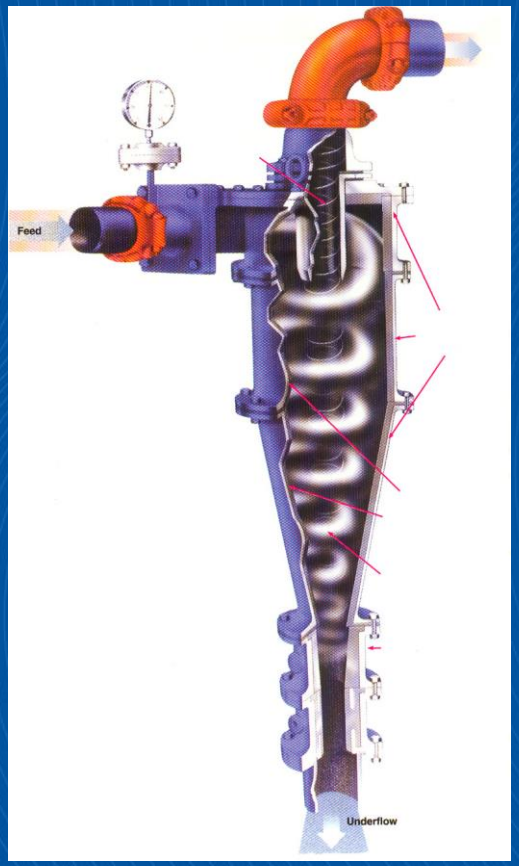
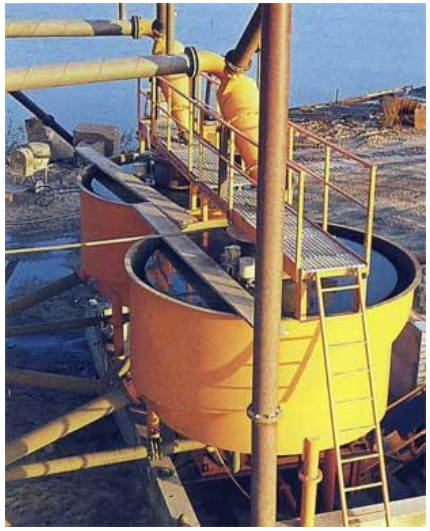
Universidad Politécnica de Cartagena

TECNOLOGÍA MINERALÚRGICA



TEMA 7: CLASIFICACIÓN INDIRECTA

Universidad Politécnica de Cartagena



7 CLASIFICACIÓN INDIRECTA

7.1. Introducción.
7.2. Principio Teórico de la Clasificación por Equivalencia.
7.3. Campos de Aplicación.
7.4. Tipos de Clasificadores Industriales.
7.5. Clasificadores Hidráulicos de Sedimentación Simple.
7.6. Clasificadores Hidráulicos de Contracorriente.
7.7. Clasificadores Hidráulicos Centrífugos.
7.8. Clasificadores Neumáticos.
7.9. Rendimiento y Eficacia de la Clasificación Hidráulica.
7.10. Dimensionado de un Clasificador Hidráulico

Introducción

Introducción

- **Cuando la separación por tamaños está por debajo de los límites prácticos de empleo de los equipos de cribado se recurre a la clasificación por equivalencia.**

- **Por lo tanto, estos equipos reciben el nombre de clasificadores hidráulicos o por equivalencia.**

- **La clasificación ya no se realiza teniendo en cuenta el tamaño como única variable, sino que en el proceso influirán, además, otras como la forma y la densidad.**

- **De esta forma, se podrán clasificar en la misma salida de productos granos finos densos y más gruesos y ligeros, o bien, finos y redondeados y más gruesos y laminares.**

- **Las partículas que aparecen en el mismo producto siendo de distinto diámetro, se dicen que tienen el mismo tamaño "equivalente" a efectos de clasificación.**

Introducción

- **Los equipos que se emplean someten a las partículas a la acción de una corriente que someterá al material a un arrastre diferencial según su tamaño, forma y densidad.**

- **A escala industrial, esta corriente podrá estar originada por un flujo de agua, y así se tendría la clasificación hidráulica; o de aire, donde se tendría a la clasificación neumática.**

- **La clasificación indirecta o por equivalencia tiene su aplicación para la separación de partículas minerales inferiores a 3 mm (1 µm – 3 mm).**

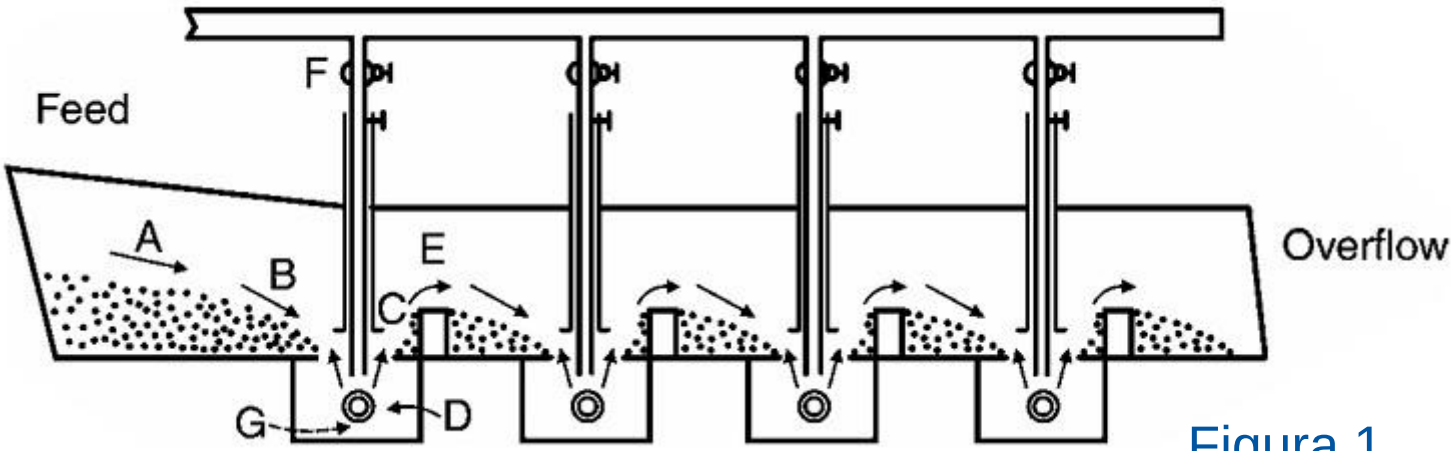


Figura 1

Terminología

- **En los clasificadores se van a presentar, principalmente, dos corrientes que se diferenciarán por las velocidades de asentamiento de las partículas:**

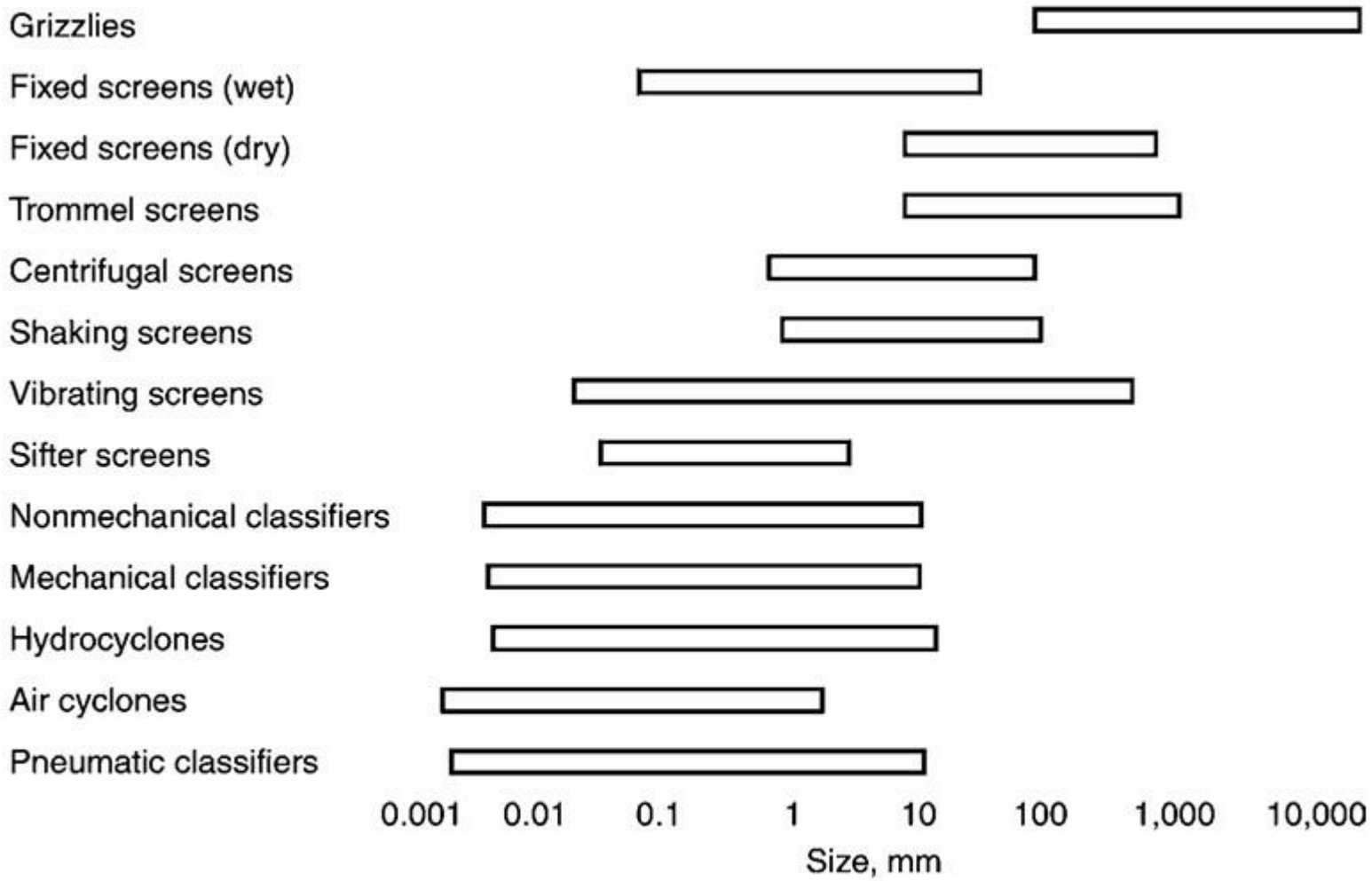
- **Partículas con velocidades altas de asentamiento: pesados, arenas, productos de la descarga inferior o sobretamaños.**

- **Partículas con velocidades bajas de asentamiento: ligeros, lamas, rebose, derrame o productos de la descarga inferior.**

Aplicaciones

- **Obtención de una separación en dos fracciones: Una relativamente fina y la otra relativamente gruesa; clasificación muy fina.**
- **Realización de una concentración de partículas más finas y pesadas 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 la salida de los productos del proceso de molienda en circuito cerrado.**

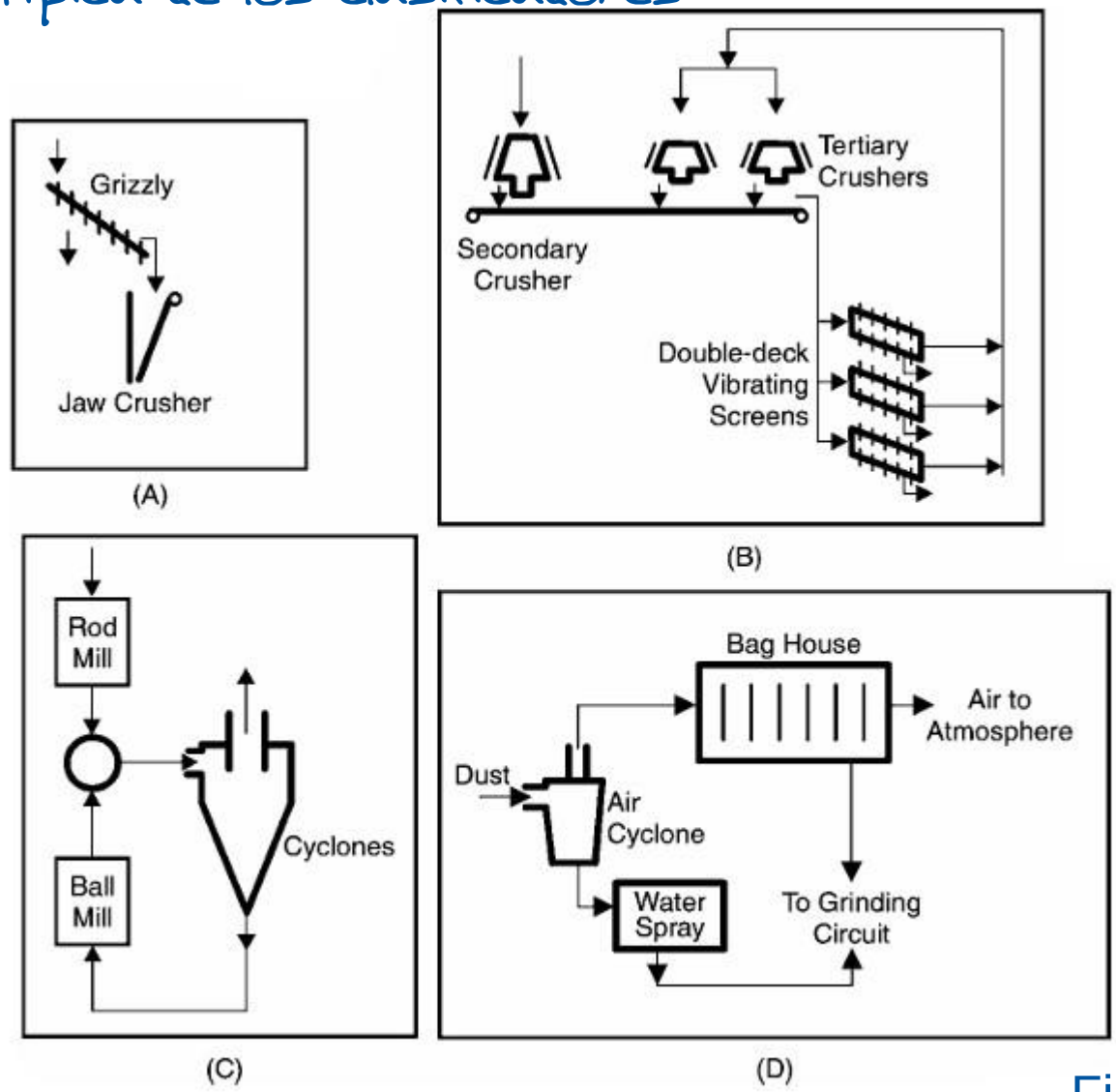
Rango típico de tamaños para los diferentes equipos clasificadores



Typical size ranges treated by common size-separating devices

Figura 2

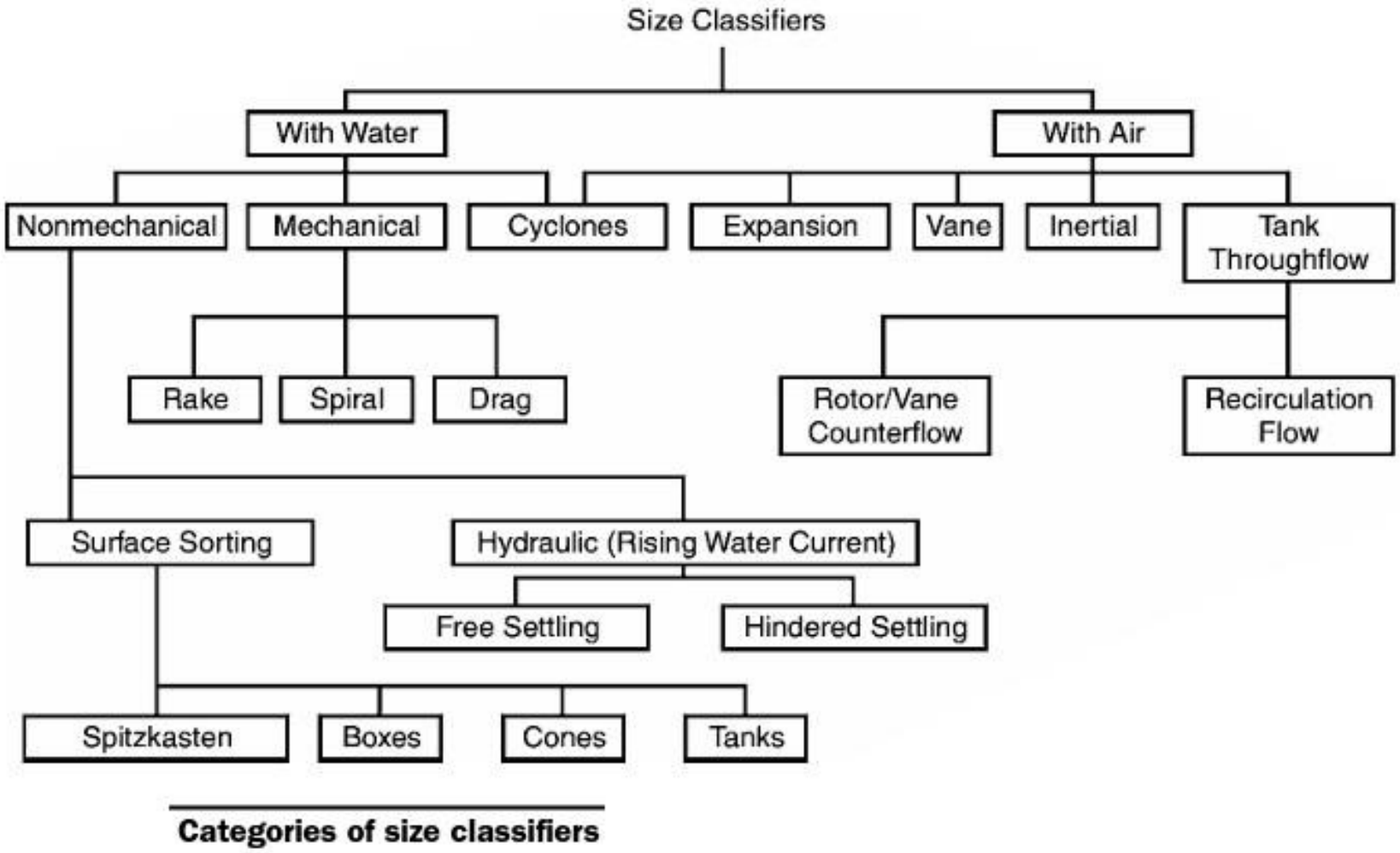
Instalación típica de los clasificadores



Applications of sizing devices

Figura 3

Agrupación de los equipos de clasificación por equivalencia



Categories of size classifiers

Figura 4

Principio Teórico de la Clasificación Indirecta

Fundamentos

- **Una partícula sólida, en el vacío, caerá con una velocidad que aumenta de forma indefinida e independiente de su densidad y tamaño.**

- **En un medio viscoso (aire o agua), la partícula en caída libre sufrirá una resistencia al movimiento que aumentará según aumenta su velocidad.**

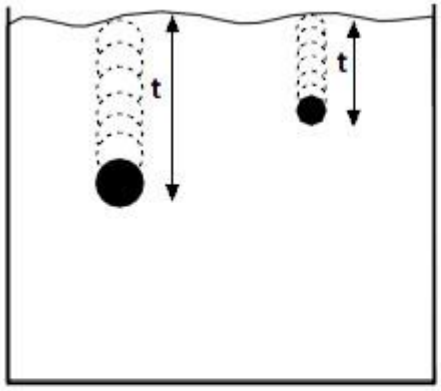
- **A cabo de un tiempo de caída, se va a llegar a un equilibrio de fuerzas (gravedad y resistencia que ofrece el fluido), donde la partícula habrá alcanzado la velocidad terminal o límite (a = 0).**

- **La resistencia al avance que opone el fluido dependerá de la rapidez del descenso. Así, para minerales con velocidades bajas de caída, la resistencia que surge es la viscosa.**

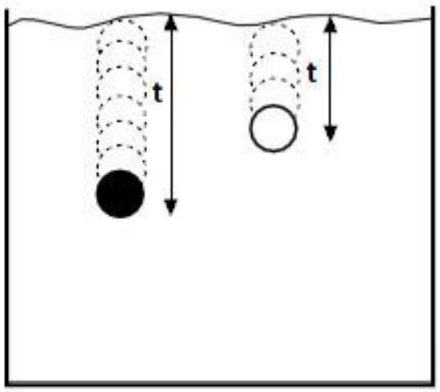
- **Por el contrario, para minerales con velocidades altas de caída la resistencia que se produce es la turbulenta, como resultado del desplazamiento que sufre el fluido por la partícula mineral.**

- **Si los valores de la resistencia viscosa y turbulenta son significativos, la partícula alcanzará rápidamente la velocidad límite.**

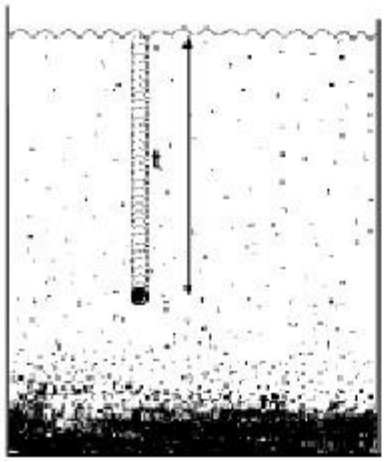
Fundamentos



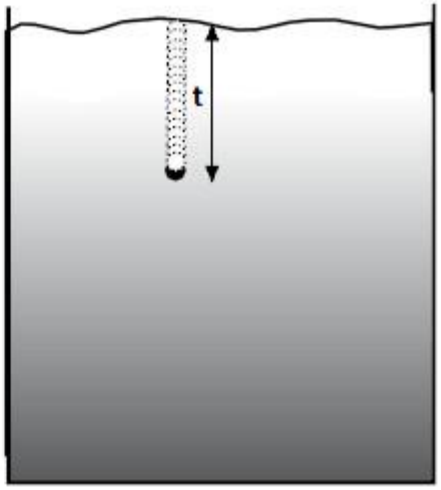
Las partículas gruesas se mueven más rápido que las finas a igual densidad.



Las partículas de alta densidad se mueven más rápido que las de baja densidad a igual tamaño.



Movimiento libre



Movimiento obstruido

Figura 5

- **Los clasificadores hidráulicos más simples consisten en una columna de separación en cuyo interior se crea un flujo ascendente (agua o aire) con una velocidad uniforme (V_f).**

- **Los granos de las diferentes especies minerales (mena y ganga) se introducen mezclados por la abertura de alimentación.**

- **La mezcla de partículas, una vez en contacto con el fluido, las diferentes partículas sedimentarán o subirán en base a que sus velocidades de sedimentación sean mayores (V_p) o menores (V_l), respectivamente, que la velocidad de ascenso del flujo.**

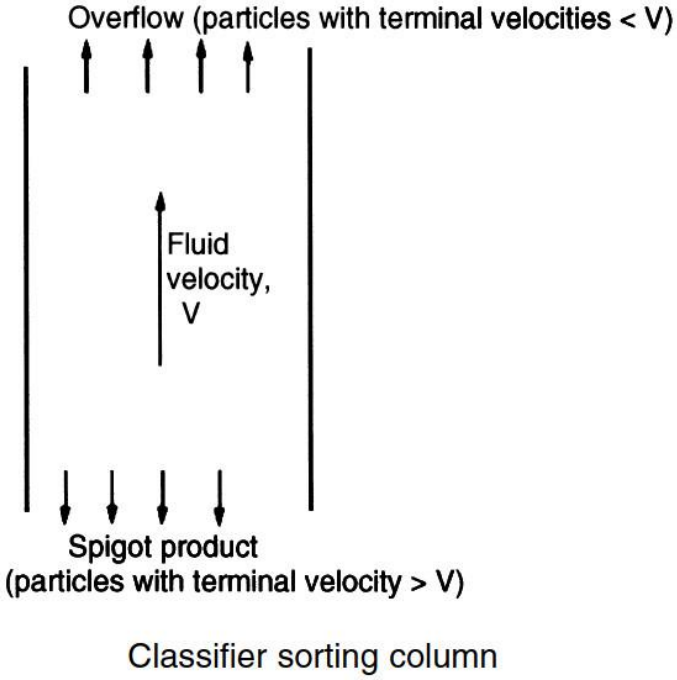


Figura 6

Clasificador hidráulico de columna

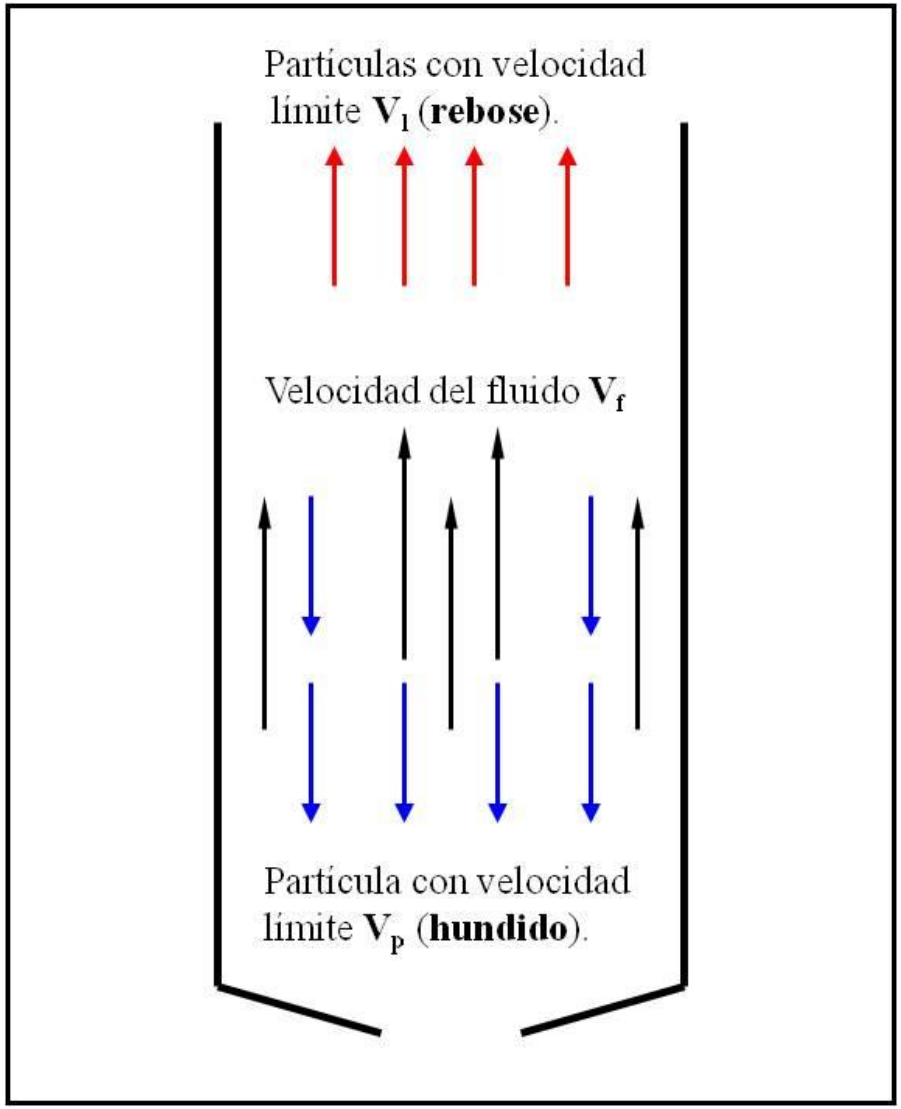


Figura 7

Clasificador hidráulico de columna

Sedimentación libre

- **Cuando una partícula desciende dentro de un fluido sin encontrar obstáculo por otras partículas, se dice existen condiciones de sedimentación libre.**

- **Sedimentación libre ocurrirá cuando las pulpas minerales contengan un porcentaje en peso de sólidos inferior al 15 %.**

- **Una partícula aislada dentro de un fluido se encontrará sometida a las siguientes fuerzas (Figura 8):**

  1. **Fuerza gravitatoria causada por el peso de la partícula.**

  2. **Fuerza de Arquímedes o flotante, como consecuencia del fluido desalojado por la partícula.**

  3. **Fuerza de arrastre o resistencia al avance que manifiesta el fluido cuando la partícula se desplaza en su caída.**

Sedimentación libre

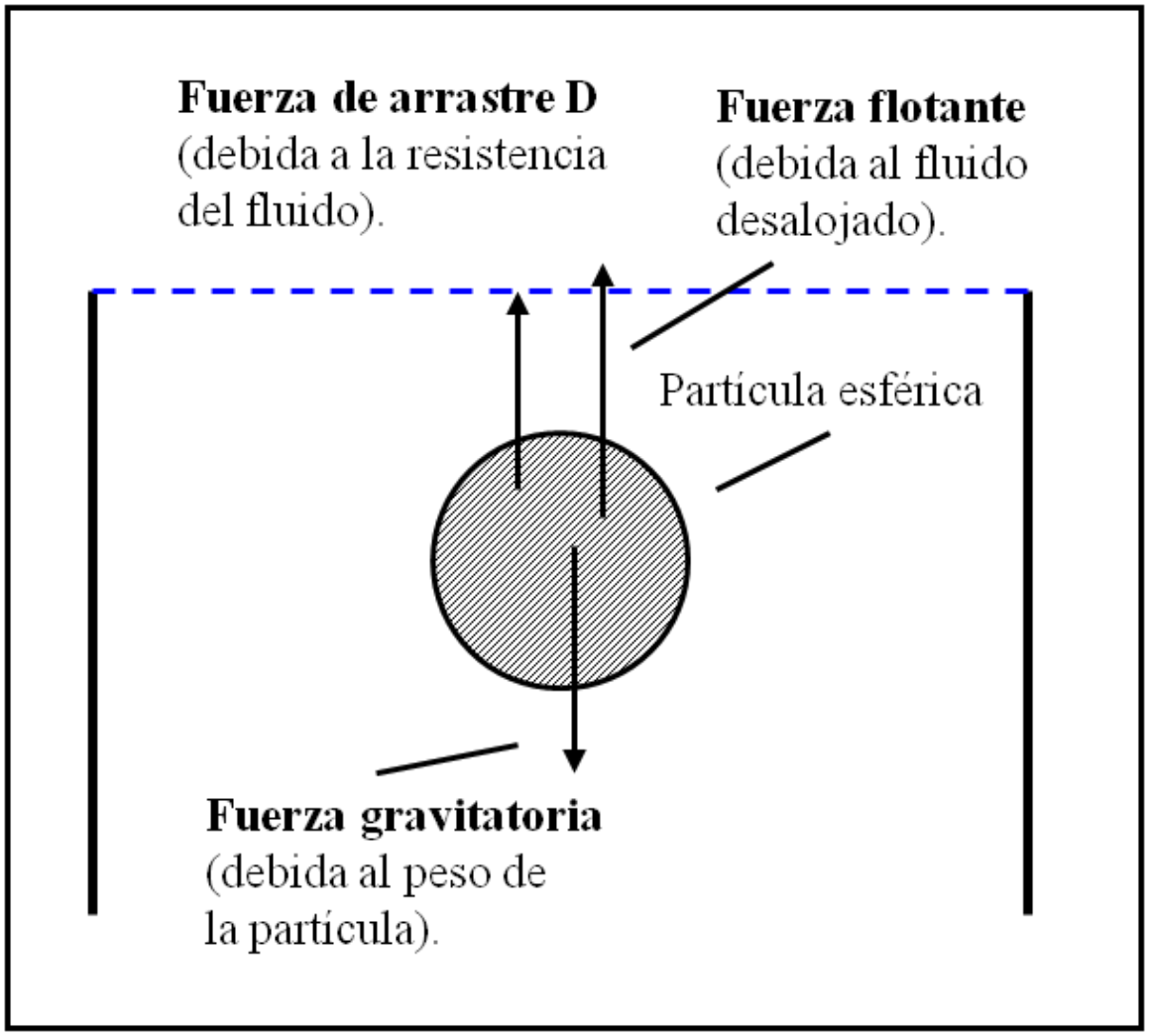


Figura 8

Partícula esférica en el interior de un fluido

Sedimentación libre

- **La expresión para el movimiento de dicha partícula será:**

$$m \cdot g - m' \cdot g - D = m \cdot \frac{dv}{dt}$$

Ecuación 1

Donde,

- ***m*** **= masa de la partícula esférica.**
- ***m'*** **= masa del fluido desalojado.**
- ***v*** **= velocidad de la partícula.**
- ***g*** **= valor de la aceleración gravitatoria.**

- **Cuando se alcanza una velocidad constante, la partícula se dice que desciende a velocidad terminal o límite, siendo la aceleración nula.**

Sedimentación libre

- **Si despejamos D de la ecuación 1, queda que:**

$$D = (m - m') \cdot g$$ Ecuación 2

- **Transformamos las variables de masa en densidades, conociendo que para el caso de una esfera:**

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

- **Ahora tendremos que la ecuación 2 se puede escribir como:**

$$D = \frac{\pi}{6} \cdot g \cdot d^3 \cdot \left(\rho_s - \rho_f \right)$$ Ecuación 4

- **Siendo, ρ_s la densidad de la partícula sólida, y ρ_f la densidad del fluido.**

Sedimentación libre

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

$$D = 3 \cdot \pi \cdot d \cdot \eta \cdot v$$

Ecuación 5

- **Siendo,**
  - **η = viscosidad del fluido.**
  - **v = velocidad límite de la partícula.**
- **Igualando la ecuación 4 y 5:**

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

Ecuación 6

- **Despejando de la ecuación (6) el valor de la velocidad límite queda:**

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

Ecuación 7

Ley de Stokes

- **Newton, propuso la fuerza de arrastre (D) debida principalmente a la resistencia turbulenta:**

$$D = 0.055 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot v^2 \cdot \rho_f$$

Ecuación 8

- **Ahora igualamos las ecuaciones (4) y (8) y despejamos la velocidad límite (v):**

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

Ecuación 9

Ley de Newton

Sedimentación libre

- La Ley de Stokes (régimen laminar) se aplicará a partículas inferiores a 50-100 µm.
- La Ley de Newton (régimen turbulento) se aplicará a partículas superiores a 3-5 mm.
- El resto estarán en el régimen de Allen.
- Se denominan partículas "isodromas", aquellas que siendo de diferente tamaño y densidad, tienen la misma velocidad límite en una situación concreta y por lo tanto se separarán juntas.
- Para establecer la relación entre sus diámetros en función de sus densidades, basta con igualar sus velocidades límites.
- Las ecuaciones (7) y (9) se pueden poner en notación simplificada:

$$v_{límite\,Stokes} = k_1 \cdot d^2 \cdot \left(\rho_s - \rho_f\right)$$ Ecuación 10

$$v_{límite\,Newton} = k_2 \cdot \sqrt{d \cdot \left(\rho_s - \rho_f\right)}$$ Ecuación 11

- **k_1 y k_2 son constantes y al término (ρ_s - ρ_f) se le denomina densidad efectiva.**

- **De las anteriores ecuaciones se extrae los siguiente:**

1. **La velocidad límite de una partícula en un fluido va a depender únicamente de la densidad y de su diámetro.**

2. **Dos partícula con la misma densidad, tendrá mayor velocidad límite aquella con diámetro mayor.**

3. **Entre dos partículas con el mismo diámetro, tendrá mayor velocidad límite aquella con mayor densidad.**

Relación de Sedimentación Libre

- **Ley de Stokes (régimen laminar):**

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

$$\frac{d_a}{d_b} = \sqrt{\frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_a - \rho_f}}$$

Ecuación 12

- **Teniendo,**
  - d_a **= diámetro de la partícula a.**
  - d_b **= diámetro de la partícula b.**
  - ρ **= densidad.**

Relación de Sedimentación Libre

- **Ley de Newton (régimen turbulento):**

- **Para dos partículas minerales que tienen la misma velocidad límite, obedeciendo condiciones turbulentas, la expresión será:**

$$\frac{d_a}{d_b} = \frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_a - \rho_f}$$

Ecuación 13

- **Teniendo,**
  - d_a **= diámetro de la partícula a.**
  - d_b **= diámetro de la partícula b.**
  - ρ **= densidad.**

- **De lo anterior se deduce que el efecto en la clasificación hidráulica debido a la diferencia de densidad entre las partículas minerales se verá amplificada para aquellos tamaños mayores.**

Relación de Libre Asentamiento

- **Ley General:**

- **La expresiones anteriores se pueden representar bajo una ecuación general que también considere aquellas partículas que no obedecen a condiciones de Stokes ni de Newton:**

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

Ecuación 14

- **Así para tamaños de partícula comprendidos entre 50 µm y 5 mm, el valor de *n* estará comprendido entre 0.5 y 1.**

Sedimentación obstaculizada

- El caso de la sedimentación libre no es frecuente en la clasificación industrial.
- Aunque si sean las condiciones adecuadas para la realización de análisis granulométricos finos por sedimentación, tales como los métodos de la pipeta de Andreasen o del elutriador.
- Lo habitual es que se empleen altas concentraciones de sólidos por lo que estaremos en condiciones de sedimentación obstaculizada, o asentamiento obstruido.
- Las expresiones pueden adaptarse a esta condición de sedimentación obstaculizada sustituyendo la densidad del fluido por la densidad de la pulpa.
- Se puede decir que se cumplen condiciones de sedimentación obstaculizada cuando el porcentaje de sólidos en peso dentro del fluido es superior al 15%.
- Van a generarse fenómenos de apiñamiento entre las partículas.

