

# Extração Sólido-Líquido

Prof. Rodolfo Rodrigues  
Universidade Federal do Pampa

BA310 – Operações Unitárias II  
Curso de Engenharia Química  
Campus Bagé

30 de outubro de 2018



# Introdução



# Introdução

- Na **extração sólido-líquido** os componentes solúveis de um sólido são separados por contato com um solvente adequado (líquido);
- Geralmente o **material solúvel (soluto)** é o produto de interesse e o **sólido residual (inerte)** é um subproduto ou resíduo;



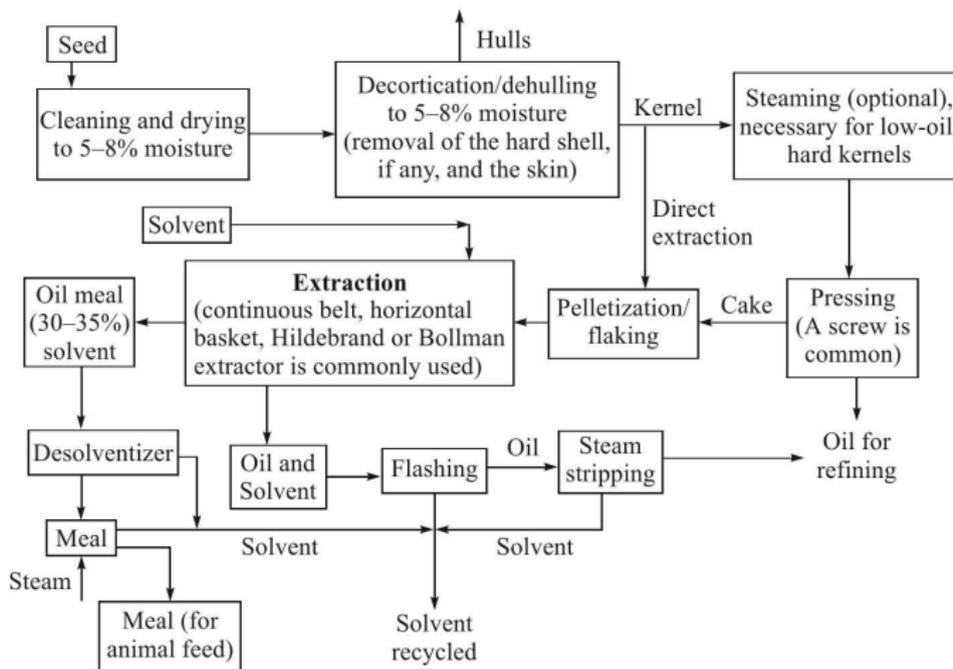
# Introdução

Processo de extração sólido-líquido, envolve:

- 1** Contato íntimo entre **carga sólida** e **solvente**;
- 2** Separação da **solução (extrato)** do **sólido esgotado**;
- 3** Separação do **solvente** (e do **sólido arrastado**, se houver) do extrato seguida por purificação do produto; e
- 4** Recuperação do **solvente** do **sólido úmido** (por prensagem/secagem).



# Introdução



**Figura 1:** Fluxograma do processo de extração por solvente de sementes oleaginosas.

Fonte: Dutta (2007).

# Introdução

## Classificação dos Sistemas de Extração

### 1 Extração difusiva:

Controlada pela difusão em fase sólida do soluto;

### 2 Extração por lavagem:

Para partícula muito pequenas a resistência a difusão em fase sólida se torna desprezível;

### 3 Lixiviação:

Dissolução de componentes do sólido seguido por reações químicas;

### 4 Extração química:

Similar a lixiviação mas se refere a recuperação de componentes de sólidos orgânicos naturais.

# Introdução

**Tabela 1:** Sistemas de extração sólido-líquido comercialmente importantes.

Soluto	Sólido original	Solvente/Produto
<b>(a) Extração difusiva</b>		
Café solúvel	Grãos de café	Água
Óleo de peixe	carne de peixe	Alcoóis, hexano
Açúcar	Beterraba	Água
Água	Frutas	Solução de açúcar—para “desidratação osmótica”
<b>(b) Extração por Lavagem</b>		
Óleo vegetal	Sementes oleaginosas	Hexano, hidrocarbonetos
Óleo essenciais	Flores	Etanol
Açúcar	Cana-de-açúcar	Água
Baunilha	Vagens de baunilha	Solução aquosa de 35% etanol

Fonte: Dutta (2007).



