

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

TEMA 7: CLASIFICACIÓN INDIRECTA. CLASIFICACIÓN

7.1. Clasificación por Tamaños. Introducción.

La **Clasificación** se define como la separación de partículas minerales en dos o más fracciones granulométricas en función de la velocidad de asentamiento dentro de un fluido (normalmente agua).

La clasificación en húmedo se aplica a partículas minerales que son demasiado finas para ser clasificadas con buenos rendimientos por medio del cribado (tamaños comprendidos entre **1 μm** y **3 mm**).

En los clasificadores vamos a tener dos corrientes diferenciadas por la velocidad de asentamiento de las partículas que las componen.

Por un lado tenemos aquella corriente formada por partículas de asentamiento más rápido a las que se le denomina: **pesados, arenas, productos de la descarga inferior** o **sobretamaños**.






Por otro lado tenemos aquella otra corriente formada por partículas de menor velocidad de asentamiento; denominadas: **ligeros, lamas, rebose, derrame** o **productos de la descarga superior**.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Aplicaciones de la Clasificación Indirecta:

Las situaciones donde se puede aplicar este tipo de clasificación son:

-  Obtención de una separación en dos fracciones. Una relativamente fina y la otra relativamente gruesa (para separaciones muy finas).
-  Efectuar una concentración de las partículas más pesadas y pequeñas de las partículas más grandes y ligeras.
-  Dividir una distribución de tamaños, de amplio intervalo, en varias fracciones.
-  Restringir la distribución de propiedades de las partículas que van a entrar a un proceso de concentración.
-  Controlar el proceso de molienda en circuito cerrado.

7.2. Principios de la Clasificación.

Una partícula sólida caerá en el vacío con una velocidad que aumenta de forma indefinida e independiente de la densidad y el tamaño de la misma.

En un medio viscoso como el aire o el agua, esta partícula que cae, va a sufrir una resistencia al movimiento que va aumentar con el aumento de la velocidad.

Al cabo de un tiempo de caída, se va a llegar a un equilibrio entre la fuerza de la gravedad y las fuerzas de la resistencia del fluido. Se dice que la partícula ha alcanzado la velocidad terminal o límite y a partir de este instante dicha partícula caerá con velocidad constante ($a = 0$).

La resistencia que ofrece el fluido va a depender de la rapidez del descenso. Para minerales con velocidades de caída baja la resistencia que aparece es la **resistencia viscosa** debida a las fuerzas de corte o viscosidad del fluido. Para minerales con velocidades de caída elevadas la resistencia que aparece principalmente es la **resistencia turbulenta** debida al desplazamiento del fluido provocado por el grano de mineral.

Si las resistencias viscosa y turbulenta son importantes, la aceleración de las partículas en el interior del fluido disminuye rápidamente alcanzándose la velocidad límite.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Los clasificadores van a consistir en una **columna de separación** en cuyo interior existirá un flujo ascendente de fluido a una velocidad uniforme (V_f). La mezcla de partículas se introducirá en dicha columna y una vez en contacto con el fluido, éstas se **asentarán** o **elevantarán** en función de que sus velocidades de asentamiento sean mayores (V_p) o menores (V_l) respectivamente, que la velocidad del flujo.

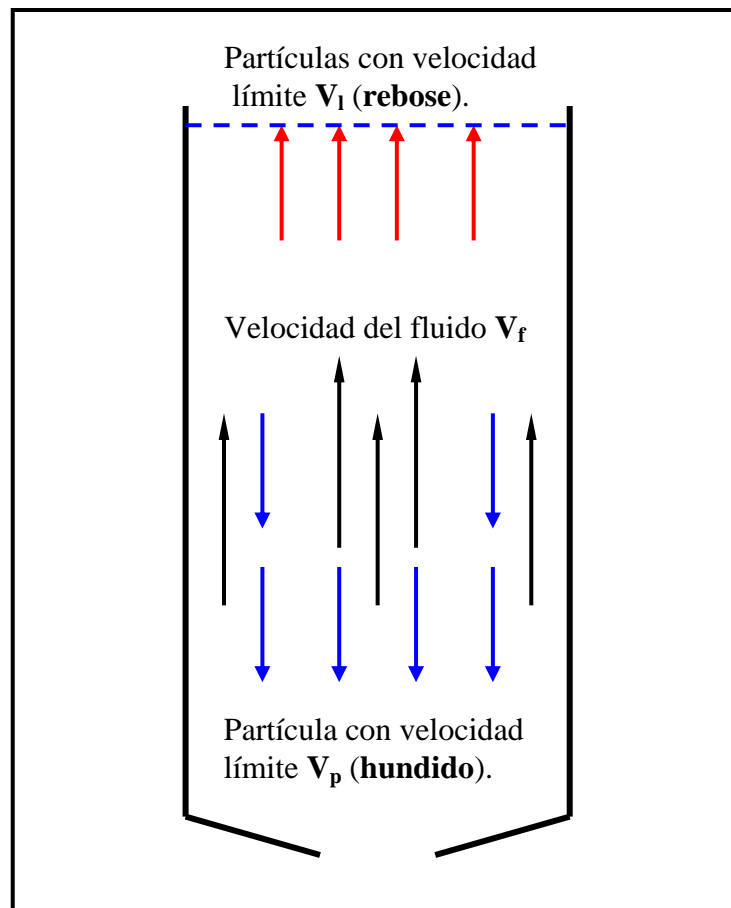


Fig. 7.1: Principio de funcionamiento de un Clasificador.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Asentamiento Libre:

Se dice que estamos ante un asentamiento libre cuando las partículas se mueven en un fluido cuyo volumen es grande con relación al volumen total ocupado por las partículas (no existe fenómenos de apiñamiento).

Estaremos en condiciones de asentamiento libre en aquellas pulpas minerales con un porcentaje en peso de sólidos inferior al 15 %.

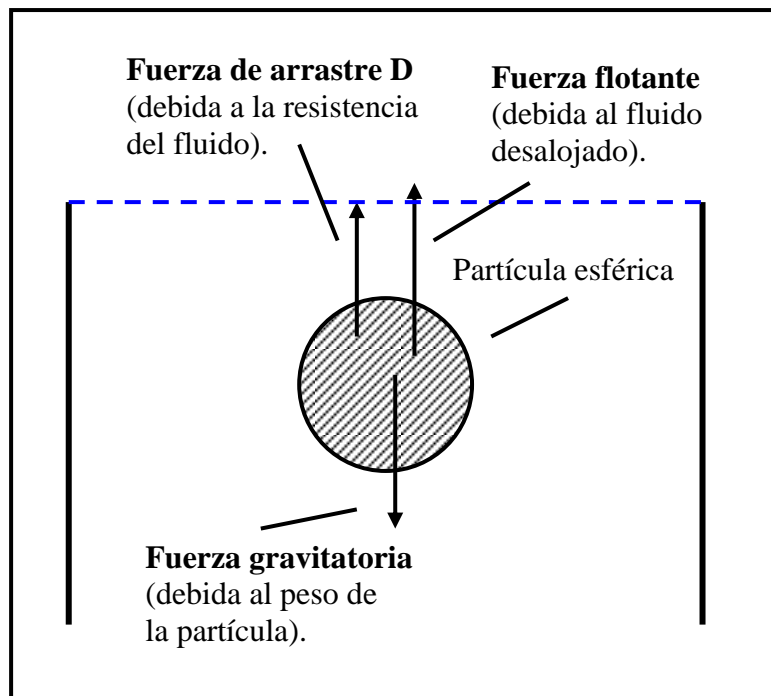


Fig. 7.2: Partícula esférica en el interior de un fluido.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Según la figura 7.2, una partícula esférica situada en el interior de un fluido va a estar sometida a las siguientes fuerzas:

- Fuerza gravitatoria debida al peso de la partícula. ↓
- Fuerza de Arquímedes o flotante, debida al volumen de fluido desalojado por la partícula. ↑
- Fuerza de arrastre o resistencia que ofrece el fluido al avance de la partícula en su caída. ↑

La ecuación del movimiento de dicha partícula será la siguiente:

$$\boxed{m \cdot g - m' \cdot g - D = m \cdot \frac{dv}{dt}} \quad (7.1)$$

Siendo:

- m = Masa de la partícula esférica.
- m' = Masa del fluido desalojado.
- v = Velocidad de la partícula.
- g = Aceleración debida a la gravedad.

Cuando se alcance la velocidad límite o terminal la velocidad “ v ” se hará **constante** y por lo tanto la aceleración (dv/dt) será **nula**.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Si despejamos D de la expresión 7.1 nos queda la siguiente ecuación:

$$D = (m - m') \cdot g \quad (7.2)$$

Pasamos las **masas** a **densidades** sabiendo que la masa de una esfera es:

$$m_{esfera} = \frac{\pi}{6} \cdot d^3 \cdot \rho \quad ; (d = \text{diámetro})$$

Por consiguiente tendremos que:

$$D = \frac{\pi}{6} \cdot g \cdot d^3 \cdot (\rho_s - \rho_f) \quad (7.3)$$

Donde:

- ◆ ρ_s = Densidad de la partícula sólida.
- ◆ ρ_f = Densidad del fluido.

Por otro lado, Stokes dedujo una expresión para la fuerza de arrastre (D) debida, fundamentalmente a la **resistencia viscosa**, siendo:

$$D = 3 \cdot \pi \cdot d \cdot \eta \cdot v \quad (7.4)$$

Donde:

- η = Viscosidad del fluido.
- v = Velocidad límite.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Igualando las expresiones 7.3 y 7.4:

$$3 \cdot \pi \cdot d \cdot \eta \cdot v = \frac{\pi}{6} \cdot g \cdot d^3 \cdot (\rho_s - \rho_f) \quad (7.5)$$

Y despejando la velocidad límite (v):

$$v = \frac{g \cdot d^2 \cdot (\rho_s - \rho_f)}{18 \cdot \eta} \quad (7.6)$$

Ley de Stokes

Sin embargo, Newton propuso que la fuerza de arrastre (D) era debida principalmente a la *resistencia turbulenta*:

$$D = 0.055 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot v^2 \cdot \rho_f \quad (7.7)$$

Donde igualando esta expresión con la ecuación 7.3 y despejando la velocidad límite (v):

$$v = \sqrt{\frac{3 \cdot g \cdot d \cdot (\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}} \quad (7.8)$$

Ley de Newton

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

La Ley de Stokes es aplicable sólo a partículas inferiores a 50 μm .

La Ley de Newton se aplica a partículas superiores a 5 mm.

Las ecuaciones 7.6 y 7.8 se pueden simplificar y ponerse de la siguiente forma:

$$v = k_1 \cdot d^2 \cdot (\rho_s - \rho_f) \quad (7.9)$$

$$v = k_2 \cdot [d \cdot (\rho_s - \rho_f)]^{\frac{1}{2}} \quad (7.10)$$

Siendo k_1 y k_2 constantes y denominando al término $(\rho_s - \rho_f)$ como **densidad efectiva**.

De las ecuaciones 7.9 y 7.10 se desprende lo siguiente:

- La velocidad límite de una partícula en un fluido va a depender únicamente de la densidad y de su diámetro.
- Dos partículas con la misma densidad, tendrá mayor velocidad límite aquella con diámetro mayor.
- Dos partículas con el mismo diámetro, tendrá mayor velocidad límite aquella con mayor densidad.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Relación de Libre Asentamiento

- Ley de Stokes:

La ley de libre asentamiento para dos partículas minerales que tienen la misma velocidad límite es:

$$\frac{d_a}{d_b} = \left(\frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_a - \rho_f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7.11)$$

Donde se tiene que:

d_a = diámetro de la partícula **a**.

d_b = diámetro de la partícula **b**.

ρ = Densidad.

- Ley de Newton:

Para partículas que obedecen la ley de Newton la relación de libre asentamiento es de la forma:

$$\frac{d_a}{d_b} = \frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_a - \rho_f} \quad (7.12)$$

Se cumple: “la diferencia de densidad entre las partículas minerales presenta un efecto importante sobre la clasificación en aquellos tamaños mayores”.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

- Ley General:

$$\frac{d_a}{d_b} = \left(\frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_a - \rho_f} \right)^n \quad (7.13)$$

Donde el valor de n estará comprendido entre 0.5 y 1 para aquellos tamaños intermedios entre 50 μm y 5 mm.

Asentamiento Obstruido:

Se dice que estamos ante un asentamiento obstruido cuando el porcentaje de sólidos en peso dentro del fluido es elevado (superior al 15 %). El fluido se va a comportar como una pulpa y la densidad del fluido será la densidad de la pulpa.

Van a existir fenómenos de apiñamiento.

La fuerza de arrastre será debida ahora, principalmente, a resistencias de tipo turbulento (Ley de Newton) y la expresión de la velocidad límite de una partícula en este tipo de medios será:

$$v = k \left[d \cdot (\rho_s - \rho_p) \right]^{1/2} \quad (7.14)$$

Donde ρ_p , es la **densidad de la pulpa**.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

El asentamiento obstruido va a hacer disminuir la influencia del tamaño y va a aumentar el efecto de la densidad sobre la clasificación.

La **Relación de Asentamiento Obstruido** es:

$$\frac{d_a}{d_b} = \frac{\rho_b - \rho_p}{\rho_a - \rho_p} \quad (7.15)$$

Donde ρ_p , es la densidad de la pulpa.

“La relación de asentamiento obstruido siempre va a ser mayor que la relación de libre asentamiento (ley de Newton) para las mismas partículas”.

Resumiendo se puede establecer que cuando se quiera realizar una clasificación por tamaños, interesa realizarla en condiciones próximas a la sedimentación libre, y cuando se quiera realizar una clasificación por densidades interesará realizarla en condiciones próximas a la sedimentación obstaculizada.