Sedimentación obstaculizada

- **La fuerza de arrastre (D) será debida a fuerzas resistentes de carácter turbulento (Ley de Newton).**

- **La expresión de la velocidad límite de una partícula en este tipo de medios será por lo tanto:**

$$v_{límite\,obstaculizada} = k \cdot \sqrt{d \cdot \left(\rho_s - \rho_p\right)}$$ Ecuación 15

- **Siendo, ρ_p, la densidad de la pulpa.**

- **La sedimentación obstaculizada va a favorecer la disminución de la influencia del tamaño, amplificando el efecto de la diferencia de densidad en los procesos de clasificación hidráulicos.**

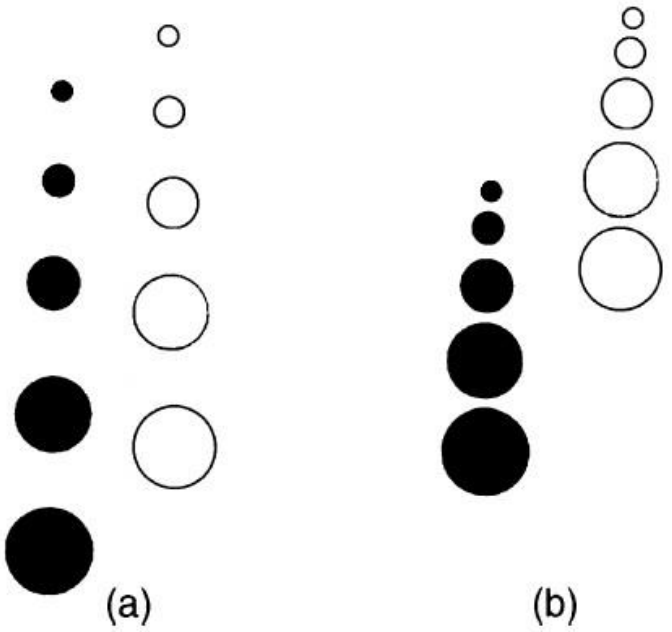
- **La relación de sedimentación obstaculizada es:**

$$\frac{d_a}{d_b} = \frac{\rho_b - \rho_p}{\rho_a - \rho_p}$$ Ecuación 16

Sedimentación obstaculizada

- **La relación de sedimentación obstaculizada siempre va a ser mayor que la relación de sedimentación libre en régimen turbulento (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.**



Classification by (a) free settling, (b) hindered settling

Figura 9

Sedimentación obstaculizada

- **Para crear condiciones de sedimentación obstaculizada, las partículas deben de estar únicamente rodeadas por una pequeña película de fluido (*comportamiento de arenas movedizas*), donde se generan tensiones superficiales que mantienen a las partículas unidas.**

- **En esta situación la mezcla de partículas se comporta como una suspensión perfecta donde no tiende a separarse.**

Tipos de obstaculización en un clasificador hidráulico de columna para crear condiciones de sedimentación obstaculizada

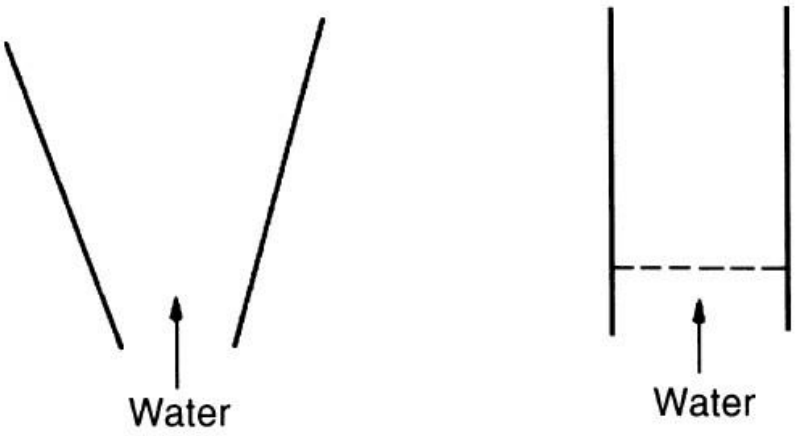
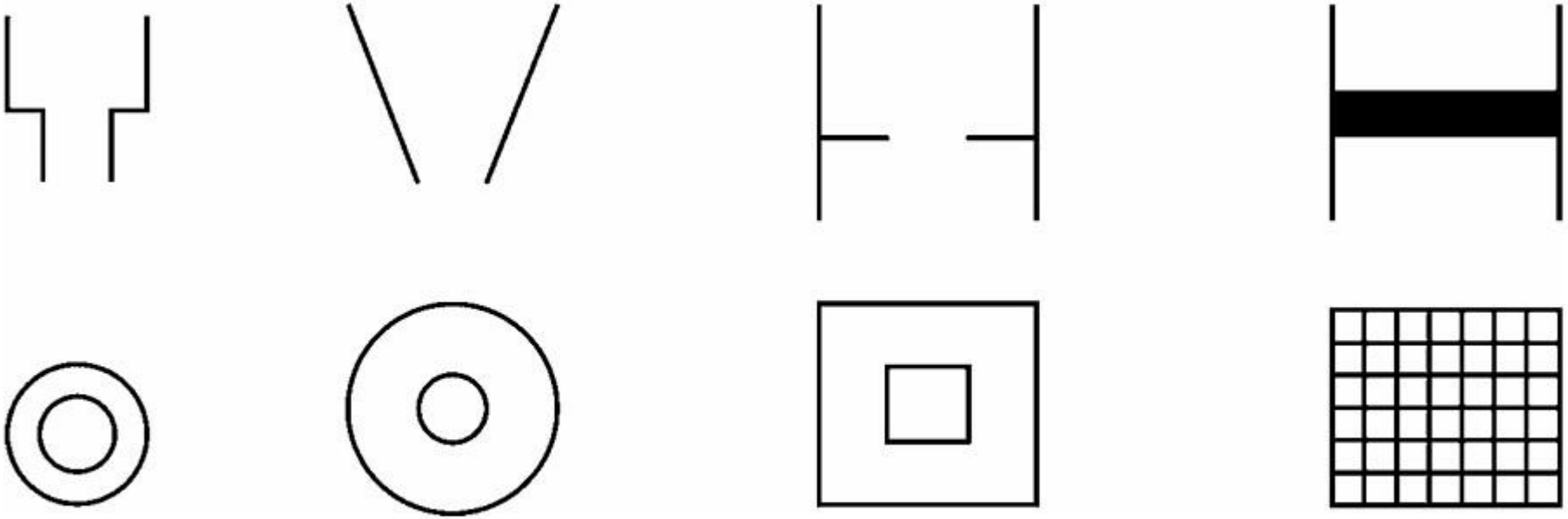


Figura 10 Teeter chambers

- **Las partículas tienen libertad de movimiento, pero al chocar con las partículas inmediatamente próximas, al final se ven obligadas a permanecer en el mismo sitio (comportamiento conocido en inglés como "*full teeter*").**

- **La masa actúa como líquido viscoso que podrá ser penetrado por partículas de mayor densidad, que descenderán obstaculizadas por la masa viscosa.**

Sedimentación obstaculizada



Constrictions for hindered settlers

Figura 11

Tipos de obstaculización en un clasificador hidráulico de columna para crear condiciones de sedimentación obstaculizada

Campos de Aplicación

Empleo Industrial de la clasificación por equivalencia

- **La clasificación por equivalencia, que emplea sólo la acción de la gravedad, va a ser interesante en aquellas aplicaciones donde hay que realizar cortes granulométricos que se mueven entre 50 µm y 2 mm.**

- **Cuando la clasificación por equivalencia (hidráulica o neumática) se apoya en la aceleración centrífuga, los cortes granulométricos pueden bajar a órdenes de algunas micras.**

- **Para el empleo de la clasificación hidráulica hay que estudiar el comportamiento que surge entre las partículas sólidas desde un punto de vista físico-químico, ya que la ocurrencia de características hidrofóbicas o el desarrollo de acciones electrostáticas disminuye la eficiencia de los clasificadores.**

- **Los clasificadores serán aptos en aquellas situaciones donde las partículas conservan su individualidad y no están sometidas a fuerzas diferentes de la acción gravitatoria o de la aceleración centrífuga.**

- **Los clasificadores por equivalencia dan altas capacidades de tratamiento y son relativamente económicos.**

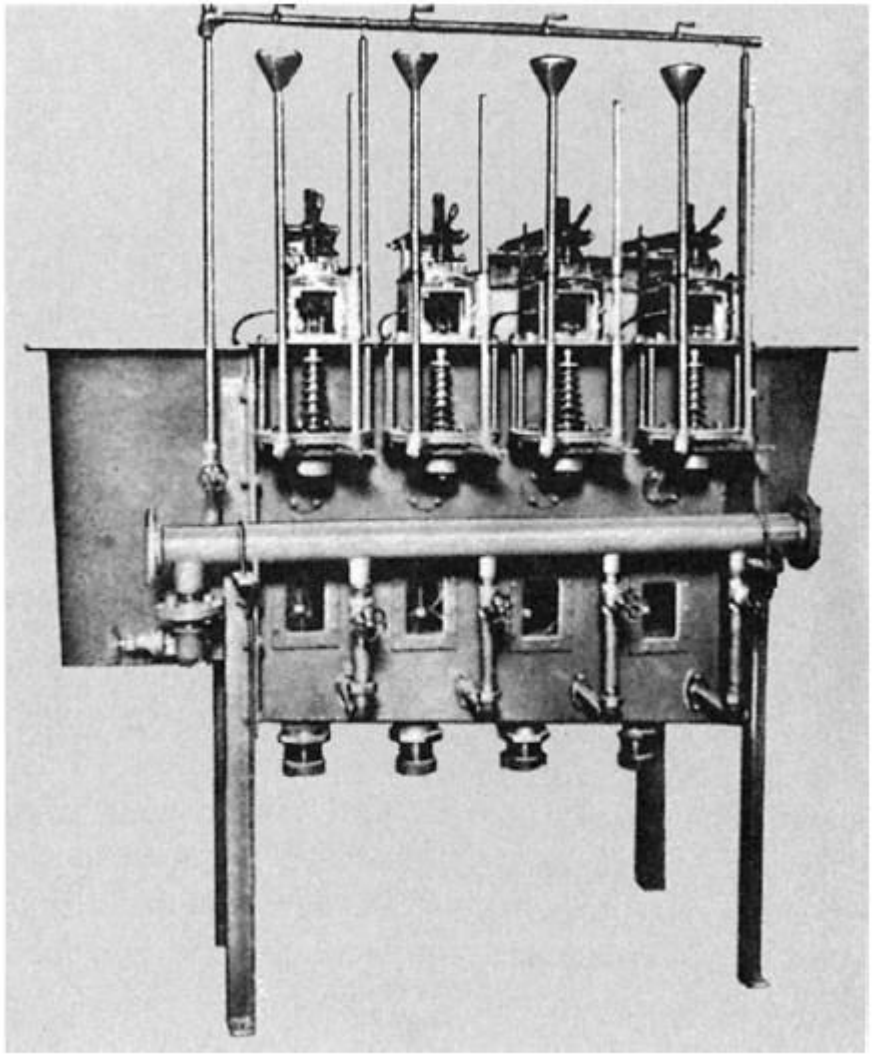
Tipos de Clasificadores Industriales

Clasificadores comúnmente empleados

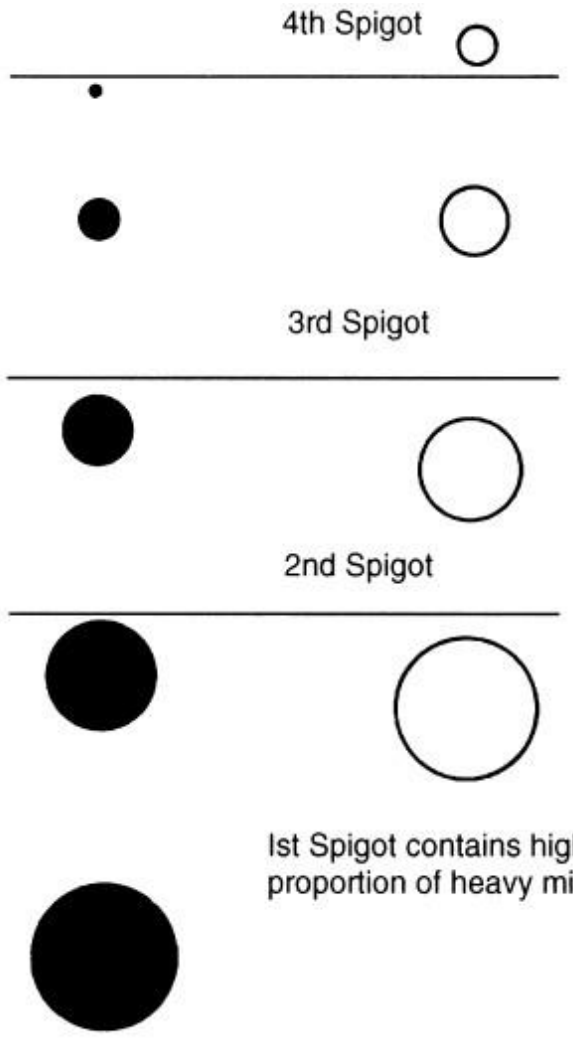
- **Clasificadores hidráulicos según las fuerzas predominantes que actúan en la separación de tamaños.**

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

Figura 12



Stokes multi-spigot hydrosizer



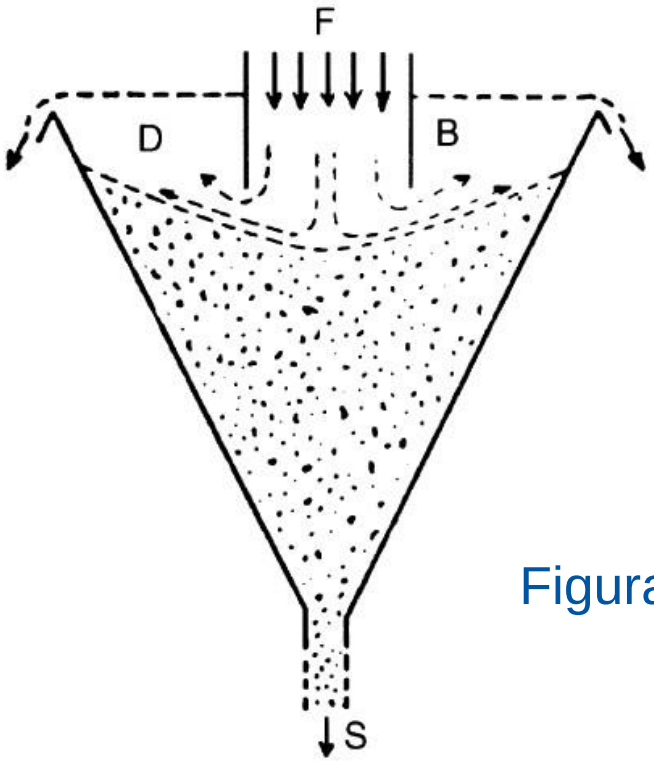
Added increment of hindered-settling classifier

Clasificadores Hidráulicos Sedimentación Simple

Conos

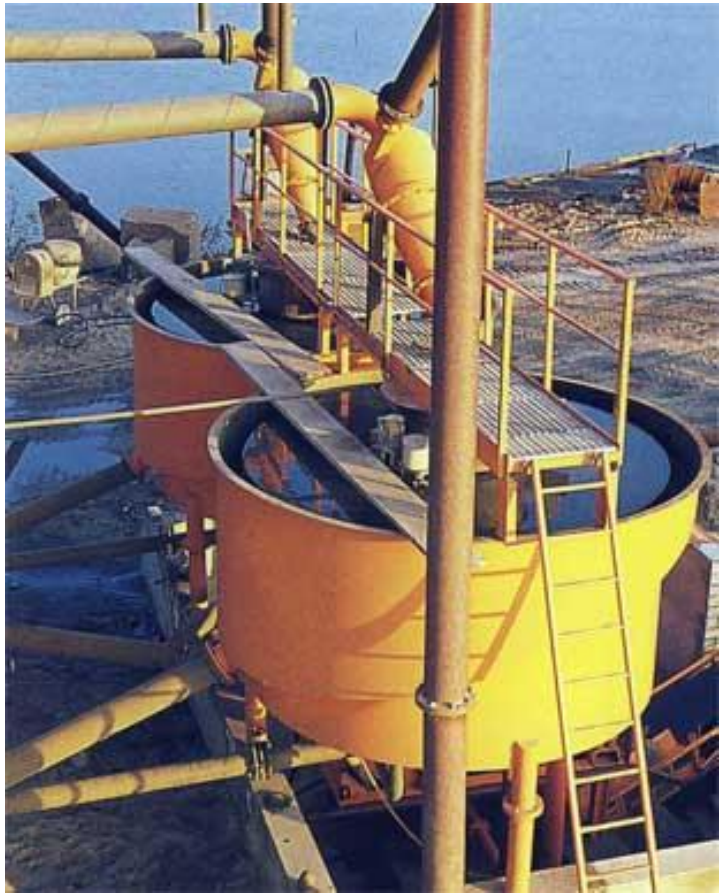
- **Son los equipos de clasificación más simple.**

- **Se emplean en la industria de los áridos para el deslamado de las arenas gruesas.**



Settling cone operation

Figura 13



MonoSizer de Dorr-Oliver (FLSmidth)

Conos

- **Su funcionamiento es sencillo, la pulpa o lodo se introduce por un alimentador central en forma de tubo, situado en la parte superior, y que penetra 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 o hundido irán sedimentando en el fondo del cono donde la actuación de una válvula automática controlará la extracción del producto en función del peso del hundido situado en el fondo del cono.**

- **El producto se obtendrá prácticamente libre de agua.**

- **Los conos se fabrican de chapa metálica y deben tener un ángulo próximo a los 60º para evitar sedimentación permanente de partículas en las paredes del cono.**

- **La dimensión de los conos está limitada a diámetros de 3 metros aproximadamente, como consecuencia de la altura que alcanzan con cada incremento de diámetro.**

- **Los cortes granulométricos, del producto obtenido, serán poco precisos.**

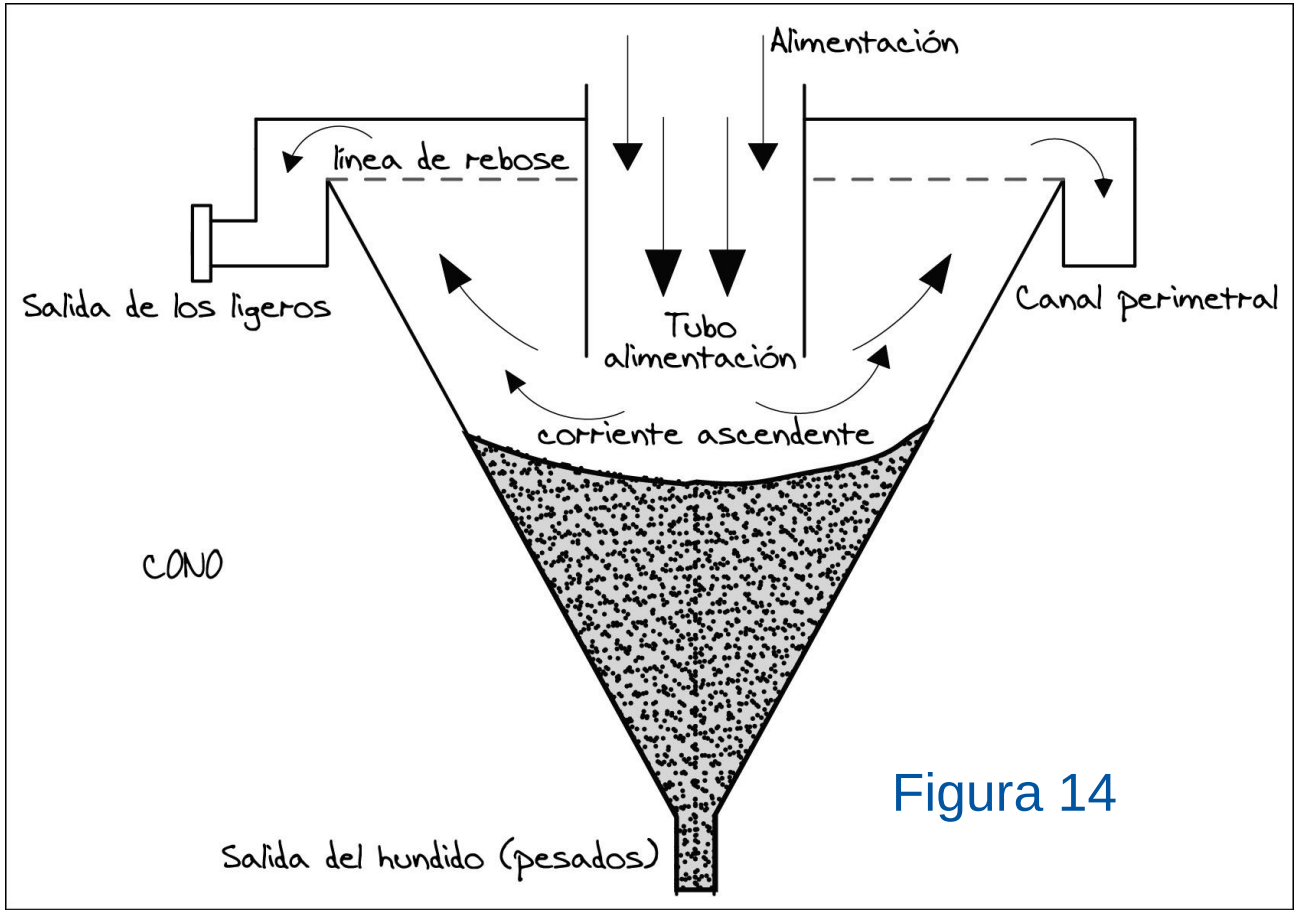
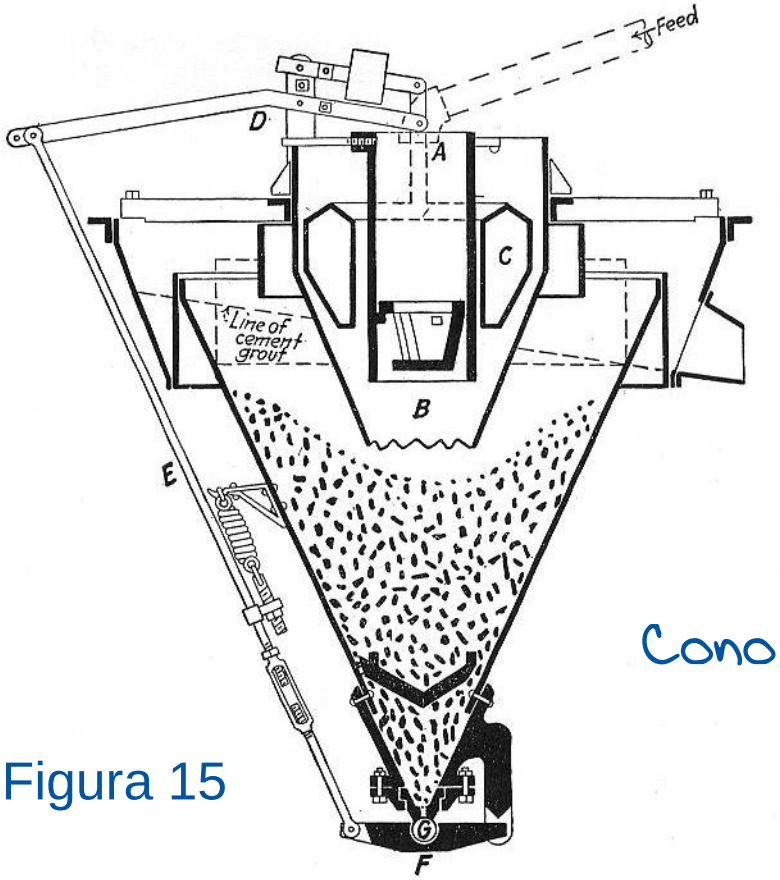


Figura 14

- **Los conos se utilizan más como decantador y eliminador de agua que como clasificador.**

- **La salida de gruesos se realiza abriendo intermitentemente la válvula inferior, manual o automáticamente a través de un flotador situado en la tubería de alimentación que se eleva junto con el nivel de líquido.**



—Allen automatic classifier.

Cono Allen

Figura 15

Hidroseparadores

- **Como consecuencia de las limitaciones de diámetro de los equipos anteriores, surgen cubas cilíndricas con mayor diámetro (> 10 metros) que ofrecerán mayores capacidades de clasificación.**

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

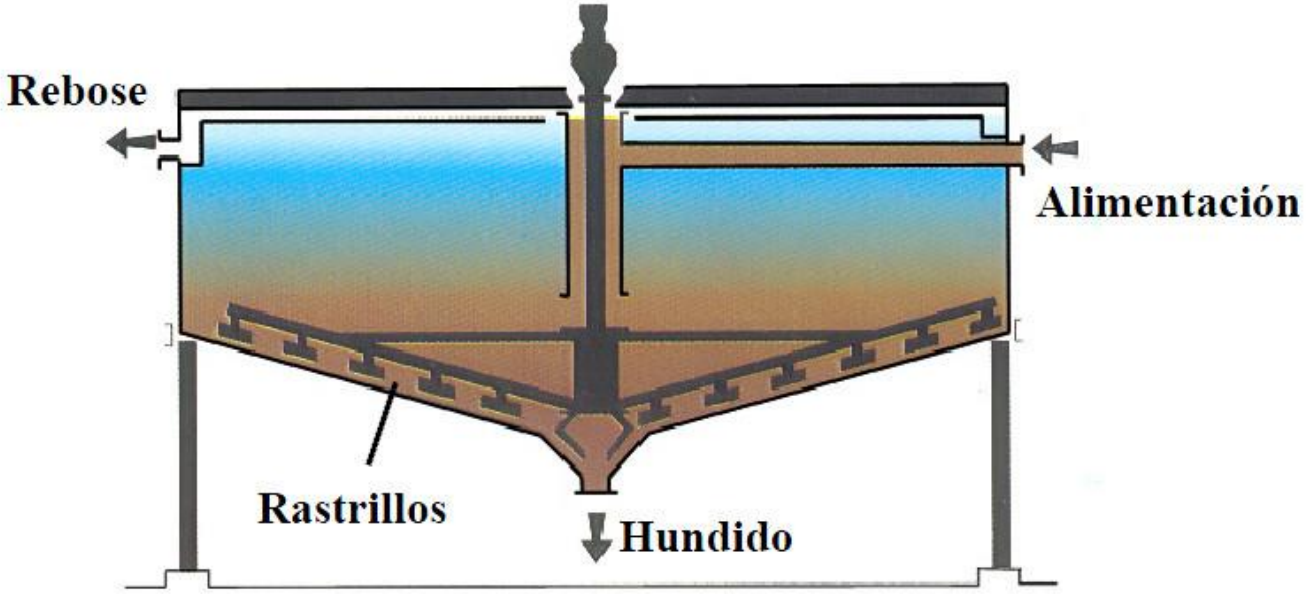
- **Estos equipos son empleados principalmente como unidades espesadoras-clarificadoras, para la separación de sólidos-líquidos, favoreciendo el efecto de sedimentación con el empleo de reactivos floculantes.**

- **Al igual que los equipos anteriores, los cortes granulométricos del producto que dan son muy poco precisos.**

- **Por otro lado, existe en el mercado equipos denominados Clasificadores de Copa (Bowl Classifier de Dorr-Olivier (F.L.Smidth) cuyo diseño es una combinación entre un hidroseparador y un clasificador mecánico de rastrillos.**

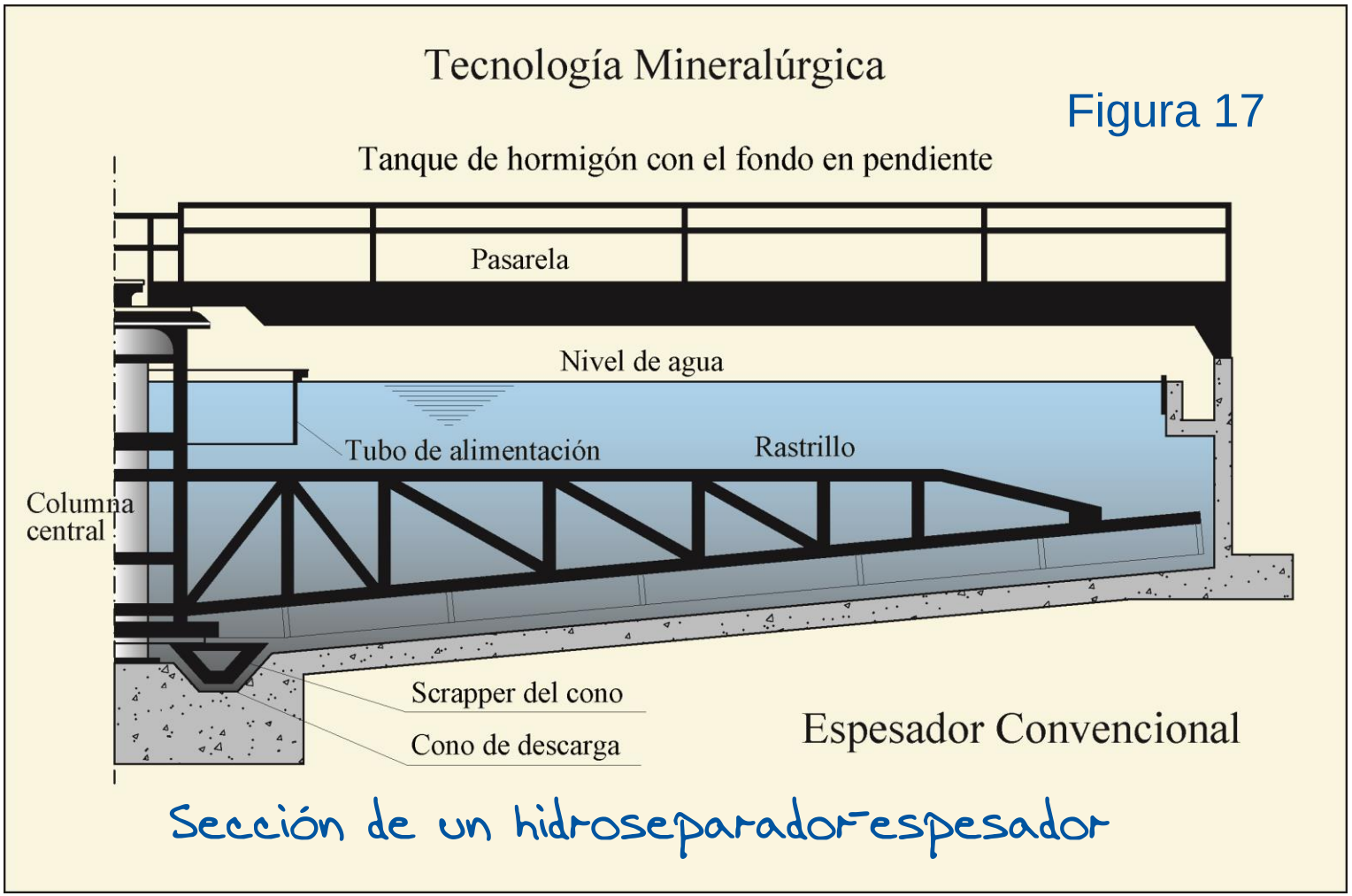
Hidroseparadores

Figura 16



Hidroseparador de Eral S.A.

Hidroseparadores



Sección de un hidroseparador-espesador

Hidroseparadores

Descarga del lodo

Espesadores

Figura 18

Bio-leach Thickeners, Ghana

Vista lateral - Clasificador de Copa de Dorr-Oliver (F.L.Smidth)

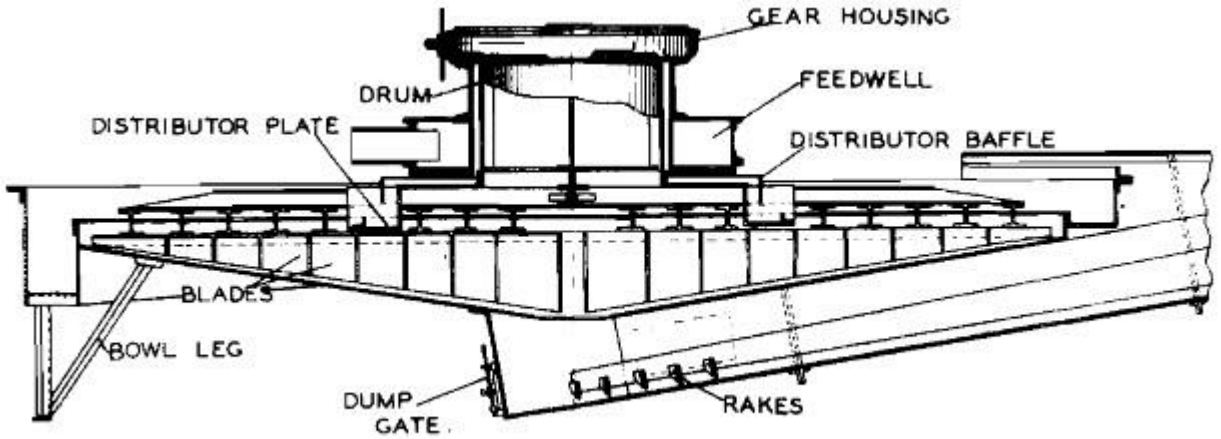


Figura 19

Vista superior - Clasificador de Copa de Dorr-Oliver (FLSmidth)

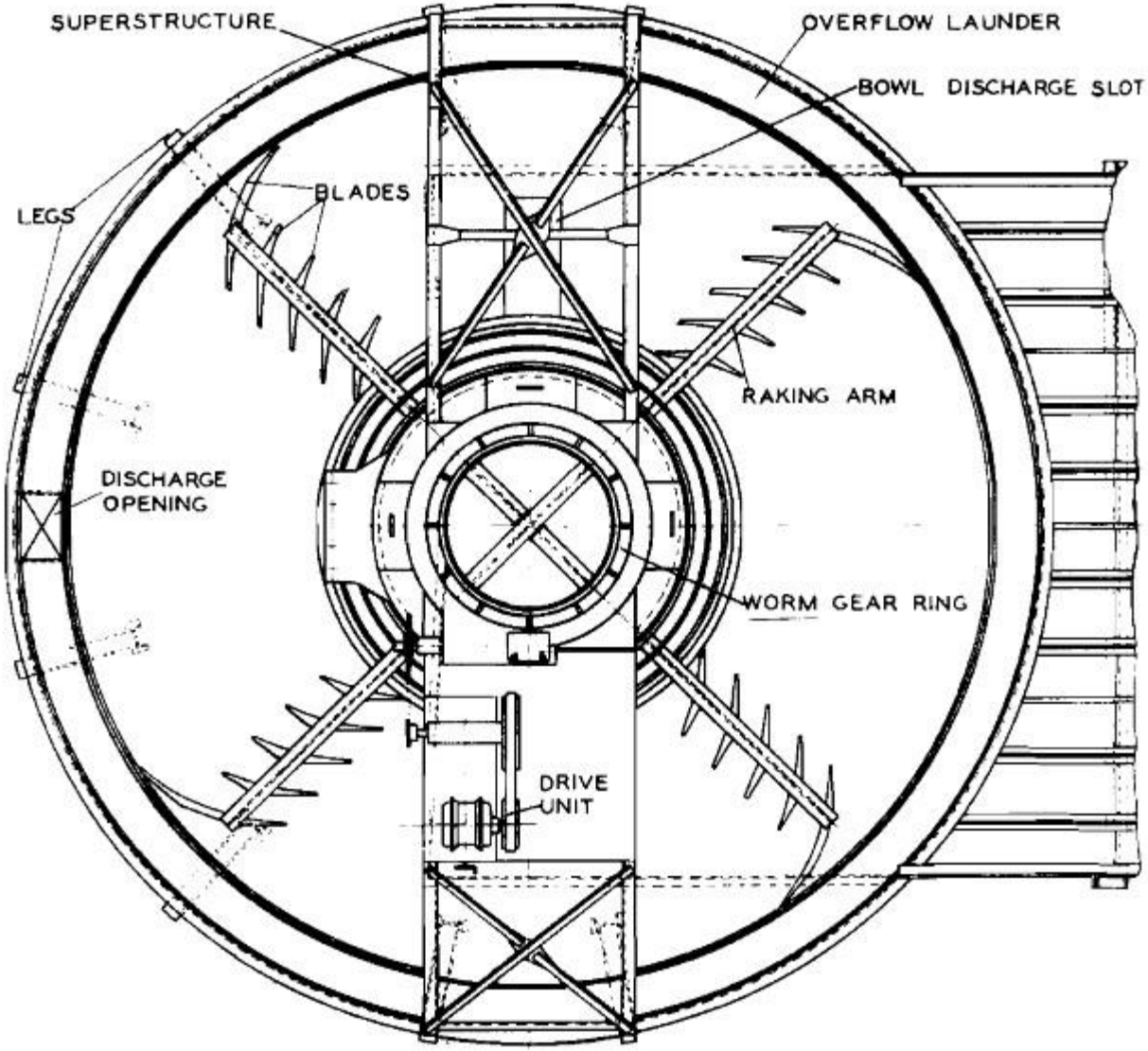
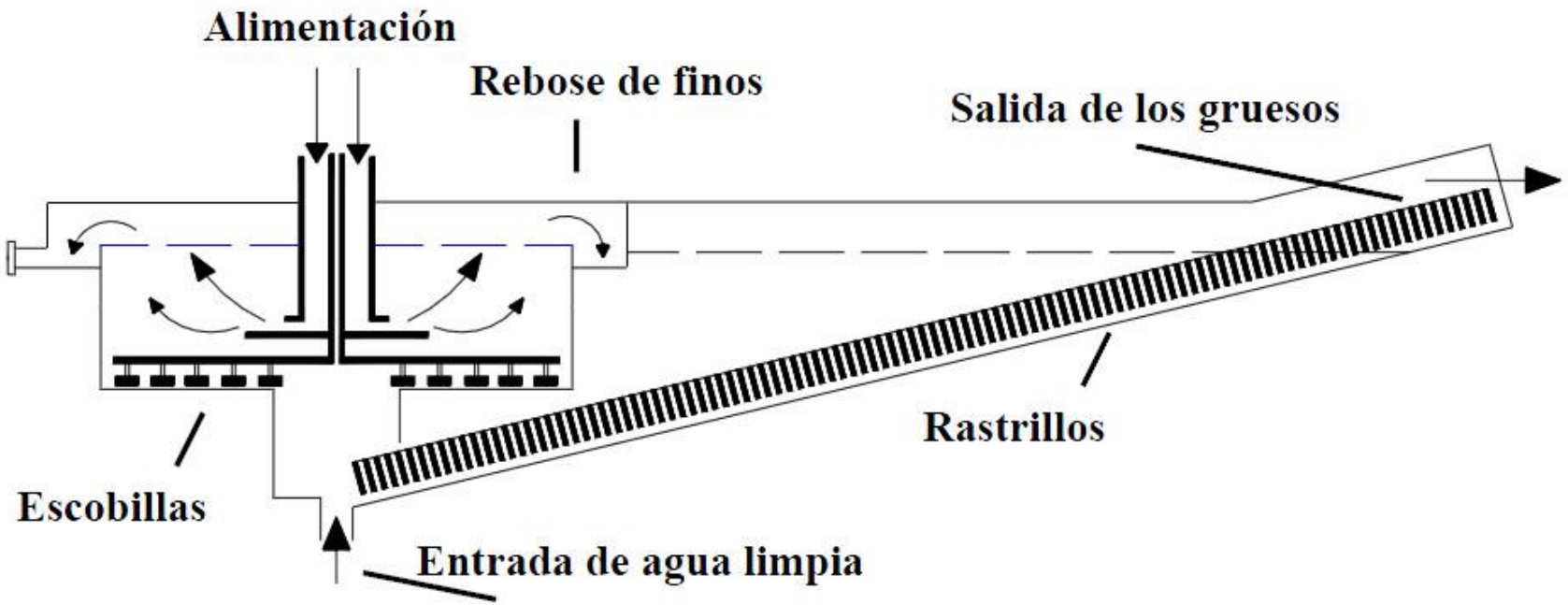


Figura 20

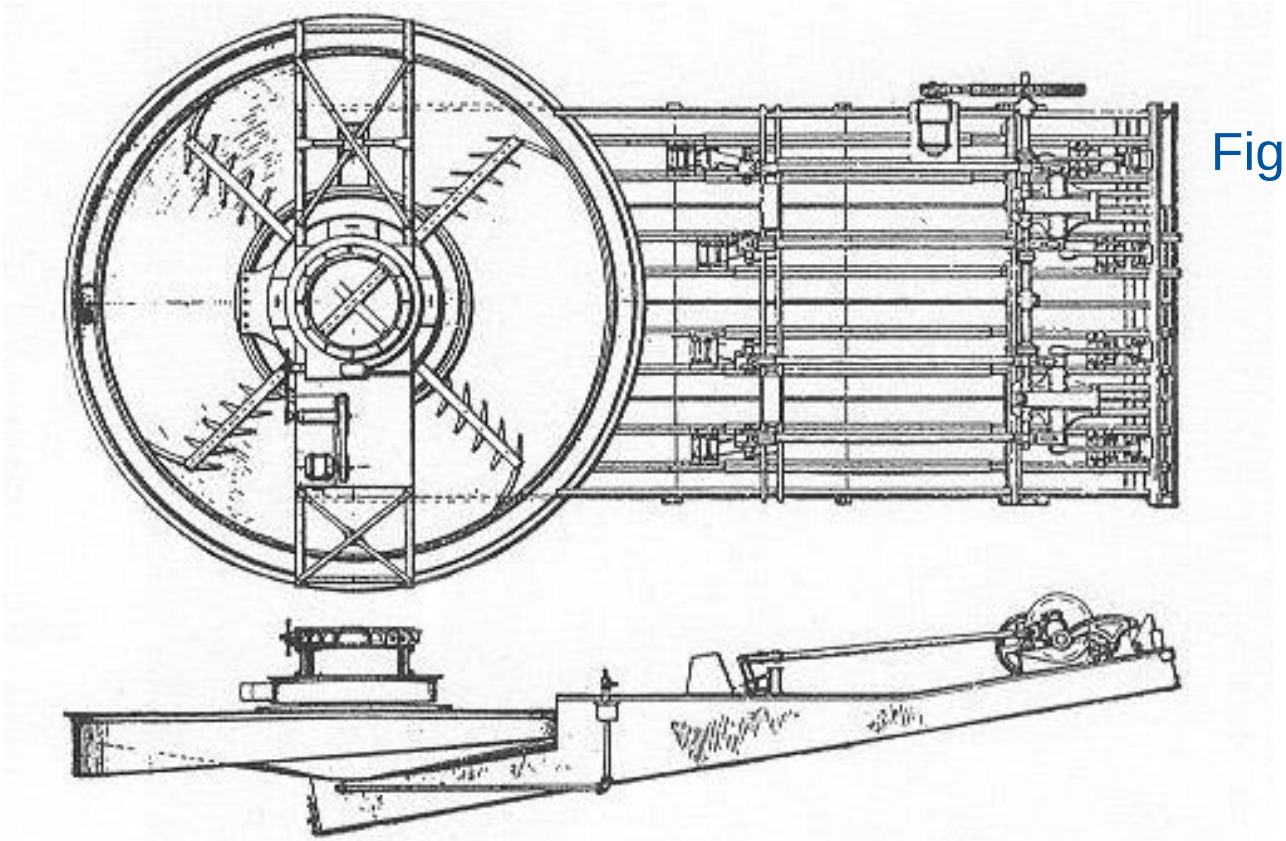
Representación esquemática

Figura 21



Clasificador de Copa (Dorr-Oliver)

Representación esquemática



—The Dorr turret-bowl classifier.

