

Dimensionamento de Colunas

Coluna Recheada

Prof. Rodolfo Rodrigues
Universidade Federal do Pampa

BA310 – Operações Unitárias II
Curso de Engenharia Química
Campus Bagé

09 de outubro de 2018



Introdução



Introdução

- A variação de **composições** é **contínua** ao longo de toda a coluna recheada;
- O recheio proporciona um **contato mais íntimo** entre as 2 fases;
- Simultaneamente, o recheio deve assegurar:
 - boa **drenagem** do líquido e
 - baixa **perda de carga** do vapor.
- Os recheios podem ser **randômico** ou **estruturado**;



Introdução

Recheios Randômicos

- São pequenas peças de diferentes formas dispostas aleatoriamente;
- São de 3 gerações:
 - 1ª geração (1907 a 1950);
 - 2ª geração (1950 a 1970);
 - 3ª (última) geração (1970 a atual);
- As peças de 1ª e 2ª gerações são mais comuns;
- As peças de 3ª geração apresentam maiores áreas específicas.



Introdução

Recheios Randômicos

- São entre 6 e 89 mm;
- A razão entre os diâmetros da coluna e da peça devem ser superiores a 15/1;
- São metálicos (aço inoxidável ou aço-carbono), cerâmicos ou plásticos.



Introdução



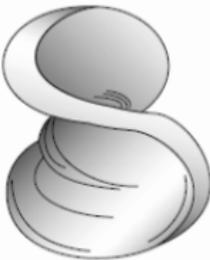
(a) anel de *Raschig*



(b) anel de *Pall*



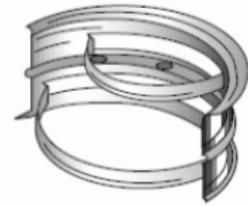
(c) *Tellerette*®



(d) sela de *Berl*



(e) sela *Intalox*®



(f) anel de *Nutter*

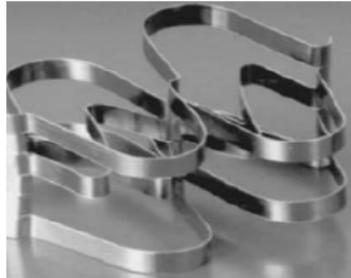
Figura 1: Recheios randômicos (metálicos, cerâmicos ou plásticos) de 1ª e 2ª gerações.

Fonte: Azevedo e Alves (2013).

Introdução



(a) anel de *Nutter*



(b) superanel de *Raschig*



(c) IMTP[®]

Figura 2: Recheios randômicos metálicos de última geração.

Fonte: Azevedo e Alves (2013).

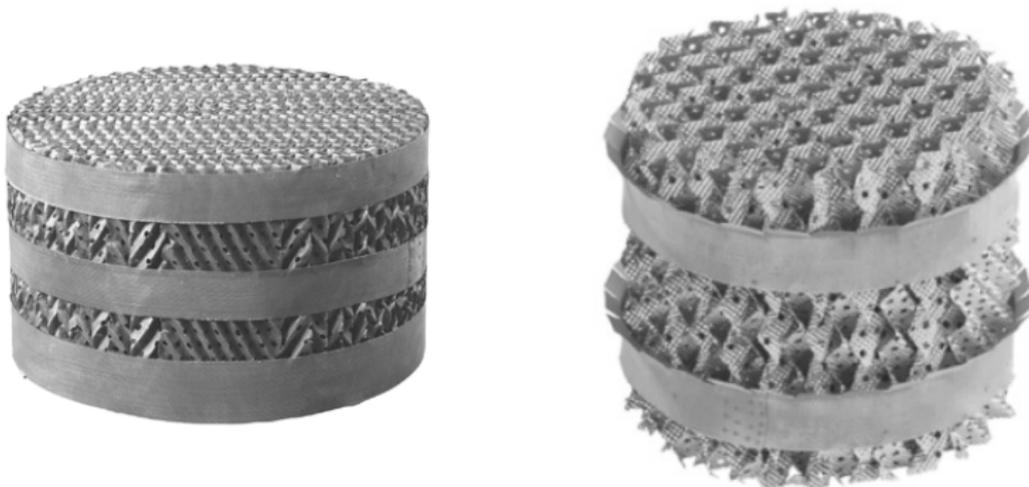
Introdução

Recheios Estruturados

- São blocos compactos com uma estrutura bem definida;
- São de origem mais recente;
- São mais eficientes e com perdas de carga bem menores porém, mais caros que os recheios randômicos.