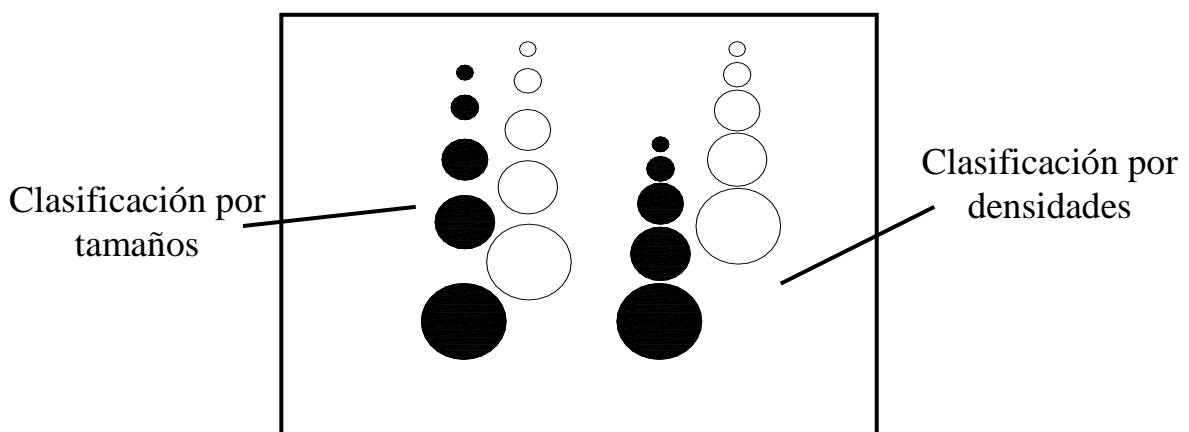


Fig. 7.3: Asentamiento libre y obstruido.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

7.3. Campos de Aplicación.

La clasificación hidráulica, que emplea sólo la acción de la gravedad, va a ser interesante en aquellas aplicaciones donde se exigen cortes granulométricos comprendidos entre **50 μm** y **2 mm**.

Cuando la clasificación hidráulica o neumática se ayuda también de la aceleración centrífuga. Los cortes granulométricos, que permiten las máquinas, pueden bajar a órdenes de algunas micras.

Para emplear la clasificación hay que analizar el comportamiento que existe entre los granos desde el punto de vista **físico-químico**, pues hay situaciones donde las partículas presentan **hidrofobia** o se surgen **acciones electrostáticas** entre ellas disminuyendo la eficiencia de los separadores o incluso descartando su empleo para este tipo de sustancias.

Por ello el empleo de este tipo de separadores se restringe a aquellos casos donde las partículas conservan totalmente su individualidad y no están sometidas a fuerzas diferentes a la debida a la gravedad o a la aceleración centrífuga.

Estos equipos se emplean en aquellos casos donde se requieren altas capacidades de tratamiento. Además son equipos relativamente económicos.

7.4. Tipos de Clasificadores Industriales.

La siguiente tabla clasifica los clasificadores hidráulicos como los neumáticos en función de las fuerzas predominantes (fuerza gravitatoria y fuerza centrífuga).

Tabla 7.1: Tipos de Clasificadores.

	Fuerza gravitatoria		Fuerza centrífuga
	Sedimentación Simple	Contra Corriente	
Clasificadores Hidráulicos	- Conos - Hidroseparadores - Clasificadores mecánicos	- Conos - Tipo Fahrenwald - Hidroscilador - Rheax	- Hidrociclones - Centrifugadoras
Clasificadores Neumáticos	-	- Despolvoreadores	- Ciclones - Separadores dinámicos

Clasificadores Hidráulicos de Sedimentación Simple:

Conos:

Los conos clasificadores son las unidades de clasificación más simples. Se emplean en la industria de los áridos para el deslamado de la arena gruesa.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Su funcionamiento es sencillo; la pulpa que nos interesa clasificar se introduce por un alimentador central en forma de tubo, y dentro del cono las partículas finas son arrastradas por la corriente de rebose que va a ser recogida a través de unos canales perimetrales.

Los gruesos irán decantándose en el fondo del cono y una válvula automática será la que controle la salida del producto en función del peso del hundido, obteniéndose un producto prácticamente **libre de agua**.

Los conos estarán fabricados de chapa y deben tener un ángulo en la parte inferior que no sobrepase los **60°** con el fin de evitar asentamientos de granos en las paredes del equipo.

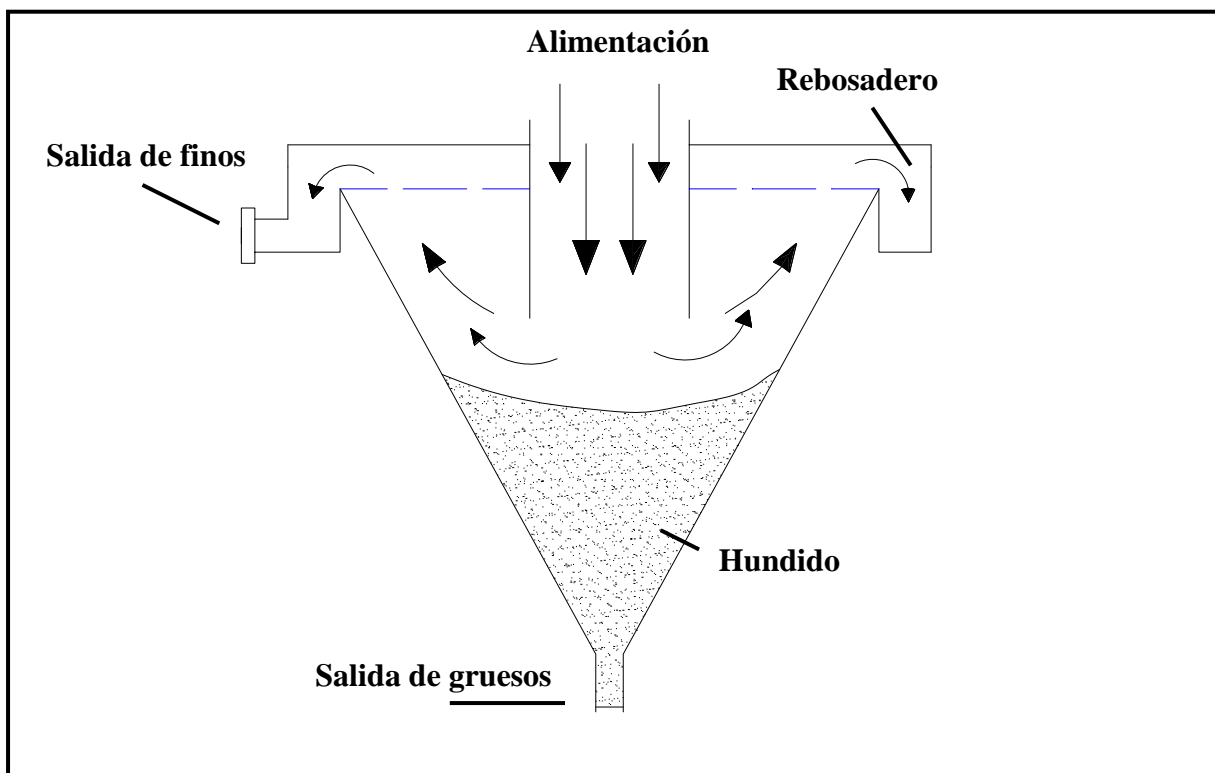


Fig. 7.4: Cono Clasificador de Sedimentación Simple.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

La dimensión de los conos está limitada a diámetros de 3 metros aproximadamente, como consecuencia de la altura que toman con los incrementos del diámetro.

Los cortes son poco precisos.

Hidroseparator:

Debido a las limitaciones en lo que se refiere a dimensiones; han surgido cubas cilíndricas de mayor diámetro (10 m o más) y que proporcionarán mayores capacidades de clasificación.

Los hidroseparadores disponen de un sistema de rastrillos con movimiento circular que arrastran el material decantado hacia el cono central de descarga, y es extraído por bombeo.

Estos equipos son empleados principalmente como unidades **espesadoras-clarificadoras**, para la separación de sólidos-líquidos, potenciando el efecto de sedimentación con el empleo de reactivos floculantes.

Dan al igual que los equipos anteriores cortes granulométricos muy poco precisos.

Existen fabricantes que han lanzado al mercado unos equipos denominados **Clasificadores de Copa** (Bowl Classifier de Dorr-Oliver), siendo una combinación entre un hidroseparator y un clasificador mecánico de rastrillos.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

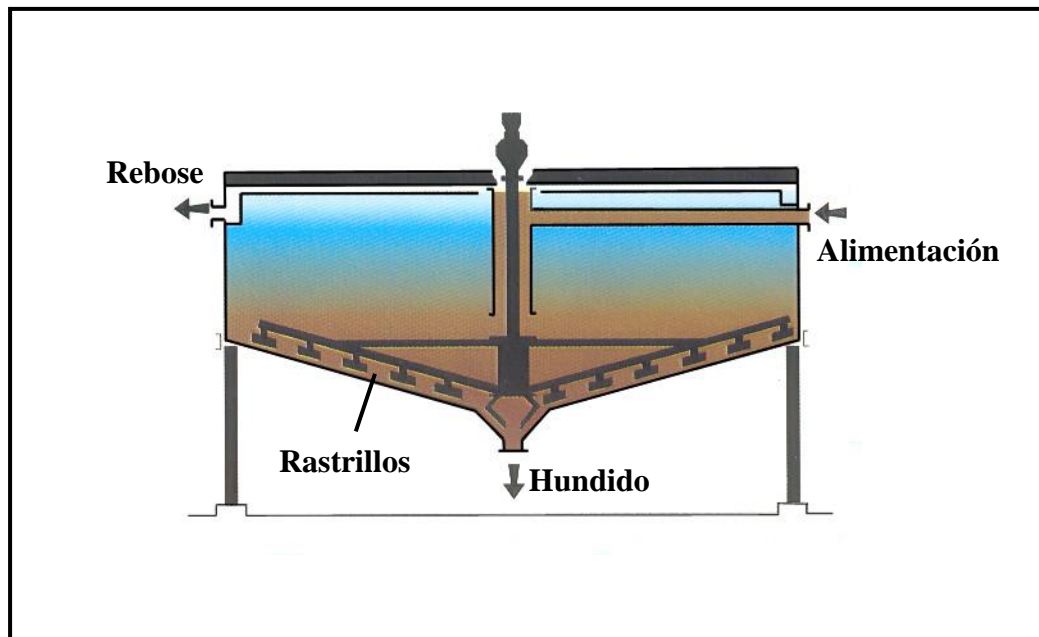


Fig. 7.5: Hidroseparador (Cortesía de Eral S.A.)

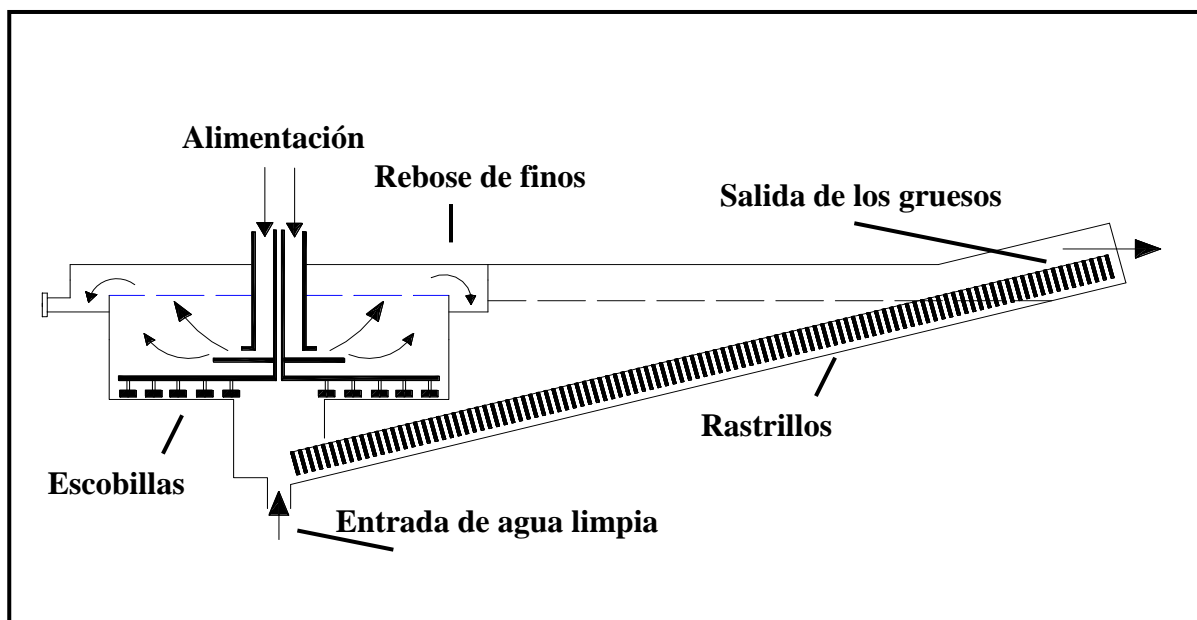


Fig. 7.6: Corte esquemático de un clasificador de copa (Dorr-Oliver).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Canales de clasificación. Cajas Puntiguadas:

Son los equipos de clasificación más antiguos, son de fabricación muy simple.

Están constituidos por una serie de recipientes piramidales de secciones crecientes (doble de ancho).

La pulpa se alimenta por un extremo y se extrae por el opuesto. Las partículas pesadas y gruesas se van decantando en el fondo de estos recipientes. Por el contrario las partículas finas y ligeras son arrastradas por la corriente recogiendo en el extremo.

La eficiencia de estas unidades se ve incrementada con ayuda de corrientes ascendentes de agua. Actualmente han quedado relegados por otros equipos más eficientes.

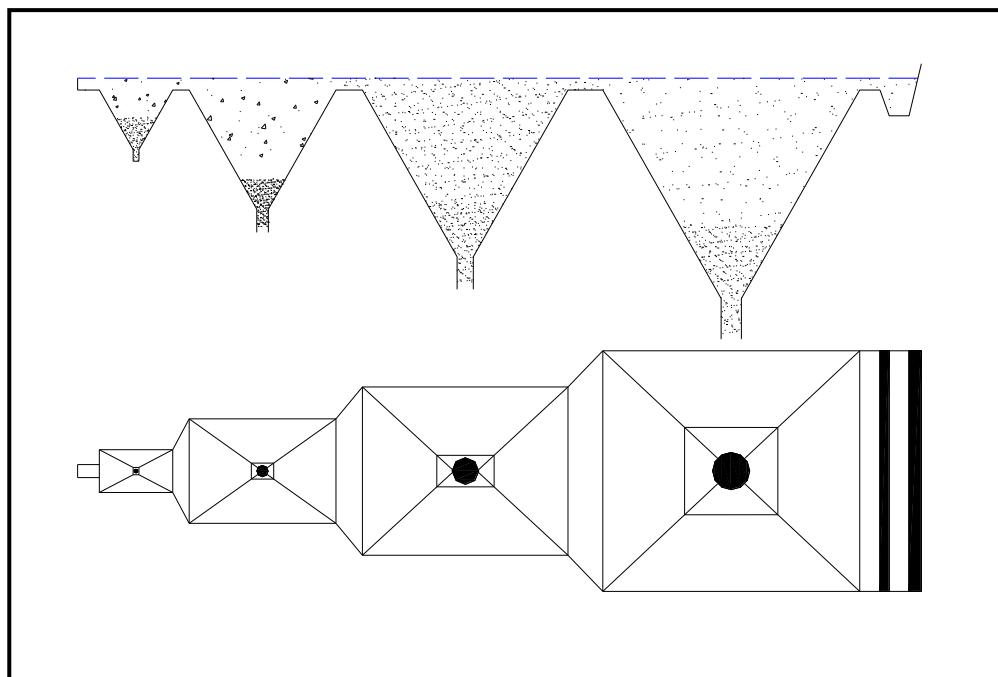


Fig. 7.7: Canal de clasificación de 4 cajas puntiaguadas.

