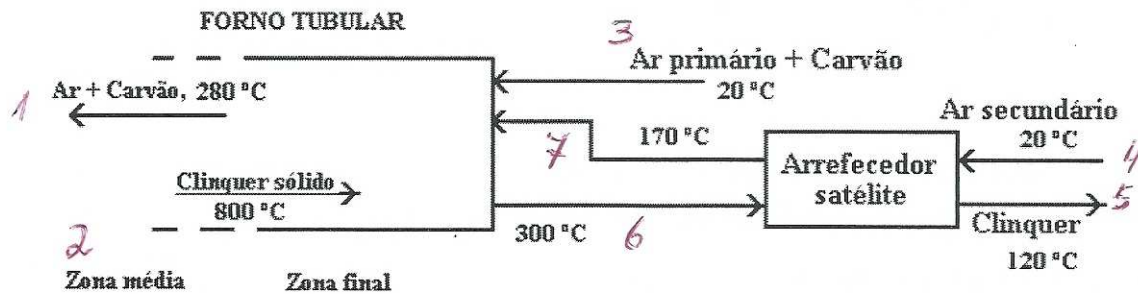


## Caso 1.6

No fabrico de cimento, produz-se "clinker" (mistura de diversos óxidos) a 1400 °C na zona inicial do forno tubular. Na zona média do forno, o clinker é arrefecido até à solidificação (800 °C). De seguida a mistura sólida é gradualmente arrefecida até 120 °C, por circulação em contra-corrente com uma mistura de ar e carvão.



Para melhor visualização desta última etapa de arrefecimento do clinker, considere que ela é realizada em duas fases:

1ª - Zona final do forno: O clinker arrefece de 800 a 300 °C, por transferência de calor para o ar "primário" injectado juntamente com o carvão pulverizado, e para o ar "secundário" proveniente dos arrefecedores satélites.

2ª - Arrefecedores satélites: A massa de "clinker" arrefece até 120 °C, por circulação em contra-corrente com o ar "secundário".

Para uma produção horária de 10 ton de clinker, calcular:

- A perda calorífica global na zona final do forno+arrefecedor satélite. (R = 1049 MJ/h)
- A perda calorífica no arrefecedor satélite. (R = 416 MJ/h)

Dados:

- Admita, como simplificação, que o clinker apresenta a seguinte composição mássica: CaO - 66%; SiO<sub>2</sub> - 21%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 9%; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 4%.
- Consumo de matérias primas: Carvão = 2 ton/h; Ar primário= 12 ton/h; Ar secundário = 8 ton/h.
- Massa molar: CaO - 56; SiO<sub>2</sub> - 60; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 101,9; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 160

Este problema envolve óxidos a temperaturas elevadas e assim antes de começarmos com a resolução deste problema devemos consultar a Tabela da Página II.65 das Tabelas de PEQ para verificarmos se ocorre alguma transição sólido-sólido.

### Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Segundo a Tabela ocorre a transição  $\alpha \rightarrow \beta$  a 950 K (676,85°C) com  $\Delta H_T = 0,16$  kcal/mole, a transição  $\beta \rightarrow \gamma$  a 1050 K (776,85 °C) com  $\Delta H_T = 0$  e posteriormente a decomposição do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $\gamma$ . Assim só a primeira destas transições é que é relevante.

FeO	solid	1641	7.5	4.6	12.9
	liquid	(2700)	(55)	(20)	—
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	solid, $\alpha$	900	(0)	(0)	35,0
	solid, $\beta$	dec.	—	—	—
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	solid, $\alpha$	950	0.16	0.17	21.5
	solid, $\beta$	1050	0	0	—
	solid, $\gamma$	dec.	—	—	—
Ga <sub>2</sub> O	solid	(925)	(8.5)	(9.2)	(22.5)

### SiO<sub>2</sub> quartzo

A SiO<sub>2</sub> apresenta duas formas alotrópica: o quartzo e a cristobilita, mas esta última é muito rara. Segundo a Tabela, para o quartzo, ocorre a transição  $\alpha \rightarrow \beta$  a 856 K (582,85°C) com  $\Delta H_T = 0,15$  kcal/mole, a transição  $\beta \rightarrow$  líquido a 1883 K (1609,85°C) com  $\Delta H_T = 2,04$  kcal/mole e posteriormente a decomposição do líquido. Assim só a primeira destas transições é que é relevante.

SiO	solid	(2550)	(12)	(4.7)	(6.5)
SiO <sub>2</sub>	solid, $\alpha$	856	0.15	0.18	10.06
	solid, $\beta$	1883	2.04	1.08	—
	liquid	dec. 2250	—	—	—

Os restante óxidos não sofrem qualquer transição sólido-sólido.

Agora já se pode seleccionar o Estado de referência e começar-se com a resolução deste problema.

Estado de referência: 20°C para o ar e carvão, 120°C para o clínquer  
 ar (g), C (coque), SiO<sub>2</sub> (quartzo,  $\alpha$ ), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $\alpha$ ), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO (c)  
 $P_T$

A escolha deste Estado referência faz com que  $\Delta H_3 = \Delta H_4 = \Delta H_5 = 0$ .

