

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

**11.1. Introducción.**

En la industria del procesamiento de minerales y rocas industriales el empleo del agua es muy significativo, aunque su cantidad (% en volumen) varía según las diversas etapas del procesamiento (ver Fig.11.1).

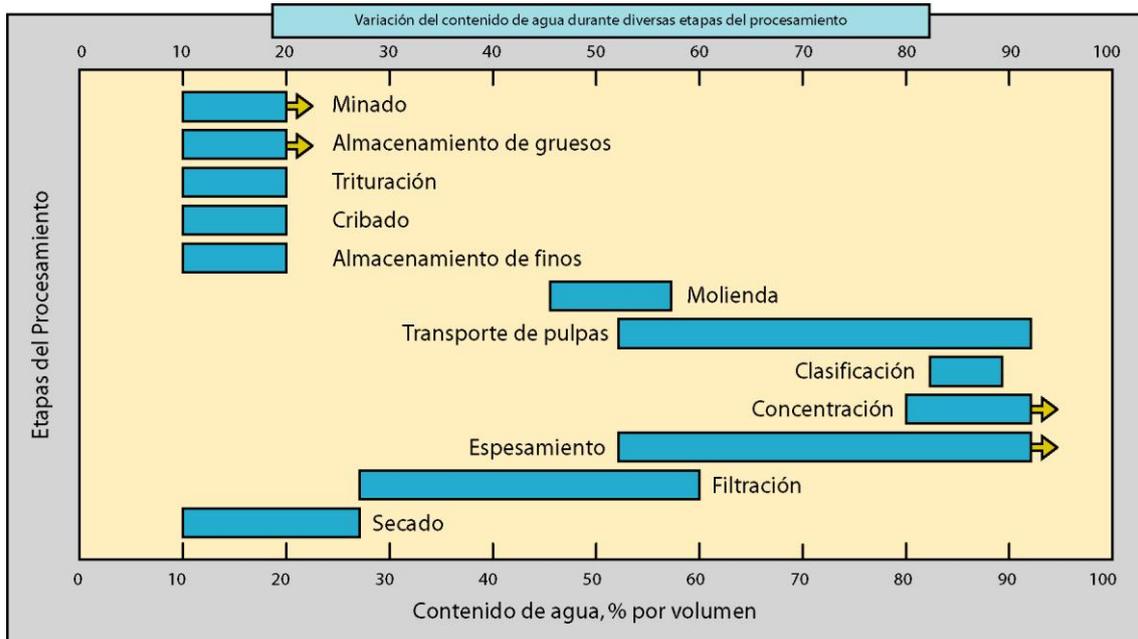


Fig.11.1: Contenido de agua según la unidad de procesamiento.

La eliminación de agua ("dewatering") por medios mecánicos, para diferenciarla de la eliminación del agua por medio del secado térmico, va a perseguir unos objetivos que serán del tipo medioambiental, técnico,

#### **BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

##### **TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

económico, seguridad, etc. Con la eliminación de agua se persigue aumentar el contenido de sólidos para ajustarse a los requerimientos de la etapa posterior o su emplazamiento definitivo, pudiendo ser los siguientes:

- 1. Reducir los costes de transporte del producto vendible** (incidencia importante en minerales de bajo valor).
- 2. Volver a llevar al mineral a su forma completamente seca por imperativo de la etapa posterior** (calcinación, sinterización).
- 3. Cumplimiento de las especificaciones de venta.**
- 4. Motivos de seguridad y transportabilidad** (desplazamiento de la carga en transporte de mineral por barco).
- 5. Recuperación del agua para su recirculación a la cabeza del proceso.**
- 6. Disminuir el volumen ocupado por la masa de estériles.**
- 7. Aprovechamiento de los finos obtenidos para diversas aplicaciones industriales** (industria del árido).
- 8. Eliminar de los efluentes líquidos los finos limosos y arcillosos por imperativos medioambientales** ( $< 80 \mu\text{m}$ ).

Para conseguir la eliminación parcial de agua o desaguado mecánico se emplean equipos de separación sólido-líquido que se pueden clasificar dentro de las dos principales categorías de acuerdo a los principios que emplean, los tamaños de partículas que se suelen manejar

#### BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.

##### TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO

en esta etapa de desaguado no deben superar los 0.5 mm (finos o slams):

- a) Sedimentación: El líquido es obstaculizado por el recipiente y las partículas se mueven libremente.
- b) Filtración: Las partículas son obstaculizadas por un medio filtrante y son los líquidos los que fluyen a través de dicho medio.

Dentro de cada una de estas categorías se desglosa en varias técnicas de separación como se ilustra en la Fig.11.2.

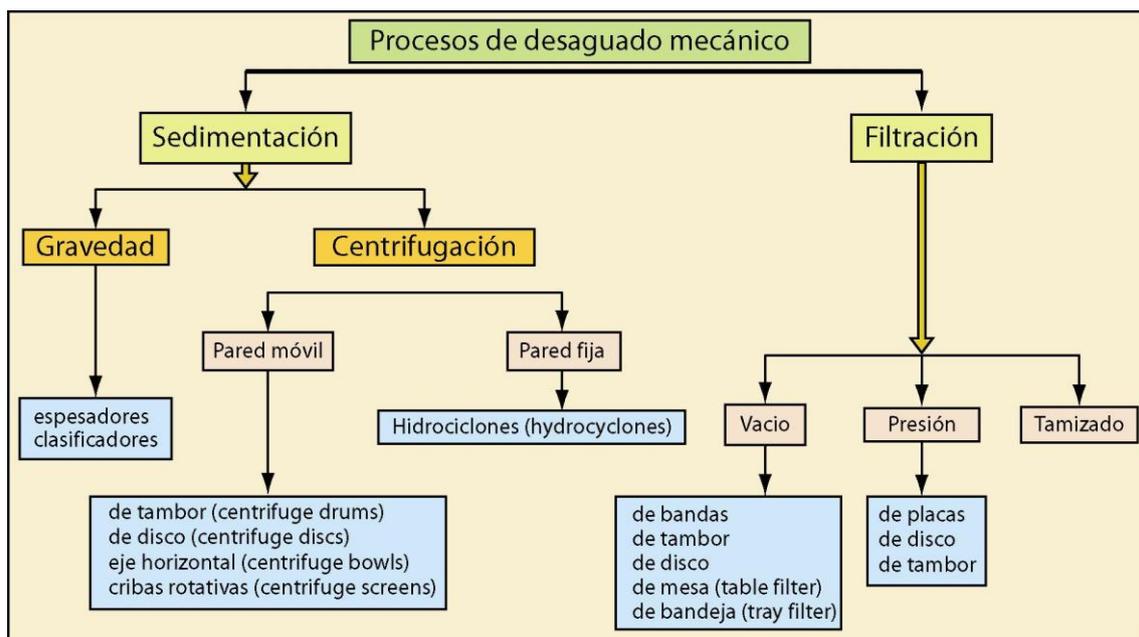


Fig.11.2: Técnicas de separación sólido-líquido.

El empleo de los equipos de desaguado va a venir determinado por el tamaño de las partículas que van a tratar estos equipos y por el contenido en humedad del producto (Fig.11.3), así como por ensayos de laboratorio, plantas ya existentes, etc. Cuando se habla del contenido en humedad se refiere a la humedad superficial o libre de

## BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.

### TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO

las partículas para distinguirla de aquella humedad que forma parte de su estructura molecular.

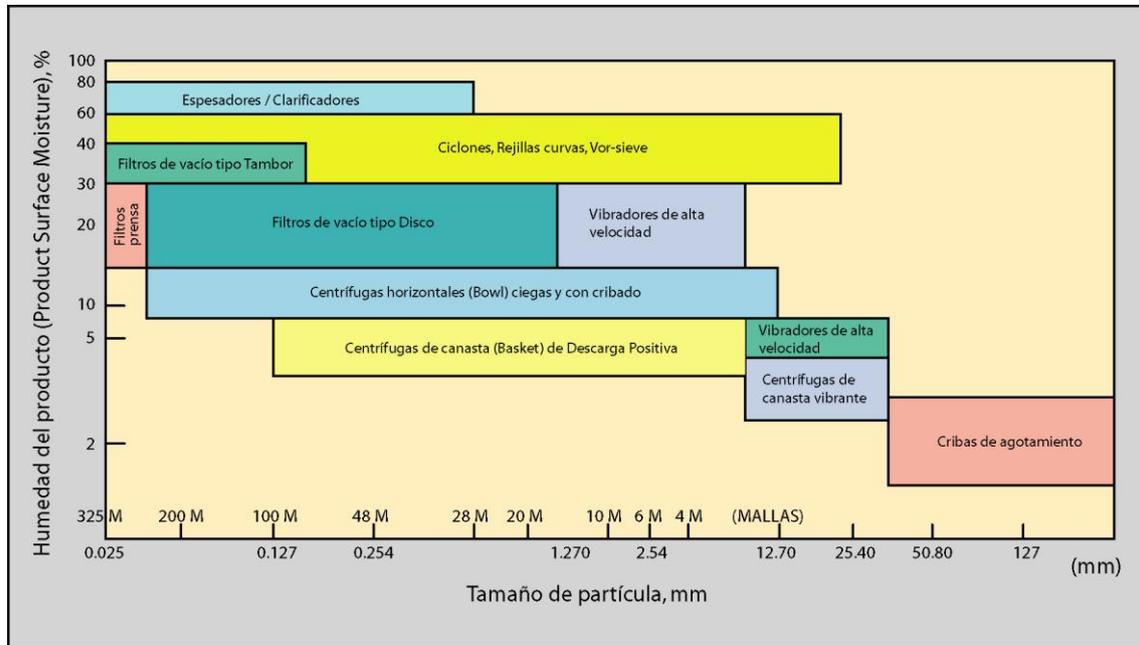


Fig.11.3: Equipos para la separación sólido-líquido según la granulometría y la humedad final del producto.

La figura anterior muestra que para los tamaños de partículas superiores a 37.5 mm no se presenta una dificultad especial para lograr su desaguado. Con el empleo de cribas de agotamiento es posible de obtener estos tamaños con bajas humedades. Los vibradores de elevada velocidad se emplean para los tamaños intermedios y para tamaños más pequeños de 0.5 mm si en el producto se admiten porcentajes de humedad del 15 % o mayores. Sin embargo, normalmente estos equipos no se emplean para tamaños inferiores a 6.3 mm debido a la humedad asociada con las partículas finas. En este nivel de tamaños se suele recurrir al empleo de la fuerza centrífuga para ayudar al proceso de desaguado. La centrifugas de varios tipos y diseños se emplean exclusivamente en el

#### **BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

##### **TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

rango de tamaños 0.5 - 9.5 mm. Las centrífugas horizontales con carcasa perforada (screen bowl centrifuges) y con carcasa ciega (solid bowl centrifuges) se emplean para tamaños más pequeños de 0.5 mm aunque darán un producto con un contenido mayor de humedad. Siguiendo a las centrífugas se encuentran las operaciones de filtrado con vacío que se hacen apropiadas para tamaños muy finos. Normalmente las fracciones más gruesas son quitadas y desaguadas con vibradores de elevada velocidad o centrífugas especiales. Los filtros de disco se emplean a menudo para el desaguado de las partículas inferiores a 0.60 mm.

Los factores que influyen en todos los pasos de separación de sólido-líquido son:

**Tamaño de partícula y Granulometría:** Generalmente las partículas finas tienen los ratios más bajos de sedimentación y filtración. Un incremento del área superficial significa una menor concentración en la salida inferior del concentrador (underflow) y en la descarga de la costra del filtro así como un mayor contenido de humedad.

**Concentración de sólidos:** El incremento de la concentración de sólidos generalmente minimizará el tamaño de los equipos requeridos y el coste en todas las etapas de separación sólido-líquido. La mayor parte de los espesadores son diseñados sobre la base de la unidad de área requerida (metros cuadrados por toneladas de un sólido seco por día) que disminuirá conforme aumenta la concentración de sólidos en la alimentación. De una forma

#### **BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

##### **TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

similar ocurre con los ratios de filtrado, los cuales también aumentan conforme el flujo requerido, a través de los vasos capilares de la costra del filtro, disminuye.

**Forma de la partícula, densidad relativa, y características superficiales:** Normalmente la forma óptima de partícula es la esférica con porosidad cero. Cuando cualquiera de estos factores se aleja de su estado ideal, las dificultades se incrementan. Las características químicas de la superficie de las partículas va a influir en factores como la dosificación de sulfatantes y/o floculantes.

**Viscosidad y densidad relativa del líquido:** El incremento de la viscosidad disminuirá los ratios de sedimentación y de filtración. Un mantenimiento de temperaturas altas será siempre deseable puesto que va a disminuir la viscosidad del agua. Sin embargo, esto último no siempre puede llevarse a cabo por el coste que ello conlleva.

### **11.2. Sedimentación.**

Los procesos de sedimentación son procesos continuos de separación sólido-líquido que facilitan la sedimentación de las partículas, que se encuentran en suspensión dentro de un fluido, empleando o bien la fuerza gravitatoria o bien ayudándose de la fuerza centrífuga.

El comportamiento de una partícula dentro de un fluido homogéneo viene definido por la Ley de Stokes.

#### **BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

##### **TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

Durante la sedimentación inicial, las partículas sólidas que hay en una solución, no turbulenta, se mueven hacia abajo bajo la influencia de la gravedad en relación con el fluido. La velocidad de este movimiento se incrementa hasta que la fuerza opuesta de arrastre (force of drage), generada por la viscosidad del líquido, iguala la fuerza de la gravedad sobre la partícula. Estas partículas, a partir de este momento, caerán a velocidad constante, llamada velocidad terminal o velocidad de asentamiento libre. La magnitud de la velocidad de asentamiento libre puede ser obtenida con la siguiente expresión:

$$V_t = \frac{2 \cdot r^2 \cdot g \cdot (s - l)}{9 \cdot \mu} \quad (\text{Ec.11.1})$$

Donde  $V_t$  es la velocidad terminal de una partícula esférica,  $r$  es el radio de dicha esfera,  $g$  es la aceleración gravitatoria,  $s$  es la densidad relativa de la partícula esférica,  $l$  es la densidad relativa del líquido y  $\mu$  es la viscosidad del fluido (todas las unidades en el sistema CGS).

#### **Ensayo de Sedimentación.**

Para comprender mejor el proceso de sedimentación que tiene lugar dentro de un espesador hay que realizar ensayos de sedimentación llevados a cabo con probetas graduadas (Fig.11.4), donde se observará el descenso de la altura de la interfase que se forma entre el líquido

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

clarificado, normalmente será agua, y la pulpa, que estará formada por el fluido y las partículas finamente divididas; este ensayo se realizará en un ambiente sin perturbación para no crear condiciones turbulentas y nos permitirá obtener los ratios de sedimentación a partir de los cuales se dibujan las curvas de sedimentación que nos aportan la información necesaria para el dimensionamiento de los tanques espesadores o los clarificadores.

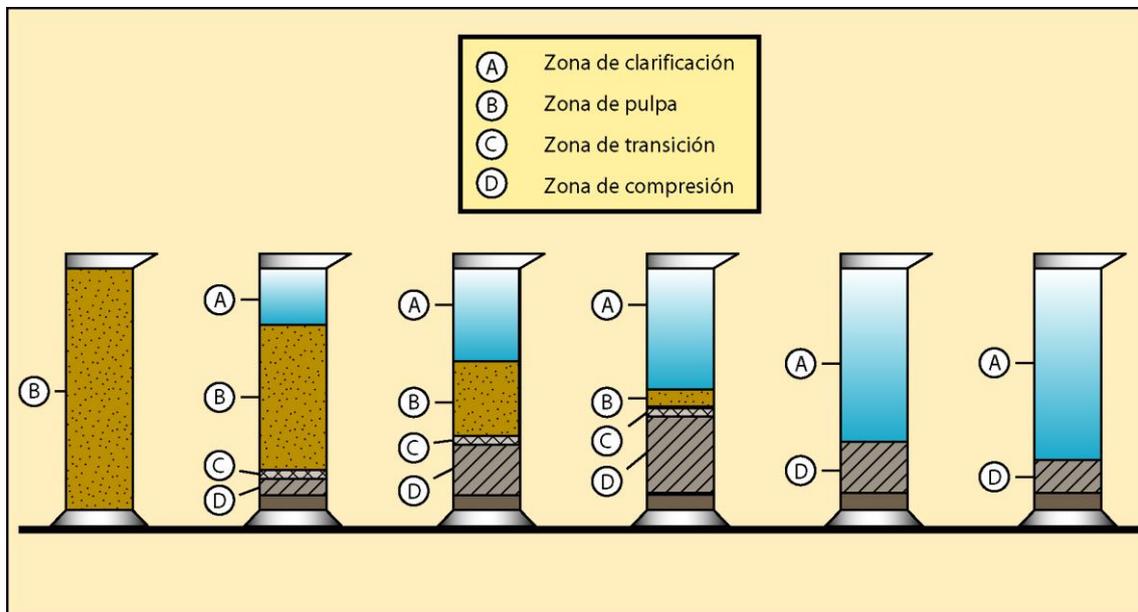


Fig.11.4: Ensayo de sedimentación.

Al inicio del ensayo de sedimentación con una probeta, se puede observar que los sólidos están dispersos a través de todo el cilindro y la concentración (Kg de sólido / l de pulpa) es igual en todas las áreas del mismo. Cuando comienza la sedimentación, las partículas caen a una velocidad que va a depender de las condiciones locales de sedimentación obstaculizada. El comportamiento exacto de una pulpa dependerá de la granulometría de las partículas, de la relación de dilución y el grado de floculación producida. Con tamaños de

#### BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.

##### TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO

partículas muy próximas tendremos velocidades de sedimentación muy similares y por consiguiente la altura de la interfase se definirá claramente, al contrario de lo que ocurre con granulometrías de partículas muy amplias.

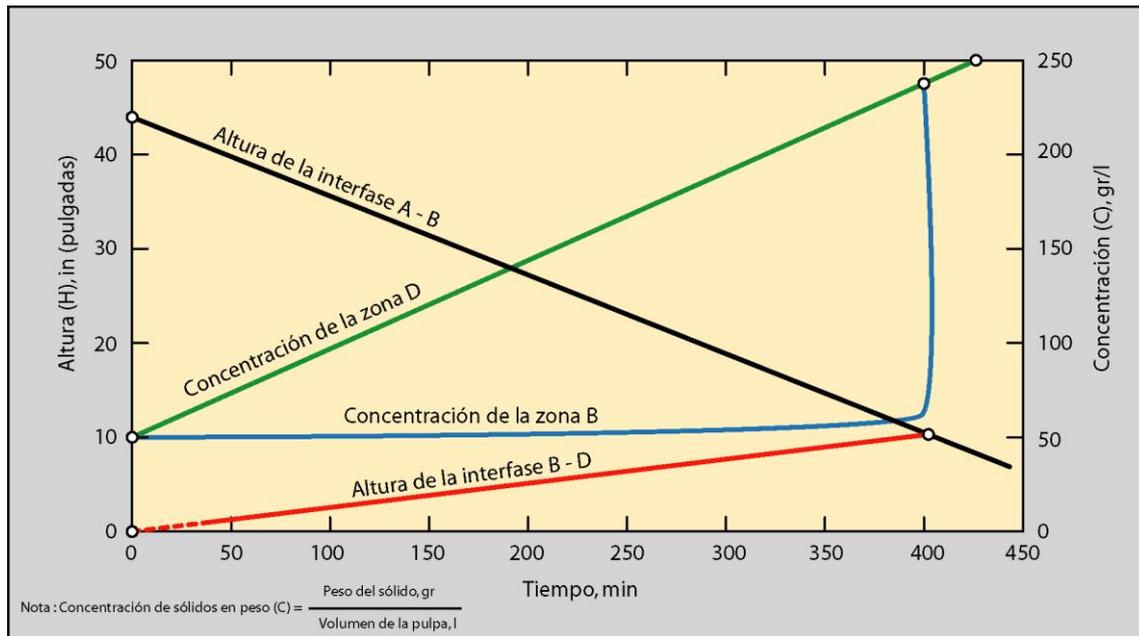


Fig.11.5: Alturas de las interfases y concentraciones de las zonas en el ensayo de sedimentación.

Las partículas coloidales si no consiguen coagularse y/o flocularse, permanecerán en suspensión durante tiempos muy prolongados. En caso donde no hay presencia coloidal, las partículas comenzarán a asentarse en el fondo produciendo una especie de fango o lodo (zona D, Fig.11.4). Tan pronto como comienza a producirse el asentamiento comienzan a mostrarse las zonas A, B y C. La zona A será el fluido clarificado y la zona B es la zona de pulpa. La zona C es una zona de transición. En la Figura 11.5 se observa que, en las probetas 2ª y 3ª, la pulpa mantiene ratios de sedimentación constantes, con lo que la zona D se va elevando debido a la acumulación de las partículas sólidas. Esta zona D comenzará a sufrir una

#### **BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

##### **TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

ligera compactación (Fig.11.5), liberando parte del fluido que hay entre sus intersticios, hasta conseguir la compactación final, en la cual la interfase formada entre esta zona de compactación (zona D) y la zona clarificada (zona A) es la única que existe en la probeta.

### **Coagulación y Floculación.**

Las partículas sólidas se pueden obtener en forma de lodo espeso dentro de un espesador, obteniendo un rebose de líquido clarificado. Sin embargo ante partículas sólidas extremadamente pequeñas, del orden de las micras, este asentamiento se ralentiza demasiado empleando únicamente la acción de la gravedad; por ello habrá que acudir a equipos de separación sólido-líquido centrífugos o bien aglomerar las partículas finas con el empleo de floculantes o a través de fenómenos de coagulación.

Existe una diferencia entre el efecto de coagulación y el de floculación aunque muchos productos empleados en la separación sólido-líquido poseen los dos efectos.

### ***Coagulación***

Las cargas superficiales son neutralizadas a través de la adición de coagulantes que tienen cargas opuestas, haciendo que las partículas micrométricas se adhieran al coagulante o entre ellas (figura 11.7). A escalas muy pequeñas, todas las partículas ejercen atracción mutua, debido a fuerzas de Van der Waals. Sin embargo estas partículas, dentro de atmósferas cargadas eléctricamente

#### **BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

##### **TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

alrededor de las mismas, van a generar fuerzas de repulsión entre ellas evitando que se adhieran y produciendo la ralentización del proceso de sedimentación.

Se puede decir que las cargas eléctricas sobre la superficie de las partículas serán de signo negativo en suspensiones acuosas de pH superior a 4 y serán de signo positivo en aquellas soluciones fuertemente ácidas.

Los coagulantes son generalmente compuestos minerales: Sulfato de Alúmina, Cloruro Férrico, Cal, Sulfato Ferroso, Cloruro Magnésico que en suspensión acuosa ayudan a la disminución del potencial Zeta. Cuando una partícula se mueve en disolución, se produce el corte de la capa doble, entre la capa de enlace que se mueve con la partícula y la capa difusa. Este plano de cizalla define el potencial Zeta, siendo la coagulación máxima cuando las partículas tienen carga cero en relación al medio en suspensión (potencial Zeta igual a cero).

Un agregado coagulado se volverá a formar después de que haya sido destruido, como puede suceder durante operaciones de transporte por medio de bombas.