Clasificadores Mecánicos:

En este grupo de equipos los minerales o arenas decantados son extraídos y elevados de forma continua por medio de un dispositivo mecánico.

Estos equipos están formados por una cuba con una superficie inclinada por donde son arrastrados los materiales. Esta superficie se prolonga más allá del nivel del líquido para que los minerales o arenas tengan tiempo suficiente de agotarse.

Los clasificadores mecánicos proporcionan cortes comprendidos entre 150 μm y 1 mm para pulpas espesas, y cortes más finos, entre 50 y 80 μm , con pulpas más diluidas.

Los equipos mecánicos más representativos son:

- Clasificadores de Tornillo.
- Clasificadores de Rastrillo.
- Clasificadores de Draga.
- Clasificadores Hardinge.
- Noria de cangilones perforados.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Clasificador de Tornillo:

Estas máquinas han sido conocidas en sus orígenes bajo el nombre de clasificadores “**Akins**”.

El principio de funcionamiento es muy sencillo; constan de un tornillo de Arquímedes que hace de órgano de elevación.

Este tornillo es de gran diámetro puede ser de paso simple, doble o incluso triple.

Las espiras están fabricadas de acero y el borde presenta una plaquitas o zapatas de material antidesgaste.

Para el lavado de arenas gruesas, el eje del tornillo dispondrá en su parte inferior de unas paletas que servirán para obtener un agua turbulenta y el máximo restregamiento entre las partículas.

Los clasificadores de tornillos son construidos con unos diámetros de hélice entre 0,45 y 2.25 m, y longitudes que oscilan entre 2 y 12 m. Las capacidades varían entre 4 y 350 toneladas a la hora.

Gracias a la hélice pueden trabajar con pendientes ligeramente mayores de 14°. Proporcionan materiales mejor agotados.

Han sido ampliamente utilizados en instalaciones de molienda de minerales en circuito cerrado por vía húmeda.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Actualmente se han visto desplazados por los ciclones, pero se emplean como lavador-decantador o como espesador en preparación de arenas, caolín, etc.

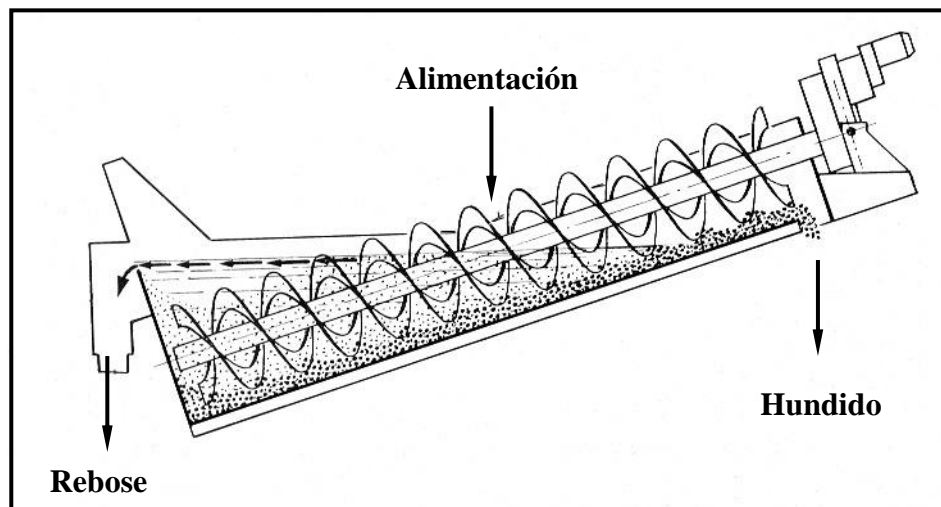


Fig. 7.8: Corte de un clasificador de tornillo (Taggart, 1950).



Fig. 7.9: Vista del rebosadero de un clasificador de tornillo (Cortesía F.L. Smidth - Wemco).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.



Fig. 7.10: Clasificador trabajando (Cortesía Metso Minerals - Svedala).



Fig. 7.11: Clasificadores de tornillo de doble eje (Cortesía Metso Minerals – Svedala).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Clasificador de Rastrillo:

Es uno de los clasificadores mecánicos clásicos, conocido también como Clasificador Dorr (Rake Classifier) debido al nombre de su fabricante Dorr-Oliver.

Es similar al clasificador de tornillo, diferenciándose en el órgano mecánico que permite la clasificación que en este caso son rastrillos.

Tiene forma de artesa con fondo inclinado liso (9° - 14°). La parte inferior de la artesa será la zona o estanque de decantación. La alimentación es introducida por un canal transversal a cierta distancia de la pared inferior de la artesa que constituirá el rebosadero.

Las partículas o granos más finos, y la mayor parte del agua, son extraídos por rebose mientras que las partículas de mayor dimensión a la de corte son extraídas por los rastrillos, que están animados de un movimiento que permite el rastrillado del piso de la artesa (avance) y un alejamiento del piso con retorno hacia atrás para volver a iniciar el ciclo (retroceso).

El número de ciclos puede modificarse de **12 a 30 c.p.m.** en función del tamaño de corte perseguido.

El corte está restringido para tamaños inferiores a **80 μm** debido a la cierta agitación que imprime el movimiento de los rastrillos a la pulpa.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.



Fig. 7.12 – Fig. 7.13: Diferentes vistas de un Clasificador de Rastrillos.
(Cortesía de Dorr-Oliver – F.L. Smidth)

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Otros clasificadores mecánicos:

Señalamos aquí la existencia del **Clasificador de Draga** en el que las arenas son elevadas por racletas fijadas sobre una correa de goma o sobre cadenas.

El Clasificador de Tambor **Hardinge**: Consiste en un tambor cilíndrico con cierta inclinación y provisto interiormente de un tornillo que va a transportar los gruesos o hundidos sobre unos cangilones; estos cangilones elevarán y depositarán el material sobre una canaleta, expulsando el hundido al exterior.

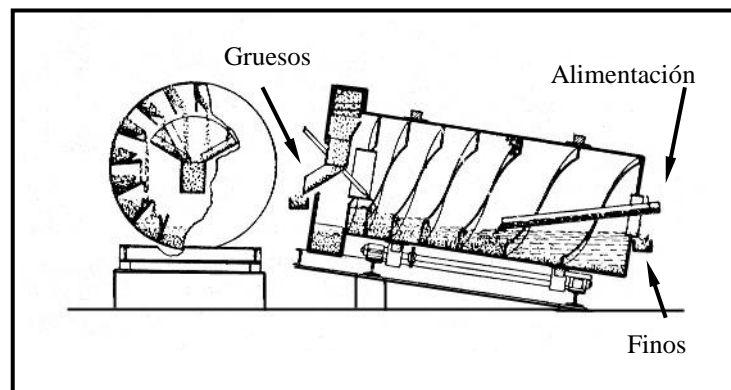


Fig. 7.14: Clasificador Hardinge (Taggart, 1950).

Aunque su aplicación está en el campo del lavado de arenas y gravas, debemos mencionar también la **Noria Decantadora**, donde las arenas decantadas son elevadas y retiradas por cangilones perforados.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

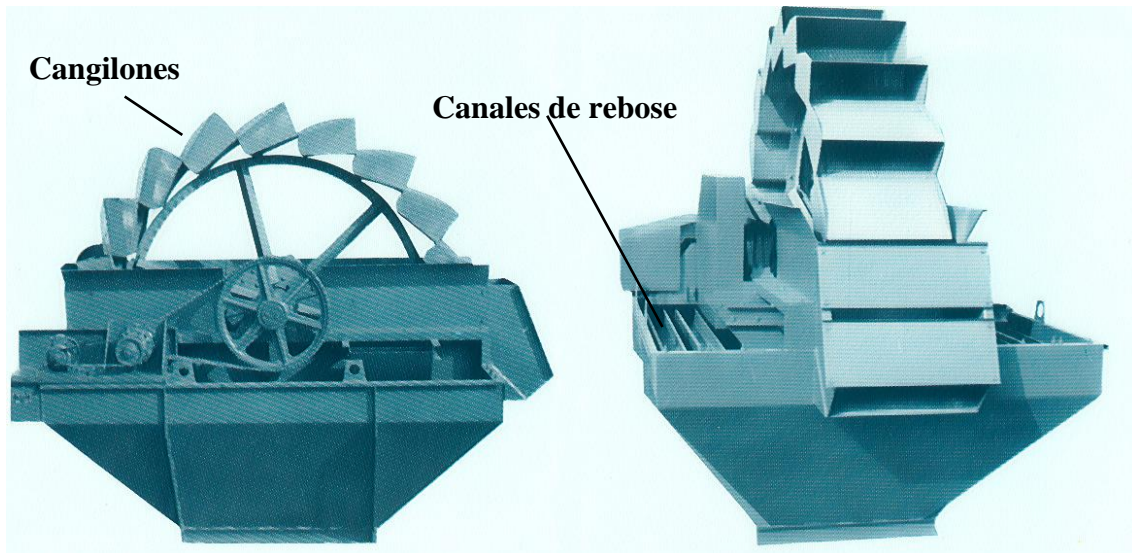


Fig. 7.15: Noria (Cortesía de Yernaux).

Clasificadores Hidráulicos de Contracorriente:

Este grupo de clasificadores tienen como característica común el disponer de inyecciones verticales de agua que van a controlar de algún modo la dimensión de corte.

Aunque existe multitud de disposiciones mecánicas, sólo vamos a describir aquellos clasificadores que proporcionan los cortes más precisos y son los más conocidos.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

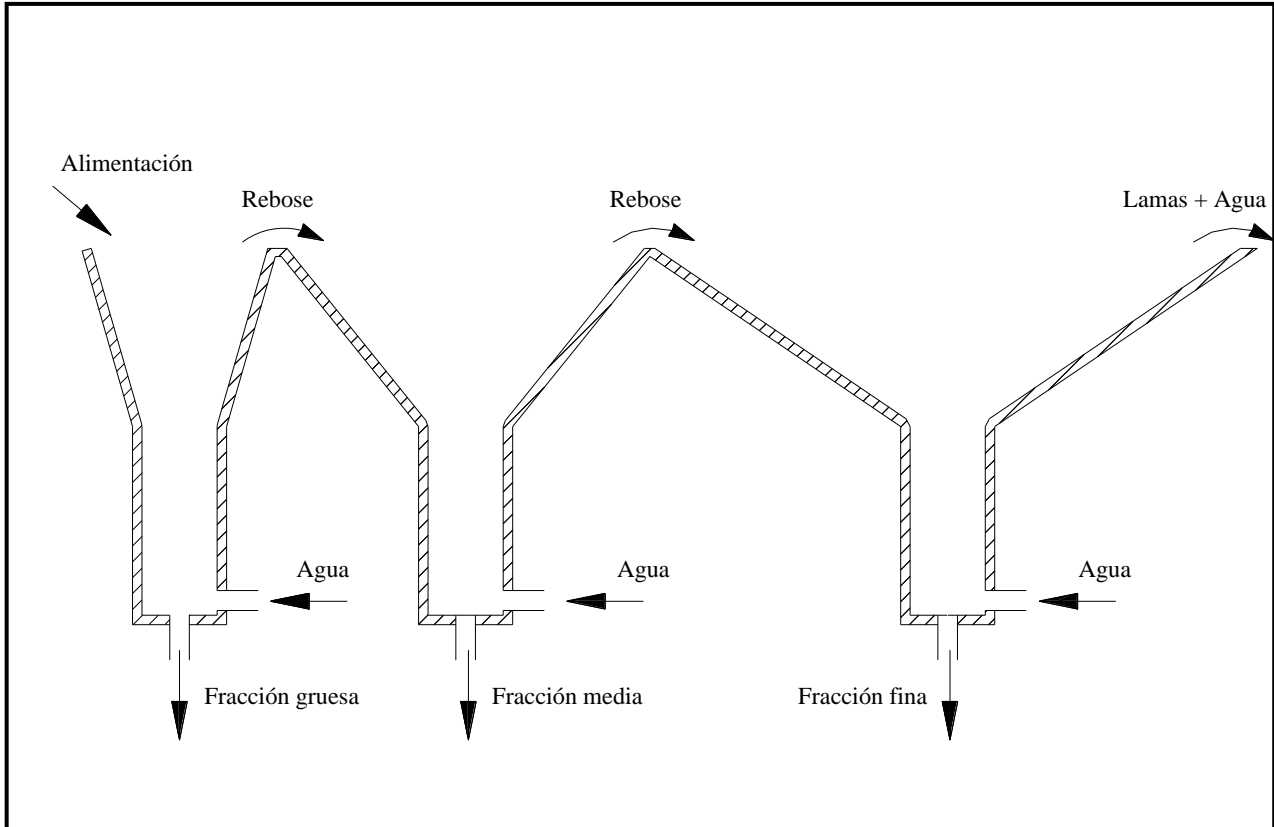


Fig. 7.16: Principio del clasificador hidráulico de contracorriente.

Clasificador hidráulico simple:

Se denominan clasificadores de corriente ascendente; están formados por tanques de chapa de sección circular o cuadrada, de forma cónica o piramidal invertida (similares a los conos de sedimentación libre).

La alimentación se realiza por la parte superior y en el fondo del clasificador se formará un lecho de partículas sólidas.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Por debajo de este lecho y a través del fondo perforado se inyectará que arrastrará las partículas finas del lecho hacia el rebosadero perimetral.

La descarga de las partículas gruesas se realizará por la parte central inferior en forma de pulpa espesa (75-80% de sólidos en peso).

La regulación del corte (1-0.075 mm) se realiza por medio de la velocidad ascensional del fluido y por los niveles del lecho fluido.

