



Universidad
Politécnica
de Cartagena

PLANTAS DE TRATAMIENTO DE RECURSOS MINERALES



TEMA 7:
SELECCIÓN POR TAMAÑOS
EQUIPOS HIDRÁULICOS:
CLASIFICADORES



7

CLASIFICADORES HIDRÁULICOS



INDICE

1. Clasificación Indirecta. Introducción
2. Factores de Diseño
3. Área de Sedimentación de la Cuba
4. Determinación de la Capacidad
5. Referencias de Consulta

1. Clasificación Indirecta

Introducción

Después de las etapas de trituración y molienda, la separación por tamaños se realiza por vía húmeda.

La separación por tamaños se llevará a cabo a través de clasificadores hidráulicos mecánicos o hidrociclones.

Todos estos equipos favorecen que las partículas se separen en base a su tamaño y densidad, principalmente.

Los clasificadores hidráulicos mecánicos aprovechan la acción gravitatoria para realizar la clasificación.

Los hidrociclones aprovecharán la acción centrífuga para separar las partículas más finas y acelerar el proceso de clasificación.

En esta unidad nos centraremos en la descripción de los clasificadores mecánicos hidráulicos más comúnmente empleados.



2. Factores de diseño

Aspectos generales

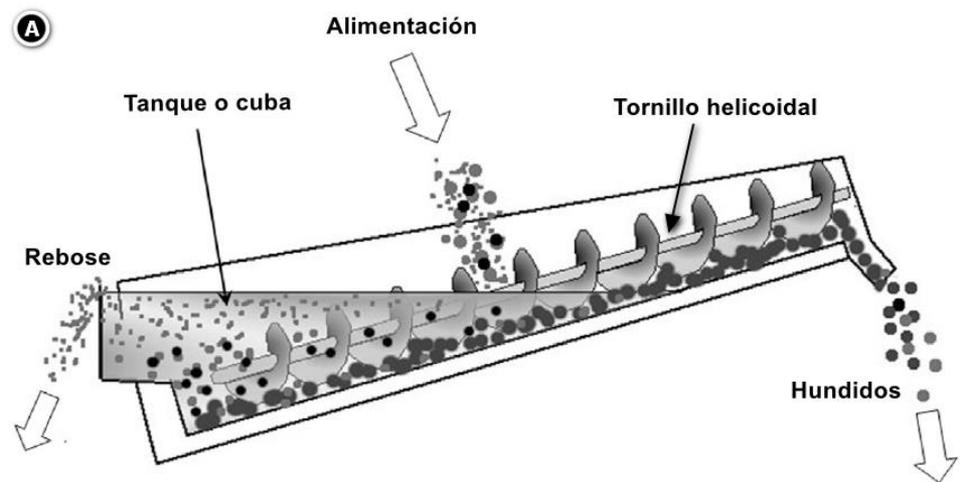
Todos dispondrán de un tanque o cuba de sedimentación.

Estarán dotado de un sistema mecánico para la retirada de los minerales sedimentados (hundido).

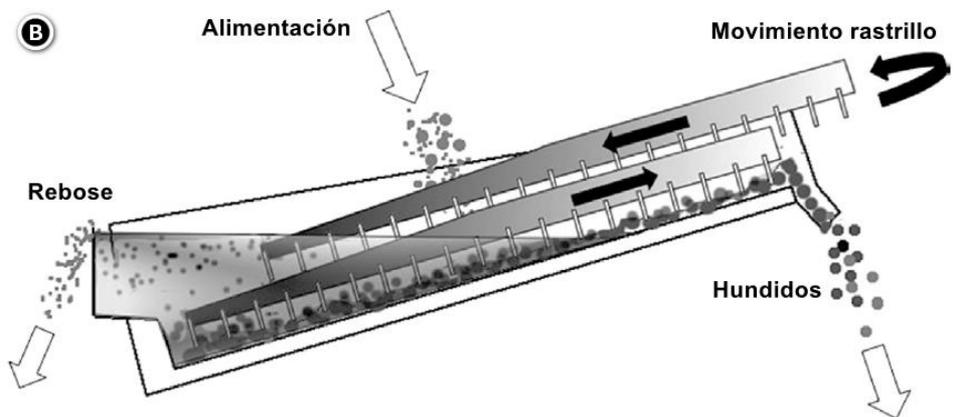
Los minerales más finos será extraídos por rebose (rebose).

Los principales tipos son:

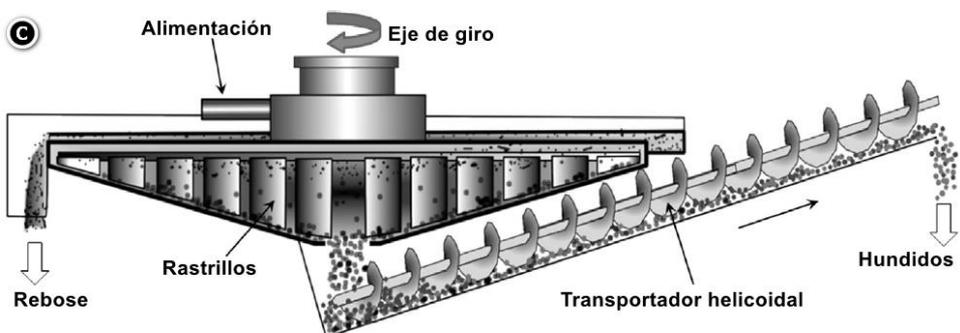
- Clasificador de espiral (*spiral classifier*)
- Clasificador de rastrillo (*rake classifier*)
- Clasificador de tazón (*bowl classifier*)



Esquema de un clasificador de espiral



Esquema de un clasificador de rastrillo



Esquema de un clasificador de tazón

(Fuente: Gupta and Yan, 2016)

