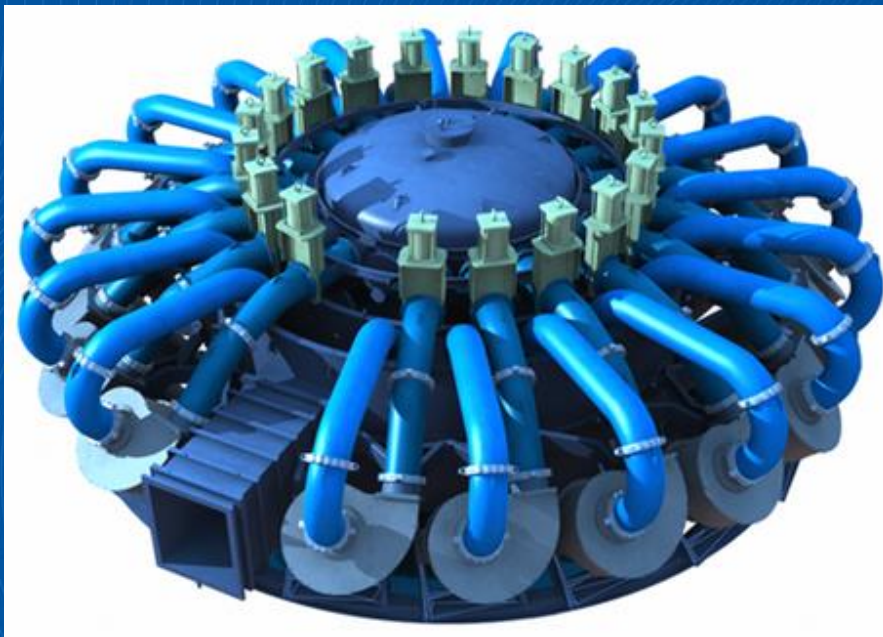




Universidad
Politécnica
de Cartagena

PLANTAS DE TRATAMIENTO DE RECURSOS MINERALES



TEMA 8:
SELECCIÓN POR TAMAÑOS
EQUIPOS CENTRÍFUGOS:
HIDROCICLONES



Universidad
Politécnica
de Cartagena

8

HIDROCICLONES

INDICE

1. Introducción
2. Componentes Principales
3. Principio de Operación
4. Curva de Partición. Concepto de Imperfección
5. Dimensionado y Selección de un Hidrociclón
6. Referencias de Consulta



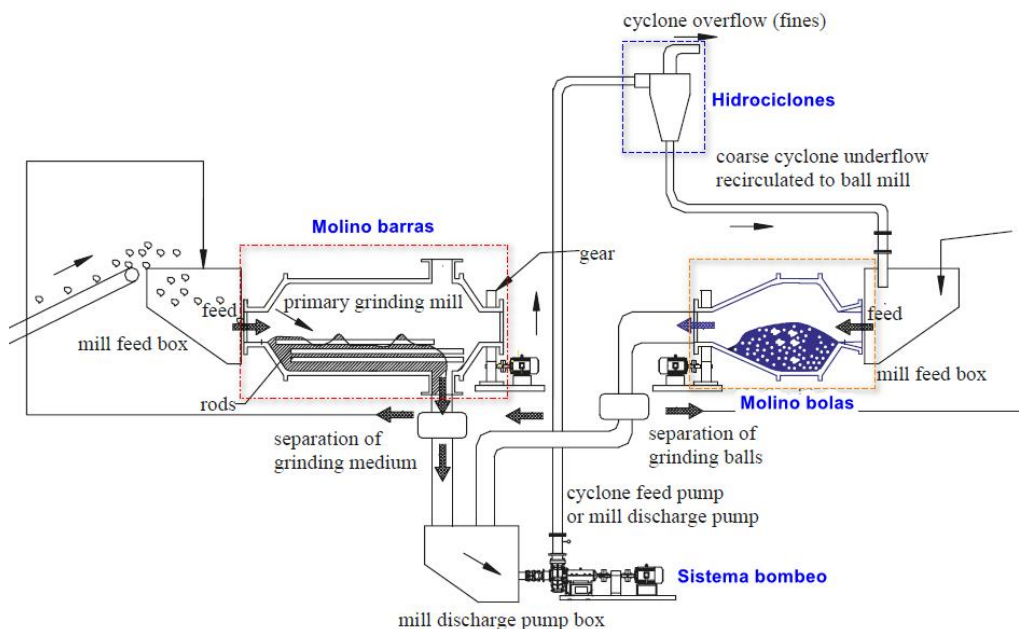


1. Introducción. Hidrociclones

Son unidades muy simples pero de gran importancia en los procesos de la industria minera.

El rango práctico para la clasificación se encuentra entre las 40 y las 400 micras (0.04-0.4 mm).

Suelen colocarse tras los molinos de bolas.



(Fuente: Baha E. Abulnaga (2002))



(Cortesía: Krebs-FLSmidth)



(Cortesía: Multotec)



1. Introducción. Hidrociclones

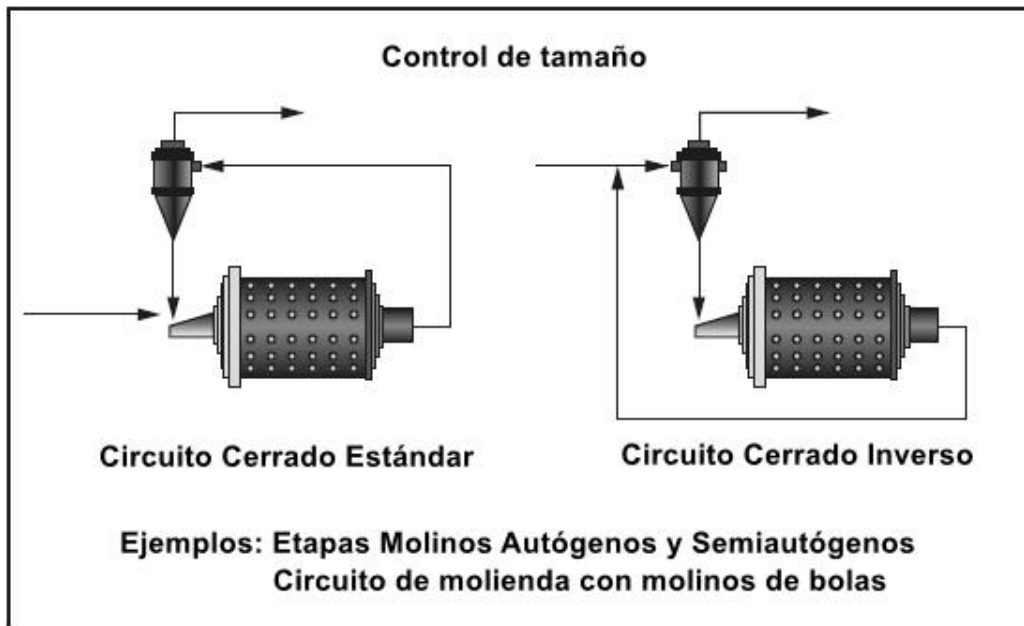
Son unidades muy simples pero de gran importancia en los procesos de la industria minera.

El rango práctico para la clasificación se encuentra entre las 40 y las 400 micras (0.04-0.4 mm).

Suelen colocarse tras los molinos de bolas.



(Cortesía: Krebs-FLSmidth)



(Cortesía: Multotec)



1. Introducción. Hidrociclones

Su funcionamiento se basa en la creación de fuerzas centrífugas (10000 G's).

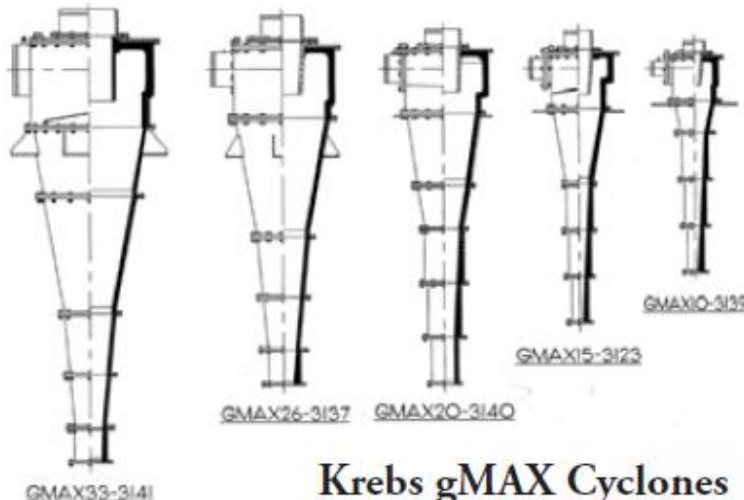
Se fabrican en acero o con materiales plásticos.