Figura 22

Clasificador de Copa (Dorr-Oliver)

Canales de clasificación. Cajas puntiagudas

- **Son equipos muy simples, además son los clasificadores hidráulicos más antiguos.**
- **Están formados por una serie de cajas, o artesas, con forma piramidal de secciones crecientes (doble de ancho).**
- **El lodo, o pulpa mineral se introduce por el extremo de menor sección y el líquido va rebosando superficialmente hacia las de mayor sección.**
- **Las partículas pesadas y gruesas se van decantando hacia el fondo de los primeros compartimentos.**
- **Las partículas más finas y ligeras van pasando sobre cada uno de los depósitos sin sedimentarse hasta salir como rebose por la salida opuesta.**
- **La precisión de los cortes no es buena, pero son equipo muy sencillos y económicos.**
- **Hoy en día han sido superados técnicamente por otros equipos de clasificación por equivalencia más eficientes.**

Secciones crecientes de un equipo de cajas puntiagudas

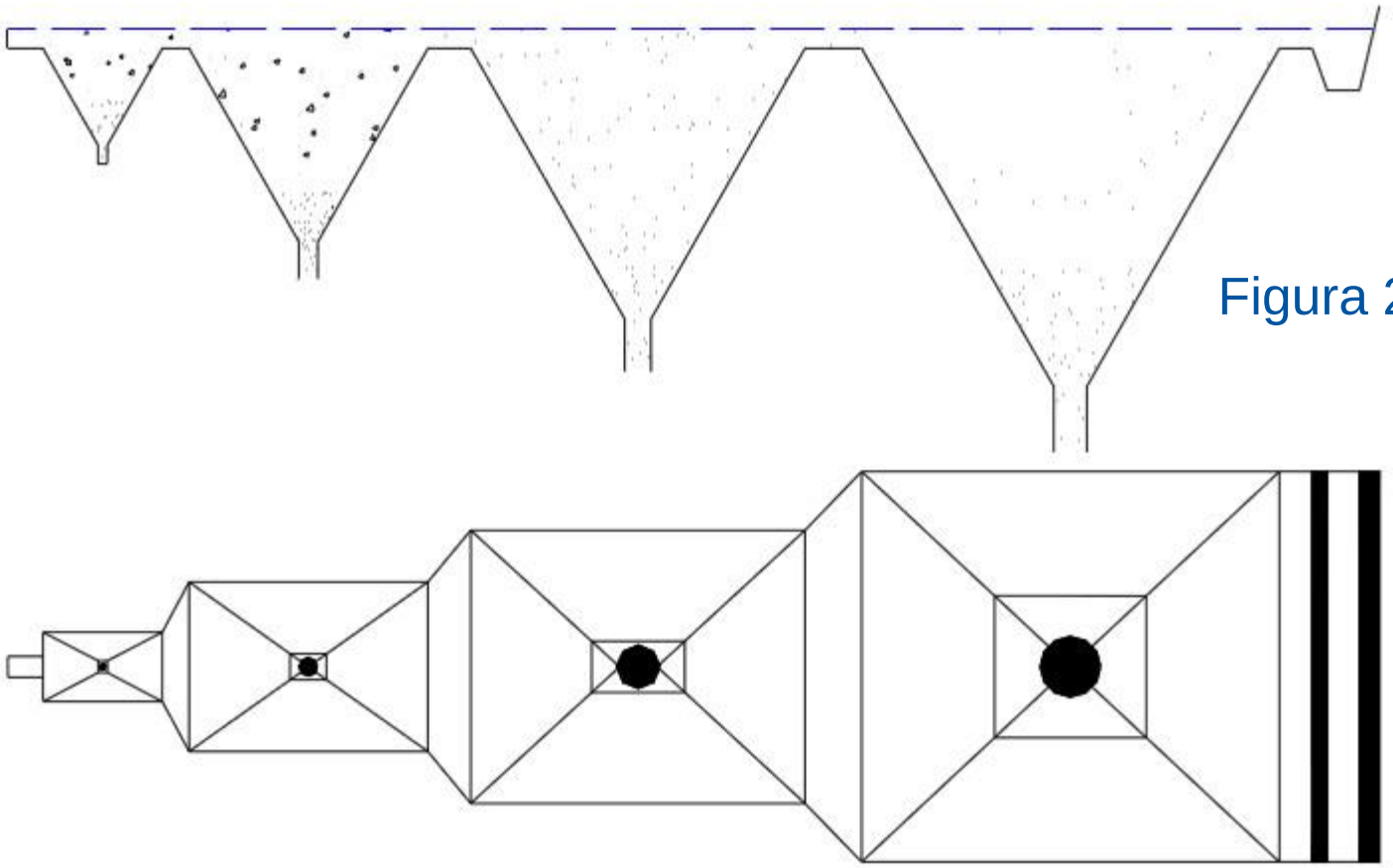


Figura 23

Clasificador de cajas de puntas

Generación de corrientes internas ascensionales en cada caja que arrastran hacia arriba las partículas de menor velocidad límite que la velocidad ascensional de la corriente.

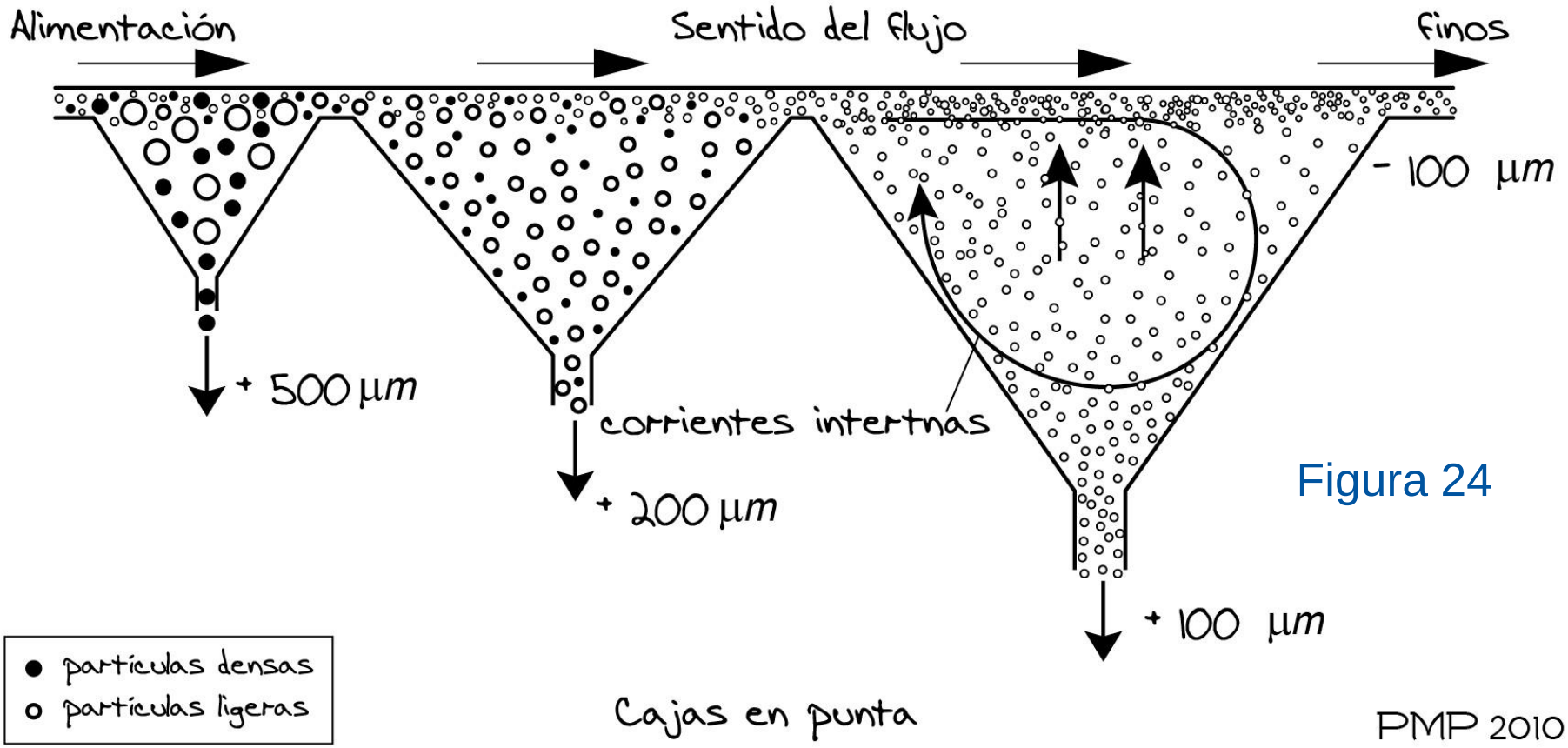


Figura 24

Canales de clasificación. Cajas puntiagudas

- **La velocidad ascensional es proporcional al cociente entre el caudal y la superficie libre de cada artesa.**

- **Si el caudal se mantiene constante, resultará que el tamaño de corte va disminuyendo según aumenta la superficie de las cajas, ya que la velocidad del flujo ascendente es proporcional a la relación entre caudal (Q) y superficie (S), v = Q/S.**

- **Las partículas que se acumulan en cada artesa serán partículas cuyo diámetro varía entre el tamaño de corte de la artesa anterior y el de la artesa en cuestión.**

- **Los granos depositados en el fondo de las artesas se evacuarán por la parte inferior a través del empleo de válvulas de apertura manual o automática, o bien el uso de sifones tipo cuello de cisne.**

- **La evacuación se realiza en base al aumento de densidad que se produce como consecuencia de la acumulación de sólidos en la punta de la caja.**

Clasificadores Mecánicos

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

- **Estos equipos están formados por una cuba, o artesa, 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 tenga 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:**
    1. **Clasificadores de tornillo.**
    2. **Clasificadores de rastrillo.**
    3. **Clasificadores de draga.**
    4. **Clasificadores Hardinge.**
    5. **Noria de cangilones perforados.**

Clasificador de Tornillo o Akins

- **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:**

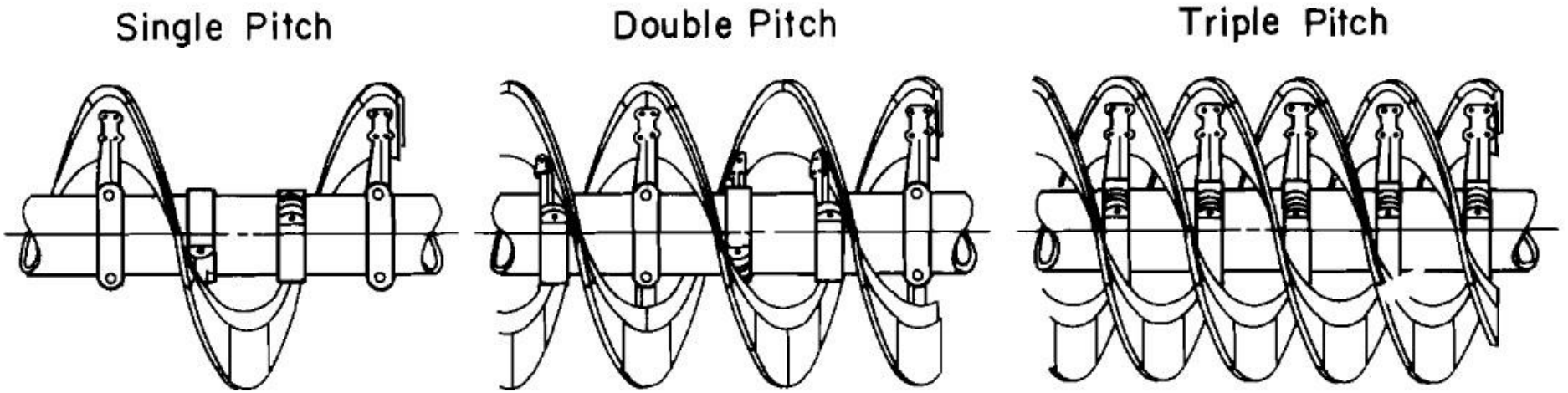


Figura 25

Clasificador de Tornillo o AKins

- **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 tph.**

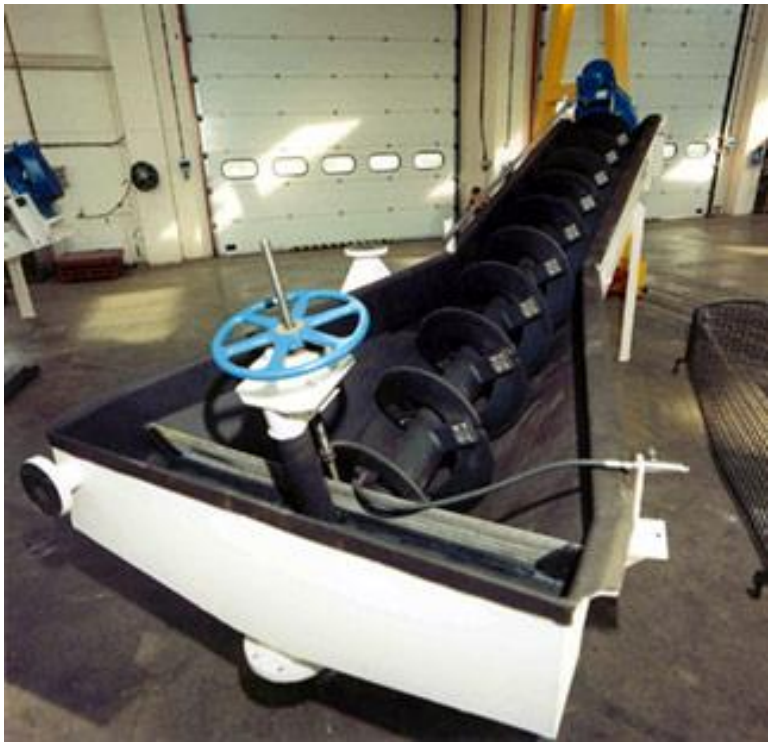
Clasificador de tornillo

Figura 26

Clasificador de Tornillo o Akins

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

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



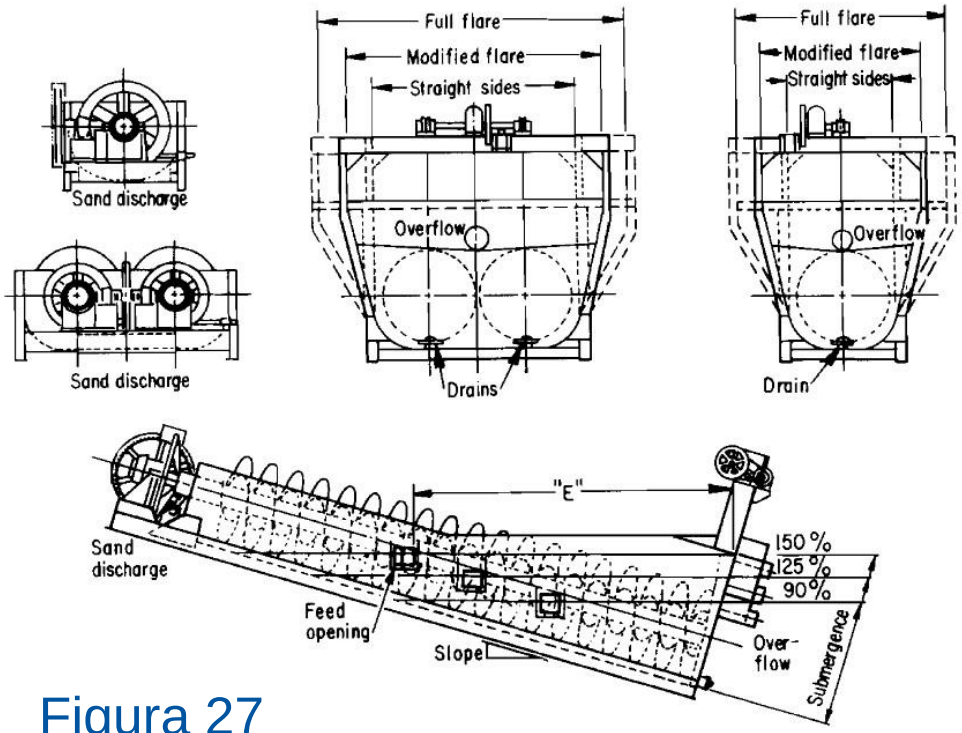


Figura 27

Clasificador de Tornillo o Akins

(Cortesía de Henan Mining Machinery Co.)

(Cortesía de FLSmidth)

Figura 28

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.**

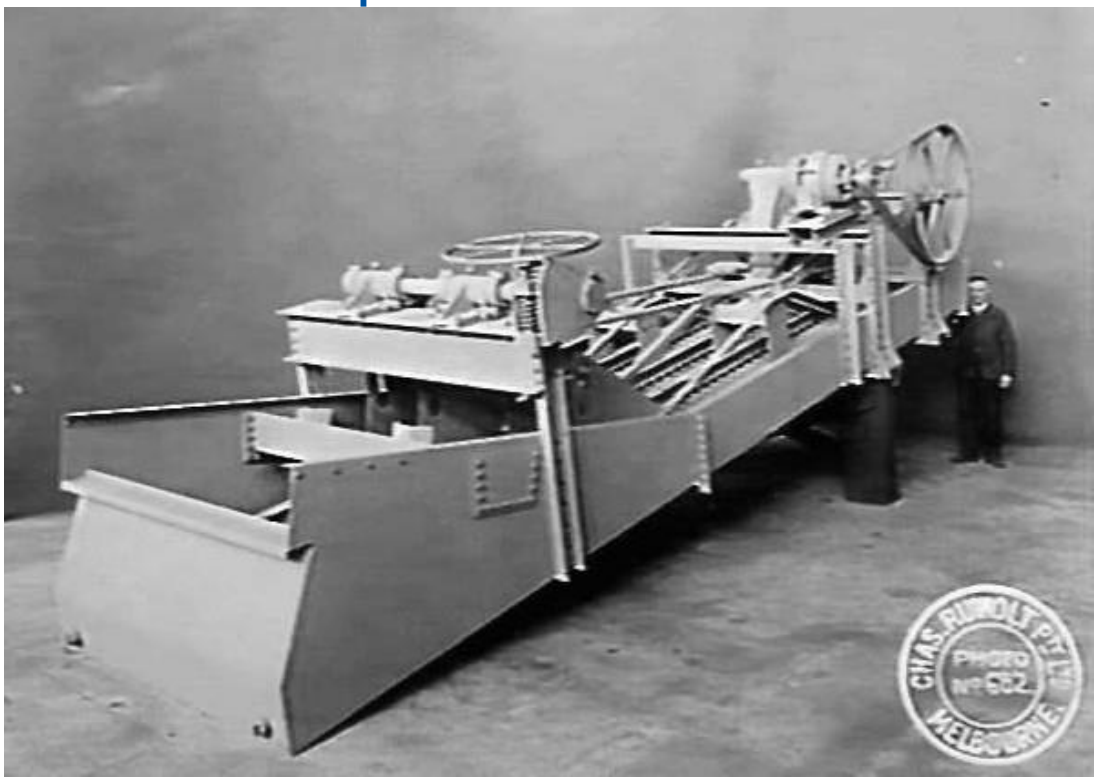


Figura 29

Clasificador de Rastrillo

- **Tiene forma de artesa con fondo inclinado liso (9º - 14º de pendiente).**

- **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.**

Figura 30

Clasificador de Rastrillo

- **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.**

- **Están animados de un movimiento que permite el rastrillado del piso de la artesa (avance) y un alejamiento de la plancha del fondo con retorno hacia atrás (retroceso) para volver a iniciar el ciclo.**

Figura 31

Clasificador de Rastrillo

- **El número de ciclos por minuto puede modificarse de 12 a 30.**

- **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.**

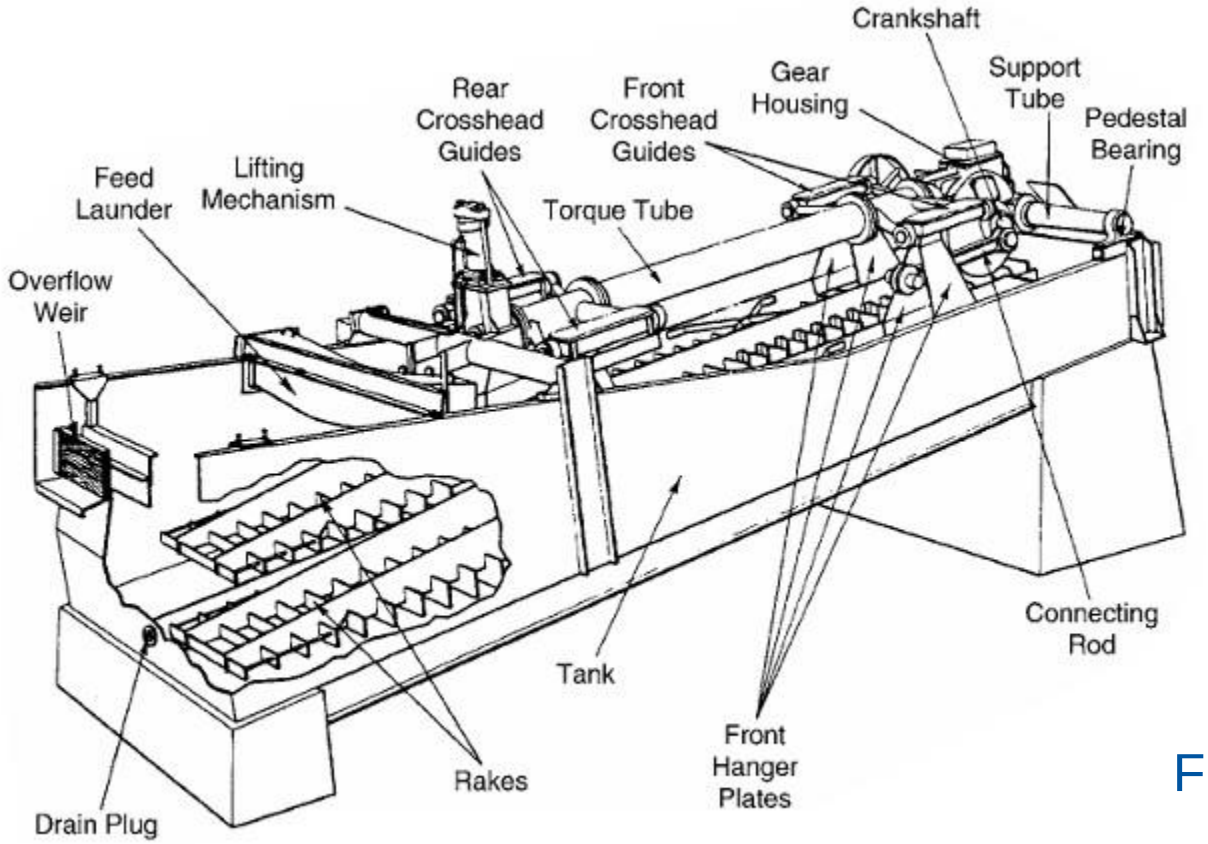
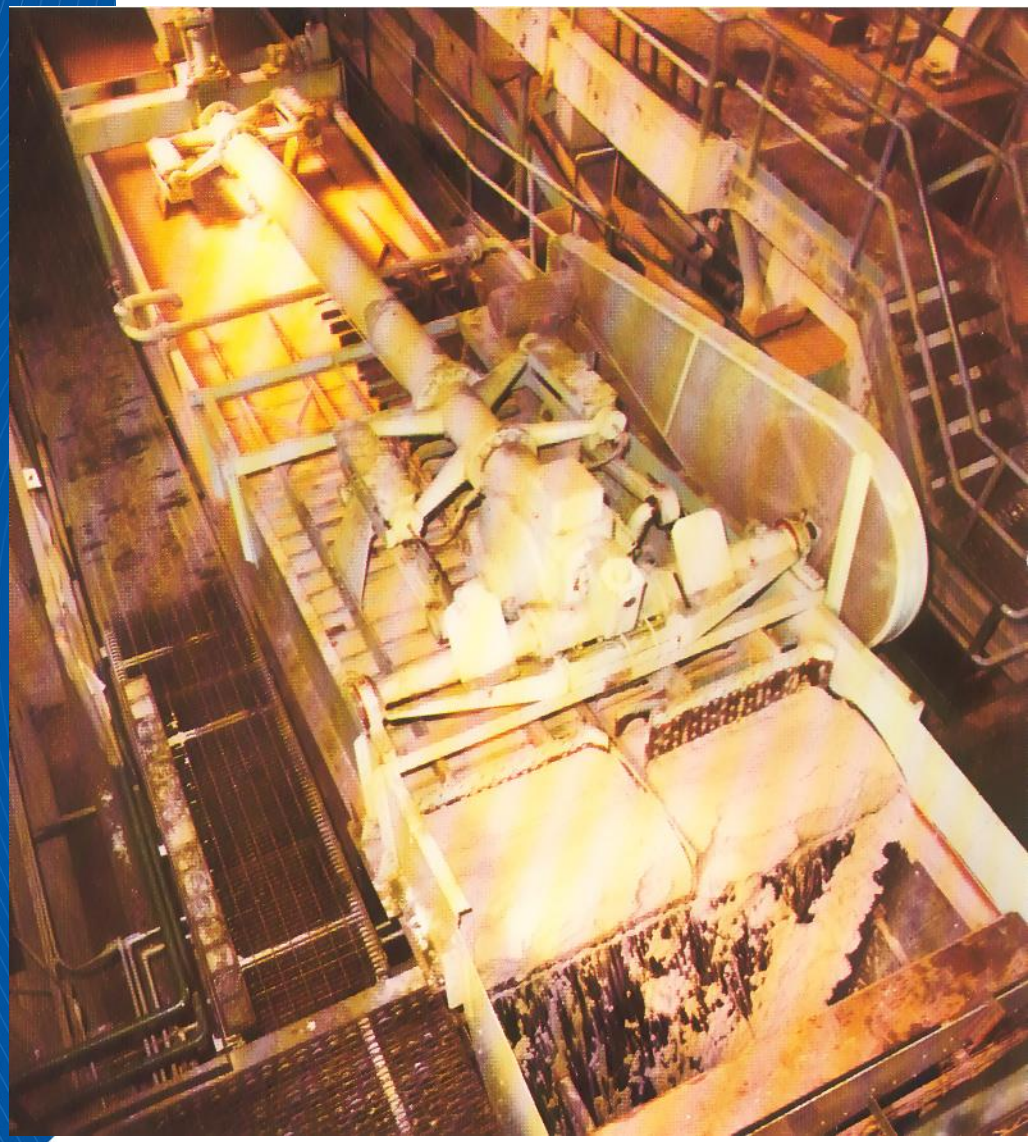


Figura 32

Clasificador de Rastrillo



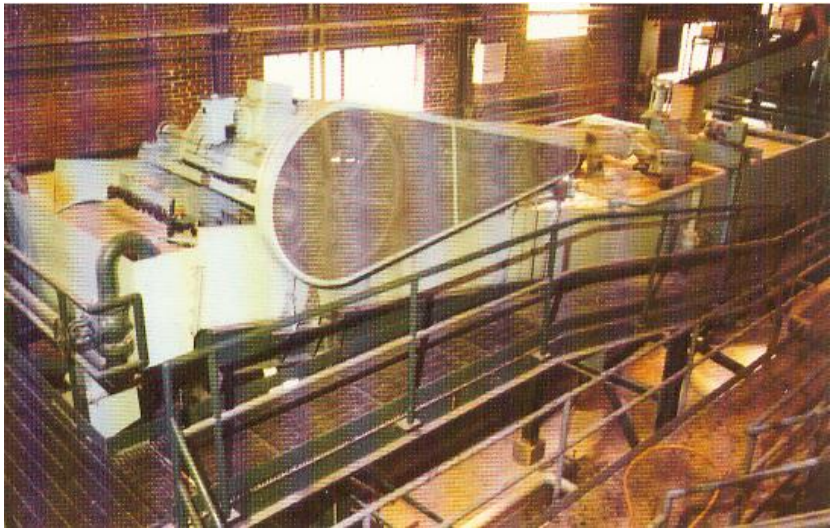


Figura 33

Clasificadores mecánicos. Dilución crítica

- **Los clasificadores anteriores (de tornillo y de rastrillo) se suelen emplear en circuitos cerrados de molienda en húmedo.**

- **Las pulpas a clasificar suele ir muy concentrada (65% de sólidos en peso como mínimo a la salida de los molinos de bolas) teniendo una alta viscosidad.m Los clasificadores suelen trabajar con concentraciones más diluidas (máximo a 50% de sólidos en peso), donde el agua de dilución actúa como un regulador del tamaño de corte.**

- **La adición de agua afecta a la viscosidad y no tanto a la velocidad ascendente lo que da lugar a una disminución del tamaño de corte (fórmula de Stokes).**

- **La dilución crítica es aquel estado en el que por debajo de ella la reducción relativa de viscosidad ya no es significativa y predomina el efecto de aumento de la corriente ascensional con lo que el tamaño de corte aumenta.**

- **Esta dilución crítica correspondería al mínimo tamaño de corte que el clasificador podría acometer para las condiciones de trabajo y características técnicas del mismo. La dilución crítica se suele alcanzar con un 10% de sólidos en peso.**

Clasificadores Mecánicos. Instalación Típica

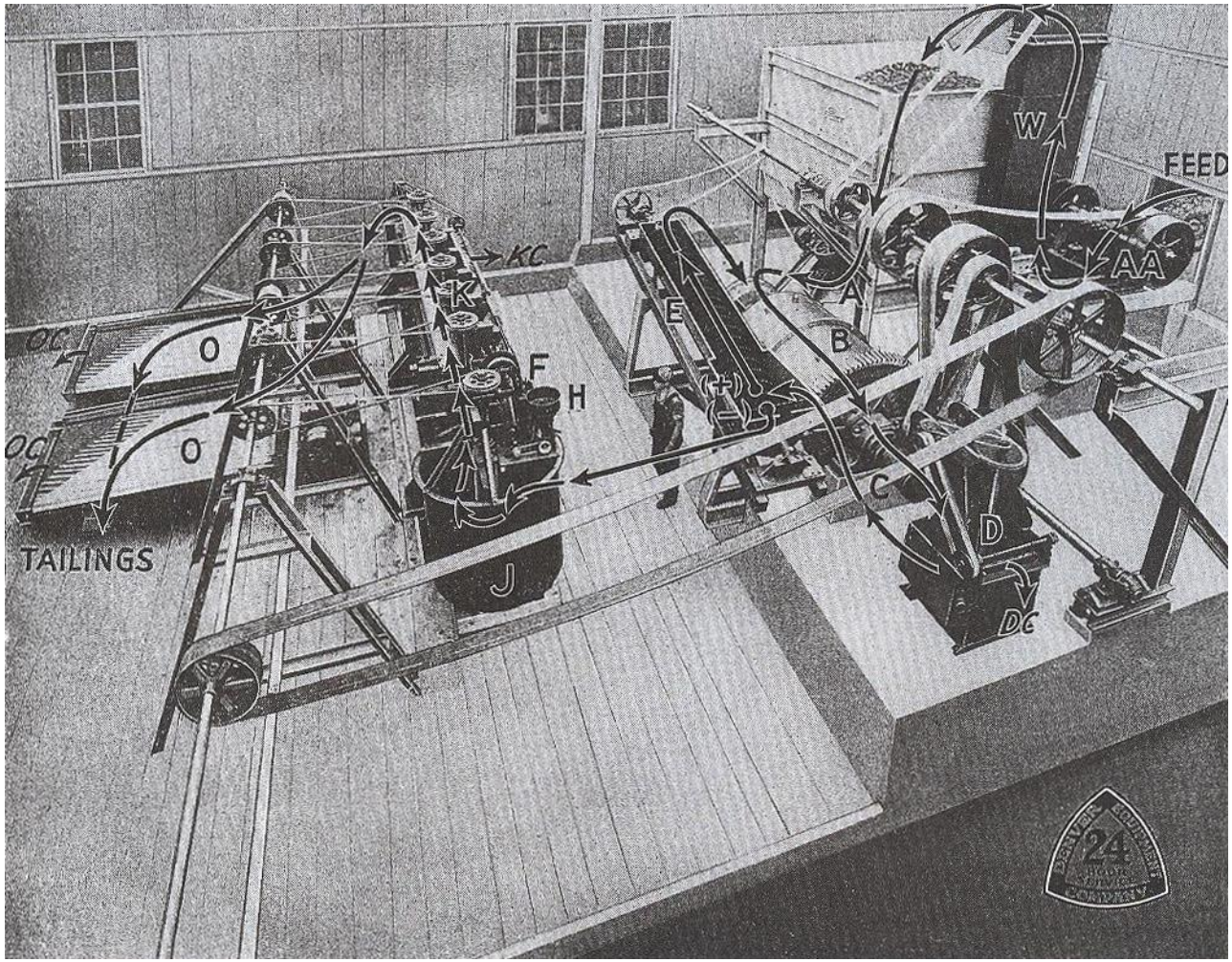
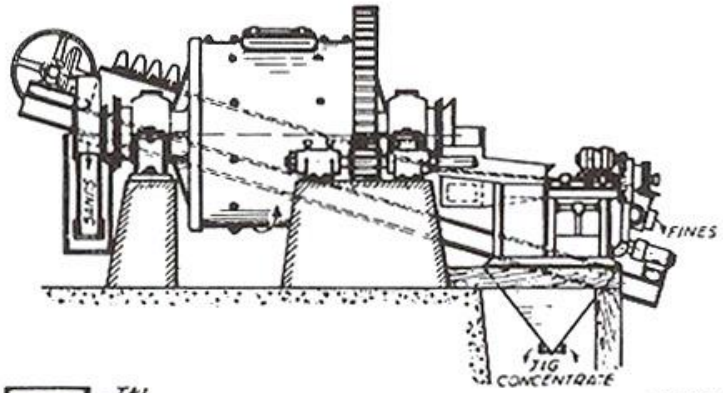
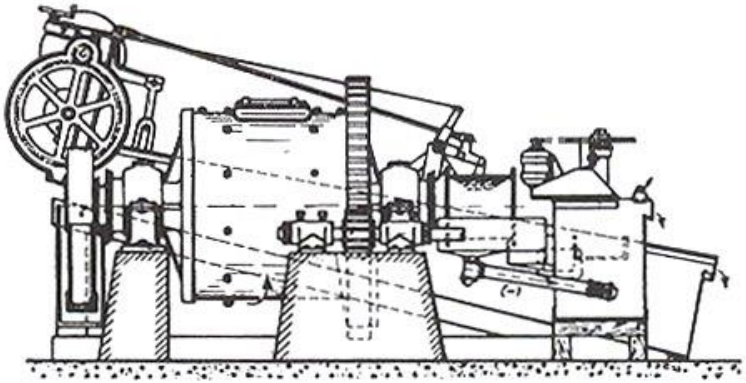
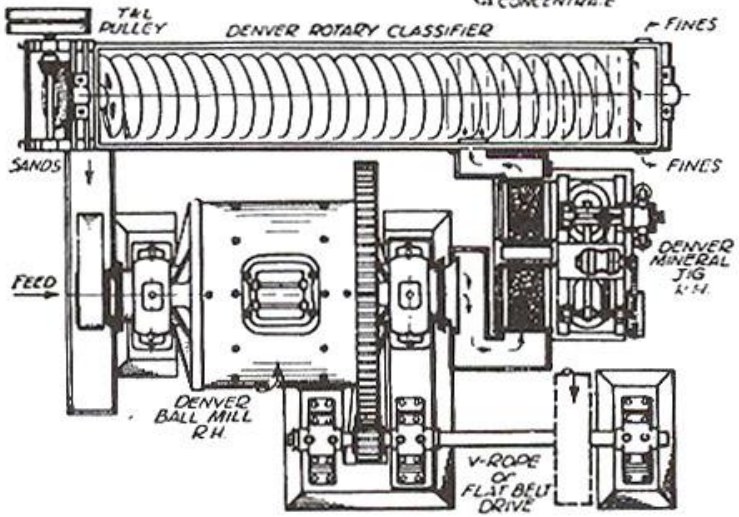