# Introdução

**Tabela 2:** Sistemas de extração sólido-líquido comercialmente importantes (continuação).

Soluto	Sólido original	Solvente/Produto
<b>(c) Lixiviação</b>		
Ácido fosfórico	Rochas fosfatadas	Ácido sulfúrico
Aluminato de sódio	Bauxita	Solução cáustica
Ouro	Minério de ouro	Cianeto de sódio
Cobre	Minério de cobre	Ácido sulfúrico, solução amoniacal
<b>(d) Extração química</b>		
Gelatina	Ossos e peles	Solução aquosa (pH 3 a 4)
Ligninas	Lascas de madeira	Solução NaOH, sulfeto ou sulfeto de sódio
Iodo	Algas marinhas	Ácido sulfúrico
Pectina	Polpa de maçã	Ácido diluído

Fonte: Dutta (2007).



# Introdução

## Taxa de Extração Sólido-Líquido

- **Características físicas do sólido:**  
Porosidade e tamanho das partículas;
- **Solvente:**  
Solubilidade, viscosidade, volatilidade, toxicidade e custo;
- **Temperatura:**  
Influencia solubilidade, viscosidade e volatilidade do solvente;
- **Agitação:**  
Coeficiente de transferência de massa e taxa de extração sólido-líquido.

# Equilíbrio Sólido-Líquido



# Equilíbrio Sólido-Líquido

## Nomenclatura e Convenções

- Componentes:
  - A** — sólido “inerte”;
  - B** — solvente;
  - C** — soluto (substância solúvel);
- Correntes:
  - Fase leve** (*overflow*) —  $V$ ,  $y$  e
  - Fase pesada** (*underflow*, *slurry* ou *sludge*) —  $L$ ,  $x$ ;
  - $F$ ,  $S$ ,  $V$ ,  $L$  — vazão total;
  - $F'$ ,  $S'$ ,  $V'$ ,  $L'$  — vazão em base livre de inerte (sólido).

# Equilíbrio Sólido-Líquido

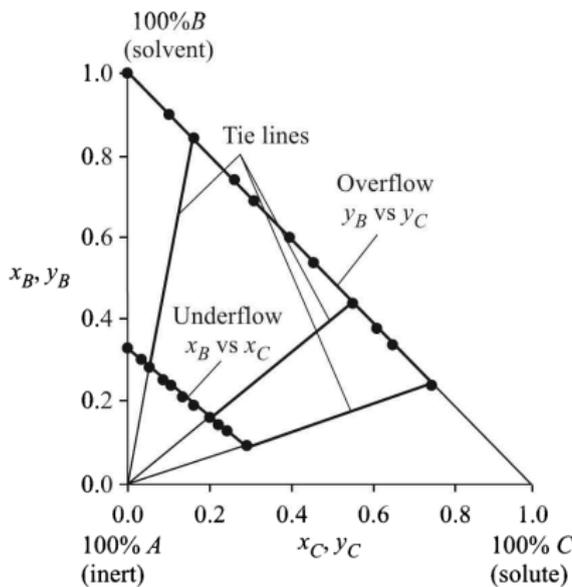
## Diagramas de Equilíbrio

Há 2 técnicas comuns para representação do **equilíbrio sólido-líquido**:

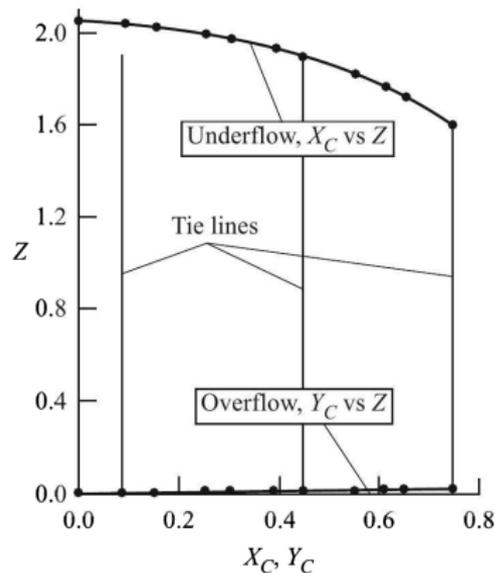
- **Diagrama triangular** (ternário) (Fig. 2-a):  
Representação em termos da **frações mássicas** de soluto ( $x_C$  e  $y_C$ ) e de solvente ( $x_B$  e  $y_B$ ) em um triângulo retângulo.
- **Diagrama de Ponchon-Savarit** (Fig. 2-b):  
Representação em termos da **razões mássicas** de soluto ( $X_C$  e  $Y_C$ ) e de sólido ( $Z$ ) ambas em base livre de sólido em um diagrama cartesiano.