En la figura 11.6 se observa como una superficie con carga negativa hace que los iones positivos de la solución sean atraídos a ella, formando la capa de enlace o capa de Stern.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

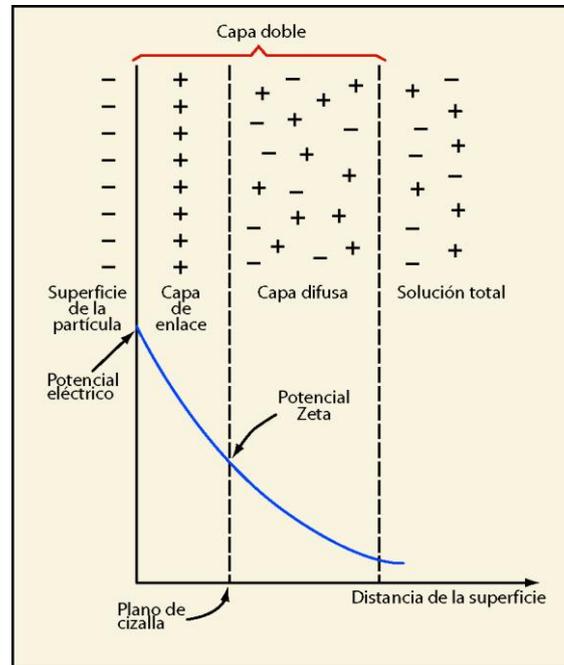


Fig.11.6: Potencial Zeta. Capa de enlace.

### ***Floculación***

Se basa en la creación de agregados a través de reactivos (floculantes) que actúan como puentes entre las partículas (figura 11.7), dando lugar a agrupaciones de partículas que sedimentarán más rápido, acelerando de esta forma el proceso de separación sólido-líquido.

Los floculantes anteriormente eran a base de materiales naturales como el almidón, cola, gelatina y goma de guará, pero actualmente son polímeros orgánicos de alto peso molecular de base poliacrilamida con una carga eléctrica opuesta a la carga de la suspensión que se quiere flocular.

#### BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.

##### TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO

Los floculantes en su mayoría son de carácter **aniónico**, es decir copolímeros de acrilamida con grupos acrilato en aumento, los cuales dan una carga negativa.

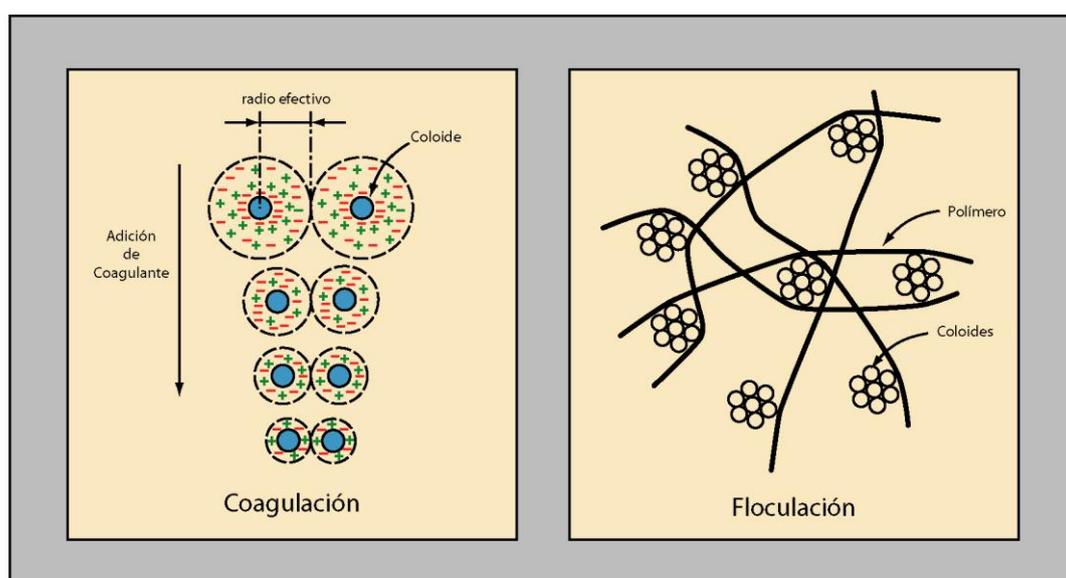


Fig.11.7: Efectos de coagulación y floculación.

Pero también hay floculantes **no-iónicos**, constituidos por poli(acrilamidas) técnicamente puras, que en solución acuosa presentan un comportamiento neutro y floculantes **catiónicos** formados por copolímeros de acrilamida con las partes de un comonomero catiónico en aumento que darán una carga positiva en solución acuosa.

Un floculante una vez destruido no volverá a formarse es por ello que no sean muy eficientes en los hidrociclones, incluso en bombeo se pueden destruir los grupos debido a la ruptura de las cadenas moleculares largas. Se debe disponer un sistema de floculación para que los floculantes entren en contacto con las partículas a flocular en soluciones de empleo fuertemente diluidas (0.1 % en peso máx.), a partir de soluciones madre de 0.5 % en peso. Se necesitará de un periodo de maduración

#### **BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

##### **TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

(entre 5 - 60 minutos) en el cual la solución estará bajo una agitación suave (figura 11.8).

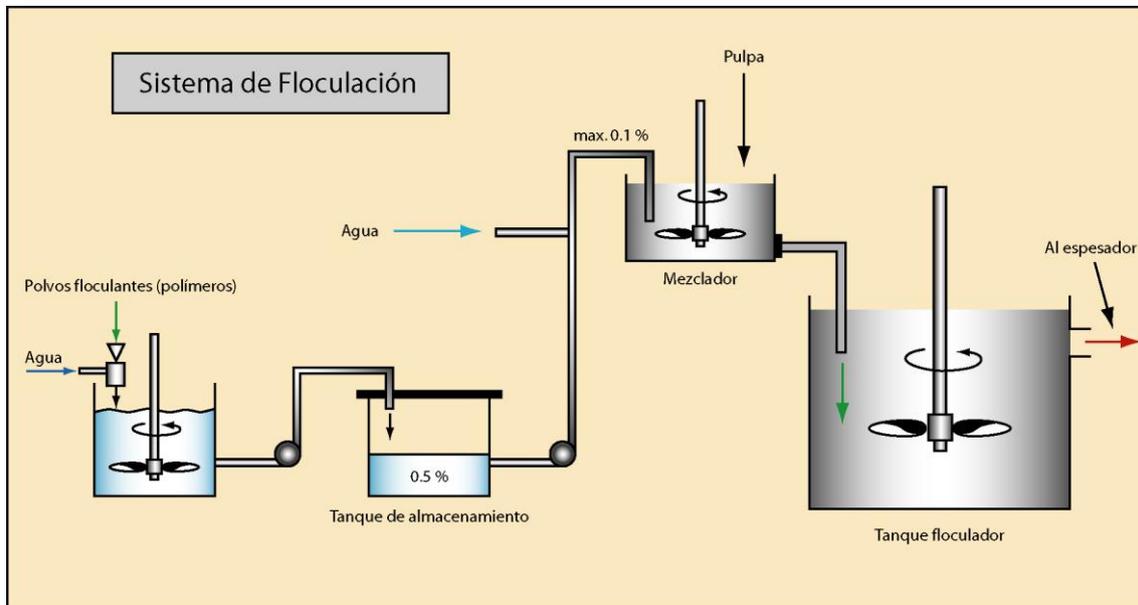


Fig.11.8: Sistema de preparación del floculante.

### **Espesadores Convencionales.**

Es espesador por gravedad o convencional se emplea para aumentar la concentración de sólidos en el hundido a través de la gravedad. Los espesadores a veces actúan como elementos de almacenamiento para alimentar de forma continua a las líneas de equipos de filtrado o centrífugas.

Los elementos principales de un espesador son los motores y elementos de transmisión, el eje y los brazos giratorios. Estos últimos tienen como función el transportar los sólidos sedimentados al punto de descarga central y crear canales en el lodo para permitir la liberación de agua y obtener, de este modo, un lodo con mayor concentración en sólidos.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

Los espesadores suelen emplearse para concentraciones de la suspensión elevadas y con sedimentación obstaculizada. Son tanques de poca profundidad en los que el lodo se obtiene por la parte inferior y el líquido clarificado por la parte periférica superior (Fig.11.9).

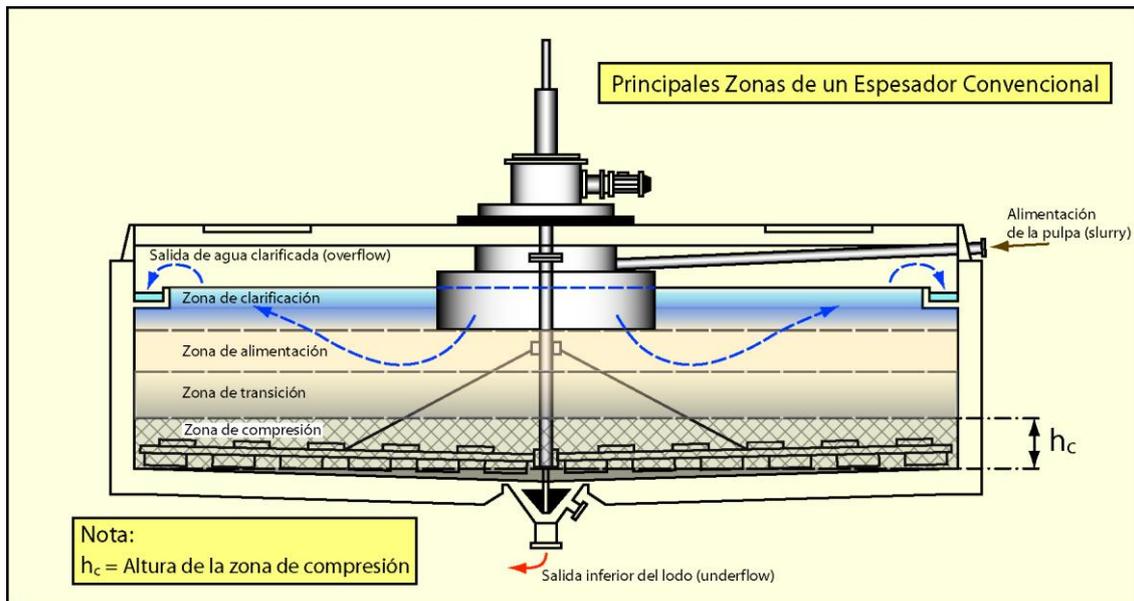


Fig.11.9: Zonificación en un espesador convencional.



Fig.11.10: Lodo obtenido en un espesador (Cortesía de Outokumpu)

#### BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.

##### TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO

Los tanques de los espesadores se construyen de acero, hormigón o una combinación de ambos. En tanques menores de 21.4 m de diámetro es más económico fabricarlos completamente de acero, tanto las paredes del tanque como el fondo del mismo. El fondo del tanque, cuando es de acero, se fabrica sin pendiente por su coste en este caso los brazos giratorios o rastrillos tendrán cierta pendiente hacia el centro del tanque para facilitar el transporte del lodo. Se formará un lecho de lodo (bed-in) que hará de falso fondo.

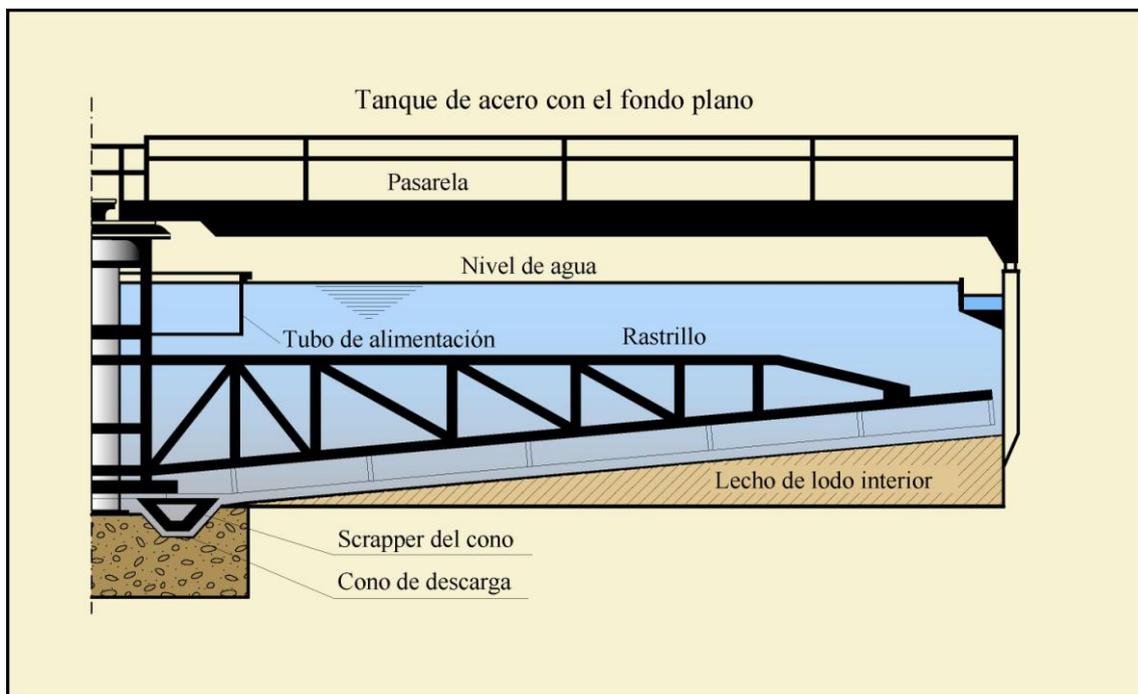


Fig.11.11: Espesador convencional con tanque de acero.

Cuando las partículas sedimentadas, debido a su tamaño, son incapaces de crear el lecho de lodo hay que recurrir a un fondo en pendiente fabricado con hormigón con las paredes del tanque o bien de acero o bien de hormigón (Fig. 11.12). Este tipo de construcciones es muy común para diámetros entre 21.4 m y 30.5 m.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

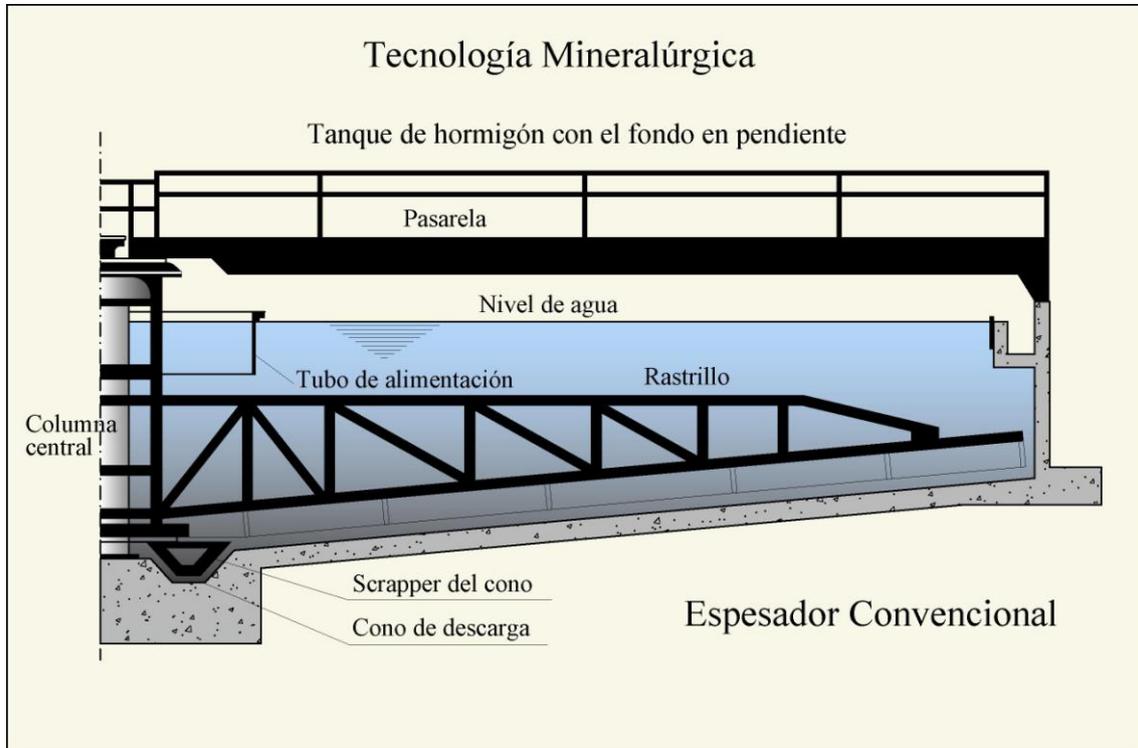


Fig.11.12: Espesador convencional con tanque de hormigón.

Los espesadores convencionales se clasifican según la posición de los sistemas de accionamiento (motor, engranajes, etc) y el método de soporte para los mismos. Su diseño va a depender del diámetro del tanque finalmente seleccionado. Así, para pequeños diámetros (hasta 30-40 m) el mecanismo de accionamiento y el eje central son soportados sobre una superestructura o puente (Fig.11.13) que atraviesa el tanque y que debe ser capaz de soportar el peso del rastrillo más los sólidos depositados en los brazos giratorios y vencer los momentos que opone el lodo que está siendo rastrillado. Este tipo de espesadores presenta un cono de descarga en el centro y se les conoce como espesadores *tipo puente* (bridge type).

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

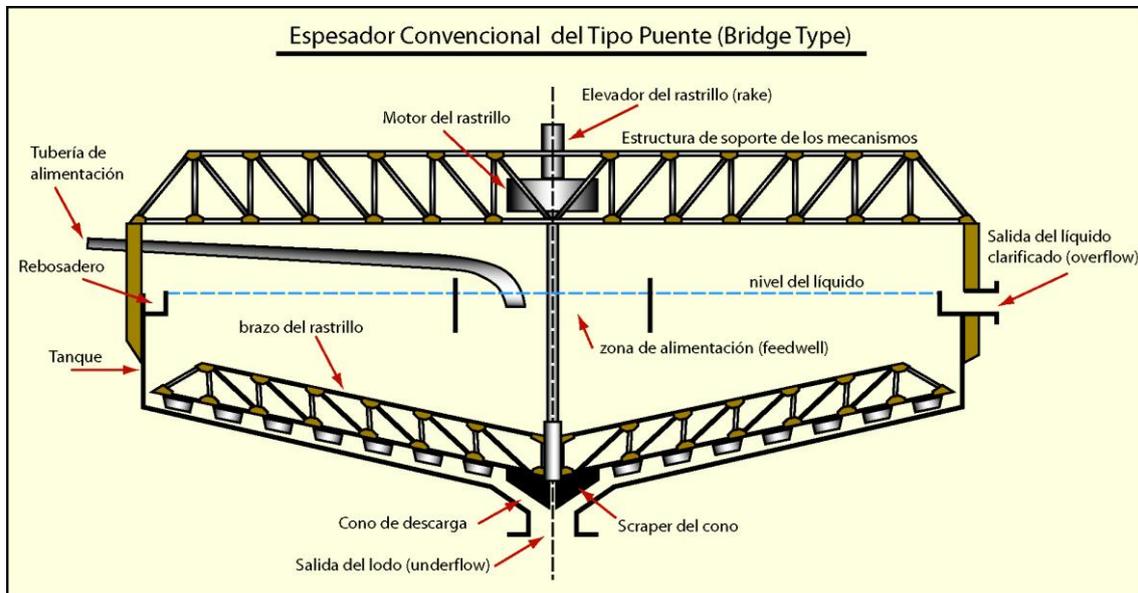


Fig.11.13: Espesador tipo puente.

Para los tanques con diámetros superiores a 30-40 m, se emplea un pilar estacionario central de acero u hormigón para soportar los mecanismos de accionamiento y control. El puente sólo se emplea para acceso de personal y como soporte de tuberías de alimentación. Los brazos de los rastrillos están unidos a una estructura o jaula giratoria que rodea al pilar central. El giro se lo proporcionan los elementos de accionamiento superiores; la descarga del lodo se realiza a través de un canal anular que rodea al pilar central (Fig.11.14). Este tipo de espesadores se les conoce con el nombre de espesadores tipo *pilar central* (centre pier type).

El diseño del rastrillo es importante y vendrá en función de la naturaleza de sólidos sedimentados, el diámetro del tanque, la cantidad de sólidos coloidales floculados, etc.

#### BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.

##### TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO

Hay diferentes tipo de construcción, variando desde un único brazo rígido con hojas soldadas directamente sobre él (limitado a tanques con un diámetro máximo de 15 m) hasta brazos de diferentes tipos de estructura metálica diseñados para grandes tanques (por encima de 35 m de diámetro)

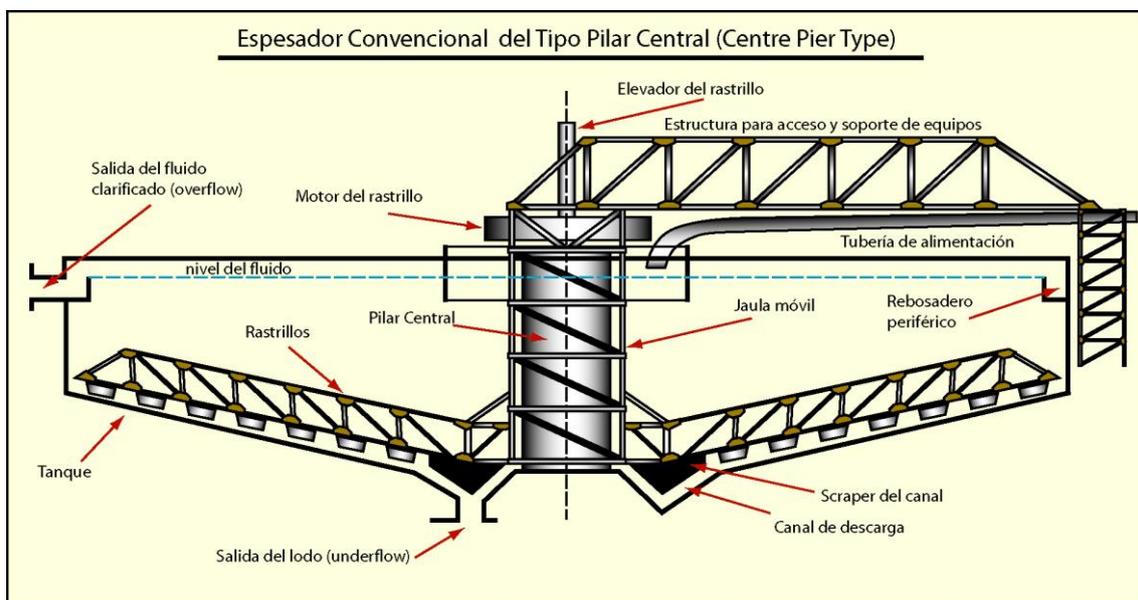


Fig.11.14: Espesador tipo pilar central.

Para eliminar grandes estructuras que lleguen hasta el material sedimentado en los grandes tanques, se puede recurrir al empleo de extensiones que parten de los brazos porta-rastrillos. Este tipo de brazos es conocido como "Thixotrópico" diseñado para el tratamiento de sustancias coloidales (arcillas) con comportamiento thixotrópico que eviten la formación de "donuts" (fig.11.15). En la mayor parte de los espesadores convencionales, los brazos de los rastrillos están unidos al eje central (tipo puente) o a una estructura circular giratoria (tipo pilar central), sin embargo hay otras alternativas como son los espesadores

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

con el guiado del rastrillo a través de cables (Fig.11.16). En estos últimos el brazo de rastrillado se encuentra articulado a la base del eje central o jaula giratoria. La articulación es diseñada para permitir movimientos horizontales y verticales del rastrillo que es guiado alrededor de la columna a través de cables conectados a un brazo superior de tubo que produce el momento de giro, situado por debajo del nivel de agua. Este tipo de espesadores se emplea en sólidos de comportamiento thixotrópico o finamente divididos y parcialmente floculados.

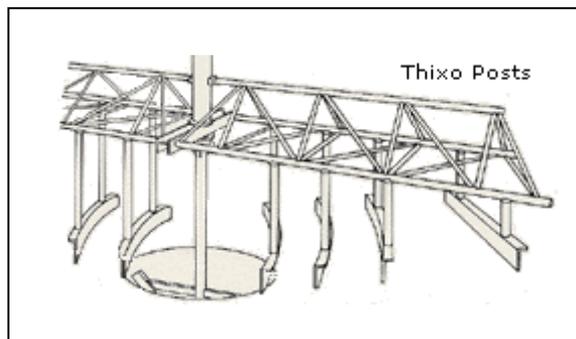


Fig.11.15: Rastrillos "thixo" y estructura de tubo.