Presentarán revestimientos antidesgaste cerámicos, Ni-Hard, poliuretano, neopreno, etc.

Se fabrican en una amplia variedad de tamaños (13-900 mm).



(Cortesía: Chromtech)



Krebs gMAX Cyclones



(Cortesía: Krebs-FLSmith)



2. Componentes Principales

Sección superior

Se encuentra la entrada principal y el tubo localizador el vórtice secundario.

Su diámetro interior define el diámetro del hidrociclón.

Sección intermedia

Su función es la de alargar el equipo e incrementar el tiempo de residencia.

Su longitud coincide con el diámetro del hidrociclón.

Sección cónica

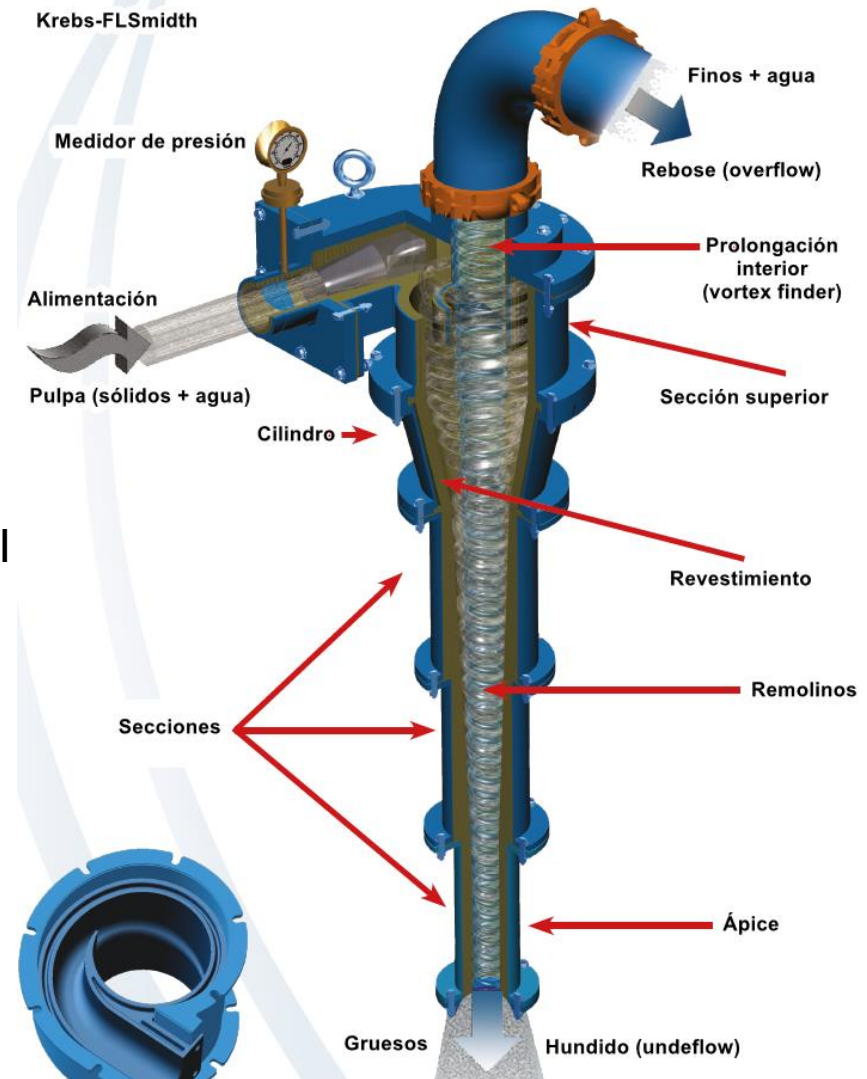
Presenta un ángulo de 10-20°.

Ápice

Salida de los gruesos.

Localizador de vórtice

Salida de finos y la mayor parte del contenido de agua (35% diámetro del hidrociclón).



(Cortesía: Krebs-FLSmith)



2. Componentes Principales

Sección superior

Se encuentra la entrada principal y el tubo localizador el vórtice secundario.

Su diámetro interior define el diámetro del hidrociclón.

Sección intermedia

Su función es la de alargar el equipo e incrementar el tiempo de residencia.

Su longitud coincide con el diámetro del hidrociclón.

Sección cónica

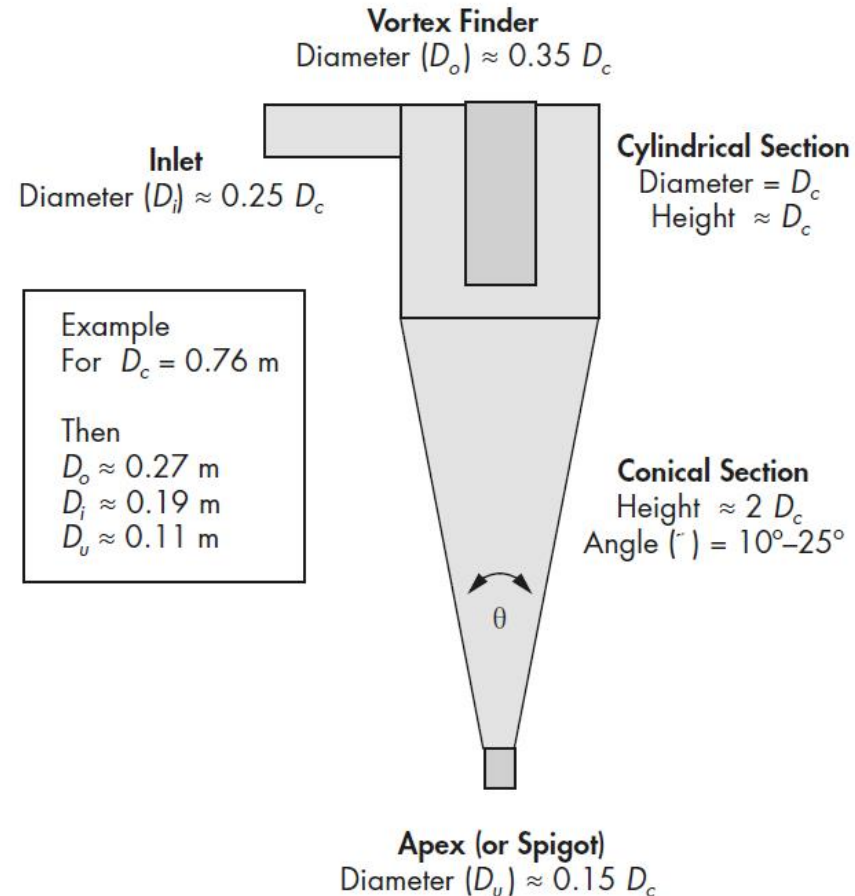
Presenta un ángulo de 10-20°.

Ápice

Salida de los gruesos.

Localizador de vórtice

Salida de finos y la mayor parte del contenido de agua (35% diámetro del hidrociclón).