# Equilíbrio Sólido-Líquido



(a)



(b)

**Figura 2:** Gráficos de dados de equilíbrio em (a) **diagrama triangular** ou (b) **diagrama de Ponchon-Savarit**.

Fonte: Dutta (2007).

## Equilíbrio Sólido-Líquido

### Diagrama de *Ponchon-Savarit*:

#### ■ Fase pesada (*underflow*):

$$X_C = \frac{x_C}{x_B + x_C} = \frac{\text{kg soluto}}{\text{kg solução}} \quad (1)$$

$$Z = \frac{x_A}{x_B + x_C} = \frac{\text{kg sólido}}{\text{kg solução}} \quad (2)$$

#### ■ Fase leve (*overflow*):

$$Y_C = \frac{y_C}{y_B + y_C} = \frac{\text{kg soluto}}{\text{kg solução}} \quad (3)$$

$$Z = \frac{y_A}{y_B + y_C} = \frac{\text{kg sólido}}{\text{kg solução}} \quad (4)$$

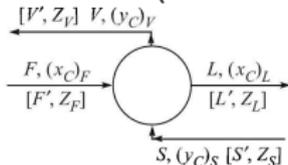


# Operações por Estágios de Equilíbrio

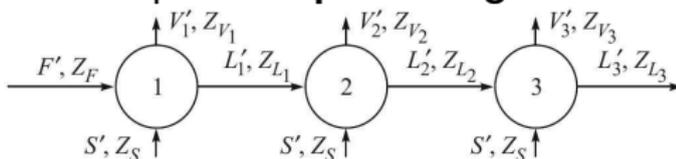


# Operações por Estágios

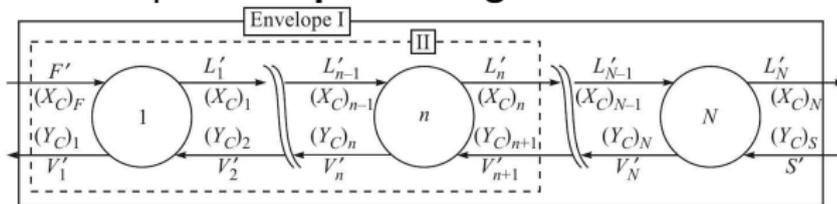
- Contato (em batelada) por um **único estágio**;



- Contato por **múltiplos estágios em corrente cruzada**;



- Contato por **múltiplos estágios em contracorrente**.



# Operações por Estágios: 1 Estágio

## Método Gráfico: Batelada/Contínuo

- 1 Marcar  $\overline{F'S'}$  no diagrama;
  - Para solvente puro, então  $S'$  [0; 0].
- 2 Obter o ponto de mistura  $M'$ , sob  $\overline{F'S'}$ , a partir de:

$$Z_{M'} = \frac{F'Z_{F'} + S'Z_{S'}}{F' + S'} \quad (5)$$

- 3 Obter  $L'$  (fase pesada) e  $V'$  (fase leve) a partir da linha de amarração em  $M'$ ;
  - Geralmente as linhas de amarração são linhas verticais.

