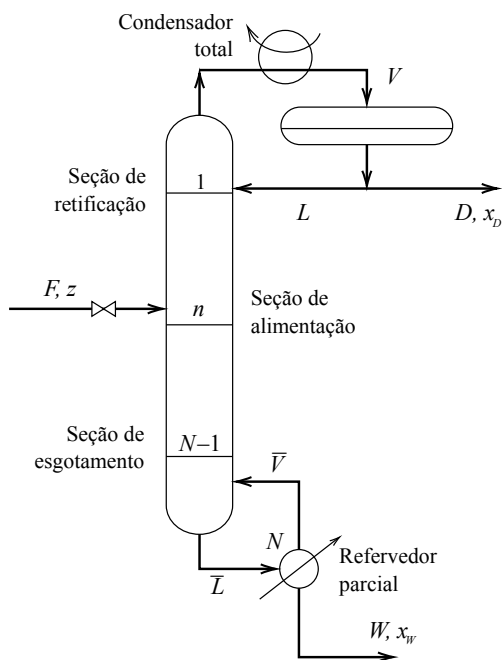


## Destilação com Refluxo



- Volatilidade relativa:

$$\alpha_{AB} = \frac{K_A}{K_B} = \frac{y_A/x_A}{y_B/x_B} \quad (1)$$

$$= \frac{p_A^{sat}/p}{p_B^{sat}/p} = \frac{p_A^{sat}}{p_B^{sat}} \quad (2)$$

$$y = \frac{\alpha_{AB} \cdot x}{1 + x(\alpha_{AB} - 1)}$$

- Variáveis envolvidas:

- Carga:  $F, z$ ;
- Produto de topo (destilado):  $D, x_D$ ;
- Produto de fundo:  $W, x_W$ ;
- Condições de operação:  $R_D$  (ou somente  $R$ );
- Dimensionamento:  $N, N_F, E_M, E_0, d_c, z$ .

- Condições limites de operação:

- $R_{\min}: N \rightarrow \infty$ ;
- $R_{\text{total}}: N_{\min}$ .

## Método Gráfico (McCabe-Thiele)

- Linha de operação da seção de alimentação:

$$y = \left( \frac{q}{q-1} \right) x - \frac{z}{q-1} \quad (3)$$

onde:

$$q = \frac{\bar{L} - L}{F} = \frac{h_V - h_F}{h_V - h_L} \quad (4)$$

- $q > 1$ : líquido subresfriado

$$q = 1 + \frac{c_{p,L}(T_b - T_F)}{\Delta h^{vap}} \quad (5)$$

- $q = 1$ : líquido saturado

- $0 < q < 1$ : líquido e vapor

$$q = 1 - f \quad (6)$$

- $q = 0$ : vapor saturado

- $q < 0$ : vapor superaquecido

$$q = \frac{c_{p,V}(T_d - T_F)}{\Delta h^{vap}} \quad (7)$$

- Linha de operação da seção de retificação ou enriquecimento:

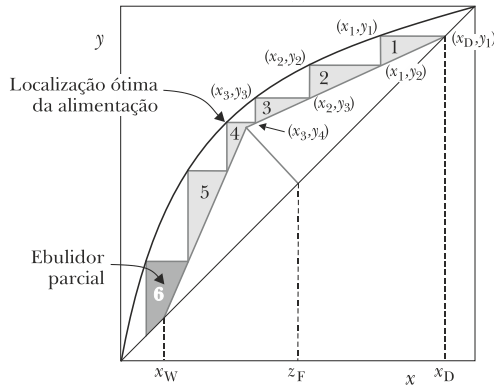
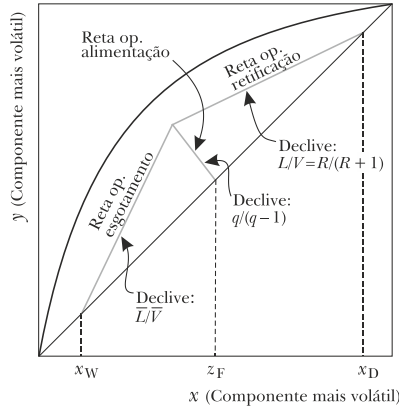
$$y = \left( \frac{R_D}{R_D + 1} \right) x + \frac{x_D}{R_D + 1} \quad (8)$$

onde  $R_D = L/D$  é a razão de refluxo.

