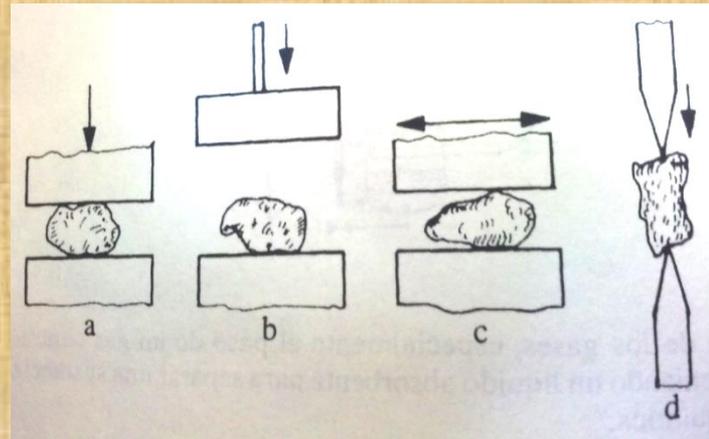


OPERACIONES UNITARIAS CON TRANSFERENCIA DE MATERIA

Trituración: Se entiende por trituración de sólidos, la disminución del tamaño por machacado o molino. Según las propiedades del material, se emplean distintos métodos.

Clase de material	Clase de trituración
Material duro	Presión, impacto
Material frágil	Fractura
Material tenaz	Escisión, corte



a: Presión
b: Impacto
c: Fricción
d: Escisión

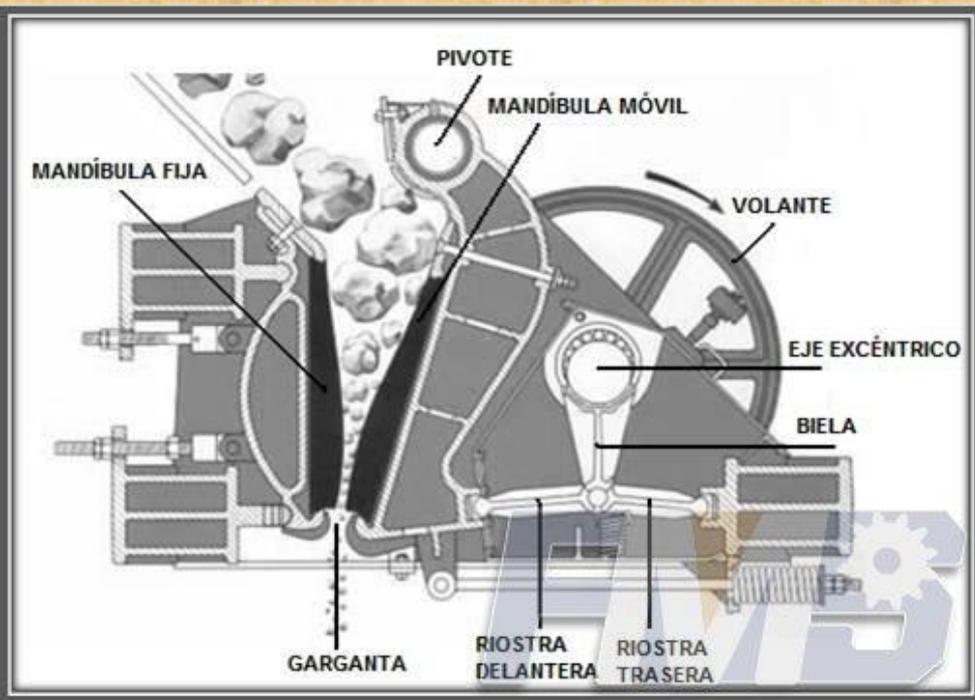
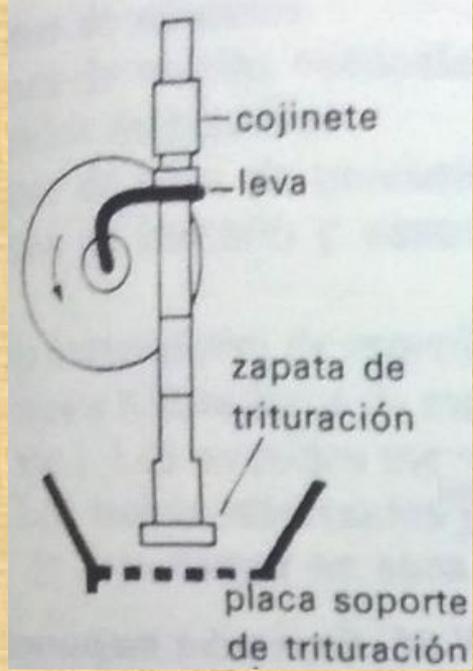
Máquinas trituradoras: Aplican simultáneamente varios de estos métodos. Muchas sustancias se secan previo a la molienda, en tanto que otras se muelen en húmedo. La ventaja de esta última es evitar la producción de polvos. Durante el proceso de trituración de debe tener en cuenta:

- 1) Se debe comprobar que no existan objetos extraños con el material a moler.
- 2) Usar un separador magnético que elimine el hierro que se encuentre en el material.
- 3) Controlar la lubricación del molino.
- 4) Detener la molienda si se obstruye el molino.
- 5) Limpiar el molino al finalizar y lubricar las piezas que lo requieran.
- 6) No introducir las manos o herramientas mientras están en funcionamiento.

Trituración gruesa: Los materiales formados de trozos grandes “puño - cabeza de caballo” se someten a una trituración gruesa en las *quebrantadoras o machacadoras* (mandíbula, conos, rodillos). Éstas lo pueden llevar hasta 50 mm

Molinos

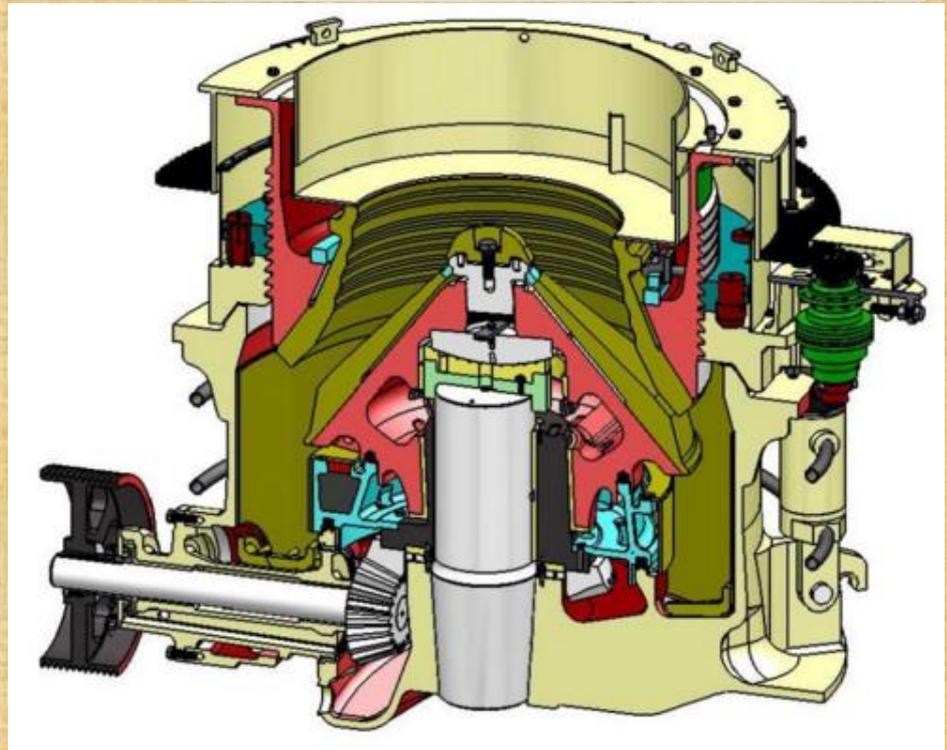
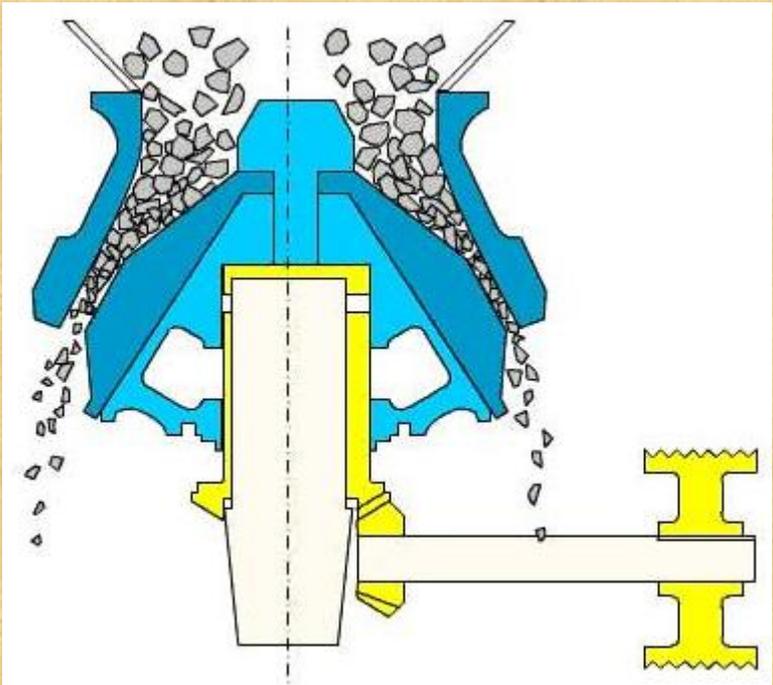
Molino tipo machacador (Trituración gruesa)



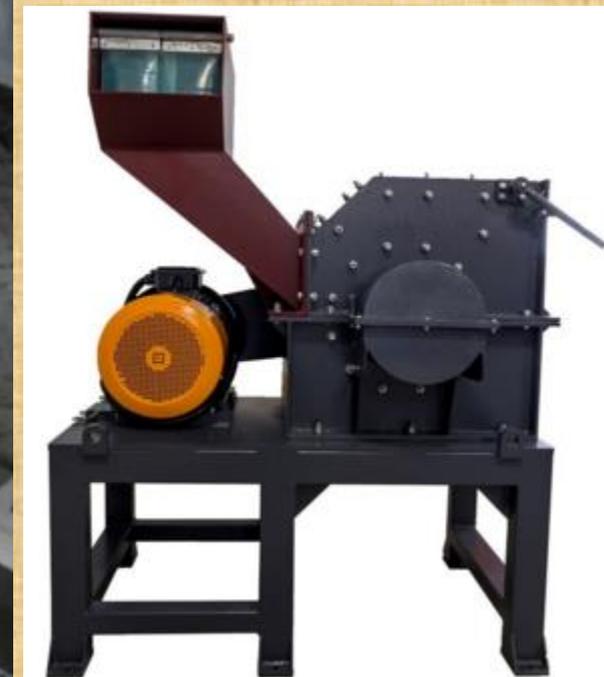
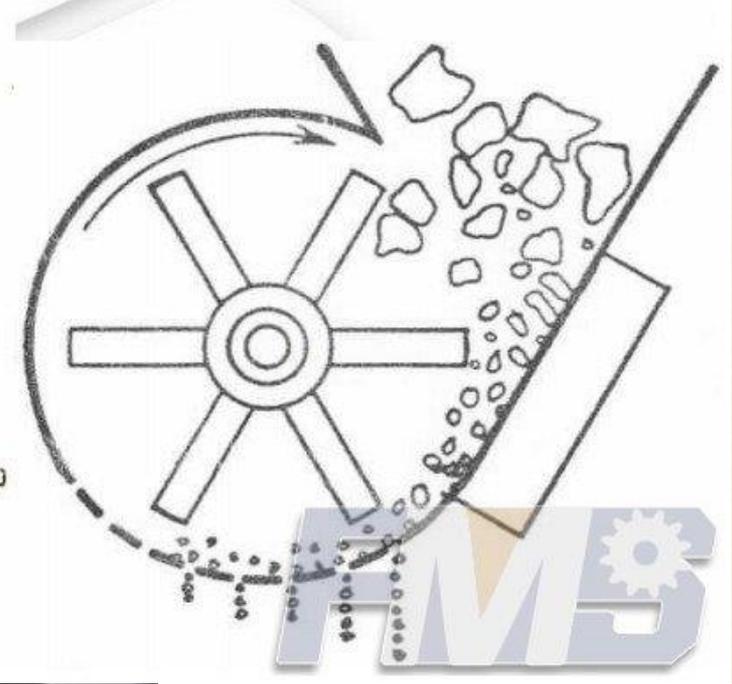
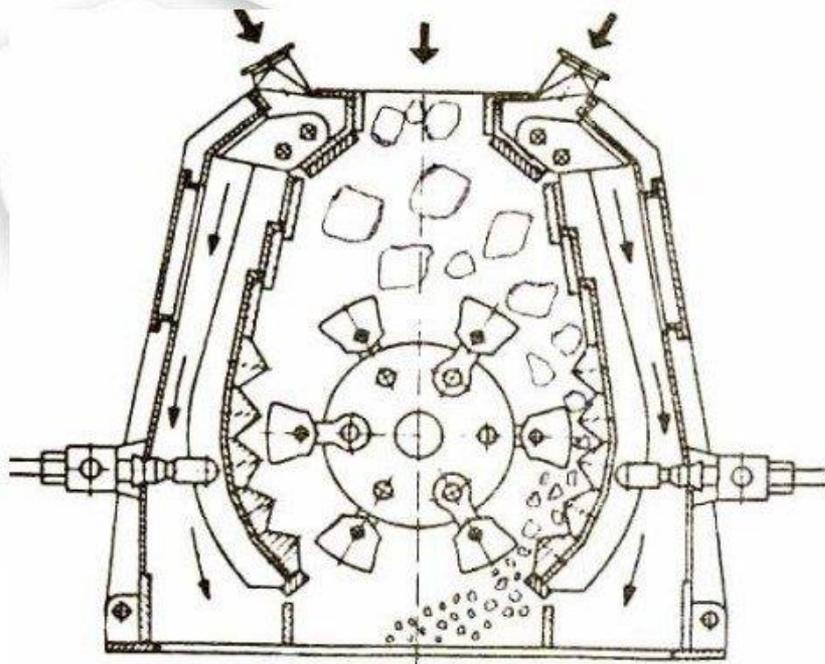
Triturador de mandíbulas (trituration gruesa)