2. Factores de diseño

Clasificador de espiral

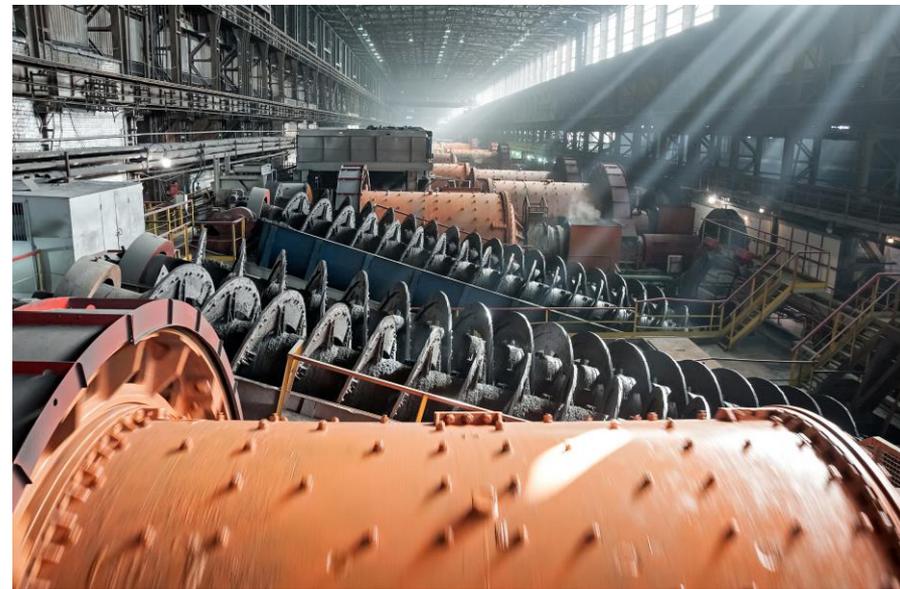
Presentan un tanque rectangular.

La alimentación es introducida en un punto intermedio del tanque.

La inclinación del tanque está entre 14° y 18° .

Los clasificadores con los laterales elevados son de tipo H, lo que presentan laterales más cortos son de tipo S.

Estos equipos pueden alcanzar los 14 metros de longitud, los 7 metros de anchura y diámetros de espiral de 2.4 metros.



(Fuente: Shutterstock)



(Cortesía: Wemco - FLSmidth)



2. Factores de diseño

Clasificador de espiral

La velocidad de giro de las espirales es proporcionalmente inversa al diámetro del tornillo.

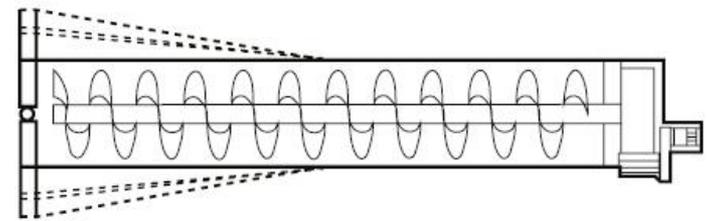
Espirales de 300 mm girarán entre 8 y 20 rpm.

Espirales de 2000 mm girarán entre 2 y 3 rpm.

Las capacidades pueden variar entre 1.5 t/h y 200 t/h.

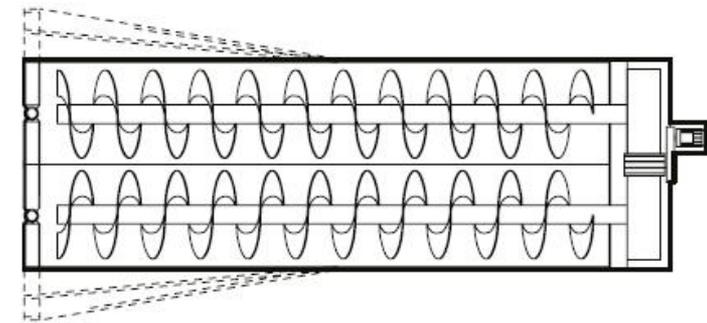
Las cubas pueden disponer de más de una espiral (simples o dobles).

Las espirales pueden ser de una sola vuelta o de varias.



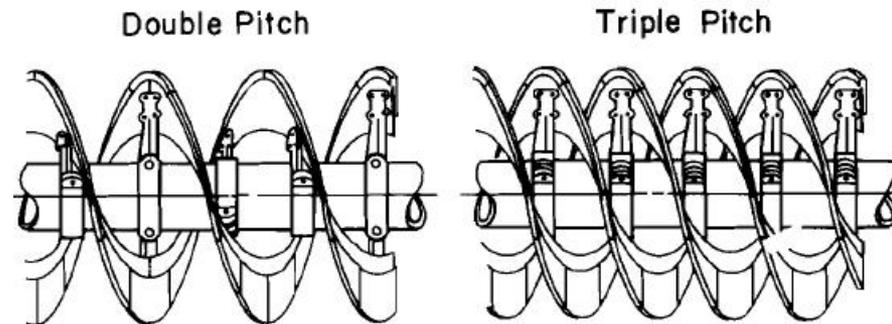
Clasificador de espiral simple (Vista en planta)

(Cortesía: Metso Minerals)



Clasificador de espiral doble (duplex)

(Cortesía: Metso Minerals)



Clasificador de doble y triple vuelta

(Cortesía: Denver Equipment (Metso Minerals))

2. Factores de diseño

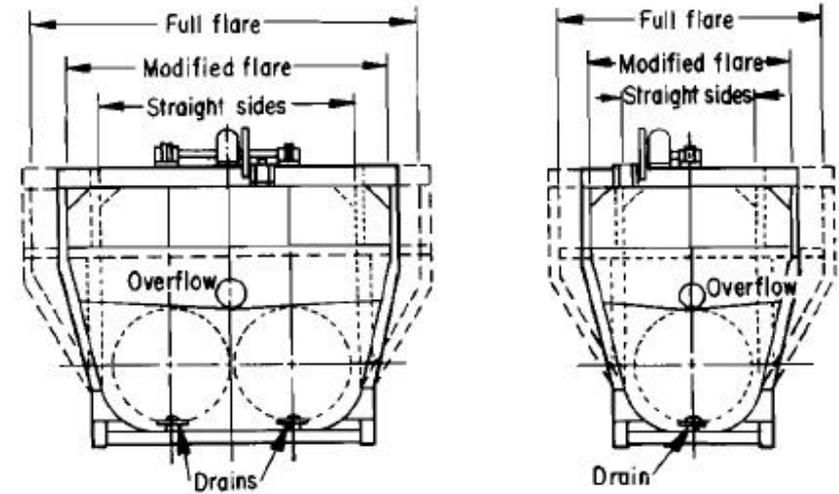
Clasificador de espiral

Las unidades pueden disponer de laterales abatibles para incrementar la capacidad.