Fig.11.16: Espesador convencional de cables (Cortesía de Dorr-Oliver).

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

Otro tipo de espesadores son los de *tracción*, en los cuales el pilar central sirve de apoyo para el brazo rastrillador, así como pivote para que toda la estructura de rastrillado gire alrededor del pilar. El movimiento es proporcionado por un mecanismo de accionamiento montado sobre rail que hace girar al brazo principal. Este tipo de espesadores se fabrica para tanques cuyo diámetro va desde los 50 m hasta los 150 m.



Fig.11.17: Rail periférico de un espesador de tracción (Dorr-Oliver).



Fig.11.18: Brazos de rastrillado en un espesador de tracción (Outokumpu).

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

La mayor parte de los espesadores disponen de sistemas de elevación del rastrillo principalmente cuando se tratan colas de flotación. Las partículas finas de arcilla pueden convertirse en un gel que impide el flujo hacia el punto de descarga al formar anillos o "donuts" y será necesario el empleo de sistemas de elevación para subir y bajar los rastrillos que ayuden a romper estos anillos. Estos mecanismos de elevación están regulados para actuar sobre el rastrillo cuando se alcanzan unos pares excesivos para la estructura.

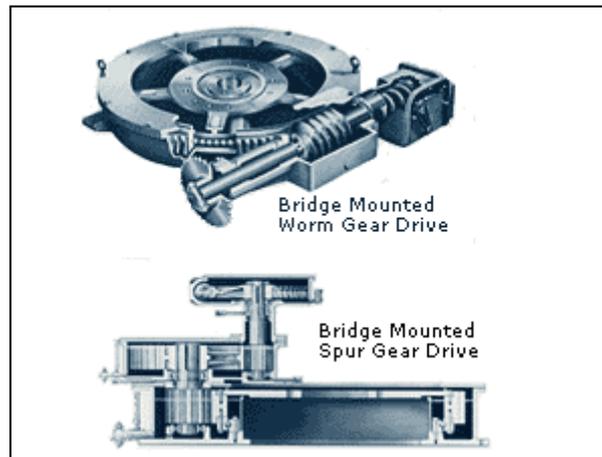


Fig.11.19: Sistemas de accionamiento para espesadores tipo puente.

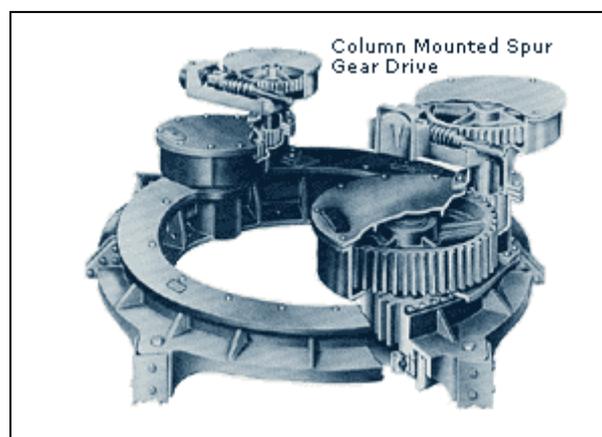


Fig.11.20: Sistema de accionamiento para espesadores tipo pilar central.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

En las figuras 11.19 y 11.20 se muestran los mecanismos de accionamiento para los espesadores tipo puente y tipo pilar central respectivamente, movidos por motores eléctricos. Su selección dependerá del tipo de pares que han de vencer:

Tipo de espesador	Torque máximo (Nm)
Tipo puente con "Worm Gear Drive"	3000-140000
Tipo puente con "Spur Gear Drive"	20000-1440000
Tipo pilar central con "Spur Gear Drive"	27000-3270000

En los espesadores convencionales se instalan pozos de alimentación con el fin de introducir una alimentación con el mínimo posible de turbulencia así como permitir la floculación. La alimentación entrará al pozo de forma perimetral siguiendo disposiciones adecuadas para evitar chorros a presión o corrientes por debajo de la zona de alimentación (Fig.11.21).



Fig.11.21: Tuberías de alimentación al pozo central.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

**Dimensionado de la Superficie del Espesador.**

Para el dimensionado de la superficie de un tanque espesador convencional se puede manejar la fórmula dada por Coe y Clevinger, que proporciona la relación entre la velocidad de sedimentación de las partículas dentro de las diferentes zonas del espesador y el área del tanque:

$$A = \frac{1.333 \cdot (F - D)}{R \cdot \rho_F} \quad (Ec.11.2)$$

Siendo:

- $A$ , es área del espesador, siendo la unidad de area el pie cuadrado por tonelada corta de sólido seco en 24 horas ( $ft^2/(sht \cdot 24h)$ ).
- $F$ , es la dilución inicial, es decir el cociente entre el peso del líquido frente al peso del sólido en la muestra de pulpa ensayada.
- $D$ , es la dilución final del hundido, se obtiene mediante un ensayo de 19 horas de duración (underflow).
- $R$ , es la velocidad de asentamiento (ft/h).
- $\rho_F$ , es la densidad del líquido o fluido, normalmente será agua.

A través de ensayos de sedimentación para diferentes concentraciones iniciales (ver figura 11.4), se obtiene:

- $F_1$ , dilución inicial de la pulpa.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

- $R_1$ , velocidad de asentamiento (pies/hora).
- $F_i$ , dilución intermedia.
- $R_i$ , velocidad de asentamiento (pies/hora).

Con los valores  $F_i$  y  $R_i$  se obtiene, a través de la ecuación 11.2, los valores de  $A_i$ , tomando aquel valor superior.

Para el cálculo del *área industrial*, se multiplicará el mayor valor de  $A_i$  obtenido con la ecuación 11.2 por un coeficiente que varía entre 1.2 y 1.4, siendo tomado normalmente el valor de 1.2.

La ecuación de Coe y Clevinger en unidades métricas viene dada por:

$$A = \frac{(F - D) \cdot W}{R \cdot \rho_F} \quad (\text{Ec.11.3})$$

Con:

- $A$ , área de sedimentación ( $\text{m}^2$ ).
- $R$ , velocidad de sedimentación (m/h).
- $W$ , peso del sólido seco (t/h).
- $F$ , dilución a la entrada.
- $D$ , dilución a la salida.

También es interesante disponer la ecuación de Coe y Clevinger en función de las concentraciones:

$$A = \left( \frac{1}{C} - \frac{1}{C_u} \right) \cdot \frac{W}{R \cdot \rho_F} \quad (\text{Ec.11.4})$$

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

Siendo:

- $C$ , concentración inicial de la pulpa.
- $C_u$ , concentración en el hundido de la pulpa.

Una curva de sedimentación obtenida de ensayos comprende diferentes zonas, las cuales se indican en la figura siguiente:

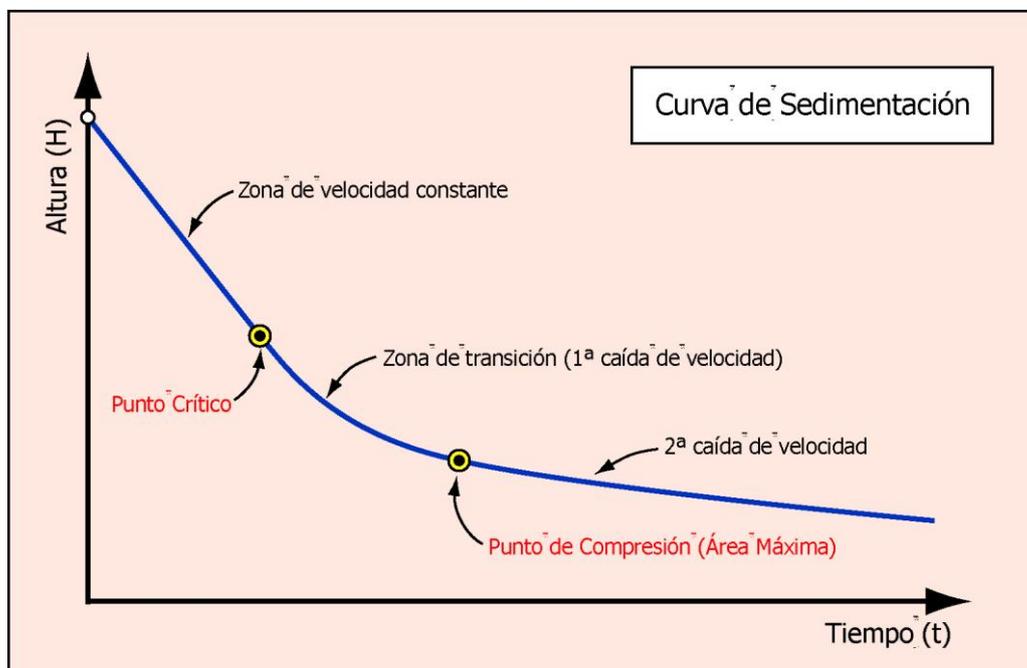


Fig.11.22: Curva de sedimentación. Zonificación.

Hay otros métodos para el cálculo del área de sedimentación de un espesador, los cuales vamos a comentar a continuación.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

**Método de Talmage Fitch.**

Este método hace uso de la ecuación de Kinch, cuya expresión es:

$$C_o \cdot H_o = C \cdot H \quad (Ec.11.5)$$

Con:

- $C_o$ , concentración inicial (Kg/l).
- $H_o$ , altura inicial de la interfase entre la zona de pulpa y la zona de clarificación (cm).
- $H$ , altura de la interfase entre la zona de pulpa y la zona de clarificación para una concentración  $C$  (cm).
- $C$ , concentración intermedia del lodo (Kg/l).

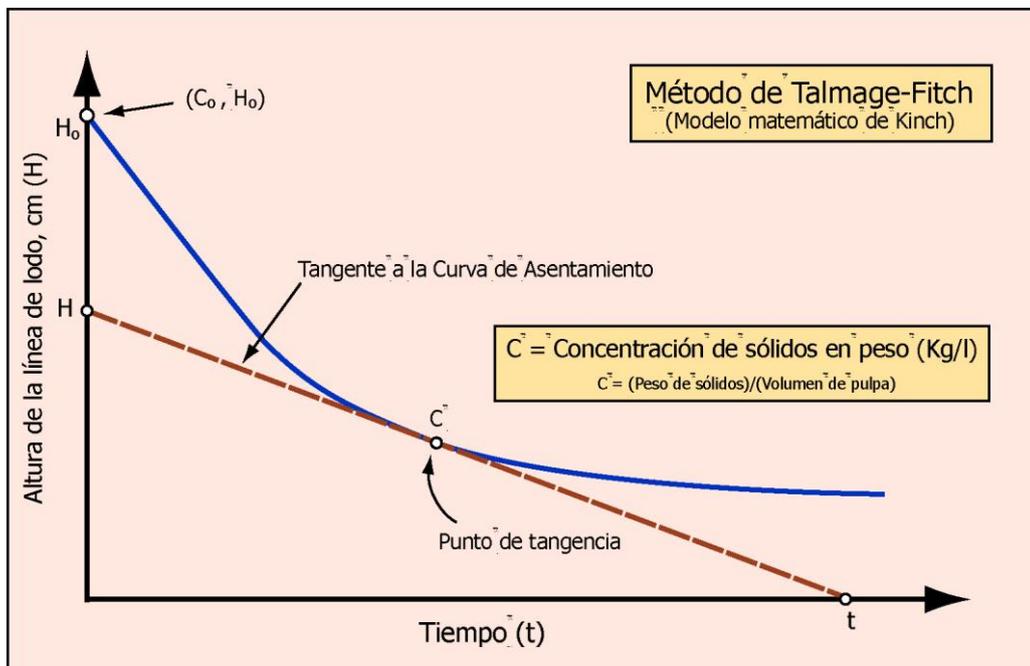


Fig.11.23: Curva para la obtención del valor H.

La expresión para el cálculo del área a través del método de Talmage Fitch es la siguiente:

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

$$A = \frac{W \cdot t_u}{C_o \cdot H_o} \quad (Ec.11.6)$$

sabiendo que:

- $A$ , área de sedimentación ( $m^2/Kg/h$ ).
- $W$ , peso de sólido seco ( $Kg/h$ ).
- $t_u$ , tiempo en alcanzar la concentración de salida ( $C_u$ ), horas.
- $C_o$ , concentración inicial de sólidos en la pulpa ( $Kg/m^3$ ).
- $H_o$ , altura inicial (m).

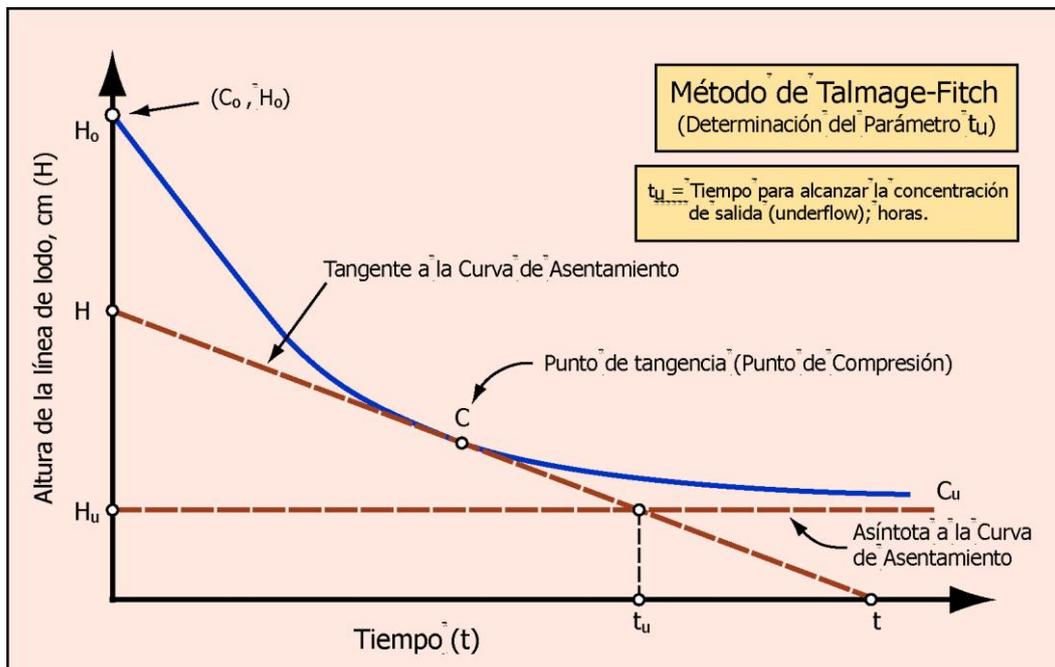


Fig.11.24: Determinación de  $t_u$ .

El punto C, es el punto a partir del cual comienza la compresión del lodo y se determina a través de ensayos.



**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

$$A = \frac{\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_u}\right) \cdot W}{(H - H_u) t_u} \quad (Ec.11.8)$$

Si a esta ecuación aplicamos la expresión 11.5 de Kinch obtenemos de nuevo la ecuación 11.6 de Talmage y Fitch.

Para el caso en el que  $H_u > H_c$ , la velocidad de sedimentación  $V_n$  se obtiene como se presenta en la siguiente figura:

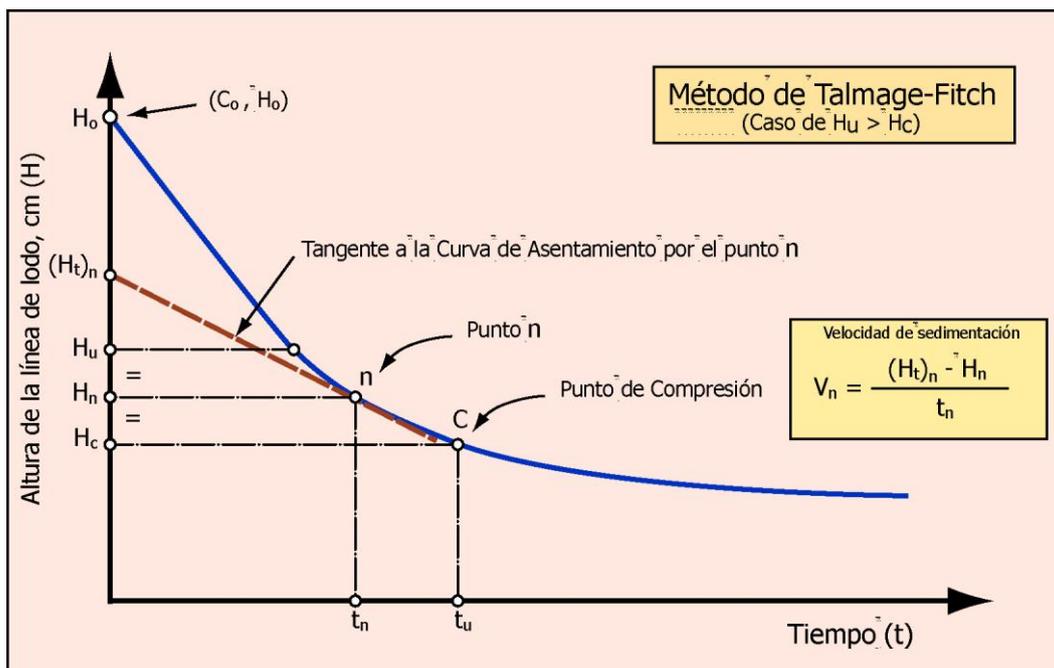


Fig.11.26: Determinación de la velocidad de sedimentación  $V_n$  (R).

**Método de Oltman.**

Para aplicar este método, se debe conocer el punto de compresión (concentración C) y la fórmula que se aplica

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

para el cálculo del área de sedimentación una vez conocido el parámetro  $t_u$  es la ecuación 11.6:

$$A = \frac{W \cdot t_u}{C_o \cdot H_o}$$

El valor de  $t_u$  se obtiene como se muestra a continuación:

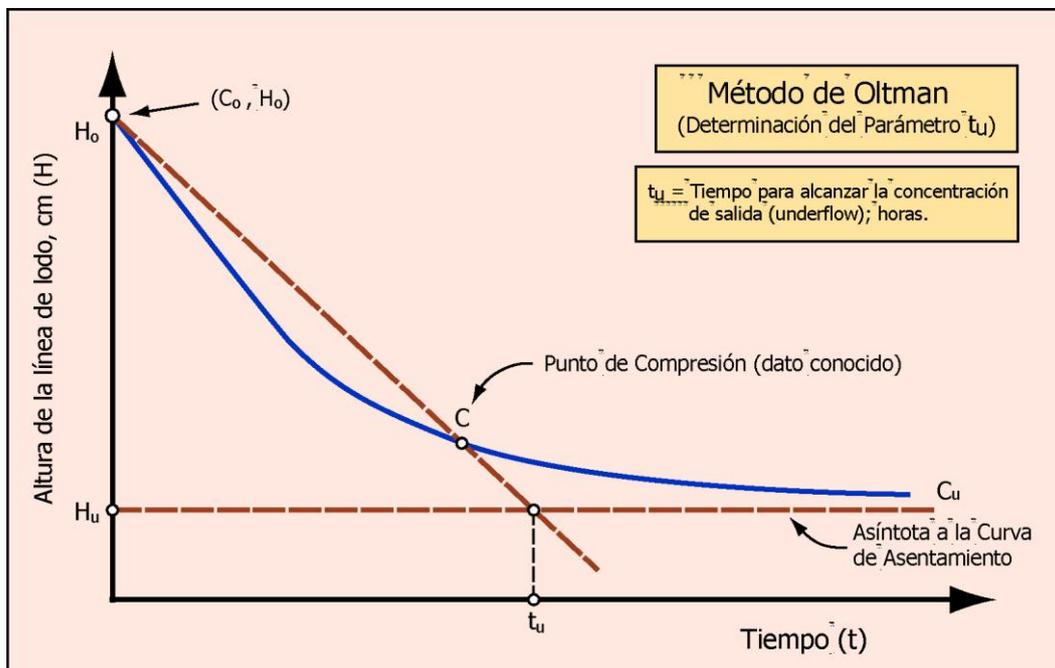


Fig.11.27: Determinación de  $t_u$ . Método Oltman.

**Método de la bisectriz.**

Este método se recomienda cuando se desconoce el punto de compresión del lodo (concentración C), el área de sedimentación obtenida estará calculada por exceso.

Para el cálculo de  $t_u$  se obtiene gráficamente a través de dos caminos como muestran las siguientes figuras.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

La primera figura se emplea cuando se persigue una concentración final de espesamiento en el hundido,  $C_u$ , y la segunda figura se empleará cuando no se pretende llegar a una concentración máxima sino a una intermedia,  $C_1$ .

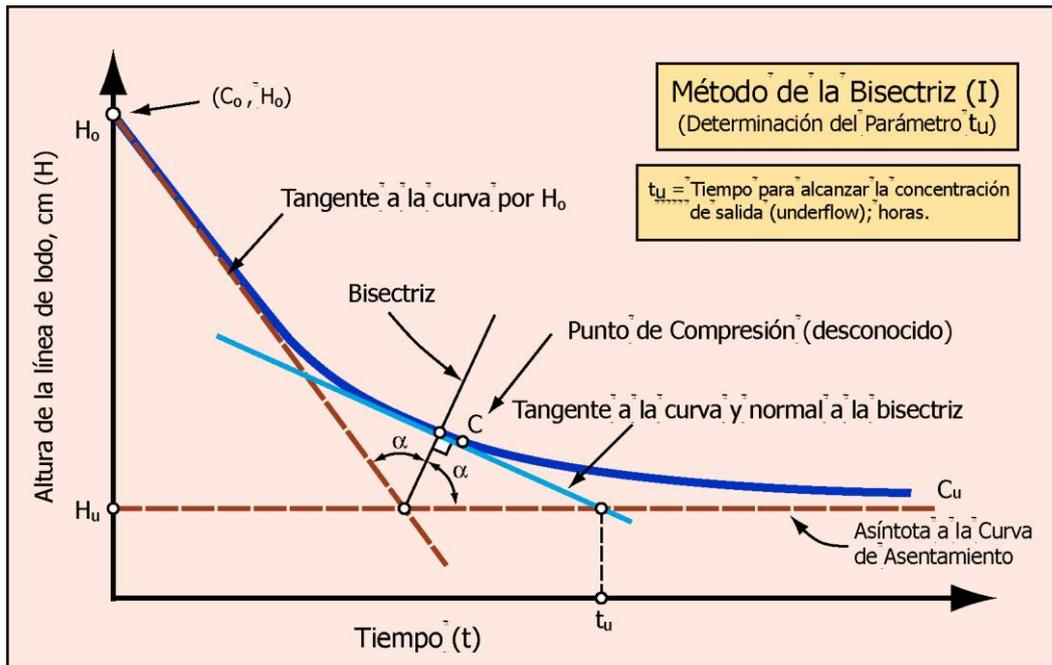


Fig.11.28: Método de la bisectriz (I).