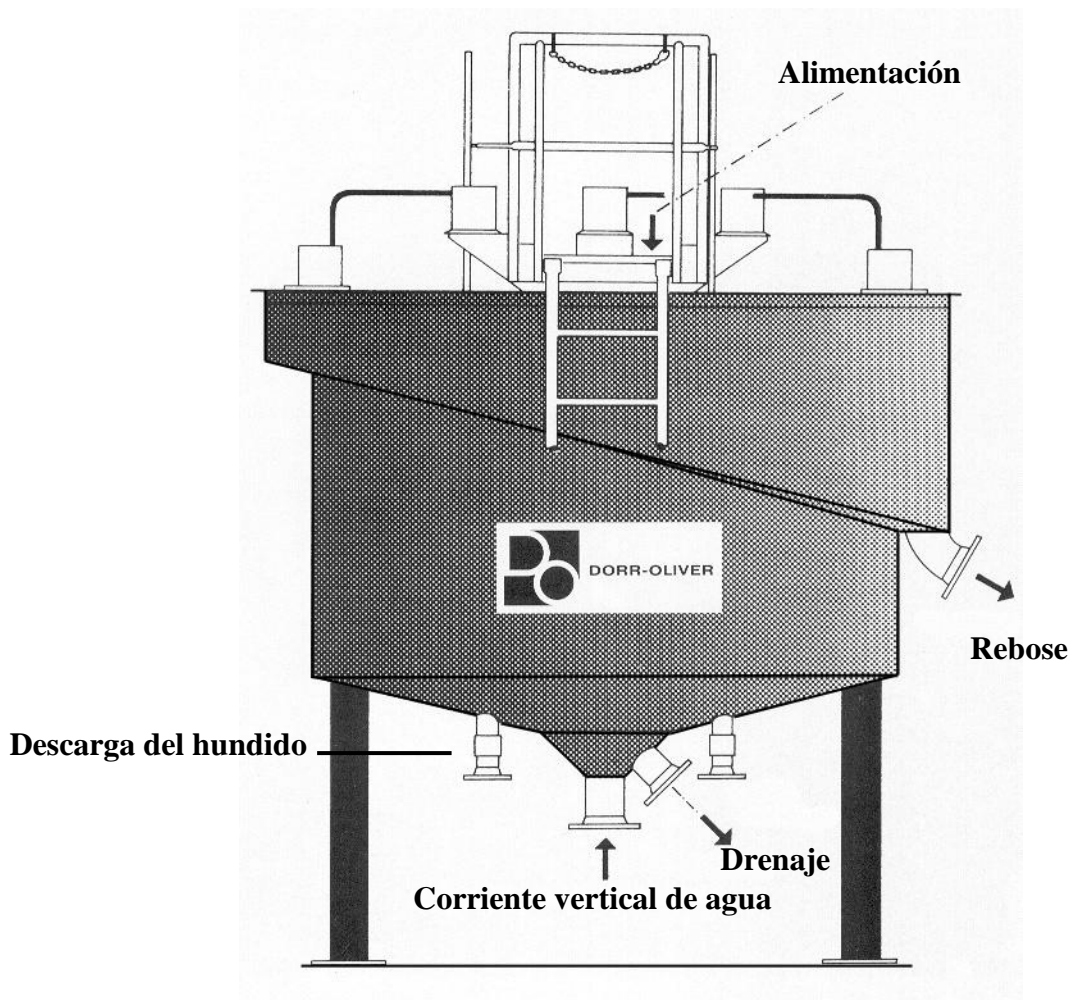


Fig. 7.17: Clasificador hidráulico simple (Cortesía de Dorr-Oliver)

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

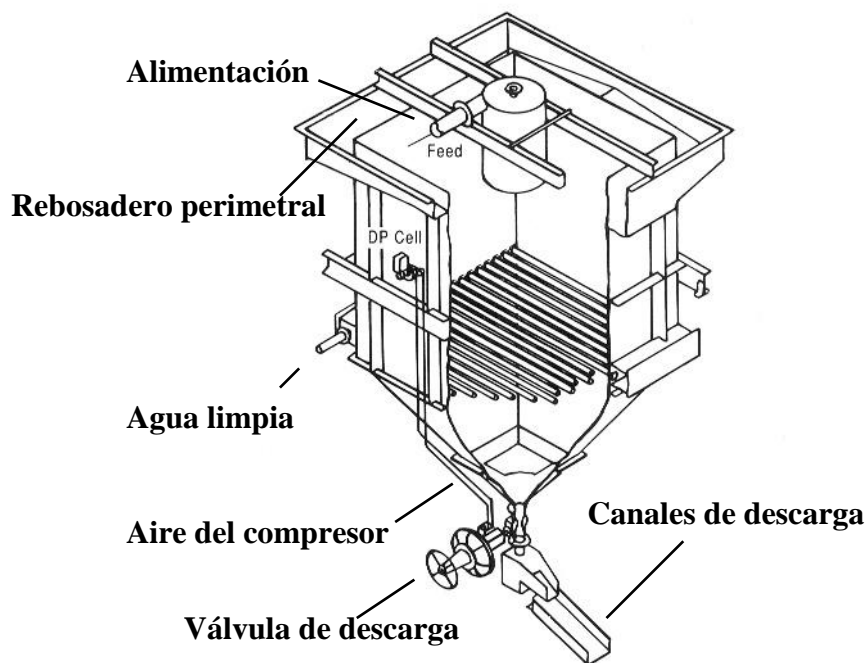


Fig. 7.18: Separador Floatex (cortesía de Carpc).

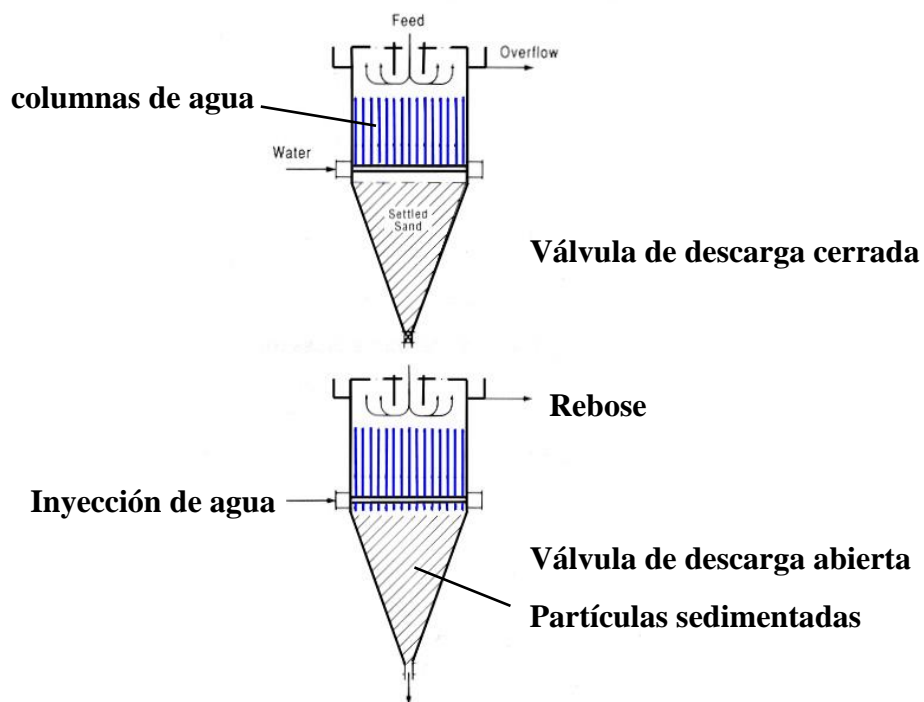


Fig. 7.19: Principio de funcionamiento del Floatex (Cortesía de Carpc)

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

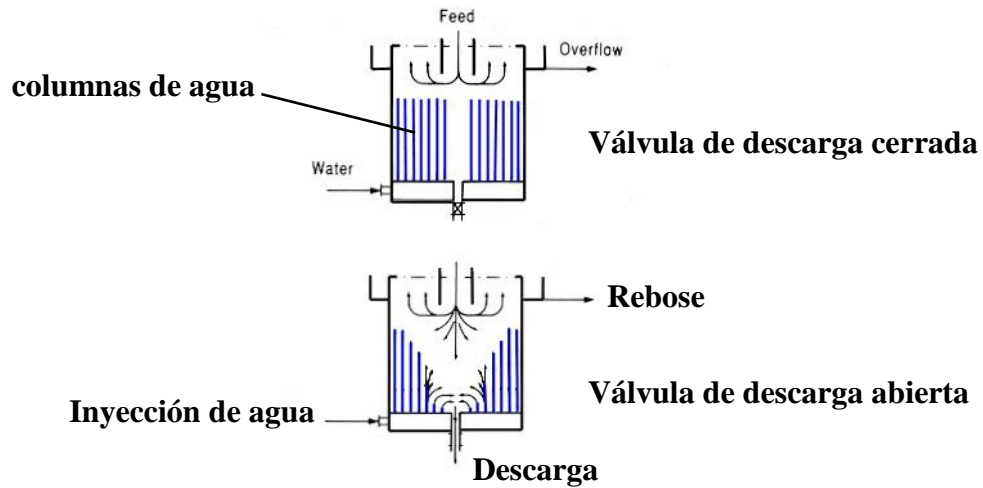


Fig. 7.20: Principio de funcionamiento de un clasificador convencional (Cortesía de Carpcó).

Clasificador hidráulico múltiple:

Consiste en una cuba con una serie de compartimentos. El producto a clasificar circula sobre cada compartimento (ver figura 7.21).

Cada compartimento presenta un doble fondo mediante una chapa perforada que permitirá el paso de agua a presión. Estas perforaciones irán decreciendo a lo largo de los diferentes compartimentos y van a influir en la velocidad ascendente de las columnas de agua; influyendo en el corte del material.

La pulpa densa o los granos son evacuados por orificios centrales controlados por válvulas de aguja; válvulas que activan la apertura según la densidad existente en el compartimento.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Por los orificios centrales abandonarán el compartimento aquellas partículas cuya velocidad de sedimentación sea superior a la velocidad ascendente del agua.

Existen mirillas o ventanas para comprobar que la operación se realiza satisfactoriamente sin acumulación de granos sobre la chapa perforada.

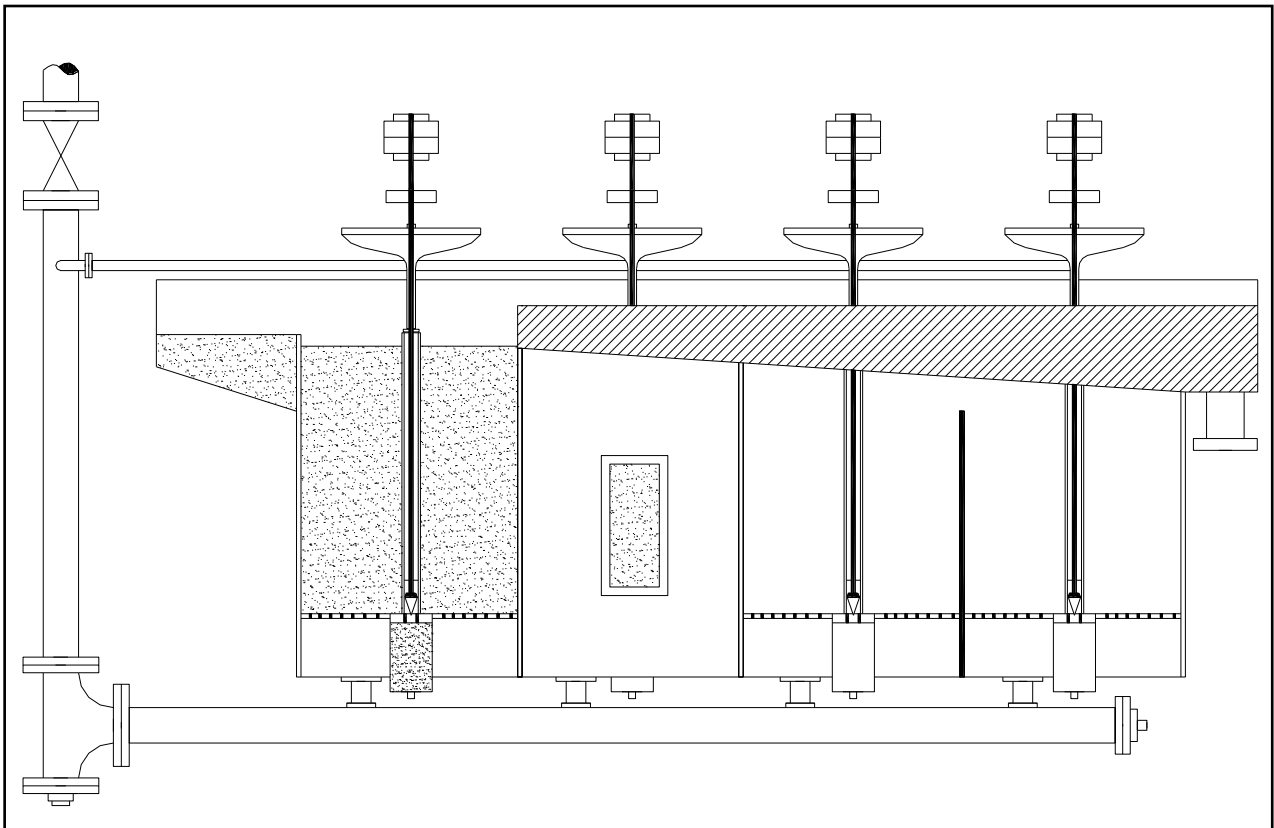


Fig. 7.21: Clasificador multicelda tipo Fahrenwald.

La densidad de cada compartimento se ve modificada una vez que se ha producido el asentamiento de las diferentes fracciones granulométricas, actuando este cambio de densidad sobre un dispositivo electromecánico

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

que enviará la señal correspondiente a la electroválvula de aguja para que ésta automáticamente abra.

Señalar que además de la variación sobre la velocidad ascendente del agua, también hay un aumento en la superficie de decantación; factor que también contribuye al tipo de corte obtenido.