Introdução



(a) BX

(b) Mellapak

Figura 3: Blocos de recheios estruturados metálicos.

Fonte: Azevedo e Alves (2013).



Coluna Recheada



Coluna Recheada

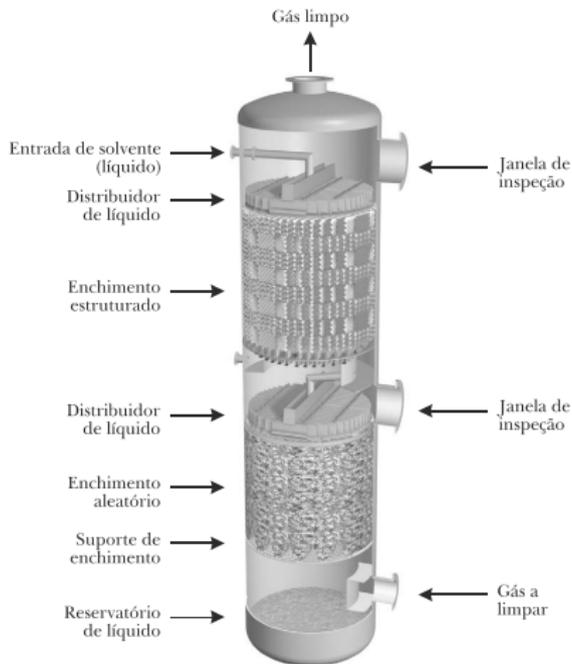


Figura 4: Representação de uma coluna recheada típica de um processo de absorção com seção de recheio estruturado (topo) e recheio randômico (fundo).

Fonte: Azevedo e Alves (2013).



Coluna Recheada

- Geralmente, o recheio é a melhor escolha em relação a pratos para:
 - 1 diâmetros pequenos de colunas ($\leq 0,9$ m);
 - 2 baixos valores de quedas de pressão
 - 3 operação a pressões reduzidas ou vácuo;
 - 4 separação de misturas corrosivas e
 - 5 separação de misturas com tendência de formarem espumas.



Coluna Recheada

Regras Gerais para Projeto de Colunas Recheadas

- 1** O gás (ou vapor) é distribuído uniformemente na seção transversal da coluna;
- 2** Os (re)distribuidores de líquidos são bem projetados;
- 3** Os redistribuidores de líquidos são colocados entre 10 a 12 estágios teóricos (ou 6 a 8 m);
- 4** Para $G \leq 15 \text{ m}^3/\text{min}$, usar recheios randômicos de até 2,5 cm, e para $G \geq 55 \text{ m}^3/\text{min}$; usar 5 cm;
- 5** Para colunas com $d_c \approx 1 \text{ m}$, deixar 1,2 m entre o recheio e o topo, e 1,8 m na base da coluna.

Características de Operação

- A **transferência de massa** ocorre entre L e V ao longo da coluna nas zonas com recheio;
- A eficiência depende da **carga da coluna** e da **distribuição do líquido**;
- O **líquido** circula por gravidade e forma um **filme** que cobre as peças sólidas do recheio;
- O **vapor (ou gás)** movimenta-se nos **interstícios** entre peças adjacentes e nos **vazios interiores** das peças.



Características de Operação

- A quantidade de L presente em um dado instante na coluna é chamada **retenção (“holdup”) total**. Este:
 - aumenta com L;
 - mas é independente de V até o **ponto de carga**.
- O **ponto de carga** é a velocidade superficial de V acima da qual o *holdup* total aumenta rapidamente:
 - abaixo do ponto de carga, V é a fase contínua;
 - acima do ponto de carga, L começa a acumular-se e carregar o leito;
 - a **inundação** ocorre quando L se torna a fase contínua.



