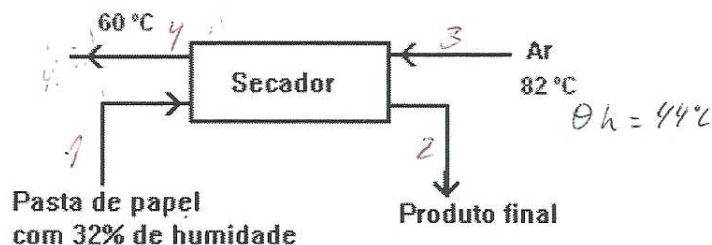


### Caso 4.10

Numa dada fase do fabrico de papel, submete-se uma pasta contendo 32 % de humidade a uma secagem em contra-corrente com ar a 82 °C, pressão atmosférica, e temperatura de termómetro húmido de 44 °C, de forma a obter um produto final com 4% de humidade.



Para 1 tonelada de pasta de papel “seca” produzida, calcular o volume (PTS) de ar a 82 °C alimentado ao secador, para as seguintes hipóteses:

# Hipótese I – A humedificação do ar é isentálpica.

# Hipótese II - O secador de túnel é adiabático. A pasta de papel entra no secador a 24 °C e é descarregada a 32 °C.

Comente as aproximações realizadas na hipótese I.

#### Dados:

- Capacidade calorífica média da pasta de papel, cal/g, °C: 0,32
- Entalpia de vaporização da água (0 °C), kJ/kg = 2498
- Capacidades caloríficas médias de gases entre (60 e 0 °C), kJ/(kg, °C): Ar = 1,01; Vapor de água = 1,87.

A resolução deste problema, como de qualquer problema de secagem, começa sempre pelo balanço mássico ao sólido para determinação da água evaporada.

kg	1	2	ag ev
Pasta	960	960	
Água	451,765	40	411,765
Total	1411,765	1000	411,765

### Hipótese 1 – Humidificação isentálpica (ou adiabática)

Humidificação isentálpica (entalpia constante) é sinónimo de secagem adiabática e significa que a entalpia do ar é constante durante a secagem, logo a entalpia do sólido também é constante.

Por simplificação consideramos que a entalpia do sólido é constante quando a sua temperatura não varia.

Como estamos perante uma secagem adiabática podemos resolver o problema usando a carta psicrométrica.

#### Corrente 3

Pela Carta Psicrométrica temos:  $T = 82 \text{ °C}$  e  $\theta_h = 44 \text{ °C}$

Obtem-se  $Ha_3 = 0,043 \text{ g água/g ar seco}$

$Hm_3 = Ha_3 / 0,62 = 0,0694 \text{ mole agua/mole ar seco}$

#### Corrente 4

Pela Carta Psicrométrica temos:  $T = 60 \text{ °C}$  e  $\theta_h = 44 \text{ °C}$