## Operações por Estágios: 1 Estágio

### Método Gráfico: Batelada/Contínuo

**4** As vazões  $L'$  e  $V'$  são obtidas resolvendo os BM's:

- Solução (B + C):

$$F' + S' = L' + V' = M' \quad (6)$$

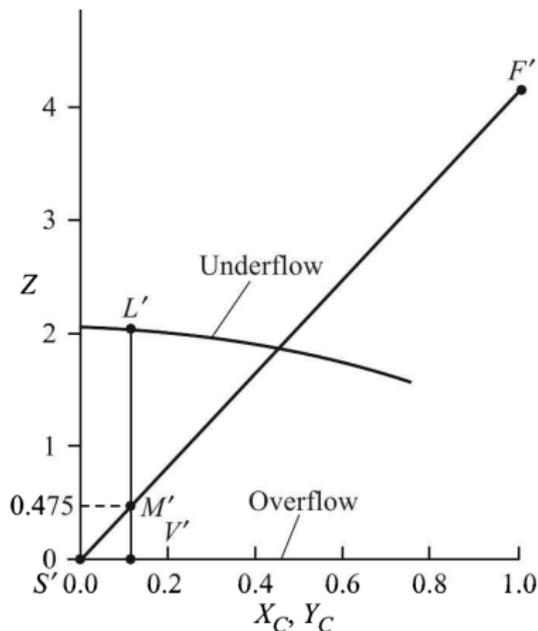
- Sólido (A):

$$F'Z_{F'} + S'Z_{S'} = L'Z_{L'} + V'Z_{V'} = M'Z_{M'} \quad (7)$$

**5** O percentual de soluto extraído (recuperado) é dado por:

$$\%C_{\text{extraído}} = \frac{V'(Y_C)_{V'}}{F'(X_C)_{F'}} \times 100\% \quad (8)$$

## Operações por Estágios: 1 Estágio



**Figura 3:** Representação em diagrama de *Ponchon-Savarit* de operação por um **único estágio**.

Fonte: Dutta (2007).



# Operações por Estágios: Multiestágio

## Método Gráfico: Corrente Cruzada

- 1 Marcar  $\overline{F'S'_1}$  no diagrama;
  - Para solvente puro, então  $S'_1$  [0; 0].
- 2 Obter o ponto de mistura  $M'_1$ , sob  $\overline{F'S'_1}$ , a partir de:

$$Z_{M'_1} = \frac{F'Z_{F'} + S'_1Z_{S'_1}}{F' + S'_1} \quad (9)$$

- 3 Obter  $L'_1$  (fase pesada) e  $V'_1$  (fase leve) a partir da linha de amarração em  $M'_1$ ;
  - Geralmente as linhas de amarração são linhas verticais.



## Operações por Estágios: Multiestágio

### Método Gráfico: Corrente Cruzada

**4** As vazões  $L'_1$  e  $V'_1$  são obtidas resolvendo os BM's:

- Solução (B + C):

$$F' + S'_1 = L'_1 + V'_1 = M'_1 \quad (10)$$

- Sólido (A):

$$F'Z_{F'} + S'Z_{S'} = L'Z_{L'} + V'Z_{V'} = M'Z_{M'} \quad (11)$$

**5** Marcar  $\overline{L'_1 S'_2}$  no diagrama;

- Para solvente puro, então  $S'_2 [0; 0]$ .

**6** Repetir os passos 2, 3 e 4 até atender o número de estágios requeridos,  $N$ ;

# Operações por Estágios: Multiestágio

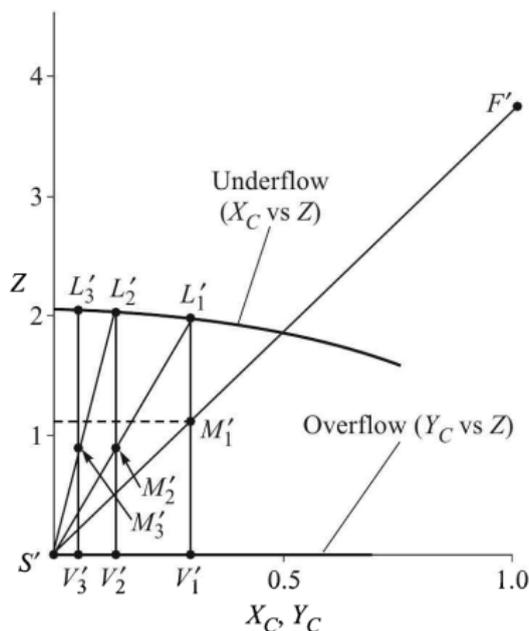
## Método Gráfico: Corrente Cruzada

7 O percentual de soluto extraído (recuperado) é dado por:

$$\begin{aligned} \%C_{\text{extraído}} &= \frac{\sum_{n=1}^N [(V'_n(Y_C)_n)]}{F'(X_C)_{F'}} \times 100\% \\ &= \frac{F'(X_C)_{F'} - L'_N(X_C)_N}{F'(X_C)_{F'}} \times 100\% \end{aligned} \quad (12)$$