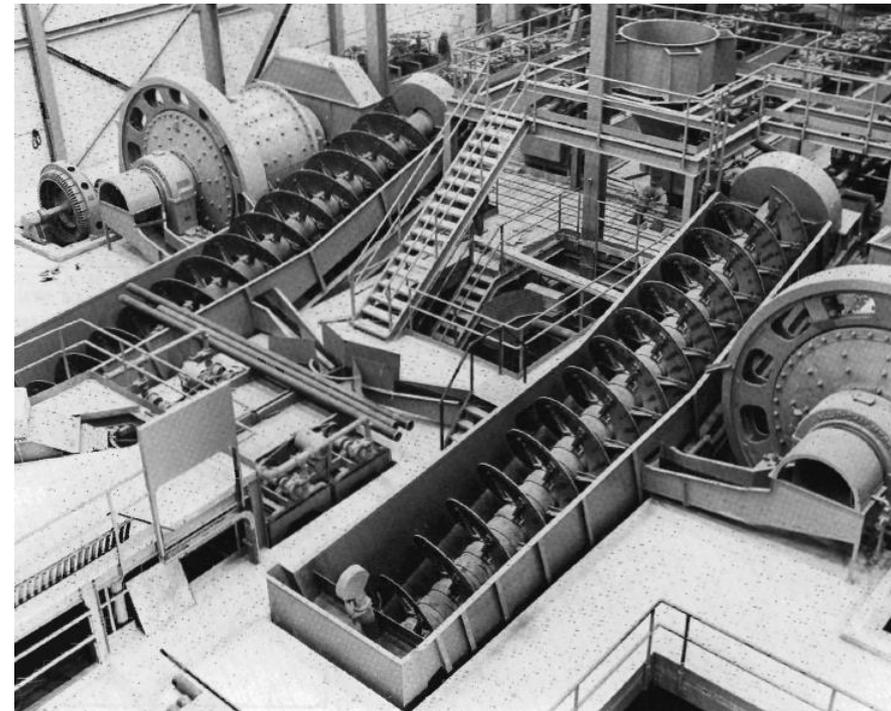
Este incremento puede alcanzar un 30% más para una unidad simple.

El incremento puede ser de un 200% para una unidad doble.

El tamaño de partícula en la alimentación está dentro del rango de las 150 micras.



(Fuente: SME Mineral Processing Handbook, 1985)



(Cortesía: Wemco)

2. Factores de diseño

Clasificador de rastrillo

Utilizan un mecanismo con movimiento recíprocante.

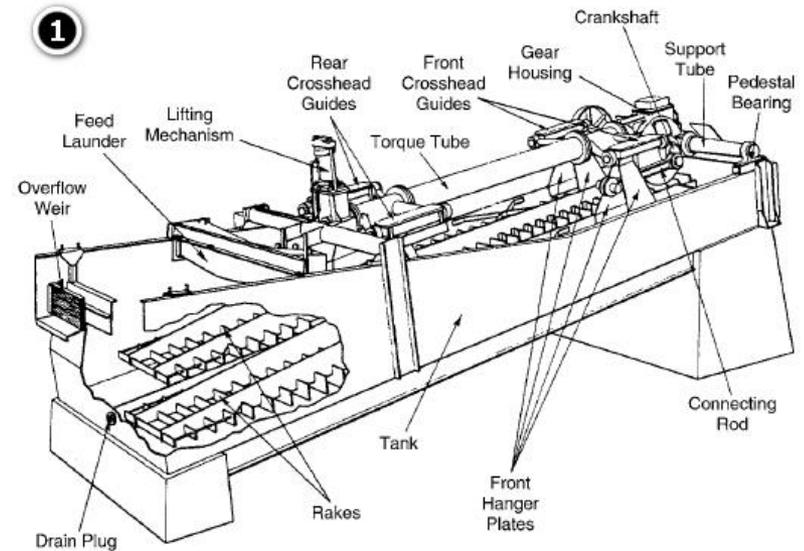
Los rastrillos estarán formados por una línea o más de placas metálicas.

La inclinación del tanque está entre 9° y 12° .

La capacidad será de 20 t/(día·anchura).

Estos equipos pueden alcanzar los 5 metros de anchura y los 12 metros de longitud.

Están menos extendidos que los clasificadores de espiral.



Clasificador de rastrillo

(Fuente: SME Mineral Processing Handbook, 1985)



(Cortesía: FLSmidth)

2. Factores de diseño

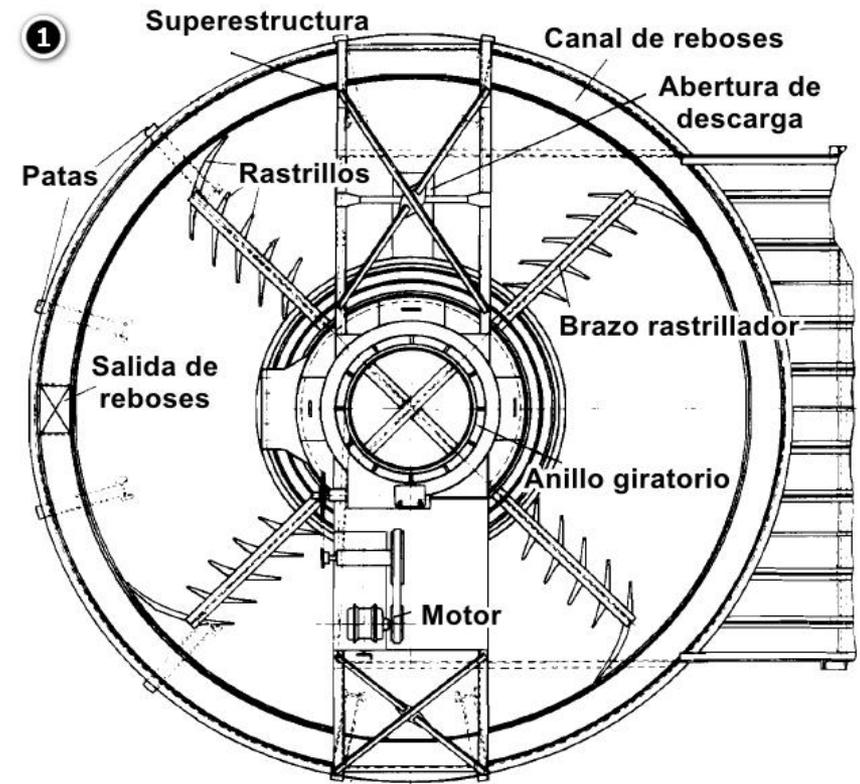
Clasificador de tazón

Este equipo es un clasificador de rastrillos con un tazón superior de sedimentación.