Figura 34

Clasificadores Mecánicos. Instalación Típica







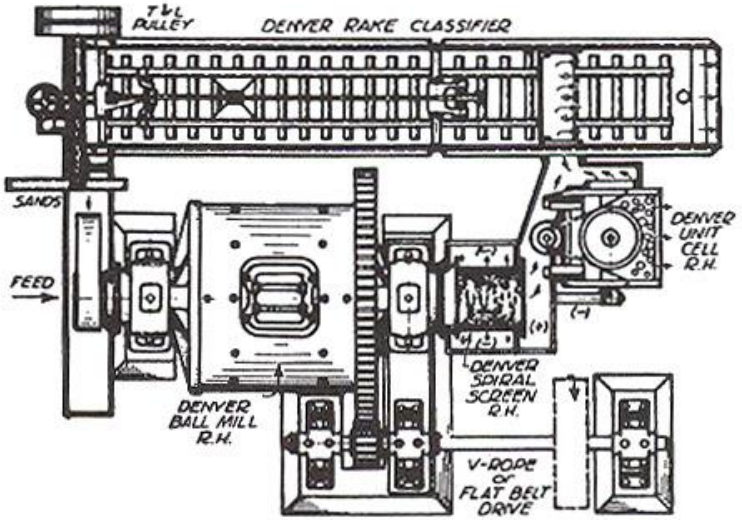
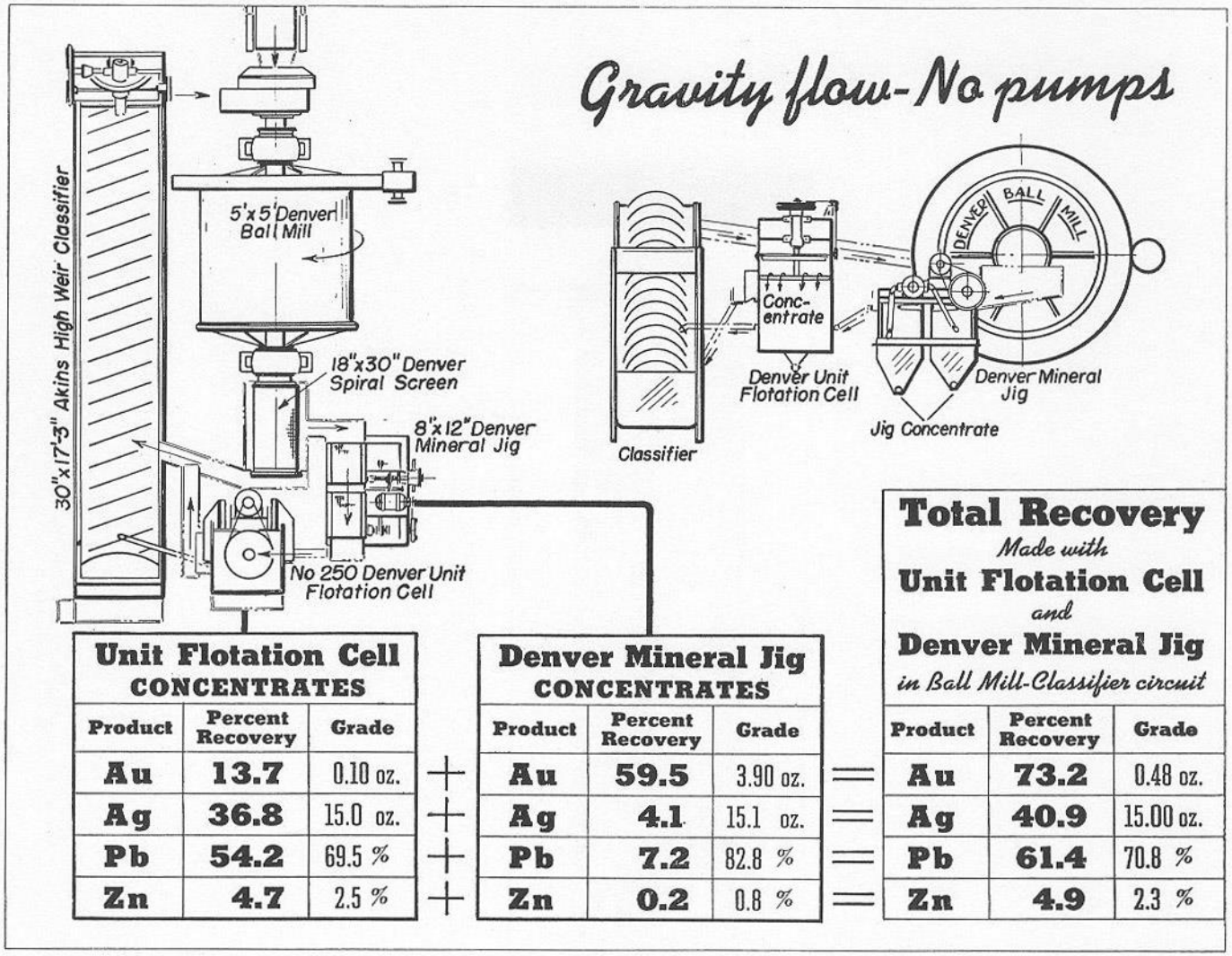


Figura 35

Clasificadores Mecánicos. Instalación Típica



Unit Flotation Cell CONCENTRATES

Product	Percent Recovery	Grade
Au	13.7	0.10 oz.
Ag	36.8	15.0 oz.
Pb	54.2	69.5 %
Zn	4.7	2.5 %

+

Denver Mineral Jig CONCENTRATES

Product	Percent Recovery	Grade
Au	59.5	3.90 oz.
Ag	4.1	15.1 oz.
Pb	7.2	82.8 %
Zn	0.2	0.8 %

=

Total Recovery
Made with
Unit Flotation Cell
and
Denver Mineral Jig
in Ball Mill-Classifier circuit

Product	Percent Recovery	Grade
Au	73.2	0.48 oz.
Ag	40.9	15.00 oz.
Pb	61.4	70.8 %
Zn	4.9	2.3 %

Figura 36

Otros clasificadores mecánicos

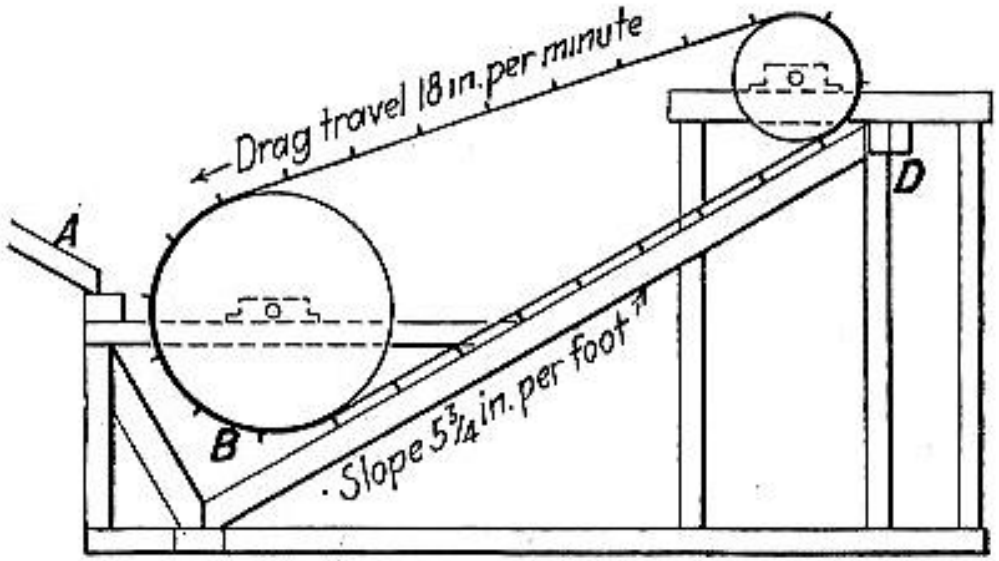
- **Señalamos aquí la existencia del Clasificador de Draga en el que las arenas son elevadas por racletas fijadas sobre una correa de goma o sobre cadenas.**

- **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.**

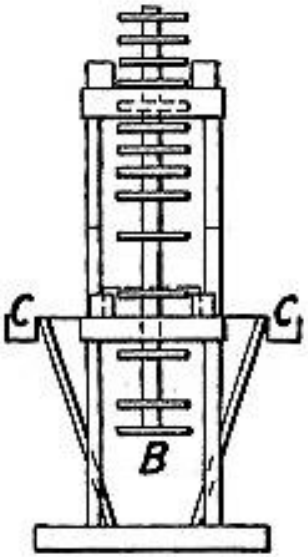
- **Estos cangilones elevarán y depositarán el material sobre una canaleta, expulsando el hundido al exterior.**

- **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.**

Clasificador de Draga



—Side view of Federal Esperanza drag classifier.



—End view.

Figura 37

Clasificador Hardinge

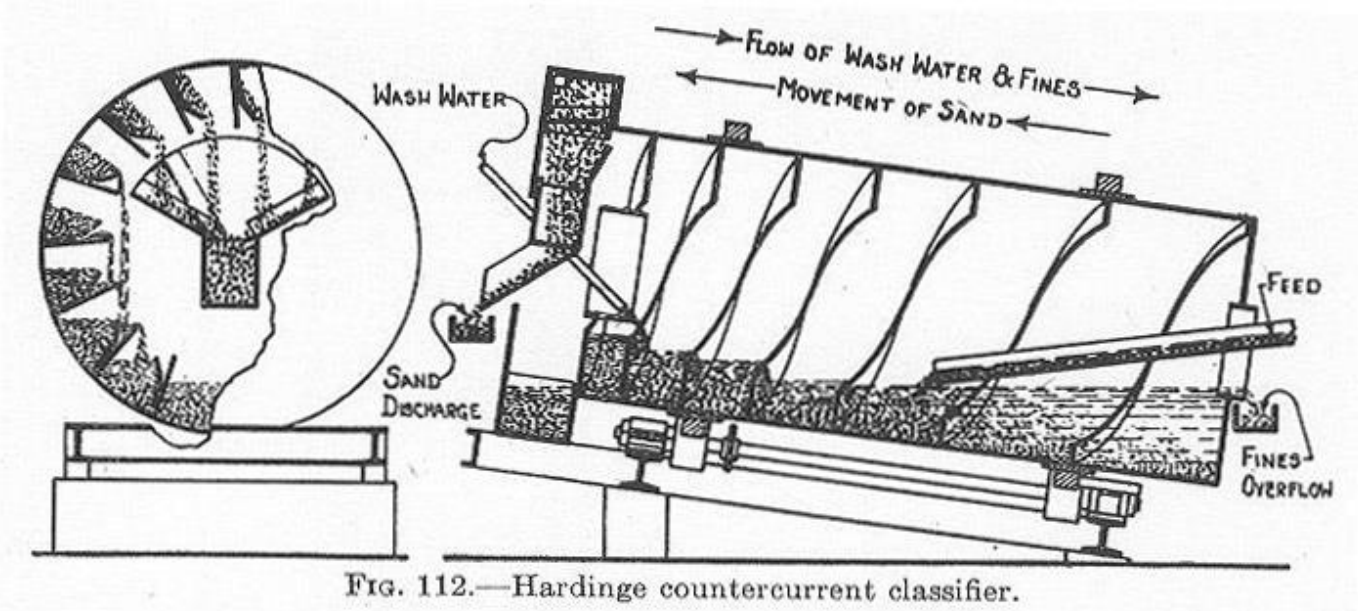


Fig. 112.—Hardinge countercurrent classifier.

Figura 38

Noria de Cangilones

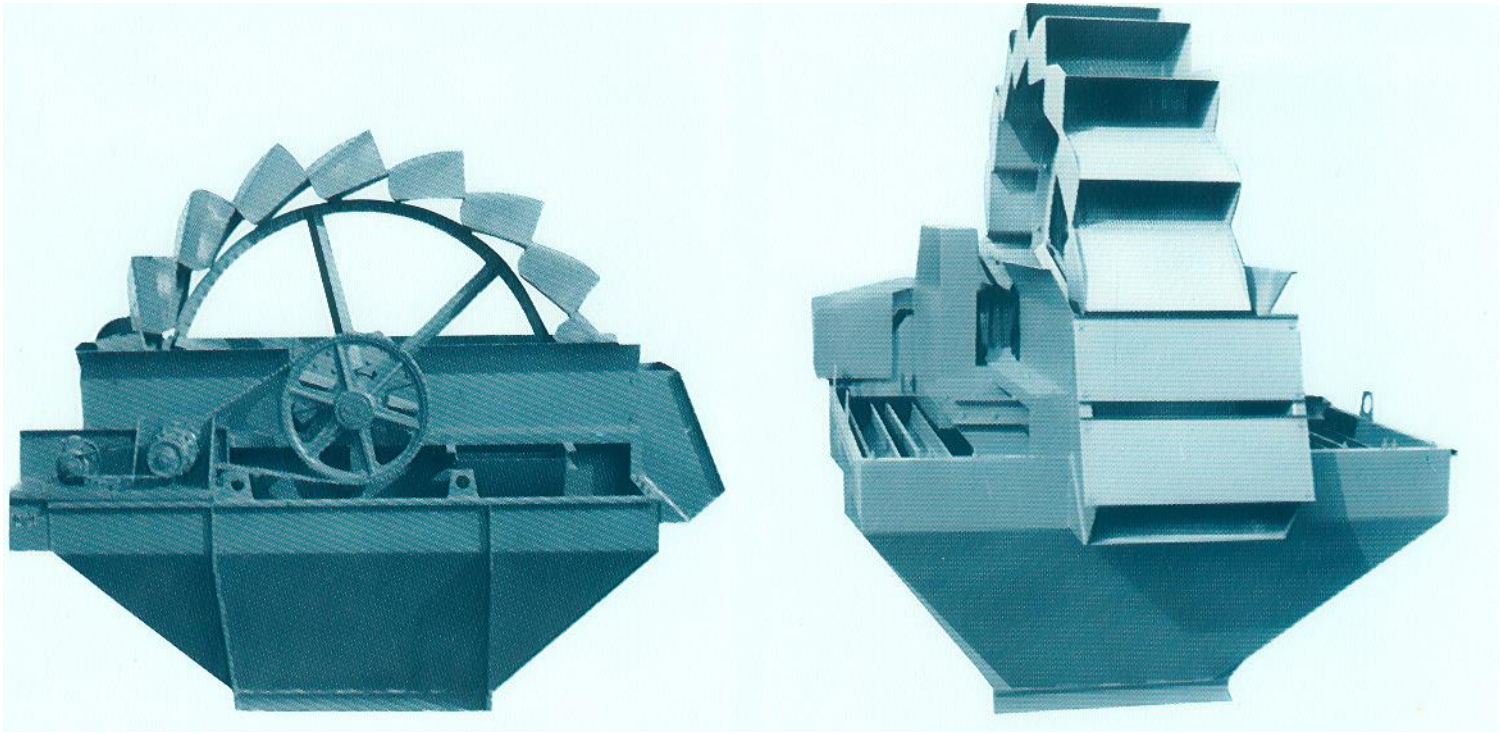


Figura 39

Clasificadores Hidráulicos de Contracorriente

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.**

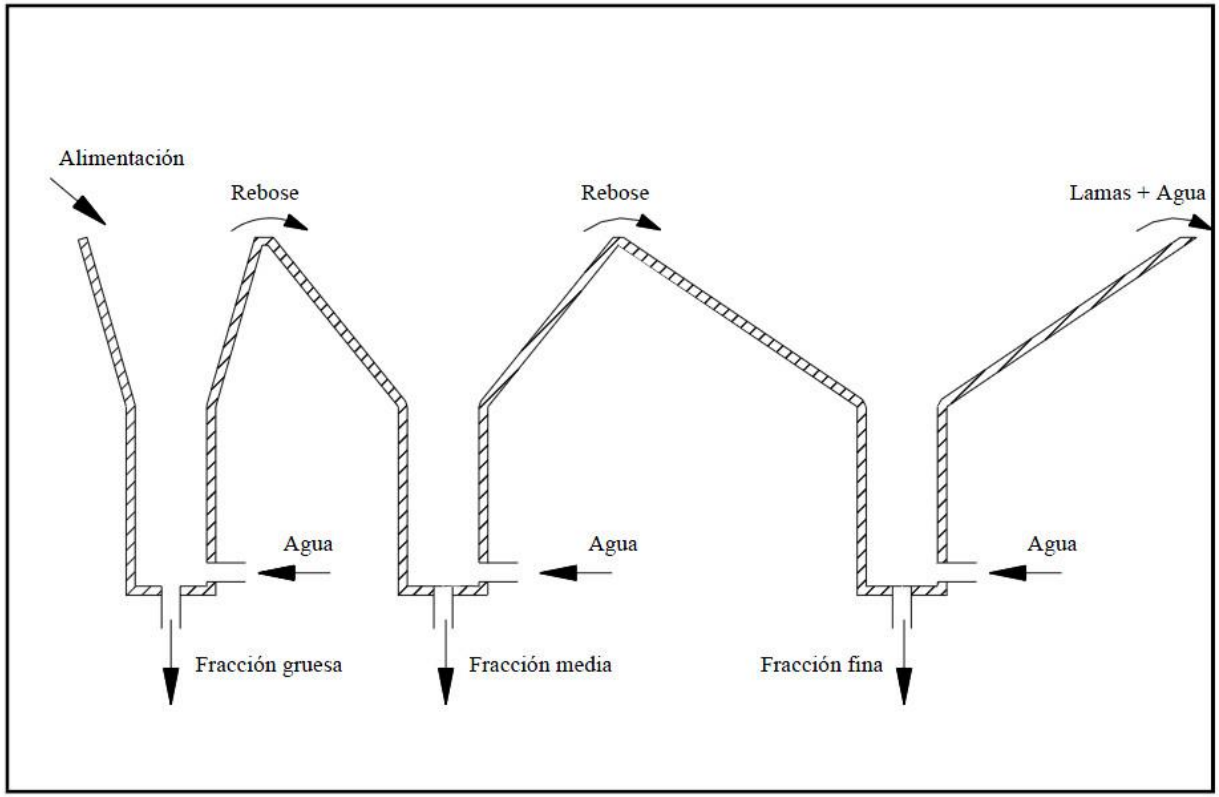
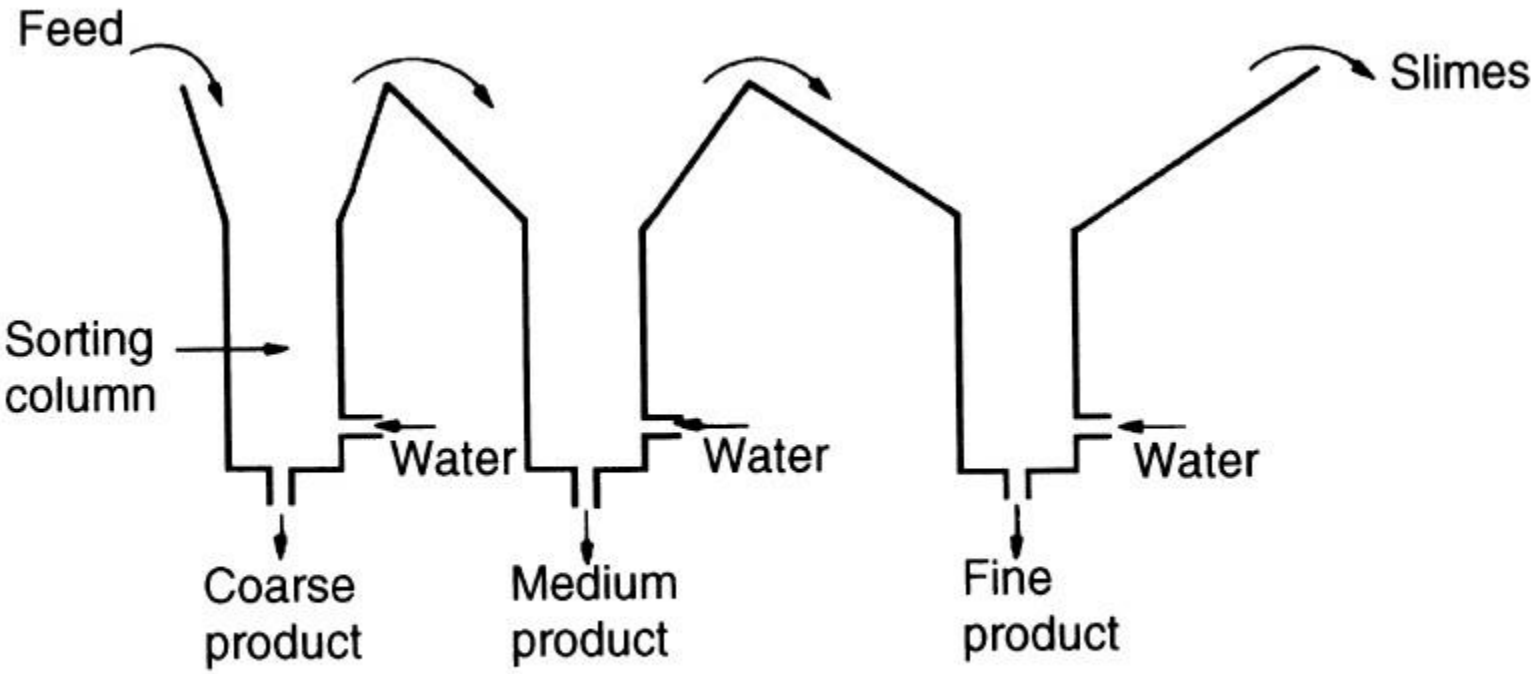


Figura 40

De Contracorriente



Principle of hydraulic classifier

Figura 41

De Contracorriente

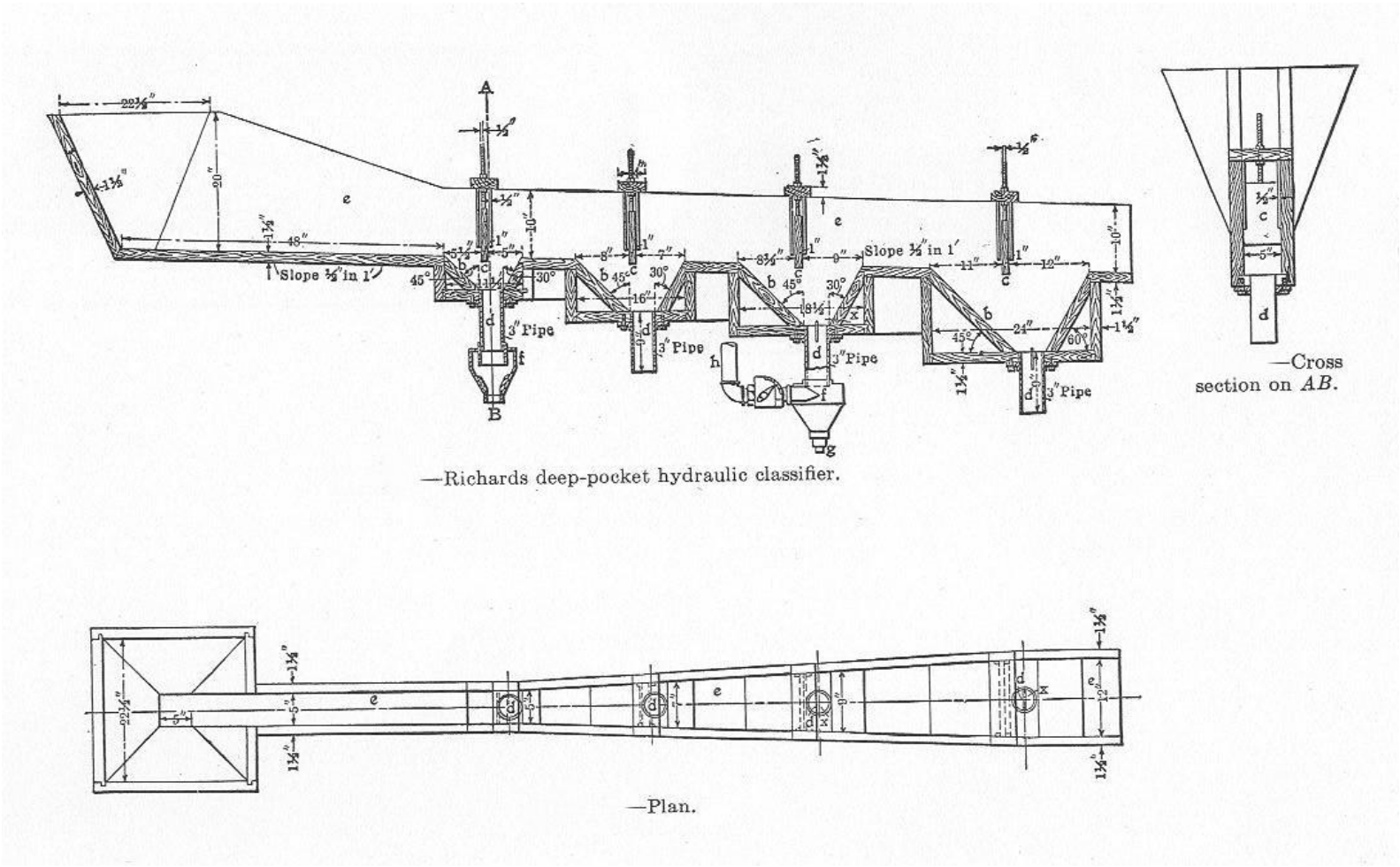


Figura 42

De Contracorriente

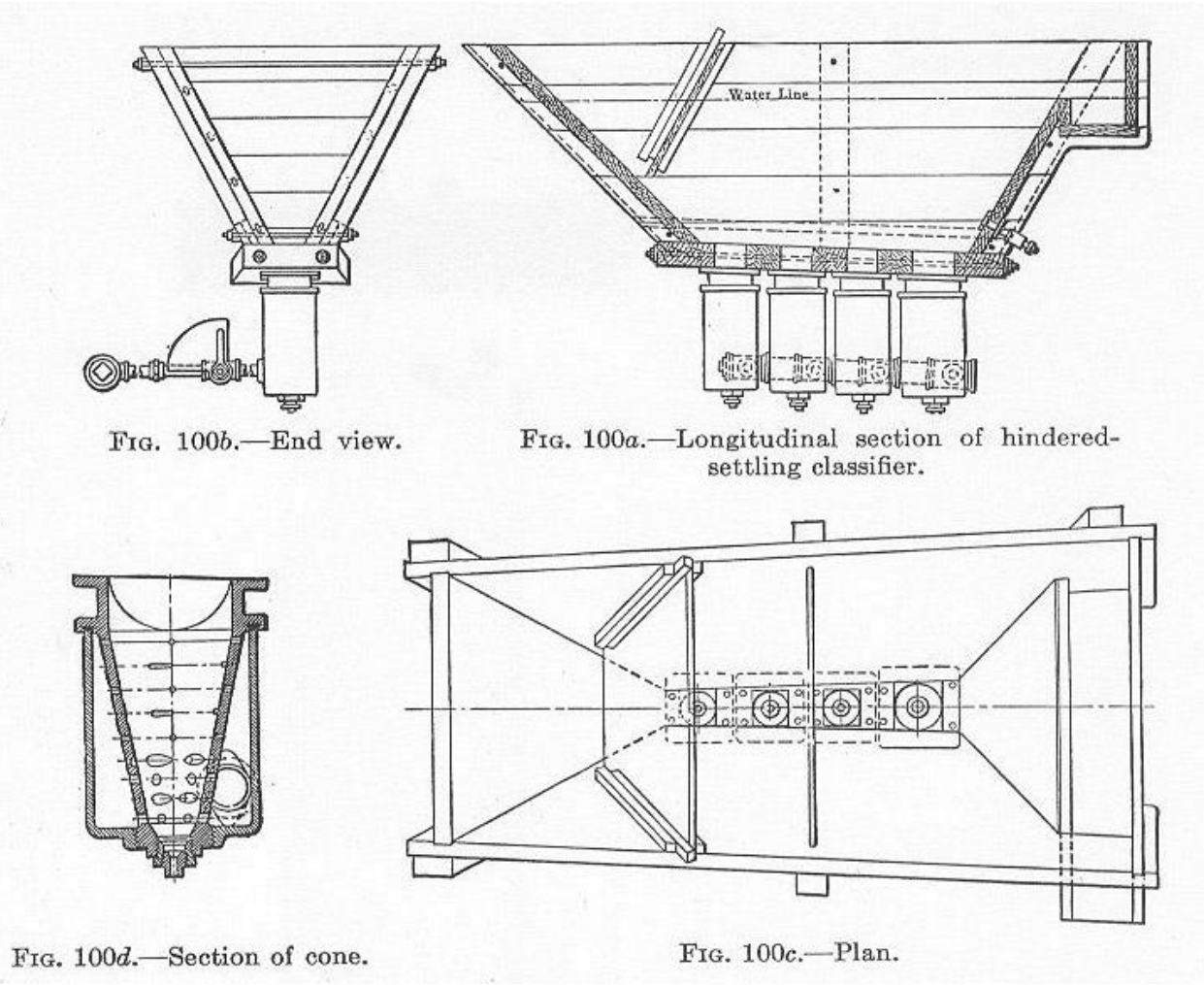


FIG. 100*b*.—End view.

FIG. 100*a*.—Longitudinal section of hindered-settling classifier.

FIG. 100*d*.—Section of cone.

FIG. 100*c*.—Plan.

Figura 43

Clasificador hidráulico simple

- **Se denomina clasificador 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 las parte superior y en el fondo del clasificador se formará un lecho de partículas sólidas.**

Clasificador hidráulico simple de Quinn Process

Figura 44

Clasificador hidráulico simple

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

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

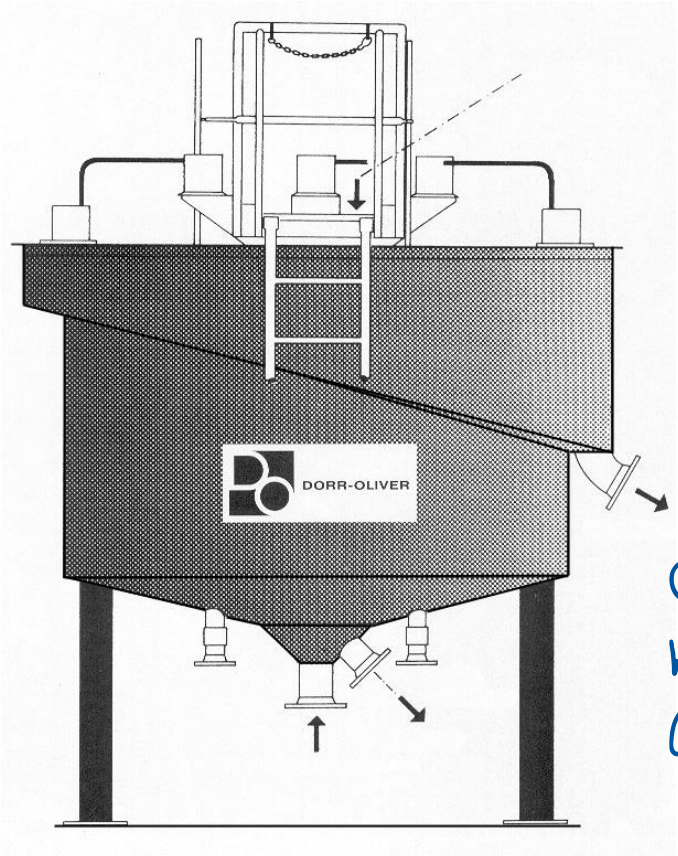


Figura 45

Clasificador hidráulico Dorr Oliver (FLSmidth)

Clasificador hidráulico simple

- **La regulación del corte (1 – 0.075 mm) se lleva a cabo por medio de la velocidad ascendente del fluido y por los niveles del lecho fluido.**

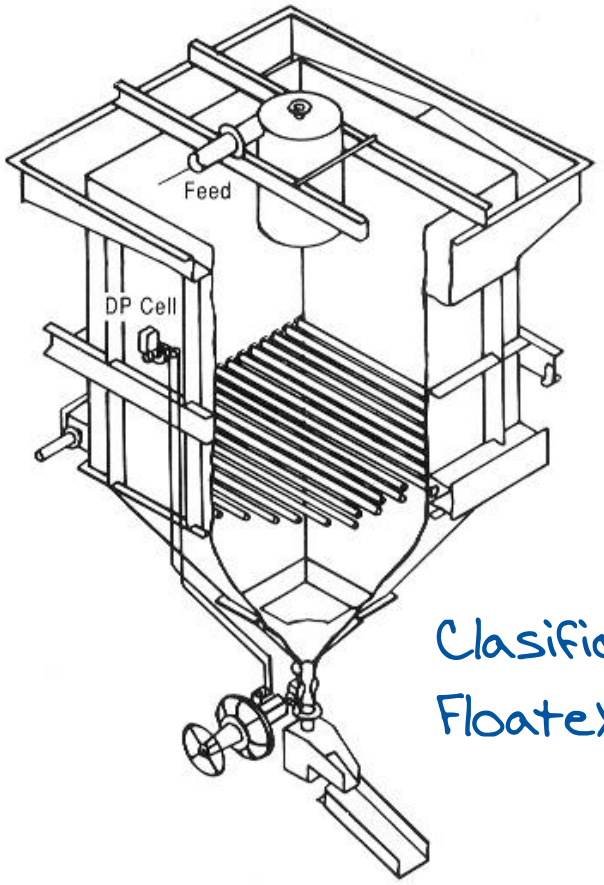


Figura 46

Clasificador hidráulico Floatex de Carpco

Clasificador hidráulico múltiple

- **Consiste en una cuba con una serie de compartimentos. El producto a clasificar circula sobre cada compartimento.**

- **Cada compartimento presenta un doble fondo mediante chapa perforada para permitir el paso del agua ascendente a presión y crear condiciones de sedimentación obstaculizada.**

Clasificador hidráulico múltiple (hydrosizer) de QVA

Figura 47

Clasificador hidráulico múltiple

- **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 granulométrico del material.**

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

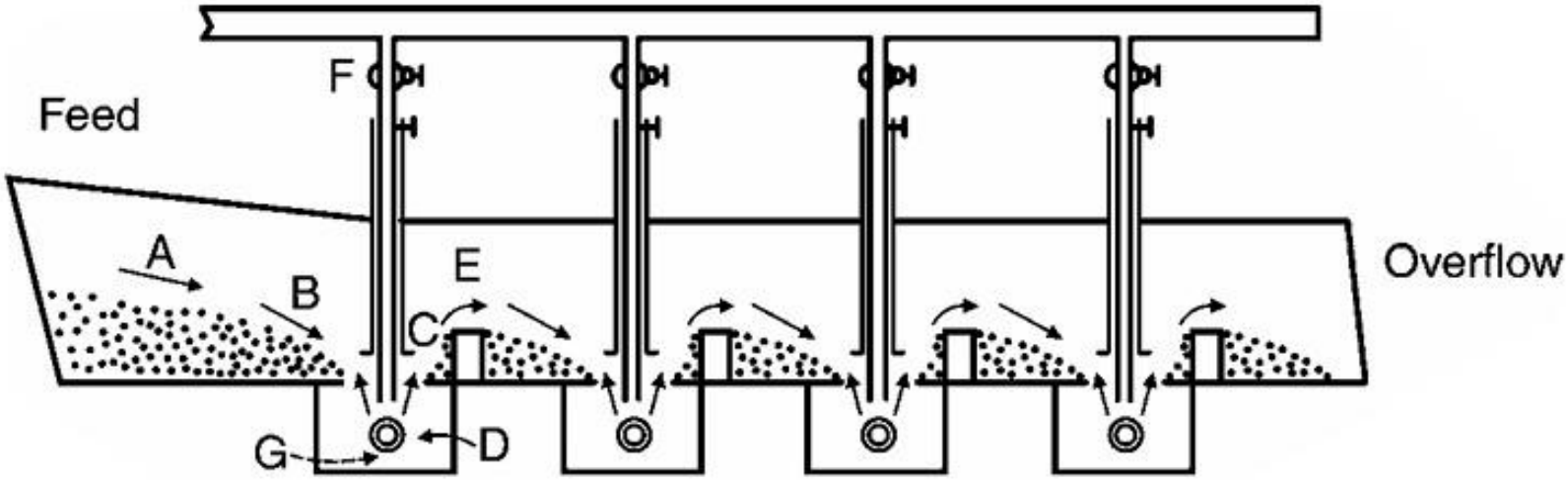


Figura 48

Clasificador hidráulico múltiple

- **Por los orificios centrales abandonarían 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.**

Figura 49

Clasificador hidráulico múltiple

- **La densidad de cada compartimento se ve modificada una vez que se ha producido la sedimentación de las diferentes fracciones granulométricas, actuando este cambio de densidad sobre un dispositivo electromecánico que enviará la señal correspondiente a la electroválvula de aguja para que ésta automáticamente abra.**

Figura 50

Clasificador hidráulico múltiple

- **Existe un aumento en la superficie de decantación, factor que también contribuye al tipo de corte granulométrico obtenido.**