Trituradora de conos (Trituración gruesa)

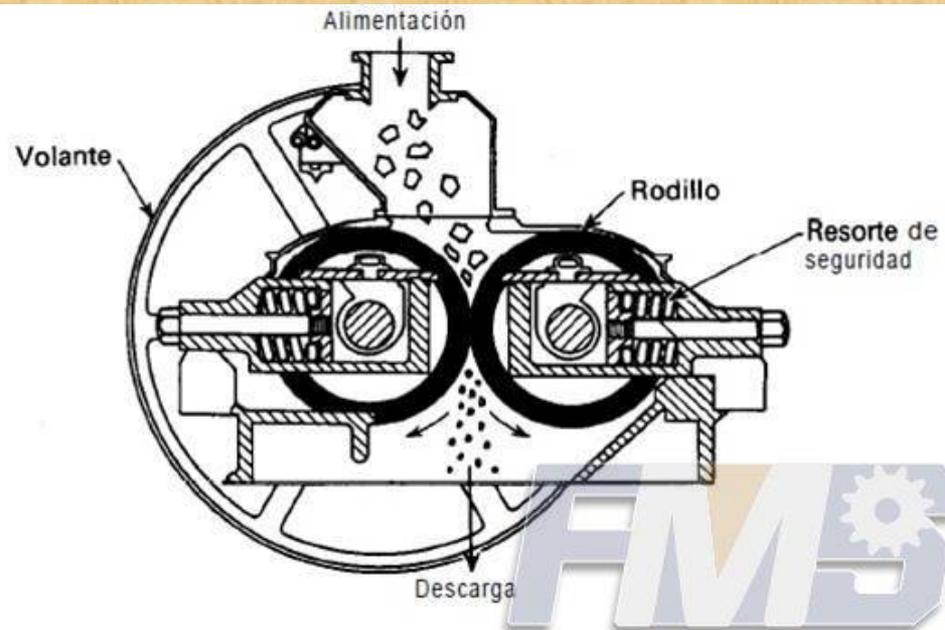
SoloStocks



Trituradora
de martillos
(Trituración
Media)



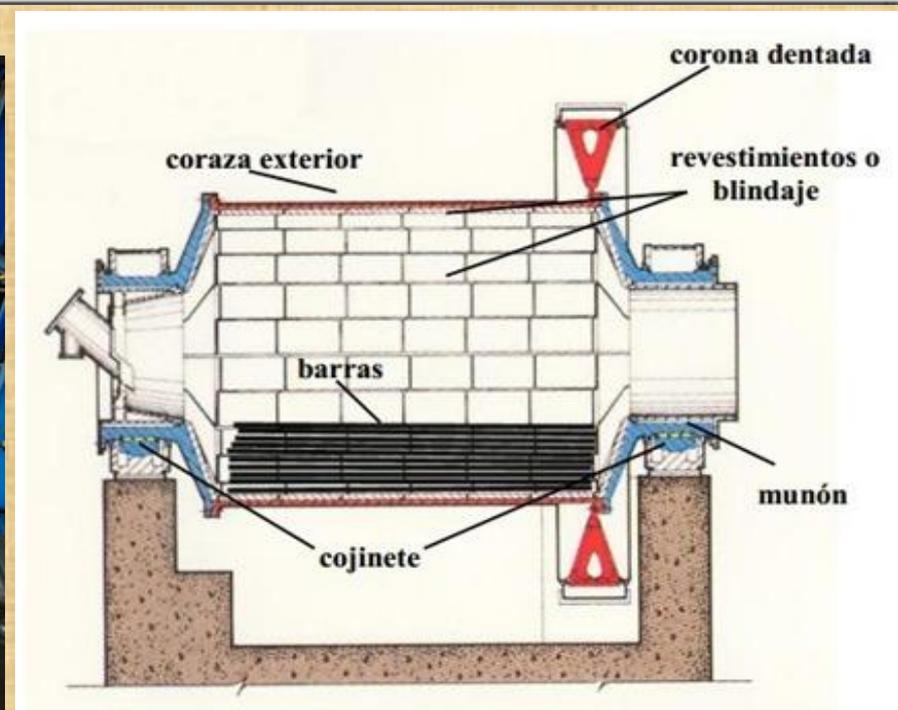
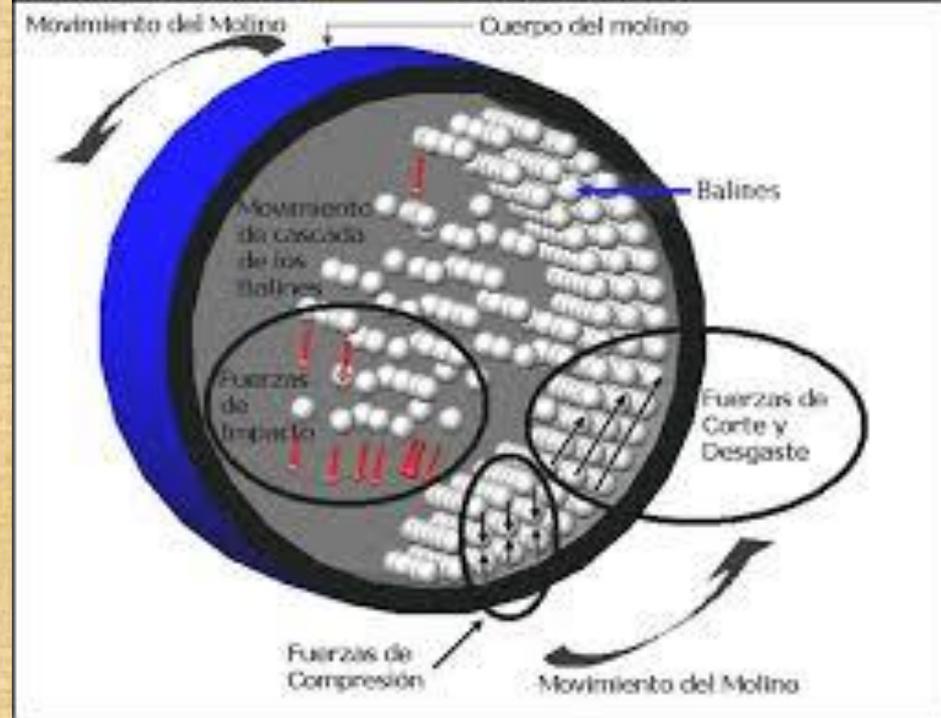
Molino de cilindros (Trituración media)



Molino de muelas (Trituración fina)

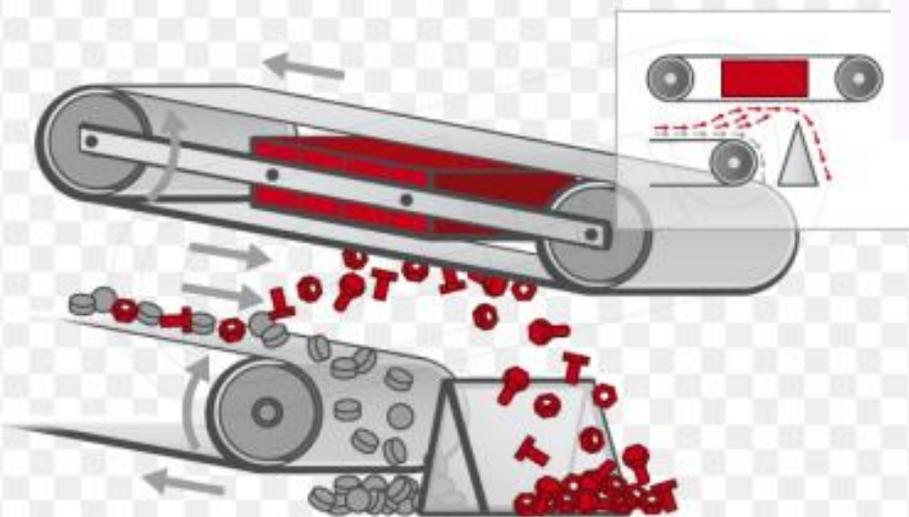


Molinos de bolas o barras (Trituración fina)

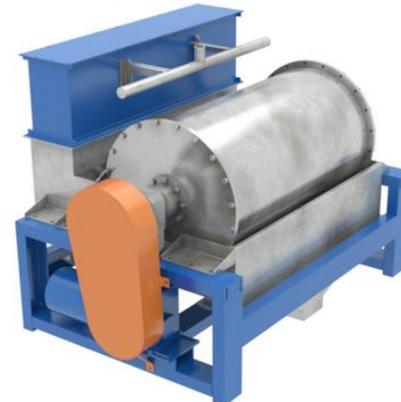




Separadores magnéticos



Material seco



Material húmedo

Molino de anillos (molienda fina) de Laboratorio



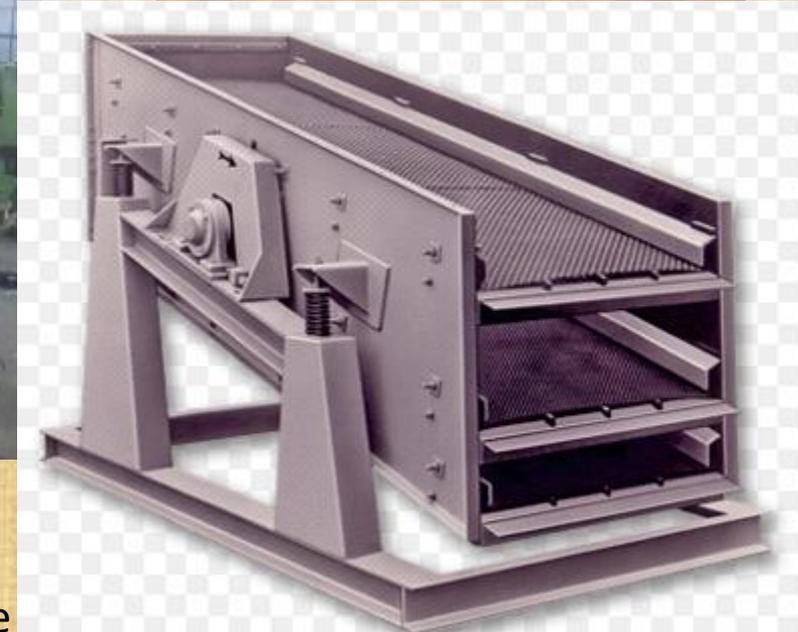
Cribado y tamizado: Luego de la trituración del material, se requiere de la clasificación por tamaños. Para ello se procede al cribado o a una separación neumática.

Cribado: La separación de mezclas de material sólido por tamaño de grano se efectúa por medio de cribas. Las cribas son superficies con perforaciones uniformes y regularmente repartidas. Las partículas de mayor tamaño permanecen sobre la criba en tanto que, las menores la atraviesan.