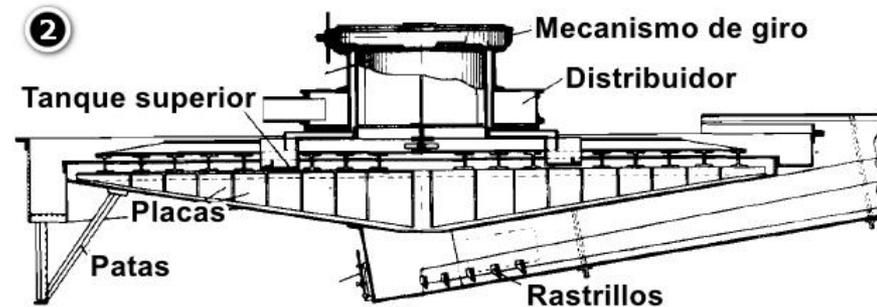
El tazón estará dotado de brazos rastrilladores dotados de placas.

Por el borde del tazón se recogerán los finos o ligeros como rebose.

El tazón se fabrica con diámetros entre 3 y 10 metros.



Clasificador de tazón (vista superior)



Clasificador de tazón (vista lateral)

(Fuente: SME Mineral Processing Handbook, 1985)

2. Factores de diseño

Clasificador de tazón

Este equipo es un clasificador de rastrillos con un tazón superior de sedimentación.

El tazón estará dotado de brazos rastrilladores dotados de placas.

Por el borde del tazón se recogerán los finos o ligeros como rebose.

El tazón se fabrica con diámetros entre 3 y 10 metros.

La alimentación llevará un 65% de sólidos.

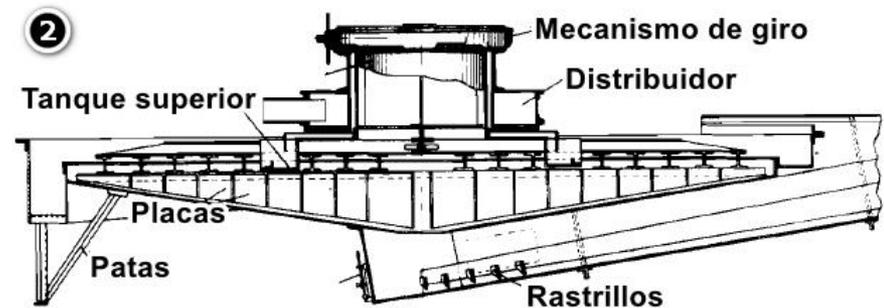
El rebose contendrá 1-15% de sólidos.

El hundido contendrá 70-85% de sólidos.

Las capacidades van de 5 a 250 t/h.



(Cortesía: FLSmidth)



Clasificador de tazón (vista lateral)

(Fuente: SME Mineral Processing Handbook, 1985)



2. Factores de diseño

Clasificador de cono

(Cortesía: FLSmidth)

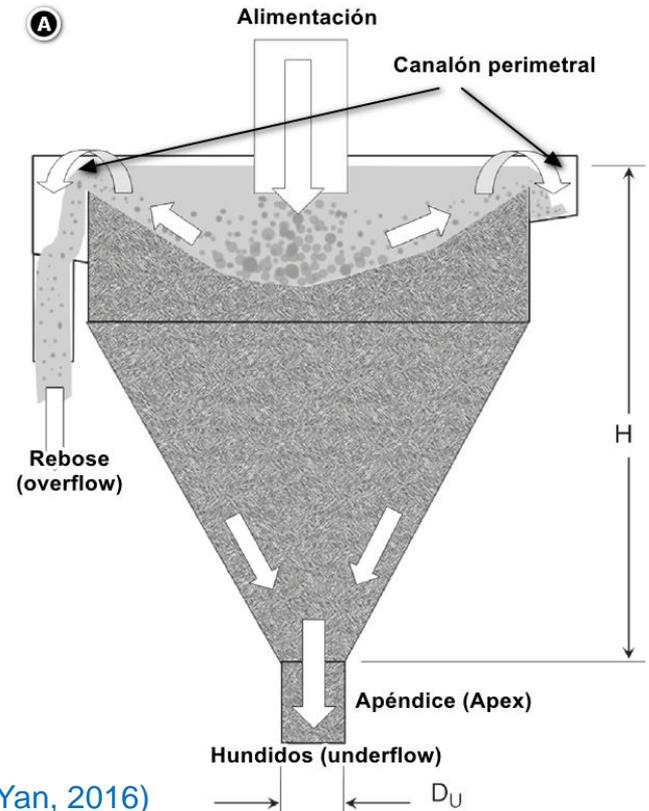
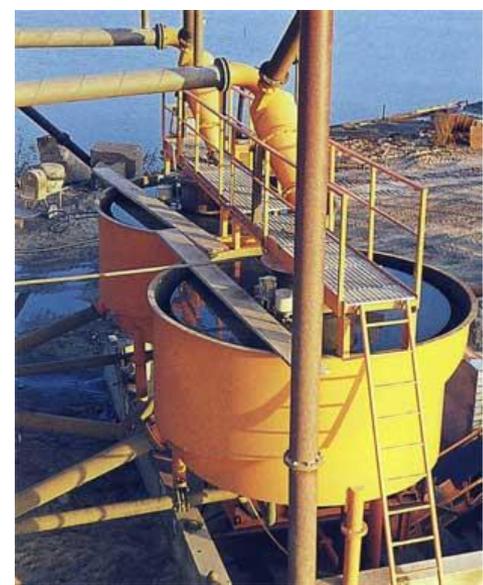
Son los clasificadores más simples.

Presentan uno uso limitado.

La cuba tiene forma cónica.

La salida inferior se mantiene cerrada hasta que el sedimentado alcanza una determinada altura.

Las partículas más finas y ligeras serán evacuadas por el rebosadero con la mayor parte del agua.