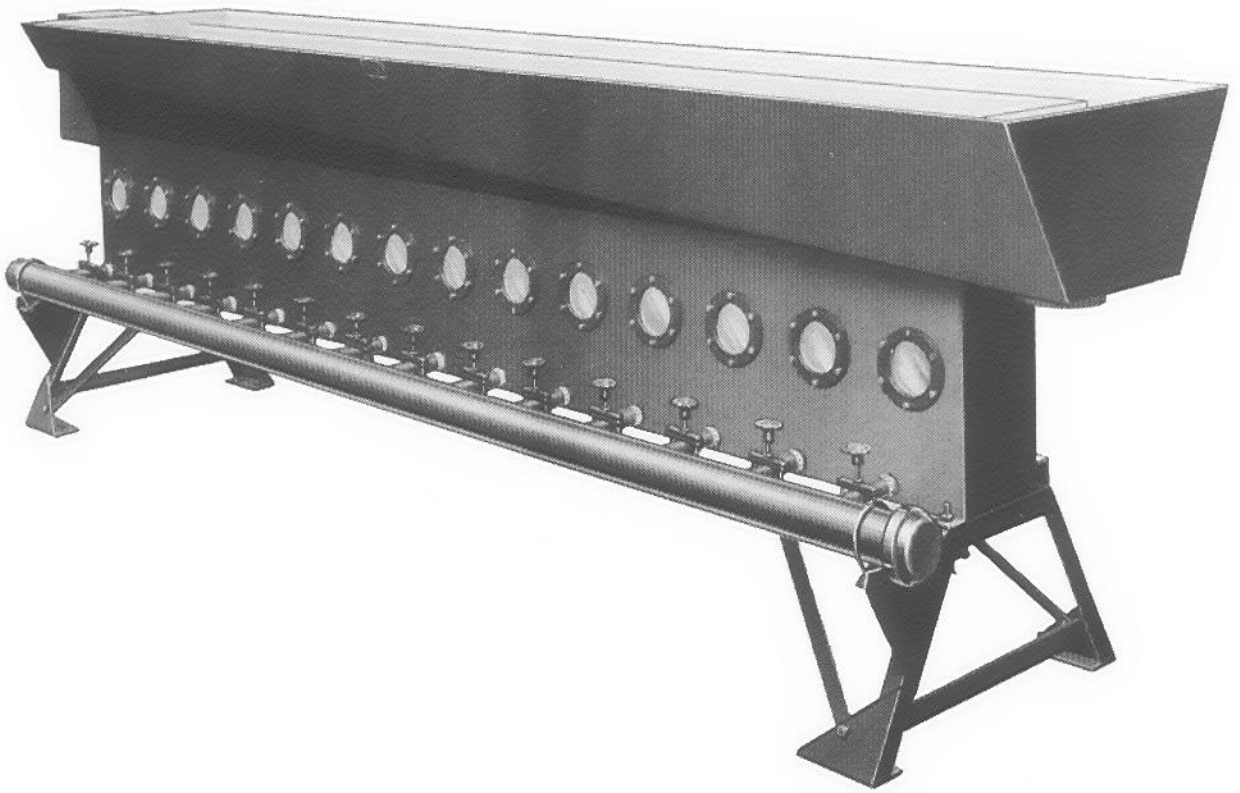
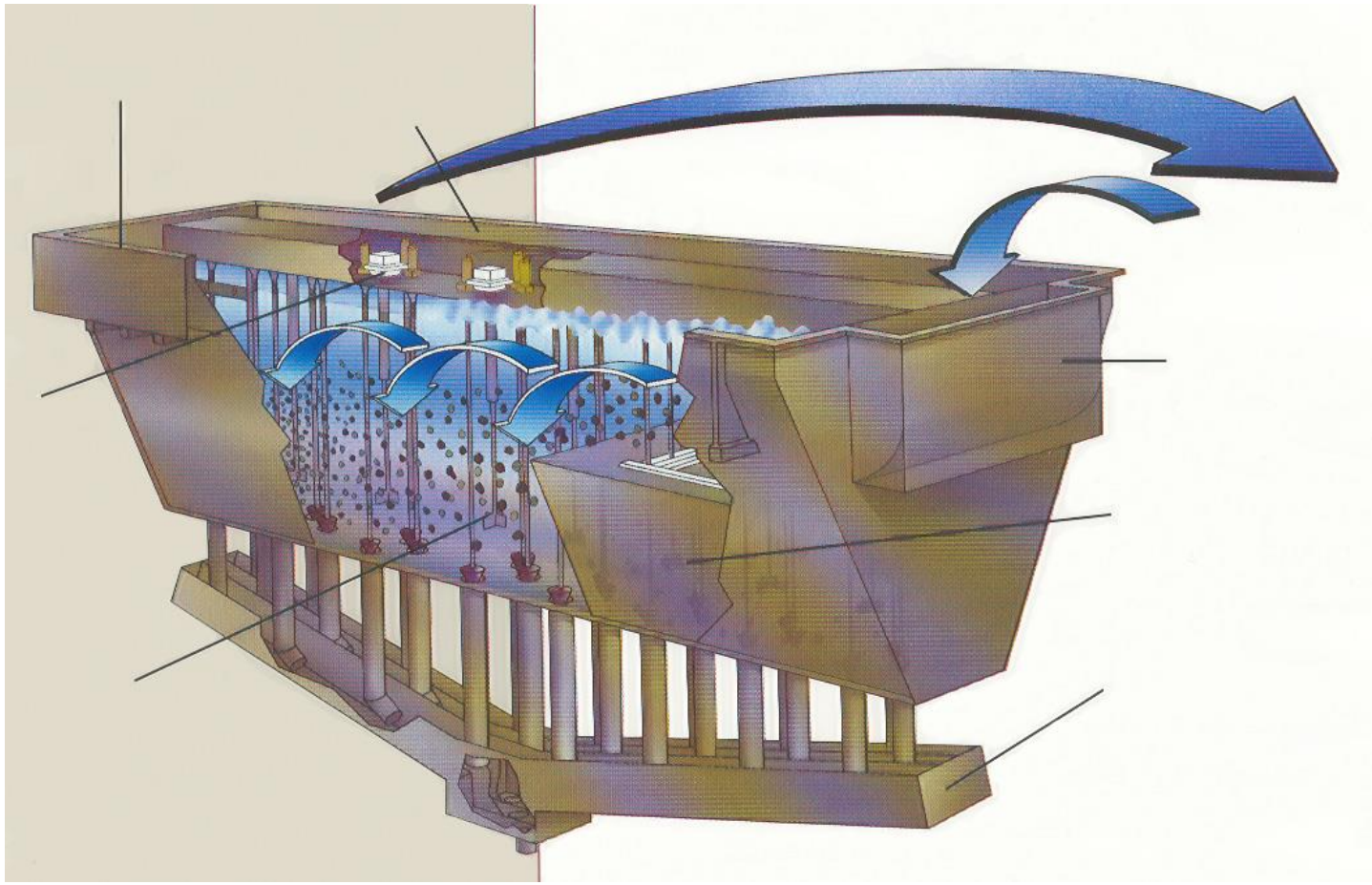


Figura 51

Clasificador hidráulico múltiple

- **Existen 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.**

Figura 52



Clasificador hidráulico múltiple

- **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 las 100 micras hasta los 6 mm y capacidades de 400 tph.**

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

Figura 53

Clasificador hidráulico múltiple de Dorr-Oliver (FLSmidth) - HydroSizer

Clasificador hidráulico múltiple

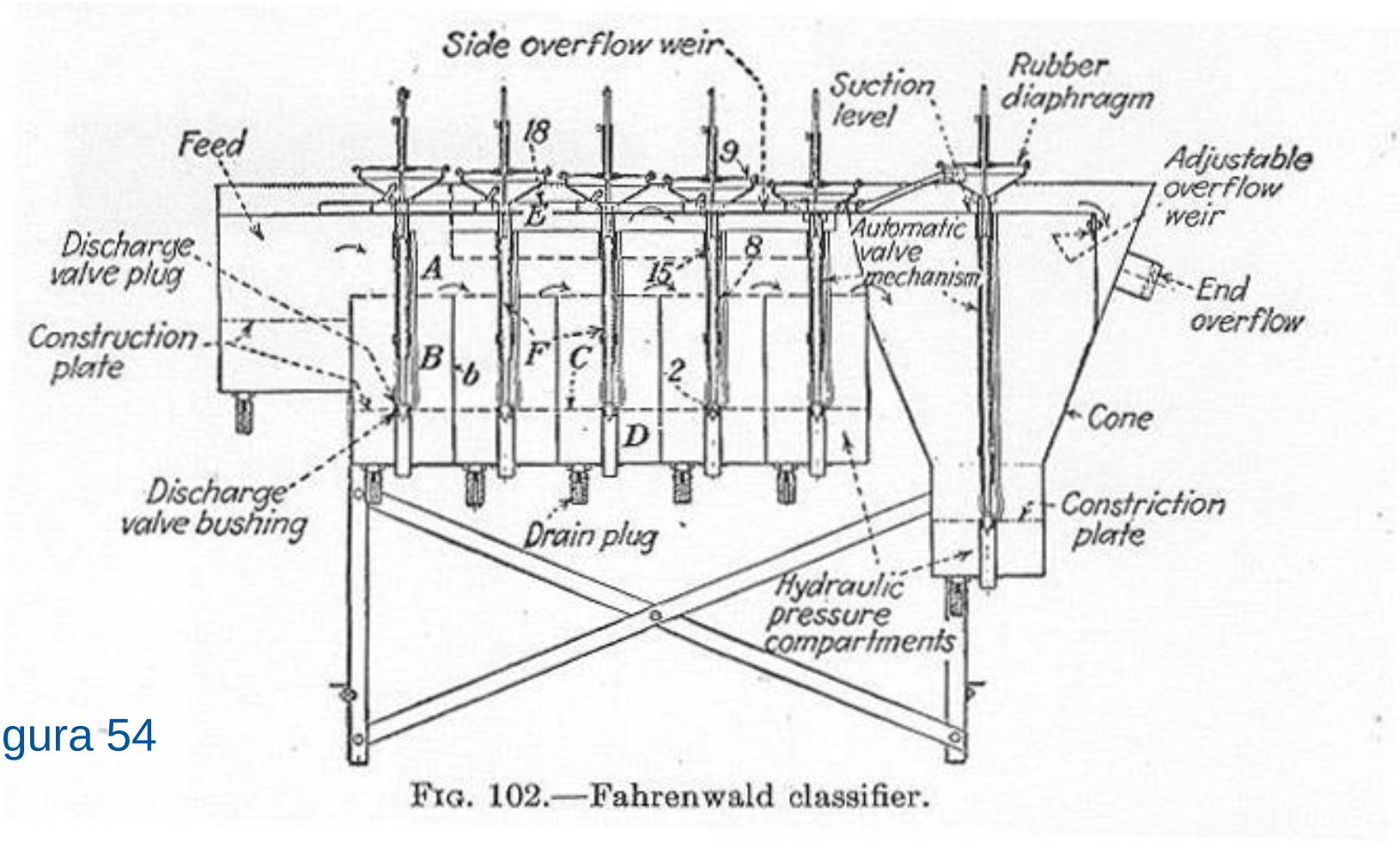


Figura 54

FIG. 102.—Fahrenwald classifier.

Clasificador hidráulico múltiple

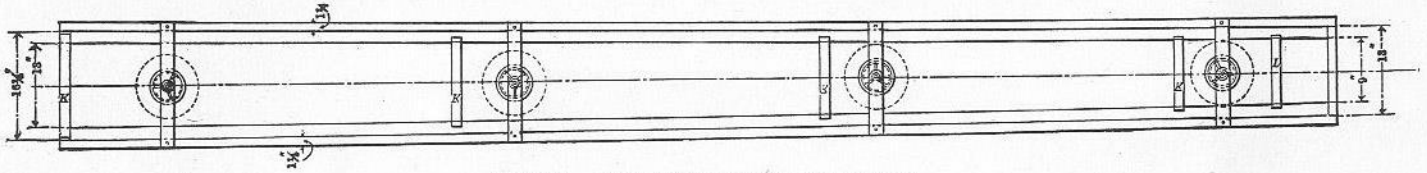


FIG. 94a.—Plan of Evans hydraulic classifier.

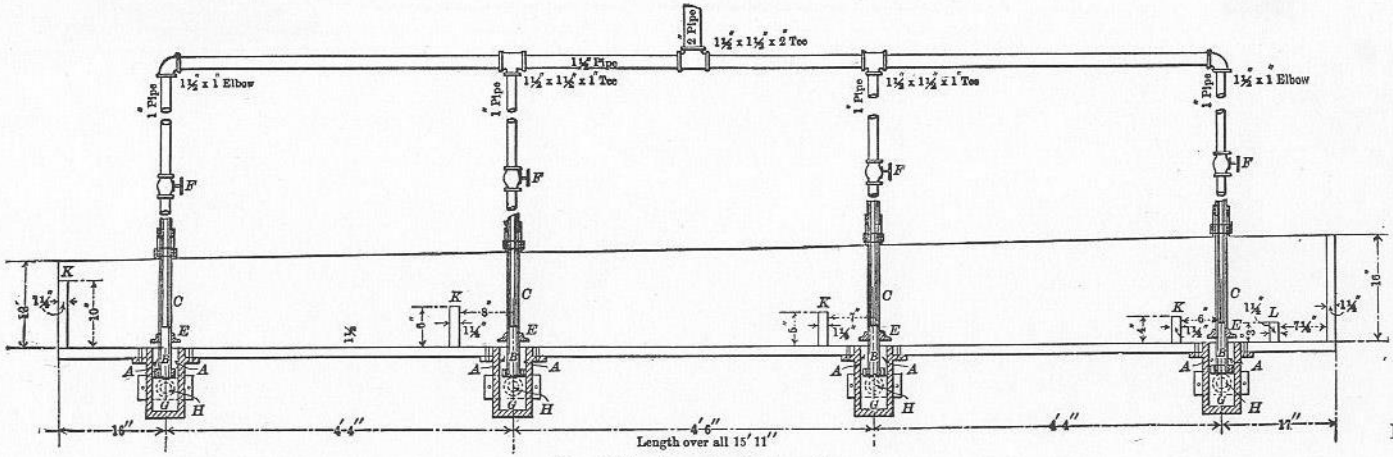


FIG. 94b.—Longitudinal section.

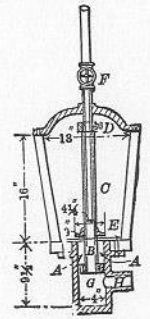


FIG. 94c.—Cross section.

Figura 55

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).**

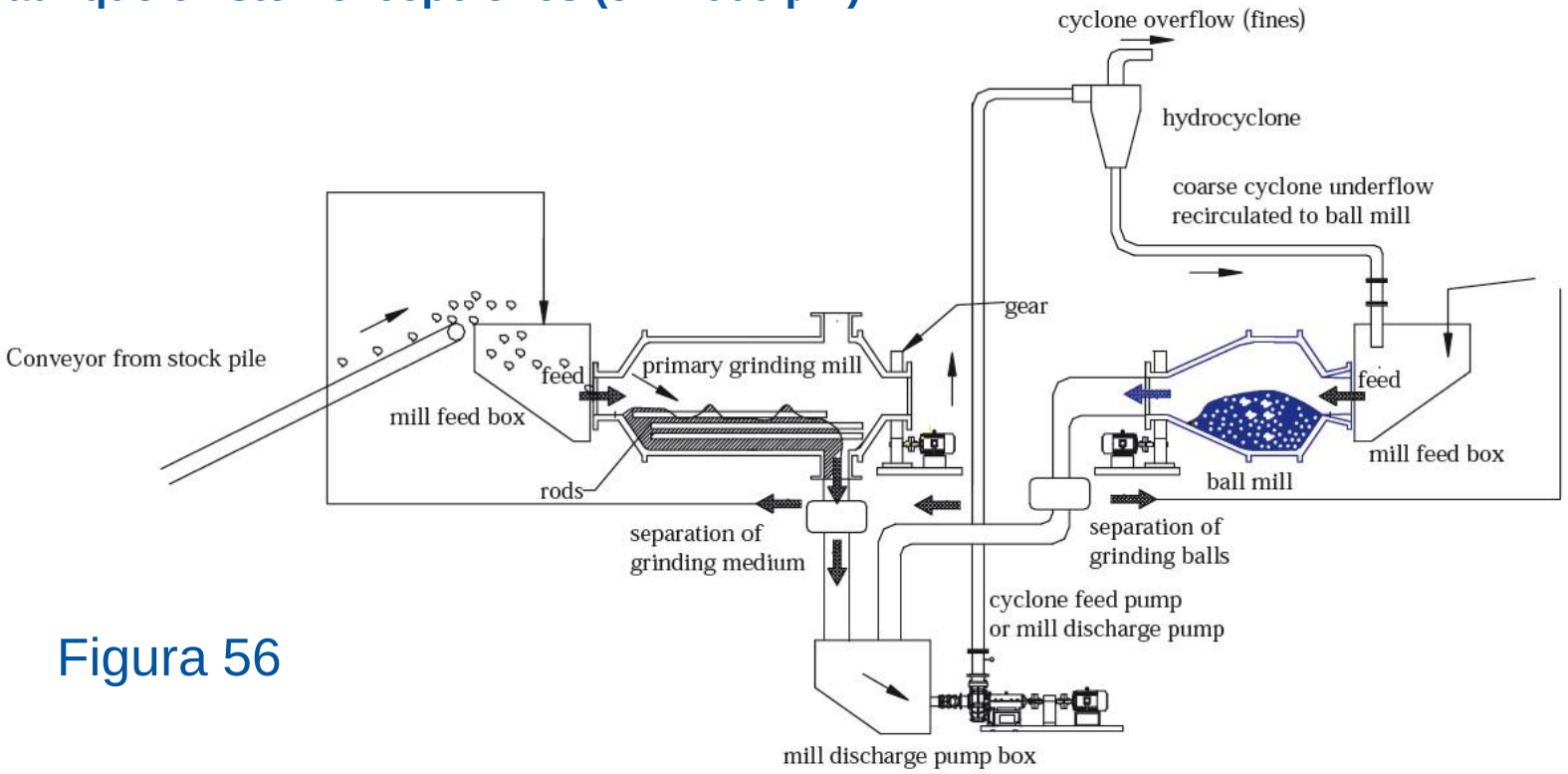


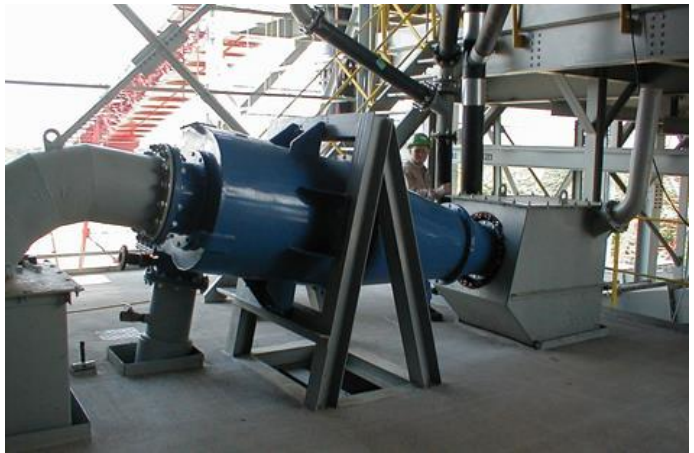
Figura 56

Two-stage closed circuit for grinding and classification of ore.

Hidrociclones

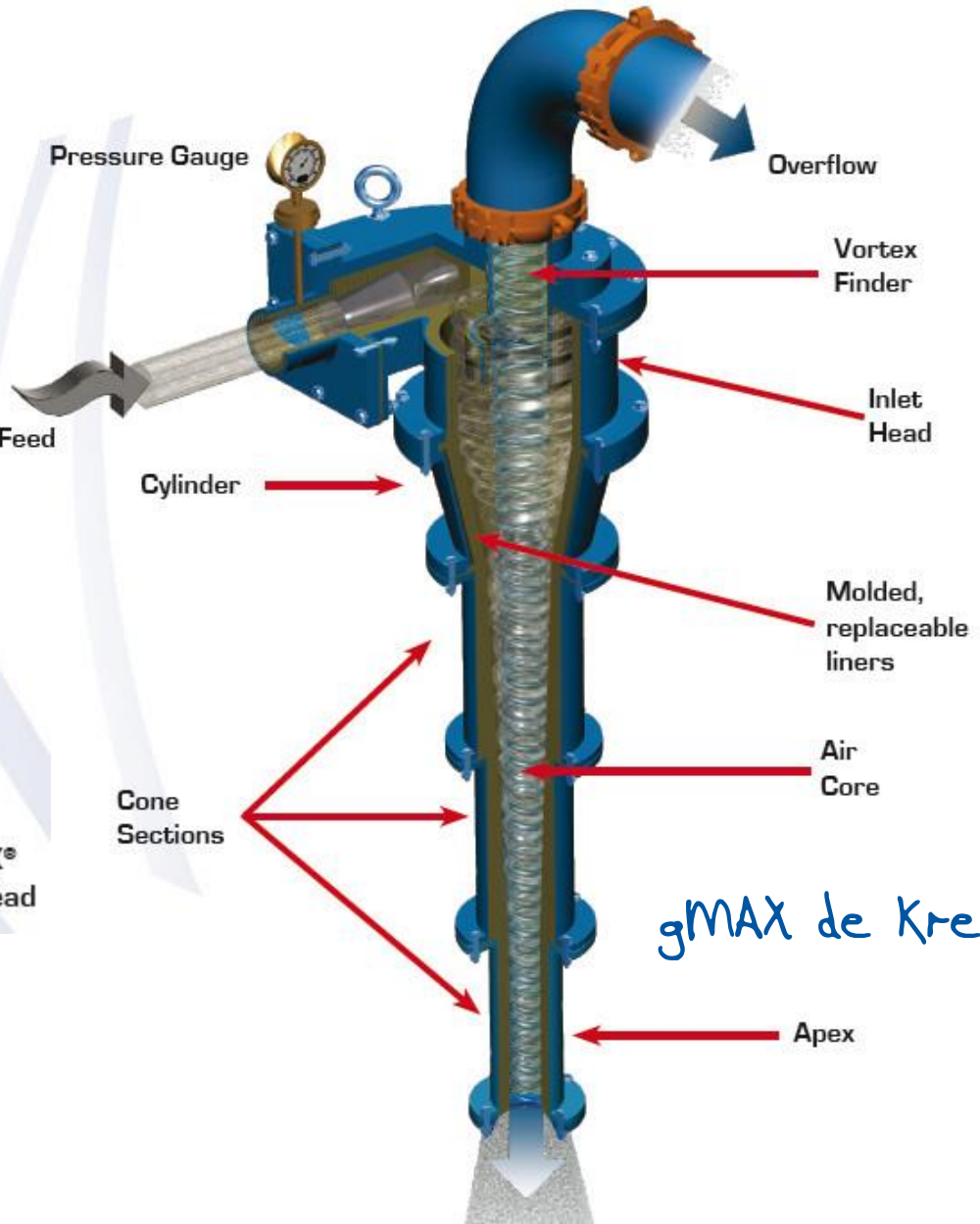
- **Se fabrican en una amplia variedad de diámetros desde los 13 mm hasta los 900 mm.**
- **Su funcionamiento se basa en la clasificación que se produce aprovechando la aparición de grandes fuerzas centrífugas (hasta de 10.000 g's en tamaños pequeños).**
- **Los hidrociclones se fabrican en acero, imponiéndose en muchas aplicaciones los materiales plásticos.**
- **Interiormente están constituidos por revestimientos de desgaste de material cerámico, Ni-hard, poliuretano, neopreno, etc.**

Figura 57



Krebs HM-cyclone - Heavy Media Cyclones para carbón

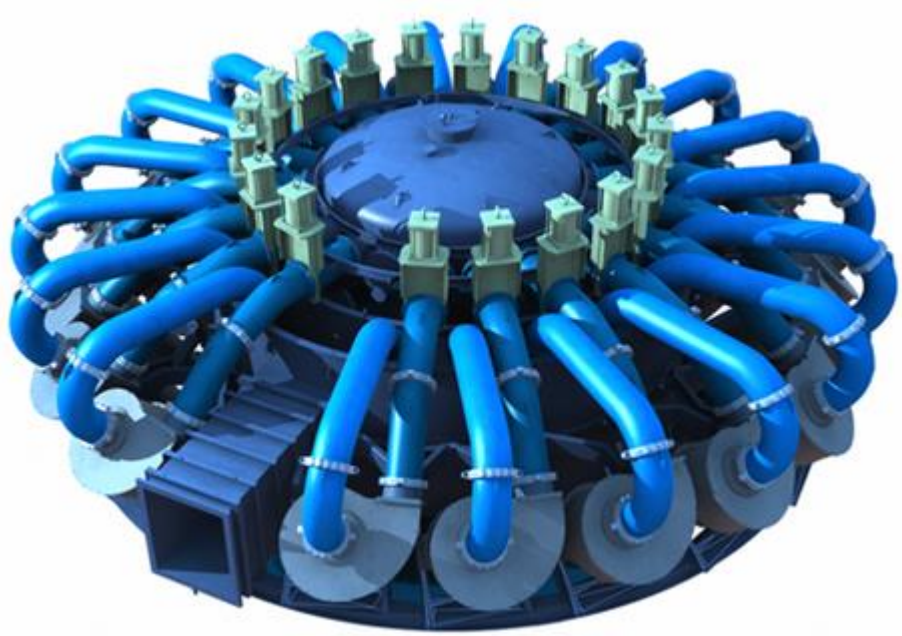
Hidrociclones



gMAX de Krebs (FLSmidth)

Figura 58

Hidrociclones



Krebs Radial Manifold Systems

Krebs (FLSmidth)

Figura 59

Hidrociclones. Componentes principales

- **Sección cilíndrica de alimentación**: **Donde se encuentra la entrada tangencial de la alimentación y el tubo localizador del vórtice secundario. 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 10-20º y su función es la misma que la anterior.**

- **Ápice (apex): Es la terminación de la sección cónica y debe ser de tamaño adecuado, para que los gruesos sean expulsados sin taponamientos.**

- **Localizador del vórtice (vortex finder): es la boquilla a través de la cual se extraen los finos y la mayor parte del agua. Debe extenderse por debajo de la entrada de la alimentación para que no se produzca un cortocircuito. Su diámetro suele ser un 35% del diámetro del ciclón.**

Hidrociclones

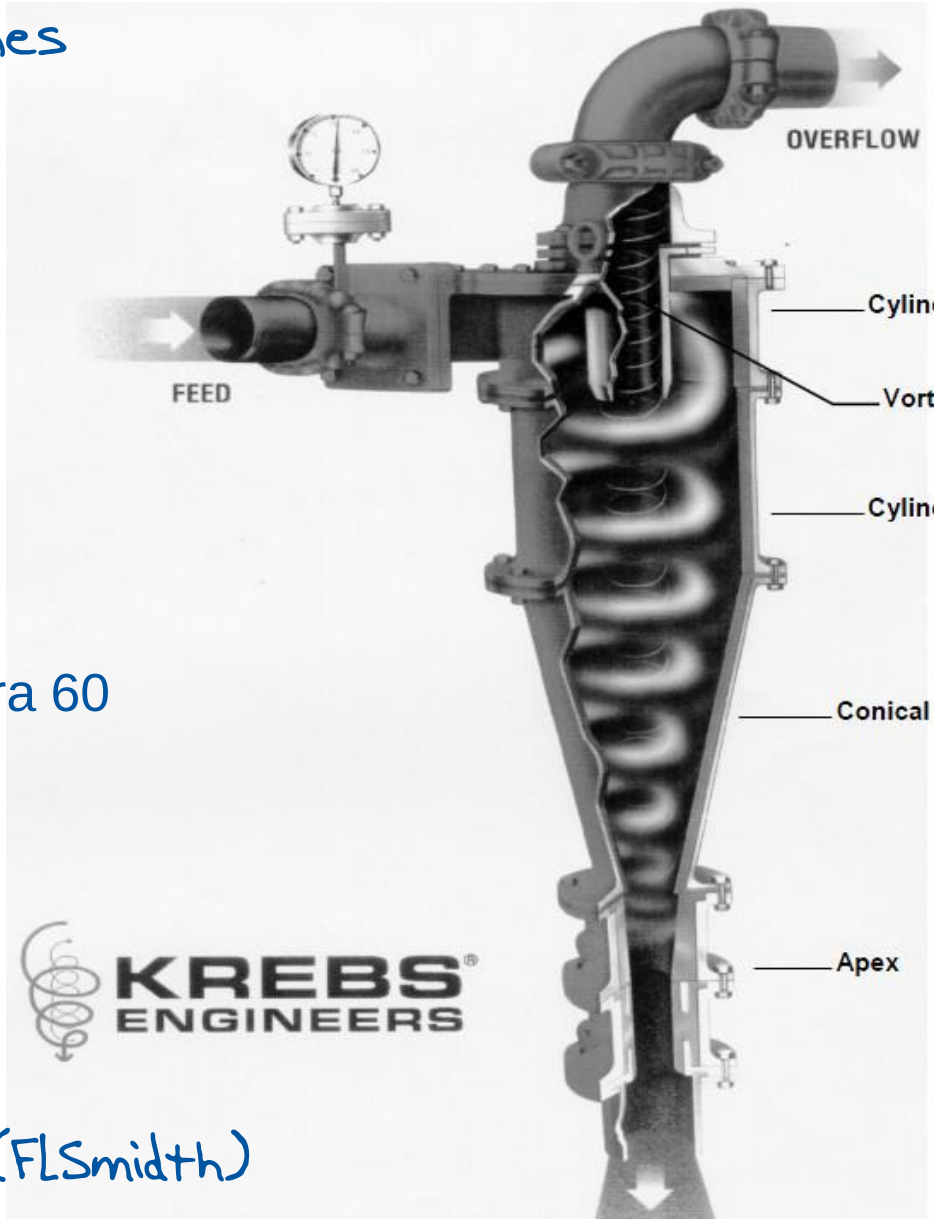


Figura 60

Krebs (FLSmidth)

Hidrociclones. Principio de Operación

- **La alimentación puede ser tangencial o de tipo envolvente.**

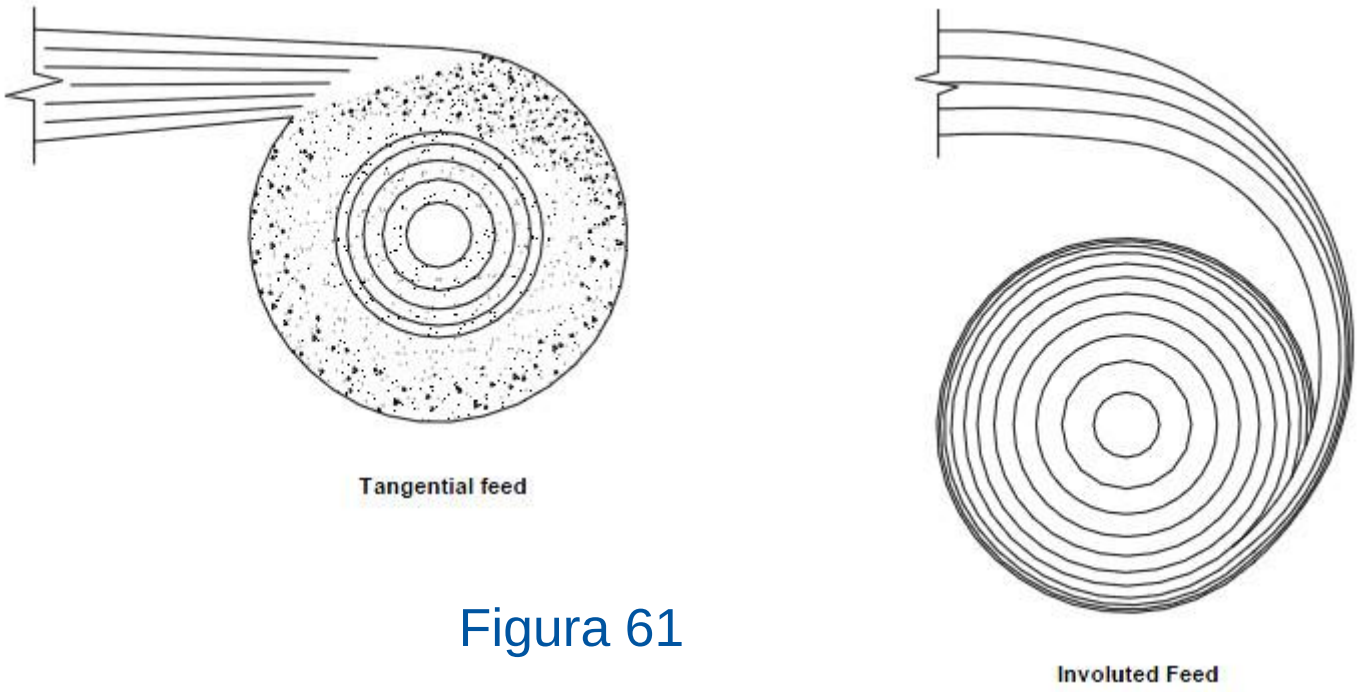


Figura 61

- **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 a dos fuerzas principales, una centrífuga que las obliga a dirigirse hacia la pared y otra de arrastre debida a la viscosidad que las obliga a dirigirse hacia el centro del ciclón.**

Hidrociclones. Principio de Operación

- **El movimiento turbulento que se produce en el interior del ciclón va a generar dos remolinos o vórtices, uno primario que transportará las partículas más gruesas o pesadas por la acción centrífuga.**

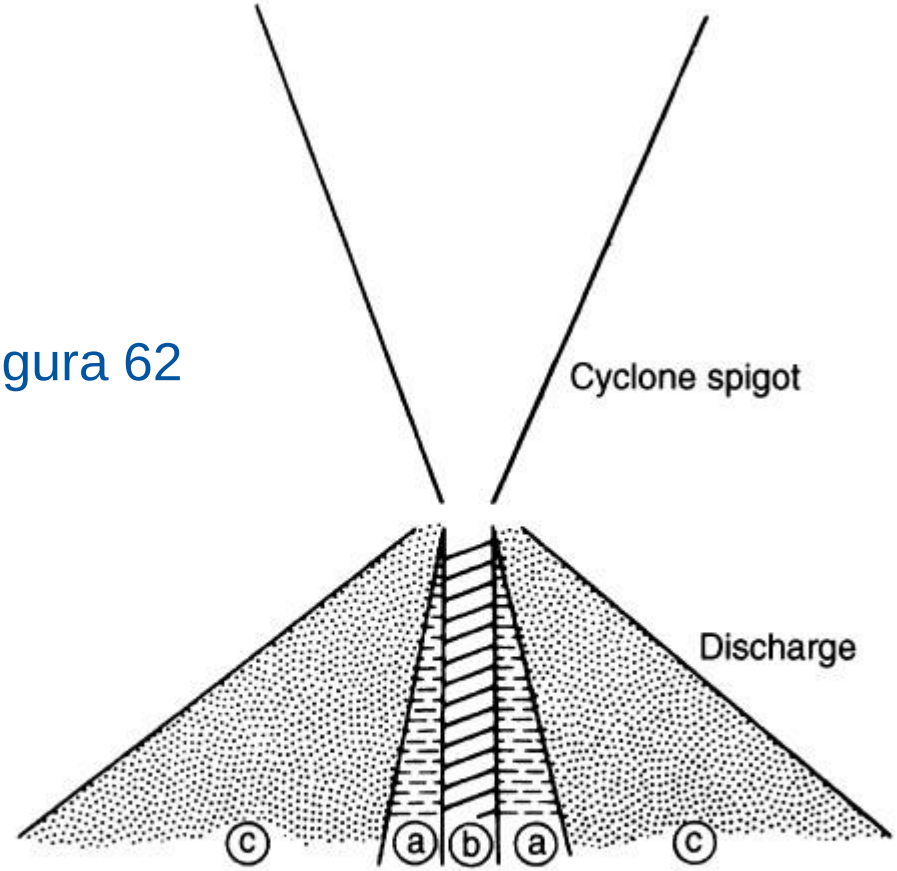
- **Y otro, secundario de menor presión y situado en la zona central, que elevará a las partículas más finas o ligeras que no han sido centrifugadas.**

- **La descarga del hundido - gruesos (underflow) puede ser en espiral, cuando el vértice de aire se encuentra sólo a nivel del vórtice y el ciclón trabaja como espesador (70% de sólidos).**

- **O en forma de paraguas y entonces la columna de aire va desde el ápice al vórtice y el ciclón funciona como clasificador (40-60% de sólidos).**

Hidrociclones. Principio de Operación

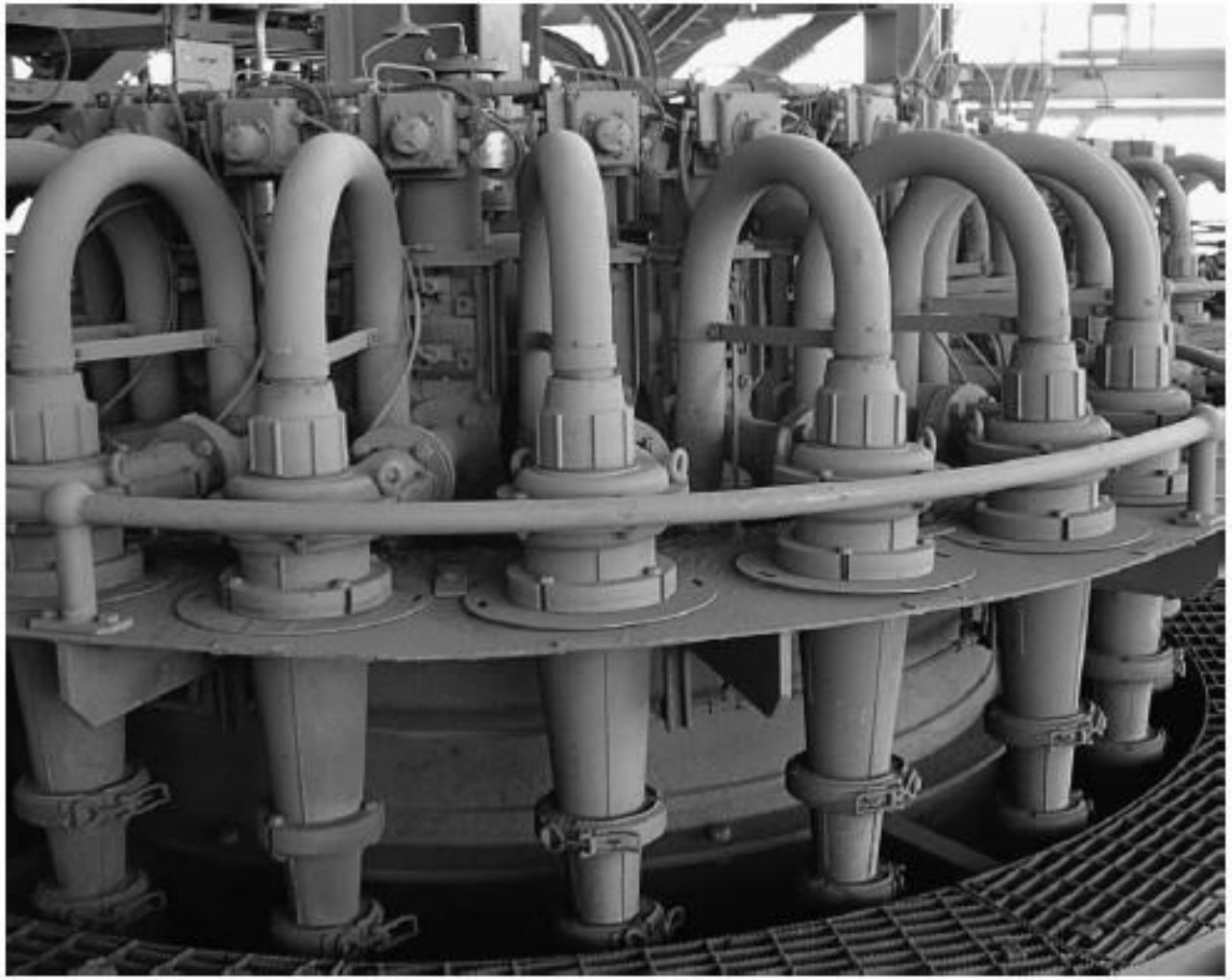
Figura 62



Effect of spigot size on cyclone underflow: zone (a), correct operation; zone (b), "roping" – spigot too small; zone (c), excessively dilute – spigot too large