- Linha de operação da seção de esgotamento:

$$y = \left( \frac{R_B + 1}{R_B} \right) x - \frac{x_W}{R_B} \quad (9)$$

onde  $R_B = \bar{V}/W$  é a razão de *boilup*.



- Razão de refluxo mínima,  $R_{\min}$ :

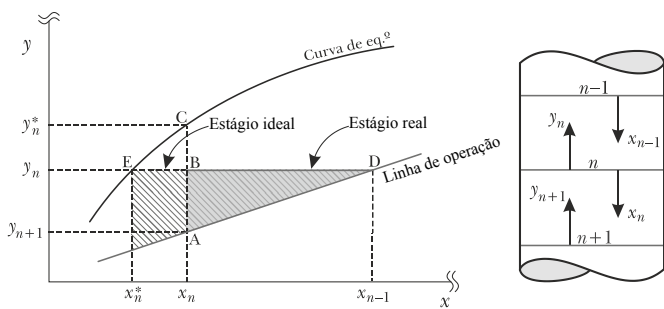
$$R_{\min} = \frac{x_D - y'}{y' - x'} \quad (10)$$

- Condensador,  $Q_C$ , e refervedor,  $Q_B$ :

$$Q_C = V \cdot \Delta h^{vap} \quad (11)$$

$$Q_B = \bar{V} \cdot \Delta h^{vap} \quad (12)$$

$$F \cdot h_F + Q_B = D \cdot h_D + W \cdot h_W + Q_C \quad (13)$$



- Eficiência de prato ou de Murphree,  $E_M$ :

$$E_{MV} = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}} \quad (14)$$

$$E_{ML} = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n^* - x_{n-1}} \quad (15)$$

- Eficiência global,  $E_0$ :

$$E_0 = \frac{N_{ideal}}{N_{real}} < 1 \quad (16)$$

## Método Algébrico (F.U.G.)

- Equação de Fenske:

$$N_{\min} = \frac{\log [(x_{D,i}/x_{D,j})(x_{W,j}/x_{W,i})]}{\log (\alpha_{i,j})} \quad (17)$$

com  $\alpha_{i,j}$  é aproximada por:

$$\alpha_{i,j} = (\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_R)^{1/N_{\min}} \approx (\alpha_1 \alpha_R)^{1/2} \quad (18)$$

Expressão alternativa:

$$N_{\min} = \frac{\log \left[ \frac{FR_{i,D} \cdot FR_{j,W}}{(1 - FR_{i,D})(1 - FR_{j,W})} \right]}{\log (\alpha_{i,j})} \quad (19)$$

sendo:

$$FR_{k,D} = \frac{\alpha_{k,j}^{N_{\min}}}{\frac{FR_{j,W}}{1 - FR_{j,W}} + \alpha_{k,j}^{N_{\min}}} \quad (20)$$

$$D \cdot x_{D,i} = FR_{i,D} \cdot F \cdot z_i \quad (21)$$

$$W \cdot x_{W,i} = (1 - FR_{i,D}) \cdot F \cdot z_i \quad (22)$$

onde  $k$  é um componente não-chave (NK).

- Equações de Underwood:

$$1 - q = \sum_{i=1}^C \left( \frac{\alpha_{i,HK} \cdot z_i}{\alpha_{i,HK} - \theta} \right) \quad (23)$$

$$R_{\min} + 1 = \sum_{i=1}^C \left( \frac{\alpha_{i,HK} \cdot x_{D,i}}{\alpha_{i,HK} - \theta} \right) \quad (24)$$

com  $1 < \theta < \alpha_{LK,HK}$ .

