | 5,768 | W/(m²K⁴) |
| Co (horas) | 20,7648 | kJ/(m²h°K⁴) |
| Altura | 0,45 | m |
| Largura | 1,2 | m |
| área | 0,54 | m² |
| Cof de Diafragma | 0,69 | |
| Tempo | 30 | minutos |



$$Q_8 = C_o (T/100)^4 F \Phi \varphi \quad [\text{kJ/h}]$$

$$Q_8 = 219752,025 \quad [\text{kJ/h}]$$

IX. Calor perdido durante o aquecimento do recipiente

Com recipientes frios a [273 K (0°C)] a quantidade de calor requerida para aquecer o forno é:

$$Q_g = G_c c_c t_c \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde

G_c é a massa do recipiente em kg/h

C_c calor específico médio do recipiente no intervalo de temperaturas de 0 a t_c em kJ/(kg°C)

Se o recipiente estiver quente deve-se apenas considerar o calor adicional gasto.



X. Calor perdido com a água de arrefecimento do forno

As perdas de calor devido ao arrefecimento do forno, são determinadas por meio de processos experimentais. Essas perdas usualmente estão entre os 10 a 15% do calor total fornecido

$$Q_{H_2O} = \dot{B} \cdot 0,1 \cdot (Q_q + Q_a + Q_c) \text{ kJ/h}$$

$$Q_{H_2O} = \dot{B} \cdot 4302,931 \text{ kJ/h}$$

Utilizou-se o valor mínimo, 10%



XI. Perdas de calor acumulado no revestimento

$$Q_{ac11} = V_1 \rho_1 c_1 t_1 \quad [\text{kJ/período}]$$

Onde:

V_1 é o volume do revestimento em m^3

ρ_1 é a densidade do revestimento em kg/m^3

c_1 é o calor específico do revestimento em $\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$

t_1 é a temperatura média de aquecimento do revestimento



XII. Perdas de calor não contabilizáveis

$$Q_{12} = \dot{B} \cdot (0,1 - 0,15) \cdot (Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11}) \quad [\text{kJ/h}]$$

$$Q_{12} = \dot{B} \cdot (0,1 - 0,15) \cdot (Q_q + Q_a + Q_c) \quad [\text{kJ/h}]$$

$$Q_{12} = \dot{B} \cdot 6454,397 \quad [\text{kJ/h}]$$

Somando separadamente os itens de entrada e de saída os dois somatórios devem ser $Q_{\text{in}} = Q_{\text{out}}$. Isto dá uma equação com uma incógnita que é o consumo de combustível **B**. Conhecido **B** todos os itens do balanço de calor podem ser calculados.

Quando se analisa os balanços térmicos de um forno, a tabela de balanços térmicos pode ser útil para identificar qual das variáveis de saída é excessivamente alta e também para identificar do mau funcionamento do forno.



Consumo de combustível

$$\dot{B} \cdot Q_i + B \cdot Q_a + B \cdot Q_c + Q_{ex} = Q_I + Q_{II} + Q_{III} + B \cdot Q_{IV} + B \cdot Q_V + B \cdot Q_{VI} + Q_{VII} + Q_{VIII} + Q_{IX} + B \cdot Q_X + Q_{XI} + B \cdot Q_{XII}$$

$$B \cdot Q_i + B \cdot Q_a + B \cdot Q_c - B \cdot Q_{IV} - B \cdot Q_V - B \cdot Q_{VI} - B \cdot Q_X - B \cdot Q_{XII} = Q_I + Q_{II} + Q_{III} + Q_{VII} + Q_{VIII} + Q_{IX} + Q_{XI} - Q_{ex}$$

$$B \cdot (Q_i + Q_a + Q_c - Q_{IV} - Q_V - Q_{VI} - Q_X - Q_{XII}) = Q_I + Q_{II} + Q_{III} + Q_{VII} + Q_{VIII} + Q_{IX} + Q_{XI} - Q_{ex}$$

$$\dot{B} = \frac{Q_I + Q_{II} + Q_{III} + Q_{VII} + Q_{VIII} + Q_{IX} + Q_{XI} - Q_{ex}}{(Q_i + Q_a + Q_c - Q_{IV} - Q_V - Q_{VI} - Q_X - Q_{XII})}$$

$$\dot{B} = 2727,470 \text{ m}^3 / h$$

$$\dot{B} = 0,757 \text{ m}^3 / s$$



Consumo específico do combustível

A qualidade de operação de muitos fornos é comparada com recurso aos valores dos consumos e dos calores específicos.

O consumo específico do combustível revela a quantidade de calor consumido para aquecer 1 kg do metal até a temperatura desejada.

O consumo específico de combustível é frequentemente calculado em termos de combustível standard. O combustível standard é um combustível hipotético cujo calor específico é de 29 330 kJ/kg. Dai o consumo específico de combustível será:



Para Q_i^t expresso em kJ/kg ou kJ/m³

$$BQ_i^t / 29330 \quad [\text{kJ/s}]$$

36

$$0,757 \cdot 40419,85 / 29330 = 1,043 \quad [\text{kJ/s}]$$