Hidrociclones. Principio de Operación

Figura 63



Centrifugadoras

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

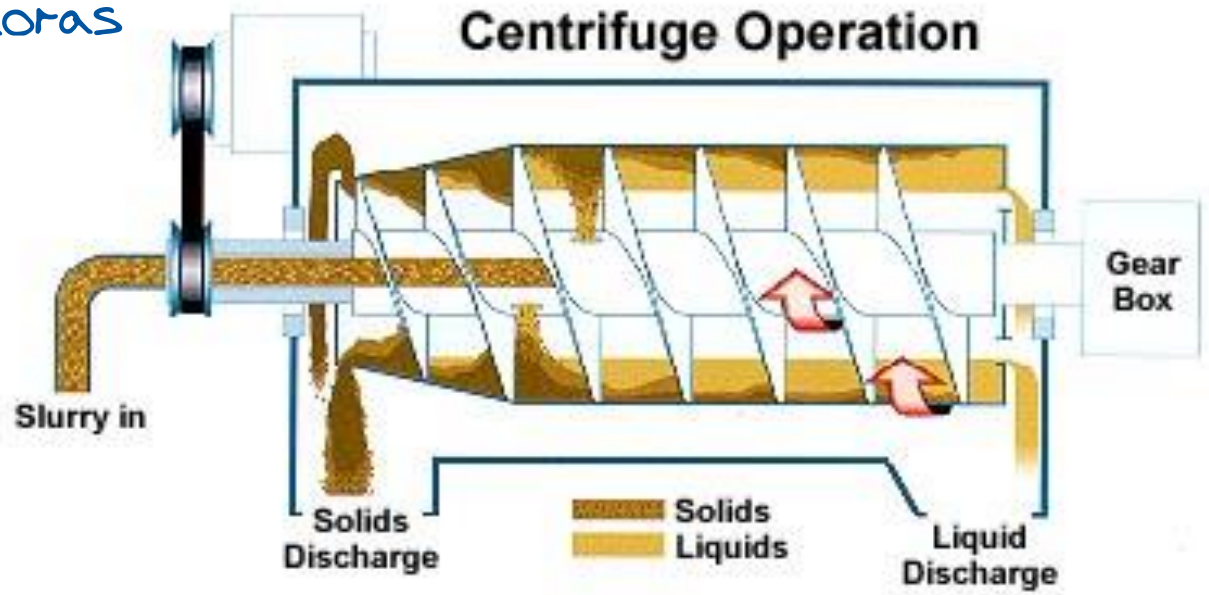
- **Son equipos semejantes a un clasificador de tornillo de tal forma que la sedimentación gravitatoria se sustituye por una sedimentación forzada a través de significativas fuerzas centrífugas (400 g's).**

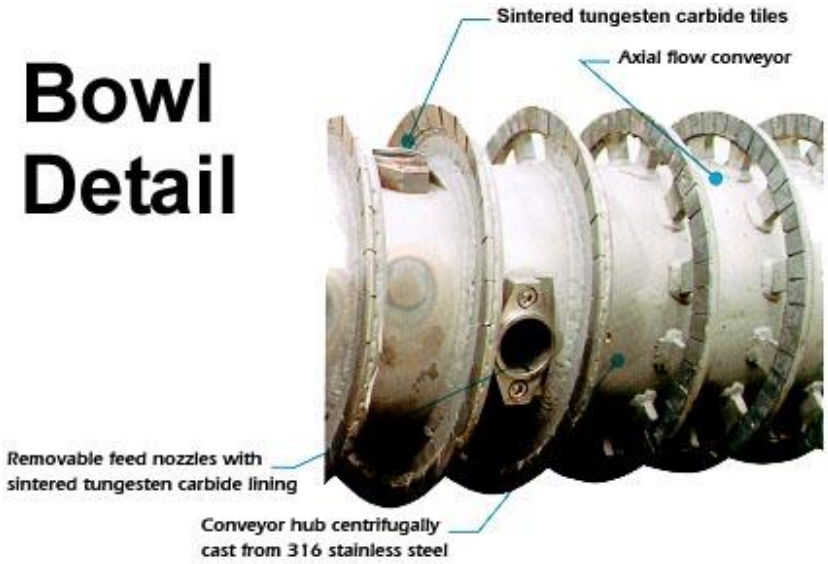
- **Estos equipos tienen un campo de aplicación en aquellos procesos industriales donde son necesarios cortes granulométricos que no pueden alcanzar los hidrociclones (diámetros de partícula inferiores a 10 µm).**

- **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.).**

Centrifugadoras

Figura 64





Centrifugadoras. Modo de Operación

- **El producto que queremos clasificar se introduce a través del rotor interior, el cual dispone de unas salidas por las que la alimentación entrará en la cámara de centrifugación.**

- **La cámara de centrifugado está limitada por un cilindro tronco-cónico que gira a una velocidad elevada.**

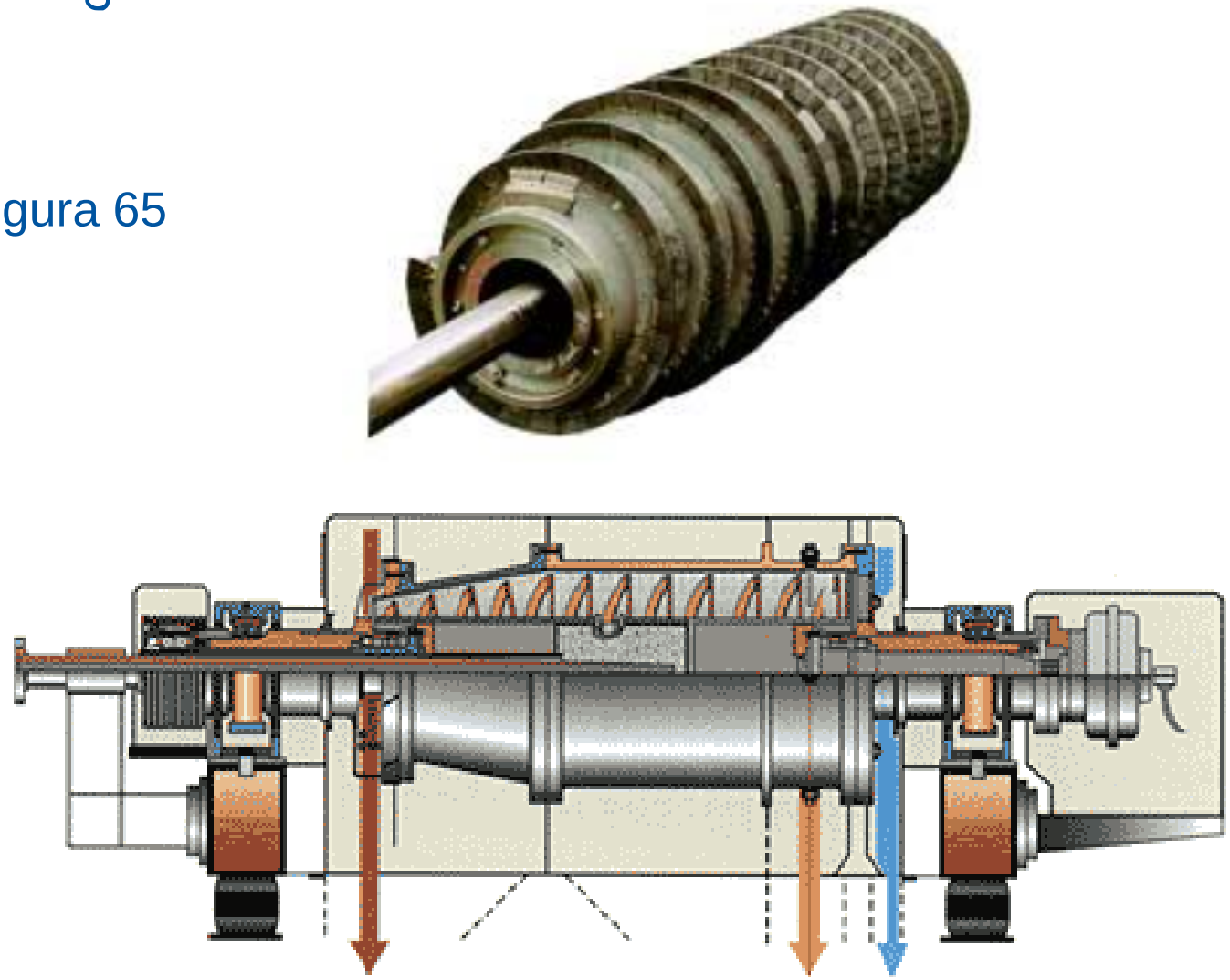
- **Las partículas gruesas o pesadas son sometidas a elevadas fuerzas centrífugas que las desplazará hacia la pared interna del cilindro exterior, donde serán arrastradas por la acción del tornillo.**

- **El tornillo gira entre un 2% y un 6% de velocidad inferior y en el mismo sentido que la cuba, por lo que extraerá las partículas gruesas por uno de los extremos.**

- **Las partículas finas o ligeras serán extraídas por el otro extremos junto con el líquido como reboso, al circular por las aberturas existentes en los anillos del tornillo.**

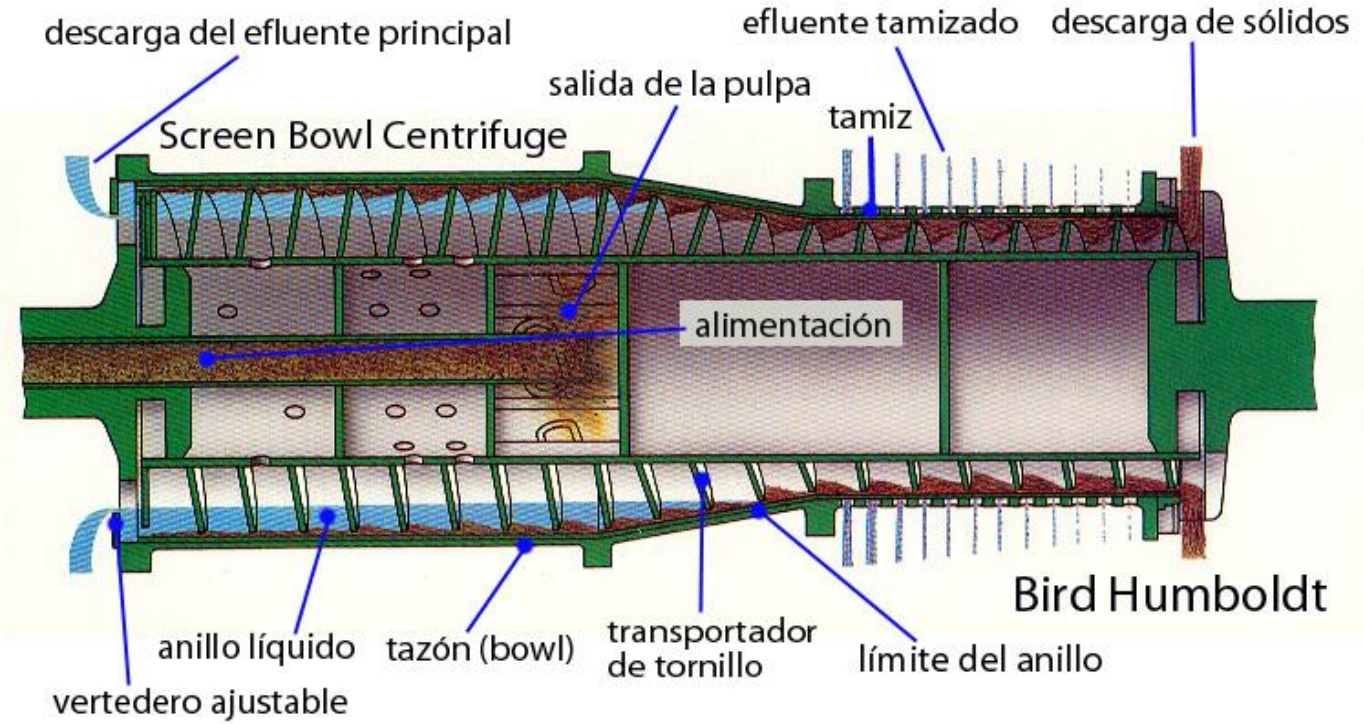
Centrifugadoras

Figura 65



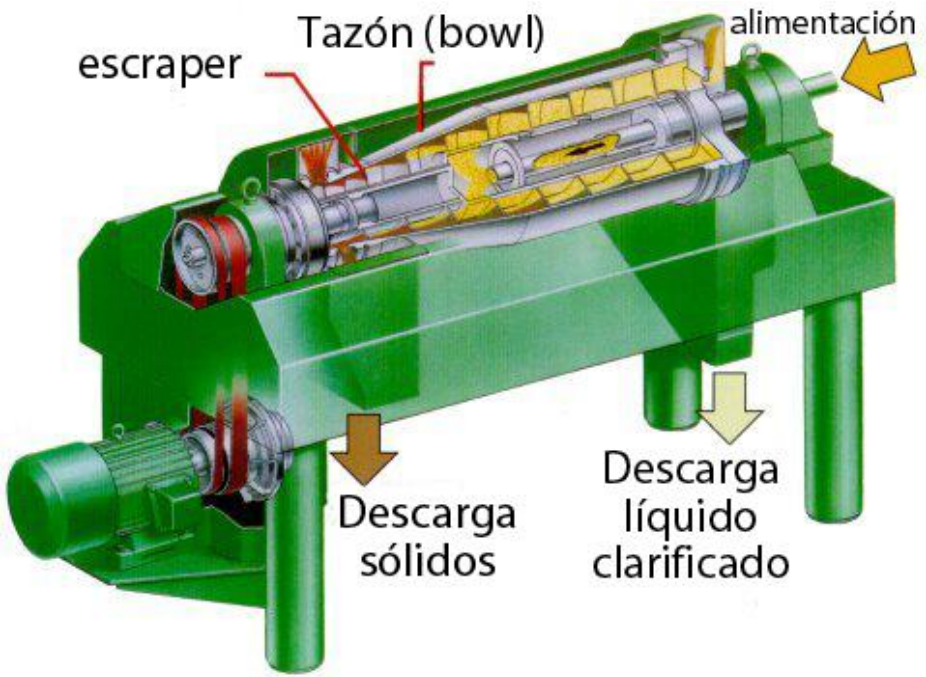
Centrifugadoras

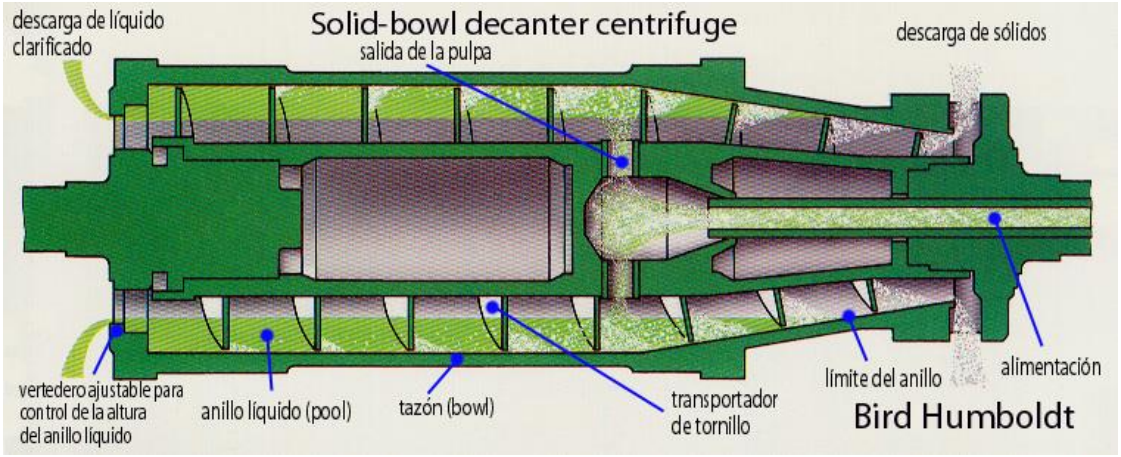
Figura 66



Centrifugadoras

Figura 67





Clasificadores Neumáticos

- **Los clasificadores neumáticos tienen un campo limitado en la preparación de minerales, pues exige que los productos se encuentren secos.**

- **Industrias donde si se encuentran implantados estos equipos son: carbón, cemento, minerales que no exigen etapas posteriores y/o previas por vía húmeda y donde se trabaja con tamaños muy finos.**

Criba Despolvoreadora

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

- **El equipo se alimenta de un carbón que hay que despolvorear.**

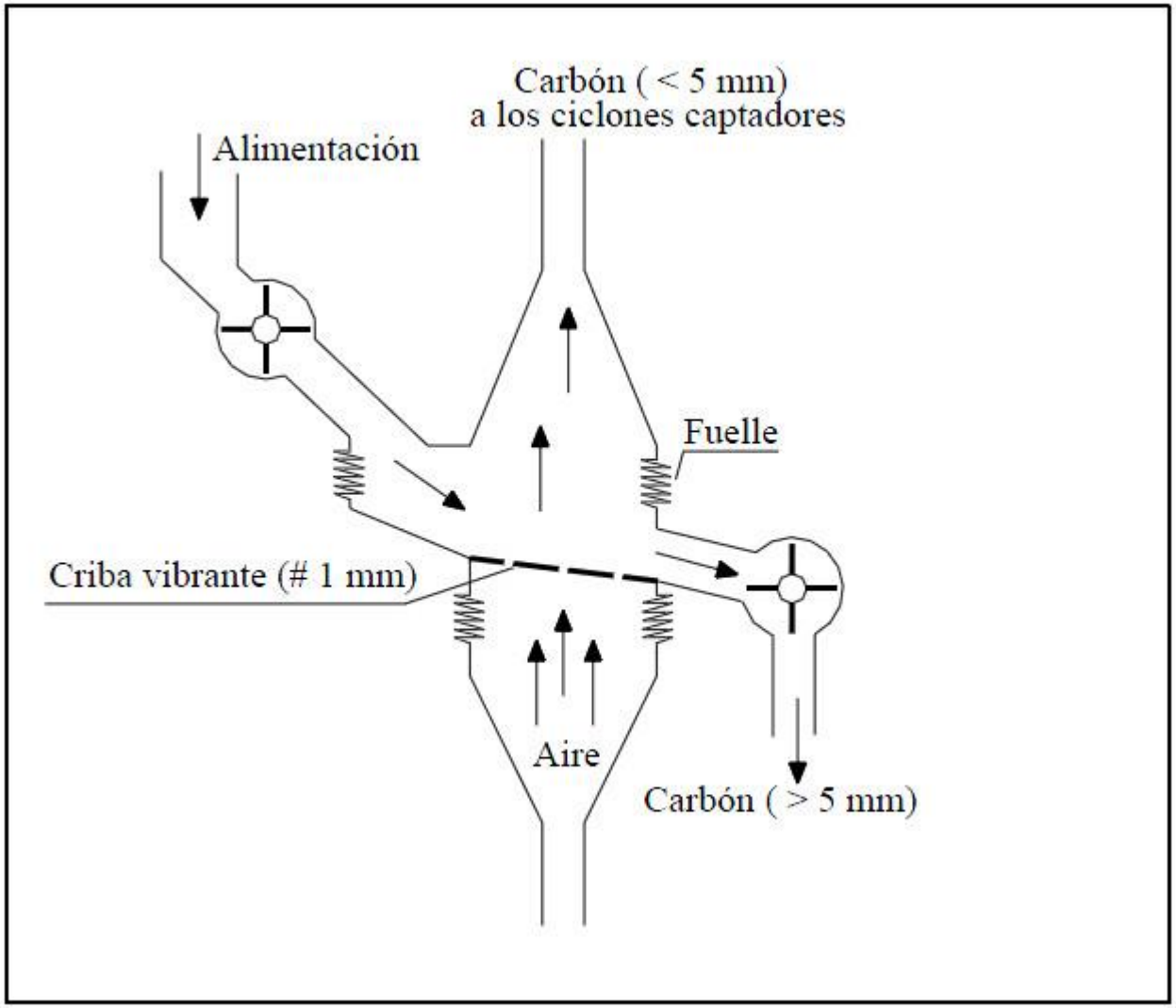
- **Este carbón cruza una corriente de aire vertical cuya velocidad ascendente es igual que la velocidad de caída para las partículas de carbón de 0.5 mm.**

- **El producto a clasificar es transportado por la corriente ascendente hacia los ciclones captadores. La corriente de aire impide que las partículas entre 0.5 – 1 mm pasen a través de la criba.**

- **Los fuelles garantizan el sellado entre el cajón de cribado y la campana superior.**

Criba Despolvoreadora

Figura 68

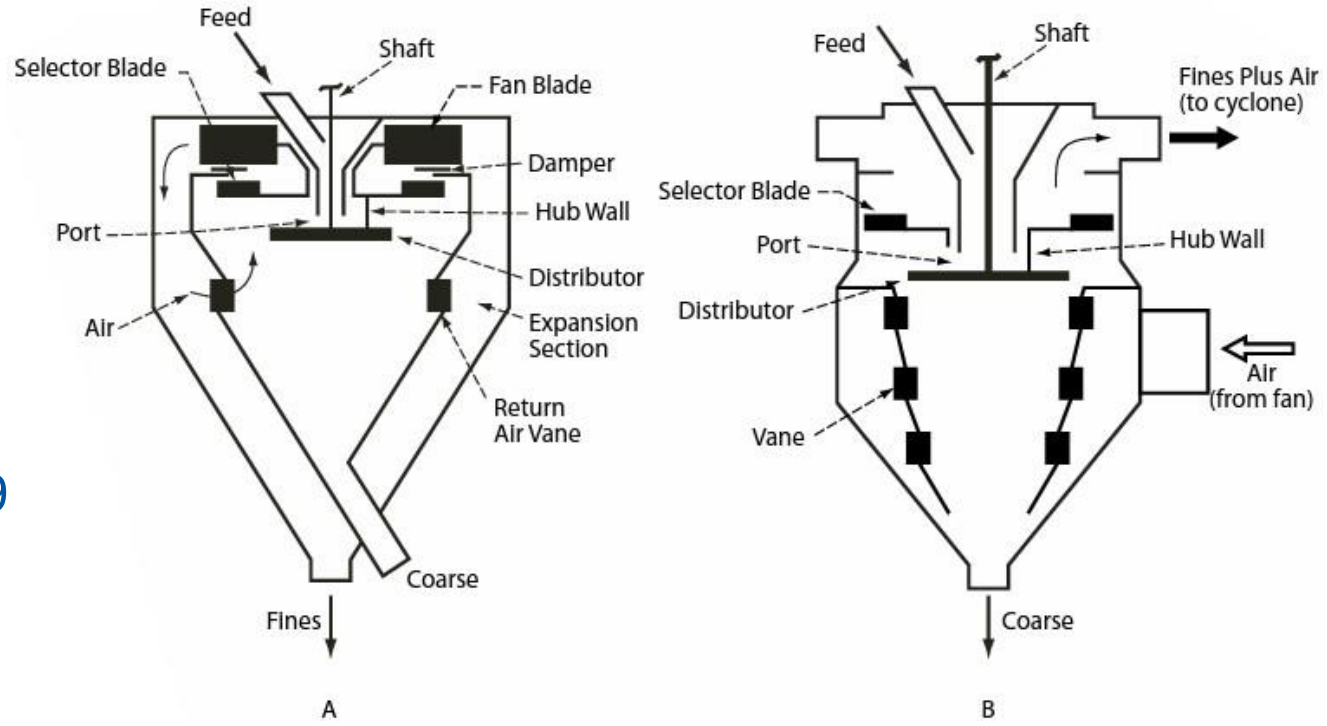


Separadores Dinámicos

- **Los más conocidos son los tipo *Whizzer*, que mejora la eficiencia que proporcionan los ciclones de aire, combiando el efecto de la centrifugación y el efecto de corrientes de aire ascendentes.**

- **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 que se garantice el circuito de aire.**

Figura 69



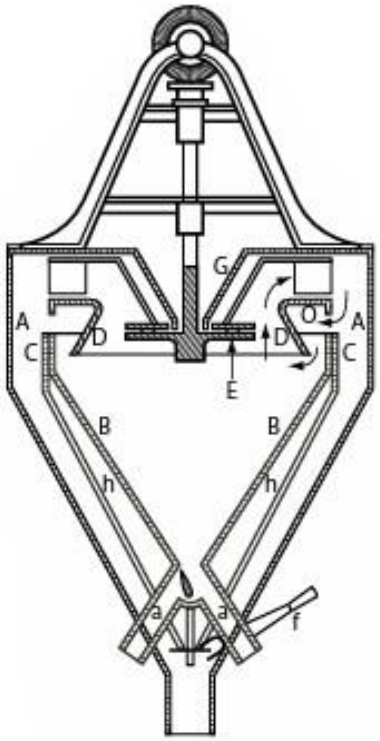
(a) First-generation Sturtevant Whirlwind (b) second-generation Humboldt-Wedag air classifier (Klumpar, Currier, and Ring 1986; reprinted by permission from *Chemical Engineering*)

Separadores Dinámicos

- **El producto que se va a clasificar se deposita sobre un disco giratorio distribuidor. Sobre estos granos se ejercerán fuerzas centrífugas y fuerzas ascendentes.**

- **Así, que aquellas partículas que san lo suficientemente finas o ligeras ascenderán por la parte de arriba y serán recogidas a través de las paredes del cono exterior.**

Figura 70



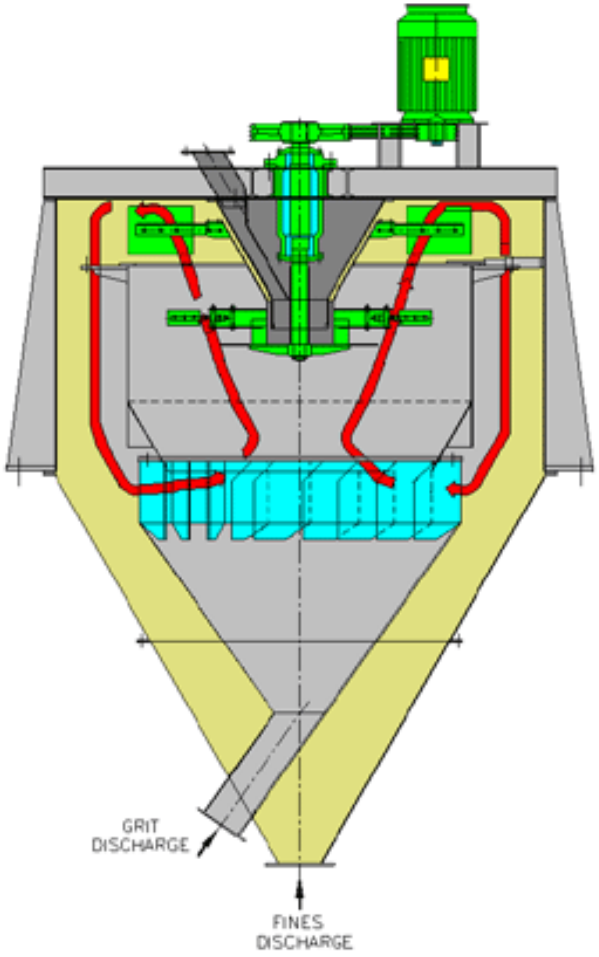
Askham air separator (Butler 1913)

Separadores Dinámicos

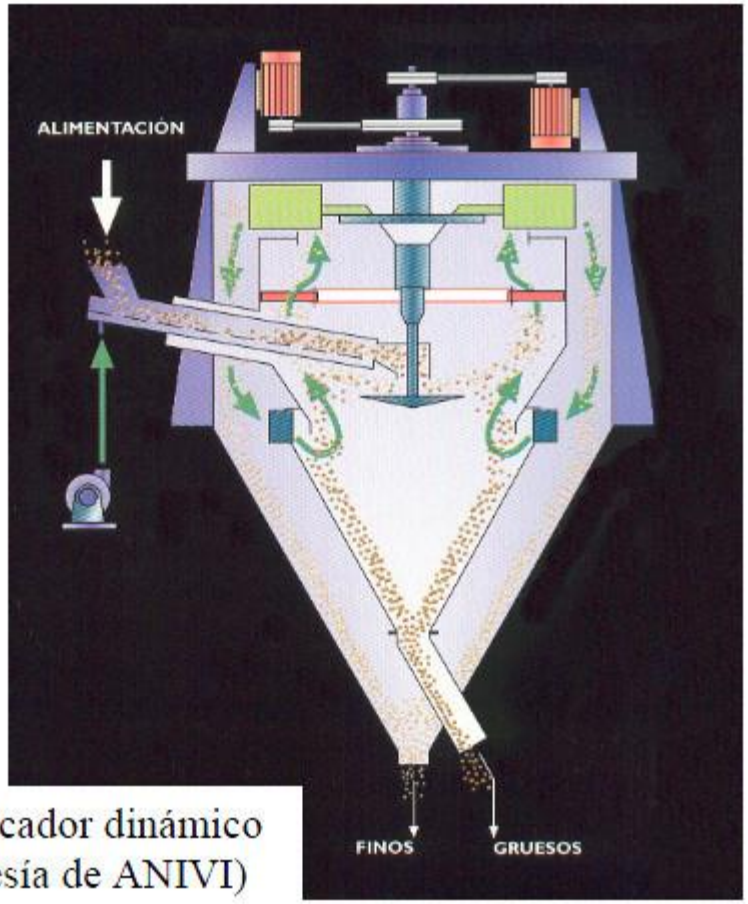
- **Las partículas gruesas que sufren la acción centrífuga no pueden ser elevadas y son llevadas hacia las paredes del cono interno sobre las que caen por gravedad.**

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

Figura 71



Separadores Dinámicos



Clasificador dinámico
(cortesía de ANIVI)

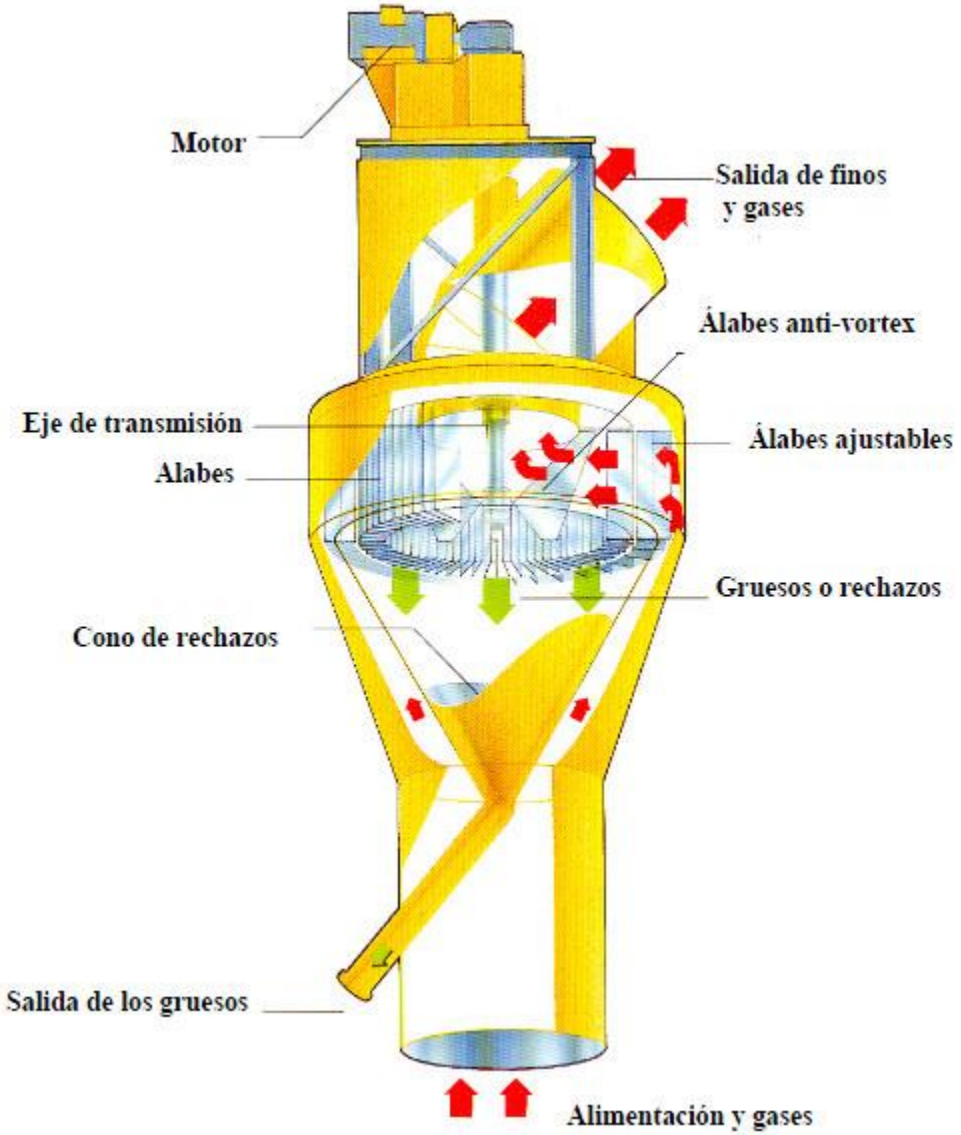


Figura 72

Separadores Dinámicos

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

- **Los separadores dinámicos permiten cortes granulométricos comprendidos entre las 10 µm y las 50 µm (industria de fabricación de cemento).**

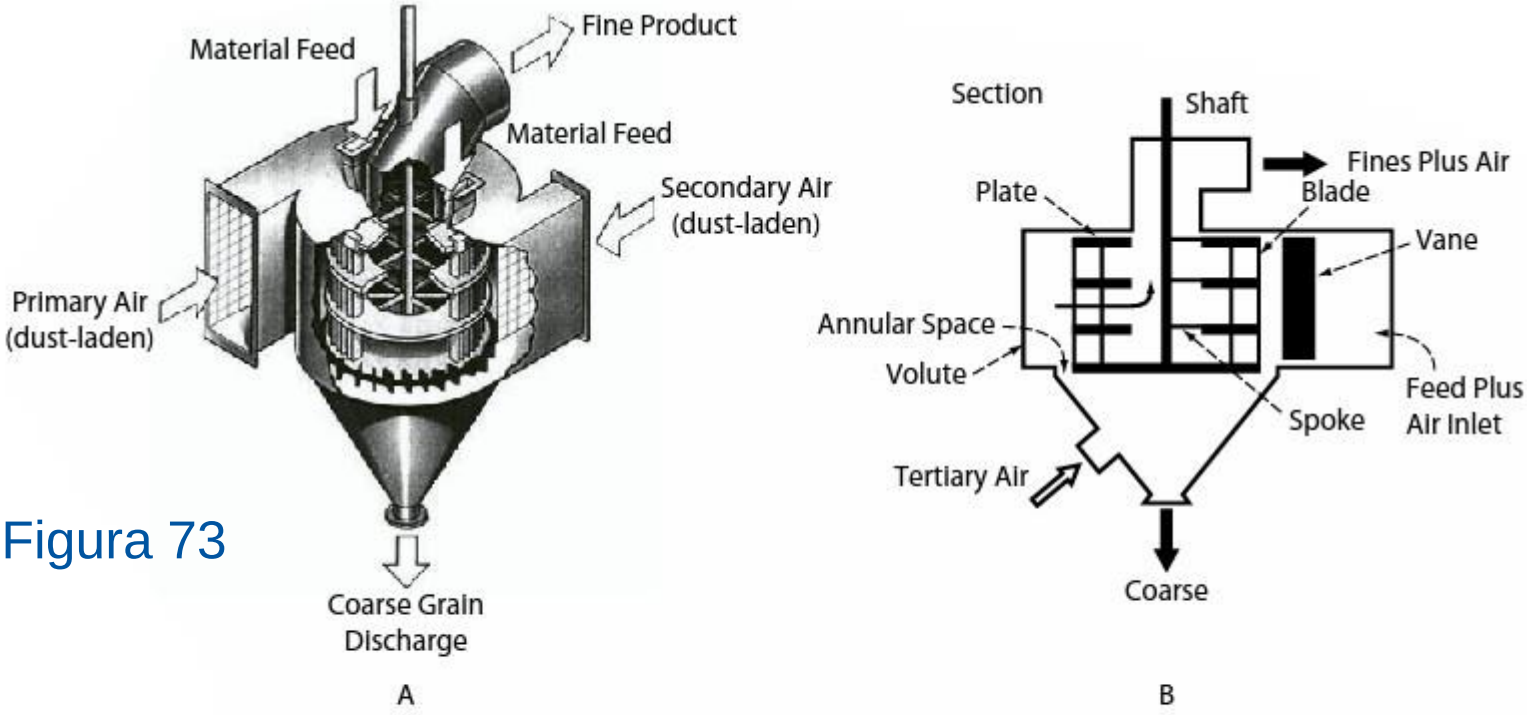
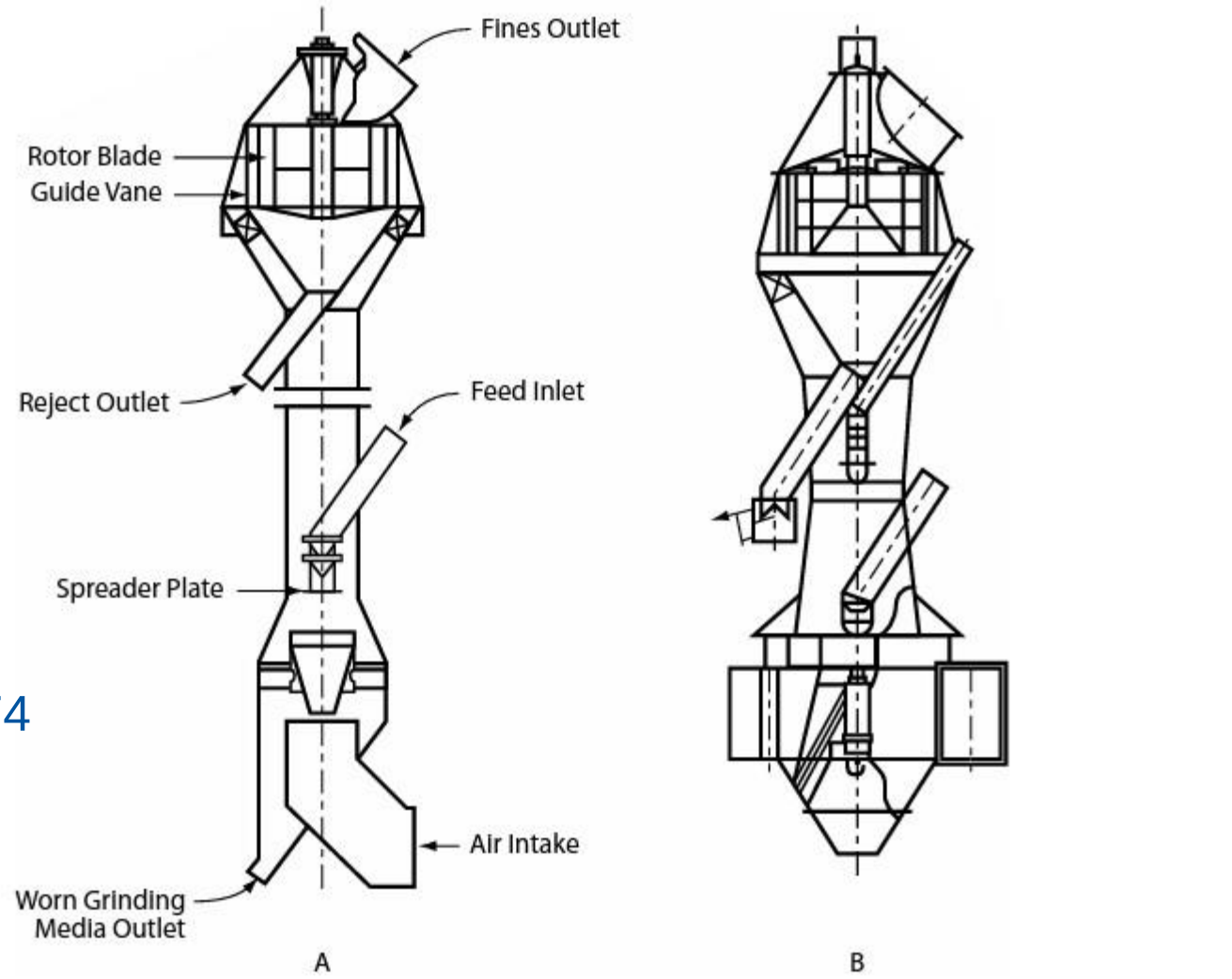


