

Dimensionamento de Colunas

Coluna de Pratos

Prof. Rodolfo Rodrigues
Universidade Federal do Pampa

BA310 – Operações Unitárias II
Curso de Engenharia Química
Campus Bagé

02 de outubro de 2018



Introdução



Introdução

- As **colunas** são **reservatórios cilíndricos e verticais**, sob pressão controlada, e operados em **regime contínuo**;
- As colunas são comuns em processos industriais de separação:
 - **destilação**,
 - **absorção/regeneração**,
 - extração líquido-líquido e
 - umidificação/desumidificação.
- As colunas deve ser projetadas para assegurar um **bom contato entre as 2 fases envolvidas**.



Introdução

- Há uma grande variedade de colunas:
 - **de pratos,**
 - **de bolhas,**
 - **de agitação mecânica,**
 - **de recheio,**
 - **de atomização e**
 - **de paredes molhadas.**
- Na maioria das aplicações, e sempre que possível, a escolha é feita entre:
 - **colunas de pratos e**
 - **colunas de recheio.**



Introdução

- Em **colunas de pratos**, o vapor ascendente e o líquido descendente circulam em corrente cruzada (ou contracorrente);
- As fases permanecem em contato através de uma série de estágios discretos que são os **pratos**;



Introdução

- Em **colunas de pratos**, o vapor ascendente e o líquido descendente circulam em corrente cruzada (ou contracorrente);
- As fases permanecem em contato através de uma série de estágios discretos que são os **pratos**;
- Em **colunas recheadas**, a variação da composição é contínua ao longo da coluna, não existindo estágios de equilíbrio discretos;
- O **recheio** proporciona um contato mais íntimo e eficiente entre as 2 fases.



Dimensionamento de Colunas

- Numa 1^a etapa calcula-se o **nº de estágios reais para efetuar determinada separação**;
- A seguir, realiza-se o **projeto pormenorizado** da coluna (diâmetro e altura) e a **escolha de seus internos** (pratos ou recheio);



Dimensionamento de Colunas

- Numa 1^a etapa calcula-se o **nº de estágios reais para efetuar determinada separação**;
- A seguir, realiza-se o **projeto pormenorizado** da coluna (diâmetro e altura) e a **escolha de seus internos** (pratos ou recheio);
- O **diâmetro**, d_c , está relacionado com as características hidrodinâmicas do sistema: **vazão de vapor (ou gás)** que circula na coluna;
- A **altura**, z , está relacionada com a **facilidade de separação**;



Coluna de Pratos

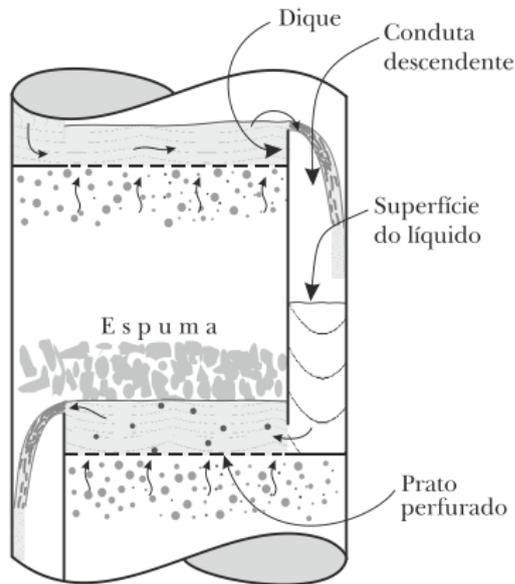
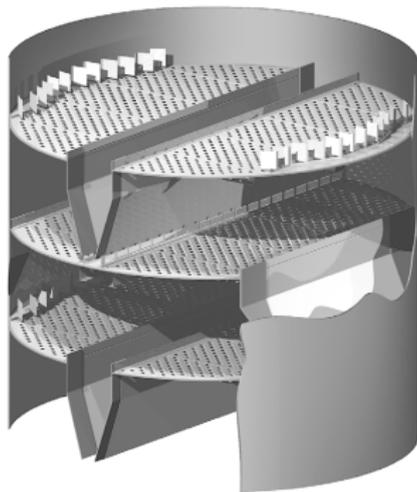


Coluna de Pratos

- O **líquido** circula horizontalmente sobre o prato;
- O **vapor (ou gás)**, que circula no sentido ascendente, entra pelos orifícios do prato e borbulha no líquido;
- Depois de tempo suficiente, o líquido acumulado transborda pelo **vertedor** e é conduzido por gravidade ao prato inferior pelo **downcomer**;
- O **gotejamento do líquido** para o prato inferior através dos orifícios é evitado por uma velocidade suficiente do vapor ascendente;
- O processo de contato líquido-vapor é aleatório e caótico formando uma “**espuma**”.