(Fuente: Gupta and Yan, 2016)



2. Factores de diseño

Clasificador de cono

(Cortesía: FLSmidth)

La velocidad terminal de las partículas dentro de estos equipos viene dada por:

$$v_T = \frac{d^2 g (\rho_S - \rho_F)}{18 \mu}$$

Siendo:

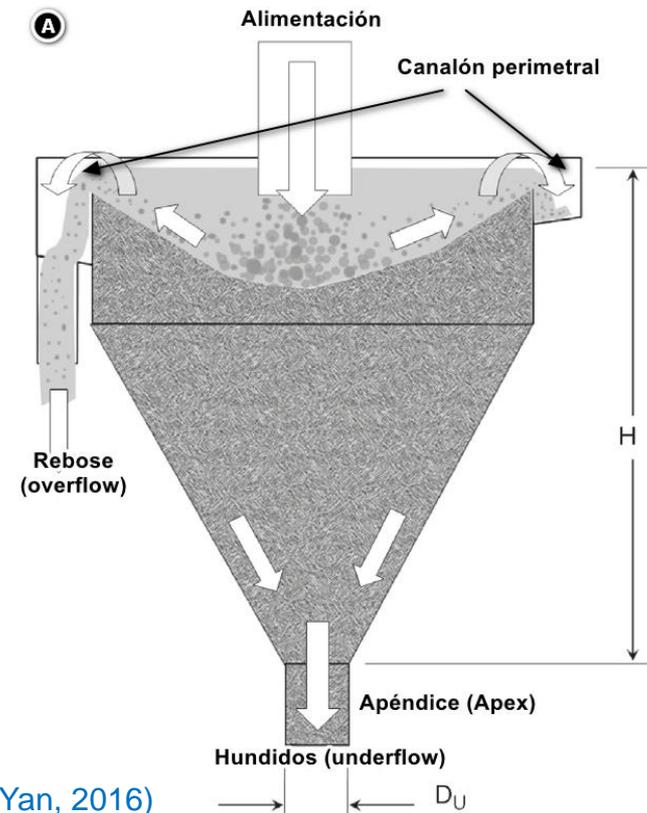
v_T = velocidad terminal

ρ_S, ρ_F = densidad del sólido y del fluido

g = aceleración gravitatoria

d = diámetro de partícula

μ = viscosidad del fluido



(Fuente: Gupta and Yan, 2016)



2. Factores de diseño

(Cortesía: FLSmidth)

Clasificador de cono

Las condiciones de sedimentación dependen del número de Reynolds, Re , y del número de Froude, Fr

1. En la sección cónica:

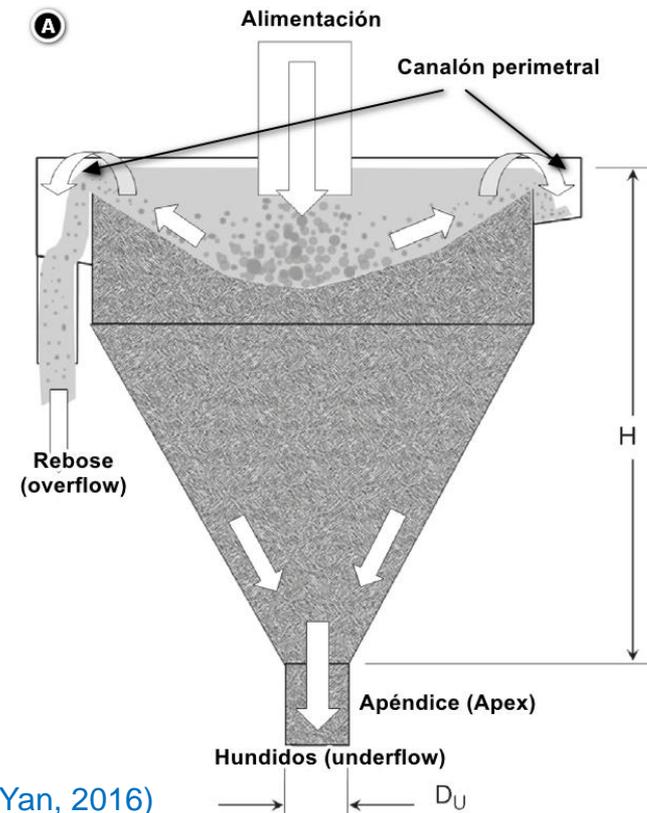
$$Re_C = \frac{2 \cdot \rho_{SL} \cdot v \cdot H}{\mu}$$

ρ_{SL} = densidad de la pulpa

$$Fr_C = \left[\frac{\rho_{SL}}{(\rho_S - \rho_{SL})} \right] \cdot \frac{v^2}{g \cdot H}$$

2. En el ápice (*apex*):

$$Re_A = 2 \cdot D_U \cdot \sqrt{g \cdot H} \cdot \rho_{SL}$$



(Fuente: Gupta and Yan, 2016)

2. Factores de diseño

(Cortesía: FLSmidth)

Clasificador de cono

Usando las expresiones anteriores se puede obtener la concentración de sólidos a través del rebose, $C_{S(U)}$ y el d_{50C}

$$C_{S(U)} = \frac{8.56 \cdot e^{2.38 \cdot V_{S(F)}} Fr_C^{0.07} Re_A^{0.17} \left[\frac{d_{80}}{H} \right]^{0.10}}{Re_C^{0.09} \left[\frac{A_U}{A_C} \right]^{0.24}}$$

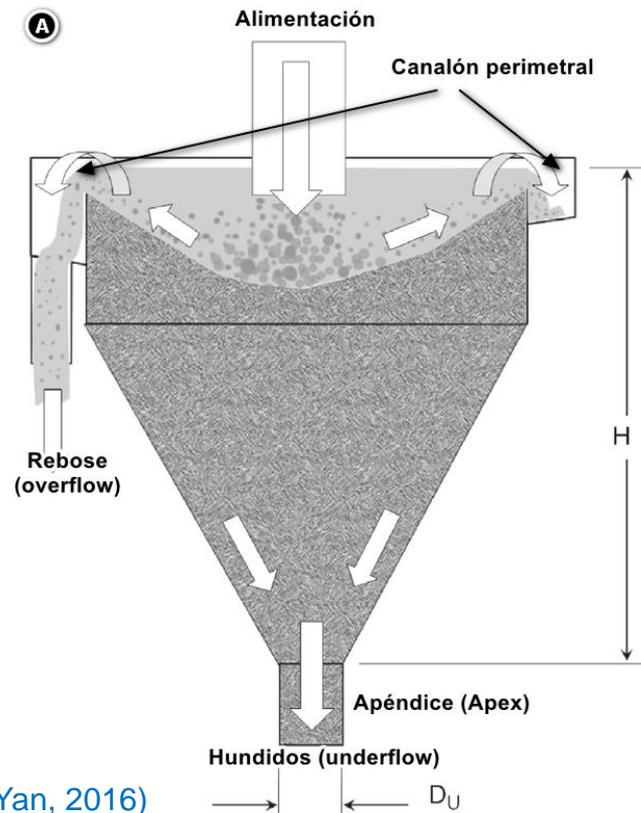
$$d_{50C} = \frac{e^{7.02 \cdot V_{S(O)}} Fr_C^{0.28} \left(\frac{d_{80}}{H} \right)^{0.53}}{e^{7.05(V_{S(F)} - V_{S(O)})} Re_C^{0.33} \left(\frac{A_U}{A_C} \right)^{0.48}} \cdot 2H$$

$V_{S(F)}$ = fracción volumétrica sólidos (alimentación)

$V_{S(O)}$ = fracción volumétrica sólidos (rebose)

A_U, A_C = Área sección ápice y cono

d_{80} = tamaño partícula pasa 80% (alimentación)



(Fuente: Gupta and Yan, 2016)

3. Área de Sedimentación

Cálculo de las dimensiones del tanque

Para el cálculo de las dimensiones de una cuba se debe tener en cuenta el término de *eficiencia de área (areal efficiency)*.