Las cribas pueden ser de diversos materiales, tales como láminas perforadas.



Criba de tambor inclinado



Criba oscilante

Los tamices, están formados por tejidos metálicos o textiles, tensados sobre un bastidor .

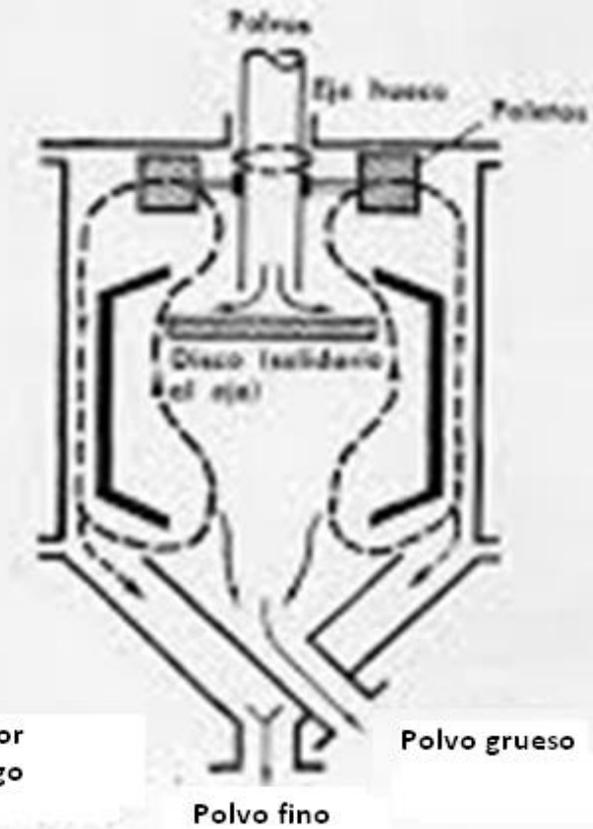
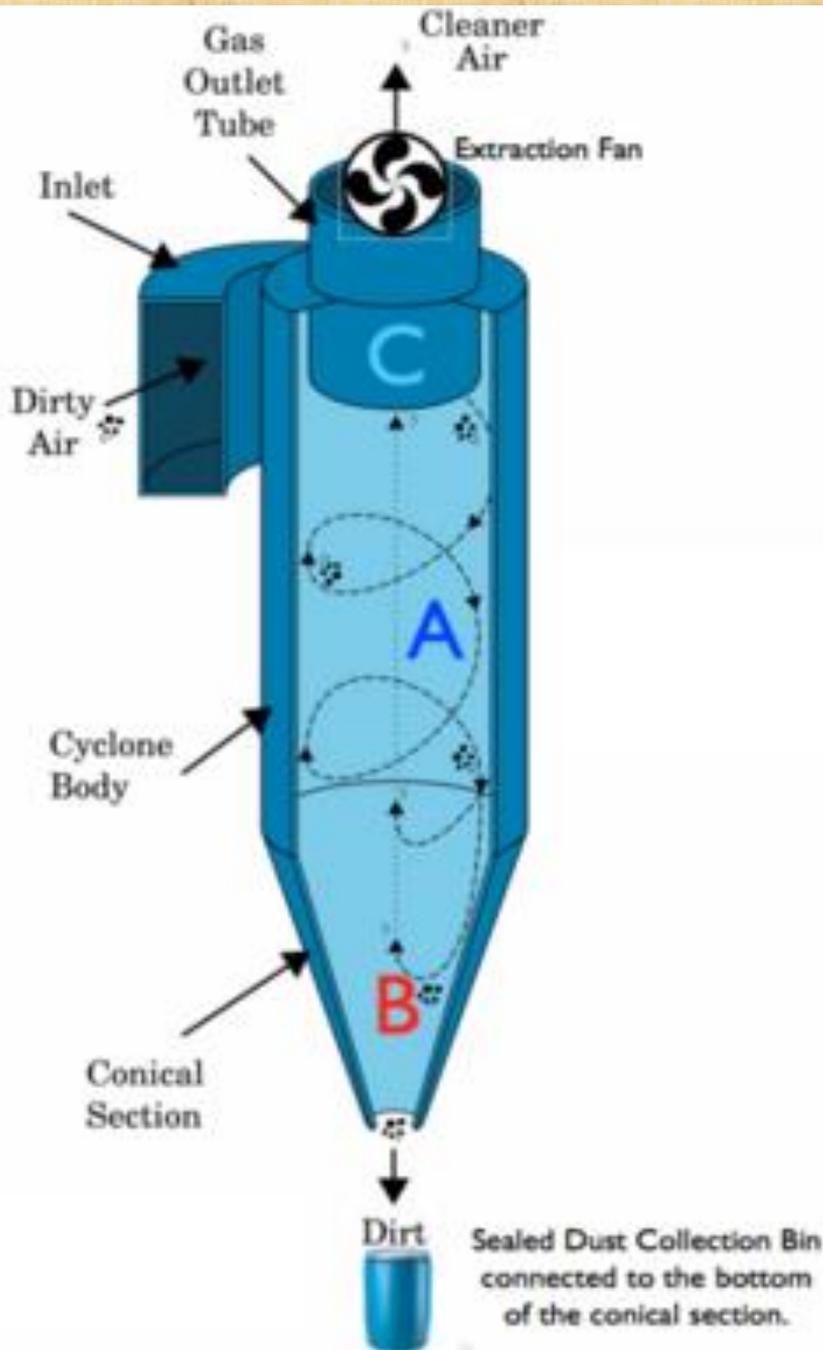


Malla: Hilos por pulgada cuadrada

Malla No. 4	Apertura: 4,75 mm
Malla No. 5	Apertura: 4 mm
Malla No. 6	Apertura: 3,35 mm
Malla No. 8	Apertura: 2,36 mm
Malla No. 10	Apertura: 2 mm
Malla No. 12	Apertura: 1,7 mm
Malla No. 14	Apertura: 1,4 mm
Malla No. 16	Apertura: 1,18 mm
Malla No. 18	Apertura: 1 mm
Malla No. 20	Apertura: 850 µm
Malla No. 25	Apertura: 710 µm
Malla No. 30	Apertura: 600 µm
Malla No. 35	Apertura: 500 µm
Malla No. 40	Apertura: 425 µm
Malla No. 50	Apertura: 300 µm
Malla No. 60	Apertura: 250 µm
Malla No. 70	Apertura: 212 µm
Malla No. 80	Apertura: 180 µm
Malla No.100	Apertura: 150 µm
Malla No.120	Apertura: 125 µm
Malla No.140	Apertura: 106 µm
Malla No.170	Apertura: 90 µm
Malla No.200	Apertura: 75 µm
Malla No.230	Apertura: 63 µm
Malla No.270	Apertura: 53 µm
Malla No.325	Apertura: 45 µm
Malla No.400	Apertura: 38 µm
Malla No.500	Apertura: 25 µm
Malla No.635	Apertura: 20 µm



Separación neumática:

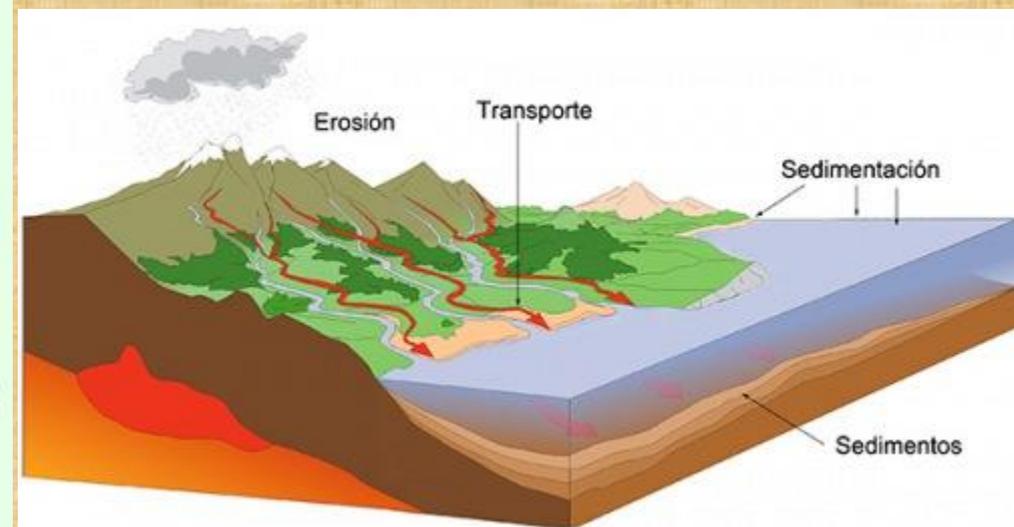
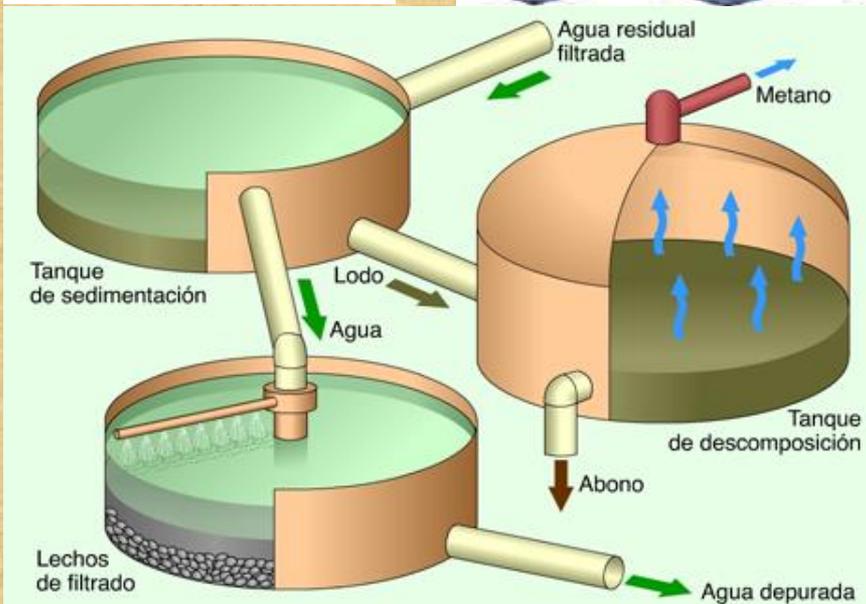
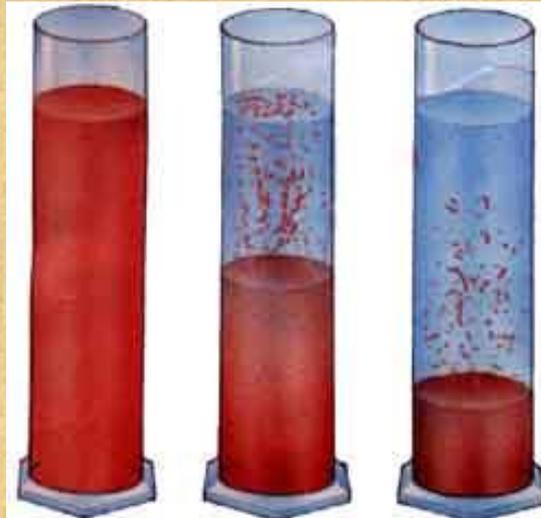
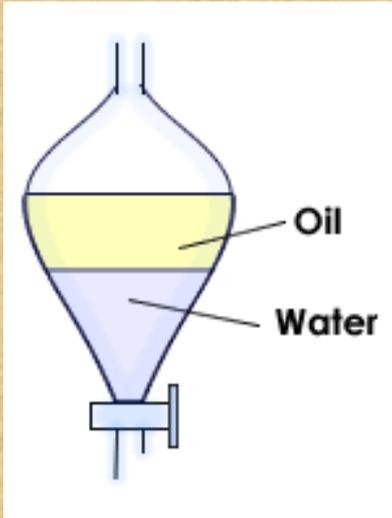


Ciclones



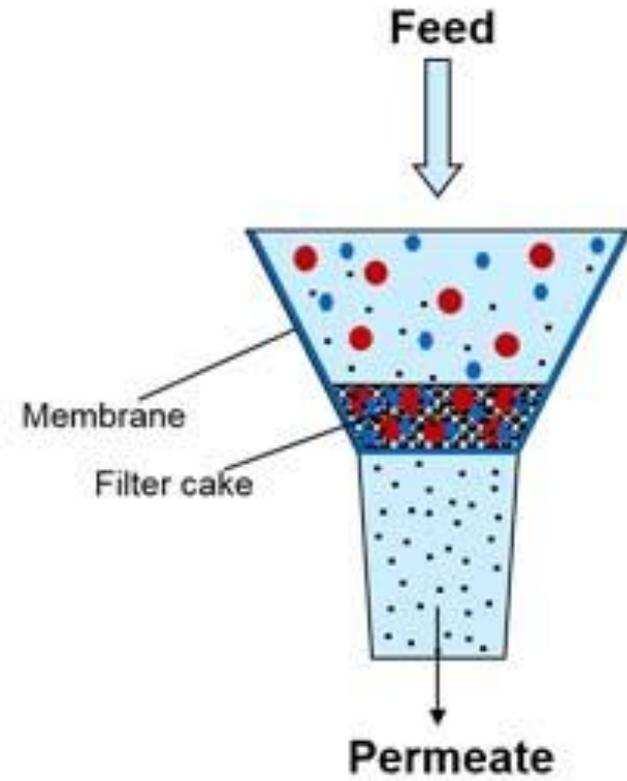
Separación mecánica de sólidos y líquidos: En muchos procesos industriales aparecen mezclas de líquidos y material sólido en suspensión. El tamaño de las partículas sólidas puede ser diversos y mientras mas pequeños, mas difícil es la separación.