# Operações por Estágios: Multiestágio



**Figura 4:** Representação em diagrama de *Ponchon-Savarit* de operação por múltiplos estágios em corrente cruzada.

Fonte: Dutta (2007).



# Operações por Estágios: Multiestágio

## Método Gráfico: Contracorrente

- 1 Marcar  $\overline{F'S'}$  e  $L'_N$  no diagrama;
  - Para solvente puro, então  $S'$  [0; 0].
- 2 Obter o ponto de mistura global  $M'$ , sob  $\overline{F'S'}$ , a partir de:

$$(X_C)_{M'} = \frac{F'(X_C)_{F'} + S'(Y_C)_{S'}}{F' + S'} \quad (13)$$

- 3 Obter  $V'_1$  a partir da prolongação de  $\overline{L'_N M'}$  até a linha de equilíbrio da fase leve ( $Y_C-Z$ );



## Operações por Estágios: Multiestágio

### Método Gráfico: Contracorrente

4  $L'_N$  e  $V'_1$  são obtidos resolvendo os BM's:

- Solução (B + C):

$$F' + S' = L'_N + V'_1 = M' \quad (14)$$

- Sólido (C):

$$F'(X_C)_{F'} + S'(Y_C)_{S'} = \quad (15)$$

$$L'_N(X_C)_{L'_N} + V'_1(Y_C)_{V'_1} = M'(X_C)_{M'}$$

5 Marcar o ponto diferença  $\Delta$  pela intersecção das prolongações de  $\overline{F'V'_1}$  e  $\overline{L'_NS'}$ ;



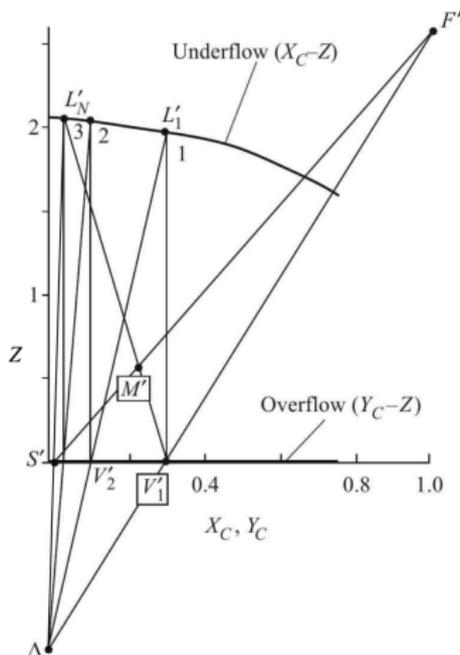
## Operações por Estágios: Multiestágio

### Método Gráfico: Contracorrente

- 6 Obter  $L'_1$  a partir da linha de amarração em  $V'_1$  até a linha de equilíbrio da fase pesada ( $X_C-Z$ );
  - Geralmente as linhas de amarração são linhas verticais.
- 7 Obter  $V'_2$  pela intersecção de  $\overline{L'_1\Delta}$  na linha de equilíbrio da fase leve ( $Y_C-Z$ );
- 8 Repetir os passos 6 e 7 até  $L'_n$  atender a especificação de  $L'_N$  (ou ultrapassar, nesse caso há estágios “quebrados”);
- 9 O percentual de soluto extraído (recuperado) é dado por:

$$\%C_{\text{extraído}} = \frac{F'(X_C)_{F'} - L'_N(X_C)_N}{F'(X_C)_{F'}} \times 100\% \quad (16)$$

# Operações por Estágios: Multiestágio



**Figura 5:** Representação em diagrama de *Ponchon-Savarit* de operação por multiestágios em contracorrente.

Fonte: Dutta (2007).