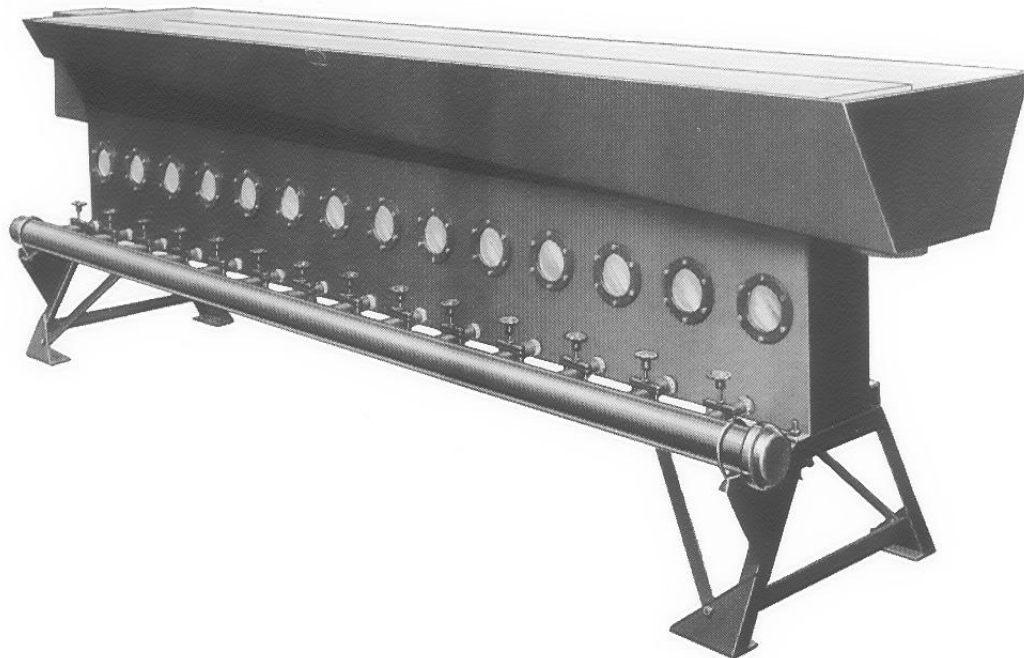


Fig. 7.22: Clasificador multicelda de sedimentación obstaculizada
(Cortesía de Deister (LMC International))

También existen actualmente clasificadores multicelda en los que se combinan compartimentos con inyección de agua con aquellos en los que la sedimentación es libre y depende principalmente del tamaño de la superficie de decantación (ver figura 7.23)

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Los compartimentos con inyección de agua suelen ser los 2 o 3 primeros para evitar que se evacuen partículas finas con los gruesos como consecuencia de las turbulencias que se producen.

Estos equipos proporcionan una clasificación adecuada para tamaños que van desde los **6 mm** hasta valores de **micras** y capacidades de hasta **400 t/h**.

Estos equipos se emplean en plantas para la obtención de arenas que deben ajustarse a granulometría muy estrechas.

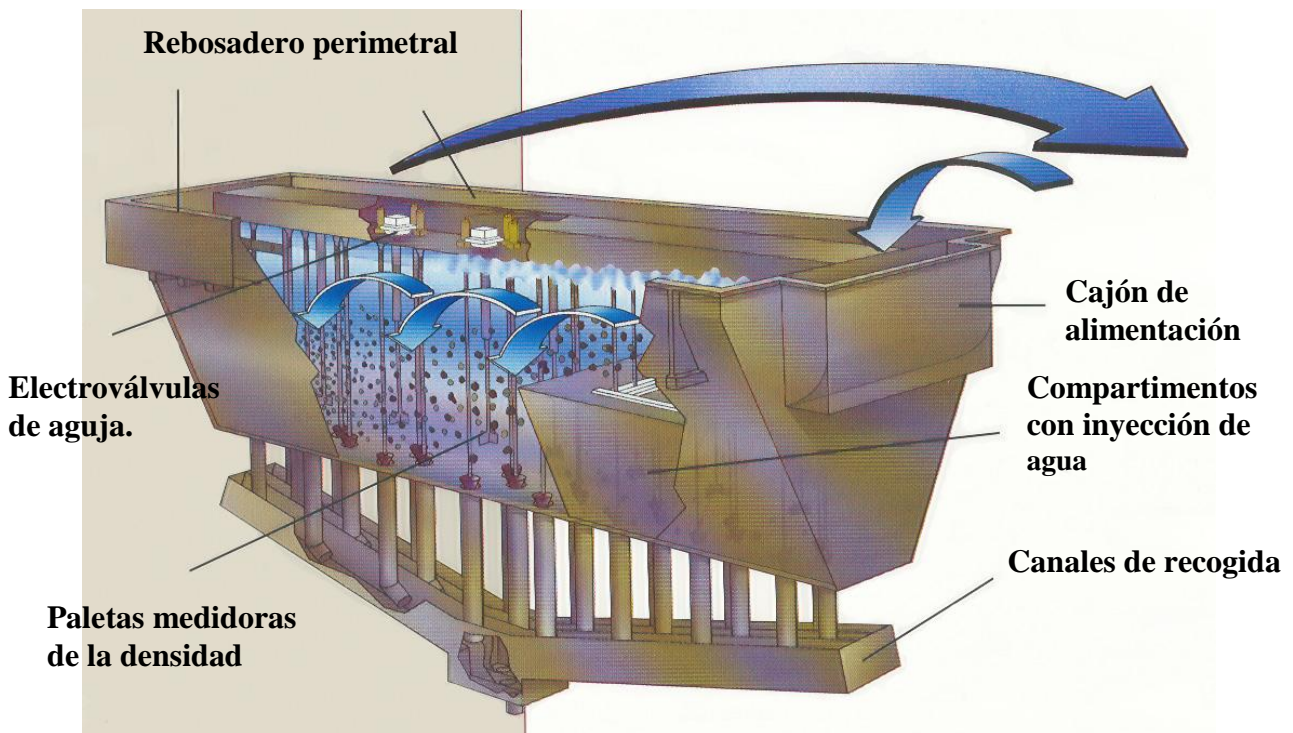


Fig. 7.23: Clasificador multicelda (Cortesía de Telsmith).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Hidro-Oscilador:

Es un clasificador de corte, provisto de una chapa perforada y alimentado en su parte central con pulpa y agua limpia.

La alimentación que recibe el equipo se reparte de una uniformemente sobre la superficie de chapa, como consecuencia del movimiento de oscilación de pequeña amplitud que recibe ésta.

El material es sometido a corrientes ascendentes de agua provocando que las partículas gruesas decanten sobre la superficie de la chapa y sean retiradas a través de su periferia hacia la cuba donde se encuentran los rastrillos.

Los finos por el contrario serán elevados por la corriente de agua y se retirarán por rebose.

En este equipo la arena se pone en suspensión mediante la agitación para formar el lecho fluidizado o lecho de arena movediza. En equilibrio la cantidad de arena decantada será igual a la cantidad de arena nueva.

Este equipo ofrece una gran precisión de corte (**200 μm**) pero es muy costoso, luego queda reservado para operaciones de clasificación que requieren un gran cuidado.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

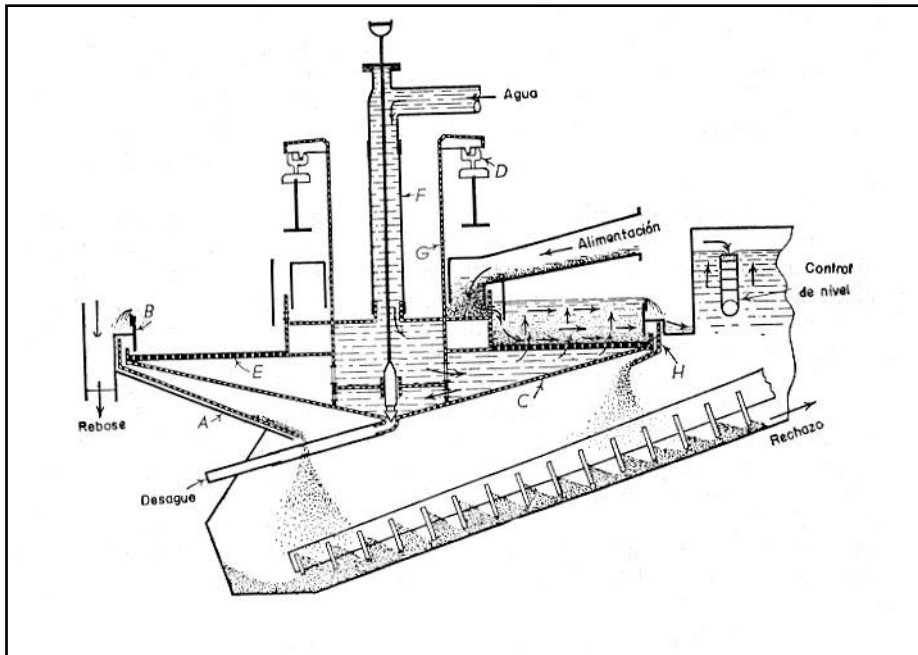


Fig. 7.24: Hidro-Oscilador (Blazy, 1977).

Separador Rheax:

Este equipo se presenta bajo la forma de una columna vertical tronco-cónica que se cierra hacia lo alto y que se une en su parte inferior a un depósito en forma de pera.

Estos separadores realizan cortes precisos y evitan la acumulación de partículas que tienen igual velocidad que el agua ascendente. Sin embargo, tienen el inconveniente de un alto consumo de agua y por consiguiente en reboses muy diluidos.

Clasificadores Hidráulicos Centrífugos:

Hidrociclones:

Los hidrociclones son unidades muy simples pero de una gran importancia en los procesos de la industria minera.

El rango práctico para la clasificación están entre las **40 μm** y las **400 μm** , aunque existen excepciones (5-1000 μm)

Se fabrican en una amplia variedad de diámetros desde los **13 mm** hasta los **900 mm**.

Su funcionamiento se basa en la clasificación que se produce aprovechando la aparición de grandes fuerzas de centrifugación (hasta de 10000 g's. en tamaños pequeños).

Los hidrociclones se fabrican en acero, imponiéndose en muchas aplicaciones los materiales plásticos. Interiormente están constituidos por revestimientos de desgaste de material cerámico, Nihard, poliuretano, neopreno, etc.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

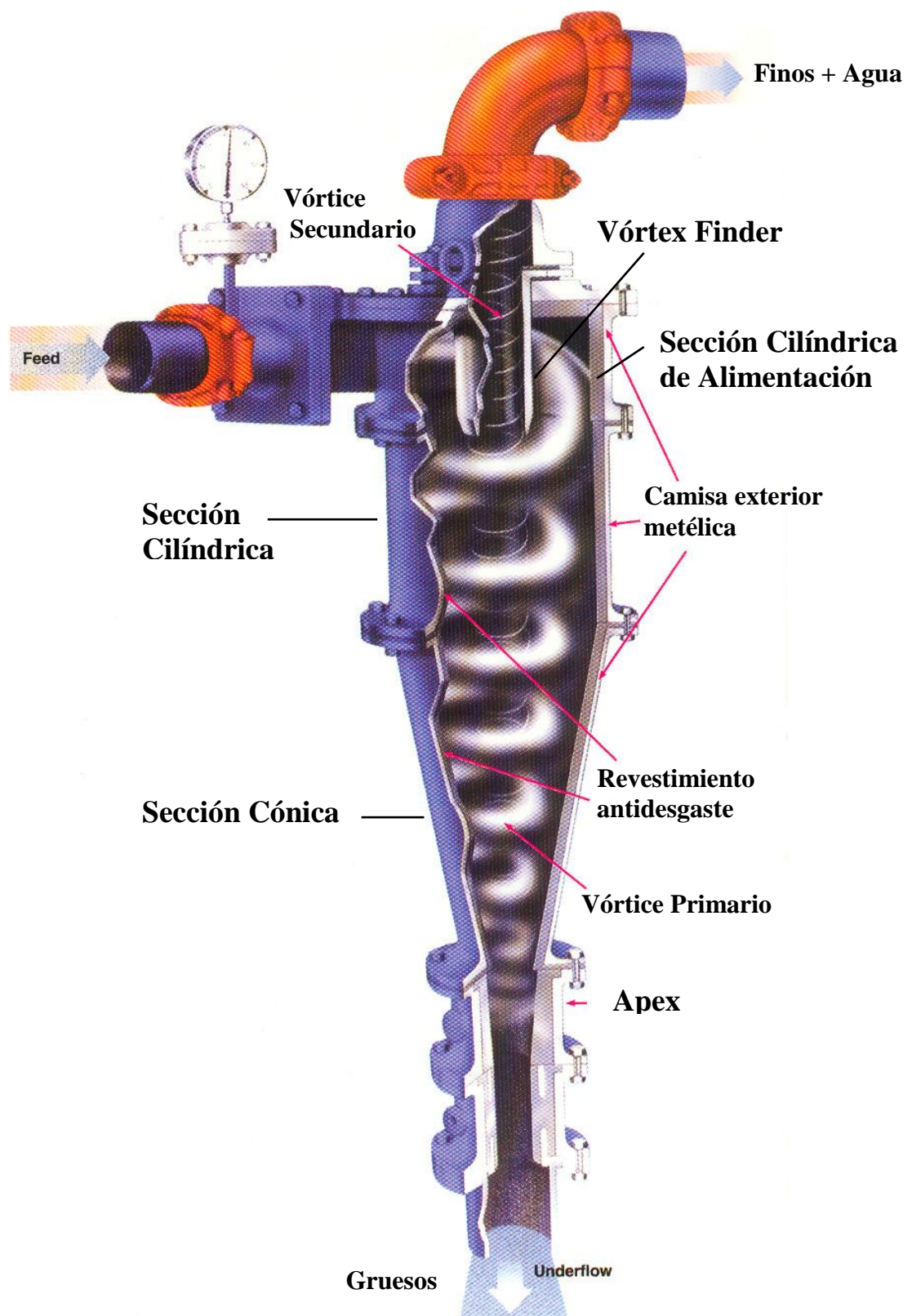


Fig. 7.25: Hidrociclón Estándar (Cortesía de Krebs Engineers).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Un hidrociclón estándar está constituido por las siguientes partes:

Sección cilíndrica de alimentación: Donde se encuentra la entrada tangencial de la alimentación y la localización del vortex. La pulpa es inyectada a alta presión formando una envolvente. Su diámetro interior nos define el diámetro del hidrociclón.

Sección cilíndrica intermedia: Esta cámara es del mismo diámetro que la sección cilíndrica de alimentación. Su función es la de alargar el equipo e incrementar el tiempo de retención del material en su interior. Su longitud suele ser del 100 % del diámetro del ciclón.

Sección cónica: Esta sección presenta un ángulo entre 10 y 20 grados y su función es la misma que la anterior.

Apex: Es la terminación de la sección cónica y debe ser de tamaño adecuado, para que los gruesos sean expulsados sin taponamientos.

Vórtex Finder: Es la boquilla a través se expulsan los finos o rebose y la mayor parte del agua. Debe extenderse por debajo de la entrada de la alimentación para que no se produzca **cortocircuito**. Su diámetro suele ser un 35 % del diámetro del ciclón.

La alimentación se puede realizar tangencialmente o con forma de involvente.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

El principio de funcionamiento de un hidrociclón es muy simple: Cuando la pulpa entra a la cámara de alimentación a altas presiones, ésta es obligada a seguir una trayectoria circular.

Las partículas se van a ver sometidas dos fuerzas principalmente, una centrífuga que las obliga a dirigirse hacia la pared y otra de arrastre debida a la viscosidad que las obliga a ir hacia el centro del ciclón.

El movimiento turbulento que se produce en el interior del ciclón va a generar dos vórtices, uno primario que transporta las partículas más gruesas o pesadas por la acción centrífuga, y otro secundario de menor presión y situado en la zona central, que elevará a las partículas más finas o ligeras que no han sido centrifugadas.

La descarga del hundido (underflow) puede ser en **espiral**, cuando el vórtice de aire se encuentra sólo a nivel del vortex y el ciclón trabaja como espesador (70 % de sólidos); o en forma de **paraguas** y entonces la columna de aire va desde el apex al vortex y el ciclón funciona como clasificador (40-60 % de sólidos)

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Centrifugadoras:

Estos equipos están muy extendidos en multitud de procesos como eliminación de agua, impurezas, clasificación, etc.

Son equipos semejantes a un clasificador de tornillo de tal forma que la sedimentación gravitatoria se sustituye por una sedimentación forzada a través de importantes fuerzas centrífugas, alcanzándose los 400 g's.

Estos equipos tienen un campo de aplicación importante en aquellos cortes granulométricos donde los hidrociclones están limitados (granos inferiores a **10 μm**).

Uno de los primeros diseños fue la centrifugadora Bird y actualmente son muchos los fabricantes que suministran estos equipos (Bird, Dorr-Oliver, Broadbent, Humboldt, Westfalia, etc.).

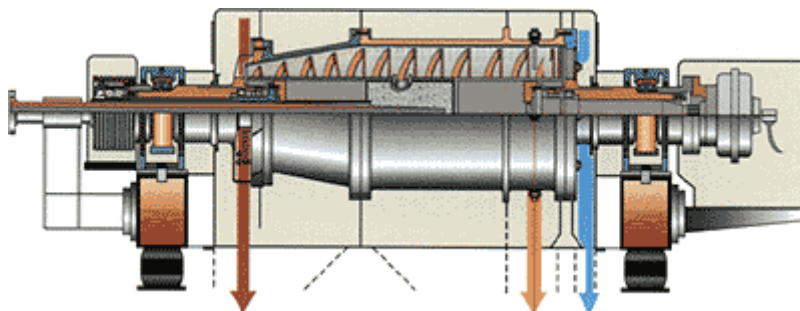


Fig. 7.26: Corte de una centrifugadora (Cortesía Andritz).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Bowl Detail



Fig. 7.27: Detalle del rotor con el tornillo adosado y las entradas de alimentación (Cortesía Andritz).

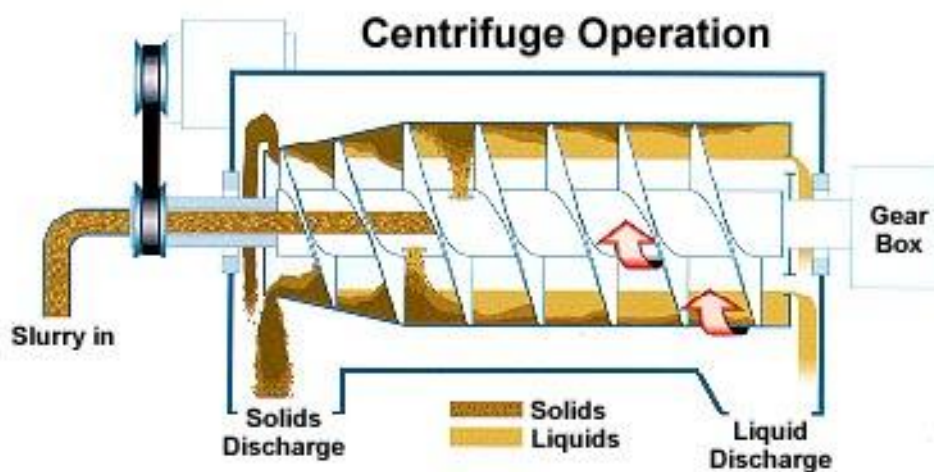


Fig. 7.28: Esquema de una operación de centrifugación (Cortesía Andritz).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

El producto que queremos clasificar se introduce a través del rotor, el cual dispone de unas salidas por las que la alimentación entrará en la cámara de centrifugación (Ver figura 7.27).

La cámara de centrifugado está limitada por un cilindro tronco-cónico que gira a una velocidad elevada. Las partículas gruesas o pesadas son sometidas a elevadas fuerzas centrífugas que las desplazará hacia la pared interna del cilindro, donde serán arrastradas por la acción del tornillo, que gira a una velocidad del 2 al 6 % menor y en el mismo sentido que la cuba, y que las expulsará por uno de los extremos.

Las partículas finas o ligeras serán extraídas por el otro extremos junto con el líquido como rebose.

Clasificadores Neumáticos:

La clasificación por aire o neumática tiene un campo limitado en preparación de minerales, pues exige que los productos estén muy secos para poder llevarse a cabo, siendo este campo: la industria del carbón, el cemento y aquellos minerales que no exigen etapas posteriores y/o previas por vía húmeda.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Criba Despolvoreadora:

Se emplean para el despolvoreado de los carbones brutos, el tamaño de corte está comprendido entre 0.3 y 0.7 mm.

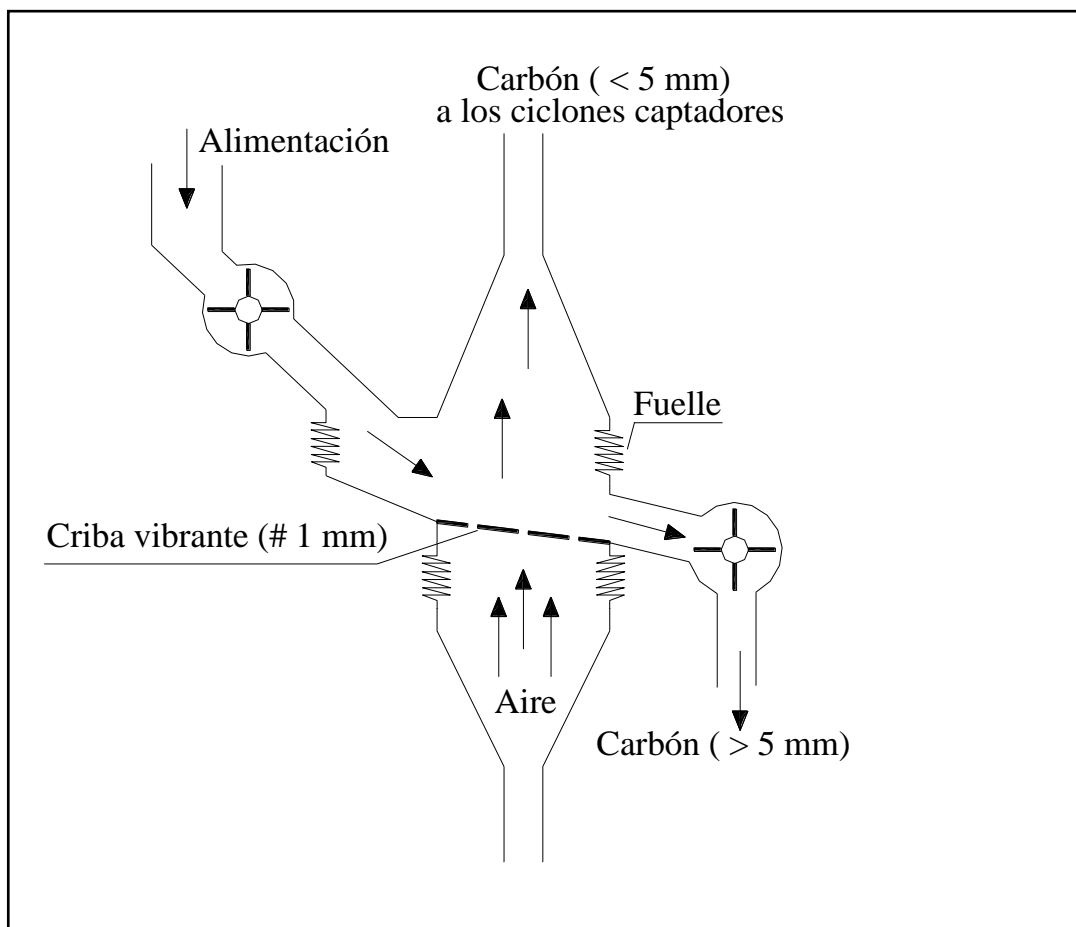


Fig. 7.29: Criba Despolvoreadora Neumática.

El equipo se alimenta de un carbón que hay que despolvorear. Este carbón cruza una corriente de aire vertical cuya velocidad ascendente es igual que la velocidad de caída de un grano de carbón de 0.5 mm.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

El producto a clasificar es transportado a través de la corriente de aire por una criba vibratoria de 1 mm de abertura de malla. La corriente de aire impedirá a los granos con tamaños entre 0.5 y 1 mm pasar a través de la criba.

Los fuelles aseguran la estanqueidad entre el cajón de cribado y la campana superior.

Separadores Dinámicos:

De este grupo de clasificadores el más característico es el separador **Whizzer**, que mejora la eficiencia que proporcionan los ciclones de aire, combinando el efecto de la centrifugación y el efecto de corrientes de aire ascendentes.

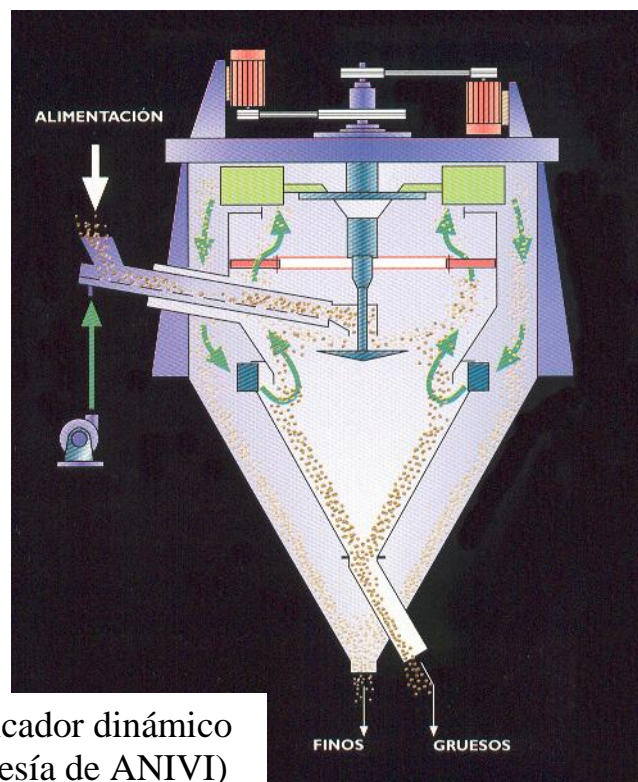


Fig. 7.30: Clasificador dinámico (Cortesía de ANIVI)

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Consta de dos conos coaxiales entre los cuales circula una corriente de aire en circuito cerrado provocada por un ventilador situado en la parte superior. El cono interior está interrumpido con el fin de garantizar el circuito de aire.

El producto que se va a clasificar se deposita sobre un disco giratorio distribuidor. Sobre estos granos se ejercerán fuerzas centrífugas y fuerzas ascendentes, de tal forma que aquellos granos que sean lo suficientemente finos o ligeros ascenderán por la parte de arriba y serán recogidos a través de las paredes del cono exterior.

Los granos gruesos que sufren la acción centrífuga no pueden ser elevados y son llevados hacia las paredes del cono interno sobre las que caen por gravedad.

Estos equipos disponen de unos deflectores o álabes que permitirán orientar el flujo de aire.

Actualmente existen numerosas variaciones en cuanto a la forma de alimentar estos equipos, salida de los finos, forma de crear la corriente de aire o la disposición de los álabes.

Los separadores dinámicos permiten cortes entre 10 y 50 μm . El principal campo de aplicación es la clasificación en la industria del cemento.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

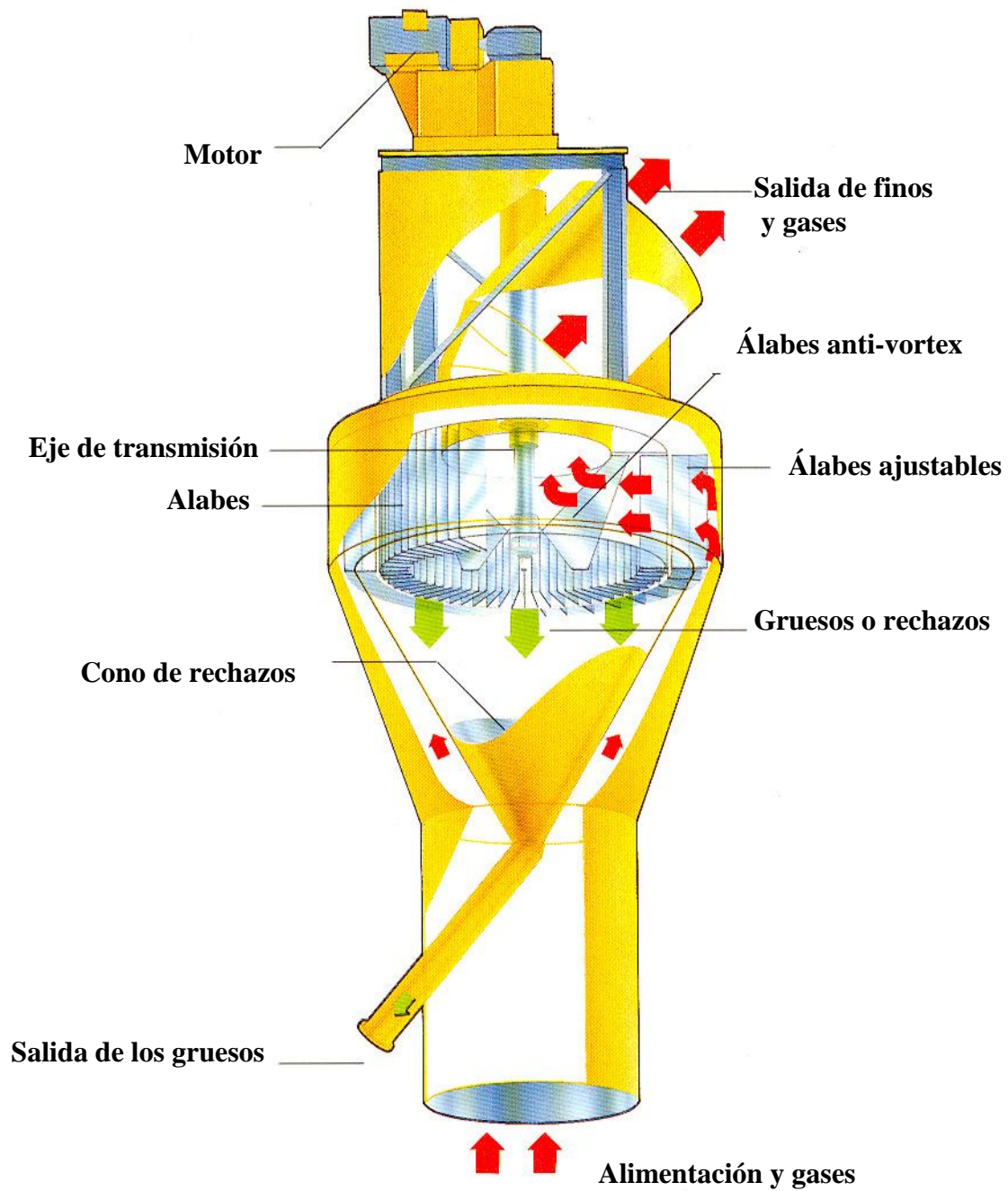


Fig. 7.31: Separador Dinámico (Cortesía de FCB).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

7.5. Rendimiento y Eficacia de la Clasificación.

Con los datos obtenidos en el laboratorio a partir de las muestras, conoceremos los siguientes parámetros que tiene cierta analogía con los empleados para obtener el rendimiento del cribado:

- A = Peso de la alimentación, en ton/h.
- P = Peso del rebose (“paso”), en ton/h.
- R = Peso del hundido (“rechazo”), en ton/h.
- m = Dimensión de la abertura de malla por la cual *pasa* un **95 %** del *rebose* (p_{95}).
- a = Porcentaje (%) de la **alimentación** cuyo tamaño de partícula es **menor** que m .
- p = Porcentaje (%) del **rebose** cuyo tamaño de partícula es menor que m .
- r = Porcentaje (%) del **hundido** cuyo tamaño de partícula es menor que m .

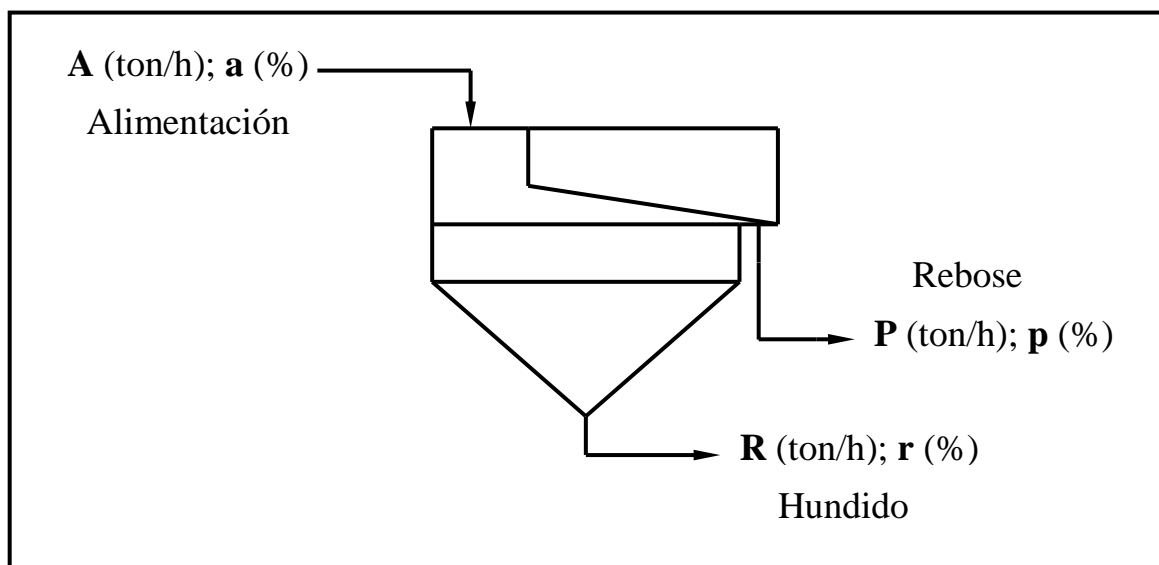


Fig. 7.32: Esquema del balance de masa de un clasificador.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Rendimiento de clasificación:

Su expresión matemática es:

$$E = \frac{P \cdot p}{A \cdot a} \cdot 100 = \frac{p \cdot (a - r)}{a \cdot (p - r)} \cdot 100 \quad (7.16)$$

Donde p no va a alcanzar el valor de 100; como ocurría en el cribado, pues parte de los sobretamaños pueden irse por el rebose (P.e.: partículas gruesas ligeras).

Eficacia de clasificación:

Se suele emplear el término eficacia de la clasificación, para conocer el grado de rendimiento que se consigue en una operación de clasificación determinada. Es decir, la cantidad de partículas de dimensiones inferiores al tamaño de corte que forman parte de la alimentación a un clasificador que realmente se obtienen a través del rebose como producto clasificado.

La expresión matemática es:

$$E_c = \frac{(p - a) \cdot (a - r)}{a \cdot (100 - a) \cdot (p - r)} \cdot 10000 \quad (7.17)$$

Tanto el rendimiento como la eficacia suelen variar entre 40-60 %.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Eficacia de clasificación del hundido:

Nos va a indicar la cantidad de granos o partículas de tamaño superior de m que se obtienen en el hundido.

$$e_h = 100 - r \quad (7.18)$$

Donde r viene expresado en porcentaje (%).

Curva de Partición:

Otra forma de representar la eficacia de un clasificador es mediante una curva de partición o curva Tromp.

Se obtiene relacionando el porcentaje de la fracción de alimentación en peso recogida en el hundido, situada en ordenadas, frente al tamaño de partícula correspondiente a dicha fracción, en abscisas.

El punto de corte o tamaño de corte (d_{50}) se define como aquel punto de la curva de partición que le corresponde un 50 % de la fracción de alimentación en peso obtenida en la descarga para una determinada dimensión de partícula o tamaño d_{50} .

La pendiente de la sección central de la curva nos va a indicar el grado de eficacia de la operación de clasificación, siendo ésta más elevada cuando mayor pendiente tenga este tramo.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Existe un parámetro que nos mide numéricamente lo anterior denominado **Imperfección** (I) y viene expresado como:

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2 \cdot d_{50}} \quad (7.19)$$

Experimentalmente se sabe que el líquido que se obtiene por el hundido o descarga, arrastra consigo toda una gama de tamaños de partícula en la misma proporción que la fracción de líquido de la alimentación que se recoge. Por lo que no toda la fracción de alimentación obtenida en la descarga se obtendrá exclusivamente por fenómenos de clasificación (fenómeno de cortocircuito).

De lo anterior se deduce que será necesario corregir la curva de partición obteniendo otra denominada curva de partición corregida, y por supuesto obteniendo un d_{50c} corregido.

La curva de partición sin corregir, se corrige utilizando la siguiente ecuación:

$$y_c = \frac{y - W}{1 - W} \quad (7.20)$$

Donde:

y_c = Fracción de la alimentación corregida para un determinado tamaño, en %.

y = Fracción real de la alimentación, en %.

W = Fracción de líquido de alimentación recogida en la descarga, en %.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Nota: Las fracciones anteriores son en peso (ton/h).

7.6. Dimensionado de un Clasificador.

Clasificador de Corriente Horizontal:

En este tipo de clasificadores el principal parámetro va a ser la longitud del clasificador (L), puesto que las partículas con tamaños superiores al tamaño de corte (D) deben tener el tiempo suficiente de residencia para evitar salir por rebose.

Tiempo que deberá ser suficiente para que las partículas superiores a D recorran la distancia vertical (H) coincidente con la lámina líquida de rebose (ver figura 7.33).

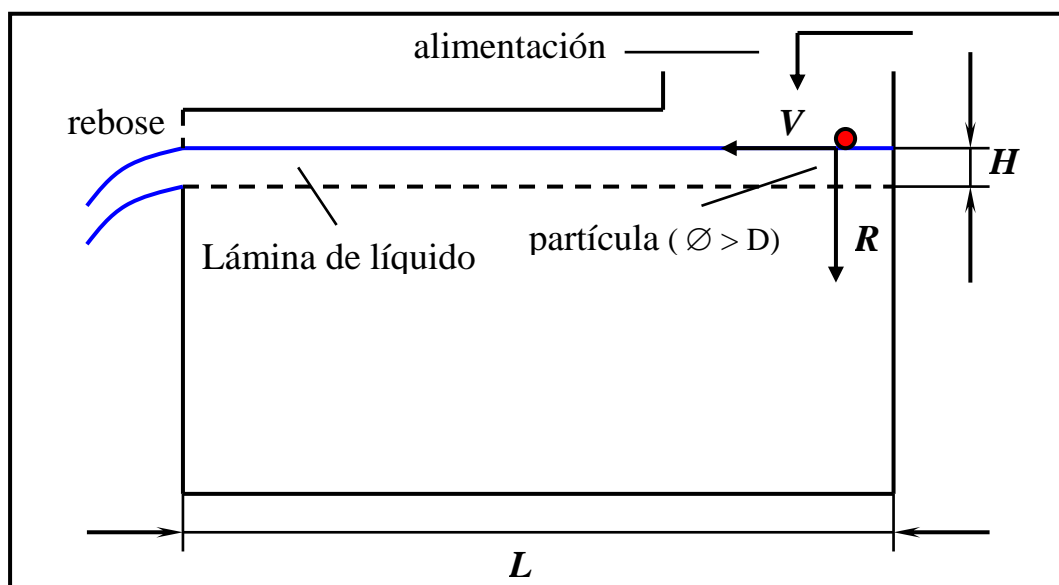


Fig. 7.33: Esquema de un clasificador de corriente horizontal.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Considerando la siguiente notación:

Q = Caudal.

R = Velocidad de asentamiento de la partícula.

V = Velocidad del flujo.

W = Ancho del clasificador.

S = Área de rebose.

t = tiempo mínimo requerido.

Utilizando la notación anterior se cumple lo siguiente:

$$S = W \cdot H \quad (7.21)$$

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{W \cdot H} \quad (7.22)$$

Se tiene garantía de que una partícula de tamaño superior al tamaño de corte (D), no saldrá por rebose si recorre una distancia vertical igual a $2.6 \cdot H$.

De lo anterior se deduce que el tiempo mínimo de permanencia en el clasificador será:

$$e = R \cdot t \Rightarrow t \geq \frac{2.6 \cdot H}{R} \quad (7.23)$$

En ese tiempo t , la partícula se desplaza horizontalmente una distancia L igual a:

$$L = V \cdot t \rightarrow t = \frac{L}{V} \quad (7.24)$$

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Luego igualando las dos expresiones anteriores nos queda que:

$$\frac{L}{V} \geq \frac{2.6 \cdot H}{R} \quad (7.25)$$

Sustituyendo V por el valor de la expresión 7.22, quedaría como:

$$\frac{L \cdot W \cdot H}{Q} \geq \frac{2.6 \cdot H}{R} \rightarrow \boxed{L \geq \frac{2.6 \cdot Q}{R \cdot W}} \quad (7.26)$$

Longitud del Clasificador

Si queremos determinar el **Área de Sedimentación**:

$$L \cdot W = A \geq \frac{2.6 \cdot Q}{R} \quad (7.27)$$

Hidrociclón:

Durante la operación de un hidrociclón intervienen multitud de variables interrelacionadas que van a influir en la eficacia o rendimiento de la clasificación.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Por ello, a la hora de diseñar o seleccionar un equipo se tiende a especificar ciclones que sean capaces de absorber las capacidades que se le exigen, pero al mismo tiempo ajustando aquellos diámetros y aberturas para que las descargas y los derrames sean correctos.

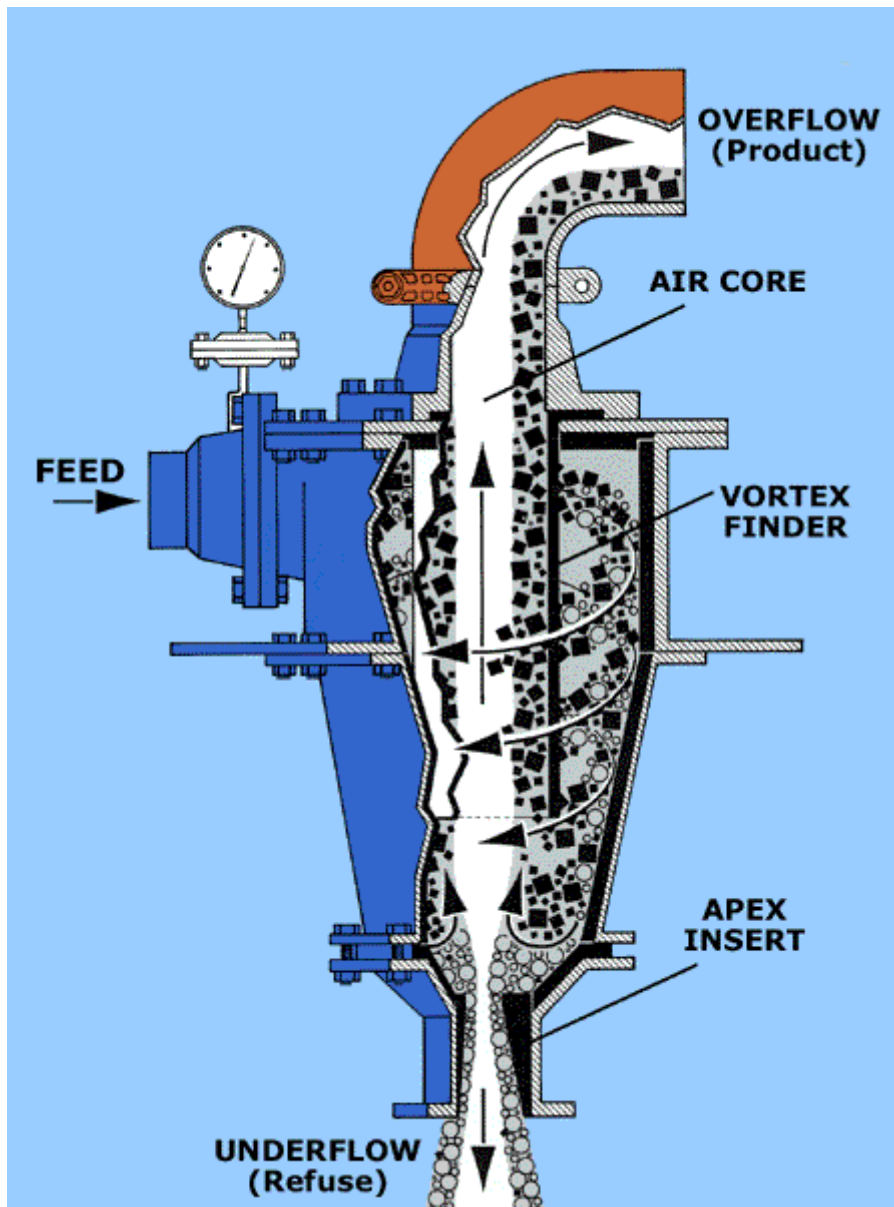


Fig. 7.34: Hidrociclón en operación (Cortesía de Krebs Engineers).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Vamos a pasar revista de las expresiones más conocidas para el diseño de los ciclones en función del punto de corte o separación (d_{50}).

Fórmula de *Dahlstrom* (1954)

$$d_{50} = \frac{13.7 \cdot (D_o \cdot D_i)^{0.68}}{Q^{0.53} \cdot (\rho_s - \rho_l)^{0.5}} \quad (7.28)$$

Siendo: d_{50} = Punto de corte (μm).

D_o = Diámetro del derrame (cm).

D_i = Diámetro de la entrada (cm).

Q = Caudal del ciclón (m^3/h).

ρ_s = Densidad relativa de los sólidos.

ρ_l = Densidad relativa de los líquidos.

Esta expresión sólo es aplicable a ciclones de diámetro muy pequeño y con pulpas muy diluidas.



Fig. 7.35: Hidrociclones de pequeño diámetro (Cortesía de Krebs Engineers).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Fórmulas de *Plitt* (1976)

Para ciclones de gran diámetro y que operan con un alto contenido en sólidos, existe la siguiente expresión que ofrece el rendimiento de un ciclón con bastante exactitud.

$$d_{50c} = \frac{14.8 \cdot D_c^{0.46} \cdot D_i^{0.6} \cdot D_o^{1.21} \cdot e^{0.063 \cdot V}}{D_u^{0.71} \cdot h^{0.38} \cdot Q^{0.45} \cdot (\rho_s - \rho_l)^{0.5}} \quad (7.29)$$

- Donde: d_{50c} = Punto de corte corregido (μm).
 D_c = Diámetro interior del ciclón (cm).
 D_i = Diámetro de la entrada (cm) *.
 D_o = Diámetro del vortex finder (cm).
 D_u = Diámetro del apex (cm).
 V = Porcentaje volumétrico de sólidos en la alimentación.
 h = Distancia desde el fondo del vortex finder hasta la parte superior del orificio de descarga (apex) (cm).
 Q = Caudal del ciclón (m^3/h).
 ρ_s = Densidad de los sólidos (gr/cm^3).
 ρ_l = Densidad del líquido (gr/cm^3).

(*) Para entradas **no circulares**: $D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$, Donde A = Área de la sección transversal en cm^2 .



BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Para obtener el caudal de un ciclón en función de la caída de presión a lo largo del mismo tenemos la siguiente expresión matemática:

$$Q = \frac{0.021 \cdot P^{0.56} \cdot D_c^{0.21} \cdot D_i^{0.53} \cdot h^{0.16} \cdot (D_u^2 + D_o^2)^{0.49}}{e^{0.0031 \cdot V}}$$

(7.30)

Donde, P es la caída de presión a lo largo del ciclón en kPa (1 PSI = 6.895 kPa).

Fórmulas de *Mullar y Jull* (1978)

Para diseños previos se desarrollaron unas expresiones basadas en los datos experimentales obtenidos con ciclones estándar Krebs. Relacionando las variables de operación con el punto de corte corregido (d_{50c}).

El **ciclón estándar Krebs** cumple las siguientes características:

- El área de entrada equivale a un 7 % de la sección transversal de la cámara de alimentación.
- El vortex finder posee un diámetro equivalente a un 35-40 % del diámetro del ciclón.
- El apex posee un diámetro no inferior del 25 % del diámetro del vortex finder.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.



Fig. 7.36: Ciclón Krebs estándar
(Cortesía Krebs Engineers).

La ecuación para el punto de corte o separación es:

$$d_{50c} = \frac{0.77 \cdot D_c^{1.875} \cdot e^{(-0.301 + 0.0945 \cdot V - 0.00356 \cdot V^2 + 0.0000684 \cdot V^3)}}{Q^{0.6} \cdot (\rho_s - 1)^{0.5}} \quad (7.31)$$

El caudal máximo de pulpa que podrá manejar el ciclón será:

$$Q = 9.4 \cdot 10^{-3} \cdot D_c^2 \cdot \sqrt{P} \quad (7.32)$$

Donde Q viene expresado en m³/h y P en kPa.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

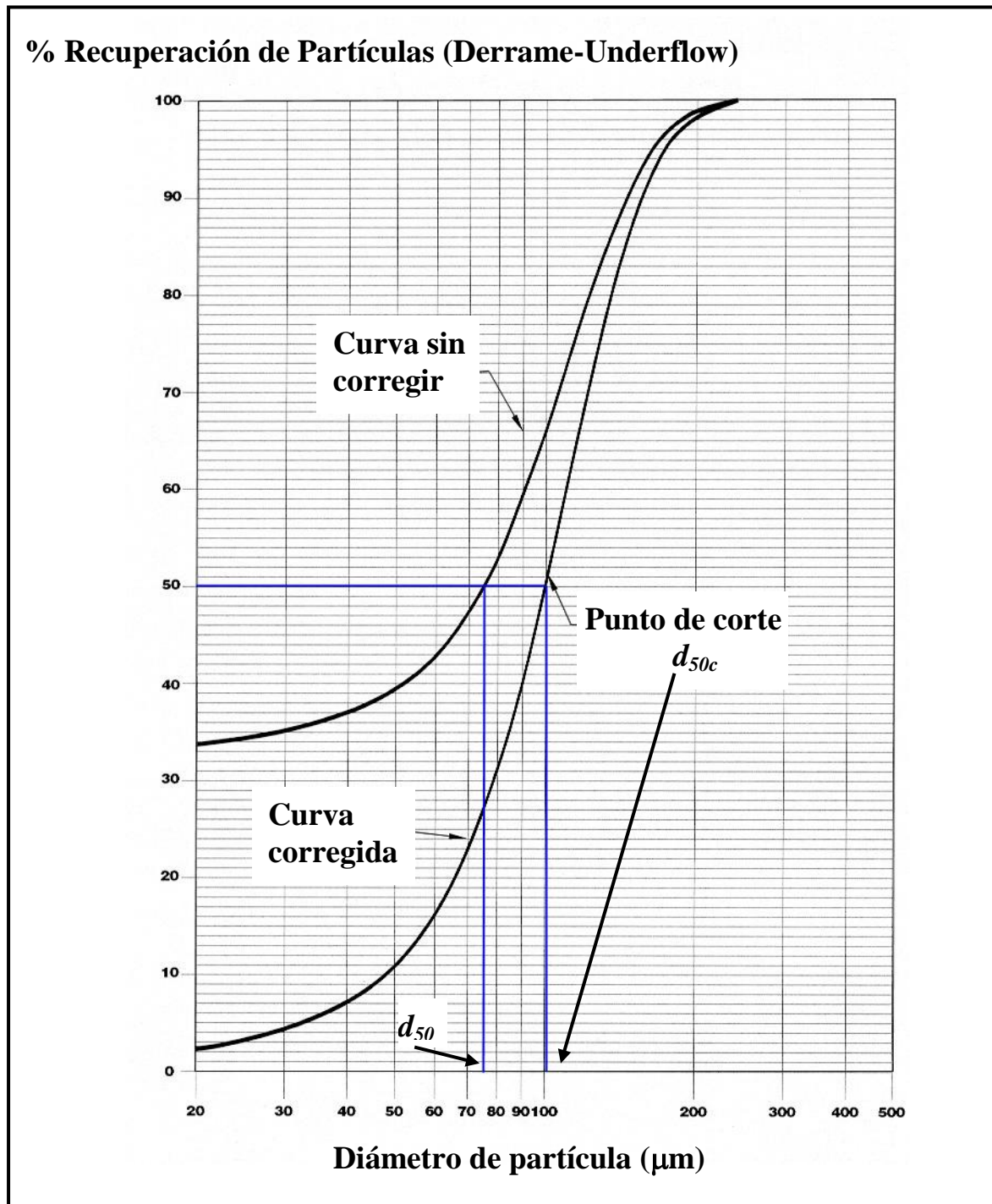


Fig. 7.37: Curva Tromp para un hidrociclón

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Fórmulas de R.A. Arterburn (1976)

Arterburn establece unas condiciones estándar de hidrociclonado o condiciones base:

- **Líquido de alimentación:** Agua a 20° C.
- **Sólidos de alimentación:** Partículas esféricas de densidad igual 2.65 t/m³.
- **Concentración en la alimentación:** Menos del 1 % de sólidos en volumen.
- **Caída de presión** (diferencia de presión entre la presión de alimentación y la presión de rebose (overflow)): 69 kPa (10 PSI).
- **Geometría del ciclón:** Correspondiente a un ciclón estándar (descrito anteriormente).

Propone una expresión matemática para el cálculo de la curva de clasificación reducida. Curva que junto con los sólidos que han sufrido by-pass, predice la distribución de tamaños para el producto obtenible en el hundido de forma completa:

$$R_r = \frac{e^{4x} - 1}{e^{4x} + e^4 - 2} \quad (7.33)$$

Definiendo las siguientes variables:

R_r = Recuperación en el derrame (underflow)
a un tamaño de partícula específico.

x = diámetro de partícula/diámetro de partícula D_{50c} .

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

A continuación exponemos una tabla que nos relaciona la distribución de tamaño en el hundido para un tamaño en micras especificado y el factor que hay que multiplicarlo para obtener el d_{50c} requerido o de aplicación.

% paso del hundido para un tamaño determinado (Ø)	Factor multiplicador (K)
98.8	0.54
95.0	0.73
90.0	0.91
80.0	1.25
70.0	1.67
60.0	2.08
50.0	2.78

Tabla 7.2: Relación del D_{50c} sobre la distribución de tamaños en el hundido.

$$d_{50c}(\text{aplicación}) = K \cdot \varnothing \text{ (}\mu\text{m)} \quad (7.34)$$

El $d_{50c}(\text{aplicación})$ está relacionado con el $d_{50c}(\text{base})$, que es el tamaño que logra clasificar un ciclón estándar en condiciones estándar, y será el valor numérico que se emplee para obtener el diámetro del hidrociclón (D). Ambos tamaños de corte están relacionados por la siguiente expresión:

$$d_{50c}(\text{aplicación}) = d_{50c}(\text{base}) \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \quad (7.35)$$

Donde C_1 , C_2 , C_3 son factores de corrección.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

Los factores de corrección surgen ante la necesidad de corregir las condiciones de operación de nuestros equipos, que van a ser normalmente diferentes a las establecidas como normales o estándar:

1. Influencia de la concentración de sólidos en la pulpa de alimentación (C_1).

El nivel de sólidos que aparece en la alimentación es muy importante de cara a la separación que se pretende. Así cuanto mayor sea éste, más gruesa será la clasificación obtenida por rebose (overflow), es decir el d_{50} aumenta debido a la mayor densidad de la pulpa y mayor viscosidad.

La influencia de la concentración de los sólidos se puede determinar por la ecuación:

$$C_1 = \left(\frac{53 - V}{53} \right)^{-1.43} \quad (7.36)$$

Donde:

V = Porcentaje de sólidos en volumen en la alimentación del ciclón.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

2. Influencia de la caída de presión a lo largo del ciclón (C_2).

La caída de presión a través del hidrociclón, es una medida de la energía que se ha puesto en juego para alcanzar la clasificación.

Se recomienda rangos de caída entre 40 y 70 kPa para reducir exigencias energéticas y problemas de desgastes.

A elevadas caídas de presión la clasificación es más fina, y a viceversa la clasificación será más gruesa (aumento del d_{50c}).

El factor de corrección C_2 se obtiene a través de:

$$C_2 = 3.27 \cdot \Delta P^{-0.28} \quad (7.37)$$

Siendo ΔP = Caída de presión en kPa.

3. Influencia de la densidad de los sólidos y los líquidos sobre la clasificación (C_3).

Esta influencia es especialmente significativa en aplicaciones minerales donde la densidad del mineral es muy alta con respecto a la ganga, mejorándonos el efecto de dicha densidad la liberación de las distintas especies minerales.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 7: SELECCIÓN POR TAMAÑOS. CLASIFICACIÓN.

El factor de corrección como consecuencia de esta influencia lo podemos obtener de la siguiente ecuación:

$$C_3 = \left(\frac{1.65}{\rho_s - \rho_l} \right)^{0.5} \quad (7.38)$$

Siendo:

ρ_s = densidad de los sólidos (gr/cm³).

ρ_l = densidad del líquido. Normalmente es agua, (1 gr/cm³).

Una vez aplicados los diferentes factores a la expresión 7.35 y obtenido el $d_{50c}(\text{base})$, estaremos en condiciones de determinar el diámetro del ciclón:

$$d_{50c}(\text{base}) = 2.84 \cdot D_{\text{ciclón}}^{0.66} \quad (7.39)$$

Con el diámetro del ciclón y otros parámetros conocidos (caída de presión, caudal total requerido, etc.), podremos entrar en los gráficos que proporcionan los fabricantes y obtener el caudal unitario, n° de unidades, dimensión del ápice o salida inferior (ápex), etc.