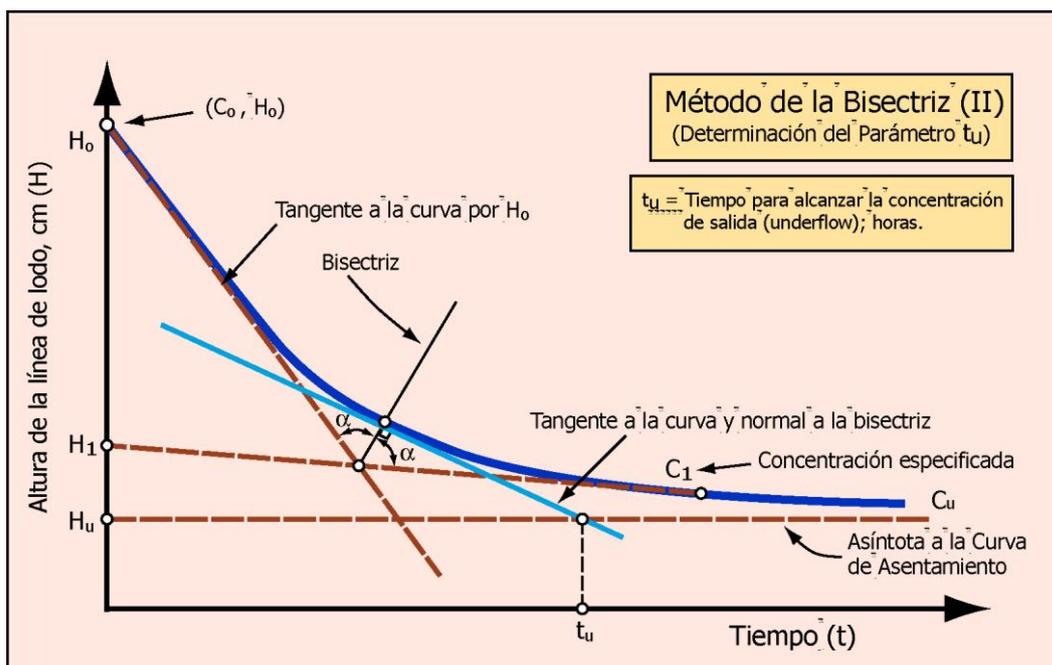


Fig.11.29: Método de la bisectriz (II).

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

**Dimensionado del área de clarificación.**

En el cálculo de un clarificador se debe tener en cuenta que el área del clarificador debe ser adecuada para que la velocidad ascensional del fluido sea inferior a la velocidad de sedimentación de las partículas que se pretenden separar.

La *carga de superficie*  $S$ , de un clarificador tiene por expresión:

$$S = \frac{Q_o}{A} = \frac{H_o}{t_o} \quad (m^3 / m^2 \cdot h) \quad (Ec.11.9)$$

La velocidad de sedimentación ( $H_o/t_o$ ), se puede obtener gráficamente de la pendiente de la curva de sedimentación (figura 11.30).

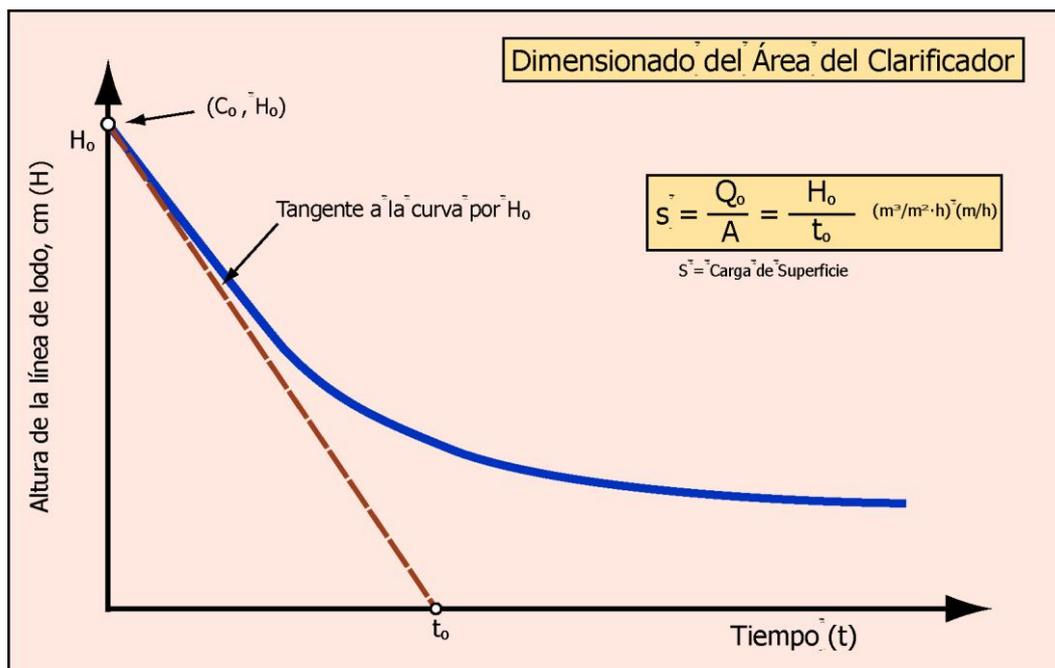


Fig.11.30: Determinación de la velocidad de sedimentación.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

El área del clarificador vendría dada por:

$$A_{cl} = \frac{Q_o}{S} \quad (m^2) \quad (Ec.11.10)$$

Profundidad del Tanque ( $h_c$ ).

Para el cálculo de la profundidad del tanque empleamos la fórmula:

$$h_c = \frac{t \cdot (\rho_s - \rho_F)}{A \cdot \rho_s \cdot (\rho_p - \rho_F)} \quad (Ec.11.11)$$

Con:

- $h_c$ , altura de la zona de compresión (m).
- $t$ , tiempo para que el lodo se consolide (h).
- $\rho_s$ , peso específico del sólido.
- $\rho_F$ , peso específico del fluido (normalmente 1).
- $\rho_p$ , peso específico de la pulpa en la zona de compresión.
- $A$ , área de sedimentación ( $m^2$ ).

En la figura 11.9, se puede observar la zona de compresión junto con la profundidad del tanque que se ha de calcular ( $h_c$ ). Ésta no debe de exceder de 1.5 m y se le debe descontar la zona cónica del fondo del tanque.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

Para el cálculo de la profundidad del tanque se puede emplear el método gráfico que se presenta en la siguiente figura:

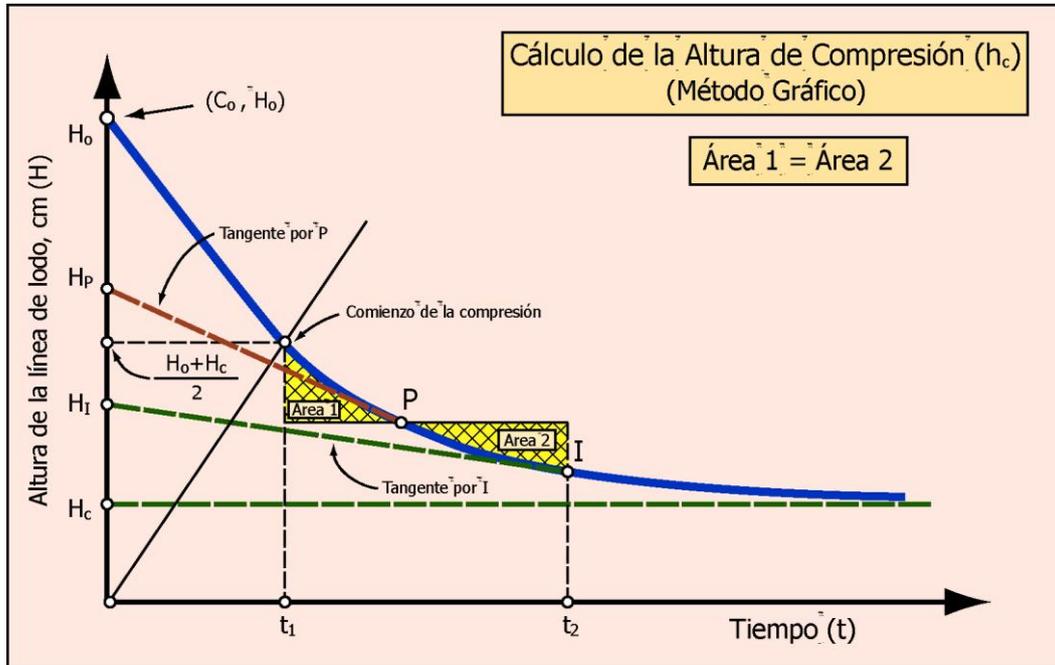


Fig.11.31: Determinación de  $h_c$ . Método gráfico.

Según la figura 11.31, con la igualación de áreas 1 y 2, se obtiene el punto P.

Tenemos que volumen total ( $V_T$ ) es:

$$V_T = \frac{1000 \cdot W}{C_P} \quad (l/h) \quad (Ec.11.12)$$

Donde:  $W$  (t/h);  $C_P$  (Kg/l) obtenida con la tangente a  $P$  (se obtiene el punto  $H_P$ ) y a través de la siguiente expresión:

$$C_P = \frac{C_o \cdot H_o}{H_P} \quad (Ec.11.13)$$

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

El volumen total de compresión ( $V_{TCP}$ ) viene dado por la siguiente ecuación:

$$V_{TCP} = V_T \cdot (t_2 - t_1) \quad (Ec.11.14)$$

y la altura de compresión por:

$$h_c = \frac{V_{TCP}}{A_{\text{espesador}}} < 1.5 \text{ m} \quad (Ec.11.15)$$

### Espesadores de Alta Capacidad.

Los espesadores de Alta capacidad (*high-capacity thickeners*), se tratan en algunos equipos de espesadores convencionales con modificaciones importantes (figura 11.32), normalmente presentan tubos de alimentación más grandes y profundos, además la alimentación suele introducirse en combinación con reactivos floculantes, consiguiendo bajar la superficie del espesador requerida para obtener una tonelada de sólido seco por día desde 0.5-0.9 m<sup>2</sup>, para un espesador convencional, a 0.3-0.6 m<sup>2</sup>.

Con la aparición de los floculantes sintéticos han aparecido equipos con los que se consiguen rendimientos de espesado mayores que con los equipos convencionales y necesitando menores superficies de sedimentación. Estos equipos caen dentro de las categorías de Alta Capacidad y de Alto Ratio (*High Rate*).

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

En los espesadores de Alta Capacidad se ha trabajado en el diseño del tubo de alimentación (*feedwell*) para que las partículas minerales sean floculadas y cuidadosamente mezcladas y posteriormente inyectadas de forma uniforme y radial a la zona de sedimentación obstaculizada (*hindered settling*).



**Bio-leach Thickeners, Ghana**

Fig.11.32: Espesadores Alto Ratio (Cortesía de Outokumpu).

En la figura 11.33 se muestra sistema para el auto mezclado de la pulpa con los floculantes a través de un inyector, previo a la entrada del tubo de alimentación (*feedwell*). Se trata de un dispositivo de Eimco Process denominado E-Duc Self-Diluting Feedwell.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

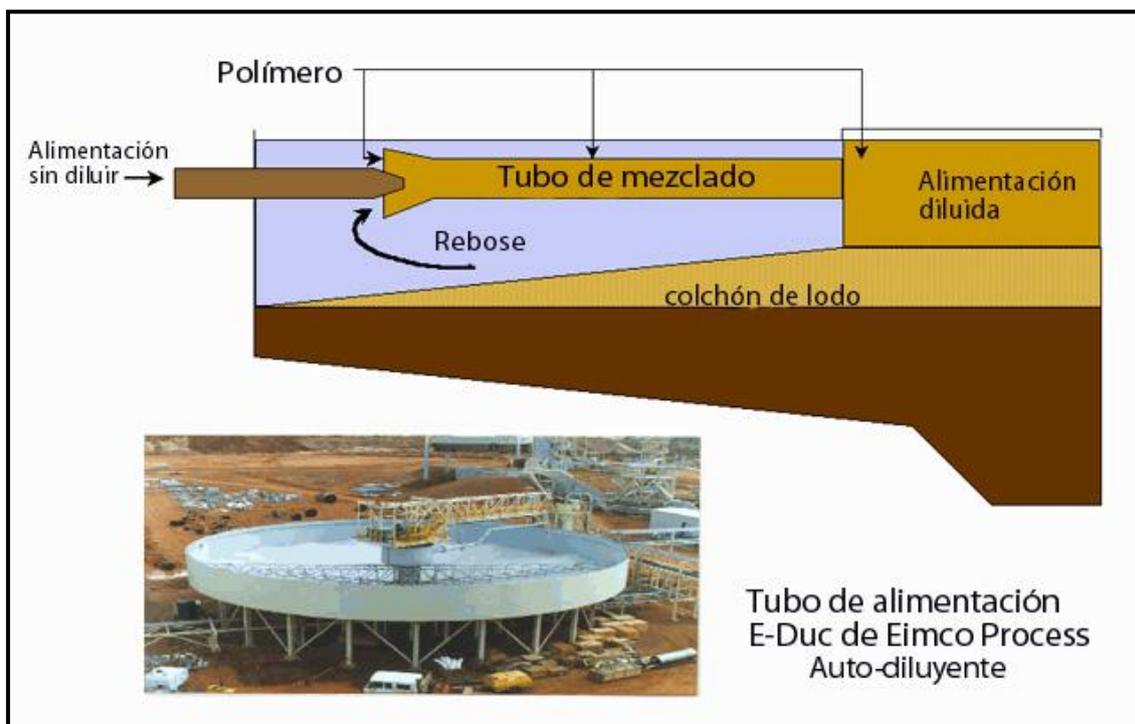


Fig.11.33: Sistema E-Duc Self-Diluting (Cortesía de Eimco Process).

Existen espesadores de alto ratio sin rastrillos que emplean tanques altos (deep tank) con el fondo muy inclinado formando un cono para obtener un lodo de alta densidad. Por lo tanto el objetivo de estos equipos será el obtener un hundido denso y un rebose perfectamente clarificado con el empleo de los floculantes. Un ejemplo de estos equipos es el espesador/clarificador E-CAT de Eimco Process (figura 11.34). Esta unidad ofrece un bajo tiempo de residencia de la pulpa dentro del tanque y requiere muy poco tiempo para alcanzar el nivel de operación (30 minutos). Estas unidades trabajan en proceso continuo por lo que no se pueden emplear como unidades intermedias de almacenamiento. Al no disponer de rastrillo las hace como unidades mecánicamente muy simples.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

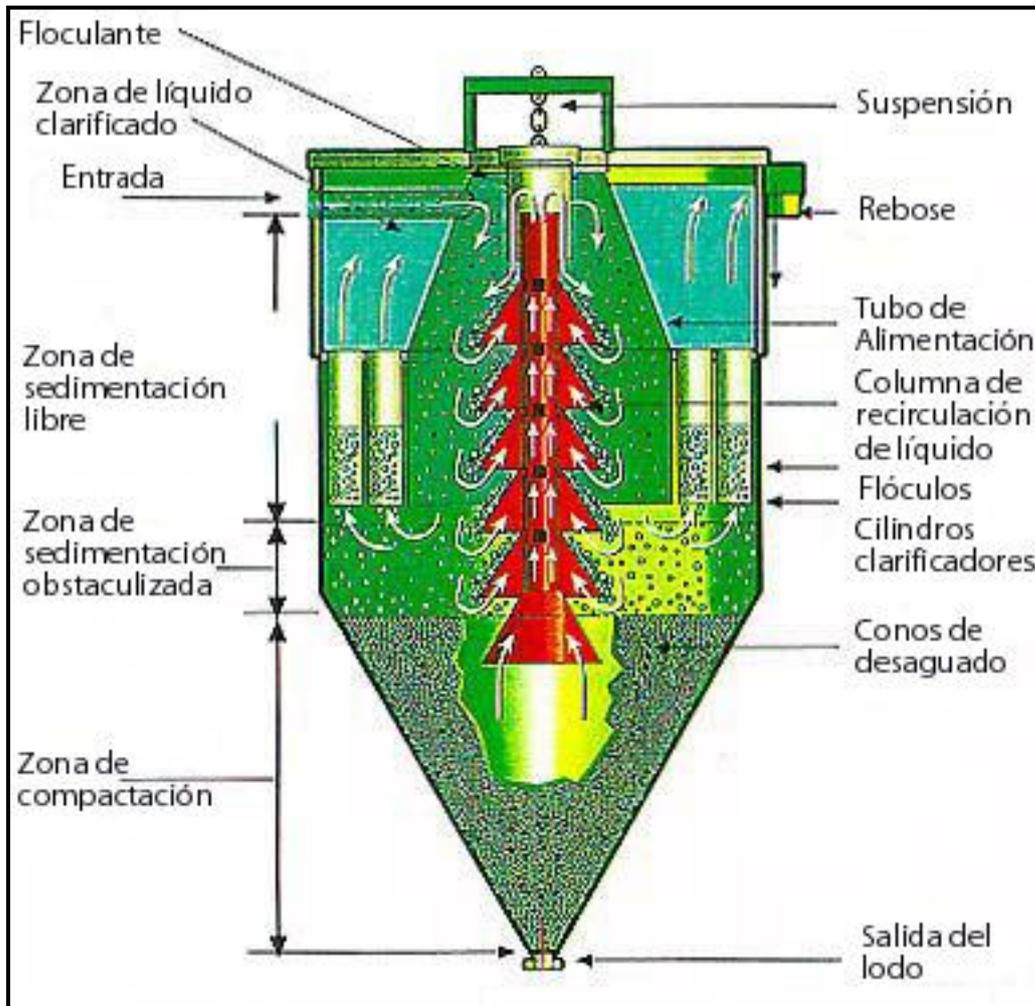


Fig.11.34: Espesador/clarificador E-Cat (Cortesía de Eimco Process).

En la década de los 60 surgieron unos espesadores para la industria del carbón a raíz de los estudios llevados a cabo por la British Coal Board, este tipo de equipos consiste en tanques con forma de cono invertido (figura 11.35) que proporcionan un lodo final con una elevada cantidad de sólidos, 65-70 % de sólidos en peso. Este hundido se descarga neumáticamente sobre una cinta transportadora a través de la salida inferior comandada por unos transductores de carga localizados sobre la pared del equipo. Dispone de unos agitadores que facilitan el

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

espesamiento de la pulpa girando a una velocidad de 2 rpm. Es necesario el empleo de floculantes que pueden ser añadidos directamente al canal de alimentación o bien prepararse previamente en tanques mezcladores. Se construyen con diámetros de cono comprendidos entre 3 y 3.7 m, manejando alimentaciones con un 5 % de sólidos en peso. En la actualidad han aparecido también otros equipos basados en este principio de funcionamiento como es el caso del *Deep Cone Paste Thickeners* y el *Hi-Tonnage Paste Thickener* de Eimco Process (grupo GLV).

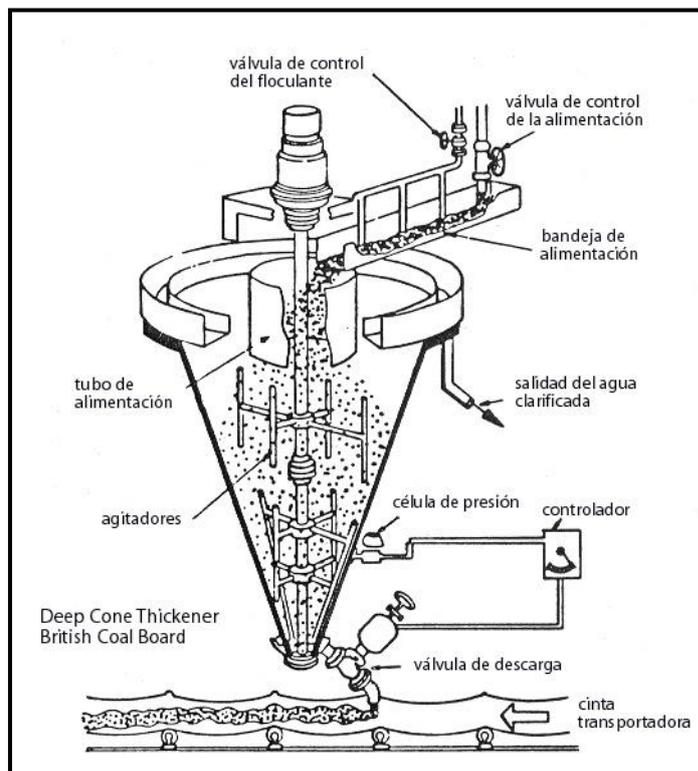


Fig.11.35: Espesador de cono NCB estándar (4 m). (Leonard and Hardinge, 1991).

Con estos equipos se obtiene un material que está en los límites de la bombeabilidad. Estas unidades manejan "colchones" de lodo con elevada altura con el fin de aprovechar las acciones de compresión que ayudan en la acción de desaguado. Aplicaciones de estos equipos son la

#### BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.

##### TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO

producción material de relleno en minería subterránea, tratamiento de lodos en la industria de alúmina, espesado de estériles de flotación de carbones, etc.

### Espesadores de Lamelas o de Placas.

Los espesadores de lamelas surgen como resultado de los estudios para obtener mayores rendimientos por unidad de área que los obtenidos con los espesadores convencionales, a través de multiplicar la superficie disponible para el asentamiento en un volumen reducido; gracias a la incorporación de placas inclinadas. Consiguiendo de este modo disminuir la superficie necesaria para la instalación.

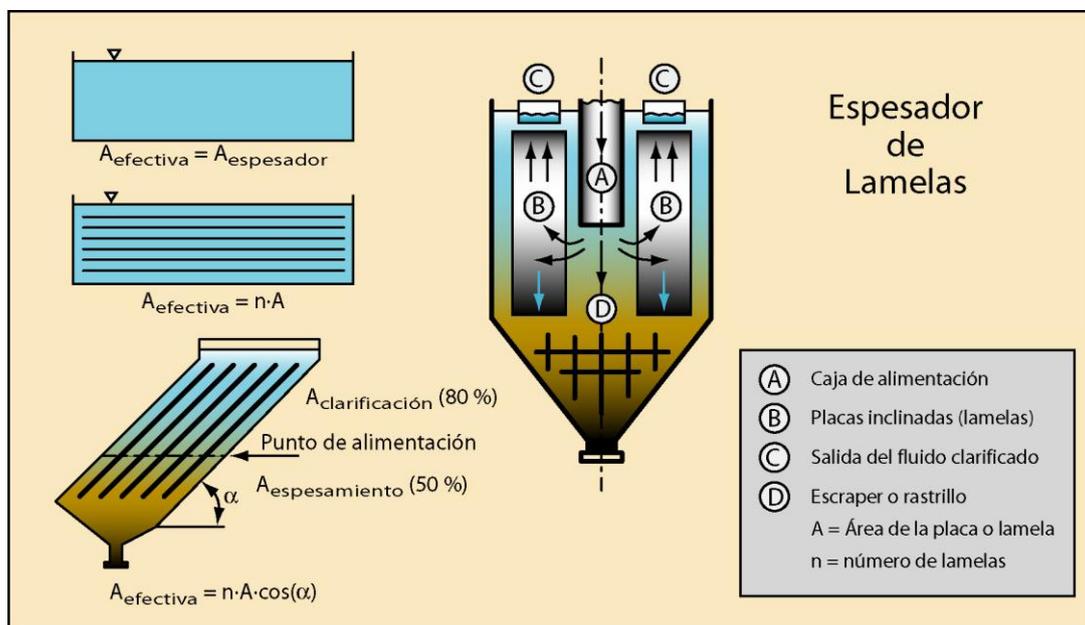


Fig.11.36: Principio de un espesador de lamelas.

Las placas inclinadas obligan a que los sólidos se deslicen a través de ellas haciendo que caigan dentro de la tolva inferior. Siendo el área efectiva del equipo la proyección horizontal de dichas lamelas (figura 11.36).

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

El área efectiva ( $A_{ef}$ ) de sedimentación viene dada por la siguiente expresión:

$$A_{efectiva} = n \cdot A \cdot \cos\alpha \quad (Ec.11.16)$$

Siendo:

- $n$ , número de lamelas.
- $A$ , área superficial de cada placa.
- $\alpha$ , ángulo entre la placa y el plano horizontal.

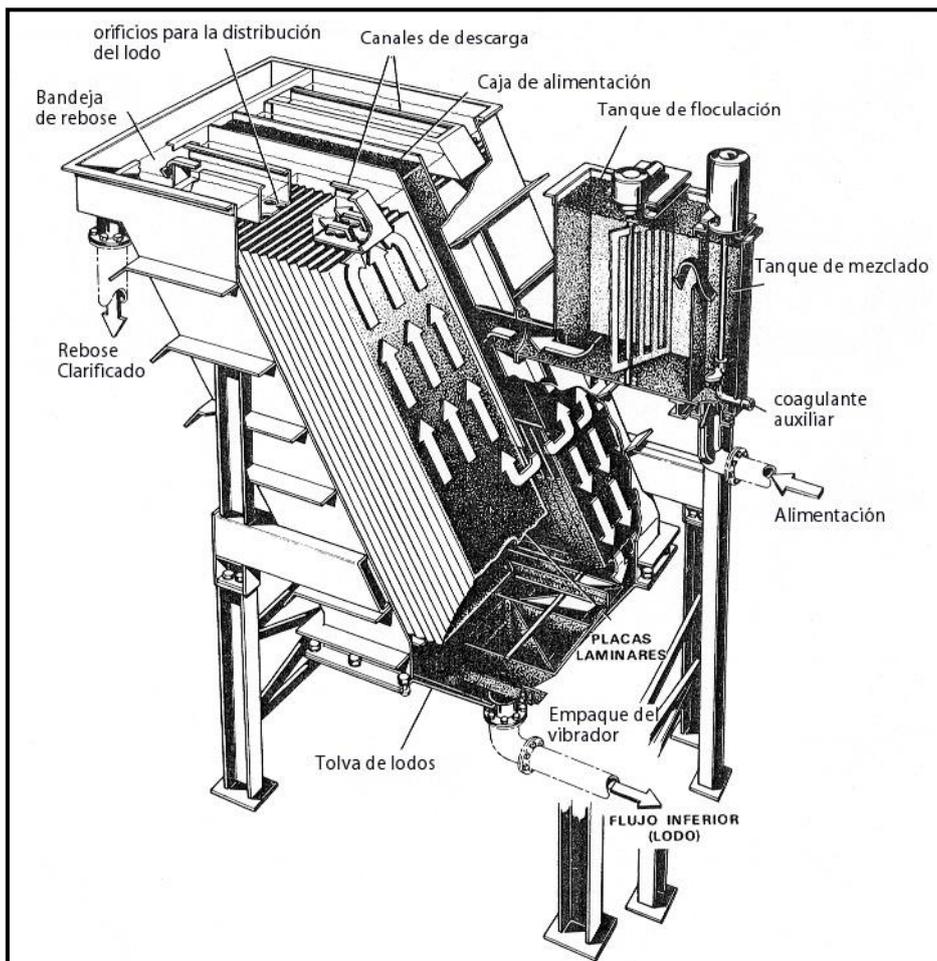


Fig.11.37: Espesador de lamelas con tanque de agitado (Leonard and Hardinge, 1991).

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

Estos equipos suelen disponer de vibración para someter al lodo hundido a compresiones que ayuden a la liberación del fluido y a facilitar su salida inferior. Un equipo de este tipo (figura 11.37) de 7.8 m de ancho puede llevar a cabo la sedimentación equivalente a un espesador convencional de 22.5 m de diámetro.

*Metso Minerals* suministra tanques circulares (Combi LTC) en los que se instalan grupos de placas inclinadas para mejorar la sedimentación y aumentar la capacidad de almacenamiento con diámetros de 25 metros (figura 11.38).

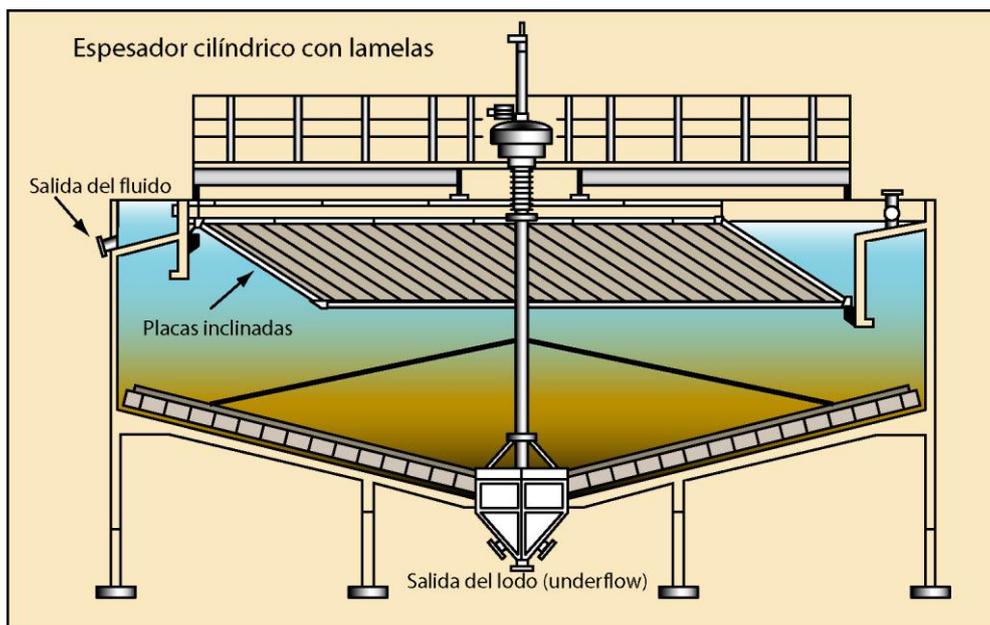


Fig.11.38: Espesador cilíndrico con placas inclinadas.

*Eimco Process* posee el **Delta-Stak**, que emplea un diseño particular pero basado en las placas inclinadas dando lugar a un equipo muy compacto con requerimientos de espacio inferiores a los exigidos por los equipos vistos anteriormente. Este equipo se emplea para

#### **BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

##### **TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

clarificar aguas que contienen partículas de caliza, mármol, etc., entre otras industrias de procesamiento de minerales.

### **11.3. Centrifugación.**

En operaciones de separación sólido-líquido en general, y en el proceso de desaguado en particular, cuando el tamaño de las partículas es demasiado pequeño (micras), se hace interesante aprovechar los altos ratios de sedimentación que se obtienen aplicando la acción de la fuerza centrífuga junto con la acción gravitatoria.

Por ello, se han desarrollado equipos centrífugos para poder realizar separaciones centrífugas. Las separaciones centrífugas han sido empleadas de una manera muy común en alguna etapa concreta dentro de los procesos de minerales. Aunque en este capítulo tratamos el desaguado mecánico también es adecuado presentar otras funciones que realizan las centrífugas describiéndolas brevemente:

Clarificación: La fase líquida será el producto que deberá estar libre de sólidos para su reutilización o descarga final. La concentración de sólidos dentro del fluido debe estar por debajo de unos límites previamente establecidos por regulaciones ambientales.

Clasificación: La fracción de sólidos más pequeños es el producto que interesa separar de las partículas más gruesas o viceversa.

“Degritting”: Eliminación de sobretamaños, tales como partículas de 25  $\mu\text{m}$ , 45  $\mu\text{m}$ , etc y/o partículas

#### **BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

##### **TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

extrañas de diferente densidad comparada con la densidad de las partículas que se encuentran en la corriente del proceso.

Desaguado (“dewatering”): la humedad de la costra (“cake”) necesita minimizarse para alcanzar los requerimientos de procesos posteriores (producto acabado, purificación, etc).

Lavado (“washing”): La costra debe lavarse con solventes adecuados o líquido (agua) de lavado para conseguir un producto limpio.

Desaguado seguido con formación de pulpa nuevamente (“reslurrying”): Cuando las partículas de la pulpa son demasiado pequeñas (5-10  $\mu\text{m}$ ) y se quiere una costra lavada y limpia, primero se realiza un desaguado y posteriormente se forma de nuevo la pulpa, haciéndolo por etapas.

Actualmente y debido a los avances técnicos conseguidos con las centrífugas en los últimos años y al mejor conocimiento que se tiene del proceso de separación que ocurre dentro de los equipos han hecho que se construyan equipos que dan productos de elevada calidad con altos rendimientos y bajos consumos de energía. Las centrífugas se emplean para desaguar materiales que varían desde 37.5 mm hasta cerca de 0 mm en tamaño.

#### *Teoría*

El comportamiento de sedimentación de una suspensión puede ser clasificado en cuatro categorías de acuerdo a la concentración de sólidos que hay en la suspensión y al grado de floculación que presentan las

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

partículas. La siguiente figura 11.39 muestra estas zonas que se basa en el diagrama de Fitch modificado. Para concentraciones diluidas y con un bajo grado de floculación las partículas sedimentan de forma individual sin interactuar con las otras partículas, siguiendo la ley de Stokes de sedimentación libre para una partícula esférica aislada dentro de un fluido.

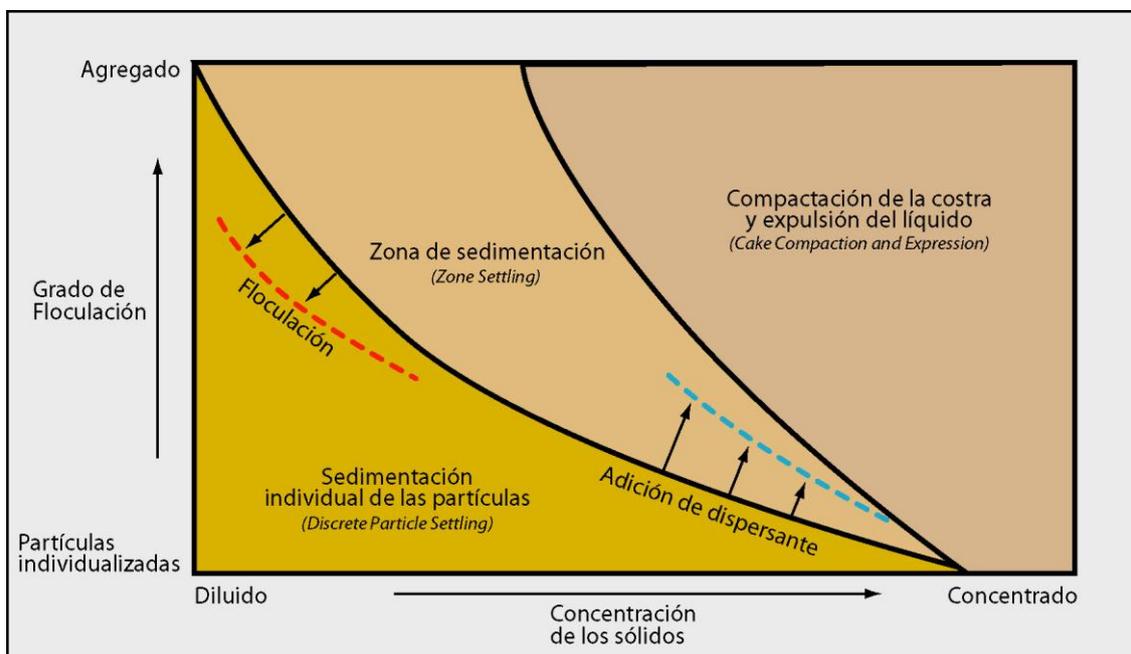


Fig.11.39: Diferentes zonas de sedimentación.

Cuando la concentración de sólidos aumenta, la velocidad de sedimentación se ve afectada por las partículas próximas aunque no exista contacto entre ellas. La velocidad de sedimentación en este caso será menor, o incluso mayor, que la velocidad obtenida con la ley de Stokes.

Existe una concentración de partículas dada en la que las partículas tienden a formar agregados, debido a la debilidad de la repulsión eléctrica, estos agregados sedimentarán en forma de flóculos permitiendo sedimentar

#### BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.

##### TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO

a las partículas grandes y pequeñas a la misma velocidad es la *zona de sedimentación*. Con la adición de coagulantes o floculantes se fomenta la formación de agregados o flóculos lo cual hace adelantar la zona de sedimentación (ver figura 11.39), este efecto interesará en aplicaciones de clarificación. Por el contrario, con la adición de dispersantes se conseguirá que la *zona de sedimentación discreta* invada la *zona de compactación* donde predominan condiciones de sedimentación obstaculizada, este efecto interesará en aplicaciones de clasificación de partículas finas con alto valor.

Por último, cuando la concentración de partículas es elevada y el grado de floculación alto, se forma una costra densa que va a estar sometida a acciones de compresión debidas a su propia masa facilitando la liberación del líquido que se encuentre entre las partículas.

Según la ley de Stokes, la velocidad sedimentación de una partícula dentro de un fluido viscoso bajo una aceleración centrífuga,  $G$ , viene dada por la siguiente expresión:

$$v_t = \frac{\Delta\rho \cdot G \cdot d^2}{18 \cdot \mu} \cdot \lambda(\phi) \quad (\text{Ec.11.17})$$

Donde:

- $\Delta\rho$ , diferencia de densidad entre sólido y líquido ( $\text{Kg/m}^3$ ).
- $d$ , diámetro equivalente de la partícula ( $\mu\text{m}$ ).
- $\phi$ , fracción de sólidos en volumen.
- $\lambda(\phi)$ , función de sedimentación obstaculizada.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

- Para suspensiones diluidas donde se cumple que:  $\phi \ll 1$  (100 %),  $\lambda(\phi) = (1-2.5\cdot\phi) = 1$ , (ecuación de Einstein)
- Para pulpas concentradas donde:  $\phi < 1$  (100%),  $\lambda(\phi) = (1-\phi^{4.5})$ , (ecuación de Richardson y Zaki).
- $\mu$ , viscosidad del líquido (centipoises,cp).
- $G$ , aceleración centrífuga ( $m/s^2$ ).

La aceleración centrífuga,  $G$ , expresada como el nº de veces que una centrífuga supera la aceleración gravitatoria ( $g$ ), puede ser calculada a partir de la siguiente expresión:

$$G's = \frac{G}{g} = 5.59 \cdot 10^{-7} \cdot N^2 \cdot D \quad (Ec.11.18)$$

$N$ , velocidad de rotación de la máquina, rpm;  $D$ , diámetro del tazón (bowl), mm.

*Tipos de Centrífugas*

Hay dos grandes tipos de centrífugas: las centrífugas horizontales de tipo “tazón” (“*bowl type*”) y las centrífugas horizontales y verticales tipo “canasta” (“*basket type*”). Dentro de cada grupo existen diferentes diseños y variaciones, algunos de los cuales vamos a describir a continuación.

**Centrífugas de tazón sólido o decantadoras (“*Solid Bowl Centrifuges*” o “*Decanter*”)**

Son los equipos más versátiles de todas las centrífugas, consisten en dos elementos giratorios. El

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

elemento giratorio externo es el tazón sólido con forma troncocónica alargada (ver figura 11.40) y montado en su interior va el elemento giratorio interno consistente en un transportador de tornillo helicoidal cuya forma se ajusta a la geometría interna del tazón.

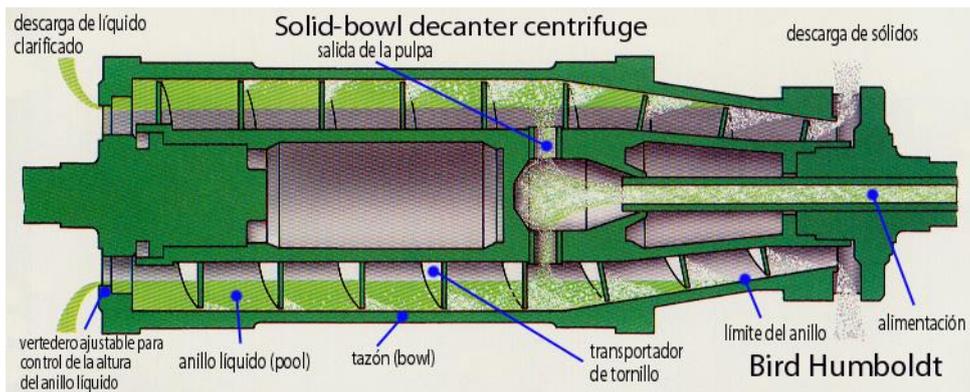


Fig.11.40: Corte una giratoria tipo tazón sólido (Cortesía Bird Humboldt).

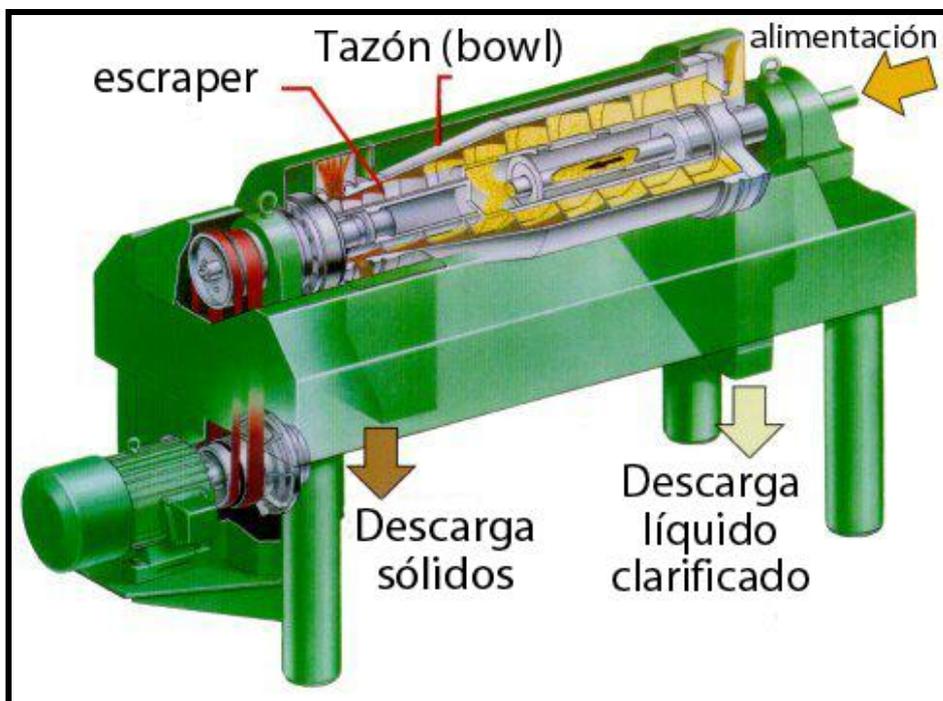


Fig.11.41: Dispositivo mecánico de giro de una giratoria de tazón (Cortesía Bird Humboldt).

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

El transportador girará a una velocidad ligeramente diferente a la del tazón gracias a sistemas de engranajes dentados y motores de frecuencia variable que permiten un control sobre la velocidad de giro de estos elementos (figura 11.41). Una vez introducida la alimentación dentro del tazón, las partículas sólidas se sedimentarán en la pared interna del tazón por efecto de la fuerza centrífuga de donde serán transportadas hasta su descarga por medio del transportador giratorio helicoidal. Al mismo tiempo, por el extremo de mayor diámetro, irá descargándose el fluido clarificado a través de un vertedero anular ajustable.

Este tipo de equipos se emplean en el desaguado de las partículas finas de carbón ( $< 0.6$  mm), con recuperaciones de partículas por encima del 80 % y producciones desde 9 t/h a 27 t/h y con la posibilidad de añadir flocculantes y obteniendo humedades de la costra por debajo del 30 % dependiendo de la cantidad de partículas inferiores a 45  $\mu\text{m}$  en la alimentación. También se emplean en el desaguado de las colas de las sales potásicas, siendo la recuperación de las partículas sólidas del 85-90 %, con una humedad de la costra del 6-8 %. Otra aplicación de estos equipos es la recuperación de barita y eliminación de los sólidos indeseados (sílice, caliza, sólido ultrafinos, etc.) de los lodos procedentes de la perforación de sondeos. Además de estos ejemplos existe una gran variedad de sustancias orgánicas e inorgánicas que son procesadas con este tipo de centrífugas, algunas de las cuales son: sulfato cálcico hidratado (gypsum), arcilla, carnalita, calcita, carbonato cálcico, concentrados de flotación, óxido de hierro, fosfatos, bauxita, bentonita, etc.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

**Centrífugas de tazón-tamiz (“Screen Bowl Centrifuges”)**

Son similares en diseño y operación a las anteriores centrífugas (figura 11.42) excepto que incorporan un tazón para tamizado consistente en una fina malla de acero inoxidable, carburo de tungsteno o cerámica con una abertura de 200-300  $\mu\text{m}$ .

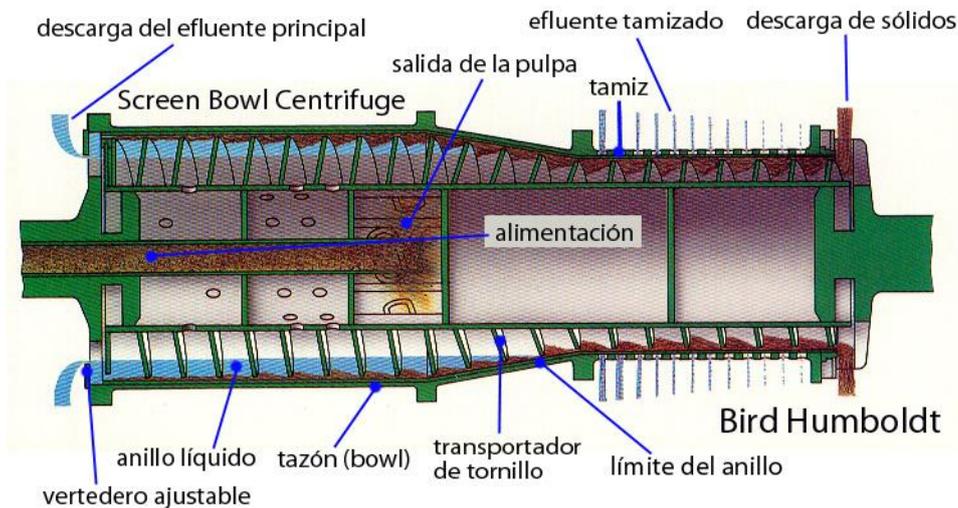


Fig.11.42: Centrífuga tipo tazón-tamiz (Cortesía de Bir Humboldt).

Una vez que las partículas de mayor densidad sedimentan frente al tazón debido a la fuerza centrífuga separándolas del líquido, el transportador helicoidal que se mueve a una velocidad ligeramente menor que la velocidad del tazón, transporta los sólidos hacia la sección de tamizado donde los sólidos se les somete a una etapa de filtración centrífuga consiguiendo una costra (cake) completamente desaguada y con la posibilidad de recircular el efluente tamizado para recuperar posibles

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

partículas de valor. También existe la posibilidad de incorporar sprays de lavado al comienzo del tamizado. Las principales aplicaciones son el tratamiento de partículas finas de carbón, desaguado de concentrados de la flotación del carbón, carbonato potásico, carbonato sódico, sales de cloruro sódico, etc., pudiendo tratar pulpas relativamente diluidas sin necesidad de procesos previos de espesado.

**Centrífugas tipo canasta perforada con transporte helicoidal** (“*Perforate-Basket Machines*” o “*Screen-Scroll Centrifuge*”)

Este tipo de centrífugas tienen una canasta giratoria con forma troncocónica que realizará el filtrado de la pulpa pudiendo ir montada en posición horizontal (figura 11.43) o en posición vertical (figura 11.44); en el interior de esta canasta va alojado un cono sólido giratorio sobre el que va enrollado el transportador helicoidal.