- Correlação de Gilliland:

$$Y = 0,75 - 0,75X^{0,5668} \quad (25)$$

onde  $Y = \frac{N - N_{\min}}{N + 1}$  e  $X = \frac{R - R_{\min}}{R + 1}$ .

- Equação de Kirkbride:

$$\frac{N_F - 1}{N - N_F} = \frac{N_{retif}}{N_{esgot}} = \left[ \left( \frac{W}{D} \right) \left( \frac{z_{HK}}{z_{LK}} \right) \left( \frac{x_{W,LK}}{x_{D,HK}} \right)^2 \right]^{0,206} \quad (26)$$

Determinação de  $N_F$  a partir de Fenske:

$$N_{F,\min} = \frac{\log [(x_{D,LK}/x_{D,HK})/(z_{LK}/z_{HK})]}{\log (\alpha_{LK,HK})} \quad (27)$$

$$\frac{N_{F,\min}}{N_{\min}} = \frac{N_F}{N} \quad (28)$$

## Colunas de Recheio

- Cálculo do Diâmetro,  $d_c$ :

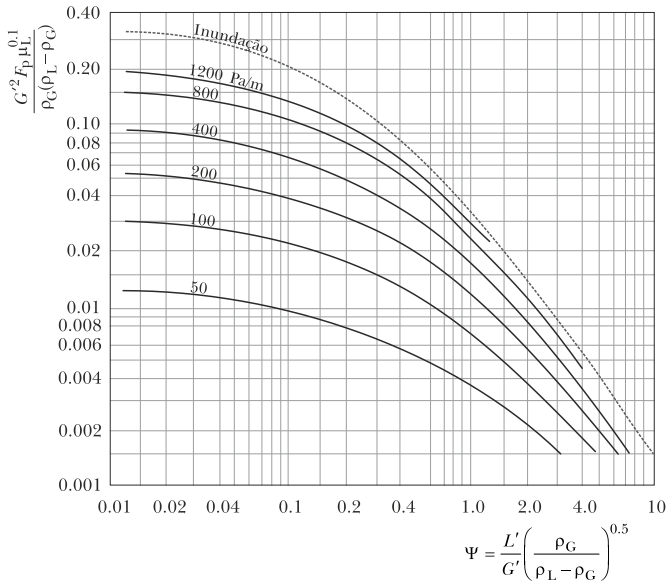


Figura 1: Queda de pressão,  $\Delta p/z$ , em colunas de recheio randômico de 1ª geração. Dados  $F_p$  em  $\text{ft}^{-1}$  e  $\mu_L$  em cP. Válido para  $F_p > 60 \text{ ft}^{-1}$ .

Tabela 1: Fatores de recheio randômico,  $F_p$  ( $\text{m}^{-1}$ ).

| Recheio                 | Dimensão, mm |            |              |            |              |            |
|-------------------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                         | 13<br>(0,5") | 25<br>(1") | 38<br>(1,5") | 50<br>(2") | 64<br>(2,5") | 75<br>(3") |
| <i>Anéis de Raschig</i> |              |            |              |            |              |            |
| Cerâmico                | 1 900        | 587        | 305          | 213        | –            | 121        |
| Metálico                | 984          | 470        | 270          | 187        | –            | 105        |
| <i>Anéis de Pall</i>    |              |            |              |            |              |            |
| Plástico                | –            | 180        | 130          | 131        | –            | –          |
| Metálico                | –            | 184        | 131          | 88         | –            | –          |
| <i>Selas de Berl</i>    |              |            |              |            |              |            |
| Cerâmico                | 790          | 360        | 215          | 150        | –            | –          |
| <i>Selas Intalox</i>    |              |            |              |            |              |            |
| Cerâmico                | 660          | 197        | 172          | 98         | –            | 70         |
| Plástico                | –            | 131        | –            | 92         | –            | 59         |
| <i>Anéis de Nutter</i>  |              |            |              |            |              |            |
| –                       | –            | –          | 98           | 79         | 59           | –          |