Coluna de Pratos



(a) coluna de pratos de alto desempenho (b) operação de coluna de pratos perfurados

Figura 1: Coluna de pratos perfurados: (a) detalhes de uma coluna de alto desempenho com *downcomers* intercalados e (b) esquema de operação de uma coluna de pratos.

Fonte: Azevedo e Alves (2013).

Coluna de Pratos

- Os pratos podem ser:
 - **perfurados** (ou **de orifícios**);
 - **de válvulas** ou
 - **de campânula**.
- Condições de operação estável:
 - Vapor circula apenas pelos orifícios ou regiões abertas (entre os *downcomers*);
 - Líquido circula de prato para prato apenas pelos *downcomers*;
 - Líquido não goteja pelos orifícios e nem é arrastado pelo vapor ao prato superior;
 - Vapor não é transportado e nem borbulhado no líquido que sai pelo *downcomer*.



Coluna de Pratos

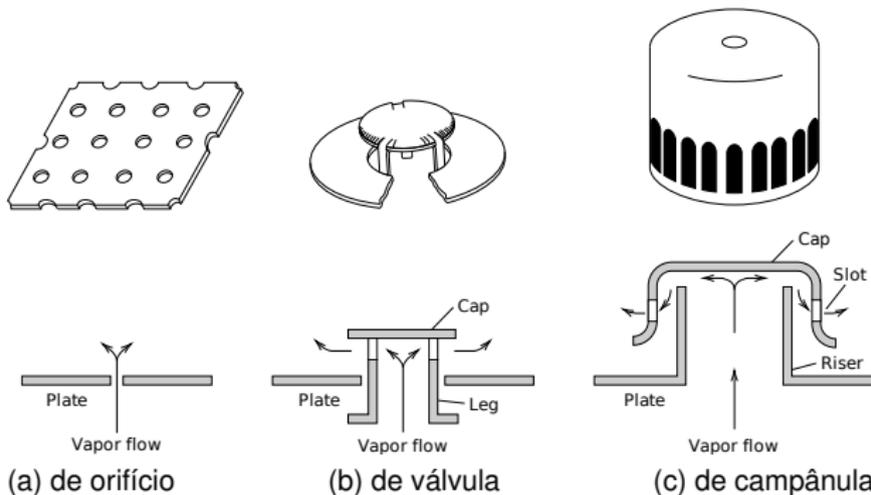


Figura 2: Tipos de pratos mais comuns em uma coluna: (a) de orifício, (b) de válvula e (c) de campânula.

Fonte: Henley, Seader e Roper (2011).