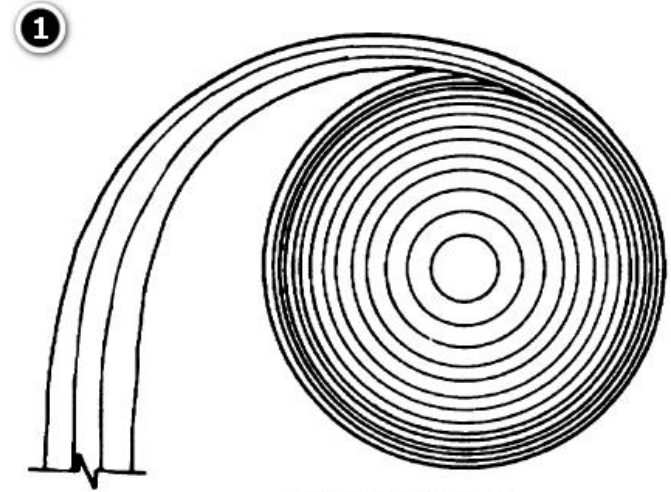


(Fuente: Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook (SME 2019))



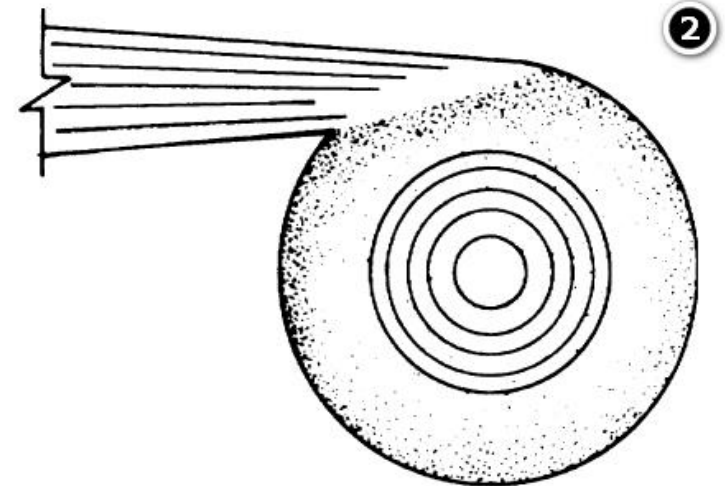
3. Principio de Operación

1. La pulpa entra a la cámara a altas presiones, y obligada a seguir una trayectoria circular.
2. Las partículas son afectadas por una fuerza centrífuga y otra de arrastre (centrípeta).
3. En el interior se producen dos remolinos o vórtices.
4. El primario arrastrará las partículas más gruesas o pesadas.
5. El secundario llevará las partículas más finas y ligeras más la mayor parte del agua.
6. El primario es de mayor presión que el secundario.



Entrada en voluta

(Fuente: Wills and Napier-Munn, 2006)

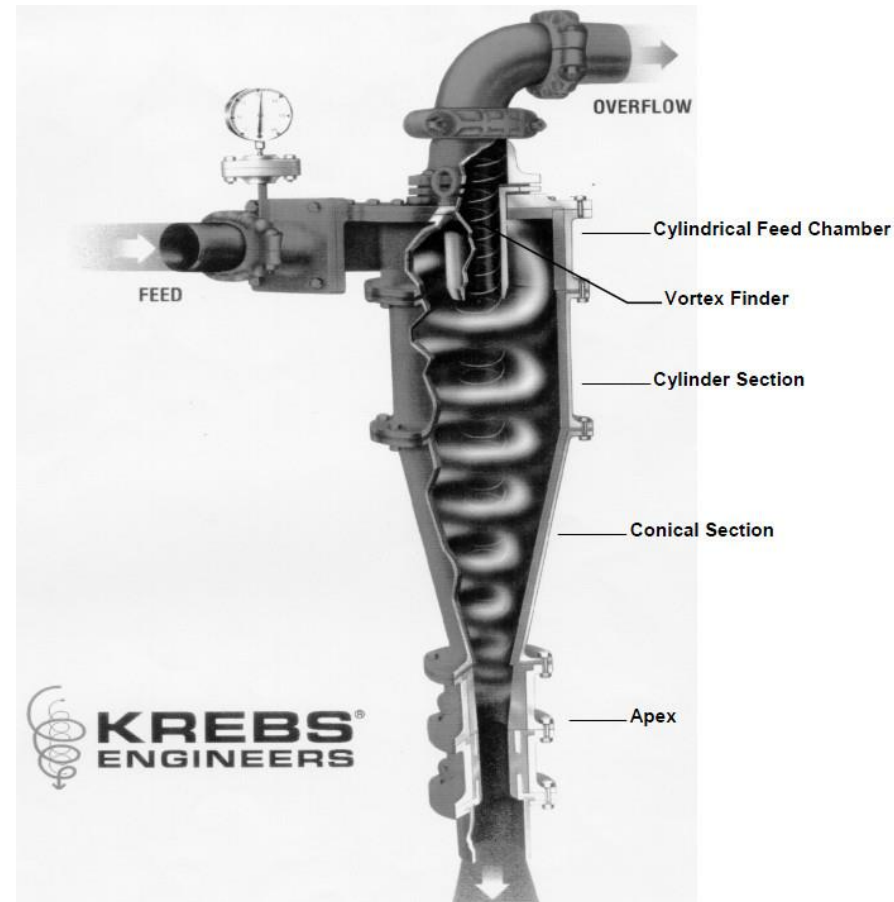


Entrada tangencial

(Fuente: Wills and Napier-Munn, 2006)

3. Principio de Operación

1. La pulpa entra a la cámara a altas presiones, y obligada a seguir una trayectoria circular.
2. Las partículas son afectadas por una fuerza centrífuga y otra de arrastre (centrípeta).
3. En el interior se producen dos remolinos o vórtices.
4. El primario arrastrará las partículas más gruesas o pesadas.
5. El secundario llevará las partículas más finas y ligeras más la mayor parte del agua.
6. El primario es de mayor presión que el secundario.

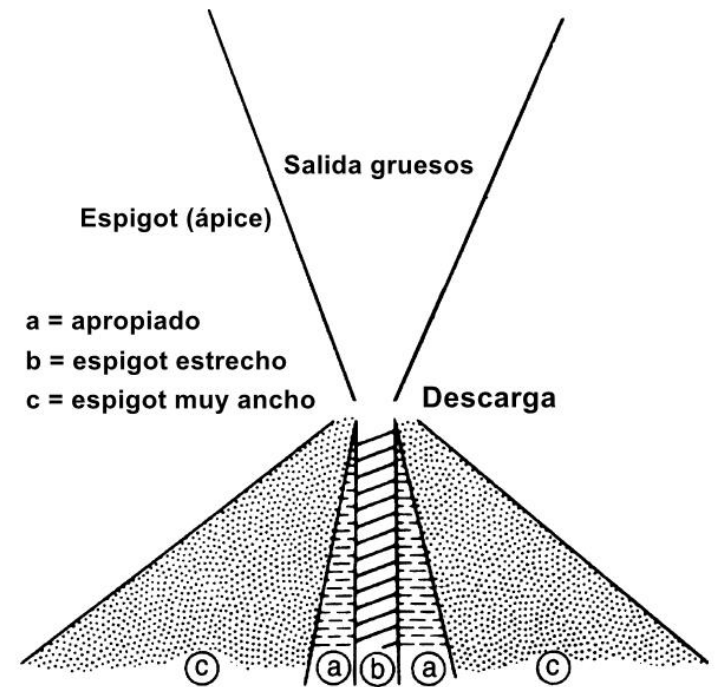


(Cortesía Krebs FLSmidth)



3. Principio de Operación

1. Un ápice correcto provoca un cono de descarga con salida de aire en su núcleo. El hidrociclón funciona como clasificador (40-60% de sólidos).
2. Un ápice estrecho provoca que el vértice de aire no salga (efecto "roping"). El hidrociclón trabaja como espesador (70% de sólidos).
3. Un ápice demasiado ancho da lugar a una salida de desclasificados y de agua (mayor imprecisión en el corte).



(Fuente: Wills and Napier-Munn, 2006)



(Cortesía: Metso-Outotec)



4. Curva de Partición. Concepto de Imperfección

Imperfección

Los clasificadores hidráulicos industriales no producen un corte granulométrico neto.

Los factores principales para ellos serán:

1. No disponer de un elemento físico que retenga, o deje pasar, por diferencia de tamaños (cribas).
2. Una falta de uniformidad en el flujo del fluido.

Ese resultado será la presencia de gruesos en la corriente de finos y tamaños finos en la corriente de tamaños gruesos.

El grado de perfección en el corte granulométrico que desarrolla un clasificador viene indicado por el término IMPERFECCIÓN.

La **imperfección** representa la calidad del proceso de estos equipos.

4. Curva de Partición. Concepto de Imperfección



Curva de partición o de Tromp

Un valor bajo de la imperfección significa un corte de tamaño más preciso.

La imperfección es un parámetro cuyo valor se deduce de la **curva de partición**, también denominada **curva de Tromp**.

Esta curva representará la probabilidad, en peso, que tiene cada partícula, según su tamaño, de salir por el hundido (gruesos).

A continuación se explica a través de un ejemplo el funcionamiento de la curva de partición o de Tromp.