O carbono poderia estar na forma de diamante, grafite ou coque, mas neste problema o carvão está na forma de coque.

A resolução deste problema é trabalhosa por precisarmos de recorrer às Tabelas para recolher muitos dados e depois fazerem-se vários integrais. Poupa-se tempo e trabalho se fizermos essa pesquisa e esses cálculos em simultâneo e antes de verdadeiramente se começar a resolver o problema.

**SiO<sub>2</sub> α** (Tabela da Página II.11)

$$C_p = 10,87 + 0,008712 T - 241200 / T^2$$

$$\bar{C}_p = \int_{T_{ref}}^T \frac{a + bT - c/T^2 dt}{T - T_{ref}} = \frac{a(T - T_{ref}) + \frac{b}{2}(T^2 - T_{ref}^2) - c(1/T_{ref} - 1/T)}{T - T_{ref}}$$

$$\bar{C}_p \text{ entre } 120^\circ\text{C e } 300^\circ\text{C} = 14,009 \text{ cal/mole K} = 0,233 \text{ cal/g K}$$

$$\bar{C}_p \text{ entre } 120^\circ\text{C e } 582,85^\circ\text{C} = 15,595 \text{ cal/mole K} = 0,260 \text{ cal/g K}$$

**SiO<sub>2</sub> β**

$$C_p = 10,95 + 0,0055 T - 241200 / T^2$$

$$\bar{C}_p \text{ entre } 582,85^\circ\text{C e } 800^\circ\text{C} = 16,256 \text{ cal/mole K} = 0,271 \text{ cal/g K}$$

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

$$C_p = 22,08 + 0,008971 T - 522500 / T^2$$

$$\bar{C}_p \text{ entre } 120^\circ\text{C e } 300^\circ\text{C} = 24,096 \text{ cal/mole K} = 0,236 \text{ cal/g K}$$

$$\bar{C}_p \text{ entre } 120^\circ\text{C e } 800^\circ\text{C} = 27,419 \text{ cal/mole K} = 0,269 \text{ cal/g K}$$

**CaO**

$$C_p = 10 + 0,00484 T - 108000 / T^2$$

$$\bar{C}_p \text{ entre } 120^\circ\text{C e } 300^\circ\text{C} = 11,859 \text{ cal/mole K} = 0,212 \text{ cal/g K}$$

$$\bar{C}_p \text{ entre } 120^\circ\text{C e } 800^\circ\text{C} = 13,292 \text{ cal/mole K} = 0,237 \text{ cal/g K}$$

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

$$C_p = 24,72 + 0,01604 T - 423400 / T^2$$

$$\bar{C}_p \text{ entre } 120^\circ\text{C e } 300^\circ\text{C} = 30,591 \text{ cal/mole K} = 0,191 \text{ cal/g K}$$

$\bar{C}_p$  entre 120°C e 800°C = 35,476 cal/mole K = 0,222 cal/g K

Ar (Tabela da Página II.26, low range)

$$C_p = 6,713 + 0,04697 \times 10^{-2} T + 0,1147 \times 10^{-5} T^2 - 0,4696 \times 10^{-9} T^3$$

$$\bar{C}_p = \int_{T_{ref}}^T \frac{a + bT + cT^2 + dT^3 dt}{T - T_{ref}} = \frac{a(T - T_{ref}) + \frac{b}{2}(T^2 - T_{ref}^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_{ref}^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_{ref}^4)}{T - T_{ref}}$$

$\bar{C}_p$  entre 20°C e 170°C = 7,013 cal/mole K

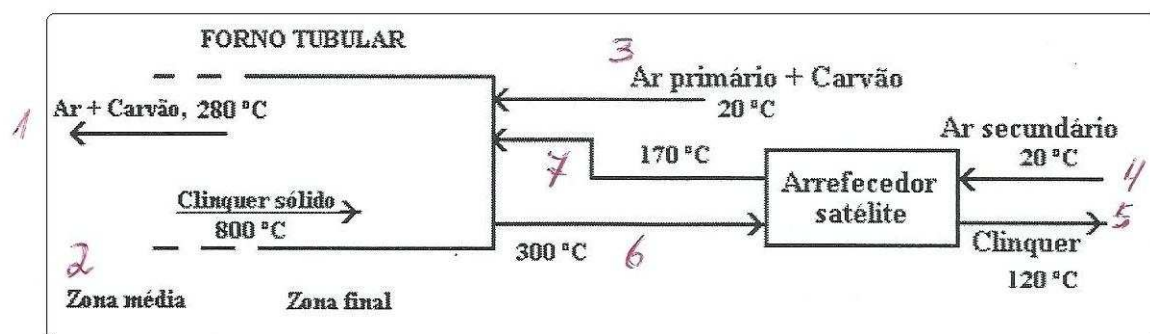
$\bar{C}_p$  entre 20°C e 280°C = 7,081 cal/mole K