Este parámetro establece que el área efectiva será menor que el área real o instalada de la cuba debido a factores que afectan a esa disminución.

En la siguiente tabla se presentan los rangos del factor de eficiencia de área:

(Fuente: Gupta and Yan, 2016)

Clasificador	Eficiencia de Área A_{EF}	
	Mínimo	Máximo
Rastrillo	0.2	0.6
Espiral	0.2	0.6
Tazón	0.4	0.6

Gráfica de eficiencia de área

El cálculo de esta eficiencia se puede llevar a cabo a través de gráficas conociendo los ciclos por minuto del sistema mecánico (ver figura adjunta)



3. Área de Sedimentación

Cálculo de las dimensiones del tanque (Gupta and Yan, 2016)

El área de la cuba viene expresada como:

$$A = \frac{Q_{VL(O)}}{v_S \cdot H \cdot P_S \cdot A_{EF}}$$

v_S = velocidad sedimentación partículas esféricas

H = Factor obstáculo a la sedimentación

P_S = Factor de forma

A_{EF} = Factor Eficiencia de Área

$Q_{VL(O)}$ = Caudal de agua (rebose)

A continuación se describe como obtener v_S , H y P_S



3. Área de Sedimentación

Cálculo de las dimensiones del tanque (Gupta and Yan, 2016)

A. Estimación de v_S

1. Obtención del valor de la velocidad terminal, v_T :

$$v_T = \sqrt[3]{g \frac{\rho_S - \rho_L}{\rho_L} \cdot \frac{\mu}{\rho_L}} \quad m/s$$

μ = viscosidad del líquido (Pascal·s)

ρ_S = densidad sólidos (kg/m^3)

ρ_L = densidad líquido (kg/m^3)

g = aceleración gravitatoria, ($9.81 m/s^2$)

2. Obtención del valor corregido de Reynolds, Re_R :

$$Re_R = \frac{d_{50} \cdot v \cdot \rho_L}{\mu}$$

3. Obtenidos v_T y Re_R se utiliza la gráfica adjunta para despejar v_S .



3. Área de Sedimentación

Cálculo de las dimensiones del tanque (Gupta and Yan, 2016)

B. Estimación del factor de obstrucción a la sedimentación, H

1. Obtención de la fracción de vacío entre partículas, ε :

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{V_d}{V_F}} = \frac{V_{L(F)}}{V_{L(F)} + V_{d50}}$$

V_F = Dilución, en volumen, alimentación $\left(\frac{V_{L(F)}}{V_{S(F)}} \right)$

V_d = Fracción volumétrica sólidos más pequeños de d_{50} en alimentación

$$V_d = \frac{V_{d50}}{V_{S(F)}}$$

V_{d50} = Volumen sólidos más pequeños de d_{50} en alimentación

$V_{S(F)}, V_{L(F)}$ = Volumen sólidos y líquido en alimentación

2. Uso de la gráfica para obtener $f(\text{Re}, P_S)$

3. Obtenidos $f(\text{Re}, P_S)$ y ε se utiliza la siguiente expresión.

$$H = \varepsilon^{f(\text{Re}, P_S)}$$



3. Área de Sedimentación

Cálculo de las dimensiones del tanque (Gupta and Yan, 2016)

C. Estimación del factor de forma, P_S

1. Se emplea la siguiente tabla para obtenerlo:

(Fuente: Gupta and Yan, 2016)

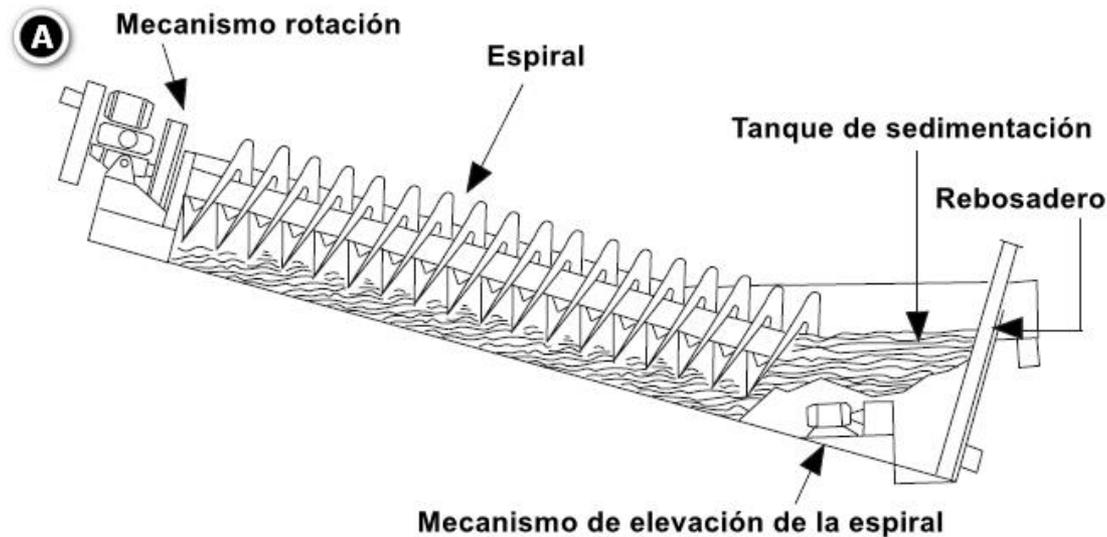
Partículas	Factor de forma P_S
Spheres Esferas	1.00
Cubes Cubos	0.93
Sand Arena	0.90
Crushed galena Galena triturada	0.70
Crushed dolomite/pyrite Pirita/dolomía triturada	0.67
Crushed quartz Cuarzo triturado	0.50