(Fuente: Wills and Napier-Munn, 2006)



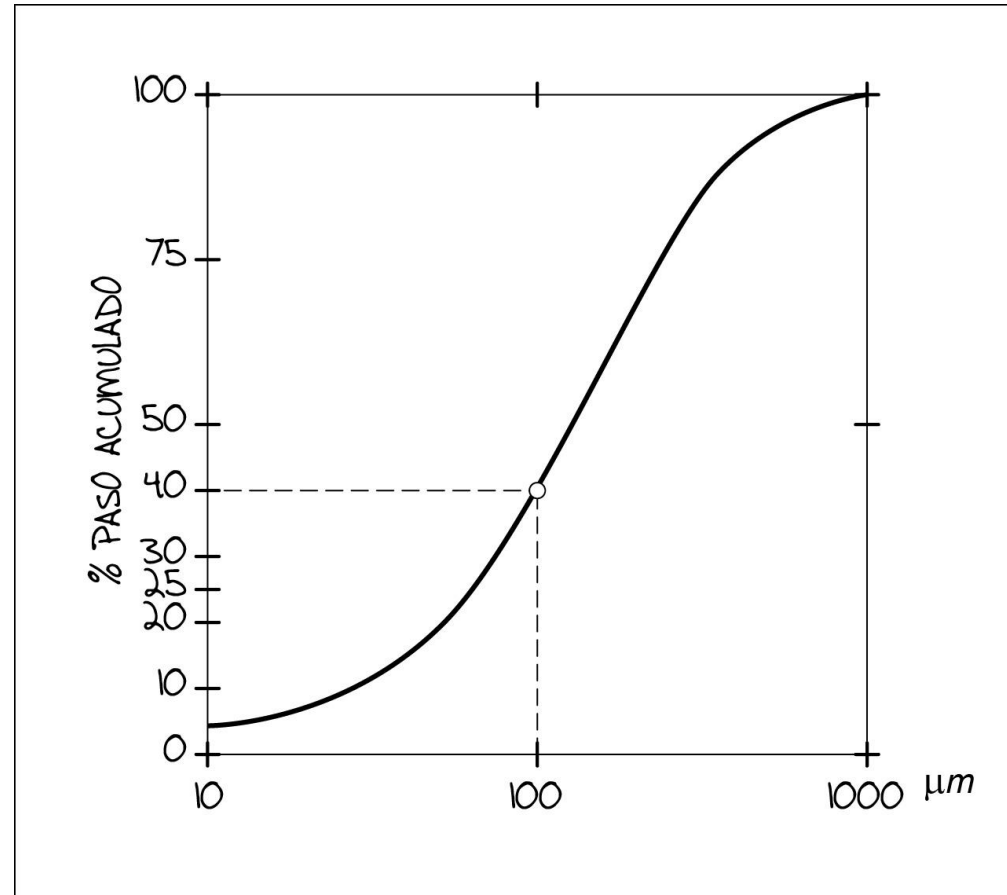
4. Curva de Partición. Concepto de Imperfección

Caso corte ideal

Se supone un clasificador ideal clasificando con un corte de 100 micras.

La figura representa la distribución granulométrica para el ejemplo (alimentación).

1. Los tamaños superiores a 100 micras será un 60% (hundido).
2. Los tamaños inferiores a 100 micras será un 40% (rebose).



Curva granulométrica



4. Curva de Partición. Concepto de Imperfección

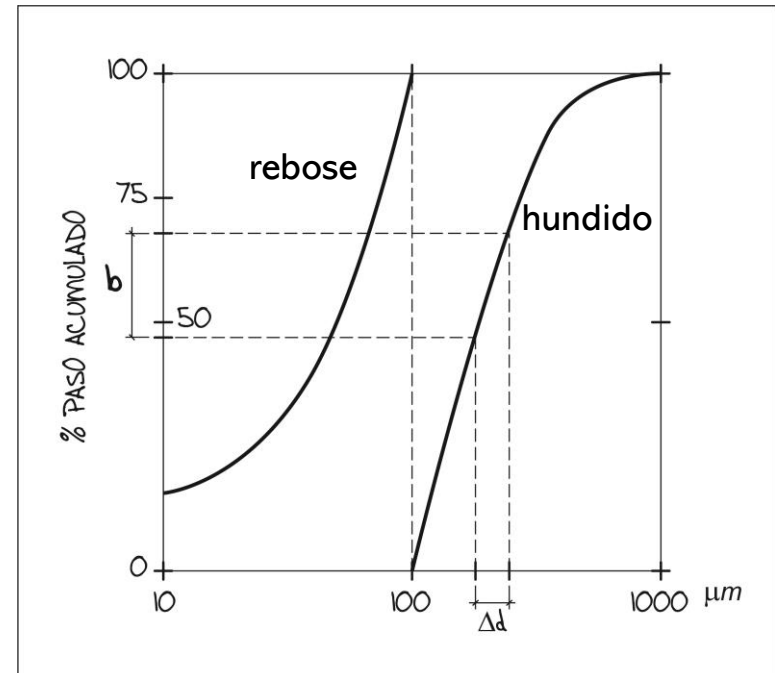
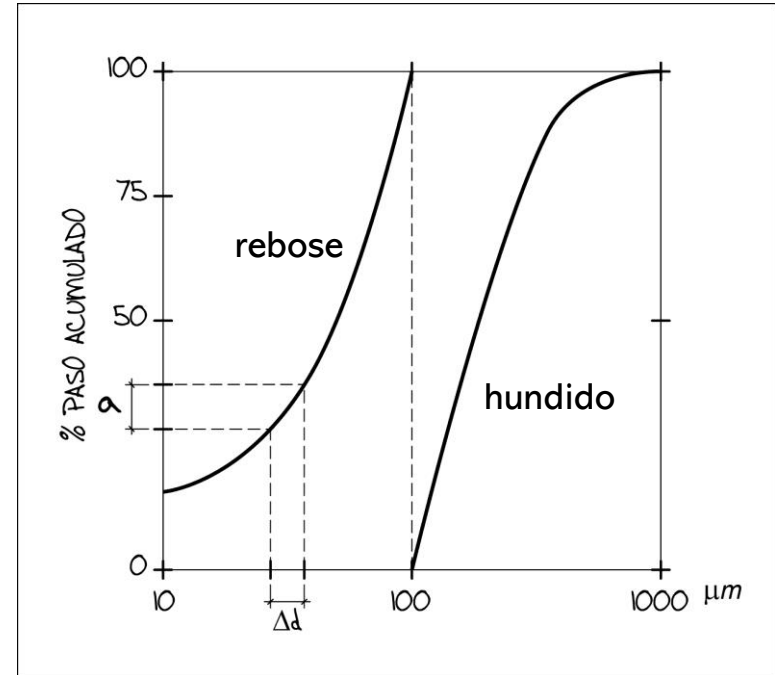
Caso corte ideal

Distribuciones granulométricas obtenidas en las salidas del hidrociclón (hundido y rebose).

Corte perfecto o ideal.

Se toma un intervalo granulométrico, Δd , cumpliéndose:

1. **Alimentación:** La cantidad en peso total será $0.4x_a + 0.6x_b$.
2. **Rebose:** La cantidad en peso obtenida será $0.4x_a$.
3. **Hundido:** La cantidad en peso obtenida será $0.6x_b$.