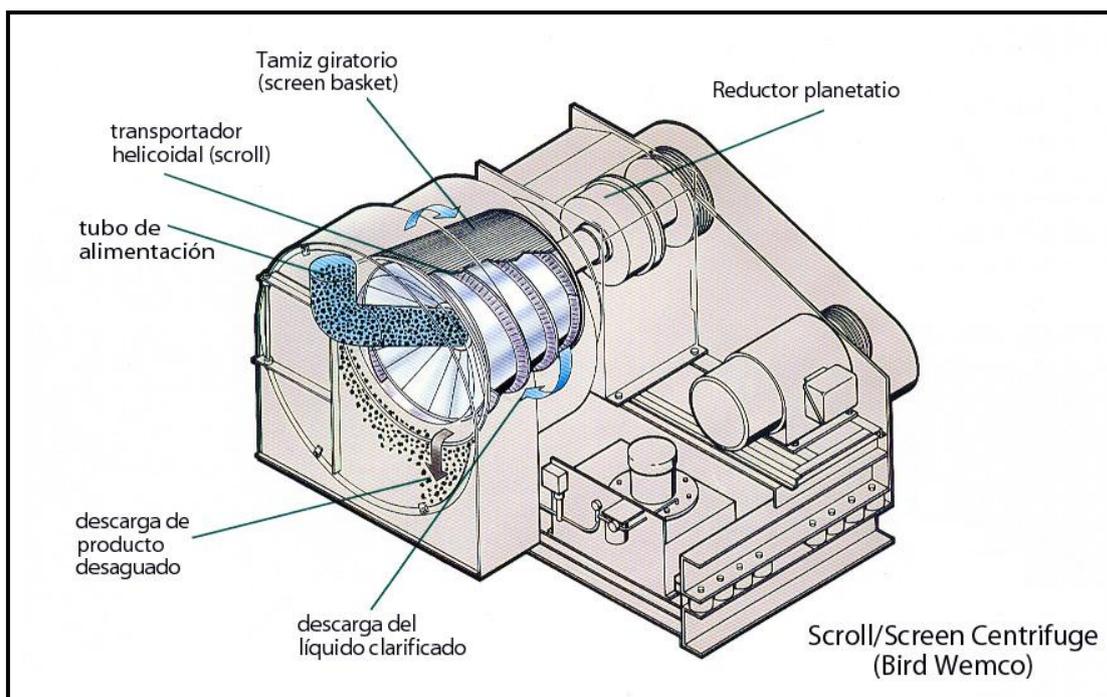


Fig.11.43: Centrífuga de canasta horizontal (cortesía de Bird Wemco).

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

El transportador helicoidal girará a una velocidad superior a la velocidad de giro de la canasta perforada. La pulpa es introducida sobre la canasta, donde comienza el proceso de filtrado bajo la acción centrífuga y la formación de la costra de partículas sólidas que serán transportadas por el transportador hacia su descarga. El fluido del filtrado se descarga por la salida de efluentes.

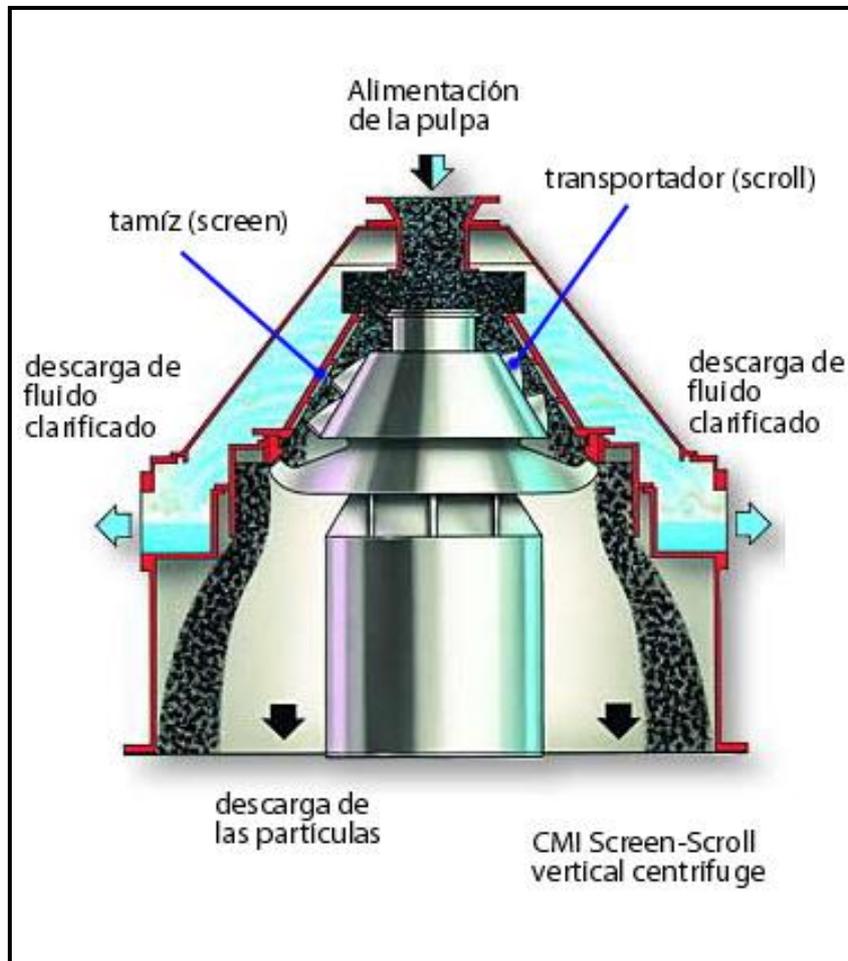


Fig.11.44: Centrífuga de canasta vertical (cortesía de CMI).

Las centrífugas de canasta horizontal operan a aceleraciones comprendidas entre 300-800g mientras que las centrífugas de canasta vertical trabajan con aceleraciones por debajo de 230g. Existe la posibilidad de

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

incorporar inyecciones de agua de lavado situados al comienzo de la zona de menor diámetro de la canasta. Aplicaciones típicas de estos equipos son el desaguado de carbones, tratamiento de sales (cloruro potásico, cloruro sódico), etc. Donde con humedades en la alimentación superiores al 40 % se obtienen productos desaguados con humedades inferiores al 10 %, dependiendo de la granulometría de las partículas, así como recuperaciones de los sólidos del 93 %.

**Centrífugas vibrantes tipo canasta perforada sin transporte helicoidal (“Vibrating Screen Centrifuge”)**

Este tipo de centrífugas tipo canasta no disponen de elementos transportadores tipo hélice helicoidal sino que están dotadas de un movimiento vibratorio generado por masas excéntricas que son movidas por un motor.

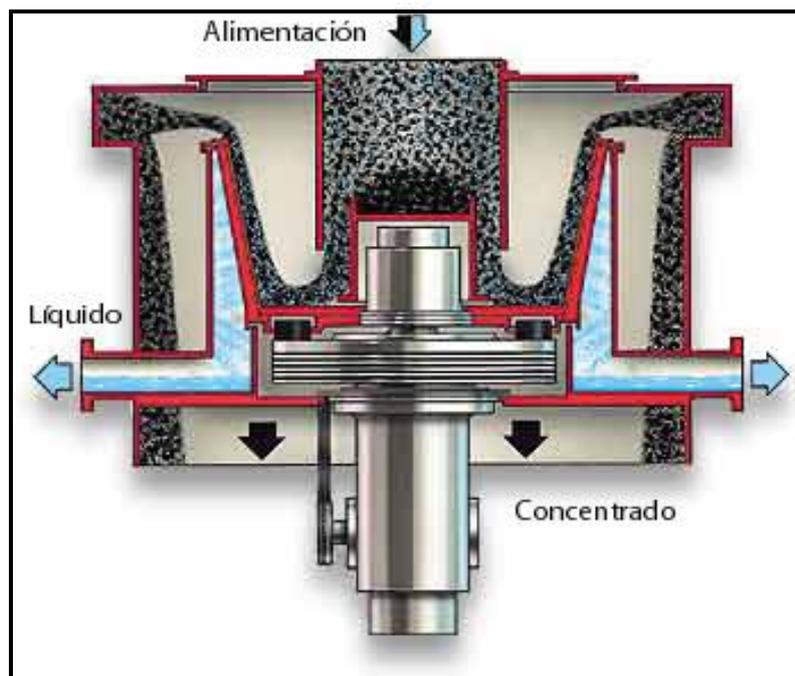


Fig.11.45: Centrífuga vibrante vertical (cortesía de CMI).

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

Esta vibración proporciona el movimiento de las partículas sobre la canasta perforada hasta su descarga al mismo tiempo que permite la expansión de las partículas ayudando a la liberación del fluido existente entre ellas con lo que mejora el proceso de desaguado (humedad inferior al 8 % en la descarga de sólidos).

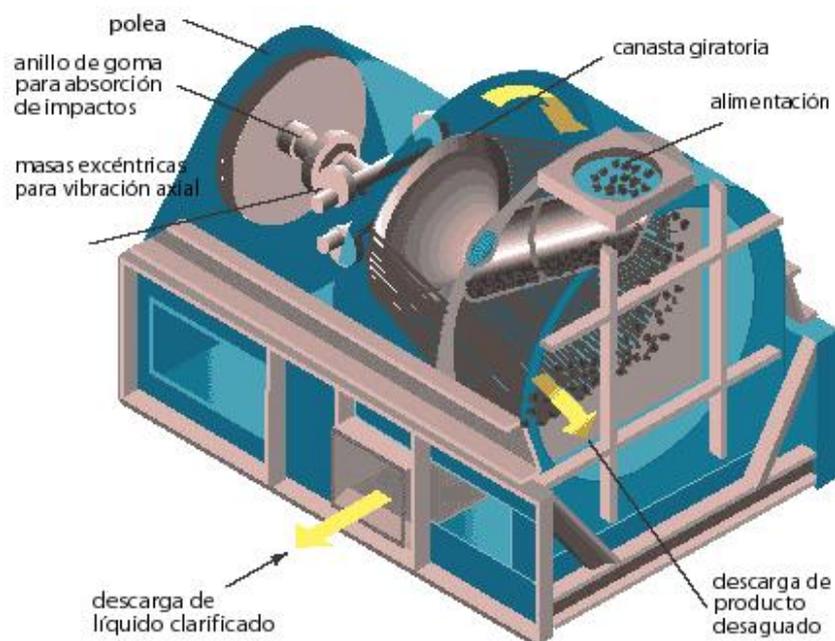


Fig.11.46: Centrífuga vibrante horizontal (cortesía de Bird Wemco).

Estos equipos suelen trabajar a 100g. También se emplean en la industria de procesamiento de carbón, arenas, sales, fosfatos, etc.

**Centrífugas horizontales con empuje hidráulico**  
*(“Pusher Centrifuge”)*

El fabricante de centrífugas Bird Machine Company fabrica este tipo de equipos (figura 11.47) donde se obtiene un producto sólido con una baja humedad. Estos

## **BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

### **TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

equipos constan de un sistema hidráulico que a través de acciones de avance y retroceso sobre la placa móvil genera que el material vaya avanzando sobre sucesivos tamices con forma cónica que aumentan en diámetro según se alejan de la placa móvil. Este equipo es idóneo para tratar materiales en los que se debe minimizar al máximo su degradación con el empleo de acciones centrífugas, pudiendo manejar materiales viscosos con producciones de hasta 70 t/h y humedades de la costra inferiores al 5 %. Se aplica en el procesado de carbonato sódico, cloruro potásico, cloruro sódico, etc.

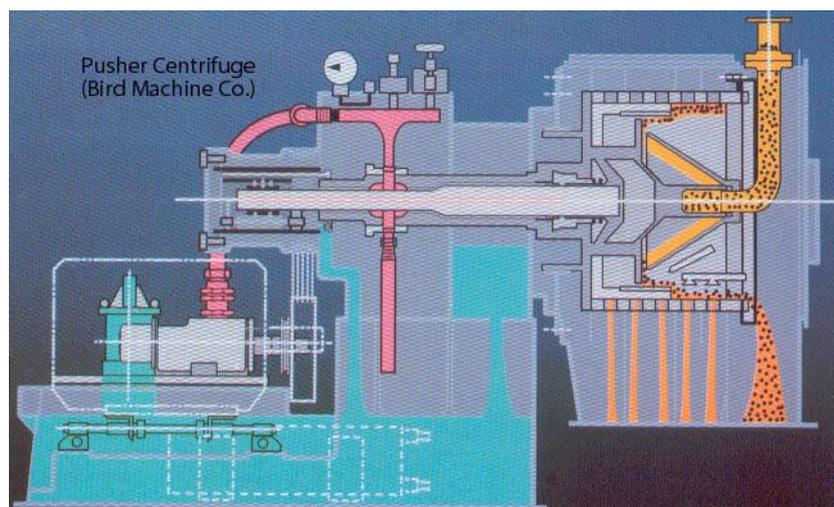


Fig.11.47: Centrífuga “Universal Puscher” (cortesía de Bird Machine Co).

## **11.4.Filtración.**

La separación mecánica de los sólidos a partir de los líquidos es a menudo la principal etapa final dentro de la industria de procesamiento de minerales. Normalmente

#### **BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

##### **TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

casi todos los productos de una planta de procesamiento pasan por la etapa de filtración, de ahí la importancia de la selección adecuada de estos equipos de filtrado. Las principales consideraciones en la selección de estos equipos serán las características de la alimentación y el objetivo final de los productos del proceso:

##### Características de la alimentación:

###### Pulpa:

- Porcentaje de sólidos en peso.
- Proceso continuo o discontinuo.

###### Líquido:

- pH.
- Composición química.
- Peso específico.
- Viscosidad.
- Temperatura y volatilidad.

###### Sólidos:

- Composición química.
- Peso específico en húmedo.
- Distribución granulométrica.
- Propiedades (abrasividad, fragilidad, etc.).

##### Objetivo final de los productos:

- Uso final de la costra (cake) y del líquido filtrado.
- Porcentaje de humedad residual de la costra.
- Condiciones de lavado de la costra.
- Condiciones de operación (toxicidad, olores, etc.).

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

La separación sólido-líquido por filtración requiere una presión diferencial,  $\Delta p$ , perpendicularmente a la costra de sólidos (cake). La diferencia de presión,  $\Delta p$ , requerida para eliminar el fluido de la costra puede ser determinada a través de la ley de Kelvin que cuantifica las fuerzas de capilaridad o diferencia de presión necesaria dentro de los poros intersticiales de una costra o torta de sólidos.

$$\Delta p = \frac{4 \cdot T \cdot \cos \theta}{D} \quad (\text{Ec.11.19})$$

Donde:

- $T$ , tensión superficial.
- $\theta$ , ángulo de contacto.
- $D$ , diámetro de poro.

La expresión anterior refleja que cuanto más pequeñas son las partículas mayores son las diferencias de presión que se deben aplicar para vencer las fuerzas de capilaridad y poder obtener una humedad final deseada de la costra. El tamaño de poro tiene una relación directa con la distribución granulométrica ( $D_{80}$  y  $D_{10}$ ) del material que va a ser desaguado.

Además de la expresión anterior, en el proceso de filtración interesa saber la cantidad de torta que se forma sobre una superficie unitaria del filtro en la unidad de tiempo,  $W/\theta_f$ , para seleccionar y dimensionar la unidad de filtración adecuada, la mencionada expresión se obtiene como resultado de la derivación de la ecuación de

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

Poiseuille, ambas ecuaciones se presentan a continuación en su forma definitiva:

$$\frac{dV}{A \cdot d\theta_f} = \frac{\Delta p}{\mu \left[ \frac{\alpha \cdot c \cdot V}{A} \right]} \quad (\text{Ec.11.20})$$

y a partir de la ecuación de Poiseuille se obtendría:

$$\frac{W}{\theta_f} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p \cdot \rho}{\mu \cdot \alpha \cdot \theta_f} \left[ \frac{S}{1 - \frac{S}{S_c}} \right]} \quad (\text{Ec.11.21})$$

Con la siguiente notación:

$\theta_f$  = tiempo de formación de la torta.

$V$  = volumen del filtrado.

$\mu$  = viscosidad del fluido.

$A$  = área de filtración.

$\Delta p$  = diferencia de presión transversalmente a la torta.

$\alpha$  = resistencia media específica a la filtración.

$c$  = concentración de sólidos en la pulpa.

$W$  = peso de sólido seco en la torta por unidad de área.

$\rho$  = densidad del fluido.

$S$  = fracción en peso de sólidos en la pulpa.

$S_c$  = fracción en peso de sólidos en la torta.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

Siendo la fracción en peso de los sólidos en la pulpa de alimentación al filtro, S:

$$S = \frac{\text{Peso de los sólidos}}{\text{Peso de los sólidos} + \text{Peso del líquido}}$$

y la fracción en peso de los sólidos en la torta formada pero sin desaguar,  $S_c$ :

$$S_c = \frac{\text{Peso de los sólidos}}{\text{Peso de la pulpa} - \text{Peso del filtrado}}$$

Por otro lado, la concentración de sólidos en la pulpa de alimentación al filtro, c, viene dada por:

$$c = \frac{\text{Peso de los sólidos}}{\text{Volumen del filtrado}}$$

Para aplicaciones de desaguado de minerales que sólo requieran diferencias de presión menores de **1 bar**, se emplearán los métodos de filtración por vacío, mientras que en aplicaciones donde los requerimientos superen **1 bar** de presión diferencial, los métodos de filtración por presión en cualquiera de sus variantes serán los que se seleccionarán. En la actualidad, los productos del concentrado de minerales y de colas generalmente tienen un  $D_{80}$  de 40  $\mu\text{m}$  o menor por lo que los filtros de presión

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

cada día juegan un papel más importante en el procesamiento de minerales.

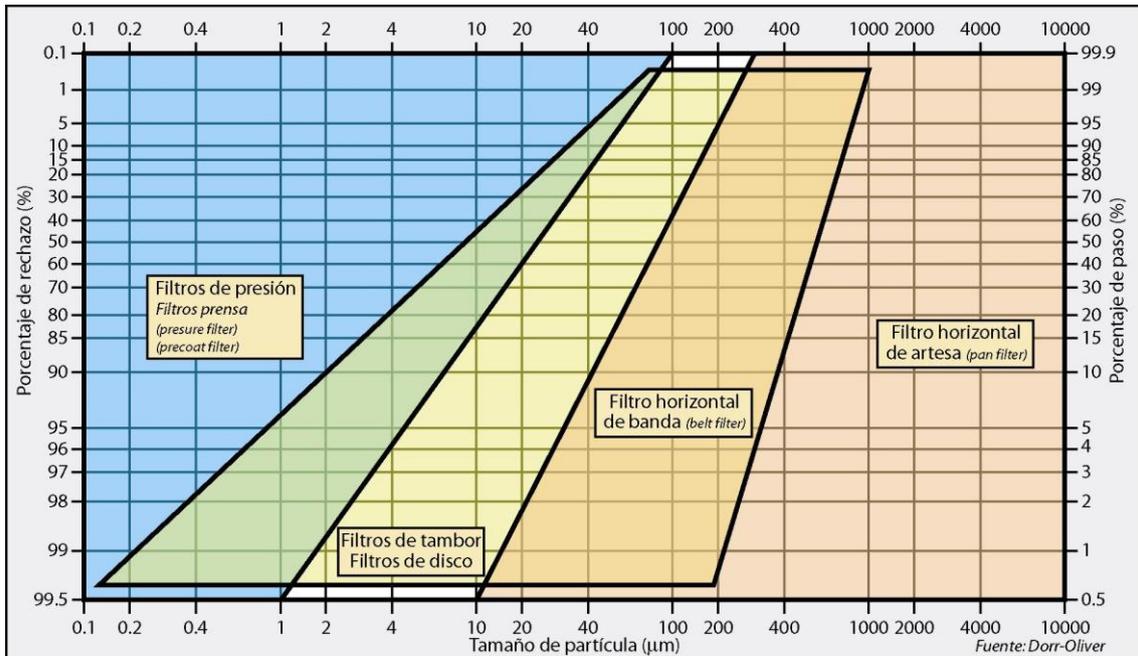


Fig.11.48: selección de filtros en función de la granulometría.

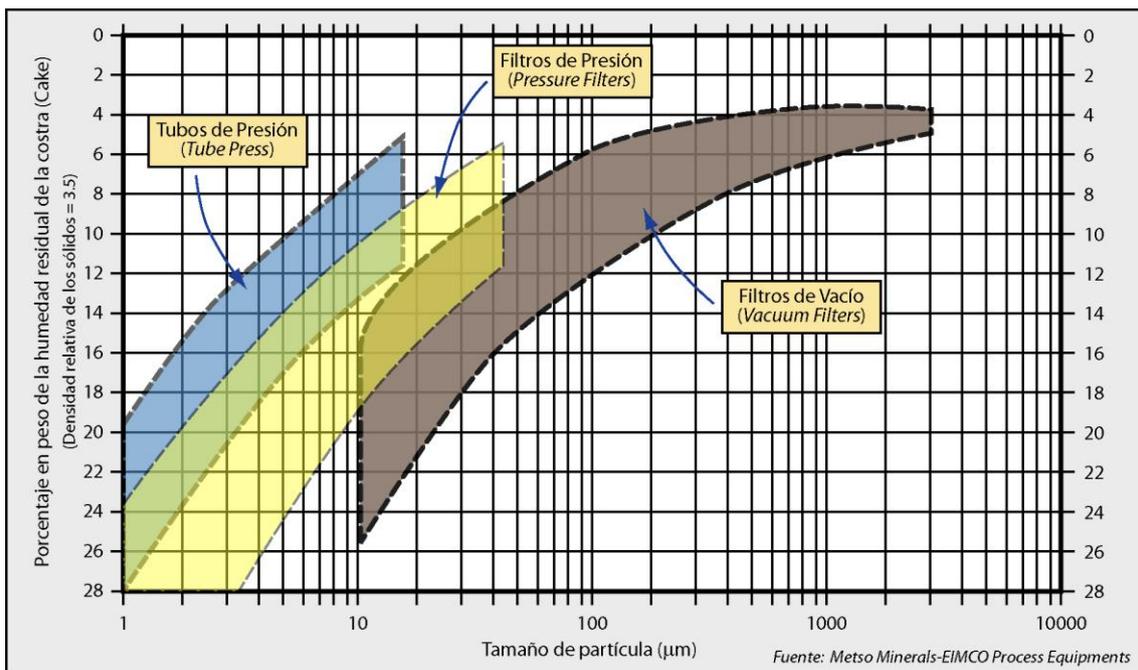


Fig.11.49: Selección de filtros en función de la humedad residual.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

En las figuras anteriores se muestran unas gráficas que presentan las regiones donde los diferentes equipos de filtrado trabajan en función del tamaño de partícula, la distribución granulométrica de los sólidos y la humedad residual de la costra (figuras 11.48 y 11.49).

**Filtración por Vacío.**

La filtración por vacío es una técnica perfectamente establecida en el desaguado industrial. Todos los filtros de vacío trabajan de forma muy similar. Dentro de un tanque de pulpa, se aplica una presión diferencial a través del vacío entre la superficie filtrante y la cara interna del tambor, disco o banda. Esta diferencia de presión provocará que el fluido sea transportado a través del medio filtrante al mismo tiempo que las partículas sólidas son retenidas por la superficie filtrante formando la costra o torta (cake). En aquellas unidades giratorias, la costra será elevada por encima del nivel de la pulpa permitiendo que el aire entre a través de la costra forzando de esta manera a salir al líquido remanente a través de redes de tuberías internas hasta los depósitos de fluido de filtrado.

**Filtros de Tambor (“*Drum Filters*”)**

Estas unidades tienen un amplio rango de aplicaciones y son seleccionadas allí donde se requiere en la costra una mínima humedad residual o bien se necesita un lavado efectivo de la costra.

#### BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.

##### TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO

El tambor es giratorio dentro de un tanque de pulpa que está en continua agitación. Sobre la superficie del tambor se montan rejillas de drenaje fabricadas en secciones y en cada una de las mismas se montan tuberías que aplican el vacío a cada sección (ver figura 11.50). Disponiendo de la válvula de distribución se permitirá cambiar la proporción de las regiones de formación de la costra, lavado, secado y descarga de la misma.