Coluna de Pratos

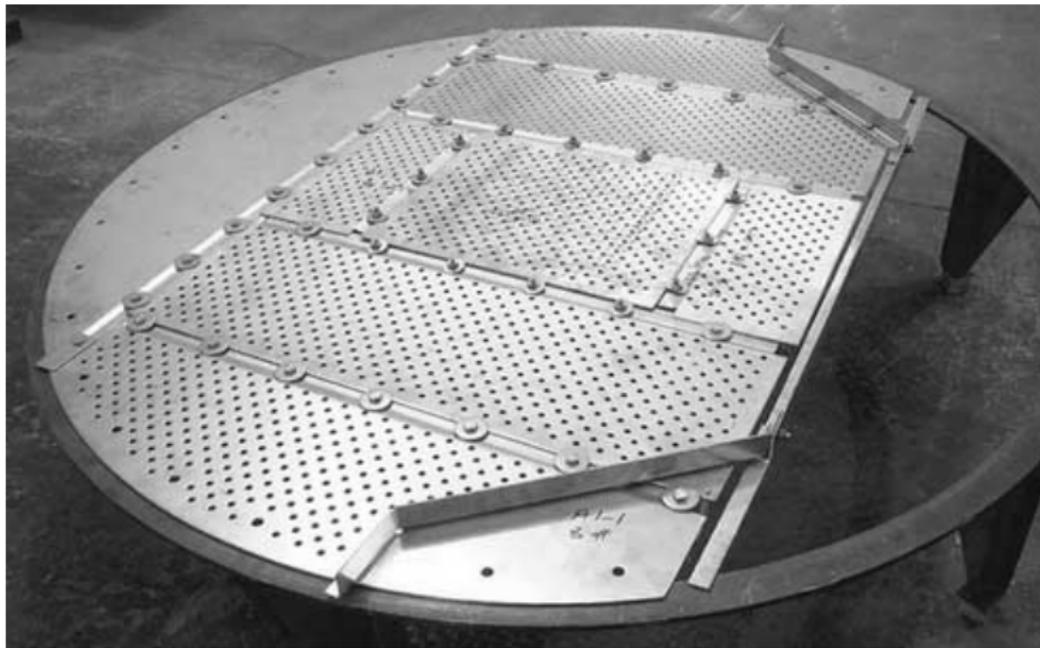


Figura 3: Imagem de um prato de orifício.

Fonte: Wermac.org (2018).

Coluna de Pratos

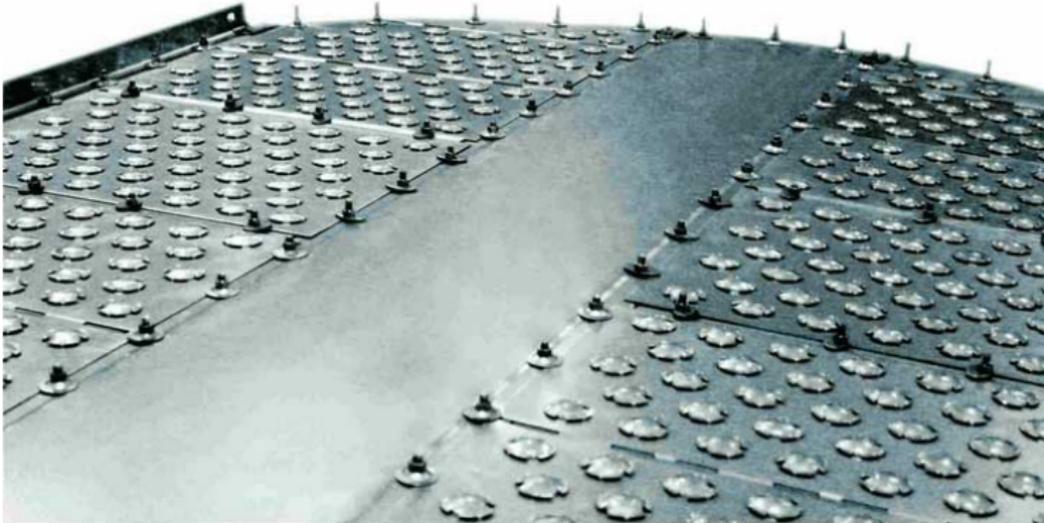


Figura 4: Imagem de um prato de válvula.

Fonte: Wermac.org (2018).

Coluna de Pratos



Figura 5: Imagem de um prato de campânula.

Fonte: Wermac.org (2018).

Características de Operação

- Para evitar **problemas de funcionamento**, as vazões (ou velocidades) de líquido e de vapor na coluna não devem ser excessivas e nem insuficientes;
- Os principais problemas de funcionamento são:
 - 1 **Gotejamento (*weeping*)**;
 - 2 **Despejo (*dumping*)**;
 - 3 **Coalescência de bolhas (*coning*)**;
 - 4 **Arrastamento excessivo de gotículas**;
 - 5 **Inundação do tipo I (*flooding*) e**
 - 6 **Inundação do tipo II.**



Características de Operação

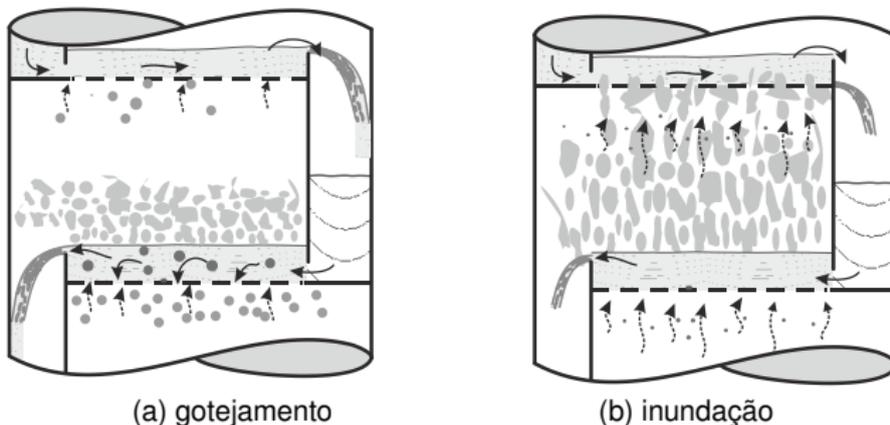


Figura 6: Problemas de funcionamento em uma coluna de pratos. (a) Gotejamento: o líquido goteja através dos orifícios quando a velocidade do vapor é baixa. (b) Inundação: o líquido não consegue descer para o prato inferior devido à elevada velocidade do vapor.