4. Curva de Partición. Concepto de Imperfección

Caso corte ideal

Entre 10 y 100 micras, la probabilidad en el hundido será:

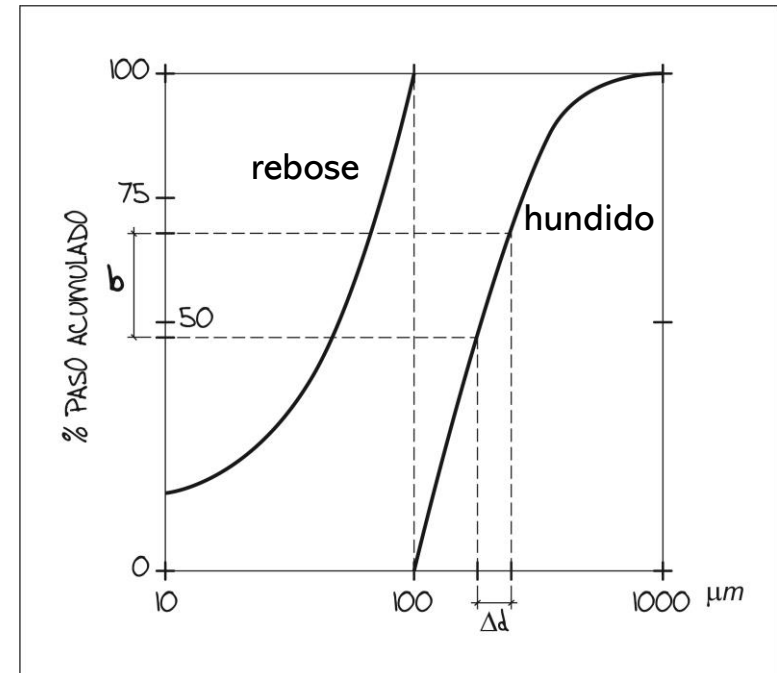
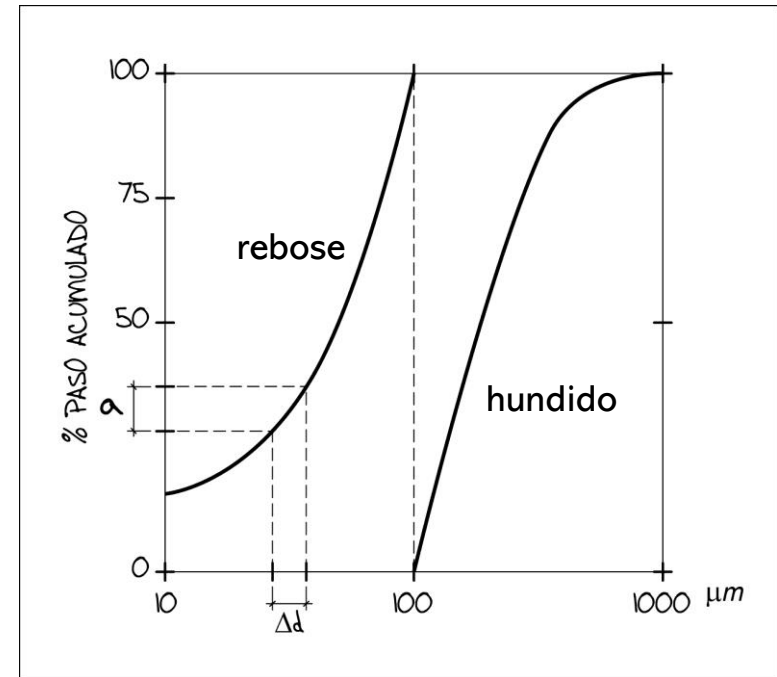
$$P_{(10-100\mu m)} = \frac{0.6 \times 0}{0.6 \times 0 + 0.4 \times a} \cdot 100 = 0\%$$

Ya que para el intervalo seleccionado, Δd , en la salida del hundido, no hay partículas con ese tamaño ($b=0$).

Entre 100 y 1000 micras, la probabilidad en el hundido será:

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

Ya que para el intervalo seleccionado, Δd , en la salida del rebose, no hay partículas con ese tamaño ($a=0$).



4. Curva de Partición. Concepto de Imperfección

Caso corte ideal

Entre 10 y 100 micras, la probabilidad en el hundido será:

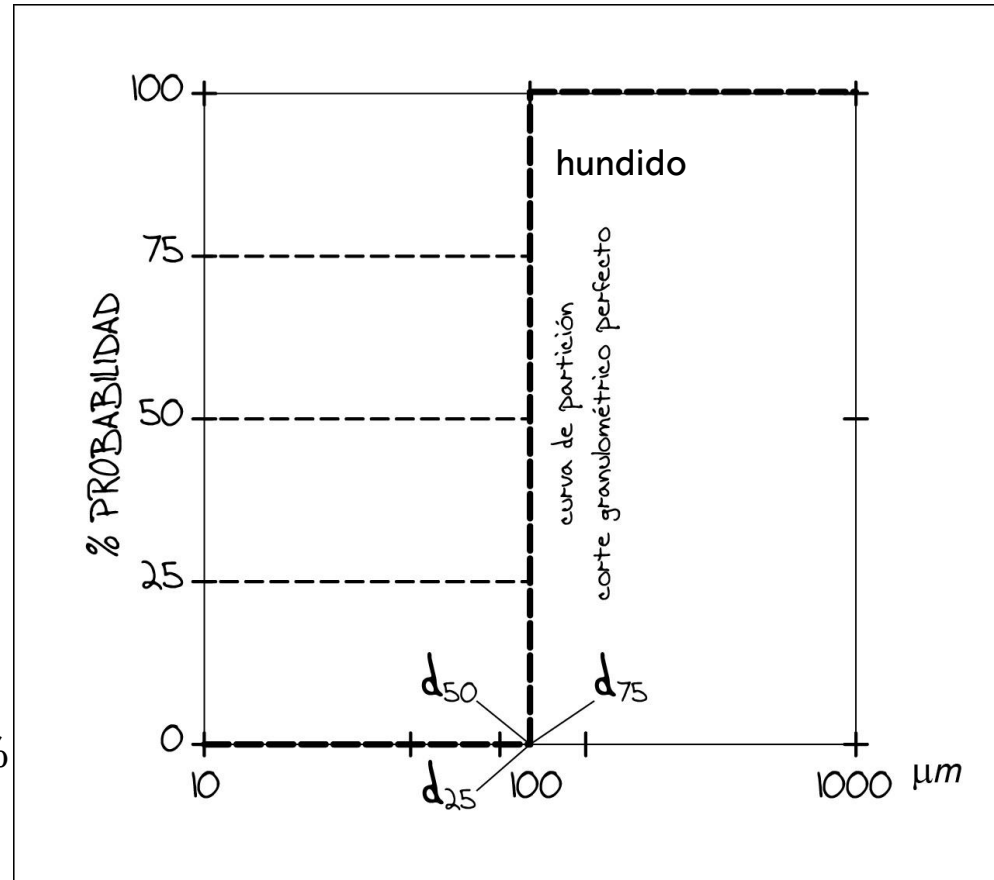
$$P_{(10-100\mu m)} = \frac{0.6 \times 0}{0.6 \times 0 + 0.4 \times a} \cdot 100 = 0\%$$

Ya que para el intervalo seleccionado, Δd , en la salida del hundido, no hay partículas con ese tamaño ($b=0$).

Entre 100 y 1000 micras, la probabilidad en el hundido será:

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

Ya que para el intervalo seleccionado, Δd , en la salida del rebose, no hay partículas con ese tamaño ($a=0$).



Curva de partición o de Tromp



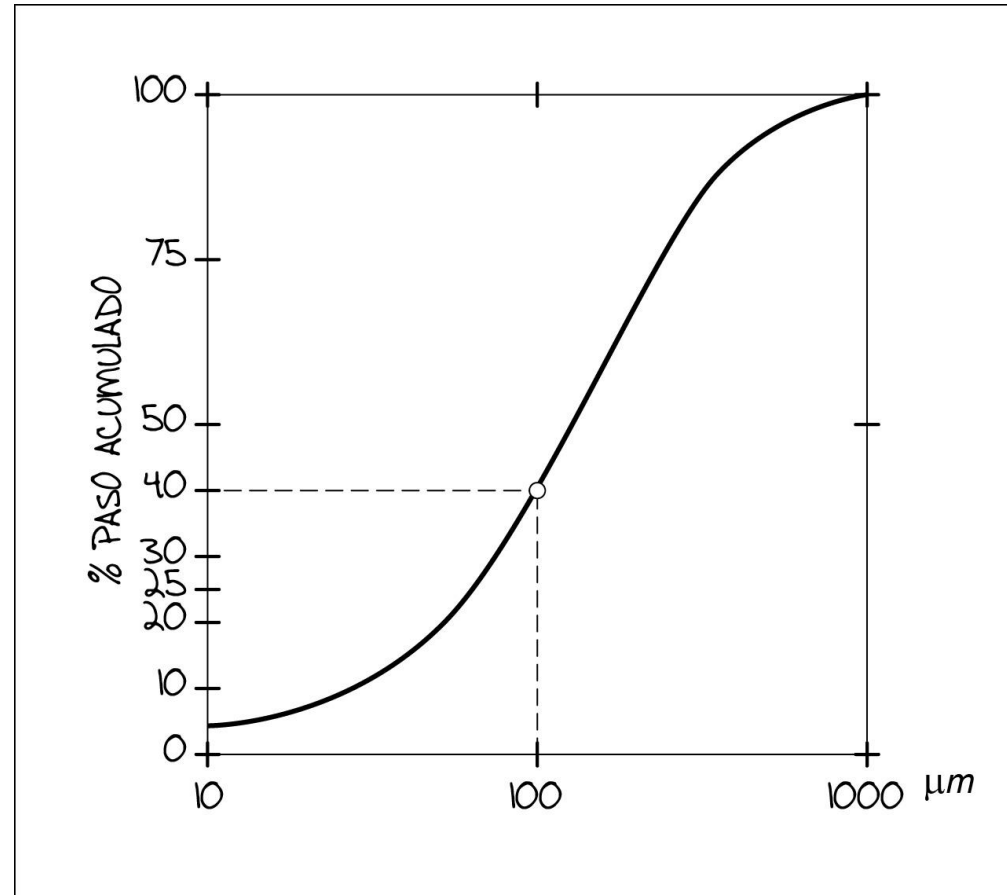
4. Curva de Partición. Concepto de Imperfección