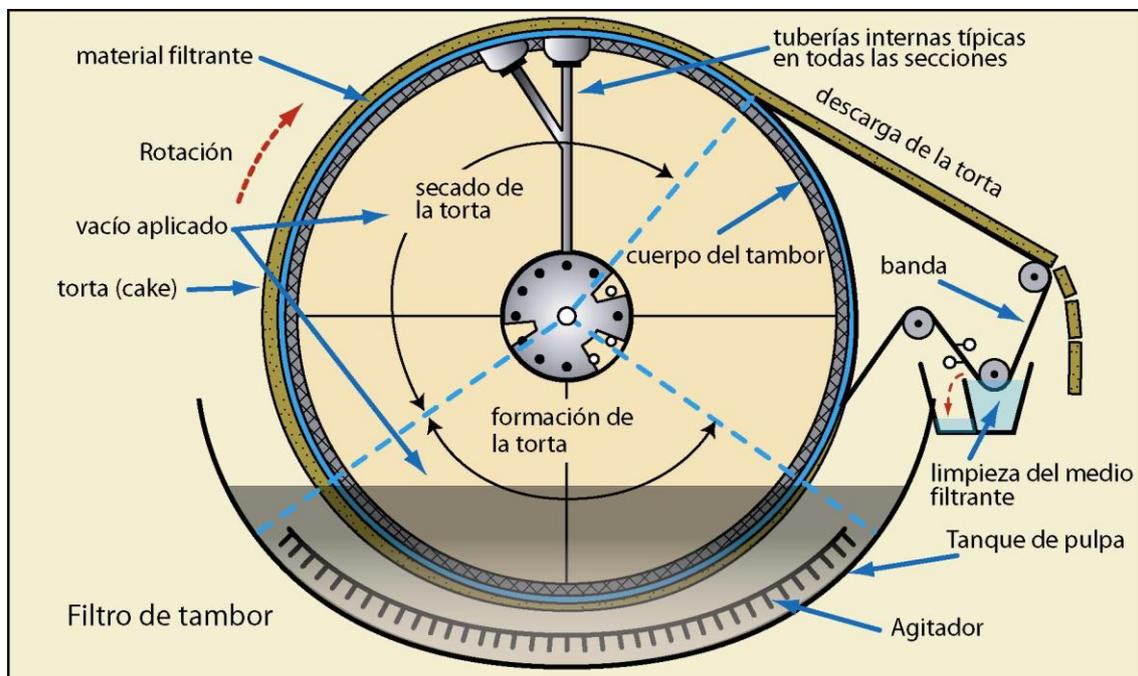


Fig.11.50: Representación esquemática de un filtro de tambor.

Los filtros de tambor ofrecen una gran flexibilidad en el manejo de una ancha variedad de sustancias y de tamaños de partícula ( $D_{80}$ ) a través de la modificación de los puntos de alimentación y del sistema de descarga de la torta.

En operaciones con pulpas de partículas gruesas debería considerarse la alimentación de la pulpa por la

#### **BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

##### **TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

parte superior para provocar la segregación de las partículas gruesas que serían las que primero formarían la torta sobre la tela filtrante con una elevada permeabilidad.



Fig.11.51: Filtro de tambor Dorr-Oliver.

El tipo de descarga seleccionado para el filtro de tambor va a depender de las características del material que se va a manejar (tendencia a cegar la tela filtrante, contenido de partículas fibrosas, etc) y de los requerimientos de clarificación del filtrado. Los tipos de descarga más comunes son:

Descarga por rascador (“*scraper discharge*”): Este tipo de descarga consiste en una cuchilla de rascado situada sobre la superficie del tambor. Durante el ciclo de descarga se emplean un soplado a baja presión de aire para soltar la torta de la tela filtrante y así ser fácilmente descargada por el rascador. Este tipo de descarga no debe emplearse en materiales con tendencia a cegar e incrustarse sobre la tela filtrante.

Descarga por banda saliente (“*belt discharge*”): En aplicaciones donde el cegamiento de la tela va a ser un problema este método de descarga puede ser una solución.

#### **BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

##### **TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

En este sistema la tela filtrante se separa del tambor a partir de la zona de desaguado. La torta es descargada gracias a rodillos de pequeño diámetro que rompen la torta y la tela filtrante es lavada completamente a través de chorros de alta presión, tanto en su cara superior como en su cara inferior (ver figura 11.50).

Descarga por rodillo (“*roll discharge*”): Este tipo de descarga se emplea en la industria de las arcillas donde el material tiene tendencia a incrustarse en la tela y hay dificultad para separarlo. En este caso se emplea un rodillo flotante que gira a una velocidad mayor que el tambor y sobre el cual se adherirá la torta que será descargada gracias al empleo de rascadores.

Descarga con el empleo de cuerdas (“*string discharge*”): Se emplean cuerdas o cadenas paralelas y separadas unos 10 mm entre sí y que envuelven al tambor y ayudarán a separar a la torta del tambor para posteriormente ser descargada a través de un juego de rodillos, evitando la separación de la tela del tambor. Se emplea en pulpas de materiales muy fibrosos.

Con precapa (“*precoat*”): Este tipo de filtros se emplea en el filtrado de sólidos que se encuentra en la pulpa en muy poca cantidad y no son capaces de producir una torta de espesor suficiente para ser descargada a través de los otros mecanismos. El filtro es cubierto por una precapa basada en tierras de diatomeas, perlita o celulosa, manteniendo el tambor en vacío en su ciclo completo. Una cuchilla cortará la superficie de la precapa descargando las partículas que se han adherido a la misma. La precapa

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

actúa como filtro y da lugar a filtrados con contenidos muy bajos de sólidos.

**Filtros de Disco (“Disk Filters”)**

Su principio de funcionamiento es similar al del filtro de tambor; su diferencia radica en que su diseño de discos (ver figura 11.52) permite un mayor área de filtrado efectivo, por área ocupada de suelo de planta, frente a los filtros de tambor. Los discos también están formados por sectores individuales a los que se les aplica el vacío en ambas caras del disco a través de las cuales se recoge el filtrado por medio de tuberías internas. La torta es descargada gracias al empleo de rascadores y el empleo de soplado de aire. La desventaja de estos equipos es el no poder llevar a cabo un lavado eficiente de la torta en discos que emplean tela filtrante convencional



Fig.11.52: Filtro de disco (cortesía de Dorr-Oliver).

Actualmente existe una variante de estos equipos fabricada por Outokumpu Technologies Inc., donde los sectores del disco son cerámicos contruidos de una sola pieza y pueden ser mantenidos limpios a través del empleo de ultrasonidos y por medio del lavado interno de ácidos.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

Con estos equipos se consiguen humedades de la torta muy bajas, cercanas a las obtenidas con filtros de presión. El diseño de los sectores dirige el fluido a través de acciones de capilaridad disminuyendo los requerimientos de potencia exigidos en las bombas en comparación a los filtros de disco convencionales (figura 11.53). Se aplica fundamentalmente en el filtrado de concentrados minerales.

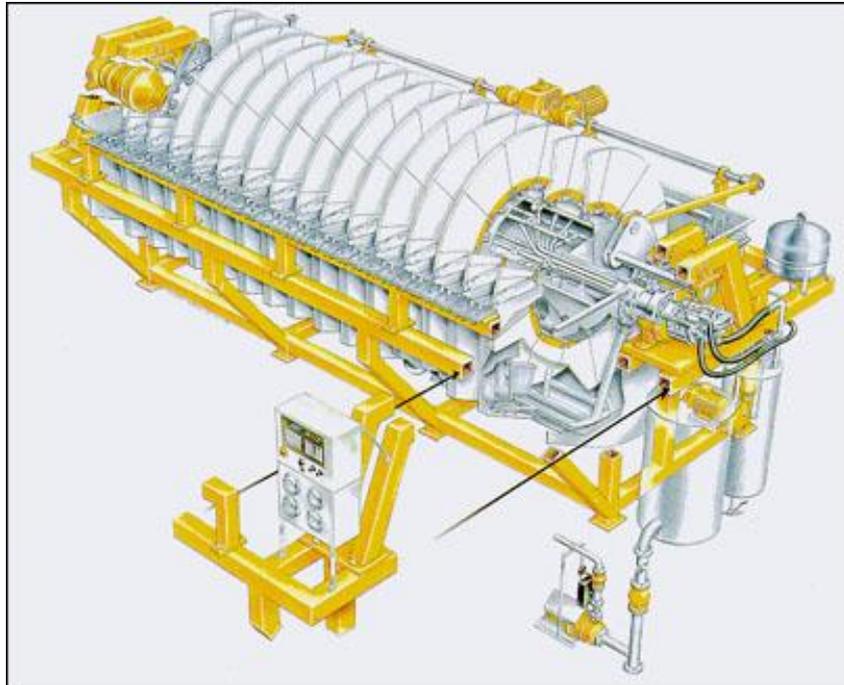


Fig.11.53: Filtro de disco CERAMEC (cortesía de Outokumpu).

**Filtros Horizontales de Banda** (*“Horizontal Belt Filters”*)

Estos filtros se emplean cuando se requiere lavados de la torta con altas eficiencias y/o se manejan pulpas de partículas gruesas. Con ellos se alcanzan humedades residuales de la costra tan bajas como las alcanzadas en los filtros anteriores. Se puede disponer de equipos de 4 m de

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

ancho de banda y de 120 m<sup>2</sup>. Estas unidades consisten básicamente en una banda de goma drenante soportada por rodillos y poleas que se desplaza sobre unas bandejas fijas en las que se ha creado el vacío para producir la presión diferencial. las bandejas estacionarias están unidas a la banda drenante por medio de una serie de bandas o tiras lubricadas de desgaste. El filtrado atravesará los agujeros de la banda, situados en su centro, la cual está ranurada para permitir el flujo del líquido a la parte central de la misma. La velocidad de la banda puede ser de 50 m/min.

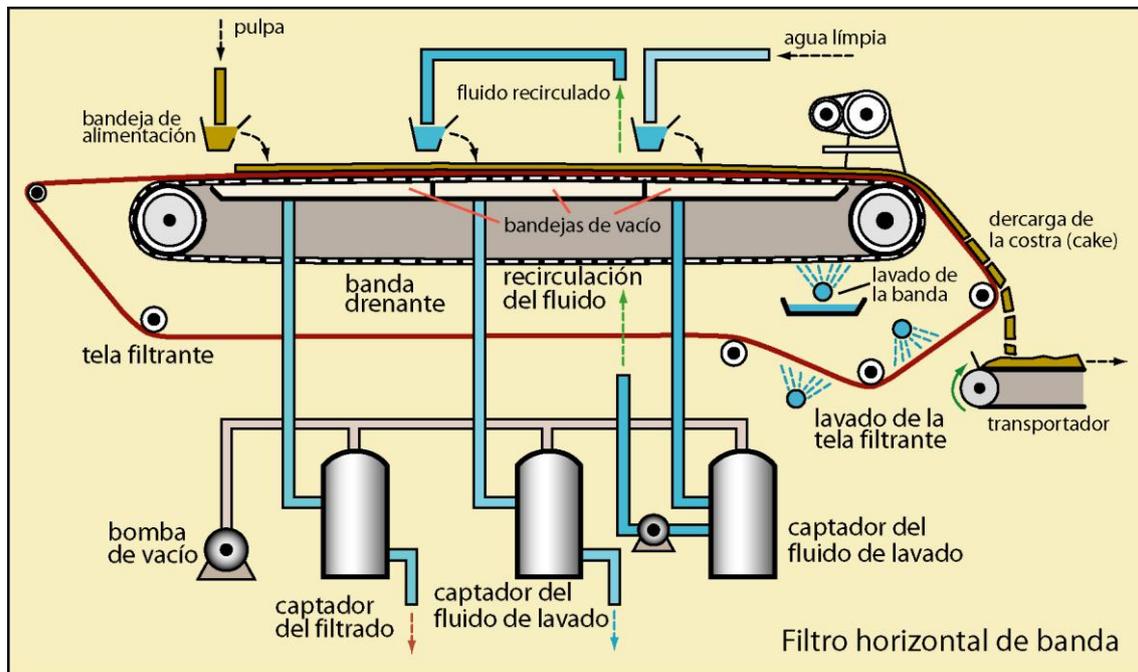


Fig.11.54: Representación esquemática de un filtro horizontal de banda.

Disponen de una tela filtrante que se traslada de forma independiente sobre la banda de goma, separándose de ella en la descarga de la torta y siendo lavada antes de volver al filtro de vacío. La artesa de vacío puede ser dividida en múltiples secciones cada una de las cuales con su propio

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

captador de fluido de filtrado. Cuando se quiere disminuir la humedad residual de la costra pueden instalarse sobre el filtro campanas de vapor.

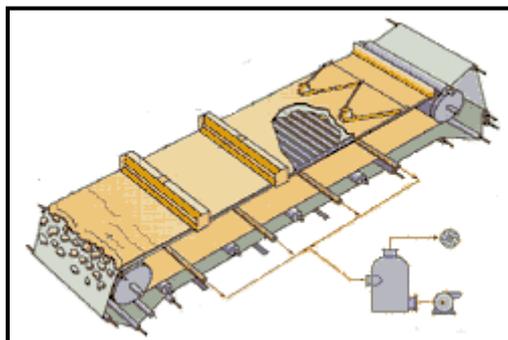


Fig.11.55: Filtro horizontal de banda Eimco Extractor.

Su aplicación es amplia en un extenso abanico de sustancias minerales incluyendo concentrados, carbón, minerales industriales, colas y aplicaciones de lavado.

**Filtros Horizontales de Bandeja Móvil (“Tray Filters”)**

Este equipo es un desarrollo relativamente nuevo en la industria del procesamiento de minerales y se diferencia del anterior en que prescinde de la banda de goma drenante y presenta una serie de bandejas móviles con movimiento de avance-retorno. Cuando está actuando la acción del vacío, la tela filtrante y las bandejas móviles se mueven a la misma velocidad. Al llegar, las bandejas móviles, al final de su carrera; éstas retornan rápidamente a su posición de inicio, mientras en este tiempo el vacío es desalojado y permitido airear las bandejas. A continuación se crea de nuevo el vacío en las bandejas y se comienza el ciclo.

## BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.

### TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO

Se encuentran en anchos de banda de hasta 3 m y longitudes de 25 m con superficies efectivas de filtrado de hasta 75 m<sup>2</sup>.

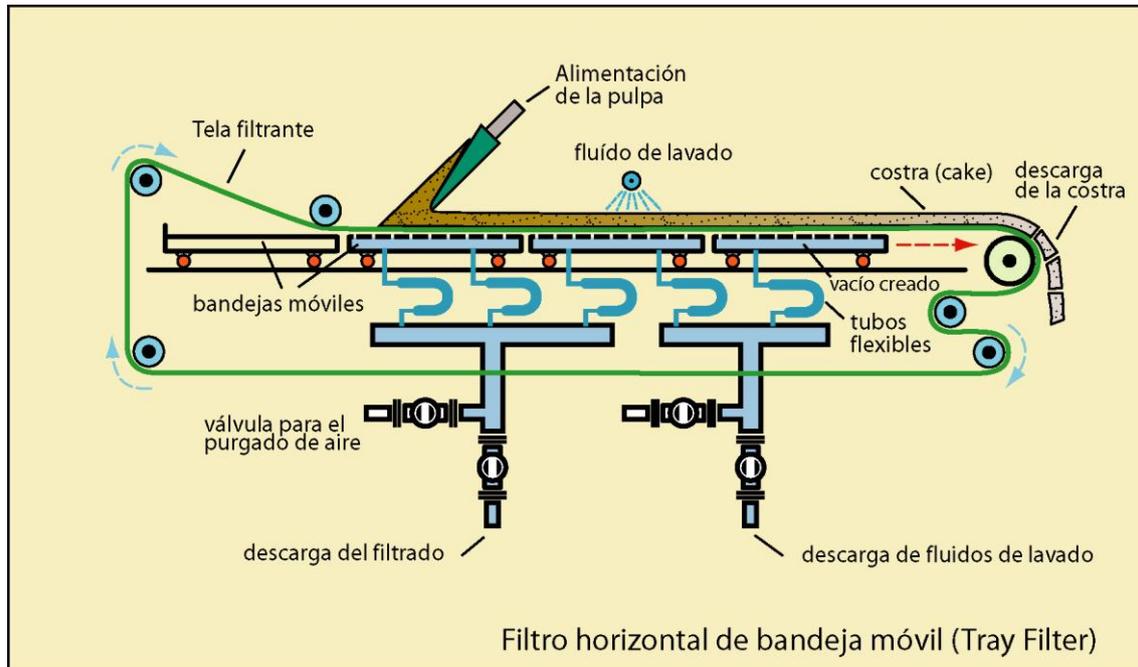


Fig.11.56: Filtro horizontal de bandeja móvil (cortesía de TEFSA).

Sus aplicaciones iniciales fueron el filtrado de compuestos químicos con tamaños muy pequeños de partícula y manejando tortas muy delgadas, pero en recientes años se presenta adecuado para el manejo de tortas de mayor espesor, incorporándose al procesamiento de minerales como Gypsum (sulfato cálcico hidratado), silicatos, sales de magnesio, sales y óxidos de metales, etc.

### Filtro Horizontal de Tablero o Artesa Circular (“Pan Filters”)

Esta unidad de filtrado es idónea para tratar pulpas de partículas relativamente gruesas (ver figura 11.48) donde

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

los sólidos sedimentan tan rápidamente que no puede mantenerse una pulpa homogénea como es el caso de las pulpas que alimentan a filtros de disco o de tambor. También habrá que contar con este filtro para situaciones donde los procesos siguientes al de filtrado exijan una torta sin grumos, pues la descarga por tornillo hará que éstos se disgreguen.

Este equipo consta de un tablero circular giratorio dividido en sectores fabricados con rejilla de polipropileno a través de la cual pasará el filtrado gracias a la presión diferencial establecida por bombas de vacío o por soplantes, mientras que los sólidos gruesos quedarán retenidos sobre su superficie formando la torta que será retirada por medio de un tornillo helicoidal. En cada ciclo de filtrado la pulpa es sometida a varias etapas de lavado y secado, este ciclo puede durar 1½ minuto.

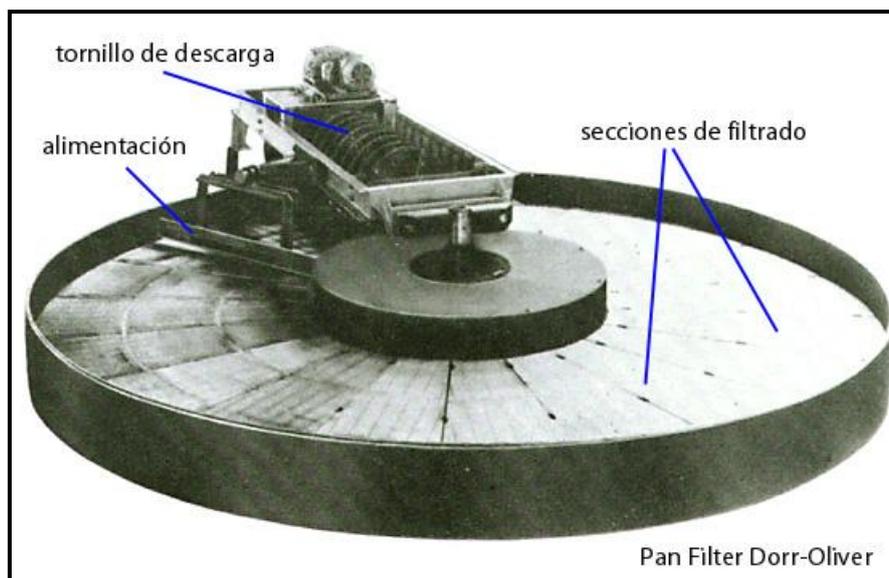


Fig.11.57: Filtro horizontal de tablero circular (cortesía Dorr-Oliver).

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

La limpieza del filtro se realiza por inyecciones ascendentes de aire sobre el sector del filtro inmediatamente antes de llegar a la zona de alimentación.

El fabricante Dorr-Oliver/GLV, suministra equipos desde 2 m<sup>2</sup> de superficie filtrante efectiva hasta equipos de 63 m<sup>2</sup> de superficie filtrante efectiva de 9 m de diámetro, pudiendo filtrar cantidades de pulpa comprendidas entre 1-6 t/h por m<sup>2</sup> con humedades residuales de la torta entre 4-6 %.



Fig.11.57: Filtro de 6 m<sup>2</sup> en el tratamiento de arenas para vidrio (cortesía de Dorr-Oliver).

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**



Fig.11.57: Descarga de las partículas retenidas por el filtro.

Existe una amplia variedad de sustancias minerales que pueden ser desaguadas con estas unidades como son: carbón, arenas silíceas, sales, concentrados de zinc, fosfato, feldespato, concentrados de hierro, etc.

### Filtración por Presión.

Actualmente la liberación económica de las partículas minerales exige tamaños cada vez más pequeños para los concentrados minerales, siendo el  $D_{80}$  del producto final de los concentrados de Cu, Pb y Zn de  $30\ \mu\text{m}$  o incluso menor. Por otro lado, el transporte marítimo de estas y otras sustancias, así como las fundiciones, exigen contenidos de humedad que se muevan entre 8 y 10 % en peso, por todo ello se están exigiendo mayores presiones diferenciales de filtración que desaconsejan el empleo de unidades por vacío y hacen de la tecnología por presión la más idónea para trabajar bajo estas condiciones.

#### **BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

##### **TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

A continuación se describen las principales unidades de filtración por presión, debido a su extensa implantación en la industria, como son el filtro prensa y el filtro de banda a presión. Para filtraciones especiales donde las partículas son ultrafinas ( $< 10 \mu\text{m}$ ) es necesario aplicar presiones diferenciales llegan hasta los 100 bares, esta exigencia ha dado lugar a la aparición de equipos como el tubo de filtración por presión (“tube press”) de Metso Minerals que también describiremos por su amplia variedad de aplicaciones en la filtración de minerales, efluentes, etc.

#### **Filtro Prensa** (“*Vertical Plate Pressure Filters*”)

Los filtros prensa son unidades formadas por placas verticales de polipropileno que son montadas sobre un bastidor de acero y movidas por cilindros hidráulicos. Los primeros equipos estaban compuestos por placas y marcos (“*plates and frames filters*”), éstos últimos conseguían la creación del espacio donde la torta se formaba, pero actualmente se han desarrollado equipos que eliminan el empleo de marcos y el espacio para la torta lo crean las propias placas adyacentes debido al diseño de sus perfiles (“*recessed plate filters*”).

Los equipos actuales pueden estar equipados con placas que incorporan membranas de goma para ayudar a conseguir una torta más desaguada a través de la acción de compresión que generan dentro del ciclo de filtrado, además incorporan una etapa de soplado (*air blow*) que ayuda a eliminar más filtrado de la costra o secado, al pasar el aire a través de ésta (figura 11.60).