Obtem-se  $Ha_4 = 0,055 \text{ g água/g ar seco}$

$Hm_4 = Ha_4 / 0,62 = 0,0887 \text{ mole agua/mole ar seco}$

Fazendo o balanço mássico à água

$ag_{ev} = Q_{as} \times (Hm_4 - Hm_3)$

$$\frac{411,765}{0,018} = Q_{as} \times (0,0887 - 0,0694)$$

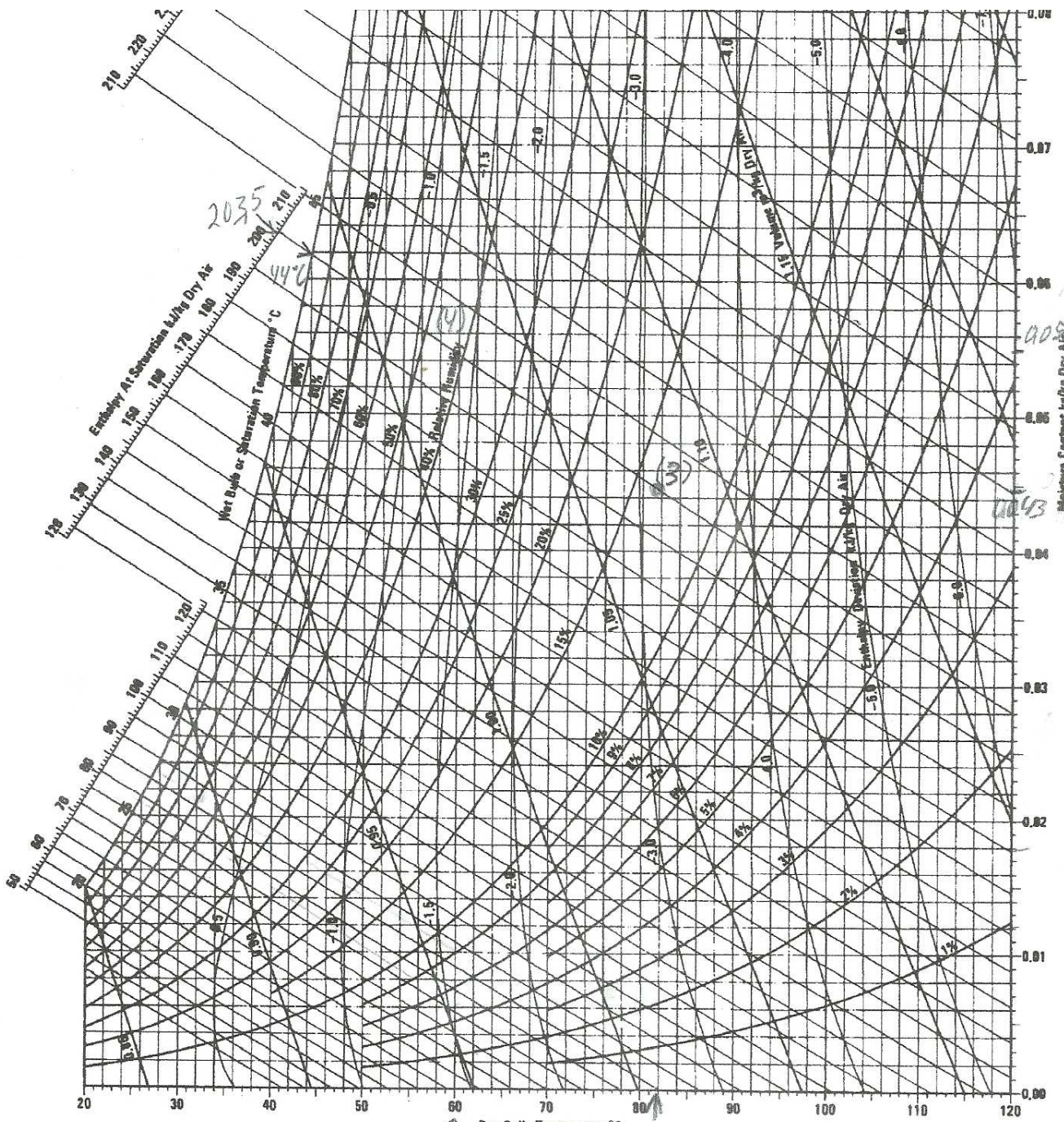
Vem:  $Q_{as} = 1,1853 \times 10^6 \text{ moles}$

$Q_{ar} = Q_{as} \times (1 + Hm_3) = 1,1853 \times 10^6 \times (1 + 0,0694) = 1,2676 \times 10^6 \text{ moles}$

$Q_v = Q_{molar} \times VM = 1,2676 \times 10^6 \times 22,4 = 2,8393 \times 10^7 \text{ L} = 28393 \text{ m}^3/\text{ton de pasta seca}$

Nota: Neste problema, quando no enunciado se refere a pasta seca, refere-se a “pasta secada”. É uma questão de Português.

Este problema depende muito dos erros na leitura da Carta Psicrométrica. Um pequeno erro na leitura dos  $Ha$  pode originar erros superiores a 50%



2035  
 44°C  
 Wet Bulb or Saturation Temperature °C  
 Enthalpy At Saturation kJ/kg Dry Air

↑ Dry Bulb Temperature °C  
 60°C      82°C

Moisture Content kg/kg Dry Air  
 0.043  
 0.085

## Hipótese 2 – Secador Adiabático e temperatura da pasta a variar

Neste caso estamos numa situação em que o equipamento / secador é adiabático, sem trocas de calor com o exterior, mas a secagem não é adiabática pois há transferência de calor entre o ar e o sólido a secar.