Caso corte no perfecto

Se supone un clasificador no ideal clasificando con un corte de 100 micras.

La figura representa la distribución granulométrica para el ejemplo (alimentación).

1. Los tamaños superiores a 100 micras será un 60%.
2. Los tamaños inferiores a 100 micras será un 40%.



Curva granulométrica



4. Curva de Partición. Concepto de Imperfección

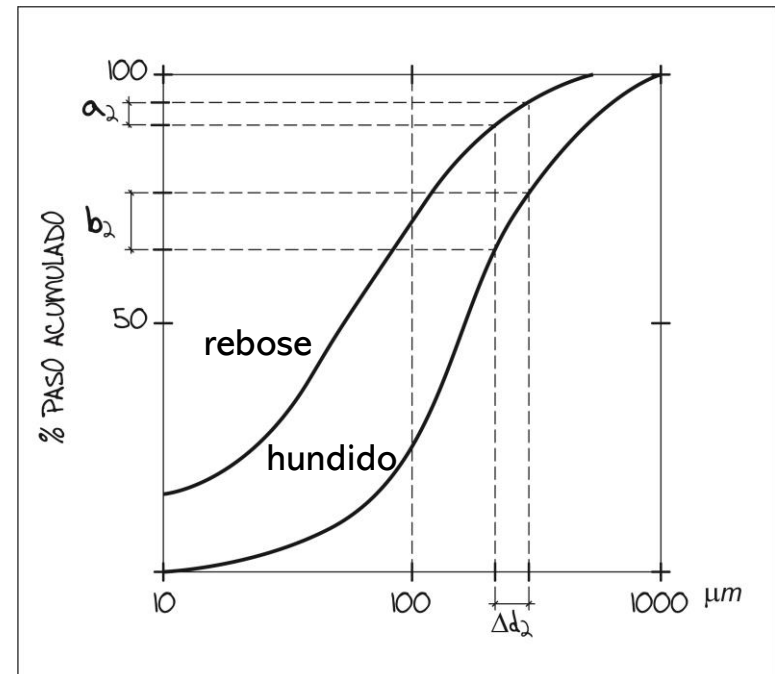
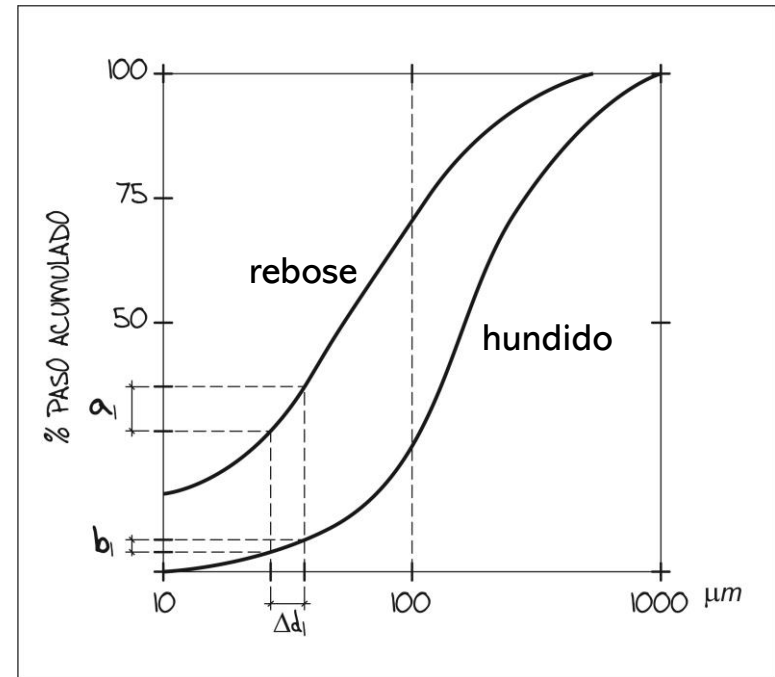
Caso corte no perfecto

Distribuciones granulométricas obtenidas en las salidas del hidrociclón (hundido y rebose).

Corte no perfecto. Hay solapamiento.

Se toma un intervalo granulométrico, Δd , cumpliéndose:

1. **Alimentación:** La cantidad en peso total será $0.4x_a + 0.6x_b$.
2. **Rebose:** La cantidad en peso obtenida será $0.4x_a$.
3. **Hundido:** La cantidad en peso obtenida será $0.6x_b$.





4. Curva de Partición. Concepto de Imperfección

Caso corte no perfecto

Entre 10 y 100 micras, la probabilidad en el hundido será:

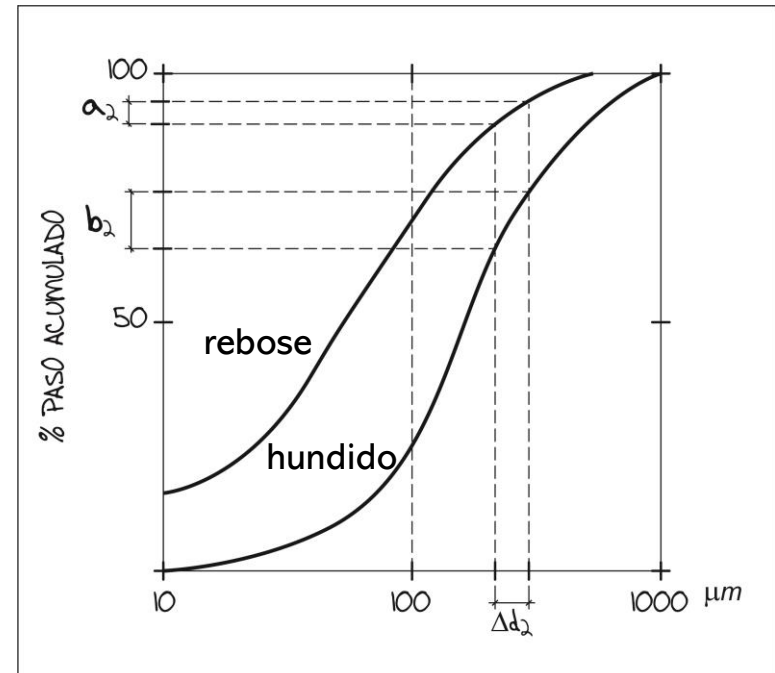
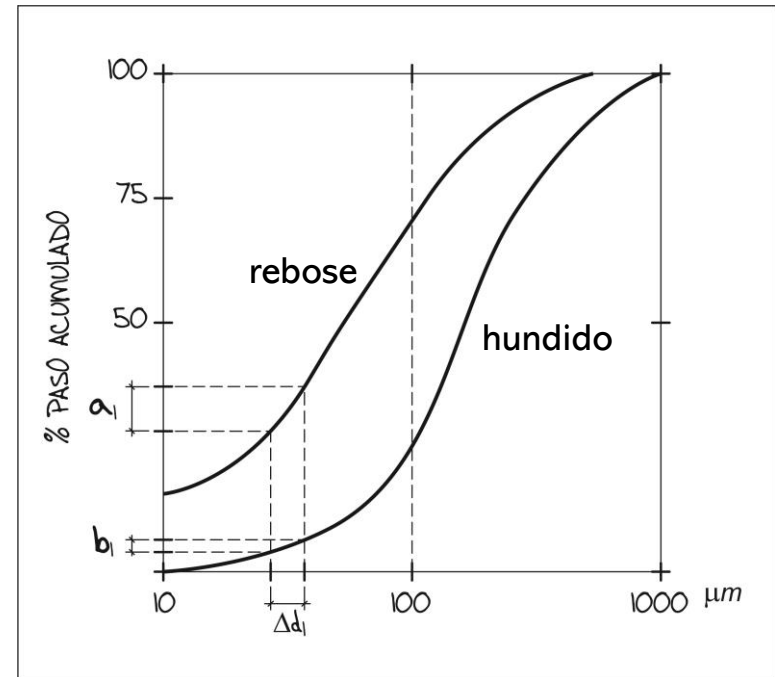
$$P_{(10-100\mu m)} = \frac{0.6 \times b_1}{0.6 \times b_1 + 0.4 \times a_1} \cdot 100$$

Ya que para el intervalo seleccionado, Δd_1 , en la salida del hundido, hay partículas con ese tamaño ($b_1 \neq 0$).