(a) Queda de Pressão,  $\Delta p/z$ :

- vácuo:  $\sim 8\text{--}40 \text{ Pa/m}$ .
- $\sim 1 \text{ atm}$ :  $\sim 400\text{--}600 \text{ Pa/m}$ .
- pressão elevada:  $\sim 800\text{--}1200 \text{ Pa/m}$ .

$$G' = \left[ Y \frac{\rho_G (\rho_L - \rho_G)}{F_p \mu_L^{0,1}} \right]^{0,5} \quad (29)$$

$$A = \frac{\overline{M}_G \cdot G}{G'} \quad (30)$$

$$d_c = \left( \frac{4A}{\pi} \right)^{0,5} \quad (31)$$

onde  $\overline{M}_G$  é a massa molar média do vapor.

Fator de capacidade do gás,  $C_G$ :

$$C_G = v_G \left[ \frac{\rho_G}{(\rho_L - \rho_G)} \right]^{0,5} \quad (32)$$

onde:

$$v_G = \frac{G'}{\rho_G} = \frac{G}{A \rho_G} \quad (33)$$

(b) Percentual de Inundação:

$$G' = \left[ Y_f \frac{\rho_G (\rho_L - \rho_G)}{C_f \mu_L^{0,1}} \right]^{0,5} \quad (34)$$

$$G'_{op} = (50\text{--}80\%) G'_f \quad (35)$$

$$d_c = \left( \frac{4G}{\pi G'_{op}} \right)^{0,5} \quad (36)$$

Para  $30 < F_p < 197 \text{ m}^{-1}$ , é válida a correlação:

$$(\Delta p/z)_f = 40,912 \cdot F_p^{0,7} \quad (37)$$

- Cálculo da Altura,  $z$ :

$$\text{HETP} = \frac{\text{altura de leito}}{\text{n}^\circ \text{ de pratos teóricos}} \quad (38)$$

$$z = (\text{HETP}) \times N \quad (39)$$

– Regra prática mais simples e antiga:

$$\text{HETP} = d_c \quad (40)$$

válida para colunas de  $d_c$  pequeno.

– Correlação empírica de Murch:

$$\text{HETP} = K_1 G^{K_2} d_c^{K_3} Z^{1/3} \left( \frac{\alpha \mu_L}{\rho_L} \right) \quad (41)$$

válida para colunas de  $d_c < 0,3 \text{ m}$  e onde  $Z$  é a altura de leito e  $K$  são constantes dadas pela Tabela 2.

Tabela 2: Constantes da correlação de Murch.

| Recheio      | Dimensão, mm | $K_1$     | $K_2$ | $K_3$ |
|--------------|--------------|-----------|-------|-------|
| <i>Anéis</i> | 10 (3/8")    | 654 598   | -0,37 | 1,24  |
|              | 13 (1/2")    | 3 241 429 | -0,34 | 1,24  |
|              | 25 (1")      | 1 056 621 | -0,1  | 1,24  |
|              | 50 (2")      | 1 506 802 | 0     | 1,24  |
| <i>Selas</i> | 13 (1/2")    | 640 768   | -0,45 | 1,11  |
|              | 25 (1")      | 671 084   | -0,14 | 1,11  |

## Absorção e Regeneração

- Relação entre razão molar ( $X, Y$ ) e fração molar ( $x, y$ ):

$$X = \frac{x}{1-x} \quad (42)$$

$$Y = \frac{y}{1-y} \quad (43)$$

onde a razão molar indica os moles de soluto por moles de L ou G em base livre de soluto.