Características de Operação

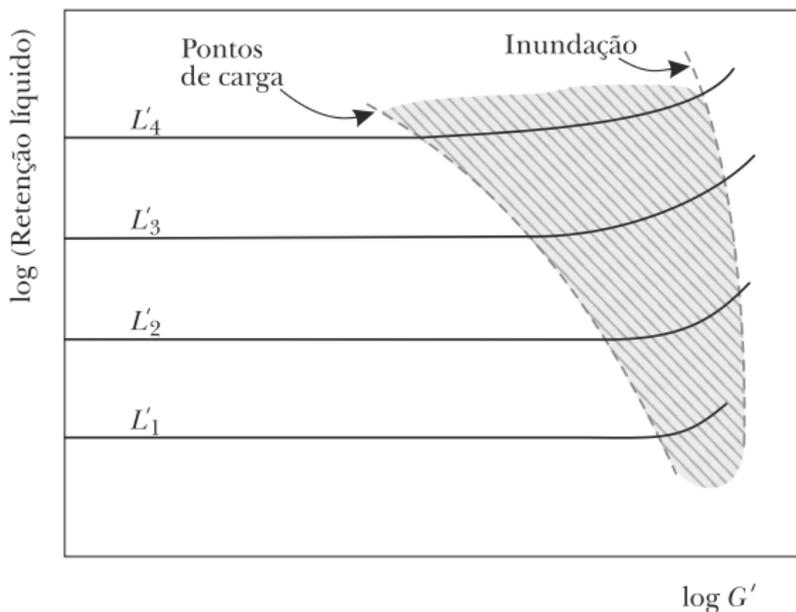


Figura 5: Representação da retenção (*holdup*) total, em função do fluxo mássico de vapor (G') que circula em uma coluna recheada.

Fonte: Azevedo e Alves (2013).



Dimensionamento



Dimensionamento

Etapas do Projeto

- 1 Escolha do **tipo de recheio**:
 - a **Recheio randômico** ou
 - b **Recheio estruturado**.
- 2 Determinação do **diâmetro** da coluna, d_c :
 - a Critério de **perda de carga aceitável** ou
 - b Critério de **inundação**.
- 3 Determinação da **altura** de recheio (ou coluna), z :
 - a Conceito de **HETP**.



Dimensionamento

Diâmetro da coluna (recheio randômico), d_c

- 1 Calcular a **razão de fluxos** mássicos, L'/G' :

$$\frac{L'}{G'} = \frac{\bar{M}_L L}{M_G G} \quad (1)$$

- 2 Obter os valores do **parâmetro de fluxo**, Ψ :

$$\Psi = \frac{L'}{G'} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \right)^{0,5} \quad (2)$$

e do **fator de recheio**, F_p , a partir da **Tab. 1**;



Dimensionamento

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

Recheio	Dimensão, mm					
	13 (0,5")	25 (1")	38 (1,5")	50 (2")	64 (2,5")	75 (3")
<i>Anéis de Raschig</i>						
Cerâmicos	1 903	508	312	213	–	121
Metálicos	1 345	472	272	187	–	105
<i>Anéis de Pall</i>						
Plásticos	–	180	130	85	–	–
Metálicos	–	183	131	89	–	–
<i>Selas de Berl</i>						
Cerâmicos	790	360	215	150	–	–
<i>Selas Intalox</i>						
Cerâmicos	660	302	171	131	–	72
Plásticos	–	131	–	92	–	59
<i>Anéis de Nutter</i>						
	–	–	98	79	59	43

Fonte: Azevedo e Alves (2013).



Dimensionamento

Diâmetro da coluna (recheio randômico), d_c

Para o critério da **queda de pressão aceitável**:

3 Assumir uma **queda de pressão**, $\Delta p/z$:

- vácuo: ~8–40 Pa/m.
- ~1 atm: ~400–600 Pa/m.
- pressão elevada: ~800–1200 Pa/m.

4 Obter o valor do **fluxo mássico de gás**, G' :

$$G' = \left[Y \frac{\rho_G (\rho_L - \rho_G)}{F_p \mu_L^{0,1}} \right]^{0,5} \quad (3)$$

a partir das **Figs. 6** ou



Dimensionamento

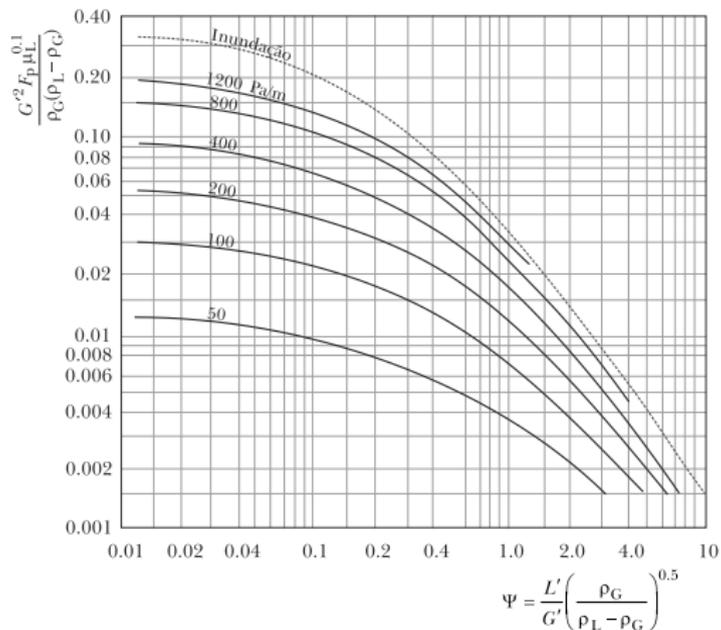


Figura 6: Queda de pressão, $\Delta p/z$, em colunas de recheio randômico de 1ª geração. Dados L' e G' em kg/s/m^2 , ρ_L e ρ_G em kg/m^3 , F_p em ft^{-1} e μ_L em cP. Válido para $F_p > 197 \text{ m}^{-1}$ (ou 60 ft^{-1}).

Fonte: Azevedo e Alves (2013).

Dimensionamento

Diâmetro da coluna (recheio randômico), d_c

Para o critério da **queda de pressão aceitável**:

- 4 Obter o valor do **fator de capacidade do gás**, C_G :

$$C_G = \frac{Y}{F_p^{0,5} v^{0,05}} \quad (4)$$

a partir da **Fig. 7** sendo C_G definido como:

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

Dimensionamento

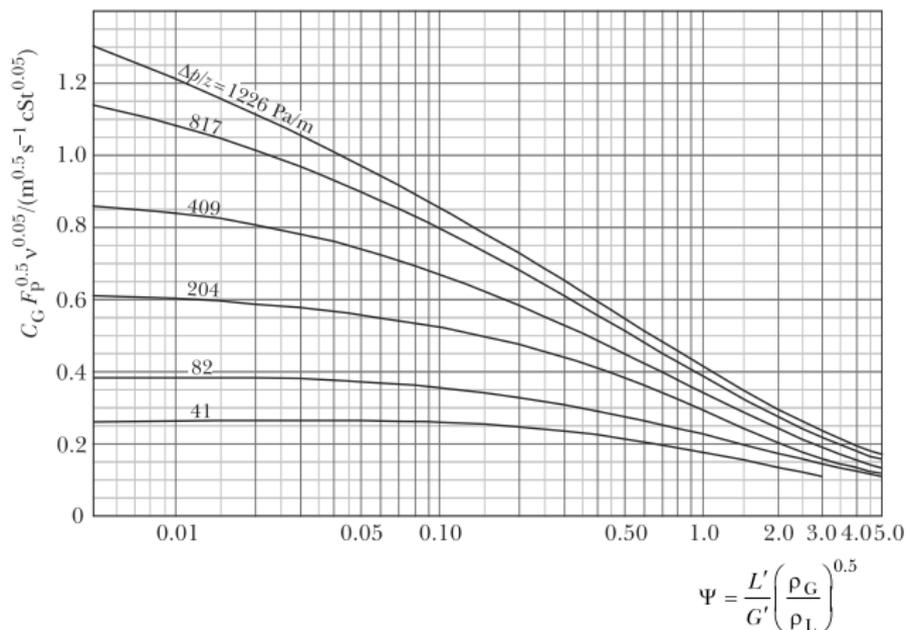


Figura 7: Correlação generalizada de queda de pressão, $\Delta p/z$, para recheios randômicos de última geração. Sabendo que $v = \mu_L / \rho_L$. Dados C_G em m/s, F_p em m^{-1} e v em cSt. Válido para $F_p < 200 \text{ m}^{-1}$.

Fonte: Azevedo e Alves (2013).

Dimensionamento

Diâmetro da coluna (recheio randômico), d_c

Para o critério da **queda de pressão aceitável**:

- 5 Calcular a área da seção transversal, A , da coluna e após, o diâmetro, d_c :

$$A = \frac{\bar{M}_G \cdot G}{G'} \quad (6)$$

$$d_c = \left(\frac{4A}{\pi} \right)^{0,5} \quad (7)$$

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

Dimensionamento

Diâmetro da coluna (recheio randômico), d_c

Para o critério do **percentual de inundação**:

- 3 Obter o valor do **fluxo mássico de gás** na condição de inundação, G'_f :

$$G'_f = \left[Y_f \frac{\rho_G (\rho_L - \rho_G)}{F_p \mu_L^{0,1}} \right]^{0,5} \quad (8)$$

a partir da **Fig. 6**.

- 4 Determinar o **fluxo de gás**, G'_{op} :

$$G'_{op} = (50-80\%) G'_f \quad (9)$$



Dimensionamento

Diâmetro da coluna (recheio randômico), d_c

Para o critério do **percentual de inundação**:

- 5 Calcular o **diâmetro** da coluna, d_c , a partir da **vazão mássica de gás**, G :

$$d_c = \left(\frac{4G}{\pi G'_{op}} \right)^{0,5} \quad (10)$$



Dimensionamento

Diâmetro da coluna (recheio randômico), d_c

Para o critério do **percentual de inundação** (método alternativo):

- 3 Pela correlação de Kister e Gill, obter a **queda de pressão** na **condição de inundação**, $(\Delta p/z)_f$:

$$(\Delta p/z)_f = 40,912 F_p^{0,7} \quad (11)$$

válido para $30 \text{ m}^{-1} < F_p < 197 \text{ m}^{-1}$ e para $F_p > 197 \text{ m}^{-1}$ usar $(\Delta p/z)_f = 1634 \text{ Pa/m}$.

- 4 A partir da **Fig. 7** determinar $C_G (\equiv C_f)$ e após; v_f .



Dimensionamento

Diâmetro da coluna (recheio randômico), d_c

Para o critério do **percentual de inundação** (método alternativo):

- 5 Calcular a **velocidade superficial de operação**, v_{op} , a partir de v_f e após; d_c :

$$v_{op} = (50-80\%) \cdot v_f \quad (12)$$

$$v_{op} = \frac{G}{\rho_G A} \quad (13)$$

$$d_c = \left(\frac{4A}{\pi} \right)^{0,5} \quad (14)$$

Dimensionamento

Diâmetro da coluna (recheio estruturado), d_c

- 1 Para **recheio estruturado Mellapak**, a partir do modelo (série Y) e o **parâmetro de fluxo**, Ψ :

$$\Psi = \frac{L'}{G'} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \right)^{0,5} \quad (15)$$

obter o **fator de capacidade máxima** na **condição de inundação**, C_f , a partir da **Fig. 8**.