Entre 100 y 1000 micras, la probabilidad en el hundido será:

$$P_{(100-1000\mu m)} = \frac{0.6 \times b_2}{0.6 \times b_2 + 0.4 \times a_2} \cdot 100$$

Ya que para el intervalo seleccionado, Δd_2 , en la salida del rebose, hay partículas con ese tamaño ($a_2 \neq 0$).





4. Curva de Partición. Concepto de Imperfección

Caso corte no perfecto

Entre 10 y 100 micras, la probabilidad en el hundido será:

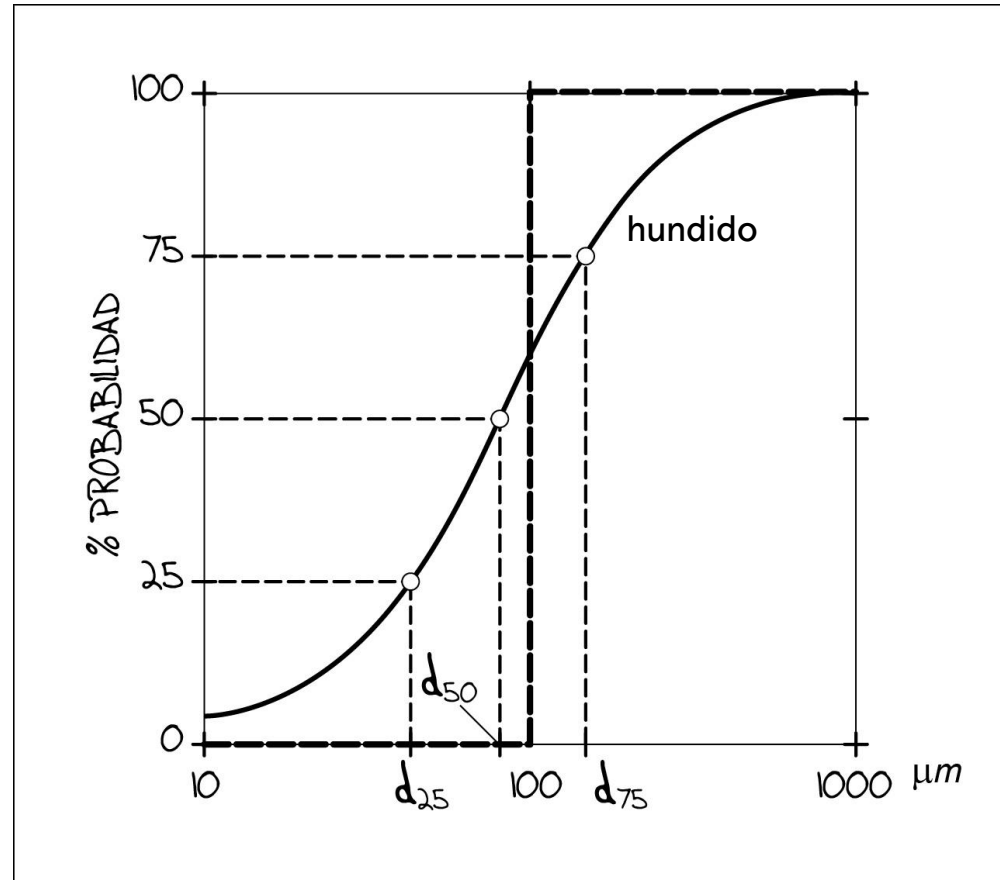
$$P_{(10-100\mu m)} = \frac{0.6 \times b_1}{0.6 \times b_1 + 0.4 \times a_1} \cdot 100$$

Ya que para el intervalo seleccionado, Δd_1 , en la salida del hundido, hay partículas con ese tamaño ($b_1 \neq 0$).

Entre 100 y 1000 micras, la probabilidad en el hundido será:

$$P_{(100-1000\mu m)} = \frac{0.6 \times b_2}{0.6 \times b_2 + 0.4 \times a_2} \cdot 100$$

Ya que para el intervalo seleccionado, Δd_2 , en la salida del rebose, hay partículas con ese tamaño ($a_2 \neq 0$).



Curva de partición o de Tromp no ideal

4. Curva de Partición. Concepto de Imperfección

Curva de partición corregida

Cuanto más vertical sea más perfecto será el corte del clasificador.

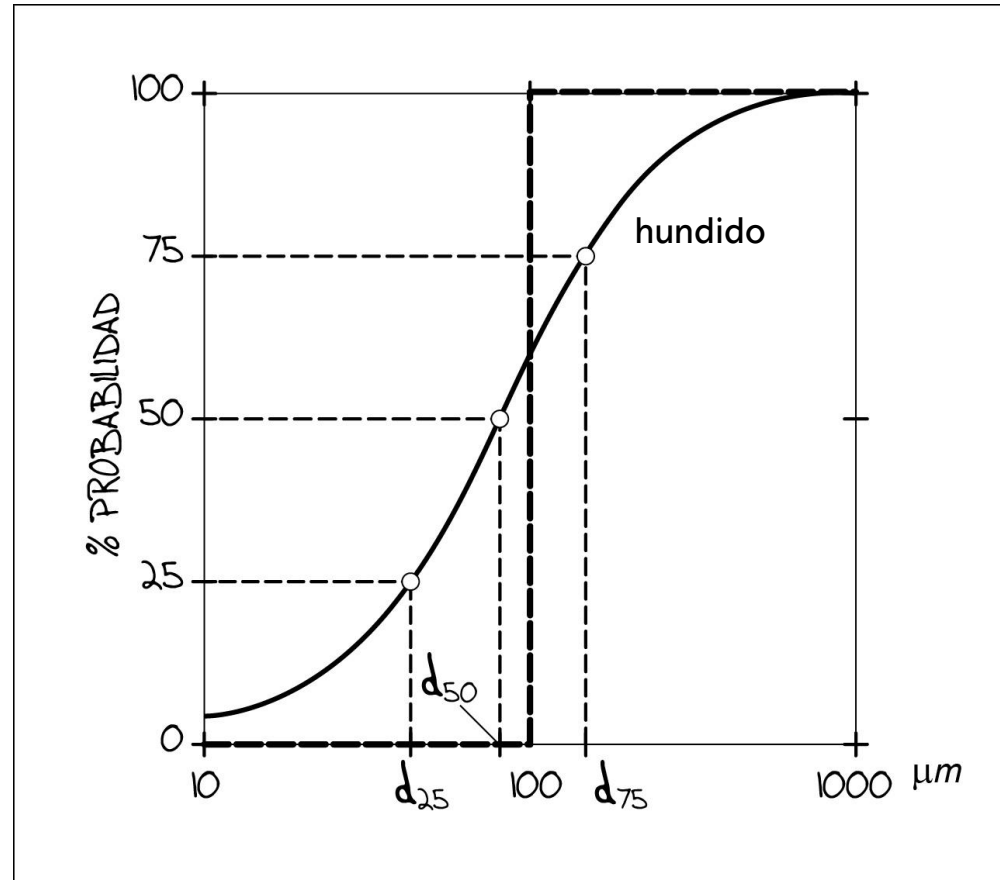
En la figura se observa que el d_{50} no coincide con el corte perfecto (100 micras).

El valor de la imperfección ya no será nulo.