Fonte: Azevedo e Alves (2013).

Características de Operação

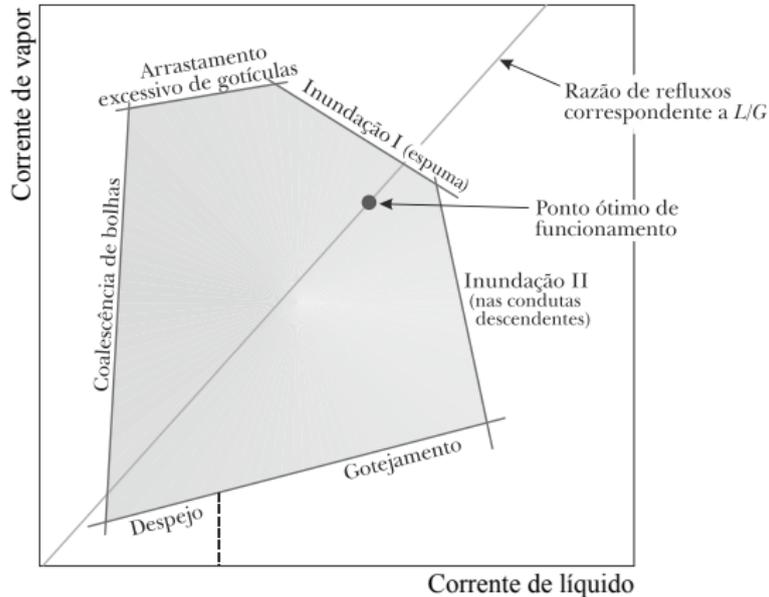


Figura 7: Características de operação de uma coluna de pratos. A zona sombreada representa a região de operação satisfatória.

Fonte: Azevedo e Alves (2013).

Dimensionamento



Dimensionamento (Coluna de Pratos Perfurados)

Etapas do Projeto

Para o projeto, precisamos reunir informações envolvendo:

- 1 Dimensões e disposição dos orifícios no prato;
- 2 Diâmetro da coluna;
- 3 Perdas de carga;
- 4 Gotejamento e arrastamento;
- 5 Altura da coluna.

Obs.:

- Na etapa 1 são assumidos valores que são verificados na etapa 2;
- As etapas 3 e 4 são de verificação das etapas 1 e 2.

Dimensionamento (Coluna de Pratos Perfurados)

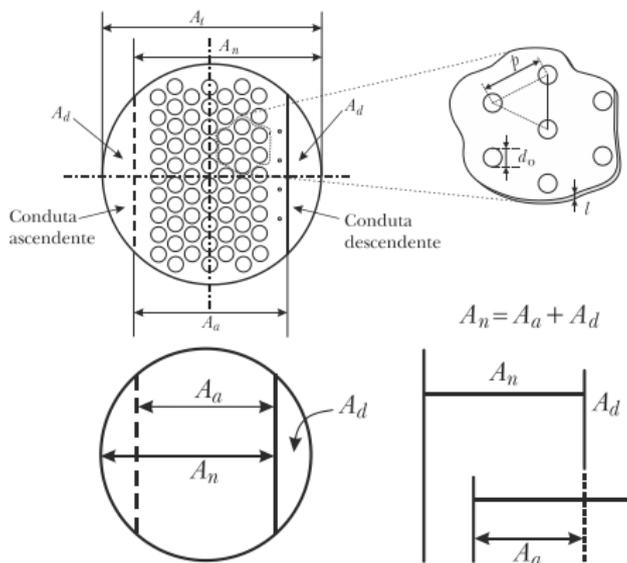


Figura 8: Definição das áreas de uma prato perfurado, relevantes para o seu dimensionamento. A_t : área total do prato; A_n : área livre de passagem de vapor; A_d : área do downcomer; A_a : área ativa; l : espessura do prato; d_o : diâmetro do orifício; e p : distância entre centros de orifícios consecutivos.

Fonte: Azevedo e Alves (2013).