D. Una vez obtenidos los factores anteriores (v_S , H y P_S) ya se puede emplear la siguiente expresión para dimensionar el área del clasificador hidráulico:

$$A = \frac{Q_{VL(O)}}{v_S \cdot H \cdot P_S \cdot A_{EF}}$$

3. Área de Sedimentación

Cálculo de las dimensiones del tanque (Metso Minerals)



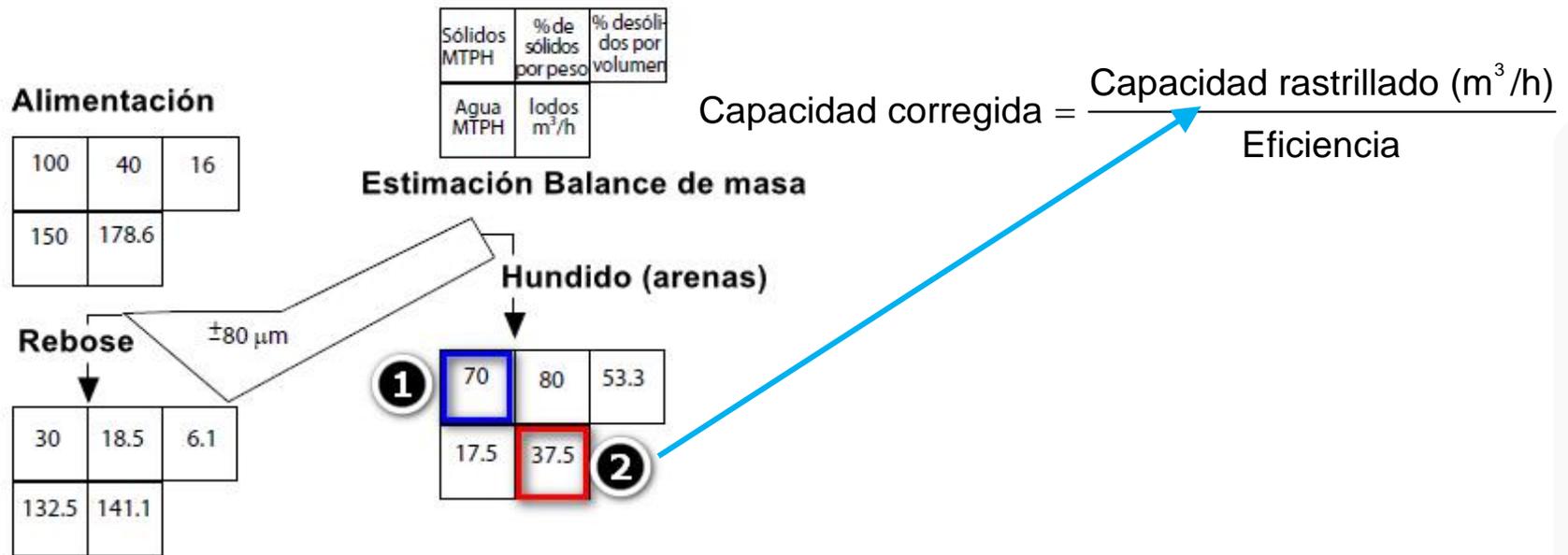
Según Metso Minerals la selección del equipo es un proceso de tres etapas:

1. Selección del diámetro de la espiral, número de espirales y velocidad de rotación.
2. Selección del tanque de sedimentación en base al tamaño de corte y a la densidad de la pulpa.
2. Cálculo del área de compresión del tanque para la fracción gruesa con la que se entrará en las tablas del fabricante.



3. Área de Sedimentación

Cálculo de las dimensiones del tanque (Metso Minerals)



- 1: Partículas secas (t/h) - cálculo área compresión
- 2: Capacidad de rastrillado - lodo (m³/h)

Determinación del diámetro, paso y velocidad de giro:

1. Se parte de un balance de masa.
2. Empleo de tabla para estimar la velocidad periférica (m/s) y la eficiencia de rastrillado (ver tabla).
3. Se calcula la capacidad de rastrillado corregida.
4. Empleo de tabla para obtener el diámetro, paso y velocidad según la capacidad corregida calculada.



3. Área de Sedimentación

Cálculo de las dimensiones del tanque (Metso Minerals)

Determinación del área del tanque de sedimentación:

1. Corrección del tamaño de corte de partícula equivalente.

Cuando la densidad de los sólidos es diferente a 2.65 se debe aplicar la siguiente expresión para obtener el tamaño de corte corregido:

$$\text{Tamaño corte} \times \sqrt{\frac{\rho_s - 1}{1.65}}$$

2. Obtención del ratio de sedimentación (m/h) entrando con el tamaño de corte corregido y el porcentaje de sólidos en volumen en el rebose (ver tabla).

3. Se calcula el área del tanque de sedimentación según el caudal de rebose:

$$A_{\text{tanque}} = \frac{\text{Caudal de rebose (m}^3/\text{h)}}{\text{Ratio sedimentación partícula (m/h)} \times 0.7}$$



3. Área de Sedimentación

Cálculo de las dimensiones del tanque (Metso Minerals)

Determinación del área del tanque de sedimentación corregida o de compresión:

Evita la acumulación de partículas que son demasiado pequeñas para sedimentar y demasiado grandes para que salgan por rebose.

1. Se obtendrá el ratio de sedimentación para un 40% de sólidos en volumen con el mismo tamaño de corte de partícula corregido.
2. Se calcula el área del tanque de sedimentación corregida con la siguiente expresión y el nuevo valor obtenido del ratio de sedimentación:

$$A_{\text{compresión}} = \frac{\text{Caudal de sólidos hundido (t/h)}}{\rho_s \times 0.4 \times \text{Ratio sedimentación partícula (m/h)} \times 0.7 \times 0.8}$$

3. Con el anterior valor de $A_{\text{compresión}}$ calculado se selecciona el equipo (ver tabla)

Selección clasificador de espiral (Metso Minerals)

Ratio de sedimentación (m/h)



3. Área de Sedimentación

Cálculo de las dimensiones del tanque (Metso Minerals)

Determinación del área del tanque de sedimentación corregida o de compresión:

Evita la acumulación de partículas que son demasiado pequeñas para sedimentar y demasiado grandes para que salgan por rebose.