Assim, este caso não pode ser resolvido através da Carta Psicrométrica. Terá que ser resolvido através dum balanço entálpico.

Contudo, como estamos à pressão atmosférica, podemos usar a Carta Psicrométrica para ler valores isolados.

### Balanço entálpico

Estado de referência: 0 °C, ar (g), H<sub>2</sub>O (l), Pt

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

$$C_p \text{ pasta seca} = 0,32 \text{ cal/g K}$$

$$\Delta H_{v, H_2O}^{0^\circ C} = 2498 \text{ J/g}$$

$$C_p^{0,60^\circ C} \text{ ar} = 1,01 \text{ J/g K}$$

$$C_p^{0,60^\circ C} \text{ H}_2\text{O} = 1,87 \text{ J/g K}$$

$$\Delta H_1 = (960 \times 10^3 \times 0,32 + 451,765 \times 10^3 \times 1) \times (24 - 0) = 1,82215 \times 10^7 \text{ cal} = 7,6139 \times 10^7 \text{ J}$$

$$\Delta H_2 = (960 \times 10^3 \times 0,32 + 40 \times 10^3 \times 1) \times (32 - 0) = 1,1110 \times 10^7 \text{ cal} = 4,6441 \times 10^7 \text{ J}$$

Corrente 3: Pela Carta Psicrométrica temos:  $T = 82 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $\theta h = 44 \text{ }^\circ\text{C}$

Obtem-se  $h_3 = 203,5 - 3,4 = 200,1 \text{ J/g ar seco}$  (a parcela -3,4 corresponde à correção à entalpia)

$$\Delta H_3 = 200,1 \times Q_{as}$$

$$\Delta H_4 = h_4 \times Q_{as}$$

Para se resolver este problema é necessário resolver-se um sistema  $3 \times 3$ . As incógnitas são:  $h_4$ ,  $Ha_4$  e  $Q_{as}$ , e as equações são o Balanço entálpico, Balanço mássico e a relação  $h_4 = f(Ha_4)$ .

### 1ª equação – Balanço entálpico

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

$$7,6139 \times 10^7 + 200,1 \times Q_{as} = 4,6441 \times 10^7 + h_4 \times Q_{as}$$

### 2ª equação – Balanço mássico

$$411,765 \times 10^3 = Q_{as} \times (Ha_4 - 0,043)$$

3ª equação – Relação  $h_4 = f(Ha_4)$

$$h_4 = 1,01 \times (60 - 0) + Ha_4 \times (1,87 \times (60 - 0) + 2498) = 60,6 + Ha_4 \times 2610,2$$

Resolvendo-se este sistema obtém-se:

$$\begin{aligned} Q_{as} &= 3,8336 \times 10^7 \text{ g} = 1,3293 \times 10^6 \text{ moles} \\ h_4 &= 200,875 \text{ J/g ar seco} \\ Ha_4 &= 0,05374 \text{ g agua/g ar seco} \end{aligned}$$

$$Hm_4 = Ha_4 / 0,62 = 0,086677 \text{ mole agua/mole ar seco}$$

$$P_{Mar} = 0,79 \times 28 + 0,21 \times 32 = 28,84 \text{ g/mole}$$

$$Q_{ar} = Q_{as} \times (1 + Hm_3) = 1,3293 \times 10^6 \times (1 + 0,0694) = 1,3385 \times 10^6 \text{ moles}$$

$$Q_V = Q_{molar} \times VM = 1,3385 \times 10^6 \times 22,4 = 2,9982 \times 10^7 \text{ L} = 29982 \text{ m}^3/\text{ton de pasta seca}$$

Nota: Como a Carta Psicrométrica tem o mesmo Estado de Referência das Tabelas Termodinâmicas, na relação  $h_4 = f(Ha_4)$  o valor  $(1,87 \times (60 - 0) + 2498) = 2610,2$  podia ser substituído pelo  $h_v$  a  $60^\circ\text{C}$  (2608,8 J/g, página II-59).

O uso das Tabelas Termodinâmicas dava um valor mais correcto, mas se no enunciado vêm valores de  $C_p$  e de  $\Delta H_V$  é para serem utilizados.