Decantación y sedimentación: Se entiende a la separación por gravedad de dos líquidos inmiscibles o la materia sólida suspendida en un líquido.

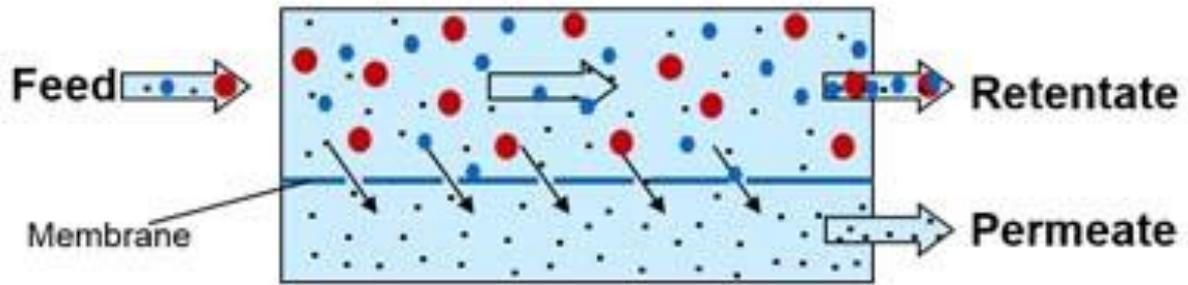


Filtración: Se denomina filtración a la separación mecánica de sólidos y líquidos con ayuda de un filtro que retiene las sustancias sólidas. La fuerza impulsora es la caída de presión entre la entrada y salida del filtro. La filtración se aplica cuando la sedimentación es lenta o se requiere un sólido con baja humedad.