Figura 73

O'Sepa separator: (a) pictorial view (Fuller Company 2001; reprinted by permission from F.L. Smidth) (b) method of operation (Klumpar, Currier, and Ring 1986; reprinted by permission from *Chemical Engineering*)

Separadores Dinámicos

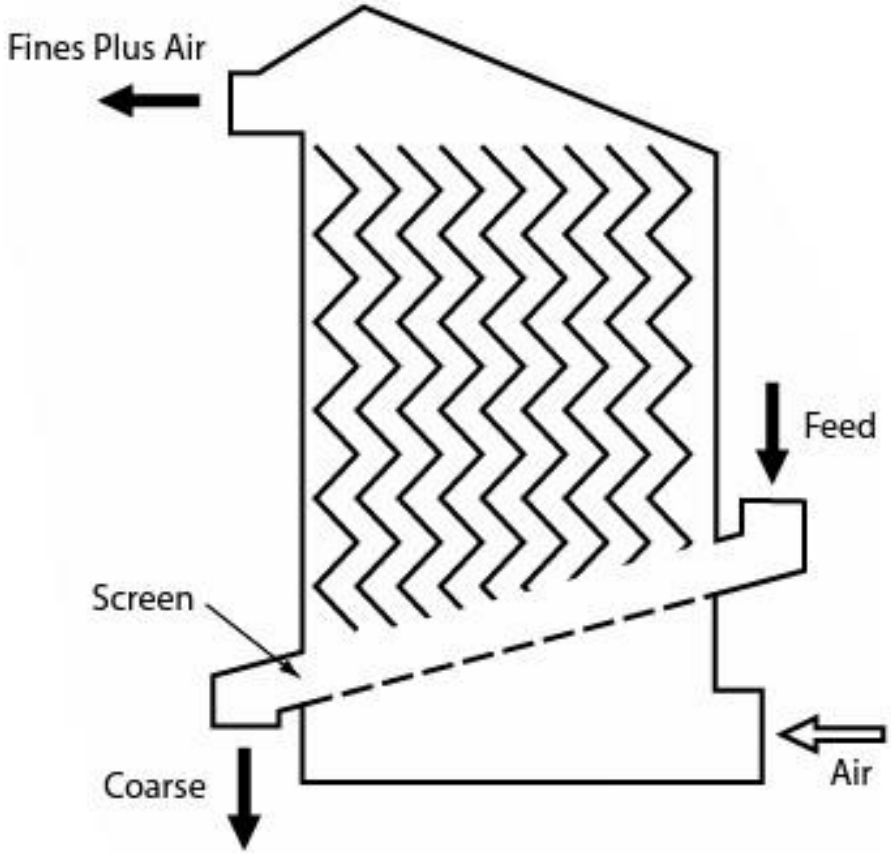
Figura 74



Sepax two-stage high-efficiency separator: (a) original unit with a single-feed entry, which is the tube mill product (b) modified for use with roller press product so that it has feed entries for the roller press and tube mill products (Smidth 2000)

Separadores Dinámicos

Figura 75



Alpine Zig Zag classifier showing the passages and collision surfaces (Klumpar, Currier, and Ring 1986; reprinted by permission from *Chemical Engineering*)

Rendimiento y Eficacia de la Clasificación Hidráulica

- **A través de ensayos de laboratorio se deberán conocer los siguientes parámetros:**
  1. ***A*** **= Peso de la alimentación, en tph.**
  2. ***P*** **= Peso del rebose, en tph.**
  3. ***R*** **= Peso del hundido, en tph.**
  4. ***m*** **= Dimensión de la abertura de malla por la cual pasa el 95% del rebose (p_{95}).**
  5. ***a*** **= Porcentaje (%) de la alimentación cuyo tamaño de partícula es menor que *m*.**
  6. ***p*** **= Porcentaje (%) del rebose cuyo tamaño de partícula es menor que *m*.**
  7. ***r*** **= Porcentaje (%) del hundido cuyo tamaño de partícula es menor que *m*.**

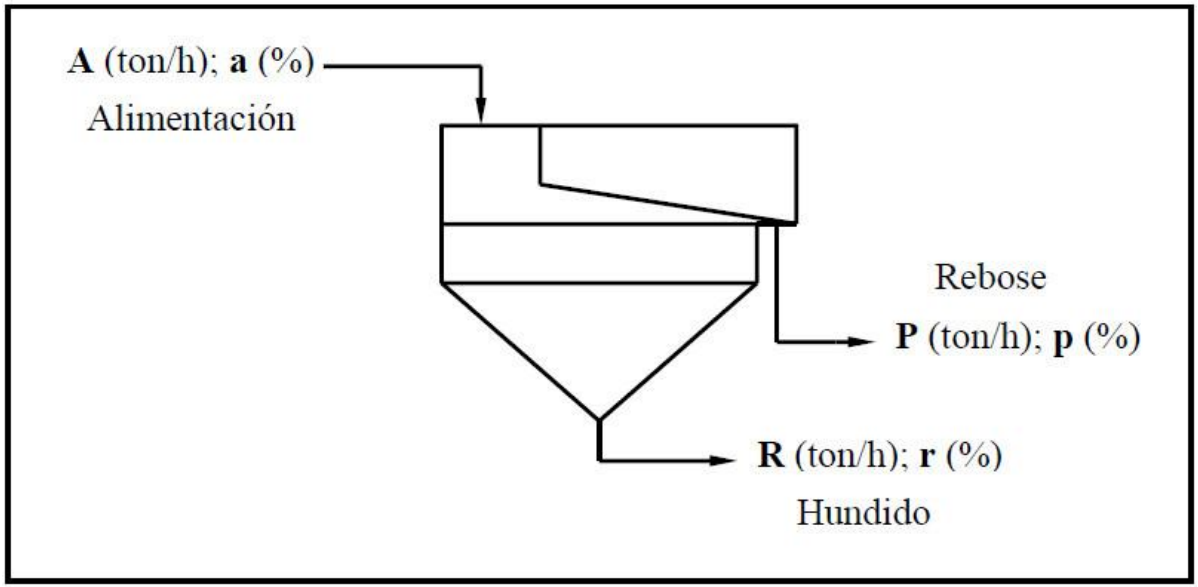


Figura 76

Rendimiento de la Clasificación Hidráulica

- **La expresión para el rendimiento de una clasificación hidráulica viene dada por:**

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

Ecuación 17

- **Donde, *p* no va a alcanzar el valor de 100%, como ocurre en cribado, debido a que parte de los sobretamaños se pueden ir por el rebose (p.e.: granos gruesos ligeros).**

Eficacia de la Clasificación Hidráulica

- **El término eficacia se emplea para conocer el grado de rendimiento que se consigue con el equipo de clasificación hidráulica.**

- **Lo anterior se puede expresar como la cantidad de partículas de dimensiones inferiores al tamaño de corte granulométrico que formando parte de la alimentación de un clasificador realmente se obtendrán a través del rebose como producto clasificado.**

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

Ecuación 18

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

Eficacia de clasificación del hundido

- **Este término indica la cantidad de partículas de tamaño superior a *m* que se obtiene en el hundido (productos gruesos o densos).**

$$e_h = 100 - r$$ Ecuación 19

- **Donde *r*, es el porcentaje (%) del hundido cuyo tamaño de partícula es menor que *m*.**

Imperfección de las Clasificaciones. Curva de Partición

- **Los clasificadores hidráulicos industriales no producen un corte granulométrico neto.**

- **Esto será debido a dos factores principales:**

  1. **No disponer de un elemento físico que retenga, o deje pasar, por diferencia de tamaños, como en el caso de las cribas.**

  2. **A una falta de uniformidad en el flujo del fluido.**

- **Un efecto de lo anterior será la presencia de tamaños de partícula gruesos en la corriente de finos y, a la inversa, tamaños finos en la corriente de tamaños gruesos.**

- **Indicar que la fracción de partículas gruesas se conoce con el término inglés "*underflow*" y la fracción de partículas finas con el término "*overflow*".**

- **El grado de perfección en el corte granulométrico que desarrolla un clasificador viene indicado por el término IMPERFECCIÓN, y representa la calidad en el funcionamiento de estos equipos.**

Imperfección de las Clasificaciones. Curva de Partición

- **Cuanto más bajo sea el valor de la Imperfección más perfecto será el corte desarrollado por el equipo, indicando menor cantidad de desclasificados en las corrientes de gruesos y finos.**

- **La imperfección es un valor que se deduce de la curva probabilística de partición o curva de Tromp, esta curva representa la probabilidad, en peso, que ha tenido cada partícula, dentro de su entorno de tamaño, de pasar a los "gruesos".**

Ejemplo explicativo de la curva de Partición

- **Suponer un clasificador ideal, que hace un corte granulométrico de 100 µm, siendo éste un corte perfecto, sobre una distribución granulométrica que viene indicada por la Figura (77).**

- **La curva indica que un 40% en peso de sólidos son los tamaños finos (< 100 µm) que se recuperarán en la salida de finos, y el 60% restante, en peso de sólidos, se recuperaría en la corriente de gruesos (> 100 µm).**

- **Ahora el análisis granulométrico de cada una de estas fracciones que se obtendrían con el clasificador ideal vienen representadas por la Figura (78).**

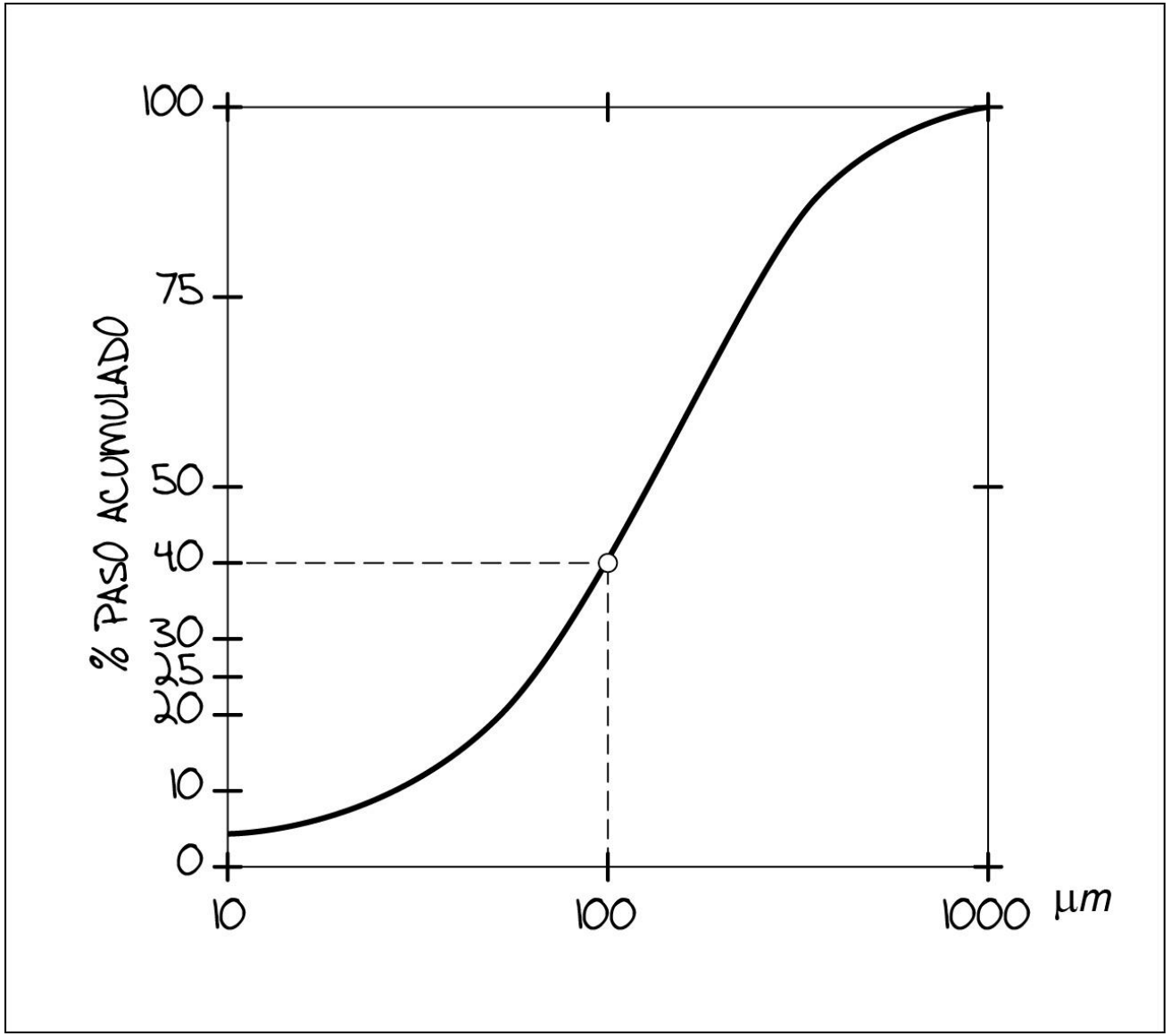


Figura 77

Distribución granulométrica de la alimentación a un Clasificador

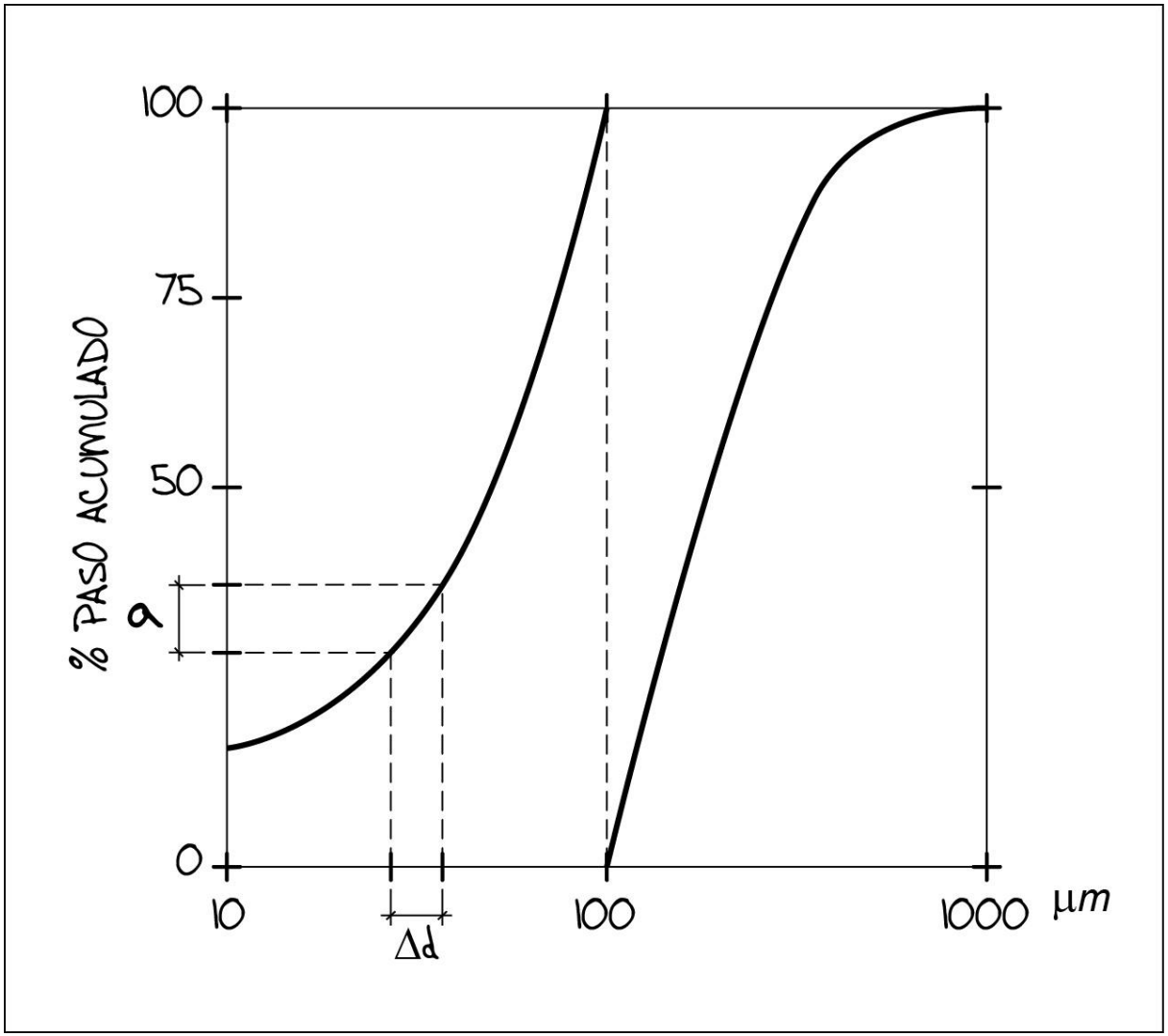


Figura 78

Distribución granulométrica de las diferentes fracciones obtenidas (finos y gruesos) en un Clasificador Ideal

Ejemplo explicativo de la curva de Partición (cont.)

- **En la Figura (78) las curvas no ofrecen solapamiento ya que el corte granulométrico ha sido perfecto.**

- **Si se divide el eje de abscisa en intervalos infinitesimales y se van desplazando de izquierda a derecha aplicando la definición de la curva de Tromp; desde 10 µm a 100 µm, las ordenadas que se tracen en los extremos de estos intervalos cortarán sólo a la curva de "finos", siendo la probabilidad de paso a los gruesos de 0%.**

- **Esta probabilidad se define como el número de eventos que ocurren dividido por el número de eventos posibles y referido a 100.**

- **En el ejemplo propuesto (Figura 78), se ha tomado un intervalo granulométrico cuya cantidad en peso es "*a*" y que referida al todo uno inicial sería, dado que el rendimiento en peso de los finos es del 40%, de "0.4x*a*".**

- **Por otro lado, van "0.6x0" a los gruesos, por lo que los casos que han sucedido (las partículas que se han obtenido en los gruesos, por definición) son "0.6x0" y los que podían haberse obtenido eran las partículas totales que había, es decir, "0.4x*a* + 0.6x0".**

Ejemplo explicativo de la curva de Partición (cont.)

- **Por lo que el cociente es 0, es decir 0%, al multiplicar por 100. Así desde 0 a 100 µm el valor es de 0% (Figura 79)**

- **Representando estos resultados, teniendo en abscisas los tamaños y en ordenadas la probabilidad de paso a los gruesos, tenemos un primer tramo de la curva de Tromp, que coincide con el eje de abscisas dese 10 a 100 µm (Figura 79).**

- **Una vez superado el valor de 100 µm, se tendría que la cantidad de material que se ha recuperado en los gruesos es "*b*" mientras que a los finos ha pasado "0" en cada curva y que referidas al todo-uno de partida son respectivamente "0.6xb" y "0.4x0".**

- **La cantidad en peso de partículas totales del intervalo es "0.6x*b* + 0.4x0", por lo que la probabilidad del paso a los gruesos sería:**

$$P_{(100-1000\,\mu m)} = \frac{0.6\times b}{0.6\times b + 0.4\times 0}\cdot 100 = 100\% \qquad \text{Ecuación 20}$$

- **De esta manera, desde 100 a 1000 µm el valor es de 100%.**

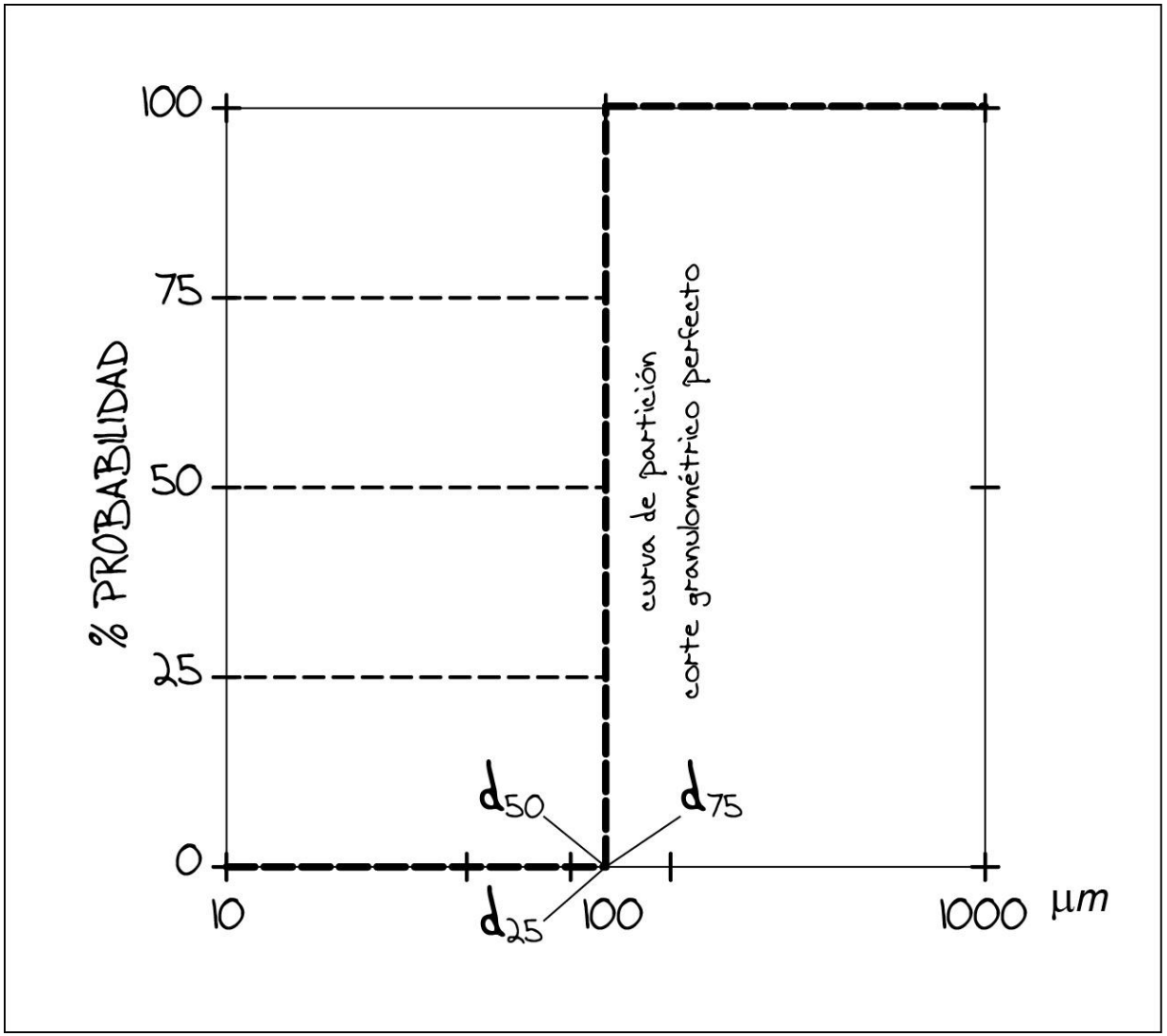


Figura 79

Curva de partición o de Tromp ideal

Tamaño de Corte de un Clasificador. Desviación. Imperfección

- **El "tamaño de corte" de un clasificador es el valor que corresponde a la ordenada 50% de la curva de partición (% de probabilidad de paso a los gruesos o *underflow*), y se denota por d_{50}.**

- **Error o desviación probable media o E_p, es la mitad de la diferencia entre las abscisas correspondientes a las ordenadas de probabilidad 25 y 75%.**

$$E_p = \frac{d_{75} - d_{25}}{2}$$ Ecuación 21

- **Indica la inclinación del tramo central de la cuerva. Para un corte perfecto la desviación probable media será de 0.**

- **La Imperfección, o *I*, se puede representar numéricamente como:**

$$I = \frac{d_{75} - d_{50}}{2 \cdot d_{50}}$$ Ecuación 22

- **Para un corte perfecto este parámetro valdrá 0.**

Curva de partición no perfecta

- **Se supone ahora un clasificador con un rendimiento del 40% en peso en los finos (y por lo tanto del 60% en los gruesos), pero con un corte no ideal.**

- **Si se analizan granulométricamente los productos de las dos fracciones (fina y gruesa) se obtendría una curva como la reflejada en la Figura (80).**

- **Al no ser ya un corte ideal, se encontrarán gruesos en la fracción de "finos" y finos en la de "gruesos", existiendo solapamientos parciales entre las curvas granulométricas de ambas fracciones (Figura 80).**

- **Ahora, para la fabricación de la curva de partición o de Tromp, se dividirá el eje de abscisas en intervalos infinitesimales al igual que para el corte perfecto.**

- **Para cada extremo del intervalo infinitesimal se levantarán verticales hasta que corten a las curvas y se toman las lecturas de los intervalos de ordenadas correspondientes.**

- **Para el ejemplo propuesto, sería "*a*%" para la curva de "finos" y "*b*%" para la curva de "gruesos" (ver Figura 80).**

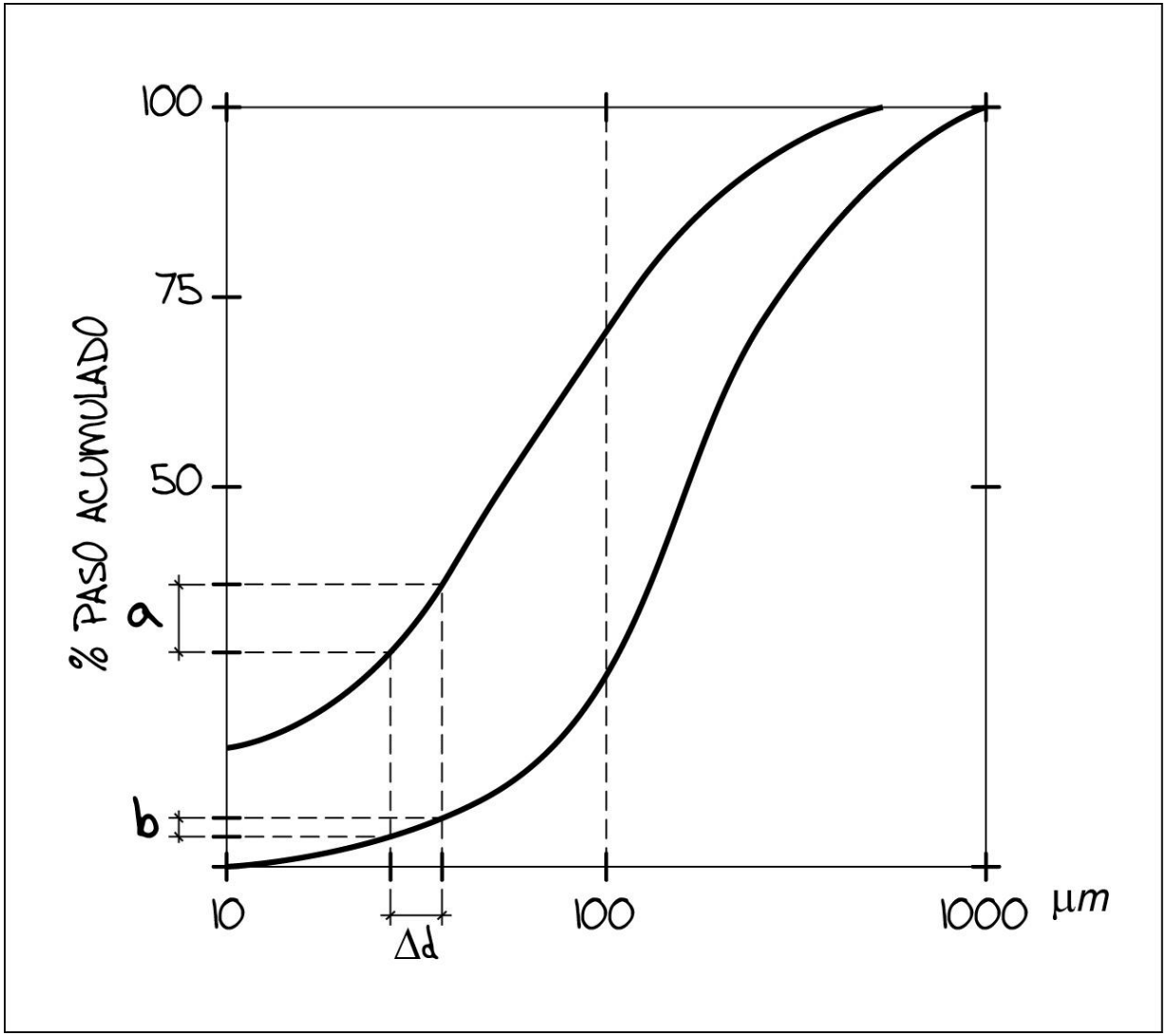


Figura 80

Distribución granulométrica de las diferentes fracciones obtenidas (finos y gruesos) en un Clasificador real

Curva de partición no perfecta (cont.)

- **Como cada curva individual (Figura 80) esta normalizada a 100 y hay que referirlo todo a la granulometría del todo-uno de partida, la cantidad de partículas en peso con tamaños comprendidos dentro del intervalo considerado, que han ido a parar a los gruesos son (considerando un rendimiento en peso de estos es del 60%): "0.6x*b*".**

- **Y la cantidad de partículas en peso con tamaños comprendidos en el mismo intervalo considerado que ha ido a la curva de los finos será: "0.4x*a*".**

- **Siendo, por lo tanto, el peso total de las partículas en peso con tamaños comprendidos en el mismo intervalo considerado de: "0.6x*b* + 0.4x*a*".**

- **La probabilidad de paso a los gruesos será ahora:**

$$P_{(\Delta d)} = \frac{0.6 \cdot b}{0.6 \cdot b + 0.4 \cdot a} \cdot 100$$

Ecuación 23

- **En el valor del punto medio del intervalo considerado (Δd) se levanta el valor de la probabilidad calculado (ordenadas) y se obtiene un punto de la curva Tromp. Lo anterior se realizará para todos los intervalos establecidos, obteniéndose la curva de partición de trazo contínuo de la Figura 81.**

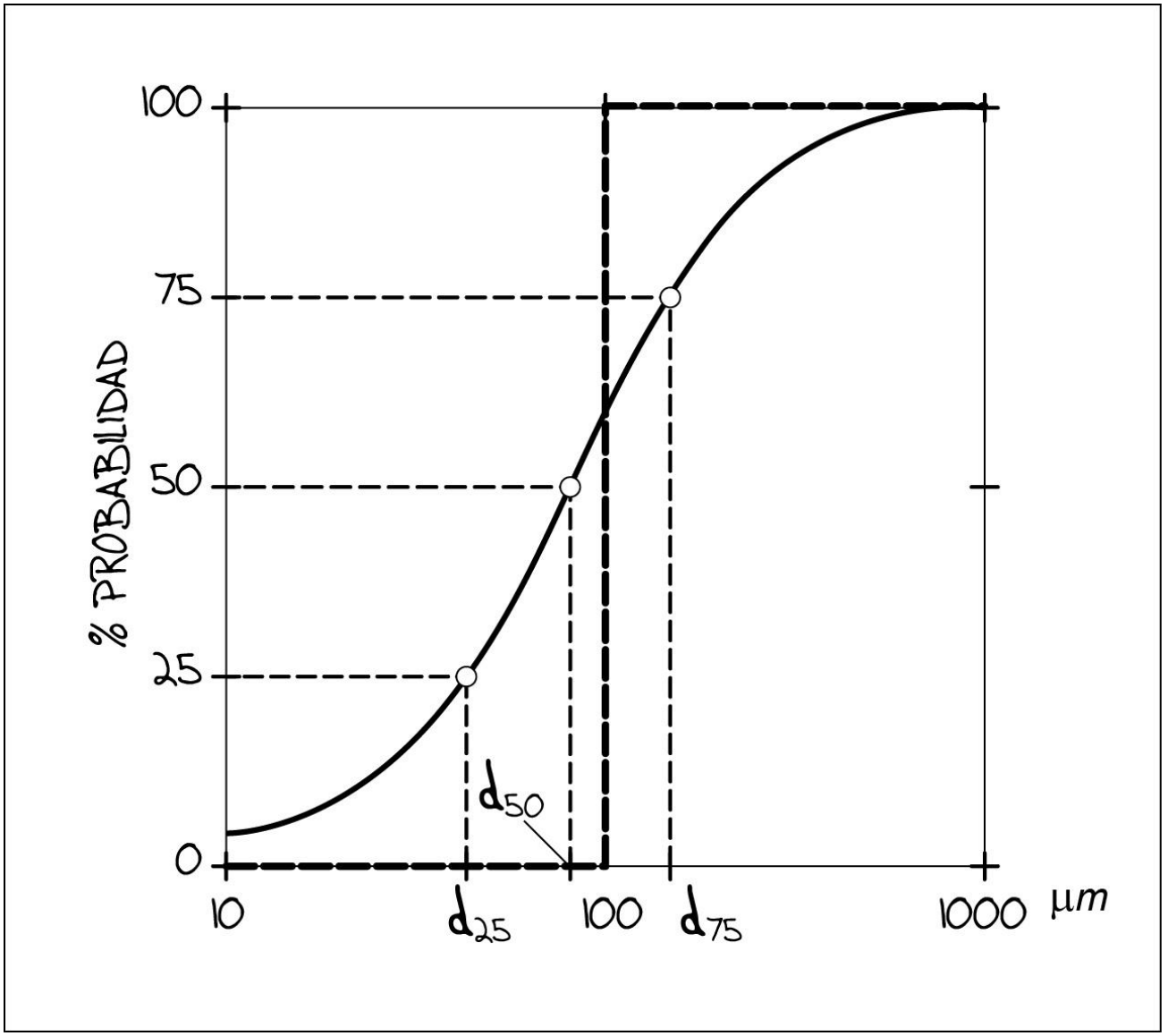


Figura 81

Curva de Tromp no ideal

Curva de partición corregida

- **La curva de partición, cuanto más se aleje de la verticalidad más imperfecto será el corte del clasificador.**

- **En la Figura 81 se puede observar como ahora el d_{50}, no coincide con el corte perfecto sino que se encuentra desplazado a la izquierda.**

- **Los valores de la desviación probable media, E_p, y de la Imperfección, I, ya no serán nulos, siendo característicos del equipo de que se trate.**

- **En los clasificadores hidráulicos, los gruesos salen acompañados de más o menos agua según el tipo de equipo y de las características de la operación realizada. Esta agua se considera como cortocircuitada arrastrando material todo-uno con sus finos, e impurificando los "gruesos".**

- **Para poder corregir los datos de la curva de participación del efecto anterior se debe obtener una curva de partición o de Tromp reducida o corregida y a partir de esta última obtener los valores de desviación probable media corregida, $E_{p(c)}$, y de imperfección corregida, $I_{(c)}$.**

- **Hay que conocer el porcentaje, que sobre el agua total de la alimentación, representa la que sale con los "gruesos", denominado como R%.**

Curva de partición corregida

- **Considerando que esa agua lleva la parte correspondiente de todo-uno y restándolo de la parte, que en cada tamaño, va a los "gruesos" y también de la cantidad total de partículas de ese tamaño, se tendría:**