## Operações por Estágios: Multiestágio

### Método Analítico: Contracorrente

- Se as fases pesadas e leves são constante, isto é,  $L'_1 = L'_2 = \dots = L'$  e  $V'_1 = V'_2 = \dots = V'$ :

$$N = \frac{\log \left[ 1 + (r - 1) \left( \frac{Y_1}{X_N} \right) \right]}{\log r} \quad (17)$$

onde  $r = S'/L'$ .



# Equipamentos de Extração



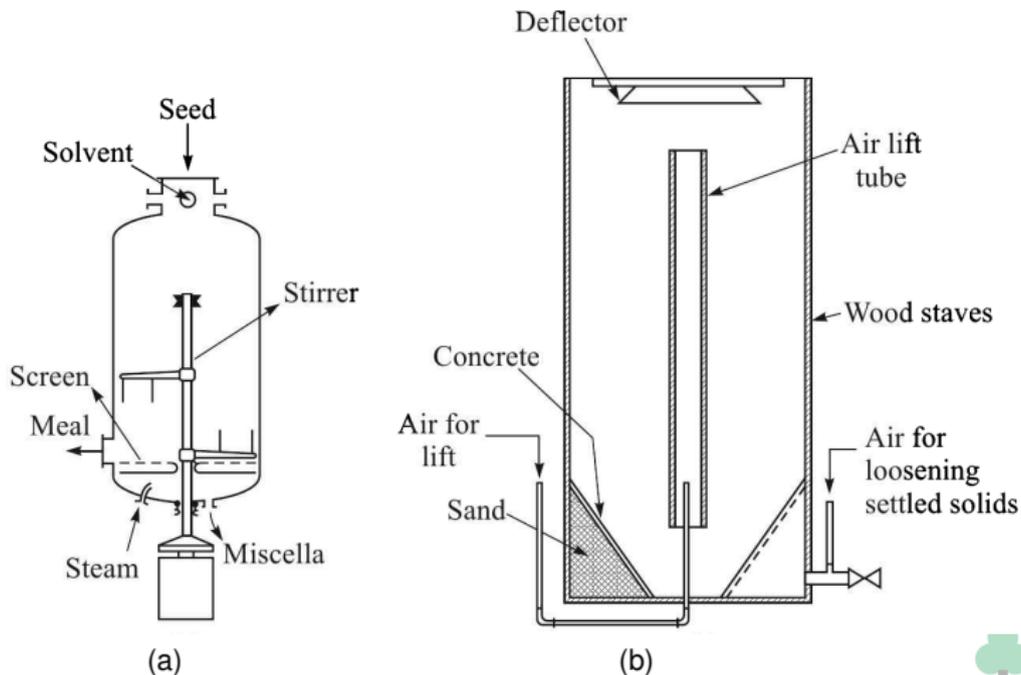
# Equipamentos de Extração: Classificação

## Classificação dos Extratores

- Tipo de operação:
  - **Batelada e**
  - **Contínuo.**
- Tipo de contato sólido-líquido:
  - **Leito fixo:**  
Solvente percola através do sólido.
  - **Tanque agitado (contato disperso):**  
Imersão do sólido no solvente com agitação da mistura.



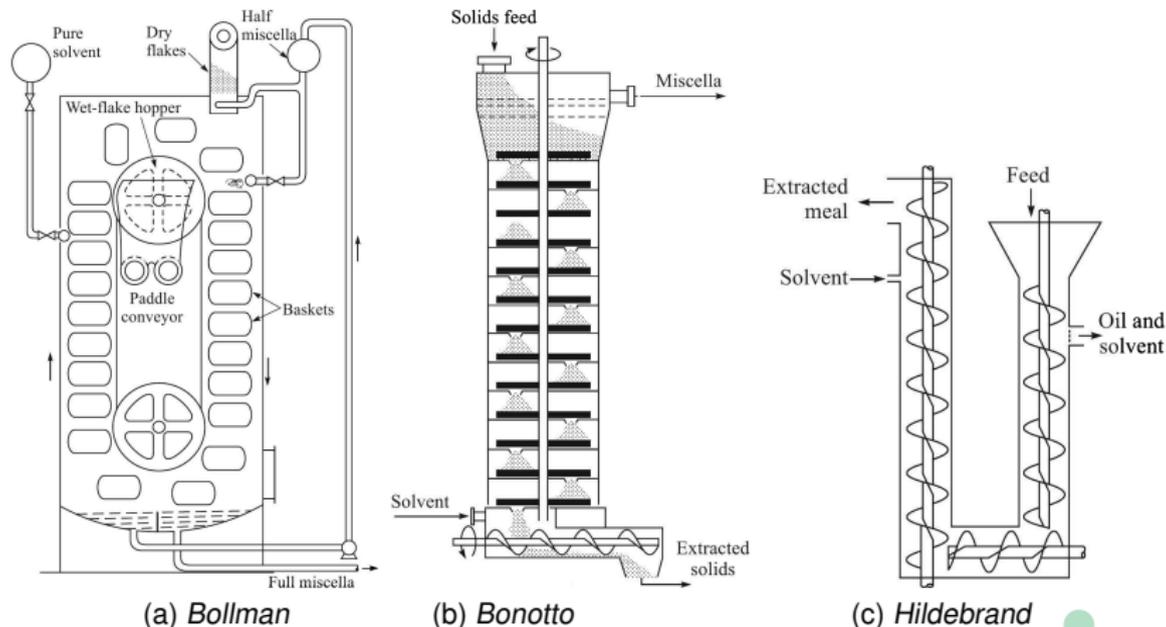
# Equipamentos de Extração: Extratores em Batelada



**Figura 6:** (a) Vaso de extração em batelada; (b) Extrator do tipo *Pachuca*.

Fonte: Dutta (2007).

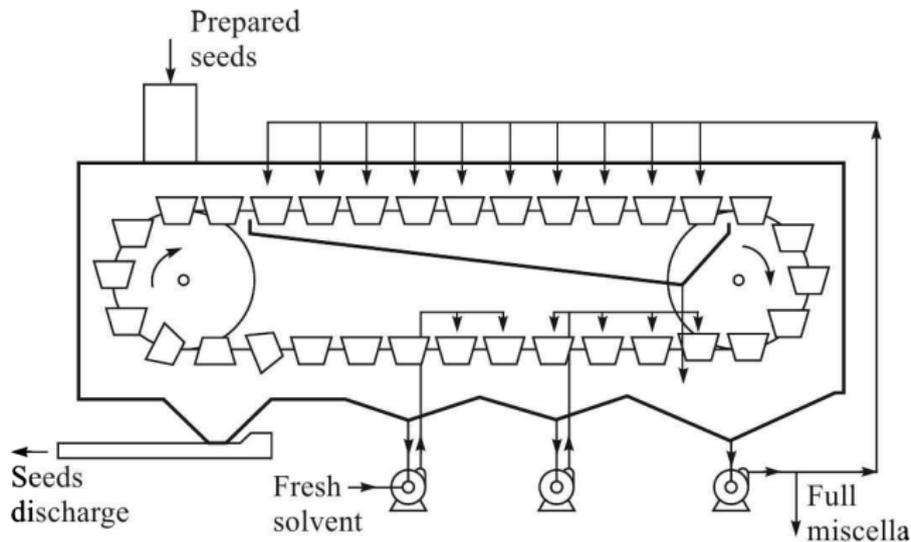
# Equipamentos de Extração: Extratores Contínuos



**Figura 7:** Extratores verticais contínuos do tipo: (a) *Bollman*; (b) *Bonotto*; (c) *Hildebrand*.

Fonte: Dutta (2007).

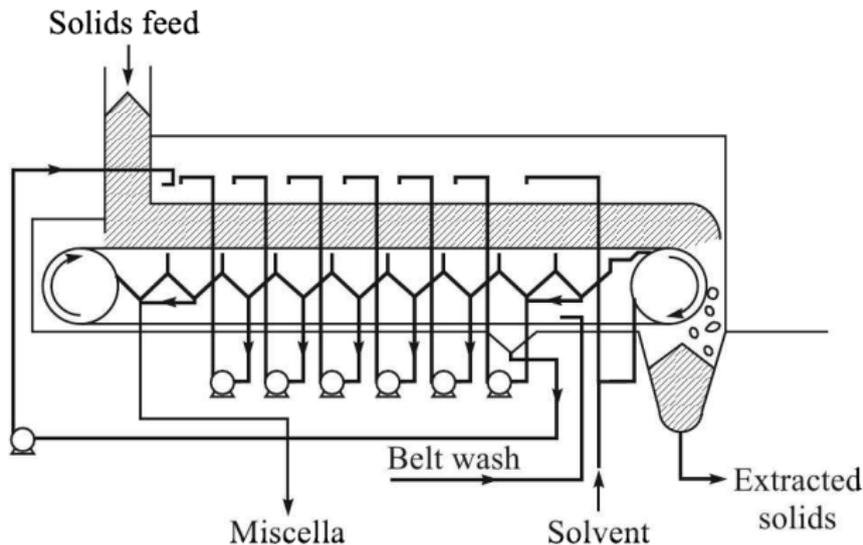
## Equipamentos de Extração: Extratores Contínuos



**Figura 8:** Extrator horizontal contínuo de caneca.

Fonte: Dutta (2007).

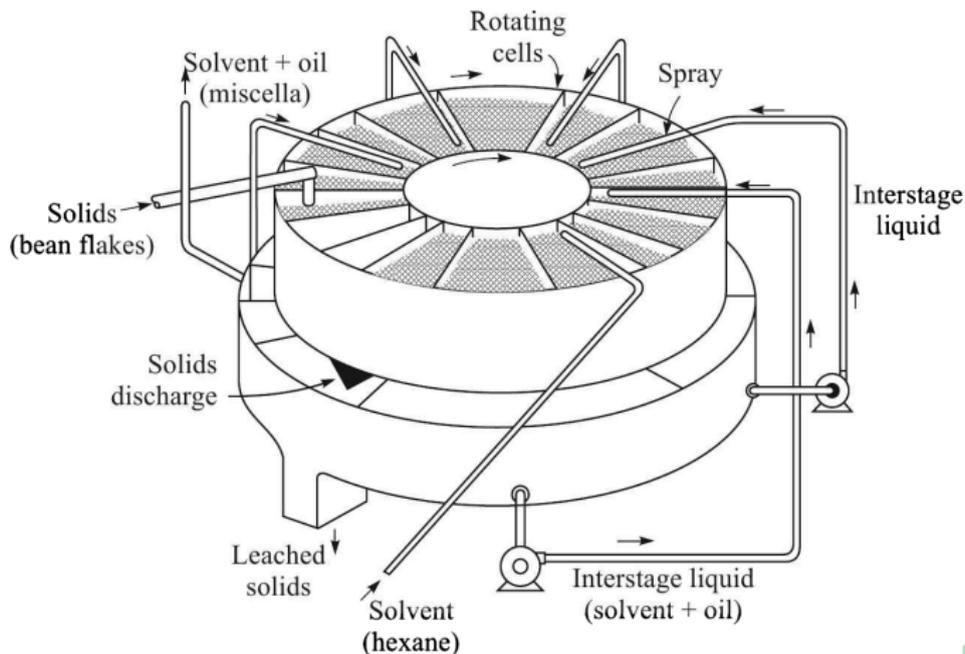
## Equipamentos de Extração: Extratores Contínuos



**Figura 9:** Extrator contínuo de cinta.

Fonte: Dutta (2007).

# Equipamentos de Extração: Extratores Contínuos



**Figura 10:** Extrator contínuo do tipo *Rotocel*.

Fonte: Dutta (2007).

## Referências

- DUTTA, B. K. **Solid-Liquid Extraction**. In: \_\_\_\_\_. (Org.). *Principles of Mass Transfer and Separation Process*. New Delhi: Prentice Hall of India, 2007, p. 477-501.
- GEANKOPLIS, C. J. **Introduction and Equipment for Liquid-Solid Leaching**. In: \_\_\_\_\_. (Org.). *Transport Processes and Separation Process Principles (Includes Unit Operations)*. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003, p. 802-817.
- SEADER, J. D.; HENLEY, E. J. **Leaching and Washing**. In: \_\_\_\_\_. (Org.). *Separation Process Principles*. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006, p. 623-643.



- WANKAT, P. C. **Washing, Leaching, and Supercritical Extraction**. In: \_\_\_\_\_. (Org.). *Separation Process Engineering Includes Mass Transfer Analysis*. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2012, p. 573-588.