1. Se obtendrá el ratio de sedimentación para un 40% de sólidos en volumen con el mismo tamaño de corte de partícula corregido.
2. Se calcula el área del tanque de sedimentación corregida con la siguiente expresión y el nuevo valor obtenido del ratio de sedimentación:

$$A_{\text{compresión}} = \frac{\text{Caudal de sólidos hundido (t/h)}}{\text{Ratio sedimentación partícula (m/h)} \times 0.7 \times 0.8} \times 0.4$$

3. Con el anterior valor de $A_{\text{compresión}}$ calculado se selecciona el equipo (ver tabla)

Ejercicio Ejemplo



4. Capacidad de los clasificadores mecánicos

Cálculo de la capacidad

Para la obtención del cálculo de la capacidad es recomendable acudir a la información de los suministradores de equipos.

El valor de la capacidad en el rebose es el parámetro determinante de la capacidad de diseño de los clasificadores.

La expresión que da la capacidad del rebose en volumen viene dada por:

$$Q_{V(O)} = W \cdot H \cdot v \quad \frac{m^3}{s}$$

$Q_{V(O)}$ = Caudal en el rebose

W = Anchura rebosadero (m)

H = Altura rebosadero (m)

v = Velocidad del flujo hacia el rebosadero, (m/s)



4. Capacidad de los clasificadores mecánicos

Cálculo de la capacidad

Para la obtención del cálculo de la capacidad es recomendable acudir a la información de los suministradores de equipos.

El valor de la capacidad en el rebose es el parámetro determinante de la capacidad de diseño de los clasificadores.

También se puede sustituir por:

$$Q_{V(O)} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot v_T \quad \frac{m^3}{s}$$

$Q_{V(O)}$ = Caudal en el rebose

A = Área de la cuba (m^2)

v_T = Velocidad terminal (m/s)



4. Capacidad de los clasificadores mecánicos

Clasificadores de espiral

La capacidad de sólidos en el rebose se puede establecer como:

1. Cubas con altura de rebosadero bajo

$$Q_{MS(O)} = n \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot (3.92 \cdot D^2 + 0.67 \cdot D) \quad \frac{t}{h}$$

$Q_{MS(O)}$ = Capacidad de sólidos en el rebose

n = Número de espirales

k_1 = Factor a través de tabla

k_2 = Factor a través de tabla

D = Diámetro de la espiral (m)



4. Capacidad de los clasificadores mecánicos

Clasificadores de espiral

La capacidad de sólidos en el rebose se puede establecer como:

2. Cubas con altura de rebosadero alta

$$Q_{MS(O)} = n \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot (3.12 \cdot D^2 + 0.42 \cdot D) \quad \frac{t}{h}$$

$Q_{MS(O)}$ = Capacidad de sólidos en el rebose

n = Número de espirales

k_1 = Factor a través de tabla

k_2 = Factor a través de tabla

D = Diámetro de la espiral (m)



4. Capacidad de los clasificadores mecánicos

Clasificadores de espiral

Otra expresión establece la capacidad de sólidos en el rechazo:

$$Q_{MS(U)} = 0.035 \cdot W \cdot P \cdot \rho_B \cdot (D - 0.75 \cdot W) \quad (t/h) / rpm - \text{espiral}$$

$Q_{MS(U)}$ = Capacidad de rastrillado

W = Ancho álabes (flight width) (m)

P = Paso álabes (flight pitch) (m)

ρ_B = Densidad de los sólidos, rebose (kg/m^3)

D = Diámetro de la espiral (m)

Referencias para consulta:



euitc

Ejercicios Resueltos de Tecnología Mineralúrgica



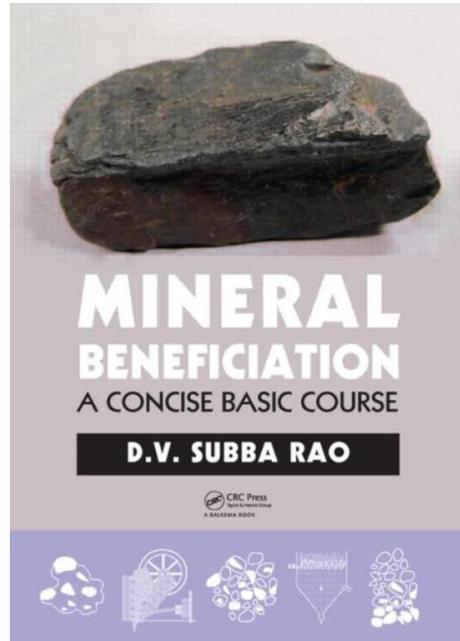
Pedro Martínez Pagán
Dr. Ingeniero de Minas



Universidad Politécnica de Cartagena

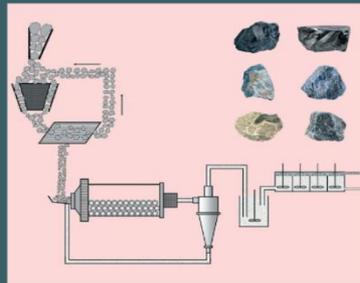


raí



Minerals and Coal Process Calculations

D.V. Subba Rao



CRC Press

A BALEMA BOOK



Universidad Politécnica de Cartagena



EUROPEAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
"Think Human First"

OCW UPCT

TECNOLOGÍA MINERALÚRGICA, 2ª ed. (2020)

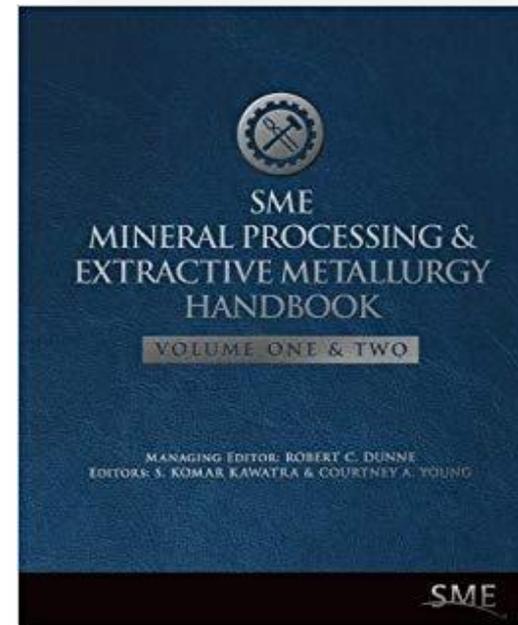
URL: <https://ocw.bib.upct.es/course/view.php?id=178>



MINERAL PROCESSING DESIGN AND OPERATIONS

An Introduction

Second Edition



SME MINERAL PROCESSING & EXTRACTIVE METALLURGY HANDBOOK VOLUME ONE & TWO

MANAGING EDITOR: ROBERT C. DUNNE
EDITORS: S. KOMAR KAWATRA & COURTNEY A. YOUNG

SME