- **Si *p*% es la probabilidad de paso a los gruesos de un punto de la curva de Tromp, es decir que pasan "*p*" de cada 100, al corregirla, ya no pasarán "*p*" sino "*p* – *R*", y los 100 iniciales ya solo serán "100 – *R*"; siendo el punto de ordenadas correspondiente de la curva corregida:**

$$p(\%)_{(c)} = \frac{p(\%) - R(\%)}{100 - R(\%)} \cdot 100$$ Ecuación 24

- **La siguiente Figura 82 muestra una curva de partición normal y corregida.**

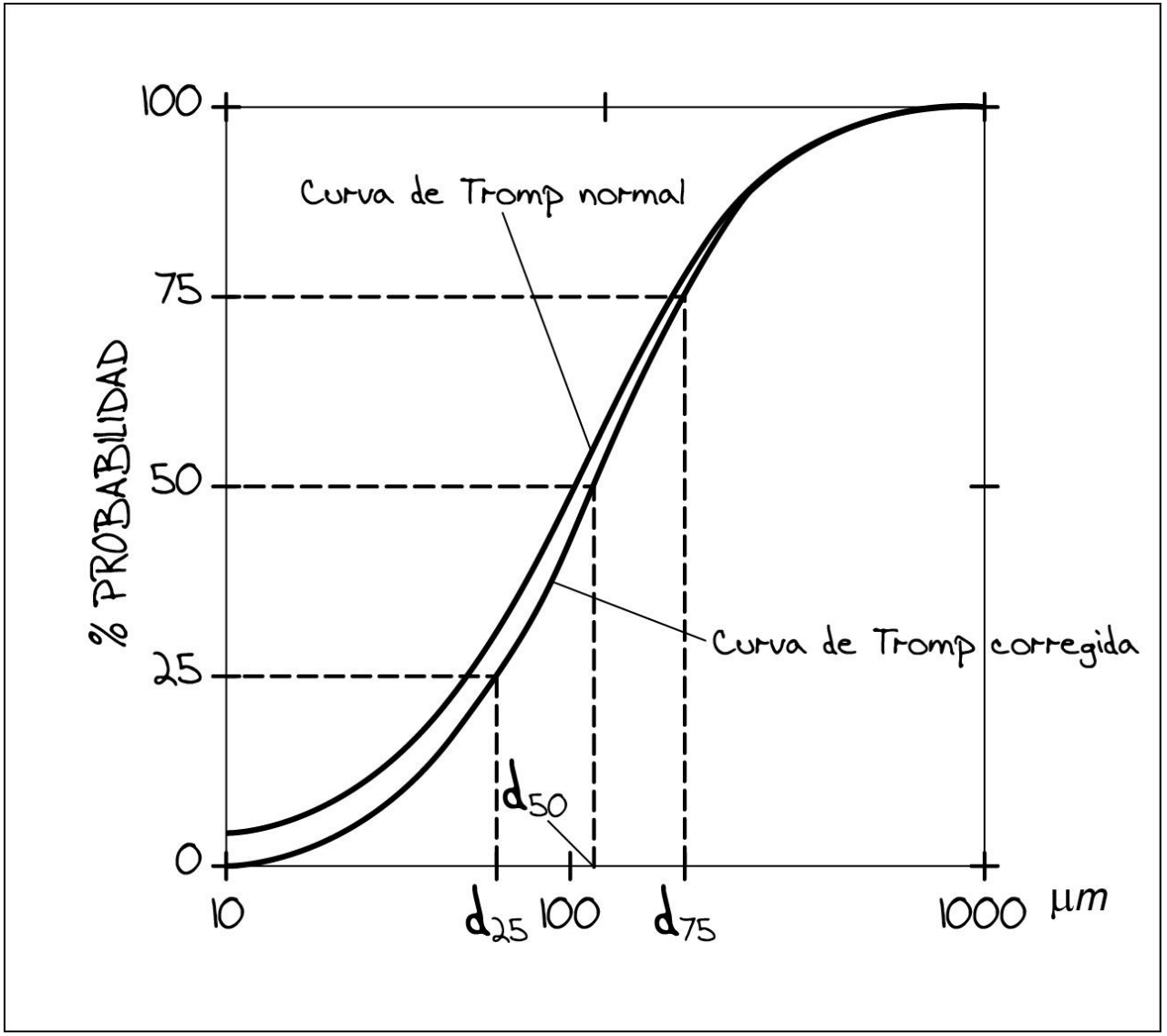
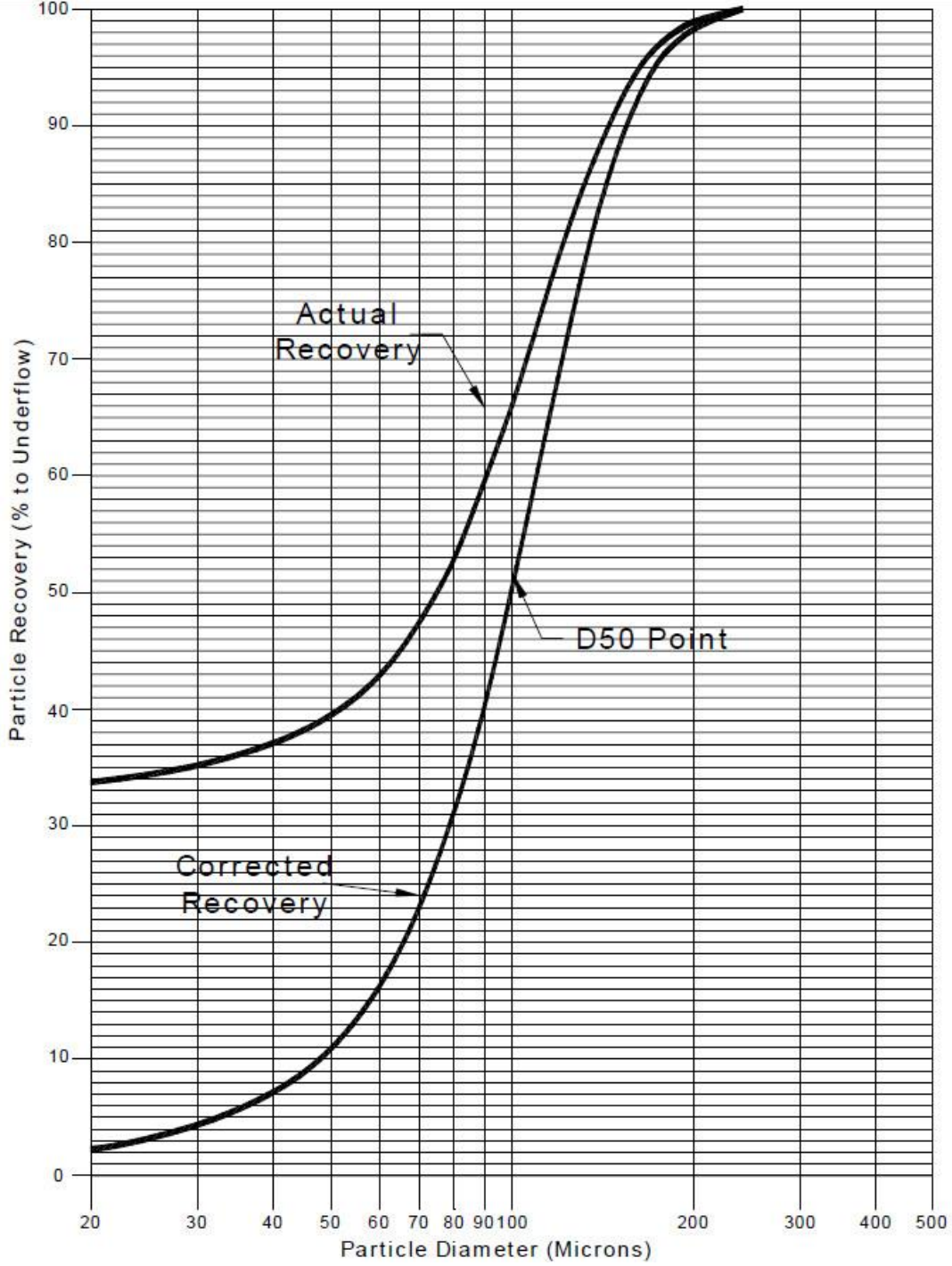


Figura 82

Curva de Tromp normal y corregida



Curva de Tromp normal y corregida

Figura 82bis

Dimensionado de un Clasificador Hidráulico

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 el rebose de los finos.**

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

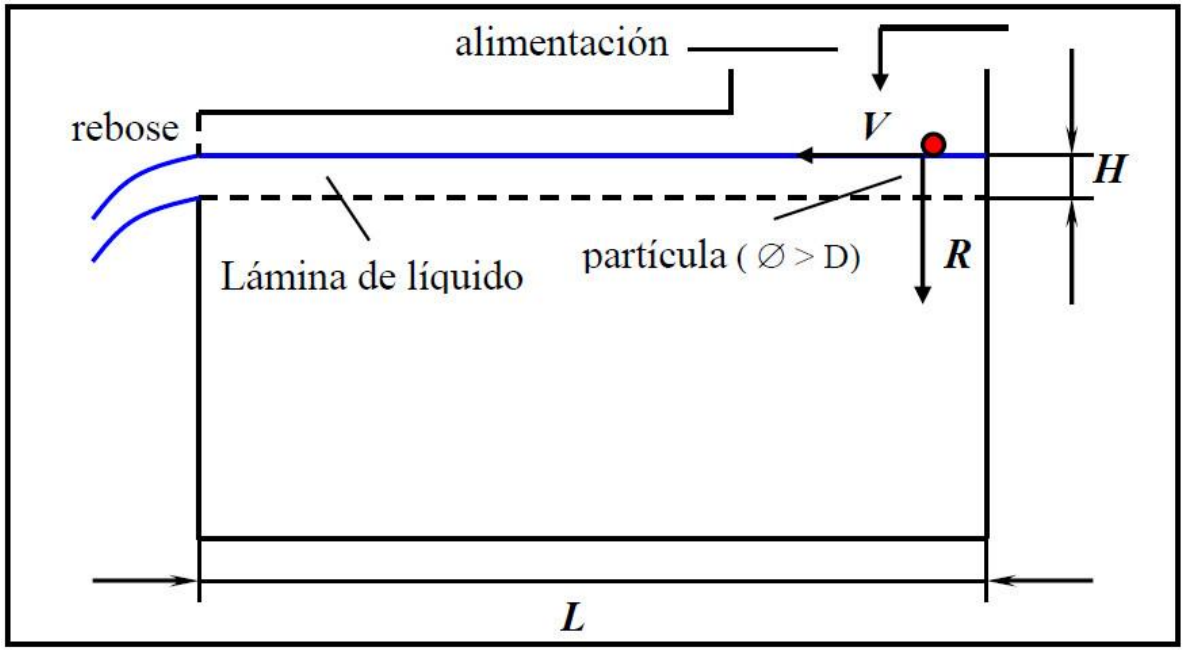


Figura 83

Dimensionado de un Clasificador Hidráulico

Clasificador de Corriente Horizontal

- **Suponiendo la siguiente notación:**
  1. ***Q* = Caudal.**
  2. ***R* = Velocidad de sedimentación de la partícula.**
  3. ***V* = Velocidad de flujo del fluido.**
  4. ***W* = Ancho del clasificador.**
  5. ***S* = Área de rebose.**
  6. ***t* = tiempo mínimo requerido.**
- **Se deberá cumplir lo siguiente:**

$$S = W \cdot H \quad \text{Ecuación 25} \qquad V = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{W \cdot H} \quad \text{Ecuación 26}$$

- **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·H*.**

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

$$e = R \cdot t \quad \Rightarrow \quad t \geq \frac{2.6 \times H}{R} \qquad \text{Ecuación 27}$$

Clasificador de Corriente Horizontal (cont.)

- **En este tiempo, *t*, la partícula recorrerá una distancia horizontal, *L*, igual a:**

$$L = V \cdot t \quad \Rightarrow \quad t = \frac{L}{V}$$

Ecuación 28

- **Donde, igualando las ecuaciones (27) y (28) queda que:**

$$\frac{L}{V} \geq \frac{2.6 \times H}{R}$$

Ecuación 29

- **Y sustituyendo V por el valor de la ecuación (26) se obtiene:**

$$\frac{L \cdot W \cdot H}{Q} \geq \frac{2.6 \times H}{R} \Rightarrow L \geq \frac{2.6 \times Q}{R \cdot W}$$

Ecuación 30

Longitud del Clasificador

$$L \cdot W = A \geq \frac{2.6 \times Q}{R}$$

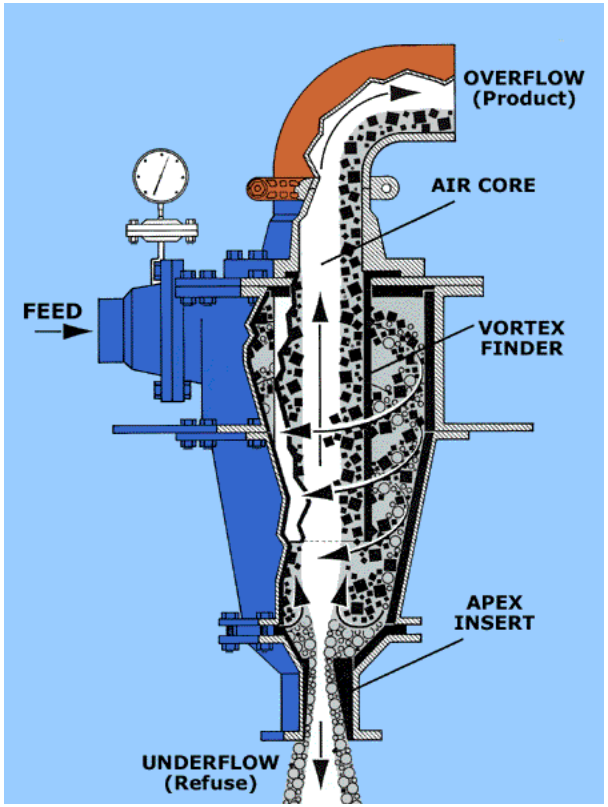
Área de Sedimentación

Ecuación 31

Hidrociclón

- **Durante la operación de un hidrociclón intervienen multitud de variables interrelacionadas que influirán en su eficiencia o rendimiento.**

- **Cuando se dimensionan estos equipos se eligen equipos que no sólo sean capaces de absorber las capacidades programadas sino también que lleven a cabo los cortes granulométricos calculados.**



Hidrociclón para limpieza de carbones (Cortesía Krebs Engineers – FLSmidth)

Figura 84

Dimensionado de hidrociclones
Fórmula de Dahlstrom (1954)

- **Las técnicas siguientes para el diseño y dimensionado de hidrociclones hacen uso del punto de corte o separación (d_{50}) de la curva de partición o de Tromp, comentada anteriormente.**

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

Ecuación 32

Siendo,

d_{50} = Punto de corte, (μm)

D_o = Diámetro del derrame (overflow), (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.

Figura 85

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

Dimensionado de hidrociclones
Fórmula de Plitt (1976)

- **Para ciclones de gran diámetro y operando con un alto contenido en sólidos, la siguiente expresión ofrece el rendimiento del ciclón con bastante fiabilidad:**

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

Ecuación 33

Donde

d_{50c} = Punto de corte corregido, (μm)

D_o = Diámetro del localizador de vórtice (vortex finder), (cm)

D_i = Diámetro de la entrada(*), (cm).

D_c = Diámetro interior del ciclón, (cm).

D_u = Diámetro del ápice (apex), (cm).

Q = Caudal del ciclón, (m^3/h).

v = Porcentaje de sólidos (en volumen) en la alimentación.

h = Distancia desde el localizador de vortice hasta la parte superior del orificio de la descarga del ápice (apex), (cm).

ρ_s = Densidad de los sólidos, (gr/cm^3).

ρ_l = Densidad de los liquidos, (gr/cm^3).

(*) Para entradas no circulares:

$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$, A es el área de la sección transversal (cm^2).

Fórmula de Plitt (1976)

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

Ecuación 34

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

Donde,

P = es la caída de presión a lo largo del ciclón, (kPa).

(1 PSI = 6.895 kPa)

Fórmula de Mullar y Jull (1978)

- **A través del uso de ciclones estándar Krebs se desarrollaron expresiones útiles para llevar a cabo diseños previos.**

- **Los ciclones estándar Krebs empleados en estas expresiones cumplen las siguientes características:**

1. **El área de entrada equivaldrá a un 7% de la sección transversal de la cámara de alimentación.**
2. **El localizador de vórtices («*vortex finder*») presenta un diámetro equivalente a un 35-40% del diámetro del ciclón.**
3. **El ápice o «*apex*» posee un diámetro no inferior al 25% del diámetro del localizador de vórtices.**

Fórmulas de Mullar y Jull (1978)

- **La ecuación para el punto de corte o separación es:**

$$d_{50c} = \frac{0.77 \cdot D_c^{1.873} \cdot e^{\left(-0.301+0.0945 \cdot V - 0.00356 \cdot V^2 + 0.0000684 \cdot V^3\right)}}{Q^{0.6} \cdot (\rho_s - 1)^{0.5}}$$

Ecuación 35

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

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

Ecuación 36

- **Las notación seguida es la misma que la mostrada en las anteriores expresiones.**

Q = viene expresado en m^3/h; y P en kPa.

(1 PSI = 6.895 kPa)

Fórmulas de R.A. Arterburn (1976) (cont.)

- **Arterburn establece unas condiciones estándar de trabajo o condiciones base, siendo éstas las siguientes:**

1. **Característica del fluido en la alimentación: agua a 20º C.**
2. **Característica de los solidos en la alimentación: partículas esféricas de densidad específica 2.65.**
3. **Concentración de alimentación: menor de un 1% de sólidos en volumen.**
4. **Caída de presión: 69 kPa (10 psi).**
5. **El ciclón será un ciclón Krebs estándar, como el descrito anteriormente.**

Fórmulas de R.A. Arterburn (1976) (cont.)

- **Según R.A. Arterburn, en el diseño de circuitos de molienda, el objetivo será producir unos finos («*overflow*» o derrame) a partir del uso de ciclonado que presente una determinada distribución granulométrica bien definida.**

- **La tabla siguiente relaciona un porcentaje de paso exigido en el rebose para obtener un factor de corrección que nos dará el D_{50c} requerido, o D_{50c}(aplicación):**

% paso del rebose (*overflow*) para un tamaño determinado (∅)	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

Ejemplo: producir un rebose conteniendo un 80% de paso

por una abertura de 149 micras

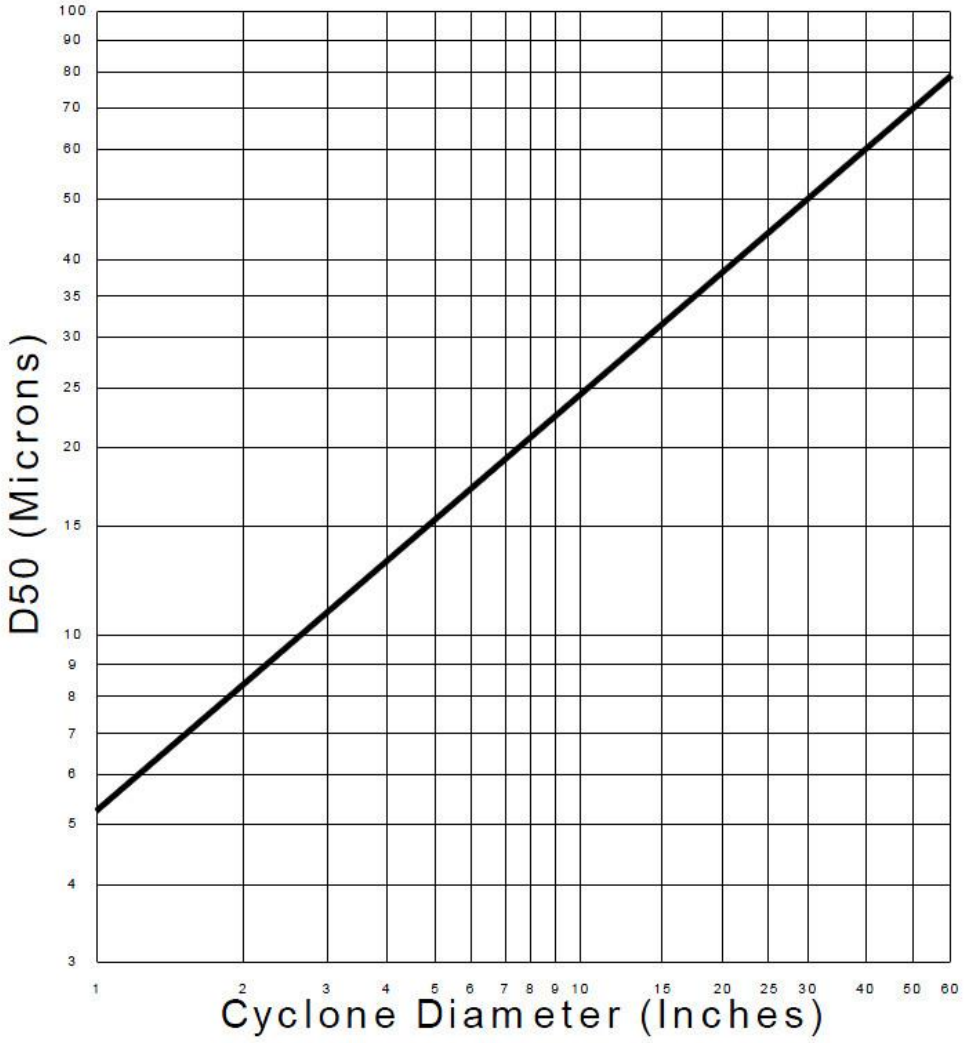
Según la tabla, 80% → 1.25,

tamaño (micras) de aplicación = 149 micras

D_{50c} (aplicación) requerido= 1.25 x 149 = 186 micras para aplicación

Fórmulas de R.A. Arterburn (1976) (cont.)

- **El D_{50c}(base) es el tamaño de corte que produce un ciclón Kreb estándar, bajo condiciones estándar y se puede calcular por la siguiente gráfica:**



Fórmulas de R.A. Arterburn (1976) (cont.)

- **El D_{50c}(aplicación), que es el tamaño de corte que produce un ciclón trabajando bajo las condiciones reales de nuestro proceso (el que nosotros necesitamos o requerimos); está relacionado con el D_{50c}(base) a través de:**

$$d_{50c}(\text{aplicación}) = d_{50c}(\text{base}) \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \qquad \text{Ecuación 37}$$

Siendo, C_1, C_2, C_3 factores de corrección a calcular.

- **Estos factores de corrección tiene por función:**

1. **(C_1) Corregir la influencia de la variación de la concentración estándar de sólidos en la pulpa de alimentación.**
2. **(C_2) Corregir la influencia de la modificación de la caída de presión estándar a lo largo del ciclón.**
3. **(C_3) Corregir la influencia de la variación de la densidad estándar de los sólidos y los líquidos sobre la clasificación.**

Fórmulas de R.A. Arterburn (1976) (cont.)

- **Así las expresiones para el cálculo de los factores de corrección serán:**

Ecuaciones 38

$$C_1 = \left(\frac{53 - V}{53} \right)^{-1.43}, \; V = \text{porcentaje de sólidos en volumen en la alimentación del ciclón.}$$

$$C_2 = 3.27 \cdot \Delta P^{-0.28}, \; \Delta P = \text{Caída de presión en kPa.}$$

$$C_3 = \left(\frac{1.65}{\rho_s - \rho_l} \right)^{0.5}, \; \rho_s, \rho_l = \text{densidades en } gr/cm^3.$$

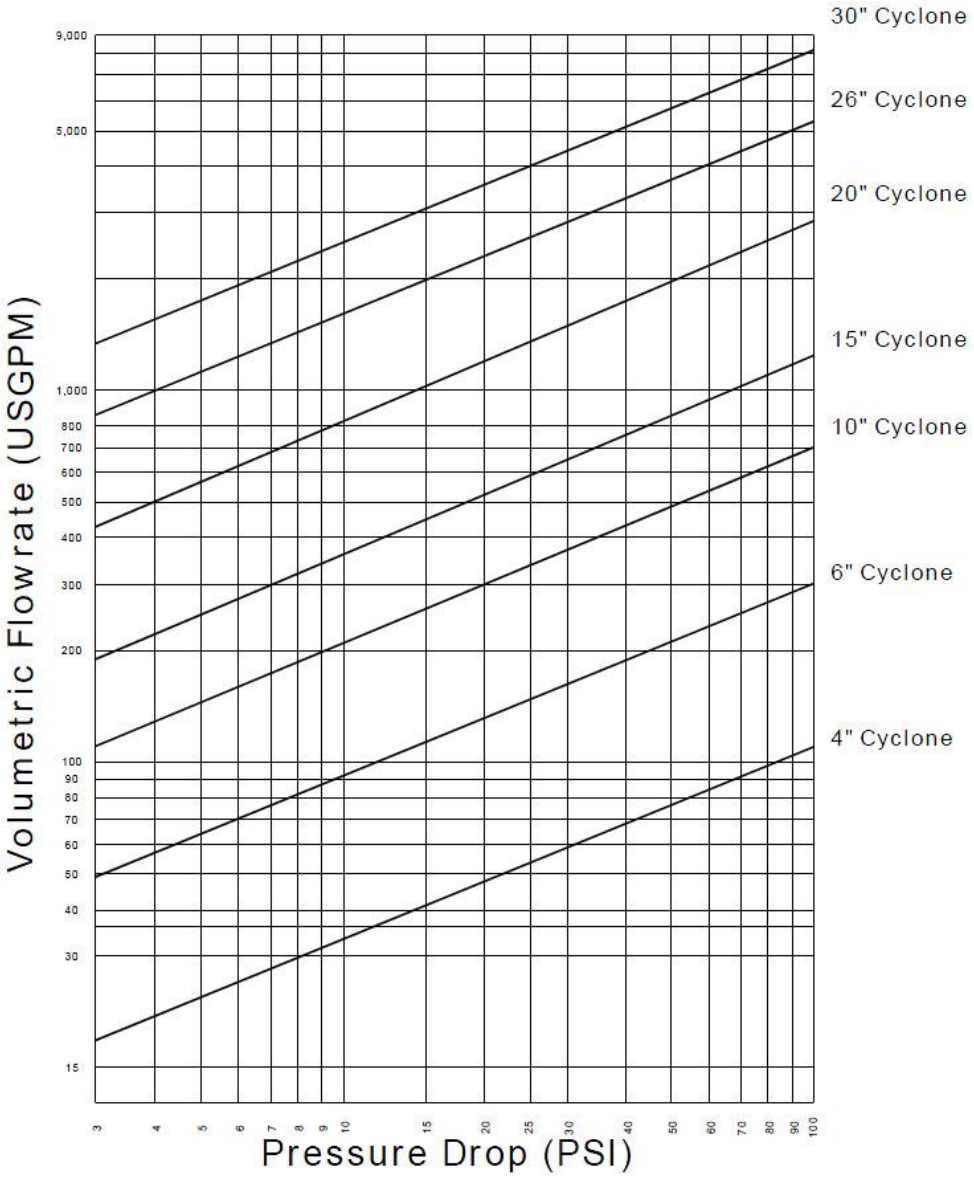
Fórmulas de R.A. Arterburn (1976) (cont.)

- **Una vez calculado el D_{50c}(base) a través de la ecuación (37) se calculará el diámetro del ciclón que necesitamos para trabajar en nuestras condiciones reales utilizando la siguiente expresión o la gráfica anterior:**

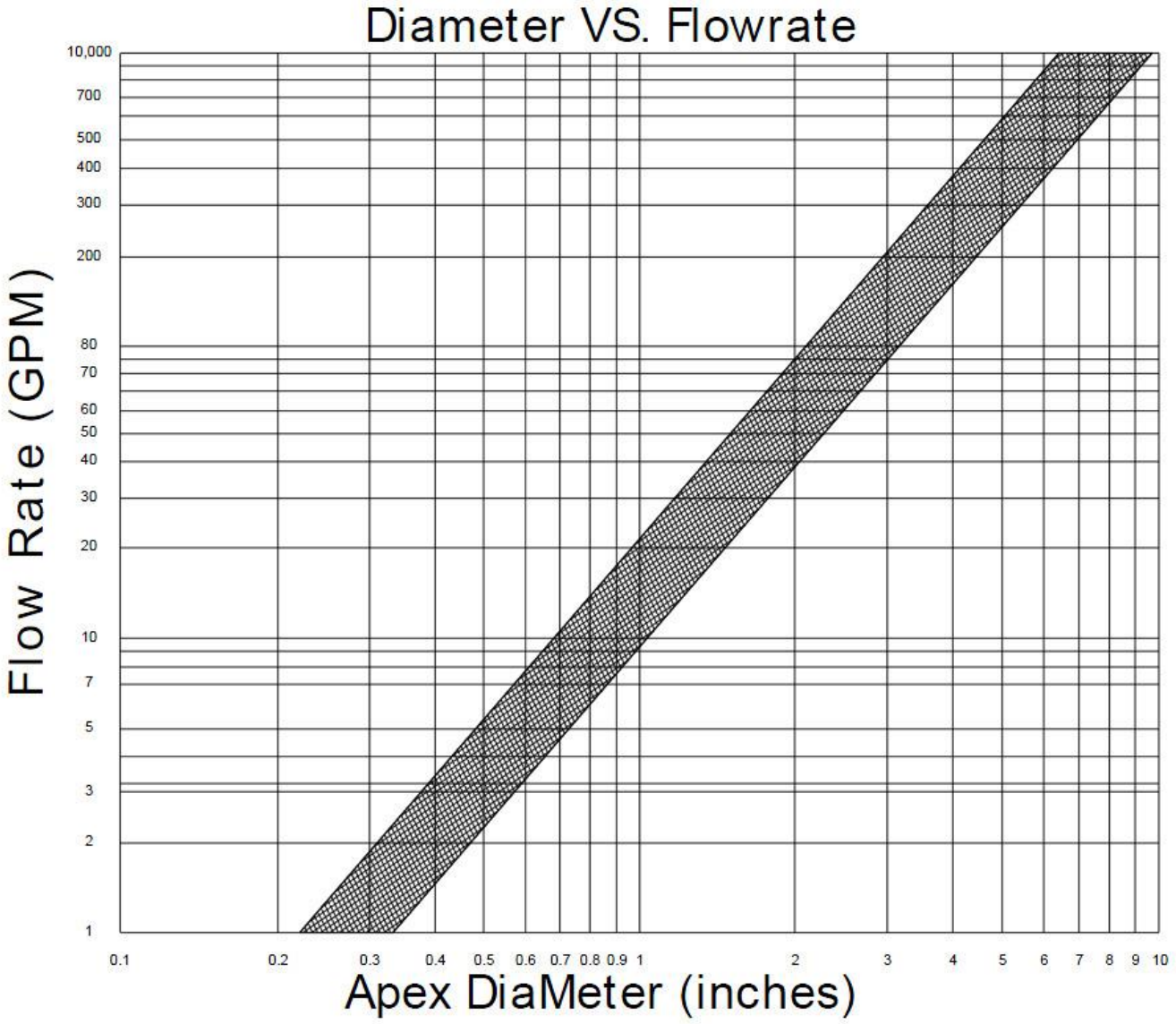
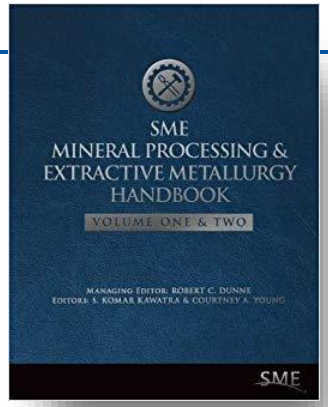
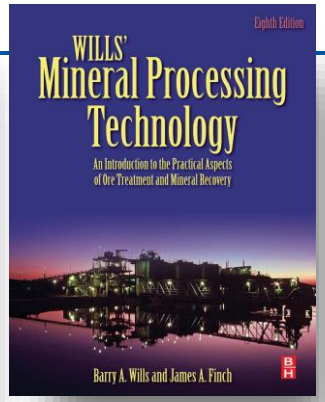
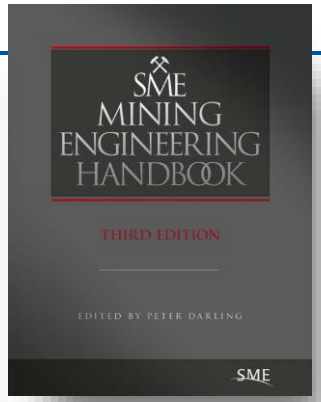
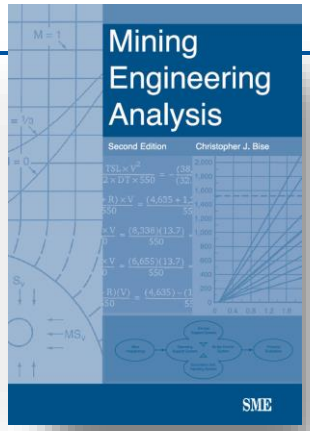
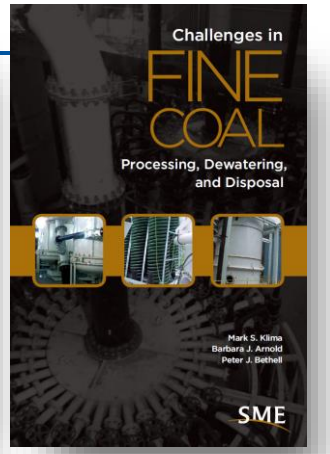
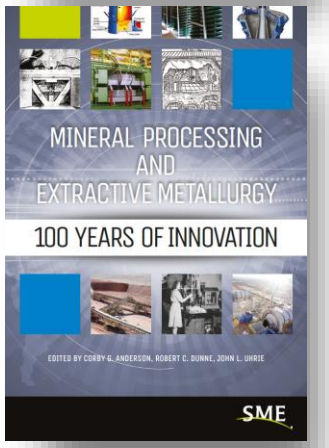
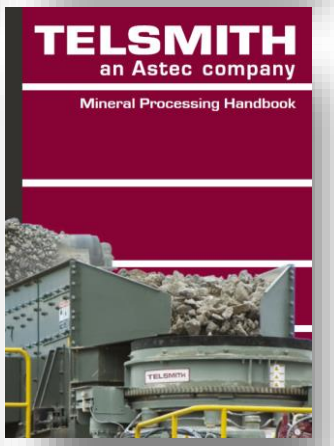
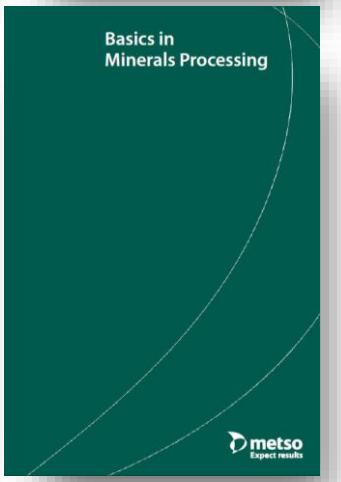
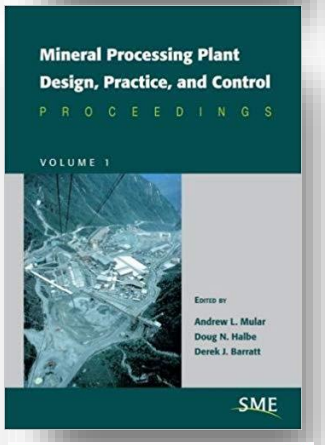
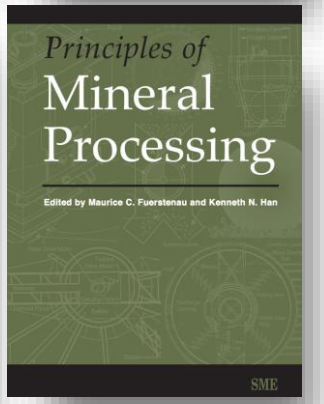
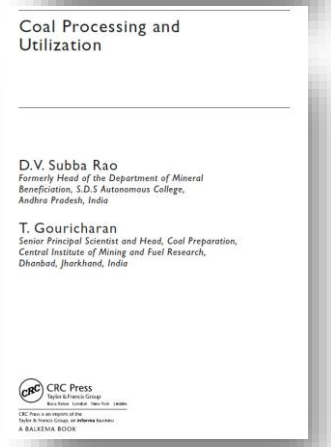
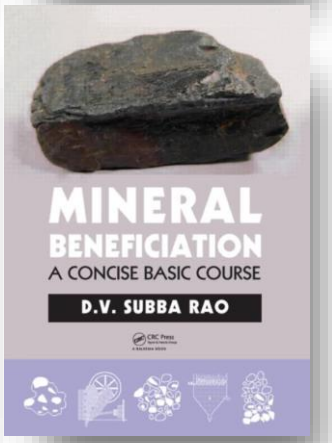
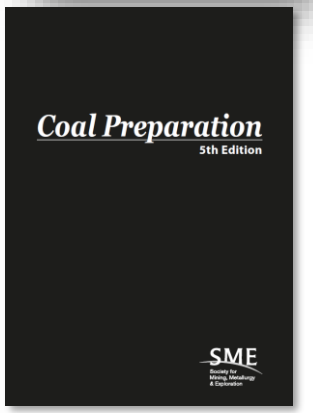
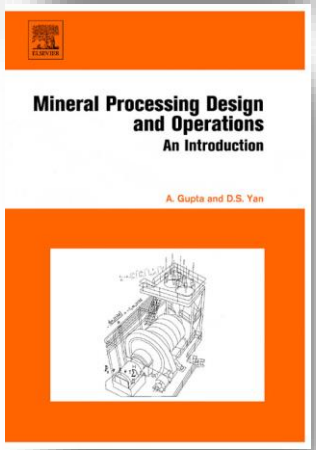
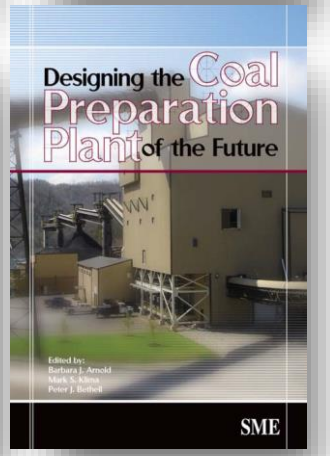
$$d_{50c}(\text{base}) = 2.84 \cdot D_{\text{ciclón}}^{0.66}$$ Ecuación 39

- **Una vez calculado el diámetro del ciclón ($D_{ciclón}$), y los otros parámetros que necesitamos conocer (caída de presión, caudal total requerido, etc.), entramos en los gráficos de los fabricantes (gráficos siguientes) para obtener: caudales unitarios por ciclón, número de unidades necesarias, dimensión del ápice («*apex*»), etc.**

Fórmulas de R.A. Arterburn (1976) (cont.)



Fórmulas de R.A. Arterburn (1976) (cont.)



Referencias: