

# PQI0410 - Operações Unitárias da Indústria Química V



Departamento de  
Engenharia Química  
Escola Politécnica da  
USP



## AULA 13 : Lixiviação

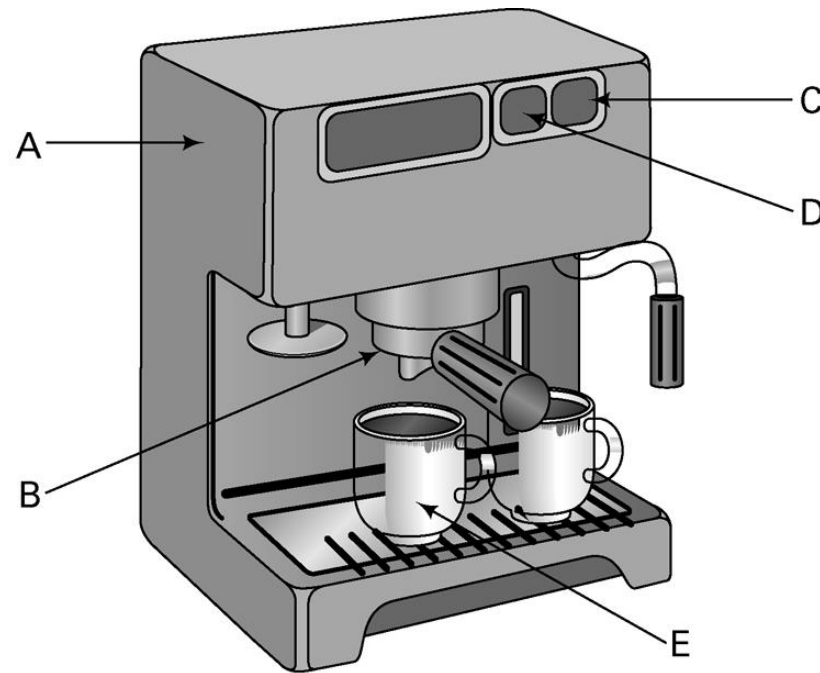
Prof. Moisés Teles/ [moises.teles@usp.br](mailto:moises.teles@usp.br)

# INTRODUÇÃO

Que fenômenos físico-químicos estão envolvidos neste processo?



(a)



(b)





# INTRODUÇÃO

- ❑ É uma extração sólido-líquido
- ❑ Remoção da fração solúvel (solute ou *leachant*) de um material sólido por um solvente líquido (soluções ácidas, alcalinas, água, etc)..
- ❑ Produtos de interesse: sólido não solúvel, sólido solúvel ou ambos.
- ❑ Aplicações

Indústrias metalúrgicas

Extração de produtos naturais

Indústria de alimentos

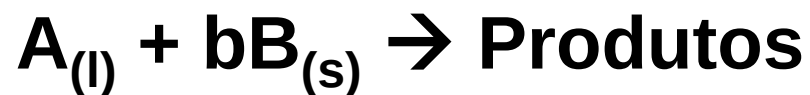


# APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

## INDÚSTRIAS METALÚRGICAS

- Pode envolver reações de oxidação ou redução do sólido com o solvente.
- Exemplos: remoção de cobre de minério usando ácido sulfúrico; recuperação de ouro de minério usando solução de cianeto de sódio.

Recuperação de metais de minérios, que pode ser realizada através da reação de parte do minério com uma espécie química presente no licor de lixiviação, produzindo íons do metal solúveis no líquido.



Materiais lixiviáveis encontram-se nos minérios (óxidos, silicatos, sulfatos).

Para esses materiais, a lixiviação pode ser realizada tanto em meios oxidantes, neutros ou básicos.

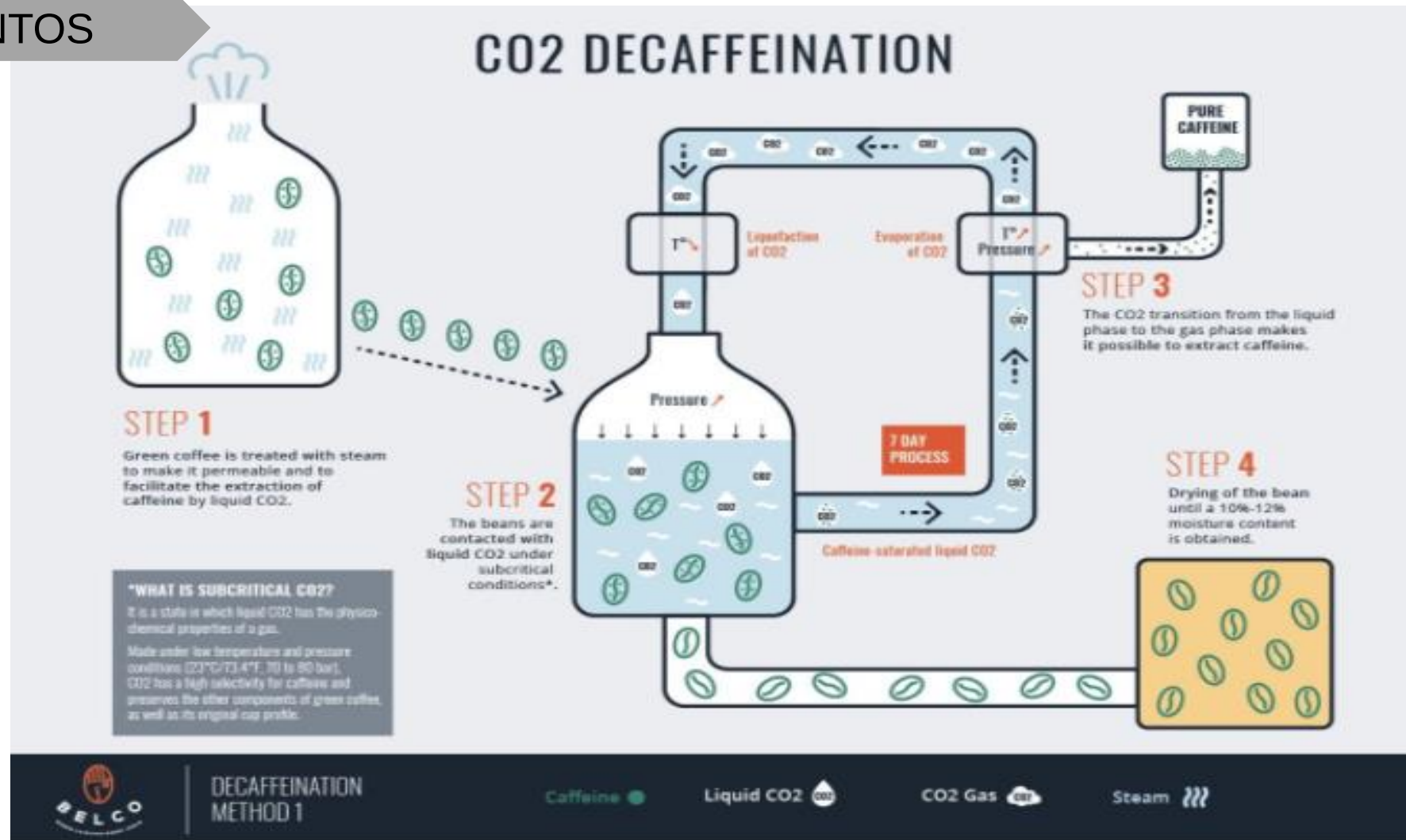
**BIOLIXIVIAÇÃO:** as bactérias promovem a solubilização do cobre dos sulfetos que os contêm. Utilizada nos países produtores de cobre a partir de sulfetos como Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), Calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), Covellita ( $\text{CuS}$ ) e Bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_5$ )

# APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

## INDÚSTRIAS DE ALIMENTOS

### Exemplos:

- Extração de açúcar de beterraba usando água quente.
- Extração de cafeína de grãos de café verde com CO<sub>2</sub> supercrítico.
- Recuperação de proteínas e outros produtos naturais de células.

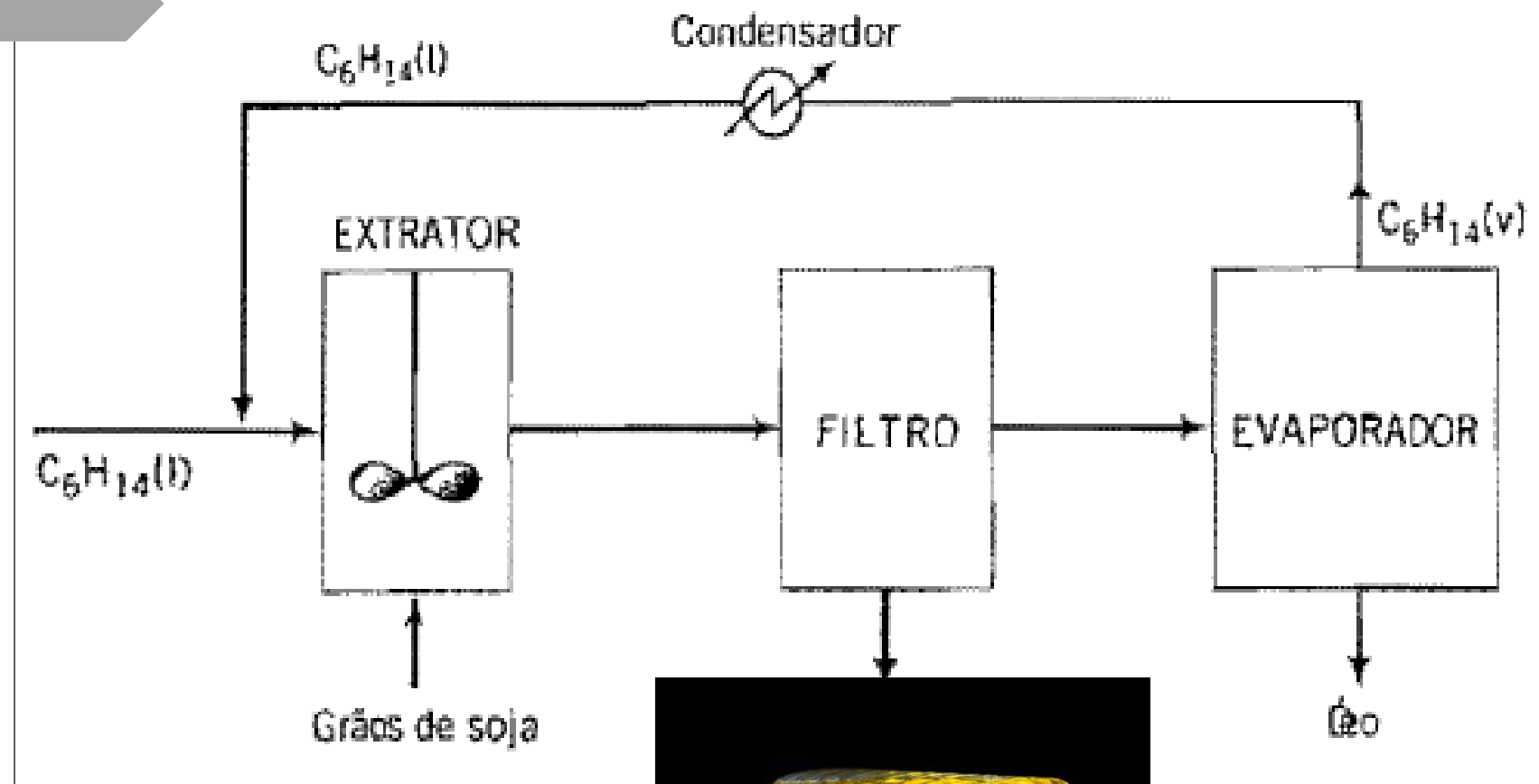




# APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

## OUTROS EXEMPLOS

- Extração de taninos de cascas de árvore usando água.
- Extração de óleos vegetais com hexano.



Quando a lixiviação  
será vantajosa em  
relação à  
prensagem?





# APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

## ESCOLHA DO SOLVENTE

Alta solubilidade para o soluto

**ALTA** volatilidade

Estável e inerte

Baixa corrosão

Baixa viscosidade

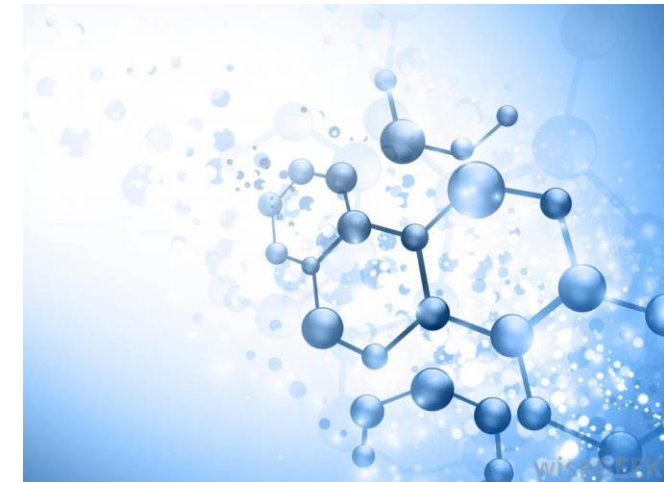
Baixa inflamabilidade e toxicidade

Disponibilidade (se possível no processo)

Baixo custo

Recuperação por evaporação ou destilação

**Trade-offs: tricloroetileno Vs hexano**





# PRINCIPAIS CORRENTES E CARACTERIZAÇÃO

- ***OVERFLOW (sobrenadante)***

- Isento de sólidos.
- Formado pelo solvente + soluto retirado do sólido.

- ***UNDERFLOW (sólidos)***

- Sólido úmido (lama).
- Formado pelo sólido não dissolvido + solução (solvente + soluto)

*Overflow* final: **extrato**.

*Underflow* final: sólidos insolúveis + solução com pequena quantidade de soluto.

Idealmente todo sólido solúvel é separado da matriz sólida e está no solvente, mas **o solvente é distribuído nas duas correntes**

**Necessidade de etapas posteriores de tratamento das duas correntes para recuperação do solvente e o soluto (lavagem).**



# PRÉ-TRATAMENTO

- Material sólido: tamanho, forma, porosidade: influência na TM do solvente.
- Os sólidos lixiviáveis normalmente passam por processos de pré-tratamento antes de serem alimentados aos equipamentos de lixiviação.
- Exemplo: remoção de cobre de minério com solução de ácido sulfúrico: diâmetros das partículas (150 mm, 6 mm, e menos de 0.25 mm). Tempos: 5 anos, 5 dias e 5 horas.
- Quando os sólidos contêm grande quantidade do soluto, o pré-tratamento pode ser dispensável devido à desintegração da estrutura sólida do material.
- Quando todo o material sólido é solúvel, lixiviação é rápida e um único estágio é necessário (dissolução).
- Para extração de minério, é necessário triturar o sólido até uma granulometria adequada.



# TIPOS DE PROCESSAMENTO

## ❑ PERCOLAÇÃO

- Solvente passa através de um leito onde é situado o material sólido

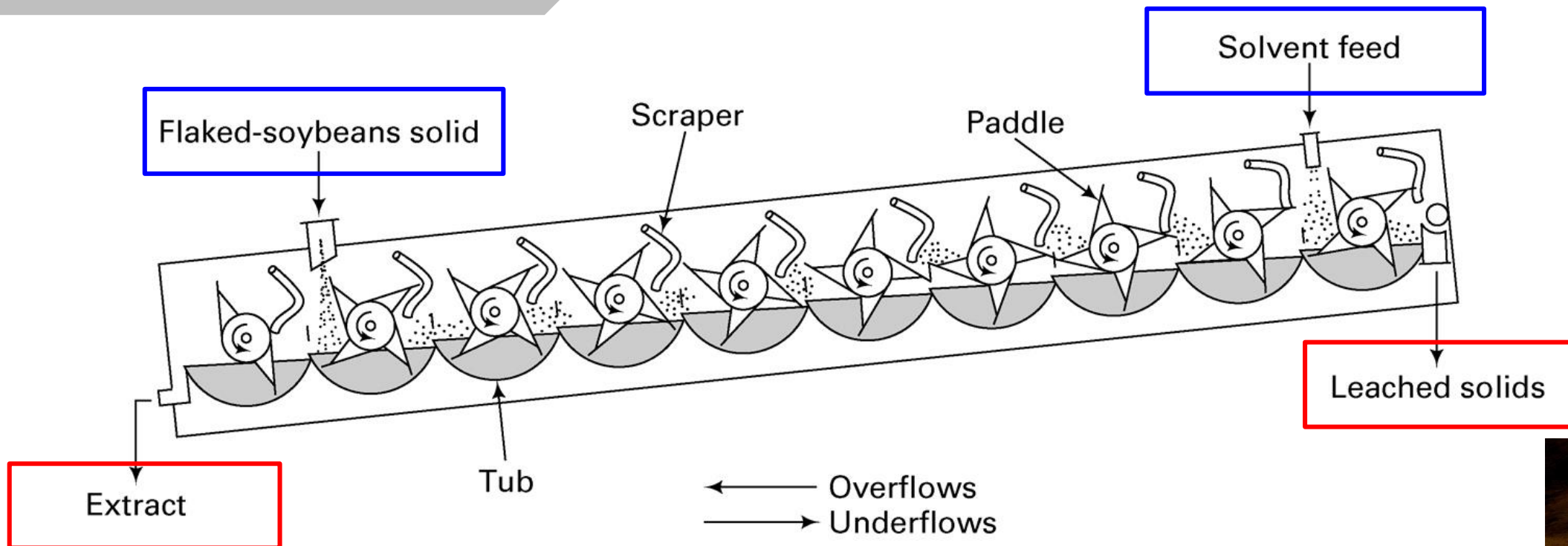
## ❑ IMERSÃO

- O material sólido é imerso no solvente com agitação da mistura.
- Normalmente operações multiestágios em contracorrente.

O equipamento deve ser eficiente de forma a minimizar o consumo de solvente (custo de recuperação do solvente).

# EQUIPAMENTOS

## EXTRATOR KENNEDY



- Sólidos finais: 0.0151 g de óleo/ g de grãos secos isentos de óleo.
- 94.4% do óleo extraído.
- Tempo de residência em cada tubo de 3 minutos.
- Tempo de residência total de 45 minutos.

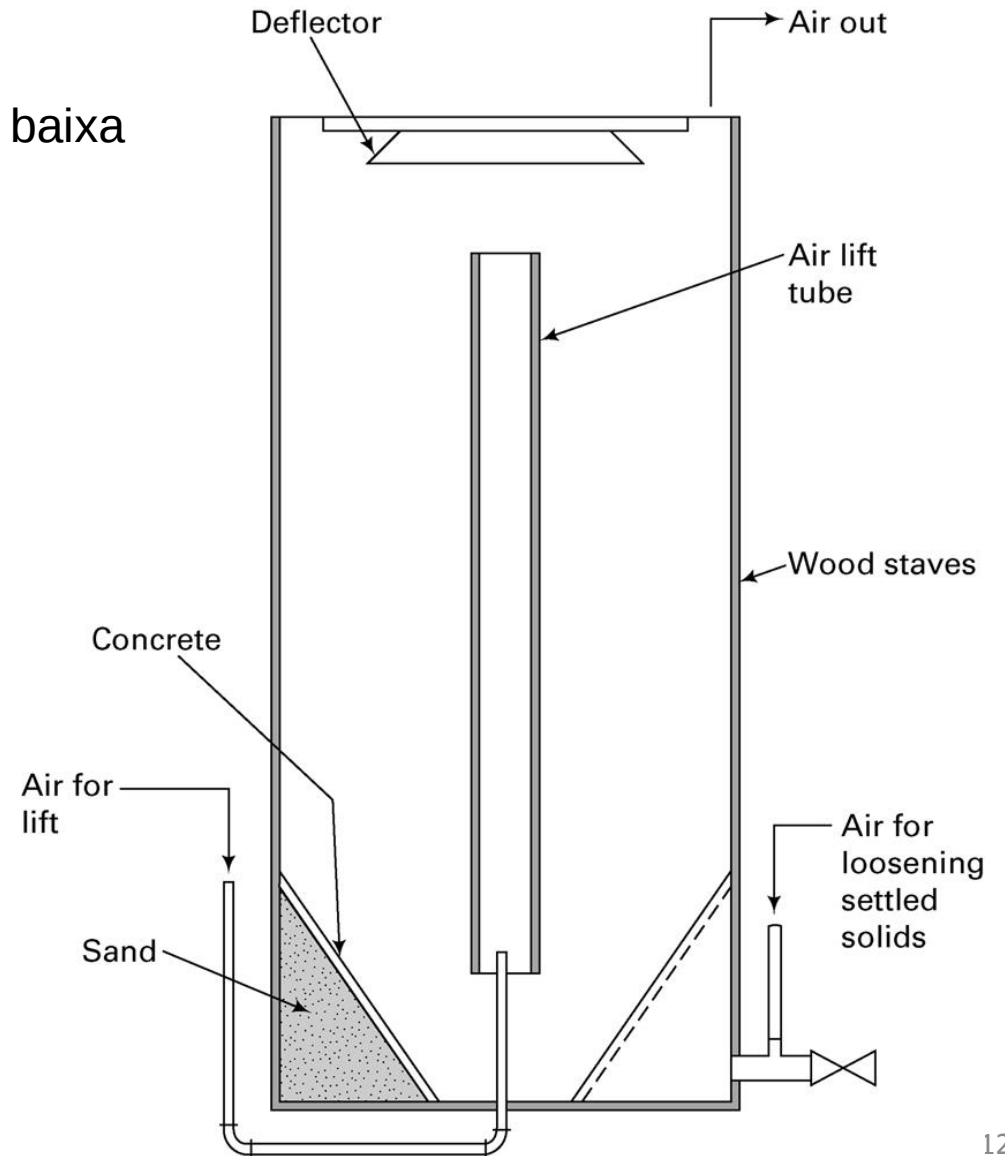
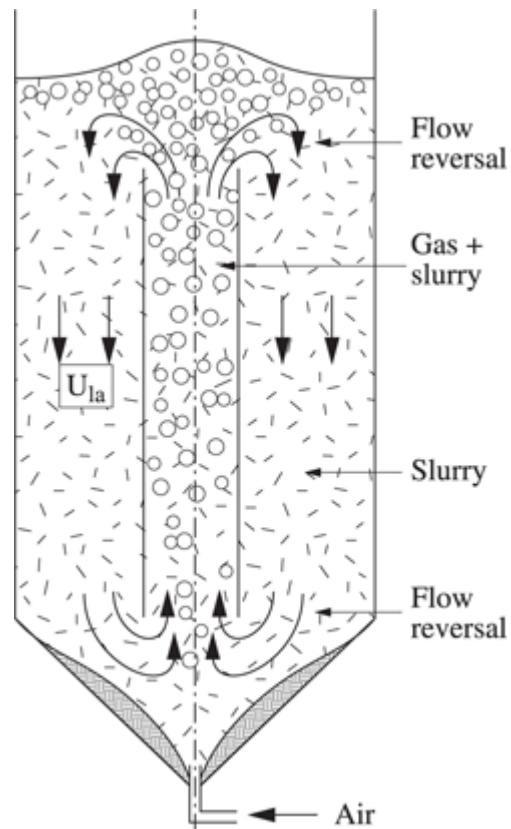
Por que o solvente fresco é posto em contato primeiro com o sólido que está há mais tempo no processo?



# EQUIPAMENTOS

## BATELADA

- ❑ Quando os sólidos estão na forma de partículas de baixa granulometria ( $< 0,1 \text{ mm}$ ).
- ❑ Tanque agitado Pachuca (agitação através de ar).



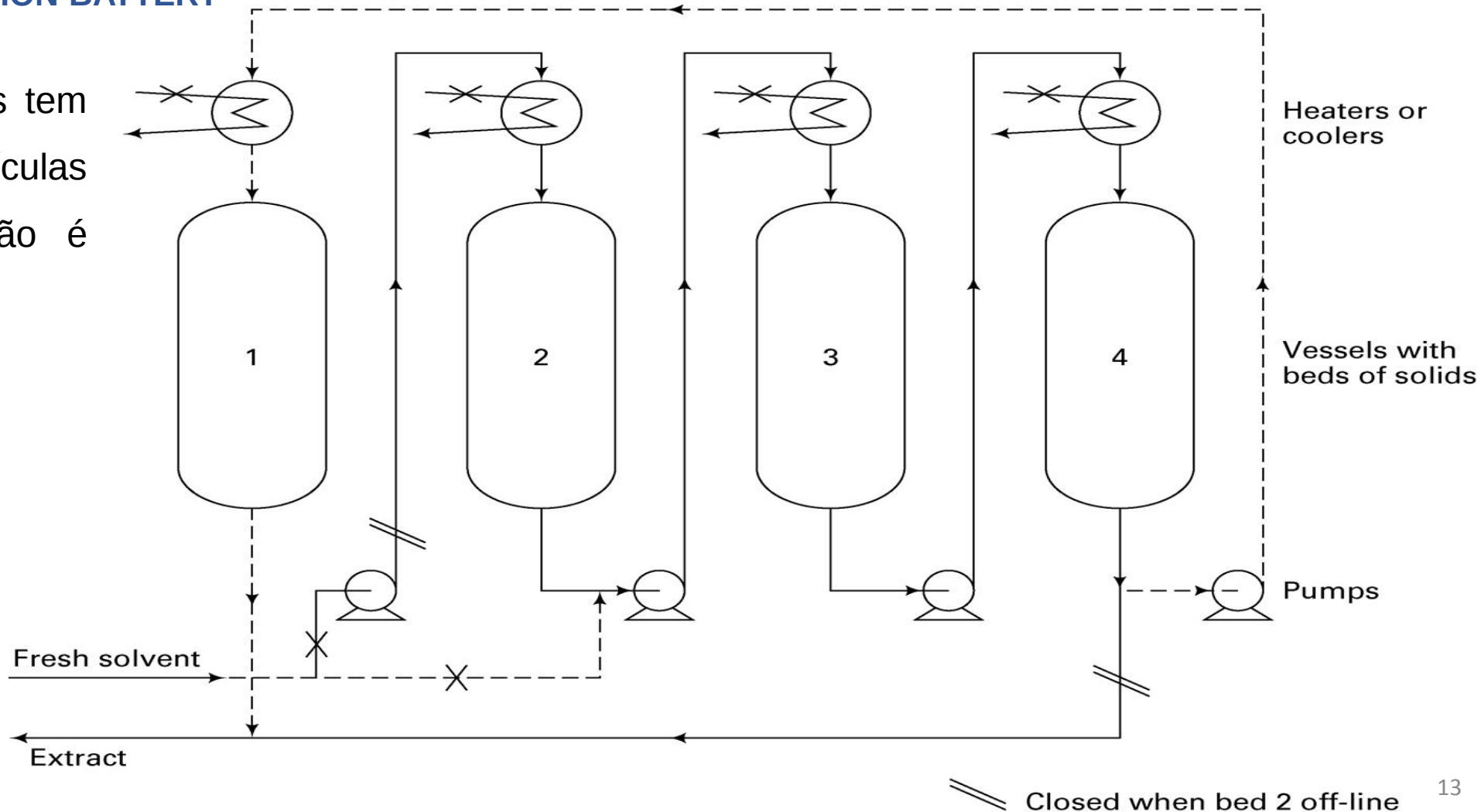
# EQUIPAMENTOS

## BATELADA

### SHANKS EXTRACTION BATTERY

Quando os sólidos tem tamanho de partículas elevada, percolação é preferível.

Exemplos:  
extração de substâncias solúveis do café, chá e especiarias.

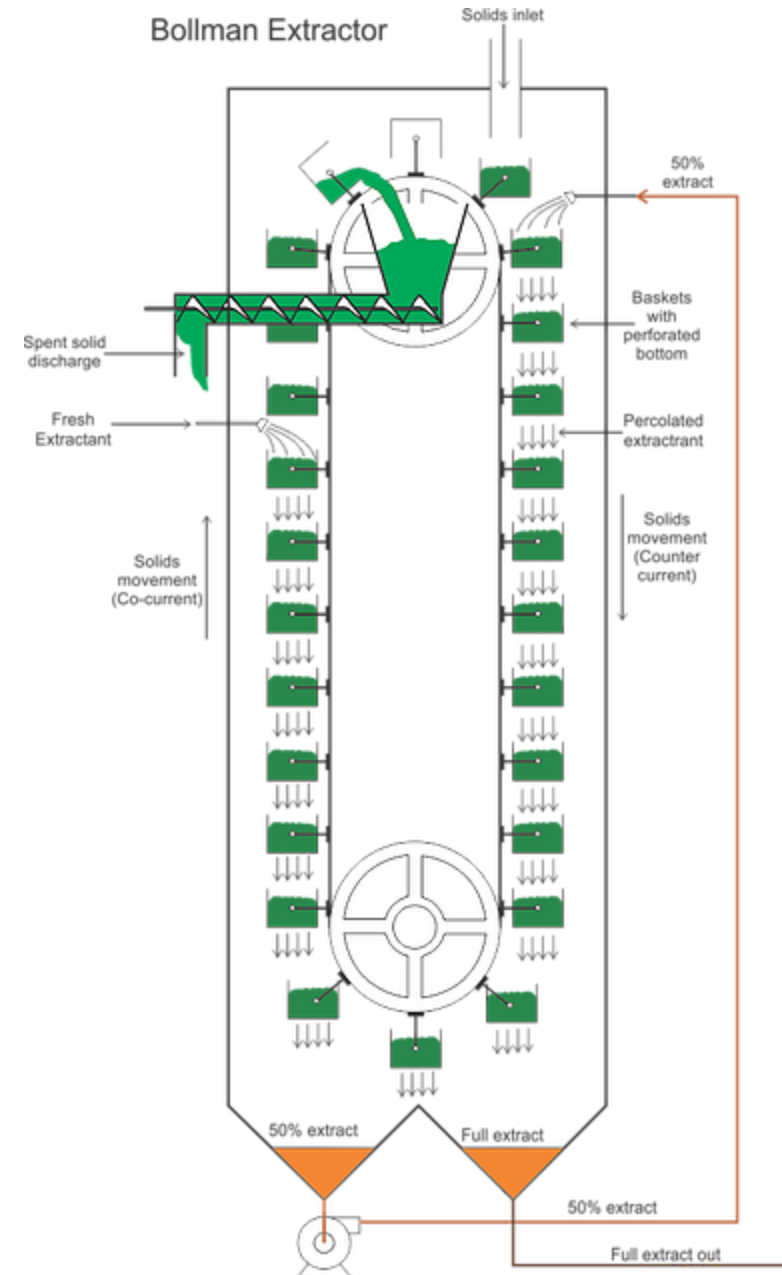


# EQUIPAMENTOS

## SISTEMAS CONTÍNUOS

**Lixiviação em larga escala: sistemas contínuos.**

Exemplo: **extrator Bollman** ( extração de óleo de sementes e grãos fragmentados).



# EQUIPAMENTOS

## SISTEMAS CONTÍNUOS

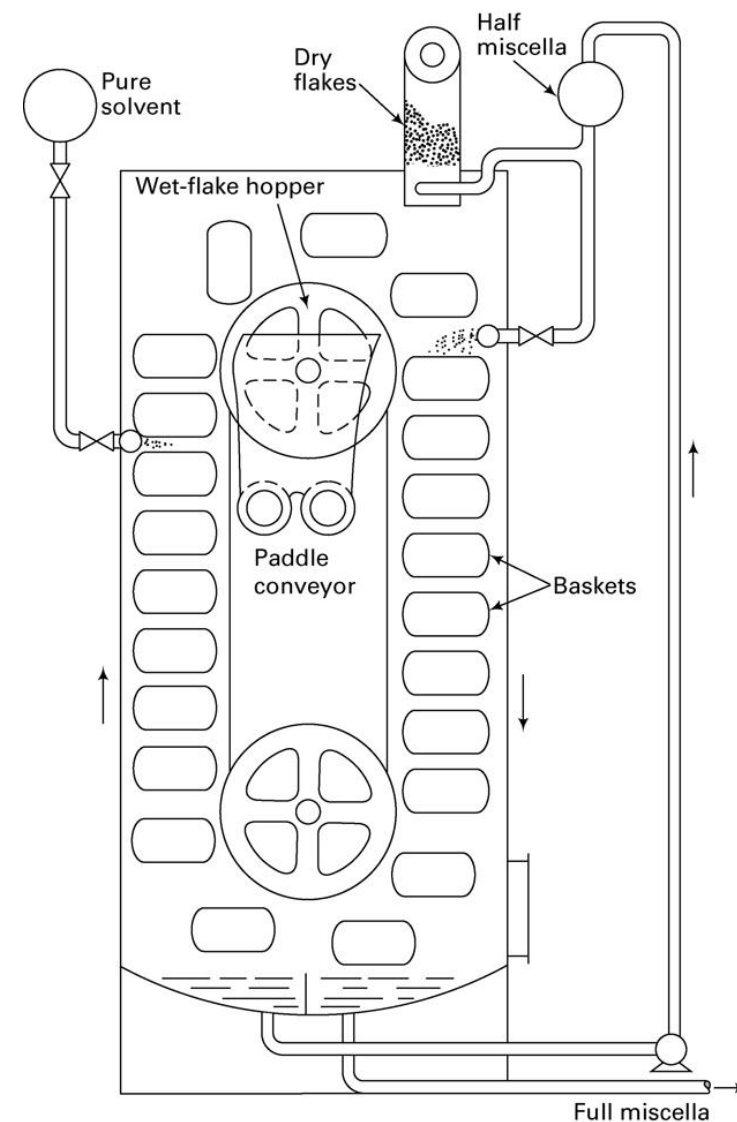
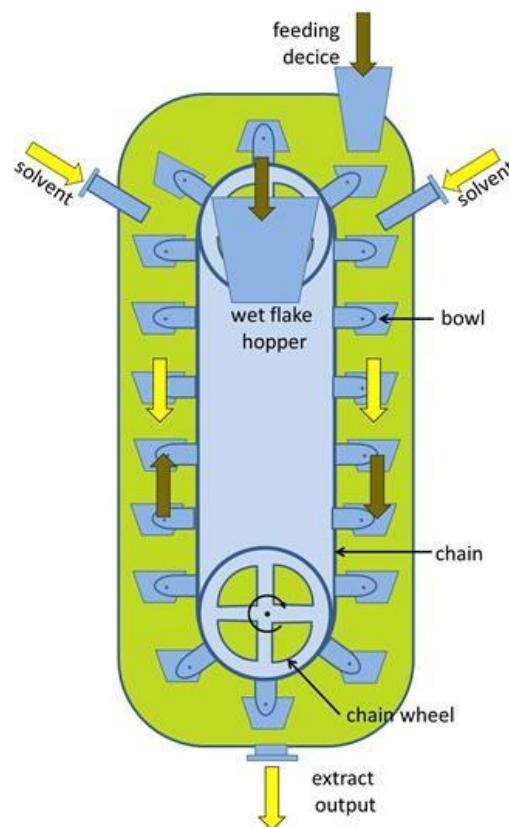
Lixiviação em larga escala: sistemas contínuos.

Exemplo: extrator Bollman ( extração de óleo de sementes e grãos fragmentados).

### Capacidade:

350 kg (cada cesta).

Em 23 cestas: aprox.  
200.000 kg de sólidos  
podem ser  
processados por dia.



(a) Bollman vertical, moving-basket, conveyor extractor

# EQUIPAMENTOS

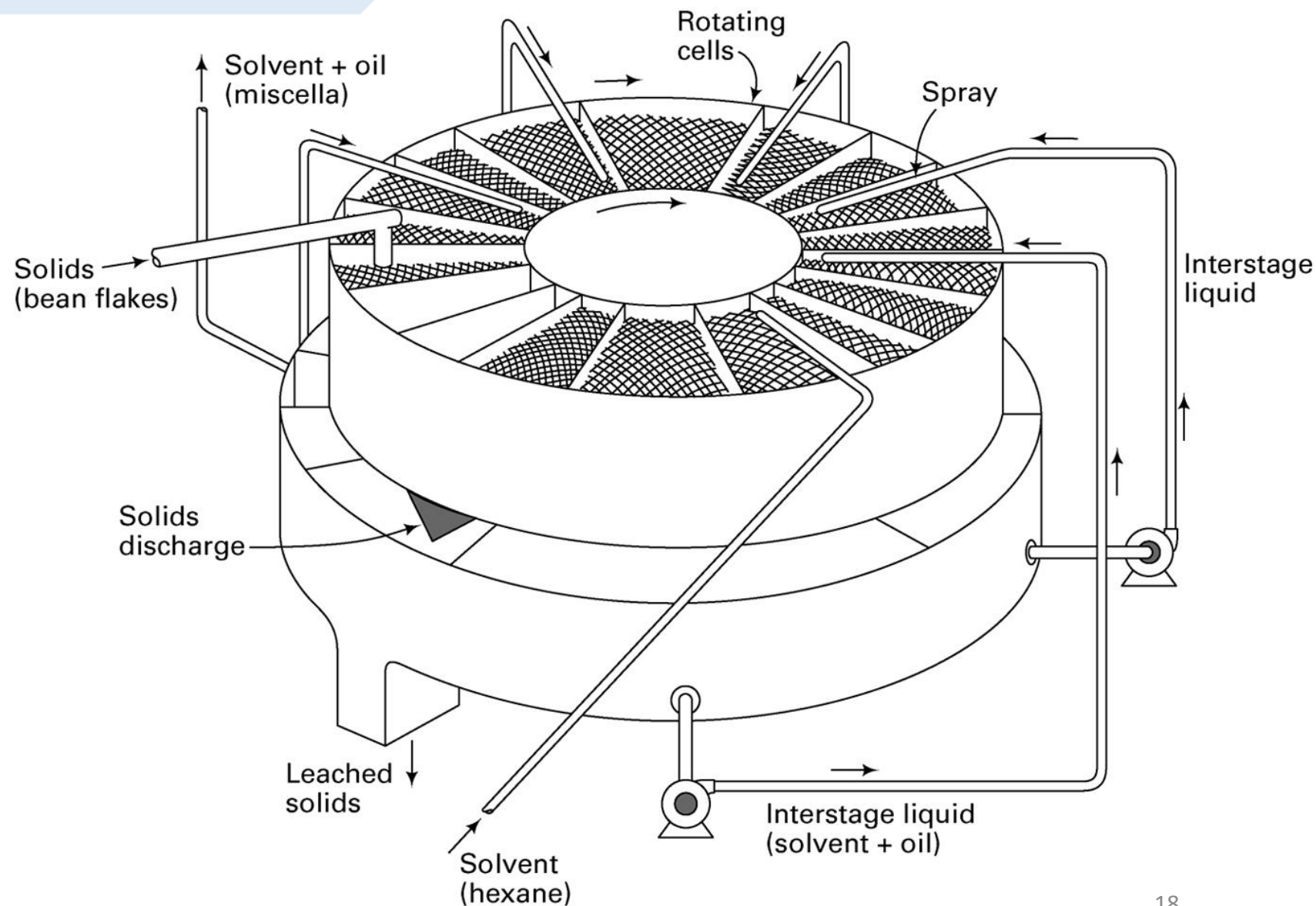
## SISTEMAS CONTÍNUOS

### EXTRATOR ROTOCEL:

3.4–11.3 m de diâmetro,  
6.4–7.3 m de altura, e leitos  
de 1.8–3.0 m de  
profundidade.

**Processamento:** mais de 3  
milhões de kg/dia de grãos  
de soja.

**Operação:** fluxos  
contracorrentes de sólidos e  
líquido.



(b) Rotocel extractor

# EQUIPAMENTOS

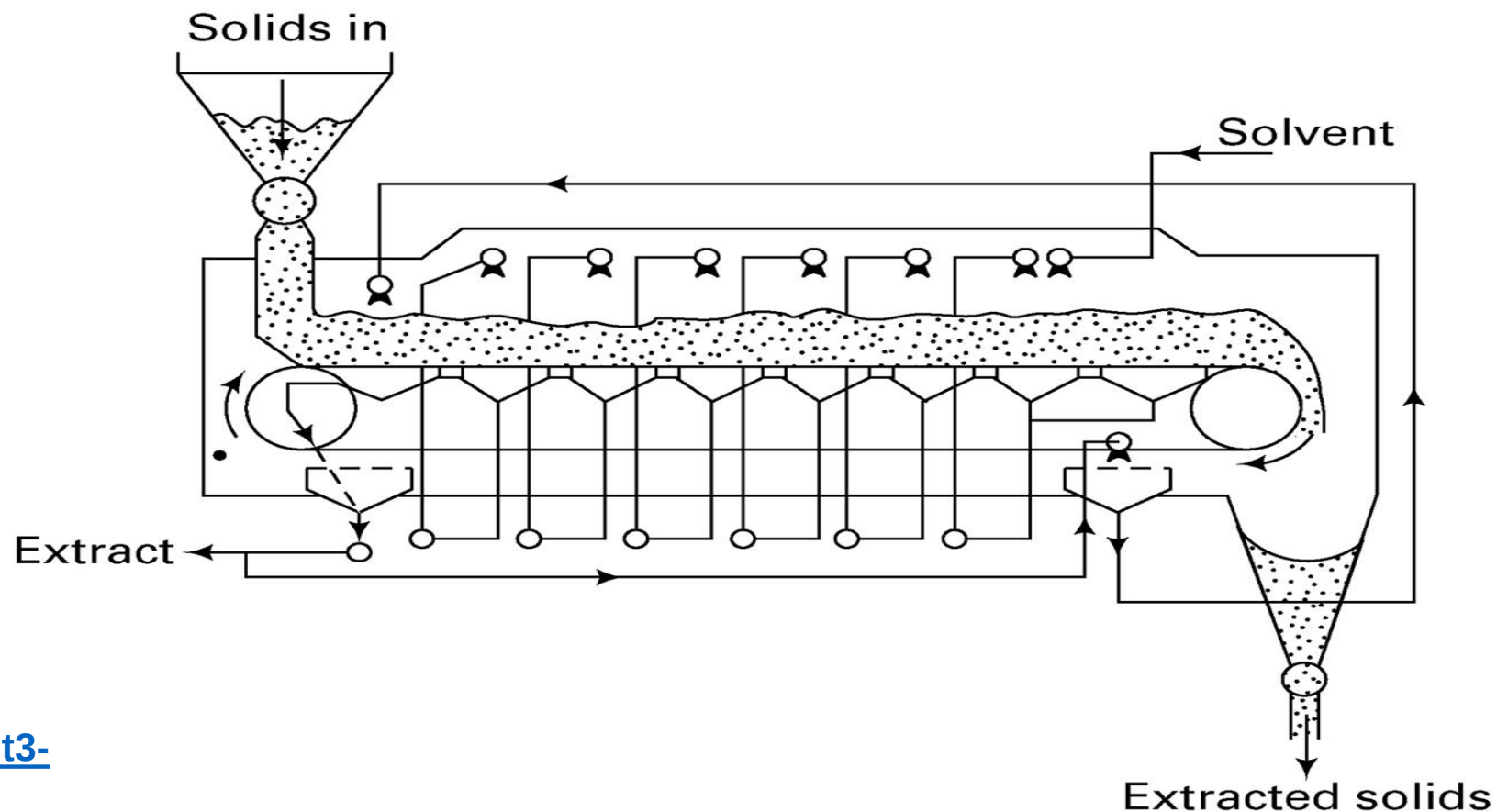
## SISTEMAS CONTÍNUOS

### ESTEIRA PERFURADA.

Aplicações: cana de açúcar, sementes oleaginosas e maçãs (para sucos).

Capacidades de até 7.000.000 kg/dia.

<https://www.youtube.com/watch?v=yTlt3-puecY>

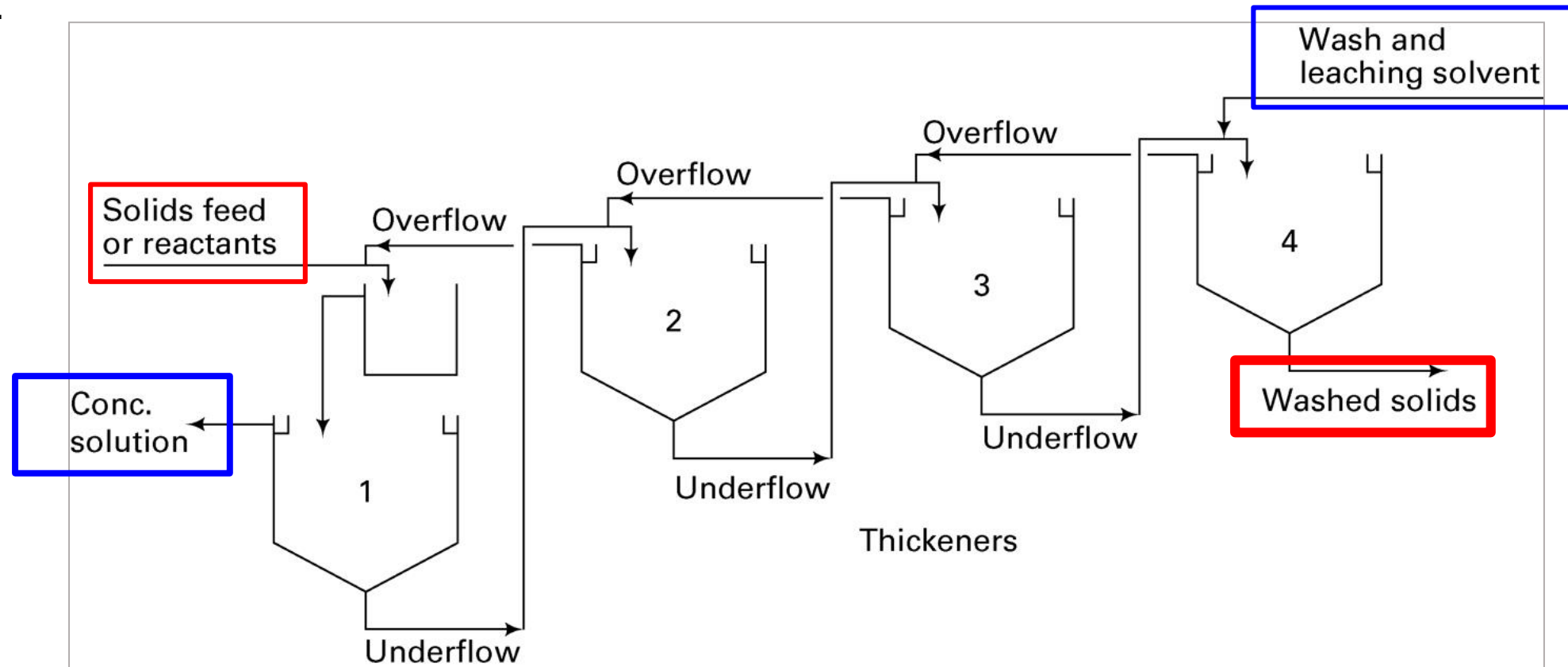


(d) Continuous, perforated-belt extractor

# LAVAGEM

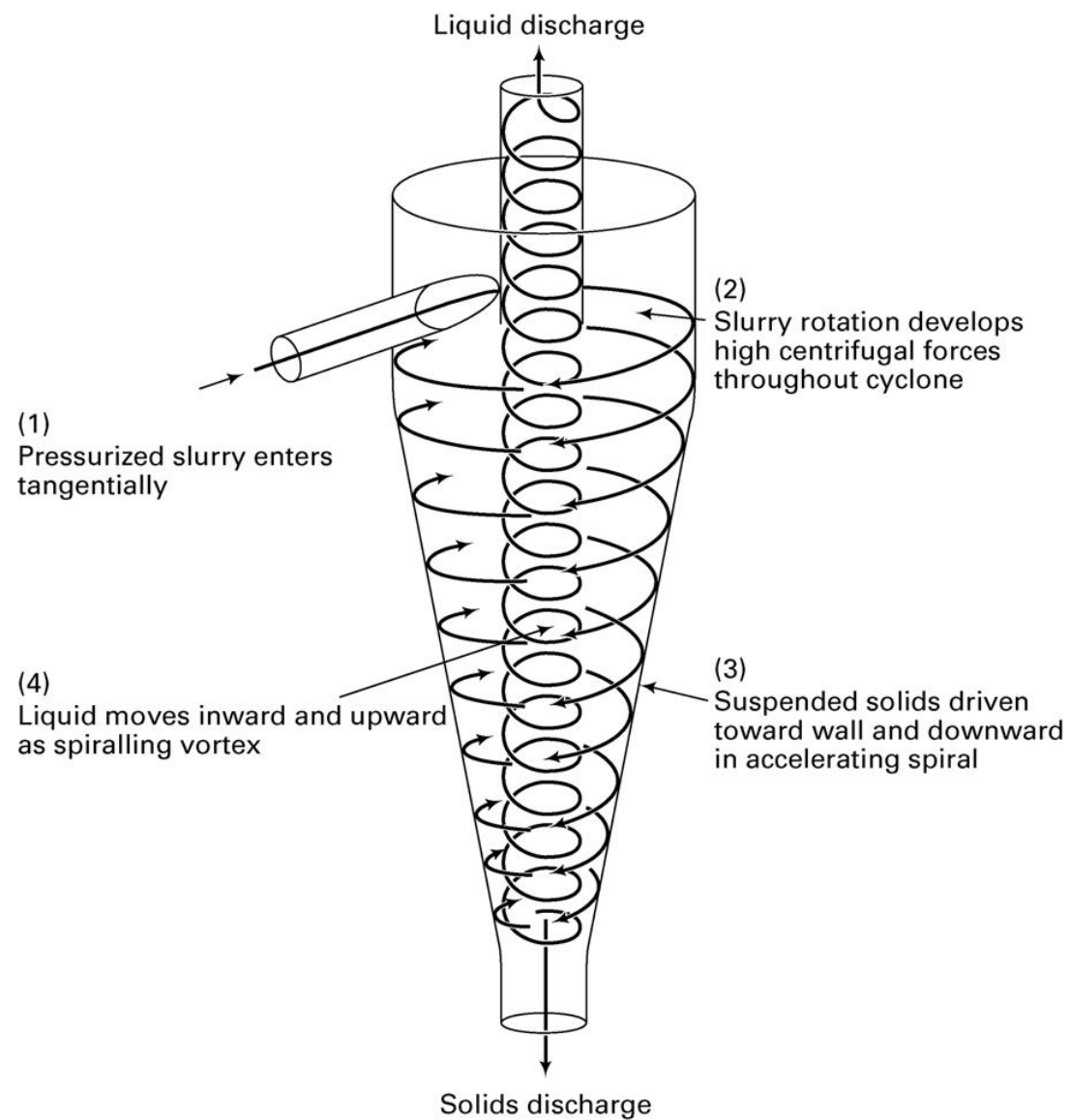
Lavagem contracorrente dos sólidos para **reduzir a concentração de soluto no líquido aderido ao sólido.**

Lixiviação rápida: pequenas partículas sólidas com solutos muito solúveis ou quando a lixiviação já está completa.



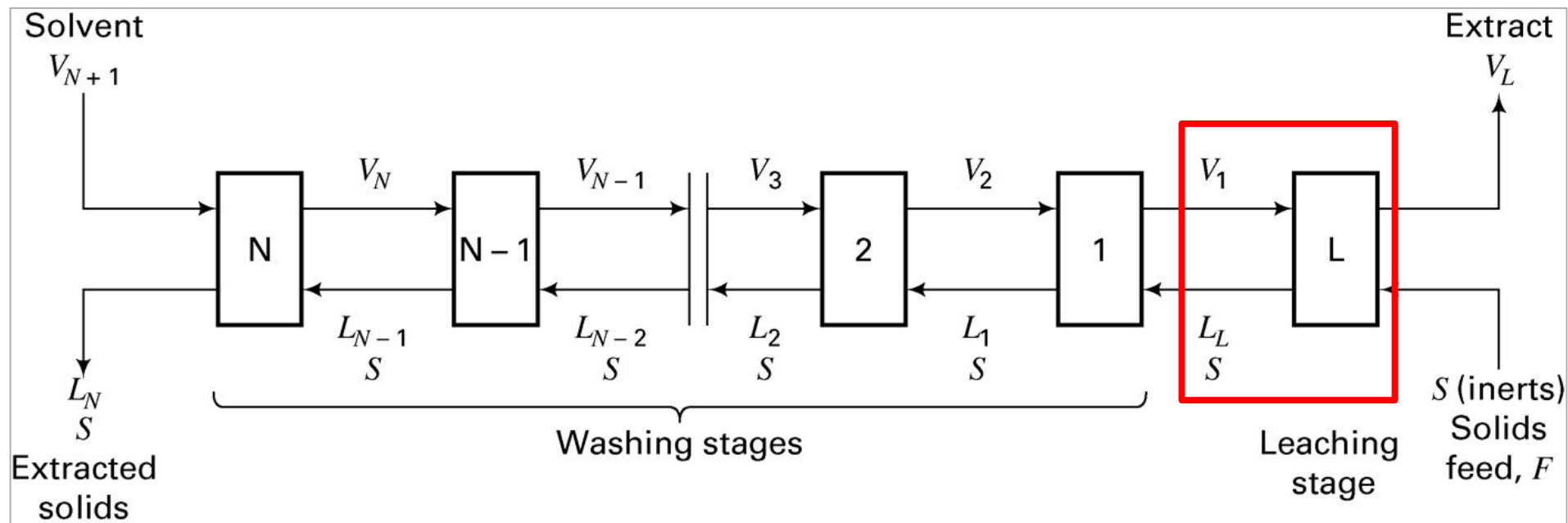


# LAVAGEM



(b) Hydroclone, centrifugal thickener

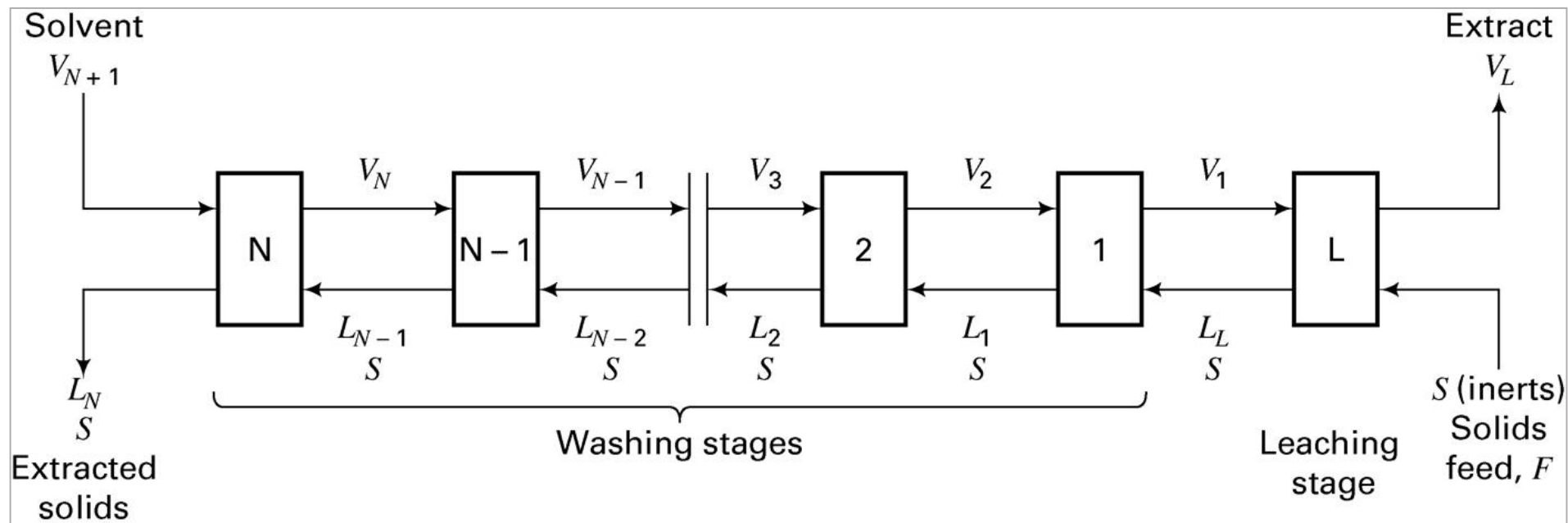
# ESTÁGIO DE EQUILÍBRIO E SISTEMAS MULTISTÁGIOS



## CONSIDERAÇÕES

- ❑ Alimentação sólida consiste de:  
**Soluto**: completamente solúvel no solvente.  
**Sólidos inertes ou não solúveis**.
- ❑ Lixiviação é rápida o suficiente para ser completada em um único estágio.
- ❑ Após a lixiviação (dissolução do soluto), o sólido passa por uma série de estágios de lavagem para **reduzir a concentração do soluto no líquido aderido ao sólido**.
- ❑ Todas as correntes de sobrenadante são isentas de sólidos.

# ESTÁGIO DE EQUILÍBRIO E SISTEMAS MULTISTÁGIOS



## CONSIDERAÇÕES

**S:** vazão mássica de sólidos inertes (constante).

**V:** vazão mássica de solvente na entrada do processo ou líquido overflow (solvente + soluto) (varia de estágio a estágio).

**L:** vazão mássica de líquido underflow (solvente + soluto)

**y:** fração mássica do soluto no líquido overflow.

**x:** fração mássica do soluto no líquido underflow.

Ps: outras bases (volumétricas, molares) podem ser usadas, bem como uma base isenta de soluto ( $Y$  e  $X$  como razões mássicas, semelhante ao usado em absorção).



# ESTÁGIO DE EQUILÍBRIO E SISTEMAS MULTIESTÁGIOS

## ESTÁGIO IDEAL DE EQUILÍBRIO

- (1) Todo o soluto sólido é completamente dissolvido no solvente em um estágio (assume-se que a quantidade de solvente é suficiente para tanto).
- (2) A composição do líquido em um estágio é uniforme, incluindo o líquido presente nos poros do sólido inerte.
- (3) Solute não é adsorvido na superfície do sólido inerte.
- (4) Sólidos inertes que deixam um estágio pelo underflow são impregnados com o líquido, de forma que a **razão mássica de solvente no líquido (ou líquido total) para sólidos inertes é constante de estágio a estágio**.
- (5) Devido ao item (2), a **concentração de soluto no líquido overflow é igual à concentração no líquido presente (impregnado) no sólido do underflow. Isto equivale a uma condição de equilíbrio**.
- (6) Nenhuma corrente de overflow contém sólidos.
- (7) Solvente não é vaporizado, adsorvido ou cristalizado no processo.