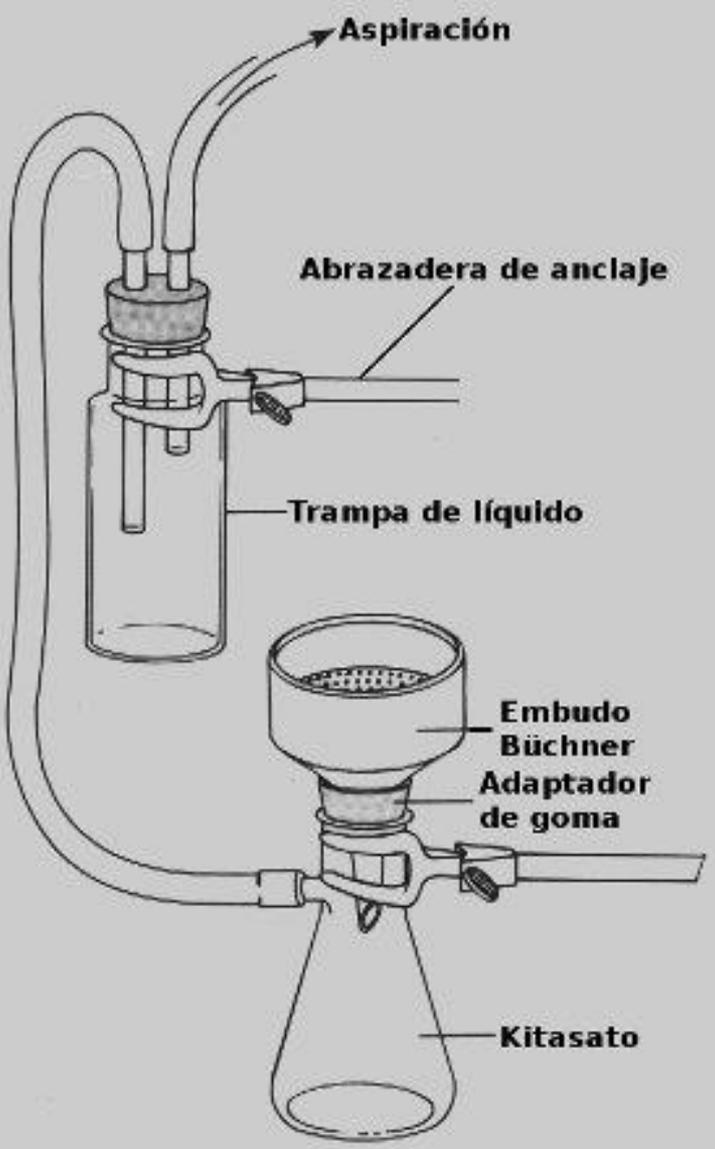
Dead-end filtration



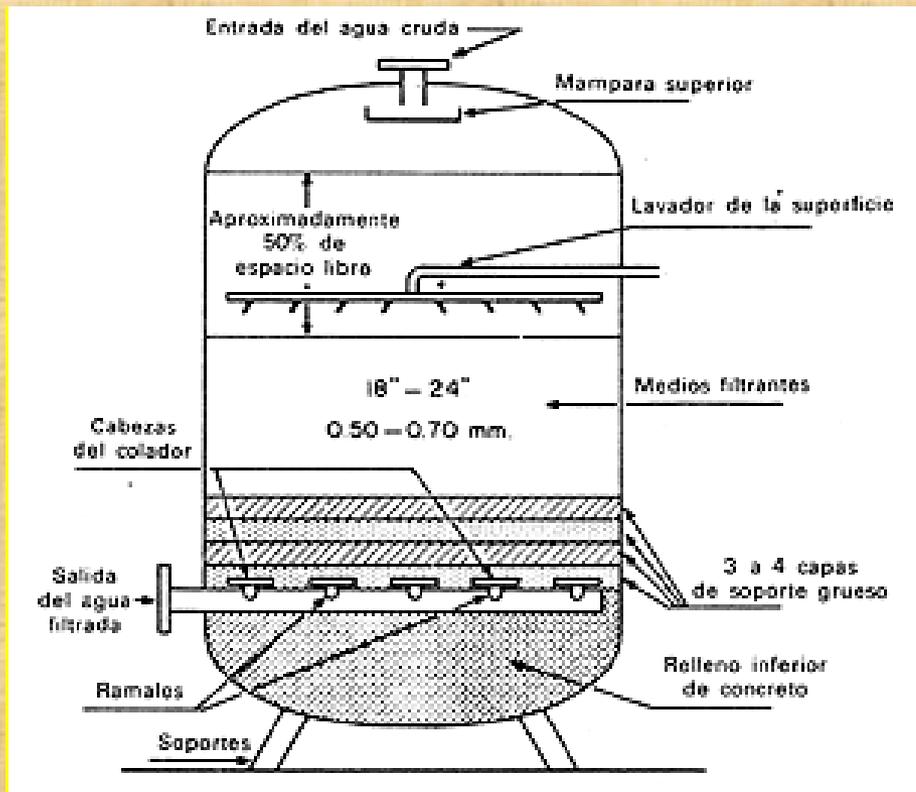
Crossflow filtration



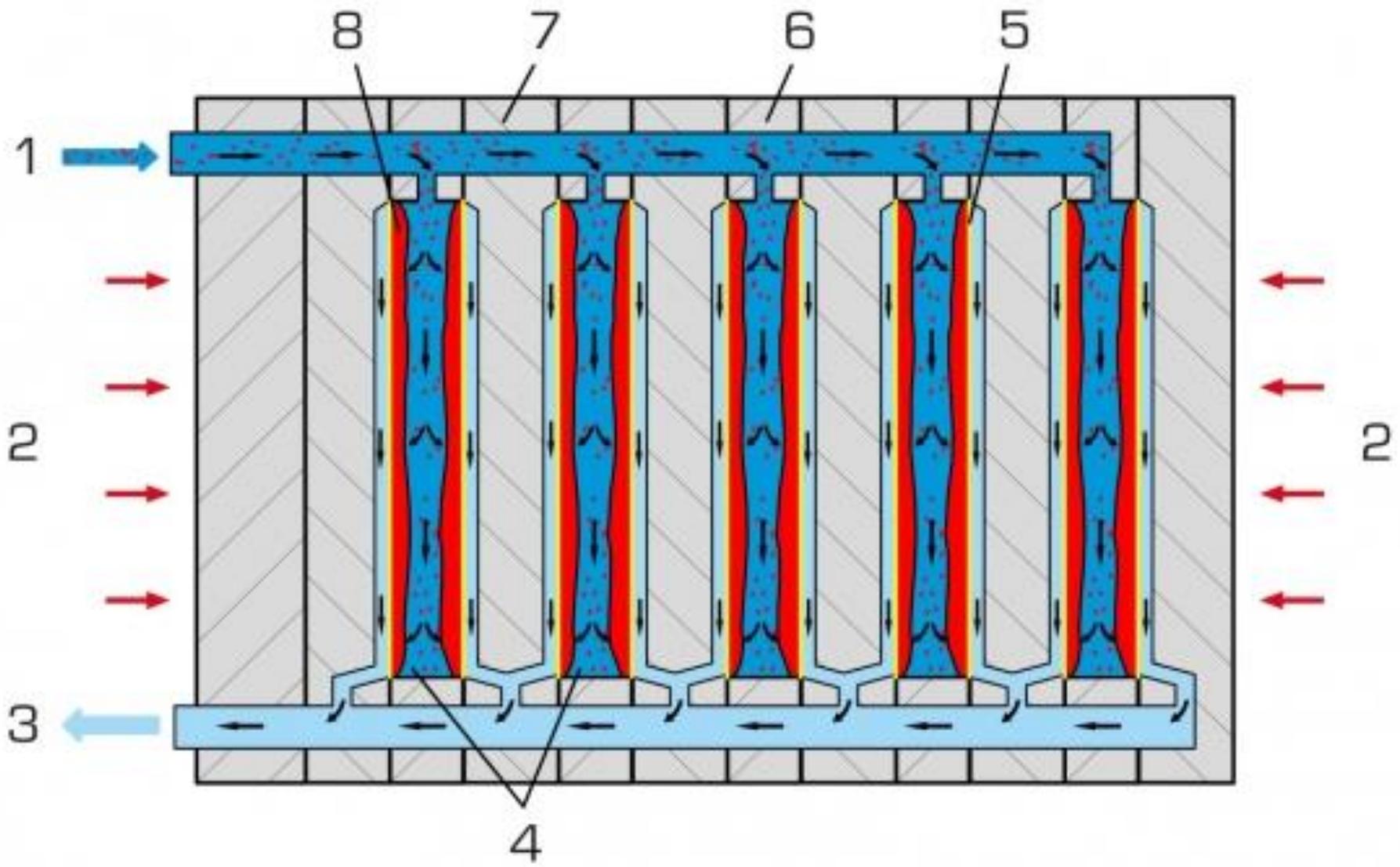
Filtración al vacío



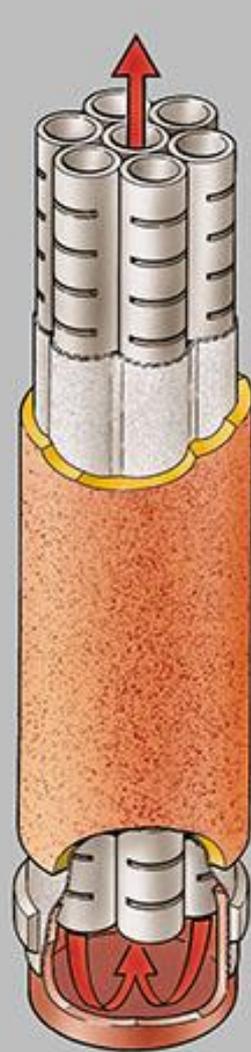
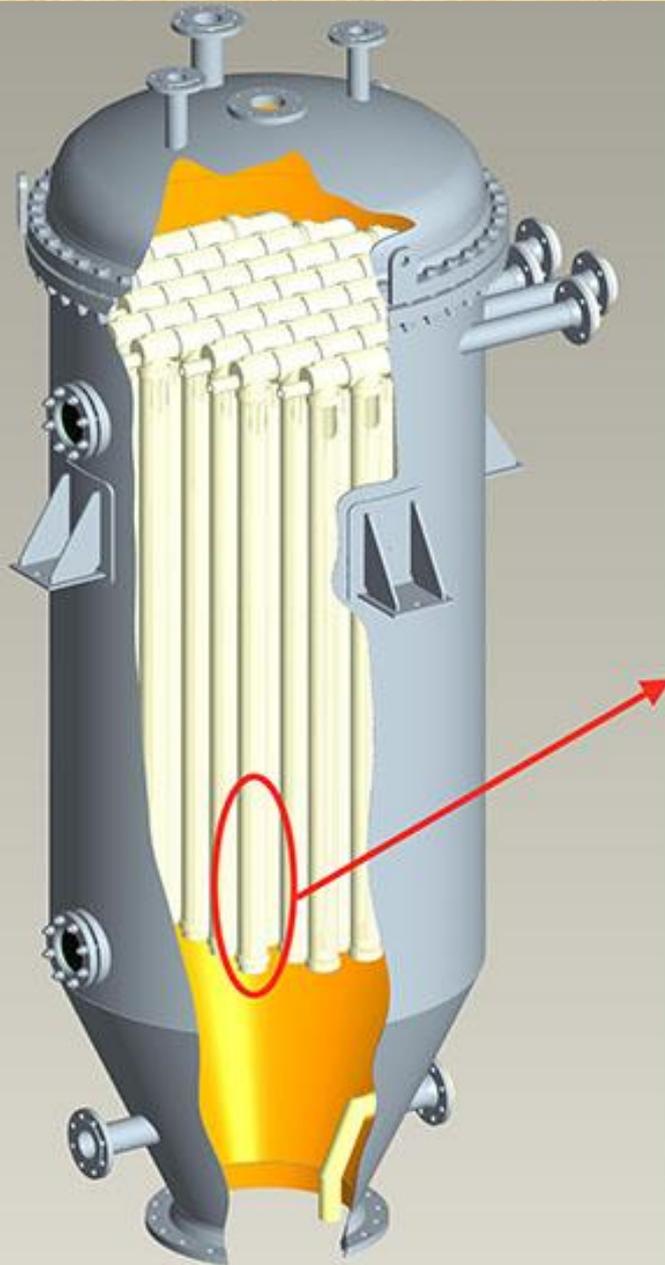
Filtración a presión



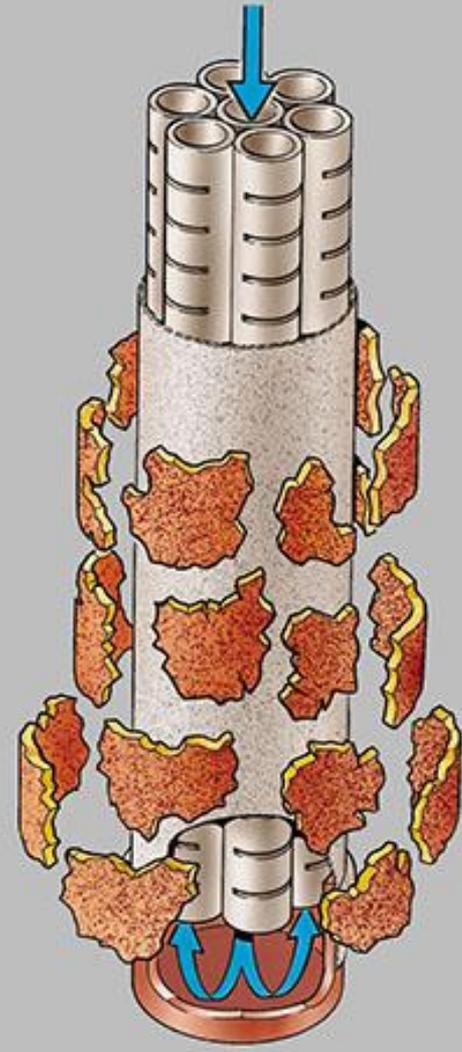
Filtros prensa



Filtro de bujía

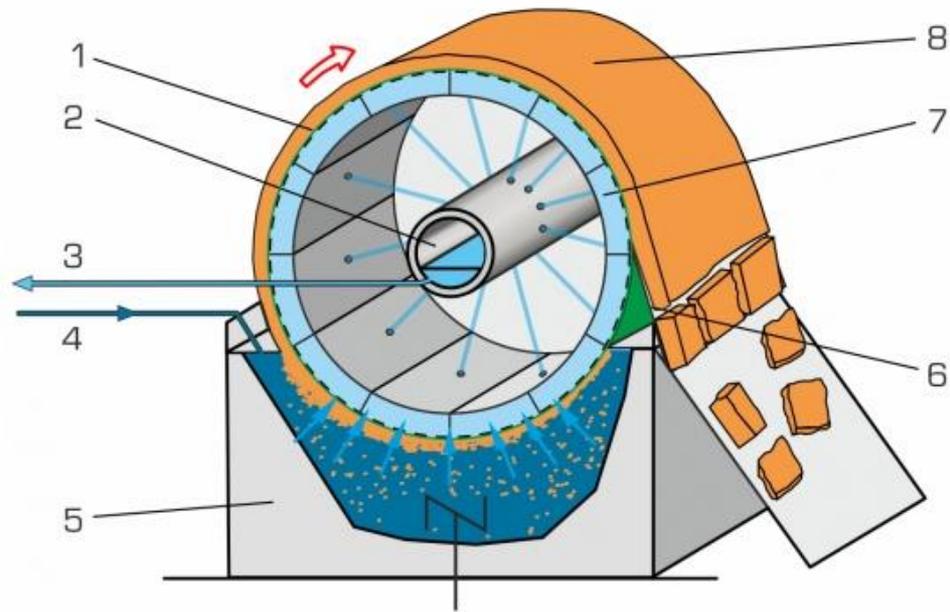


Filtration



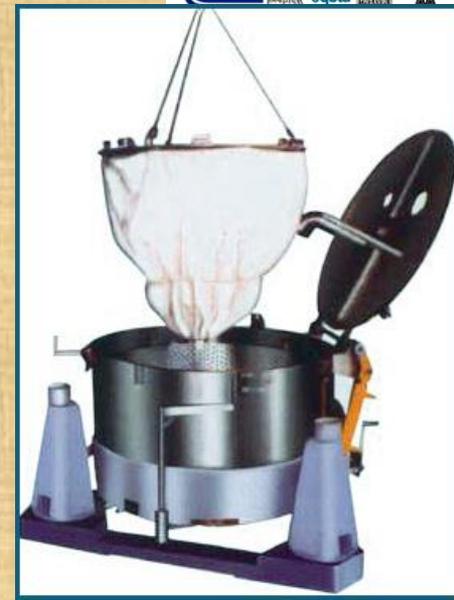
Discharge

Filtro continuo de tambor giratorio

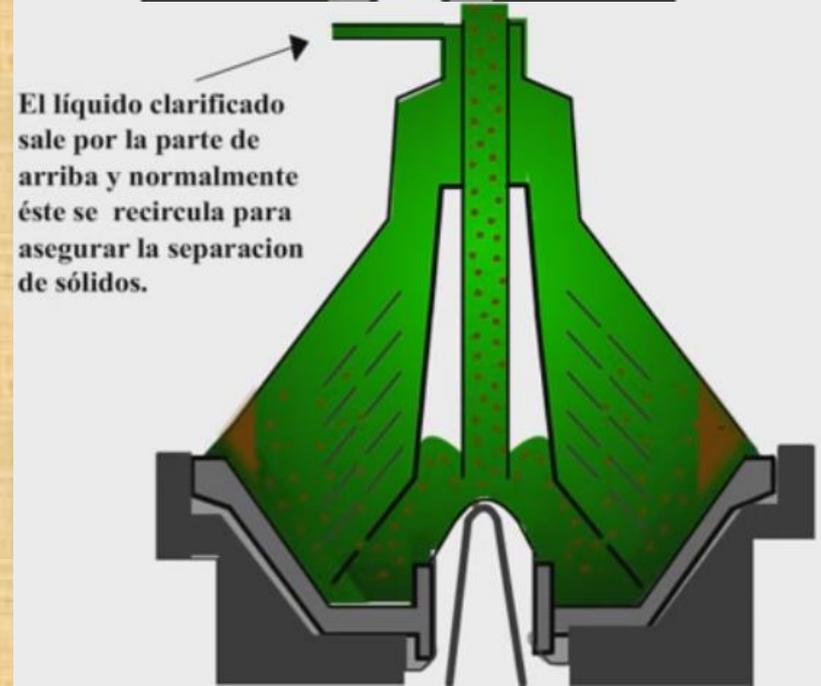
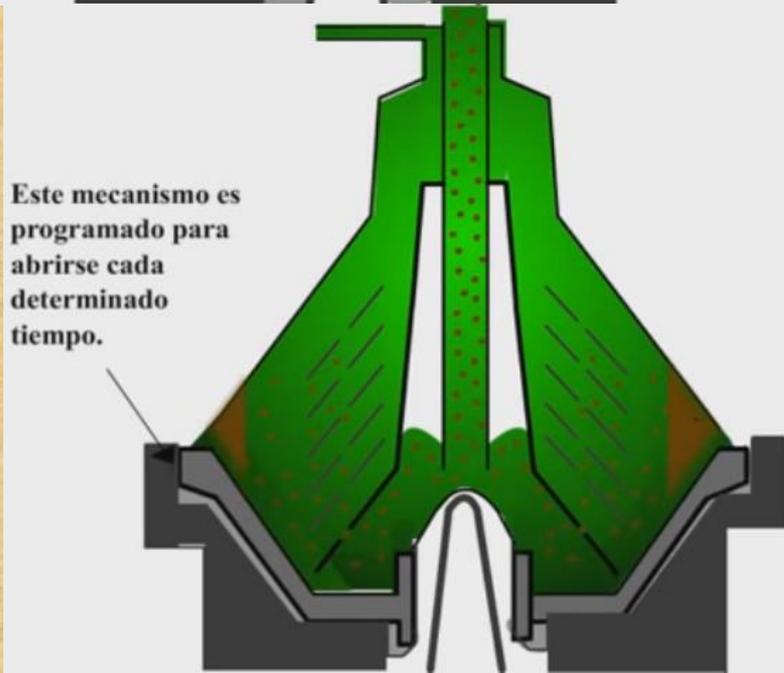
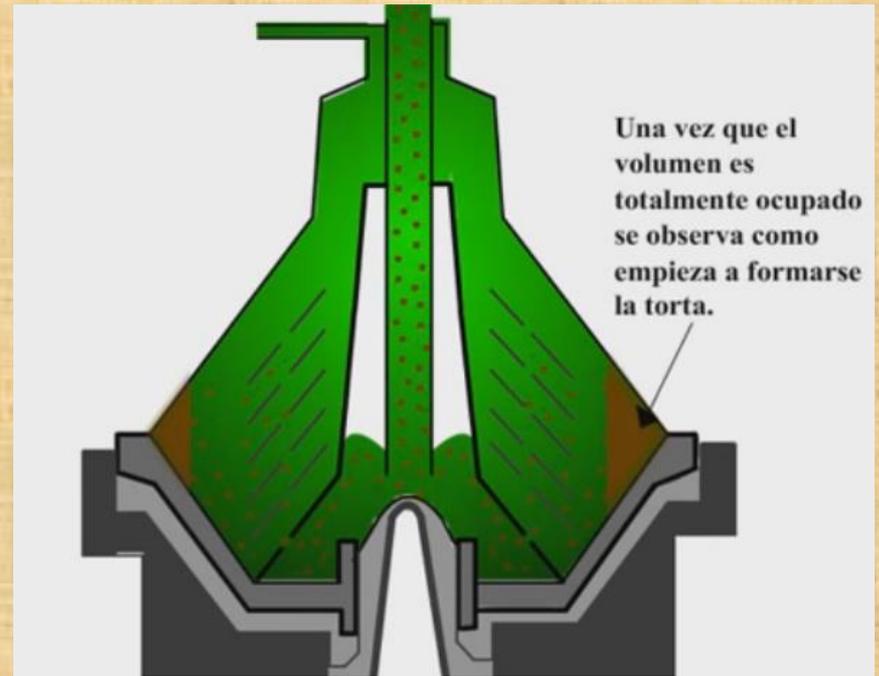
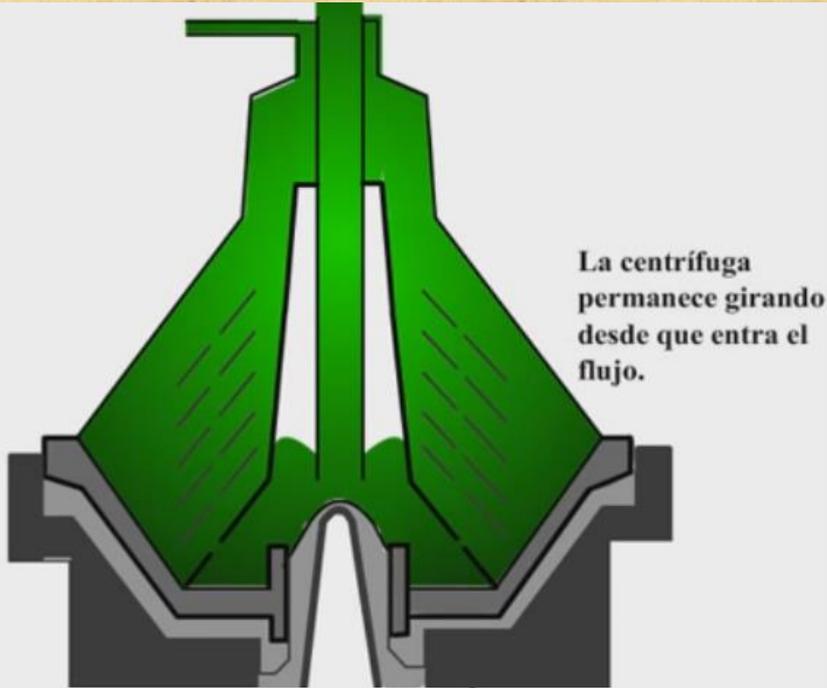