- 2 A partir de C_f obter, na sequência, v_f , v_{op} , A e finalmente d_c .



Dimensionamento

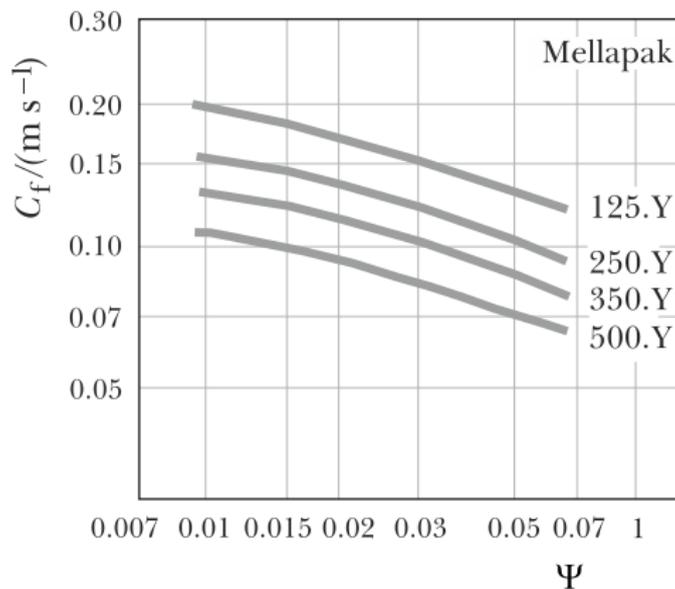


Figura 8: Fator de capacidade máxima, C_f , para recheio estruturado Mellapak série Y.

Fonte: Azevedo e Alves (2013).

Dimensionamento

Altura do recheio (ou coluna), z

- 1 Determinar o **nº de estágios teóricos de equilíbrio**, N ;
- 2 Obter a **altura de recheio (ou coluna)**, z , a partir de:

$$z = \text{HETP} \times N \quad (16)$$

onde HETP é “*height equivalent to a theoretical plate*” e definido como:

$$\text{HETP} = \frac{\text{altura da coluna}}{\text{nº de estágios (pratos) teóricos}} \quad (17)$$

Dimensionamento

Altura do recheio (ou coluna), z

- Para **recheios estruturados** a pressão moderada ou baixa e com fluidos pouco viscosos:

$$\text{HETP} = \frac{100}{a_p} + 0,1 \quad (18)$$

onde a_p é a área superficial por unidade de volume do recheio.

- **Regra prática** mais simples e antiga:

$$\text{HETP} = d_c \quad (19)$$

válida para $d_c < 0,61$ m (1 ft) (diâmetro pequeno).



Dimensionamento

Altura do recheio (ou coluna), z

■ Correlação empírica de Murch:

$$\text{HETP} = K_1 (G')^{K_2} d_c^{K_3} z^{1/3} \left(\frac{\alpha \mu_L}{\rho_L} \right) \quad (20)$$

válida para $d_c < 0,3$ m e onde K são constantes dadas pela **Tab. 2**.



Dimensionamento

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

Fonte: Caldas et al. (2007).



Dimensionamento

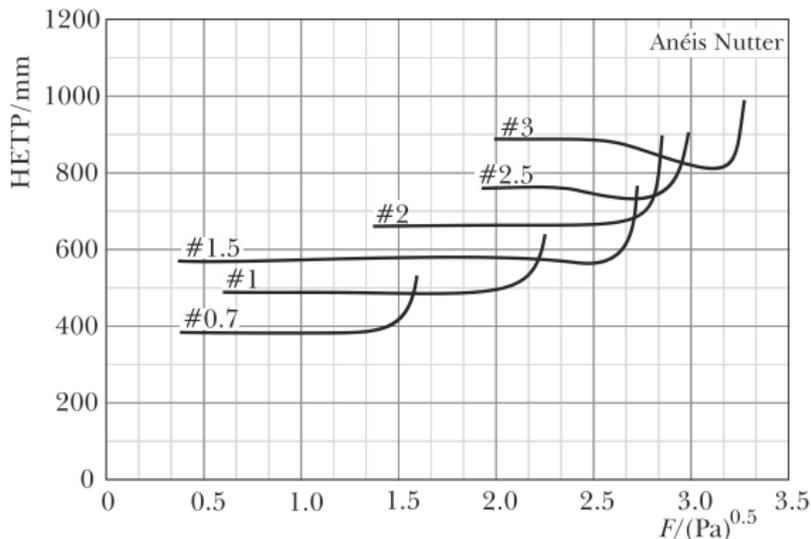


Figura 9: HETP para anéis de *Nutter* (0,7–3", aço inoxidável) em função do fator de capacidade do gás $F = v_G(\rho_G)^{0.5}$.

Fonte: Azevedo e Alves (2013).



Dimensionamento

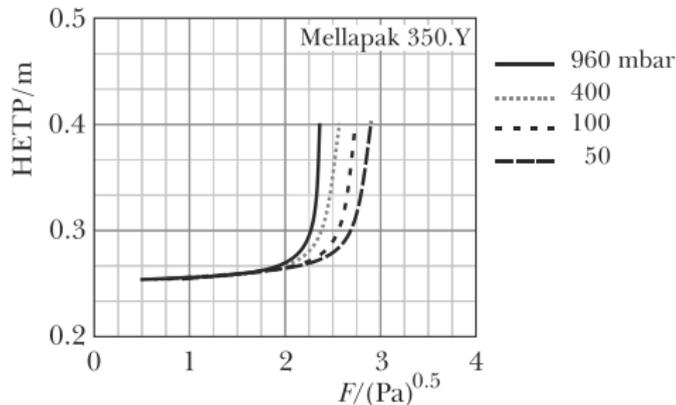


Figura 10: HETP para recheio estruturado metálico *Mellapak 350.Y*, em função do fator de capacidade do gás $F = v_G(\rho_G)^{0.5}$, para diferentes pressões.

Fonte: Azevedo e Alves (2013).

Dimensionamento

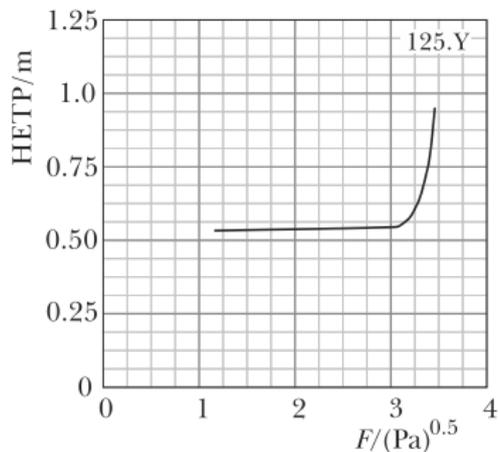


Figura 11: HETP para recheio estruturado metálico *Mellapak* 125.Y, em função do fator de capacidade do gás $F = v_G(\rho_G)^{0.5}$, a 960 mbar.

Fonte: Azevedo e Alves (2013).



Dimensionamento

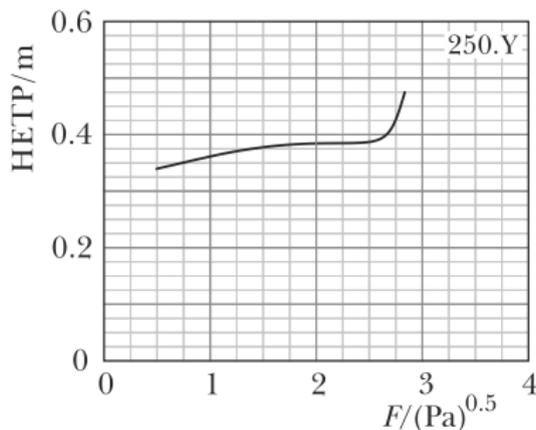


Figura 12: HETP para recheio estruturado metálico *Mellapak* 250.Y, em função do fator de capacidade do gás $F = v_G(\rho_G)^{0,5}$, a 960 mbar.

Fonte: Azevedo e Alves (2013).

Dimensionamento

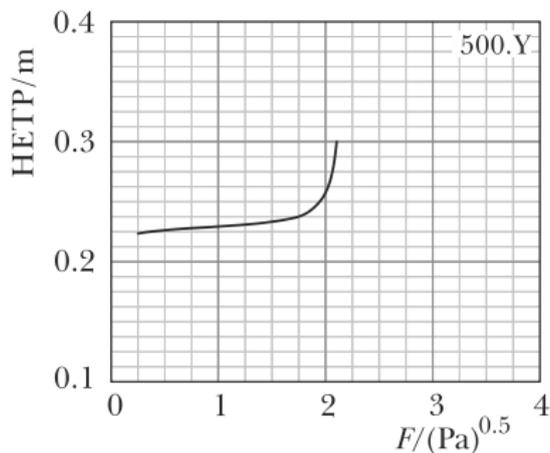


Figura 13: HETP para recheio estruturado metálico *Mellapak* 500.Y, em função do fator de capacidade do gás $F = v_G(\rho_G)^{0.5}$, a 960 mbar.

Fonte: Azevedo e Alves (2013).

Dimensionamento

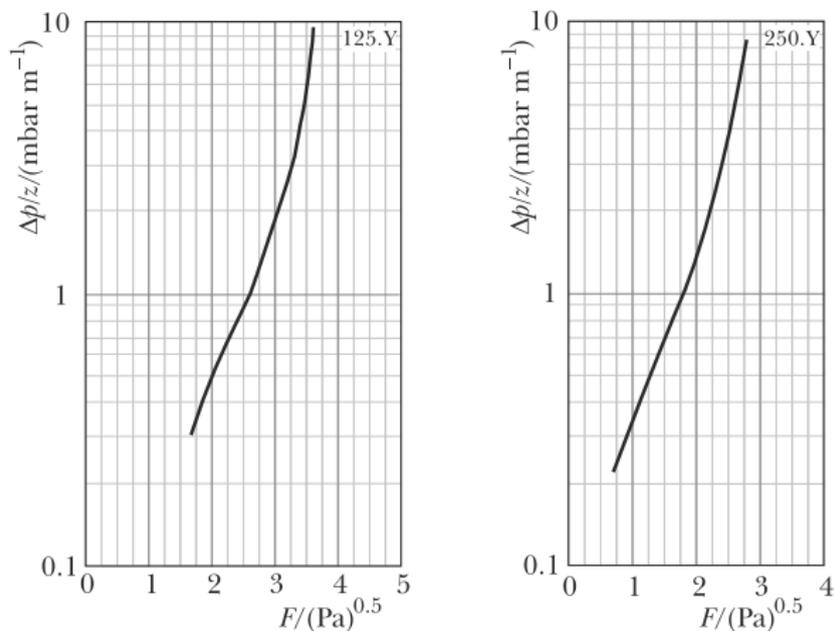


Figura 14: Quedas de pressão, $\Delta p/z$, para recheios estruturados metálicos *Mellapak* 125.Y e 250.Y, em função do fator de capacidade do gás $F = v_G(\rho_G)^{0.5}$, a 960 mbar.

Fonte: Azevedo e Alves (2013).

Referências

- AZEVEDO, E. G.; ALVES, A. M. **Equipamento de Contacto Gás-Líquido. Dimensionamento.** In: _____. (Org.). *Engenharia de Processos de Separação*. 2. ed. Lisboa: IST Press, 2013, p. 343-460.
- CALDAS, J. N.; LACERDA, A. I.; VELOSO, E.; PASCHOAL, L. C. M. **Torres Recheadas.** In: _____. (Org.). *Internos de Torres: Pratos e Recheios*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2007, p. 187-279.
- WANKAT, P. C. **Staged and Packed Column Design.** In: _____. (Org.). *Separation Process Engineering Includes Mass Transfer Analysis*. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2012, p. 355-415.