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

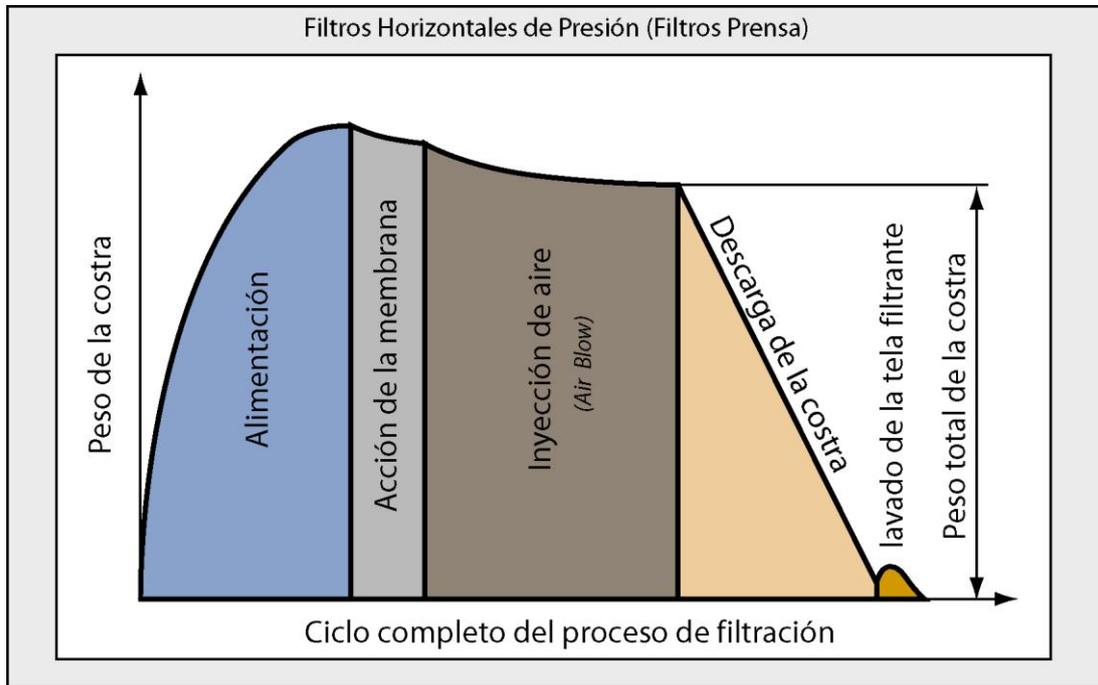


Fig.11.58: Ciclo completo de filtración en un filtro prensa.

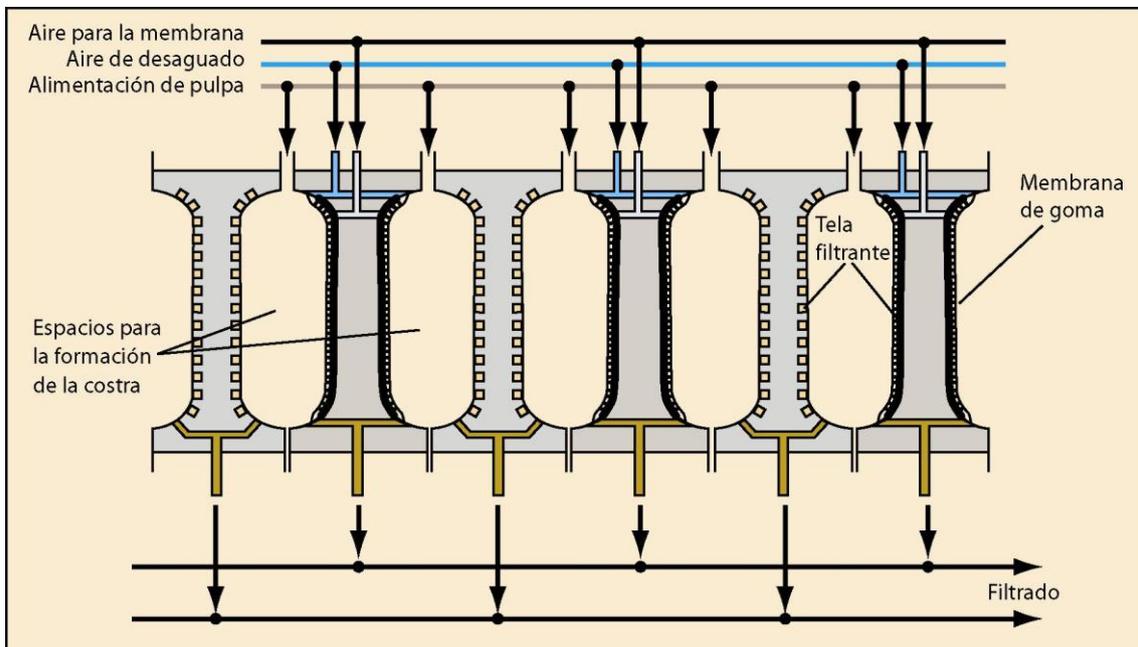


Fig.11.59: Disposición de las placas de un filtro prensa con membrana.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

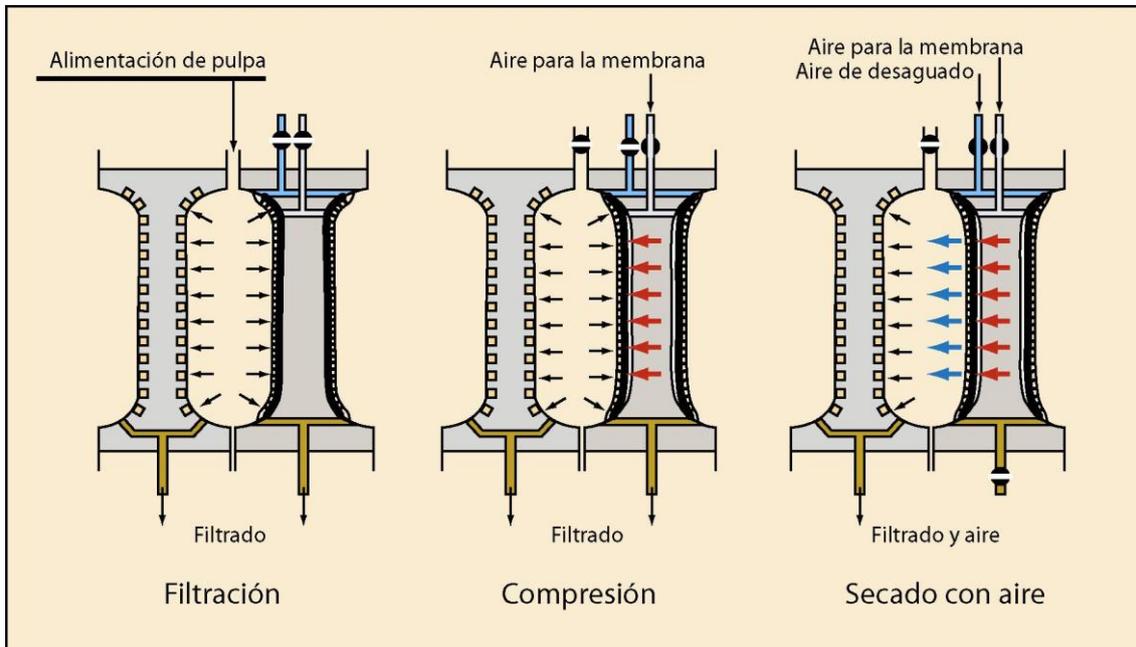


Fig.11.60: Ciclo de filtrado de un filtro prensa con soplado de aire.

Los filtros prensa también pueden darle a la torta un lavado de alta presión a través de la introducción de líquido de lavado a través de conductos existentes en el filtro y que podrá atravesar la torta a través de las placas filtrantes. La descarga de la torta es por gravedad.

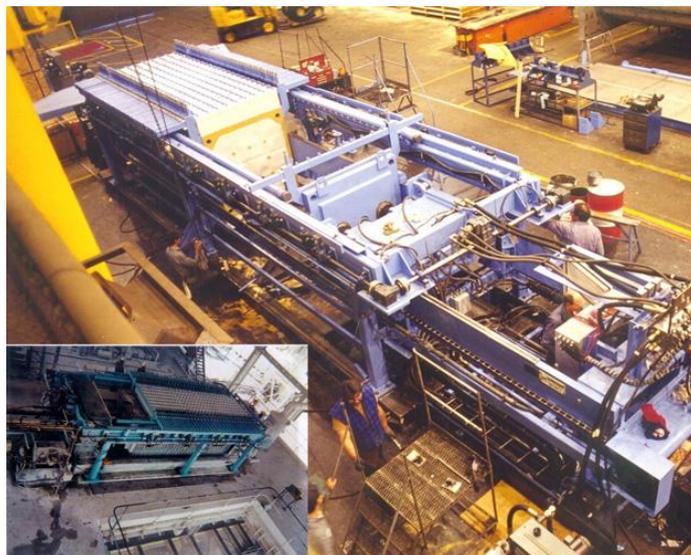


Fig.11.61: Instalación de un filtro prensa (cortesía de Eimco).

#### **BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

##### **TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

Debido a la mejora de los materiales utilizado en la construcción de las placas (polipropileno), se ha conseguido que estos equipos puedan trabajar con presiones elevadas y altas temperaturas (95 °C).

Para aplicaciones especiales las placas que forman la cámara pueden estar fabricadas de acero inoxidable, de fundición o de aluminio. El número de placas puede variar según la unidad, habiéndolas de 160 placas.

Las aplicaciones son muy amplias desde concentrados de cobre, plomo y zinc hasta lavado de carbones, concentrados de magnetita, tratamiento de colas, etc.

#### **Filtro de Banda a Presión (“*Belt Filter Press*”)**

Este tipo de equipos se ha convertido en idóneo para el desaguado de flujos de lodo formado por partículas finas que han sido previamente espesadas y floculadas. Consisten básicamente en dos bandas filtrantes, con anchuras de banda entre 0.5 y 3 m, entre las cuales se comprime o prensa a la pulpa dando lugar a un producto desaguado o torta con un porcentaje de sólidos de 60-70 %.

La operación de estos equipos es la siguiente, primero existe un área de la banda superior por donde va a entrar la pulpa que ha sido previamente dosificada con floculante. A la zona de alimentación le sigue una zona de drenaje gravitatorio de la pulpa o zona de acción gravitatoria, donde se lleva a cabo un desaguado de la humedad libre contenida en la pulpa que va a permitir un drenaje de ésta a través de la banda superior (ver figura 11.62) reduciendo

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

el volumen de la humedad en un 50 %. El material parcialmente desaguado va avanzando hasta caer en la zona de acuñamiento producida por la convergencia de las dos bandas filtrantes que van generando un aumento de la acción de compresión sobre el material y que van a eliminar el otro 50 % de humedad libre, al mismo tiempo que se va creando el “sándwich de torta”.

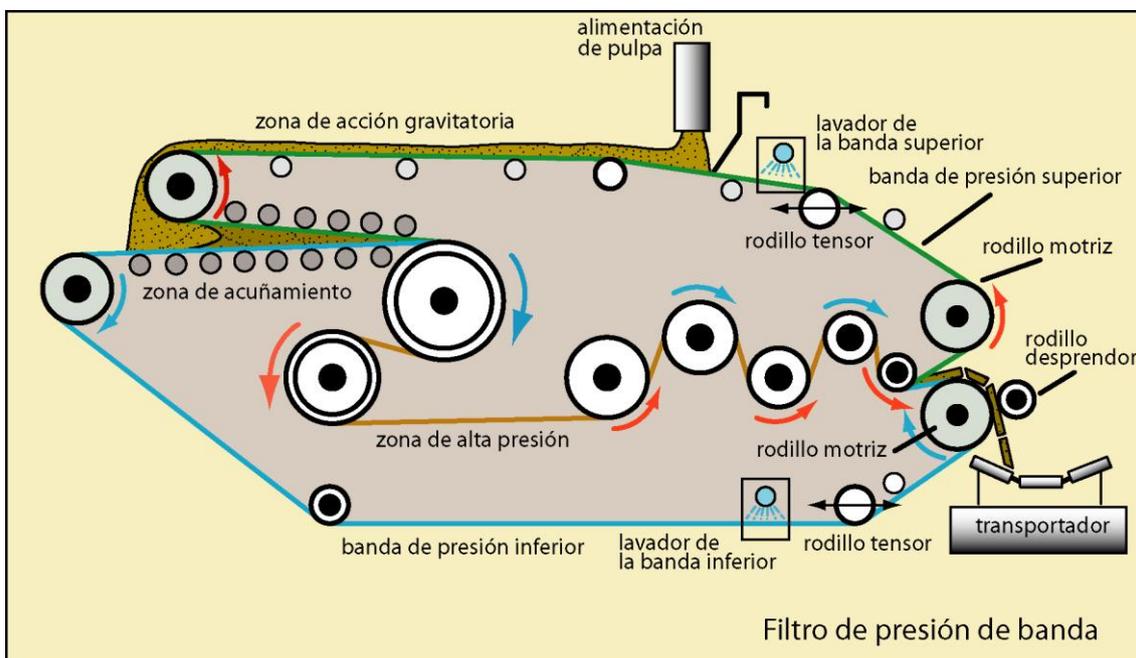


Fig.11.62: Disposición esquemática de un filtro de banda a presión.

Una vez formado el sándwich, el material entra en una zona de alta presión o zona “S” de compresión formada por una serie de tambores perforados y rodillos, que van disminuyendo en diámetro, donde el material termina de desaguarse hasta su descarga sobre un transportador.

Disponen de sistemas de control para el guiado, tensado y lavado de las bandas.

## BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.

### TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO

Son equipos de bajo consumo energético comparados con las otras unidades y con una alta recuperación de las partículas. Pueden tratar caudales desde 2 m<sup>3</sup>/h hasta 33 m<sup>3</sup>/h.

#### Tubo de Filtración por Presión (“*Tube Press*”)

Estas unidades surgieron para el desaguado de las partículas finas de caolín, donde se requería altas presiones diferenciales que no podían proporcionar las otras unidades de filtrado por presión (ver figura 11.49). Actualmente se ha diversificado el campo de aplicación, encontrándose en la industria mineral, química, farmacéutica, pigmentos, etc.

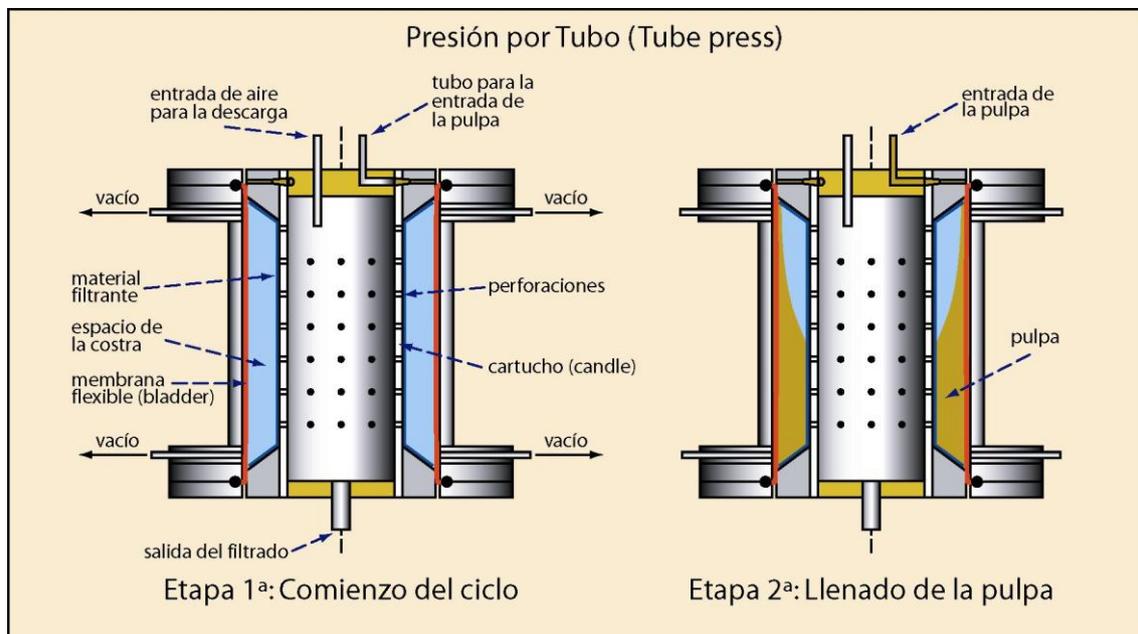


Fig.11.63: Etapa 1ª y 2ª del ciclo del filtro de presión por tubo.

El tubo o cilindro exterior contiene los tubos que proporcionarán la presión hidráulica necesaria para que la membrana flexible comprima a la pulpa consiguiendo

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**

**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

desaguarla. El cartucho o tubo interior está perforado para permitir el drenaje del filtrado, éste está fabricado de acero y está cubierto de una malla fina de alambre y sobre ésta está colocada una tela de filtrado.

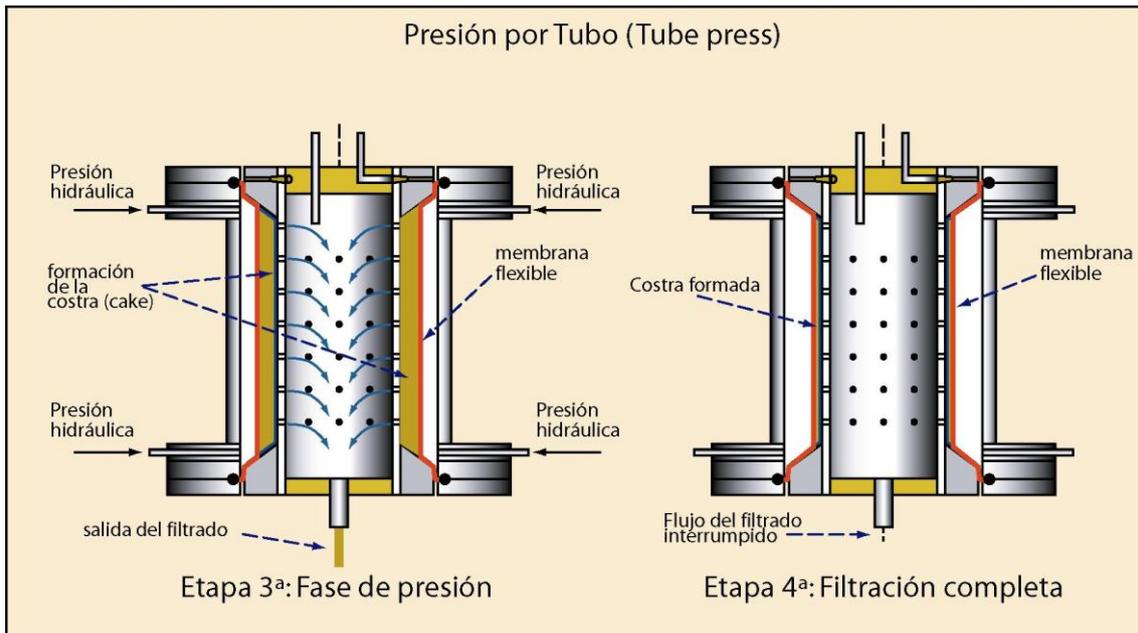


Fig.11.64: Etapa 3ª y 4ª del ciclo de filtrado del filtro de presión por tubo.

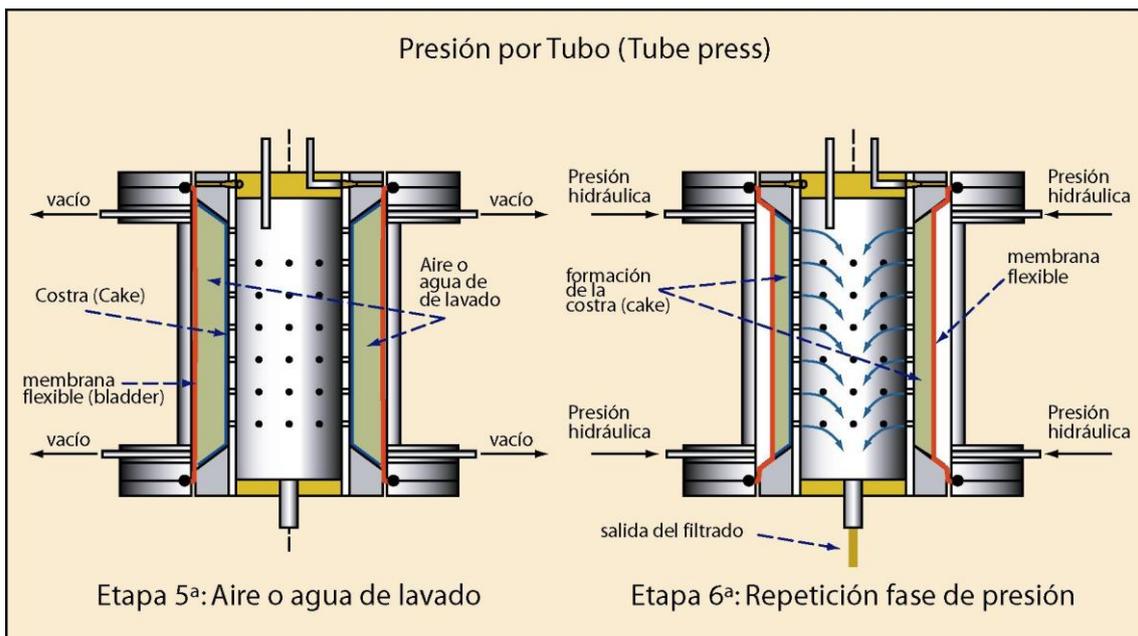


Fig.11.65: Etapa 5ª y 6ª del ciclo de filtrado del filtro de presión por tubo.

**BLOQUE 4: PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PULPAS Y LODOS.**  
**TEMA 11: OPERACIONES DE DESAGUADO MECÁNICO**

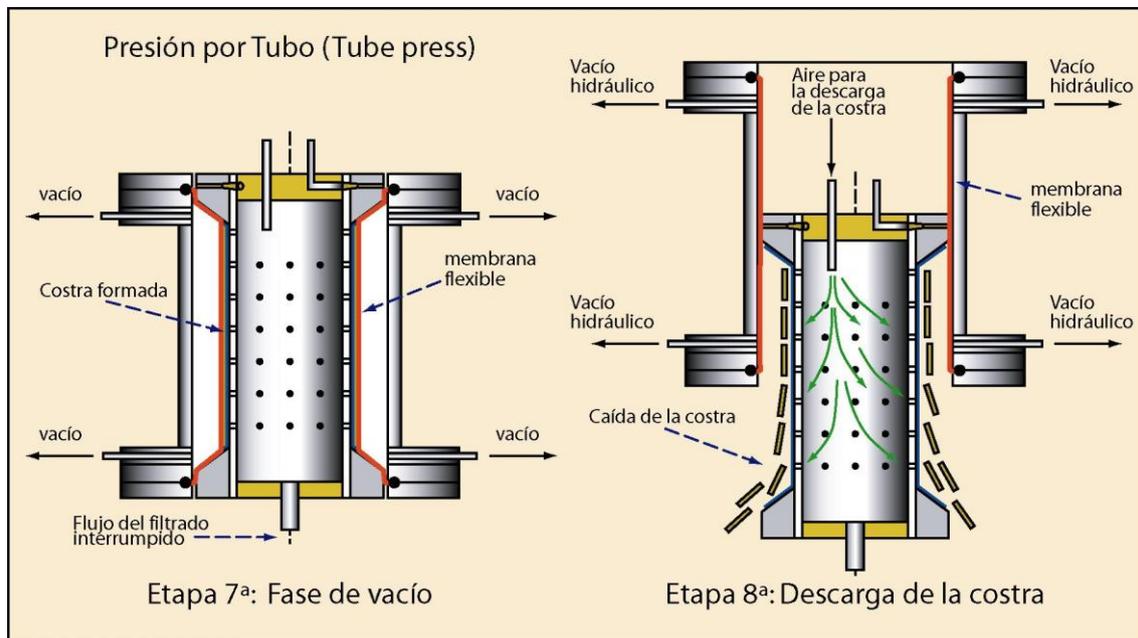


Fig.11.66: Etapa 7ª y 8ª del ciclo de filtración del filtro de presión por tubo.

En las figuras anteriores se puede observar un ciclo completo de funcionamiento de este tipo de unidades y como se lleva a cabo la descarga de la torta.

Estos filtros de alta presión los fabrica Metso Minerals con longitudes entre 1.8 m y 3 m y con diámetros entre 0.39 m y 0.86 m y presiones máximas operativas de 100-140 bares. El desaguado final obtenido con estas unidades puede ahorrar un 80 % de energía que habría sido necesaria con equipos de secado térmico de capacidades de desaguado similares.