Centrifugación: Las centrífugas sirven para separar mezclas de sólido-líquido y líquido-líquido. El proceso físico es el de la sedimentación pero acelerado por aumento de la fuerza gravitatoria hasta miles de veces.

Centrífuga de tamiz: En estas centrífugas, el tambor perforado (como una criba) está provisto de un elemento filtrante sobre el que se deposita la sustancia sólida.



Centrífuga de anillos



Medición de la densidad en polvos (picnómetros).

Este método es de gran utilidad para el cálculo de la densidad de productos pulverulentos, como puede ser: cemento, arena, etc. El Picnómetro es un recipiente de vidrio provisto de un tapón con un tubo capilar marcado con un enrase en su parte superior. Por medio de la balanza se realizan las siguientes pesadas:

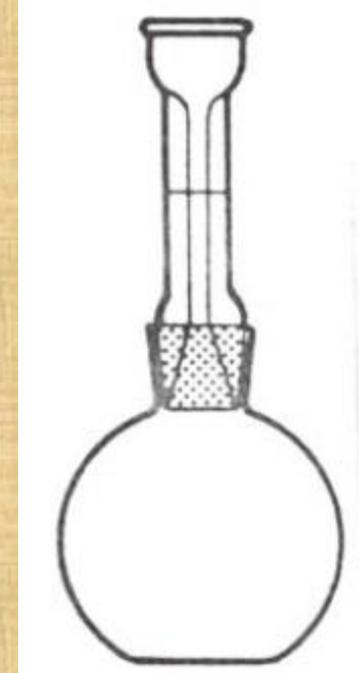
- 1) Peso del sólido: M_1
- 2) Peso del Picnómetro lleno de agua destilada: M_2
- 3) Peso del Picnómetro con agua destilada y el sólido: M_3

Volumen de agua desplazada por el sólido:

$$M_2 - (M_3 - M_1)$$

$$\text{Densidad} = \frac{M_1}{M_1 + M_2 - M_3}$$

siendo la densidad del agua = 1 g/cm^3



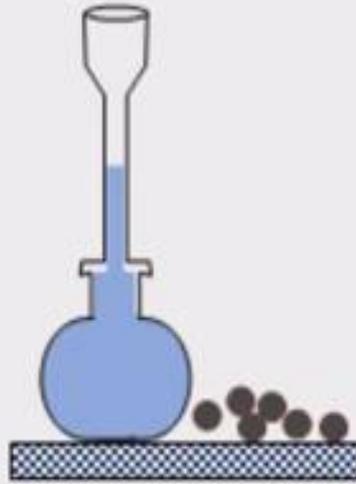
Otro procedimiento:

<https://www.youtube.com/watch?v=QobP25aT-t0>

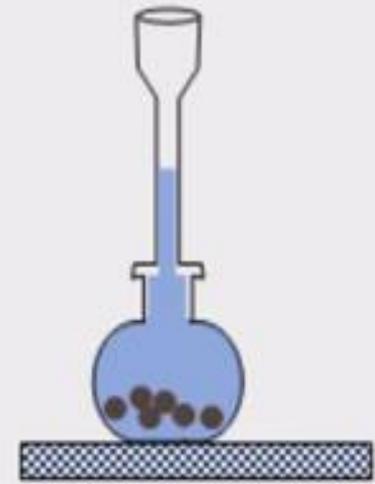


$$m_1 = 5,22 \text{ gr}$$

Plomo



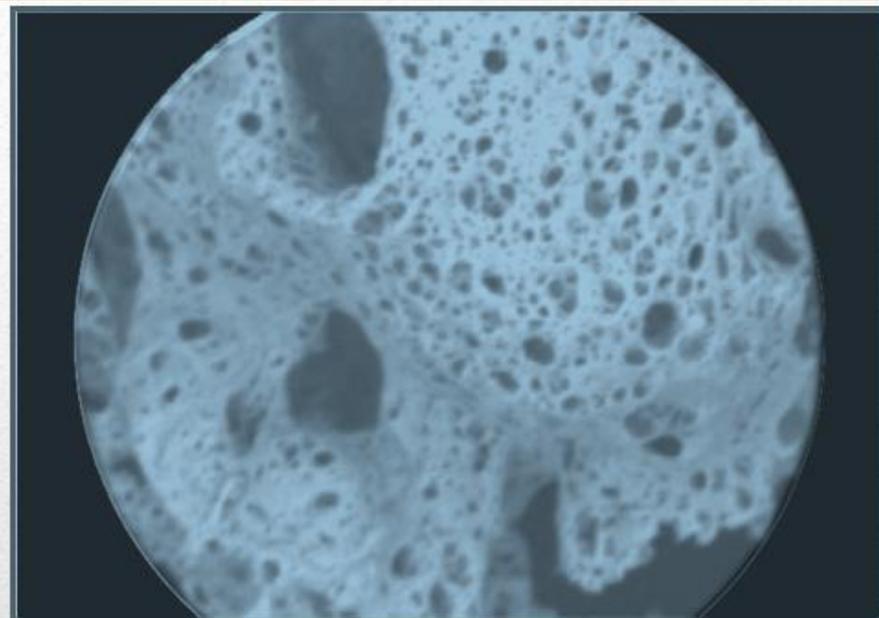
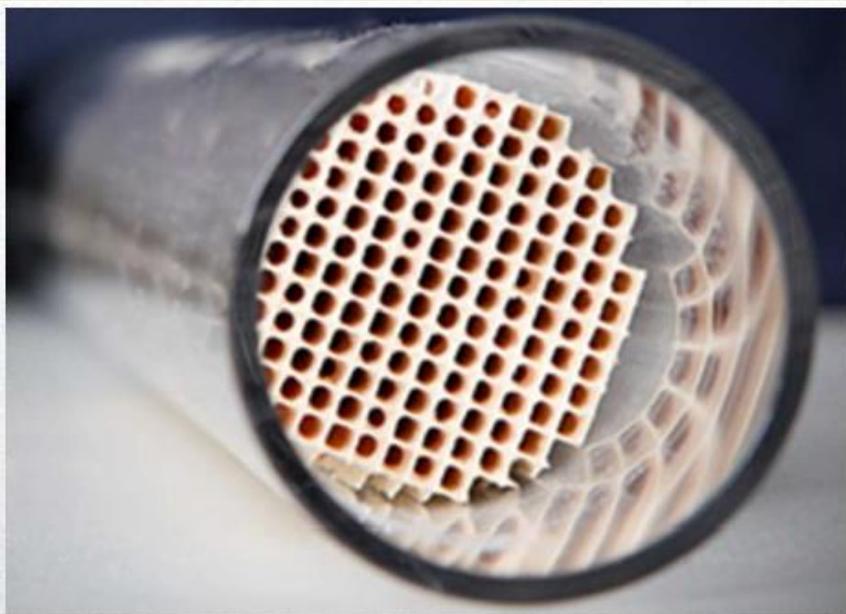
$$m_2 = 119,92 \text{ gr}$$



$$m_3 = 119,46 \text{ gr}$$

$$\text{Volumen} = m_2 - m_3 = 0,46 \text{ cm}^3$$

$$\text{densidad}_{Pb} = \frac{m}{V} = \frac{5,22}{0,46} = 11,34 \text{ gr/cm}^3$$

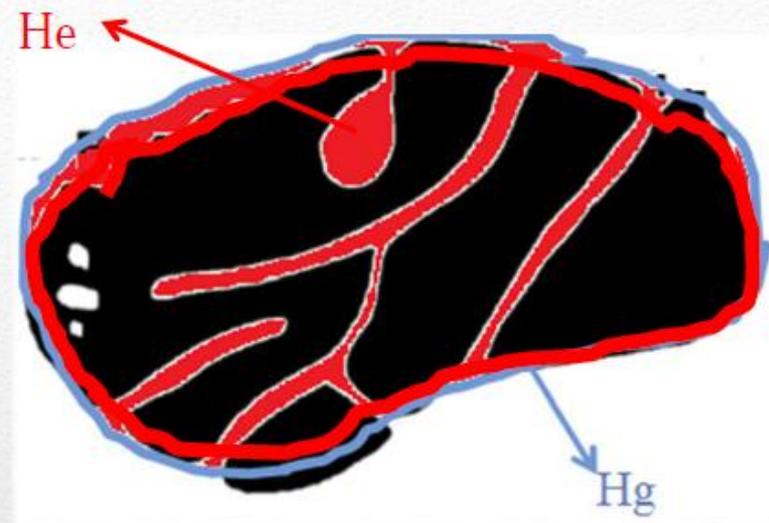


• Método de Helio-Mercurio

$$V_{\text{He}} = V_{\text{sólido}}$$

$$V_{\text{Hg}} = V_{\text{sólido}} + V_{\text{poros}}$$

$$V_{\text{poros}} = V_{\text{Hg}} - V_{\text{He}}$$

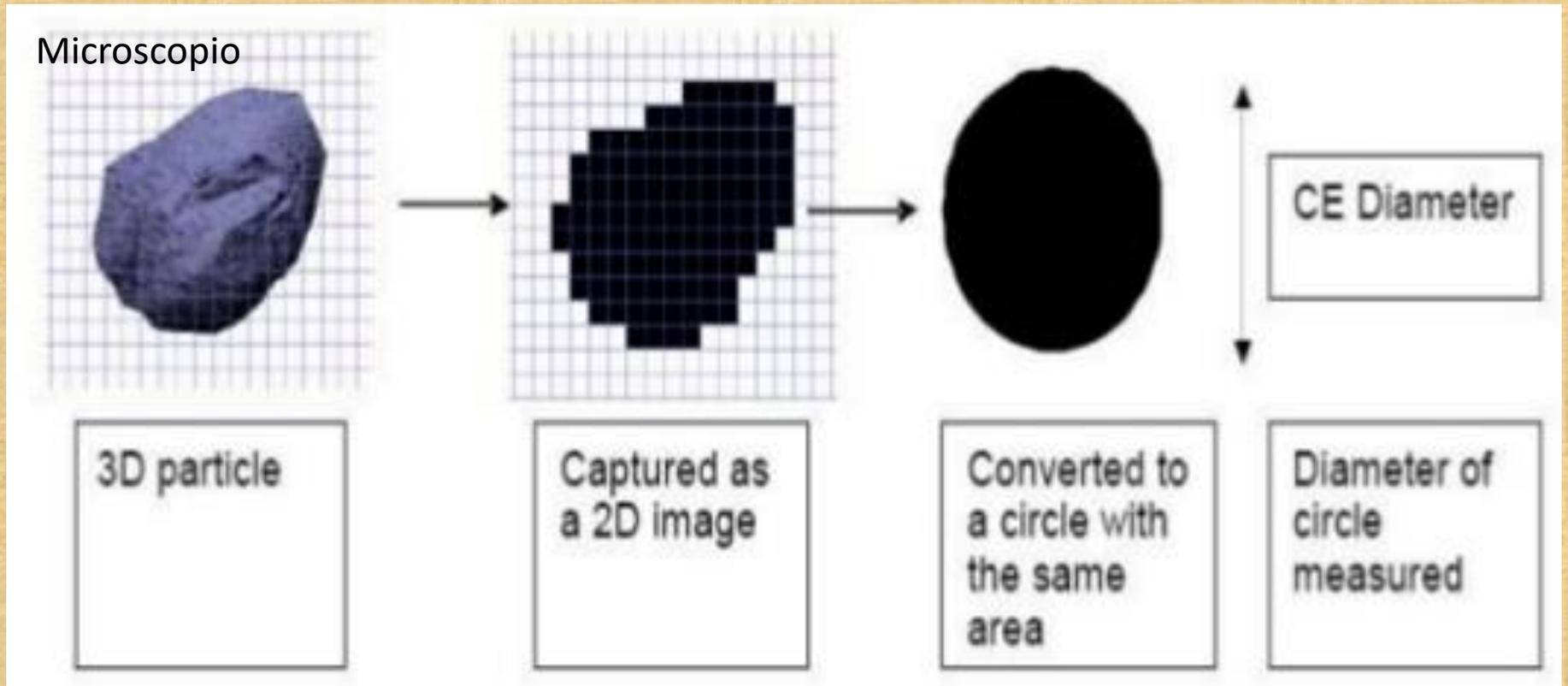


Determinación del tamaño de partícula: Puede realizarse de diversas maneras, por ejemplo:

1) Por tamización: es un método muy sencillo basado en la distribución de las partículas en los distintos tamaños de tamices.

2) Método microscopio: Se basa en la medición (independiente de su forma) por observación y comparación con una escala o patrón.

3) Método de difracción láser: Se basa en el principio de que cuando las partículas son atravesadas por una luz laser, la dispersan con un ángulo que está relacionado con el tamaño de las partículas.



Granulometría laser



OPERATING PRINCIPLE

The diagram illustrates the operating principle of a laser particle size analyzer. It shows a laser beam passing through a lens and a sample cell containing a dispersed sample. The light is scattered and detected by a detector. The data is then processed by a computer system, which is shown as a laptop. Labels include: Laser, Lens, Sample cell, Detector, Computer software, and Particle size.

A schematic diagram showing the sample preparation and measurement process. It includes a computer, a sample container, a disperser, and a detector. The process involves dispersing the sample in a liquid and measuring the light scattering.

A screenshot of the software interface showing a graph of cumulative volume (%) versus diameter (µm). The graph displays three curves representing different samples. The x-axis ranges from 0.1 to 400 µm, and the y-axis ranges from 0 to 100%. The legend indicates the following data series:

Series	Color	Symbol
1.00 - 50%	Red	Square
1.01 - 50%	Blue	Diamond
1.02 - 50%	Green	Triangle
1.03 - 50%	Yellow	Circle

The graph also shows a histogram of the data. The software interface includes a "Display status" window with "Results" and "Organization" tabs. The "Results" tab shows the graph, and the "Organization" tab shows the legend. The "Display status" window also includes a "Zoom" button with values 10.00 and 100.00.

Decantación (método de Bouyoucos): El método de Bouyoucos se basa en la ley de Stokes. Esta se refiere a la fuerza de fricción experimentada por objetos esféricos moviéndose en el seno de un fluido viscoso en un régimen laminar (bajos números de Reynolds). La ley de Stokes establece que:

$$F_d = 6\pi R\eta v$$

donde R es el radio de la esfera, v su velocidad y η la viscosidad del fluido.

Si las partículas caen verticalmente debido a su propio peso, puede calcularse su velocidad de caída o sedimentación igualando la fuerza de fricción con el peso aparente de la partícula en el fluido.

$$V_s = \frac{2}{9} \frac{r^2 g (\rho_p - \rho_f)}{\eta}$$

donde:

V_s es la velocidad de caída de las partículas (velocidad límite)

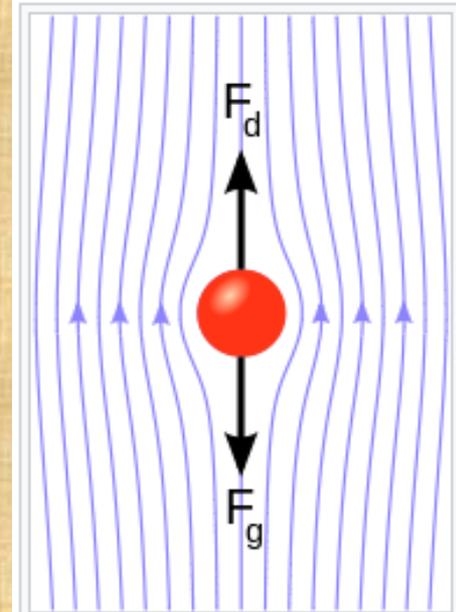
g es la aceleración de la gravedad,

ρ_p es la densidad de las partículas y

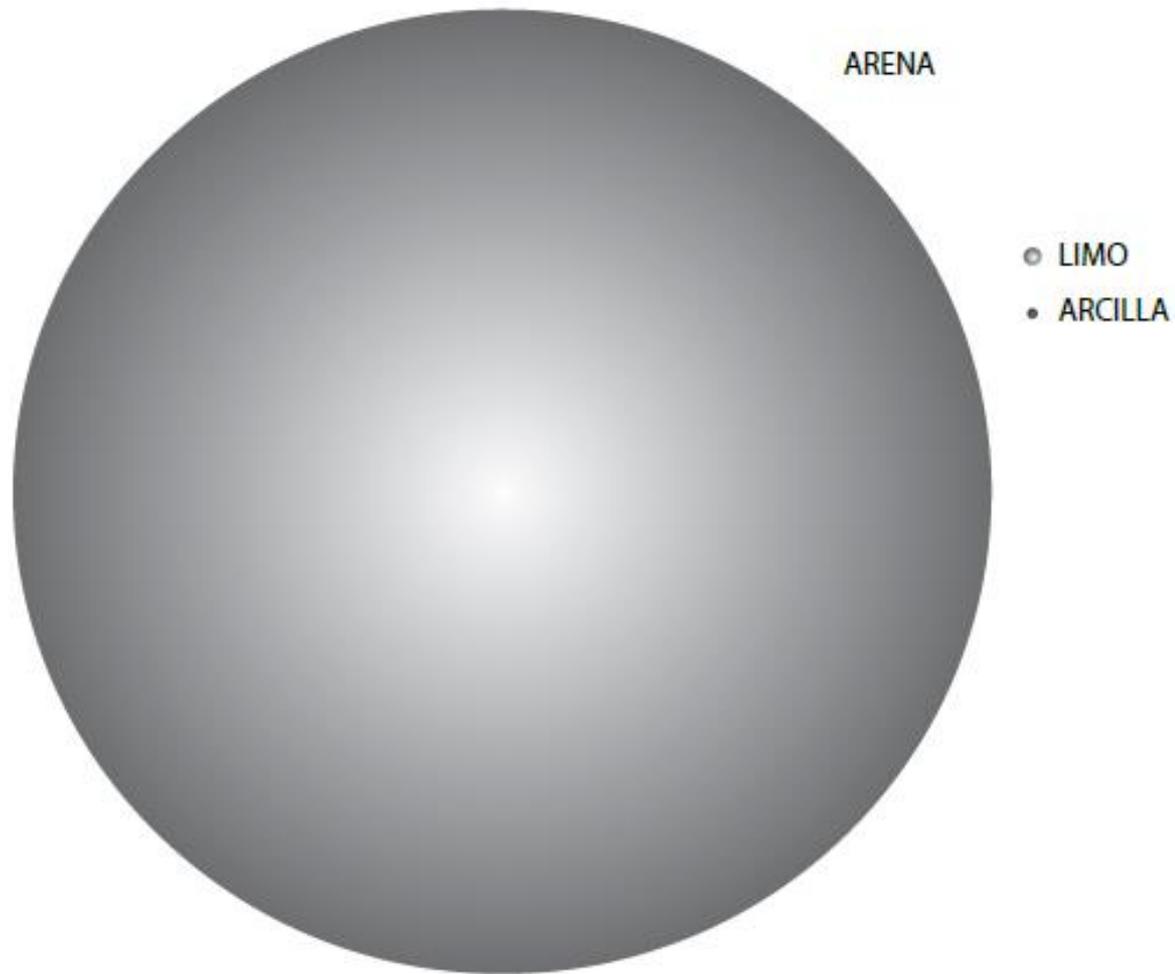
ρ_f es la densidad del fluido.

η es la viscosidad del fluido.

r es el radio equivalente de la partícula.



Algunas propiedades de las partículas minerales del suelo están condicionadas por su tamaño. Los términos de grava (> 2.00 mm), arena (2.00 mm – 0.05 mm), limo (0.05 mm – 0.002 mm) y arcilla (< 0.002 mm), son los términos comúnmente aceptados para clasificar las partículas del suelo según su tamaño. La determinación de granulometría en el laboratorio (Bouyoucos) se basa en la medición de la velocidad de sedimentación de las partículas dispersas en el agua.



Las partículas grandes se sedimentan con mayor rapidez que las partículas pequeñas; esto es porque las partículas más grandes tienen menos área específica y, por lo tanto, menos flotabilidad que las partículas más pequeñas. La ley de Stokes estipula que la resistencia ofrecida por el líquido a la caída de la partícula varía con el radio de la esfera y no con la superficie. La velocidad de caída de las partículas con la misma densidad en un determinado líquido aumenta con el cuadrado del radio.

Superficie específica: La superficie específica es una propiedad de los sólidos la cual es la relación entre el área superficial total y la masa del sólido. La superficie específica se puede calcular de una manera simple a partir de conocer la distribución de tamaños de partículas, y realizando alguna suposición sobre la forma de las partículas. Este método sin embargo, no toma en cuenta la superficie asociada a la textura superficial de las partículas.

La superficie específica se puede medir mediante la técnica de adsorción utilizando la isoterma BET. Esta se basa en la isoterma de Langmuir y posee la ventaja de que permite medir la superficie de las estructuras finas y la textura interior de las partículas.

La isoterma de Langmuir relaciona la adsorción de moléculas en una superficie sólida con la presión de gas o concentración de un medio que se encuentre encima de la superficie sólida a una temperatura constante.

La expresión de la ecuación es la siguiente:

$$\theta = \frac{\alpha \cdot P}{1 + \alpha \cdot P}$$

donde:

- θ es la fracción de cobertura de la superficie,
- P es la presión del gas o su concentración, y
- α es la **constante de adsorción de Langmuir**, que es mayor cuanto mayor sea la energía de ligadura de la adsorción y cuanto menor sea la temperatura.

Flotación por espuma (espumación): Se denomina flotación a la operación en la que un sólido se separa de otro, basándose en que uno de ellos sobrenada en la superficie de un líquido. En las modernas técnicas de flotación con espumas, las partículas sólidas se mantienen constantemente agitadas con agua sobre la que se mantiene una capa de espuma espesa. Debido a las distintas propiedades superficiales de los cuerpos sólidos, uno de ellos absorbe con más facilidad la fase acuosa, se moja perfectamente y se hunde en el líquido. El otro sólido, en cambio, adsorbe con preferencia al aire, quedando recubierto total o parcialmente por la fase gaseosa; la densidad aparente de las partículas de este sólido adherido a las burbujas de aire resulta menor que la del agua, por lo que el conjunto flota y se sostiene en la superficie del líquido formando una espuma mineralizada, que puede rebosar continuamente por el borde superior de la cuba de flotación. Dado que la separación por flotación con espumas depende solamente de las características superficiales de los sólidos, la separación de estos se logra con entera independencia de cuales sean sus densidades respectivas.

Los equipos industriales están formados por un recipiente o depósito, provisto lateralmente de un canal alimentador, un rebosadero para la espuma, un dispositivo de descarga para las colas en el lado opuesto y una conducción apropiada para la introducción del aire necesario para la formación de la espuma. En la industria minera, más del 80% de las concentraciones de minerales se efectúan por este método



Extracción con solventes: La extracción líquido-líquido es un método muy útil para separar componentes de una mezcla. El éxito de este método depende de la diferencia de solubilidad del compuesto a extraer en dos disolventes diferentes. Cuando se agita un compuesto con dos disolventes inmiscibles, el compuesto se distribuye entre los dos disolventes. A una temperatura determinada, la relación de concentraciones del compuesto en cada disolvente es siempre constante, y esta constante es lo que se denomina coeficiente de distribución o de reparto ($K = \text{concentración en disolvente 2} / \text{concentración en disolvente 1}$).

Características del disolvente de extracción

La extracción selectiva de un componente de una mezcla disuelta en un determinado disolvente se puede conseguir añadiendo otro disolvente que cumpla las siguientes condiciones.

- Que no sea miscible con el otro disolvente. El agua o una disolución acuosa suele ser uno de los disolventes implicados. El otro disolvente es un disolvente orgánico.
- Que el componente deseado sea mucho más soluble en el disolvente de extracción que en el disolvente original.
- Que el resto de componentes no sean solubles en el disolvente de extracción.
- Que sea suficientemente volátil, de manera que se pueda eliminar fácilmente del producto extraído mediante destilación o evaporación.
- Que no sea tóxico ni inflamable, aunque, desgraciadamente hay pocos disolventes que cumplan los dos criterios: hay disolventes relativamente no tóxicos pero inflamables como el hexano, otros no son inflamables pero sí tóxicos como el diclorometano o el cloroformo, y otros son tóxicos e inflamables como el benceno.

Rendimiento en la extracción. Extracciones consecutivas

La expresión del coeficiente de extracción relaciona concentraciones, pero no cantidades absolutas de solutos, que dependerán de los volúmenes empleados.

Llamemos: C_i a la concentración inicial del soluto en agua.

C_a a la concentración en la fase acuosa después de la extracción.

C_o a la concentración en la fase orgánica después de la extracción.

V_a al volumen de la fase acuosa.

V_o al volumen de la fase orgánica.

Si las concentraciones están expresadas en moles/litro y los volúmenes en litros se tendrá:

– moles de soluto iniciales en la fase acuosa = $C_i \cdot V_a$

– moles de soluto en la fase acuosa después de la extracción = $C_a \cdot V_a$

– moles de soluto en la fase orgánica después de la extracción = $C_o \cdot V_o$.

Por tanto:

$$C_i \cdot V_a = C_a \cdot V_a + C_o \cdot V_o; \quad \text{y como } C_o = D \cdot C_a$$

se tiene $C_i \cdot V_a = C_a \cdot V_a + D \cdot C_a \cdot V_o = C_a (V_a + D V_o);$ de donde

$$C_a = \frac{C_i V_a}{V_a + D V_o}$$

Llamando α_a a la fracción de soluto sin extraer, α_o a la fracción extraída y V_r a la relación de volúmenes V_o/V_a , se llega a las siguientes expresiones:

$$\alpha_a = \frac{1}{1 + D V_r}; \quad \alpha_o = \frac{D V_r}{1 + D V_r}$$

El valor de α_o , multiplicado por 100, es el rendimiento en la extracción expresado en tanto por ciento, R.

En la expresión de α_a se observa claramente que la cantidad que queda sin extraer es tanto más pequeña cuanto mayores con los valores de D y de V_r . Sin embargo, a efectos cualitativos suele ser aconsejable utilizar un volumen pequeño de extractante, debido a que, para identificaciones, es preferible tener un pequeño volumen en el que esté concentrada la especie a identificar que efectuar una extracción más exhaustiva a costa de provocar una dilución.

Cuando el valor de D es elevado con una sola extracción se puede pasar prácticamente todo el soluto a la fase orgánica. Si D es pequeño se puede conseguir una extracción cuantitativa realizando varias extracciones consecutivas.

Para n extracciones consecutivas el valor de la fracción de soluto que permanece en la fase acuosa, $\alpha_{a,n}$, adquiere el valor:

$$\alpha_{a,n} = \alpha_a^n = \left[\frac{1}{1 + D V_r} \right]^n$$

Por consiguiente, la fracción total de soluto que ha pasado a la fase orgánica en las n extracciones será

$$\alpha_{o,n} = 1 - \alpha_{a,n}^n$$

Como el rendimiento de la extracción aumenta exponencialmente con el número de extracciones es más efectivo el proceso si se efectúan varias extracciones (3 ó 4 es un número aconsejable) con pequeños volúmenes que una sola extracción con el volumen total de extractante.

EJEMPLO

El coeficiente de reparto de un sistema agua-orgánico para una especie determinada vale 10. Calcular el rendimiento en la extracción en los siguientes casos: a) Se efectúa una sola extracción con un volumen V_o igual a V_a . b) Se efectúan cuatro extracciones con un volumen $V_o = V_a/4$.

a) fracción que pasa a la fase orgánica $\alpha_o = \frac{D V_r}{1 + D V_r}$

$$\alpha_o = \frac{10 \times 1}{1 + 10 \times 1} = \frac{10}{11} = 0,909; \quad R \% = 90,9$$

b) fracción que queda en la fase acuosa después de 4 extracciones:

$$\alpha_a = \left[\frac{1}{1 + D V_r} \right]^4 = \left[\frac{1}{1 + 10 \times 0,25} \right]^4 = 0,0067$$

El total de lo extraído a las fases orgánicas en las cuatro extracciones será $1 - 0,0067 = 0,9933$.

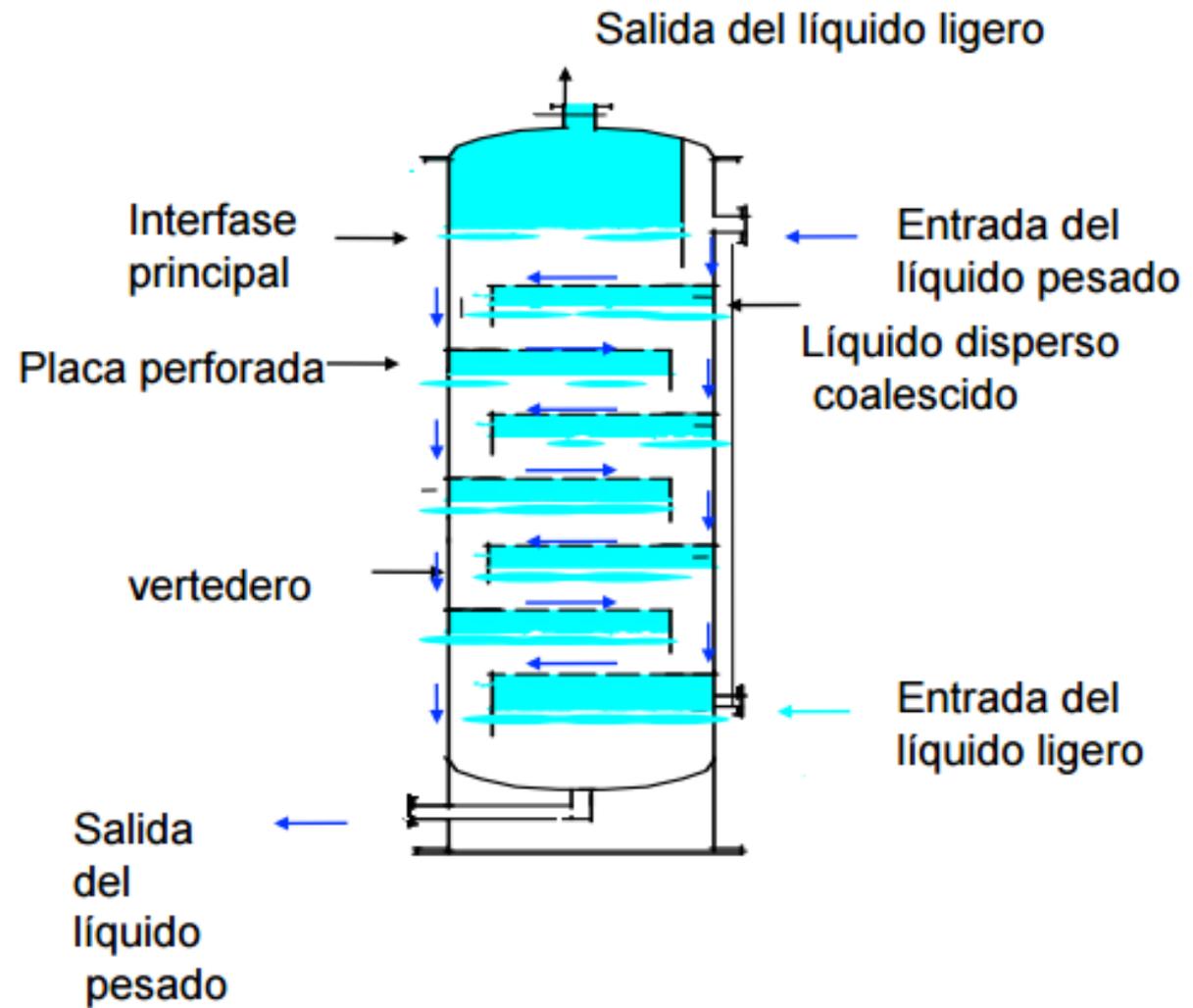
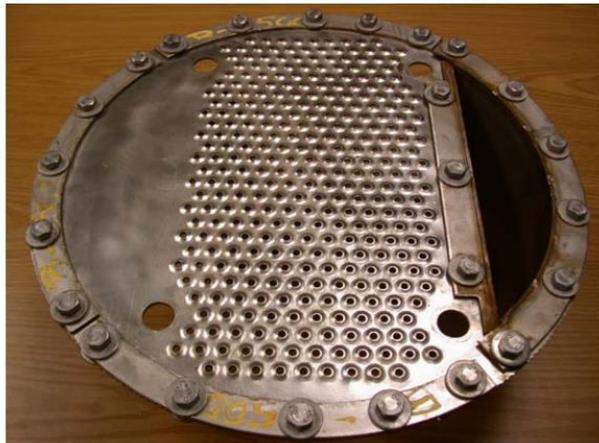
$$R \% = 99,33$$

Resulta evidente que el rendimiento es mucho mayor cuando se efectúan cuatro extracciones, aunque el volumen total de disolvente orgánico utilizado es el mismo en los dos casos.

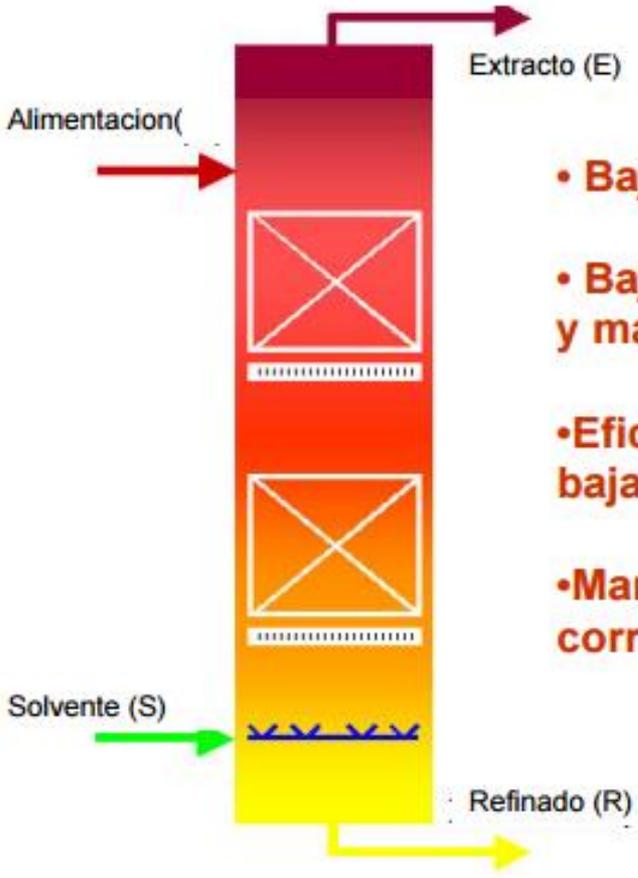
Equipos de extracción líquido-líquido

Torre de extracción de platos perforados

Plato perforado



columna de empaques



- Bajo costo de capital
- Bajo costo de operación y mantenimiento
- Eficiencia relativamente baja
- Maneja materiales corrosivos



Columna Rotatorias con agitación

- Muchas instalaciones comerciales
- Bajo costo de operación y mantenimiento
- Contacto diferencial