Dimensionamento (Coluna de Pratos Perfurados)

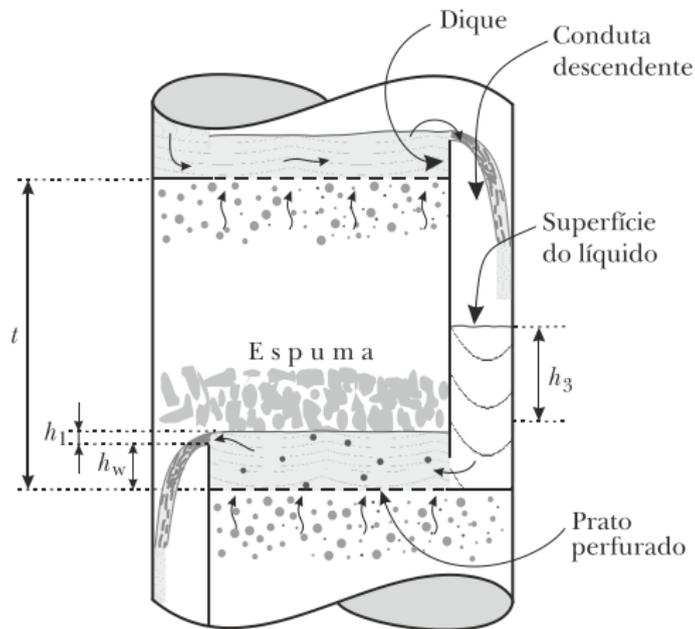


Figura 9: Esquema da operação de um prato perfurado. t : espaçamento entre pratos.

h_w : altura de vertedor; h_3 : altura de líquido no downcomer.

Fonte: Azevedo e Alves (2013).



Dimensionamento (Coluna de Pratos Perfurados)

Diâmetro da coluna (ou do prato), d_c

- 1 Assumir o **diâmetro de orifício**, d_o , entre 3 e 12 mm.
Habitual: $d_o = 4,5$ mm.
- 2 Para uma **disposição triangular de orifícios** (mais comum), assumir uma distância entre orifícios consecutivos, p (*pitch*), entre 2,5 e $5 \times d_o$;
- 3 Determinar a razão entre as **áreas total de orifícios**, A_o , e **ativa**, A_a :

$$\frac{A_o}{A_a} = 0,907 \left(\frac{d_o}{p} \right)^2 \quad (1)$$

Dimensionamento (Coluna de Pratos Perfurados)

Diâmetro da coluna (ou do prato), d_c

- 4 Encontrar a **velocidade máxima do vapor** (inundação), v_f :

$$v_f = C_f \left(\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G} \right)^{0,5} \quad (2)$$

onde a **constante de inundação**, C_f , é:

$$C_f = \left[\alpha \log \left(\frac{1}{\Psi} \right) + \beta \right] \left(\frac{\sigma}{0,02} \right)^{0,2} \quad (3)$$

$$\Psi = \frac{L'}{G'} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0,5} \quad (4)$$

Dimensionamento (Coluna de Pratos Perfurados)

Diâmetro da coluna (ou do prato), d_c

- 4 Quando $A_o/A_a \geq 0,1$ e $0,01 \leq \Psi \leq 1$, então:

$$\alpha(t) = 0,0744t + 0,01173 \quad (5)$$

$$\beta(t) = 0,0304t + 0,015 \quad (6)$$

sendo $0,15 \leq t \leq 0,9$ m.

Deve-se assumir um valor razoável para d_c para fixar então o valor de t a partir da **Tab. 1**. Habitual: $t = 0,6$ m.



Dimensionamento (Coluna de Pratos Perfurados)

Tabela 1: Relação entre espaçamento entre pratos, t , e diâmetro da coluna, d_c .

d_c (m)	t (m)
—	$\geq 0,15$
≤ 1	0,50
1–3	0,60
3–4	0,75
4–8	0,90

Fonte: Azevedo e Alves (2013).



Dimensionamento (Coluna de Pratos Perfurados)

Diâmetro da coluna (ou do prato), d_c

- Assumir, por segurança, como **velocidade de operação do vapor**, v_{op} , como 70 a 80% do valor de v_f ;
- Assumir relação entre **comprimento de vertedor**, w , e **diâmetro de coluna**, d_c , conforme **Tab. 2** e encontrar η .
Habitual: $w = 0,7d_c$.