- Cálculo de  $K$ :
  - Lei de Raoult:

$$K = \frac{p^{sat}}{p} \quad (44)$$

$$y = \frac{p^{sat}}{p} x \quad (45)$$

- Lei de Henry:

$$K = \frac{H}{p} \quad (46)$$

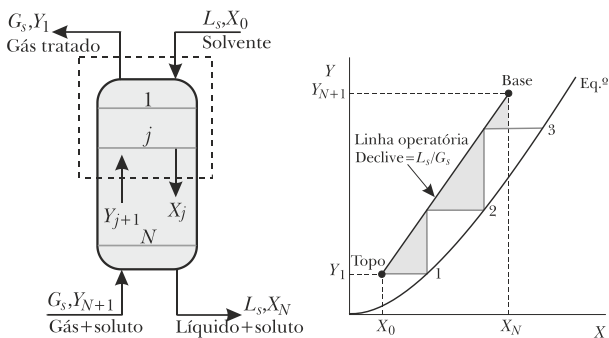
$$y = \frac{H}{p} x \quad (47)$$

- Variáveis envolvidas:

- Gás/vapor:  $G_s, Y_{N+1}$  (base),  $Y_1$  (topo);
- Líquido:  $L_s, X_N$  (base),  $X_0$  (topo);
- Condição de operação:  $L_s/G_s$ ;
- Dimensionamento:  $N, d_c, z$ .

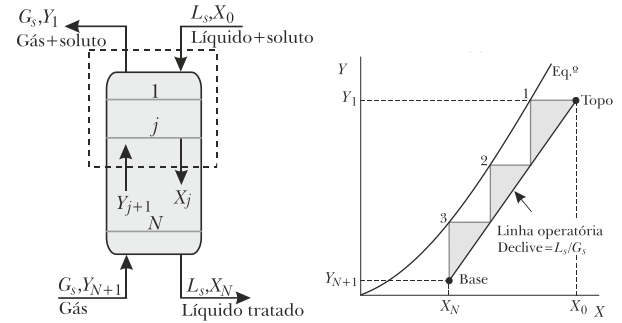
- Condições limites de operação:

- Absorção:  $(L_s/G_s)_{\min}$  ou  $(L_s)_{\min}$ :  $N \rightarrow \infty$ ;
- Regeneração:  $(L_s/G_s)_{\max}$  ou  $(G_s)_{\min}$ :  $N \rightarrow \infty$ .



- Linha de operação de absorção:

$$Y_{j+1} = \left(\frac{L_s}{G_s}\right) X_j + \left(Y_1 - \frac{L_s}{G_s} X_0\right) \quad (48)$$



- Linha de operação de regeneração (*stripping*):

$$Y_{j+1} = \left(\frac{L_s}{G_s}\right) X_j + \left(Y_1 - \frac{L_s}{G_s} X_0\right) \quad (49)$$

- Equação de Kremser (para  $L/G \neq m$ ):

$$N = \frac{\ln \left[ \left(1 - \frac{1}{A}\right) \left(\frac{y_{N+1} - m \cdot x_0}{y_1 - m \cdot x_0}\right) + \frac{1}{A} \right]}{\ln A} \quad (50)$$

$$N = \frac{\ln \left[ \left(1 - \frac{1}{S}\right) \left(\frac{x_0 - y_{N+1}/m}{x_N - y_{N+1}/m}\right) + \frac{1}{S} \right]}{\ln S} \quad (51)$$

onde  $A = L/mG$  e para um caso de regeneração,  $S = 1/A$ .

### Umidificação (Caso Especial de Regeneração)

- Propriedades do ar a partir da **carta psicrométrica**:
  - Temperatura de bulbo seco, bulbo úmido e de orvalho;
  - Umidade absoluta e relativa;
  - Volume específico;
  - Entalpia do ar úmido.

Se 2 quaisquer propriedades são conhecidas é possível determinar as demais a partir da **carta**.

### Referências para Consulta

- AZEVEDO, E. G.; ALVES, A. M. *Engenharia de Processos de Separação*. Lisboa: IST Press, 2009.
- CALDAS, J. N.; LACERDA, A. I.; VELOSO, E.; PASCHOAL, L. C. M. *Internos de Torres: Pratos & Recheios*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2007.
- SEADER, J. D.; HENLEY, E. J. *Separation Process Principles*. 2ª ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.