Coque (em inglês: coke) (Tabela da Página II.25, miscellaneous)

$$C_p = 0,265 \text{ cal/g K}$$

### A) Perda de calor global

Como se pede a perda global de calor é necessário considerar-se como Zona de controle todo o flow-sheet:



$$\text{Vem: } \Delta H_2 + \Delta H_3 + \Delta H_4 = \Delta H_1 + \Delta H_5 + P_G$$

$$\text{Sendo: } \Delta H_3 = \Delta H_4 = \Delta H_5 = 0$$

Para se calcular a  $\Delta H_1$  é necessário calcular-se o caudal de ar:

Vou considerar PM do ar = 28,9 g/mole

$$\text{Ar primário} = 12 \text{ ton/h} \rightarrow 12 \times 10^6 / 28,9 = 4,15225 \times 10^5 \text{ mole/h}$$

$$\text{Ar secundário} = 8 \text{ ton/h} \rightarrow 8 \times 10^6 / 28,9 = 2,76817 \times 10^5 \text{ mole/h}$$

$$\text{Ar total} = 4,15225 \times 10^5 + 2,76817 \times 10^5 = 6,92042 \times 10^5 \text{ mole/h}$$

$$\Delta H_1 = (2 \times 10^6 \times 0,265 + 6,92042 \times 10^5 \times 7,081) \times (280 - 20) = 1,41189 \times 10^9 \text{ cal/h}$$

$$\Delta H_2 = 10 \times 10^6 \times (0,66 \times 0,237 + 0,009 \times 0,269 + 0,04 \times 0,222) \times (800 - 120) +$$



$$+ 10 \times 10^6 \times 0,04 \times 160 / 160 +$$

**Transição do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

$$+ 10 \times 10^6 \times 0,21 \times [0,260 \times (582,85 - 120) + 150 / 60 + 0,271 \times (800 - 582,85)] = 1,67061 \times 10^9 \text{ cal/h}$$

**SiO<sub>2</sub>**

Nota: Na parcela da transição do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aparece duas vezes o 160. No numerador o 160 cal/mole é o ΔH<sub>T</sub> do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. No denominador o 160 é o PM do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Nota: O cálculo para a SiO<sub>2</sub> foi dividido em duas partes com Cp distintos, antes e depois da transição. O 60 em denominador é o PM da SiO<sub>2</sub>. Não se fez o mesmo para o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> porque o Cp do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> β não se encontra tabelado.

Substituindo-se:

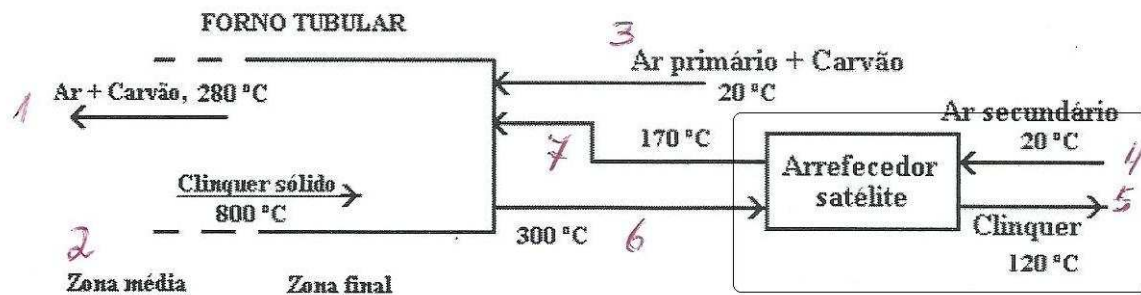
$$\Delta H_2 + \Delta H_3 + \Delta H_4 = \Delta H_1 + \Delta H_5 + P_G$$

$$1,67061 \times 10^9 + 0 + 0 = 1,41189 \times 10^9 + 0 + P_G$$

$$P_G = 1,67061 \times 10^9 - 1,41189 \times 10^9 = 2,5872 \times 10^8 \text{ cal/h } (\div 3600) = 7,1886 \times 10^8 \text{ cal/s} = \mathbf{300 \text{ kW}}$$

## B) Perda de calor no arrefecedor satélite

Agora devemos escolher uma zona de controle à volta de arrefecedor satélite:



Vem  $\Delta H_4 + \Delta H_6 = \Delta H_5 + \Delta H_7 + P_{AS}$

$$\Delta H_4 = \Delta H_5 = 0$$

$$\Delta H_6 = 10 \times 10^6 \times (0,66 \times 0,212 + 0,09 \times 0,236 + 0,04 \times 0,191 + 0,21 \times 0,233) \times (300 - 120) = 3,91914 \times 10^8 \text{ cal/h}$$

$$\Delta H_7 = 2,76817 \times 10^5 \times 7,013 \times (170 - 20) = 2,91198 \times 10^8 \text{ cal/h}$$

Substituindo-se:

$$0 + 3,91914 \times 10^8 = 0 + 2,91198 \times 10^8 + P_{AS}$$

$$\text{Vem: } P_{AS} = 3,91914 \times 10^8 - 2,91198 \times 10^8 = 1,00716 \times 10^8 \text{ cal/h} = \mathbf{4,1898 \times 10^8 \text{ J/h}}$$