Assim:

$$d_c = \sqrt{\frac{4Q_G}{\pi(1 - \eta)v_{op}}} \quad (7)$$

Dimensionamento (Coluna de Pratos Perfurados)

Tabela 2: Dimensões recomendadas em função do diâmetro, d_c .

w	Z	η (%)
$0,553d_c$	$0,4181d_c$	3,877
$0,60d_c$	$0,3993d_c$	5,257
$0,65d_c$	$0,2516d_c$	6,899
$0,70d_c$	$0,3562d_c$	8,8808
$0,75d_c$	$0,3296d_c$	11,255
$0,80d_c$	$0,1991d_c$	14,145

Fonte: Azevedo e Alves (2013).



Dimensionamento (Coluna de Pratos Perfurados)

Diâmetro da coluna (ou do prato), d_c

- 7 Verificar se d_c calculado está dentro do intervalo (**Tab. 1**) para t assumido no **etapa 4**.
- 8 Determinar as **perdas de carga** no prato, h_{tot} , e verificar se:

$$\frac{t}{2} \geq h_{tot} \quad (8)$$



Dimensionamento (Coluna de Pratos Perfurados)

Diâmetro da coluna (ou do prato), d_c

- 9 Verificar a **velocidade mínima de vapor**, v_{ow} , para evitar o **gotejamento de líquido**;
- 10 Verificar a **fração de arrastamento**, ψ , a partir da **Fig. 10**, para evitar o **arrastamento de líquido** (pelo vapor);

Obs.:

- Ocasionalmente colunas podem ter 2 seções de diâmetros diferentes se a variação é muito grande;
- A prática recomenda $d_c \geq 0,75$ m sendo usual entre 1 e 3 m.



Dimensionamento (Coluna de Pratos Perfurados)

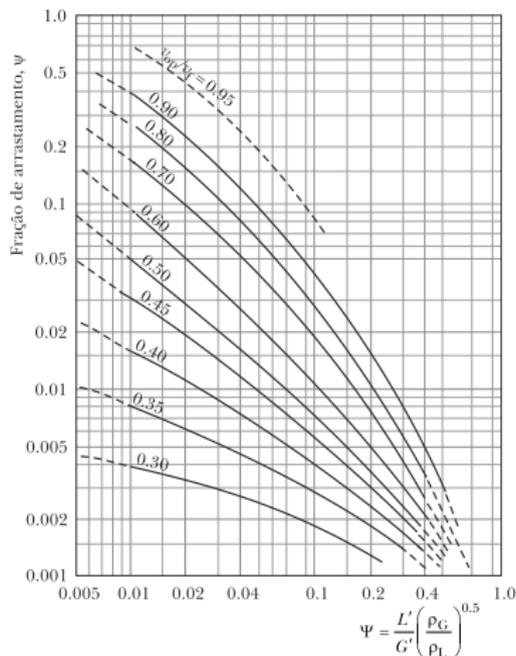


Figura 10: Fração de arrastamento, ψ , em colunas de pratos perfurados em função do parâmetro de fluxo, Ψ .

Fonte: Azevedo e Alves (2013).



Dimensionamento (Coluna de Pratos Perfurados)

Altura da coluna, z

$$z = (N_c - 1)t + \Delta h + N_c l \quad (9)$$

- N_c é o **nº real de pratos**;
- Δh é a **altura adicional**:
 - 1 **1,8 m na base da coluna**, para manter o nível de líquido e haver espaço para receber o vapor reciclado do refeedor;
 - 2 **1,2 m no topo da coluna**, para minimizar o arrastamento do líquido pelo vapor.
- l é a **espessura de um prato** (geralmente de aço inoxidável) e é determinada pela relação l/d_o a partir da **Tab. 3**.



Dimensionamento (Coluna de Pratos Perfurados)

Tabela 3: Relações recomendadas entre os diâmetros de orifício, d_o , e a espessura, l , de um prato.

d_o (mm)	l/d_o	
	aço inox	aço-carbono
3,0	0,65	–
4,5	0,43	–
6,0	0,32	–
9,0	0,22	0,50
12,0	0,16	0,38
15,0	0,17	0,30
18,0	0,11	0,25

Fonte: Azevedo e Alves (2013).



Dimensionamento (Coluna de Pratos Perfurados)

Altura da coluna, z

- A altura **não deve ultrapassar 55 m**, para evitar vulnerabilidade ao vento e garantir rigidez estrutural;
- É conveniente que $z/d_c = 20$ mas nunca maior do que 30.



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 de Pratos.** In: _____. (Org.). *Internos de Torres: Pratos e Recheios*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2007, p. 73-185.
- 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.