El agua que se obtiene en el hundido arrastrará finos (desclasificados).

Se corrige ese efecto para obtener una curva de partición corregida.

Se establece $R\%$ el porcentaje de agua, respecto al total de entrada, que sale por el hundido.



Curva de partición o de Tromp no ideal

4. Curva de Partición. Concepto de Imperfección

Curva de partición corregida

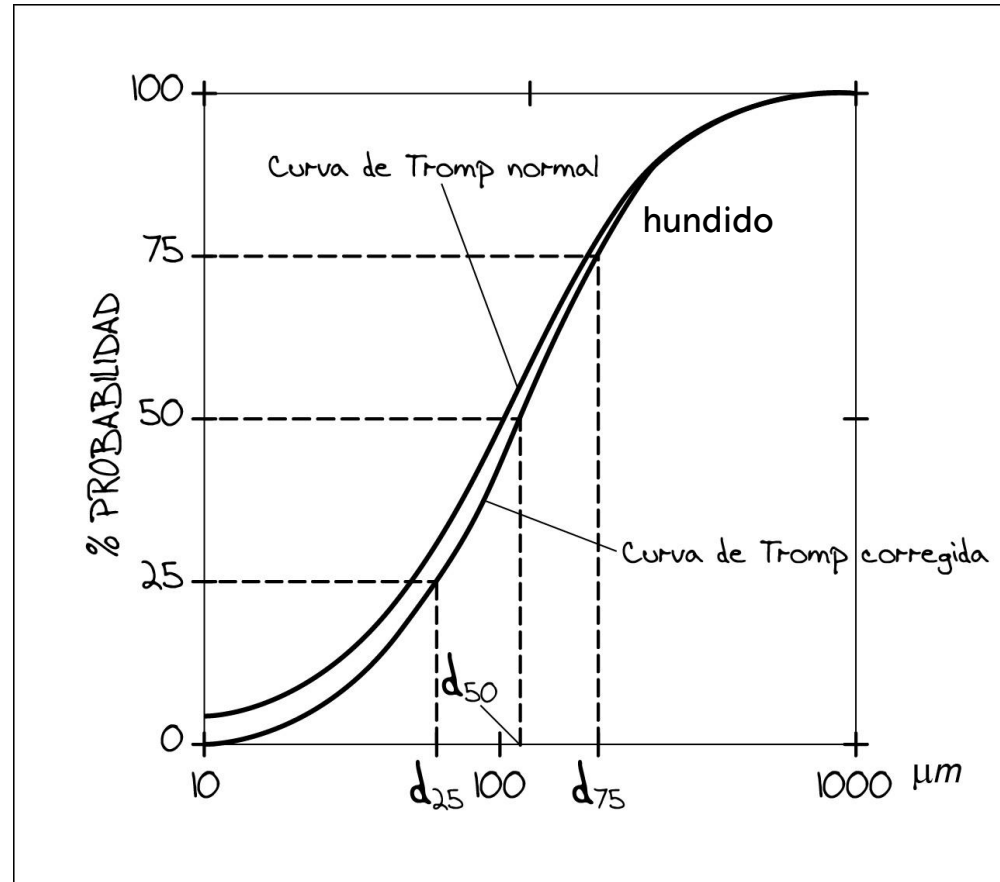
Para ello se aplica la siguiente expresión:

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

Donde:

$p(\%)$ = probabilidad de paso sin corregir para la curva del hundido (gruesos)

$R(\%)$ = porcentaje de agua en el hundido



Curva de partición corregida

4. Curva de Partición. Concepto de Imperfección

Curva de partición corregida

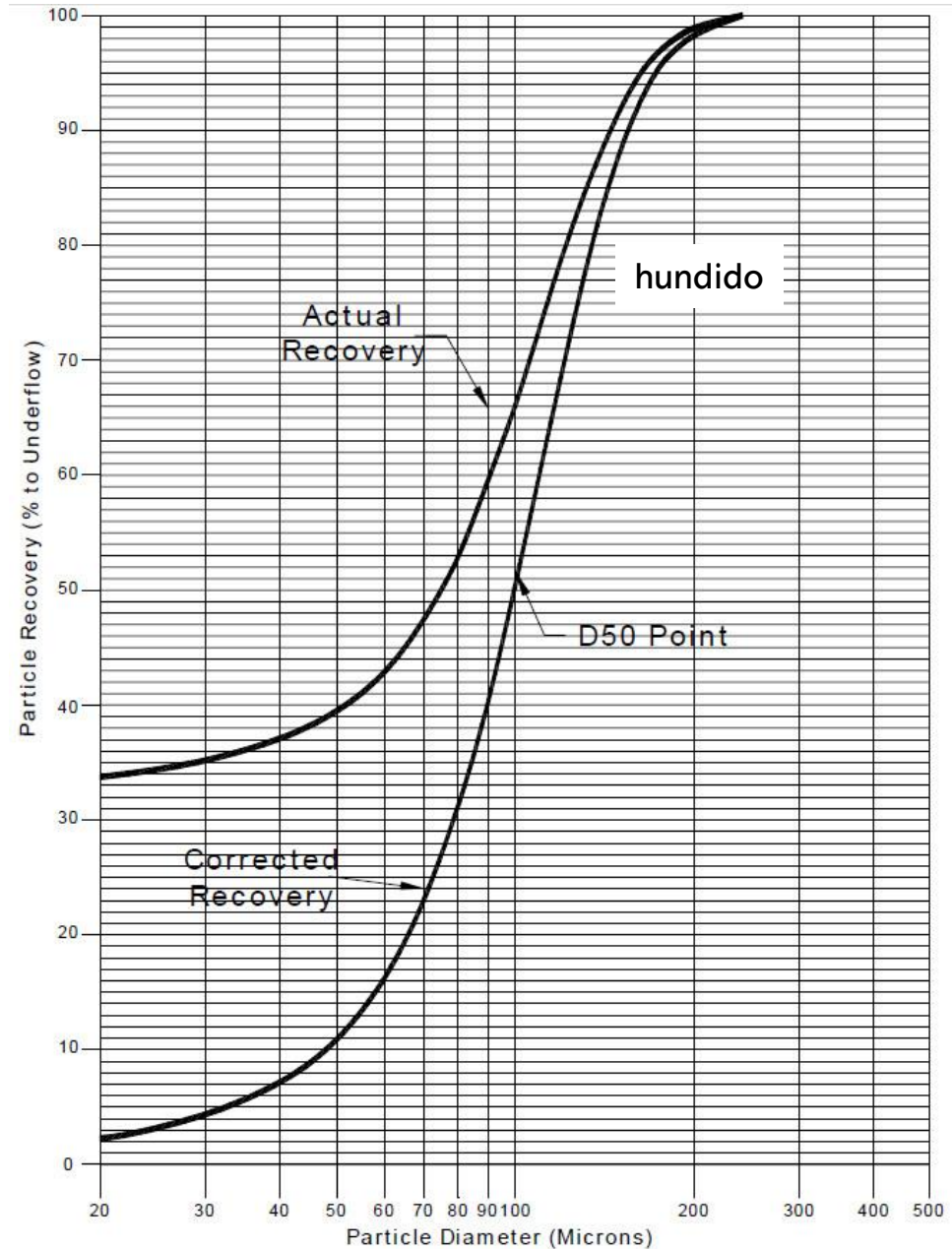
Para ello se aplica la siguiente expresión:

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

Donde:

$p(\%)$ = probabilidad de paso
sin corregir para la curva del
hundido (gruesos)

$R(\%)$ = porcentaje de agua
en el hundido



Curva de partición corregida

5. Dimensionado y Selección de un Hidrociclón

Método de Richard A. Arterburn (1976) – Krebs Engineers

Establece unas condiciones estándar de trabajo o condiciones base:

1. El fluido será agua a 20°C.
2. Los sólidos estarán constituidos por partículas esféricas de densidad 2.65 g/cm³.
3. La alimentación se caracterizará por una concentración de sólidos en volumen inferior al 1%.
4. La caída de presión será de 69 kPa (10 PSI)
5. El hidrociclón será del tipo estándar

(Cortesía: Krebs-FLSmidth)



Hidrociclón Estándar



5. Dimensionado y Selección de un Hidrociclón

Obtención del D_{50c} de aplicación

El diseño del hidrociclón se basa en obtener el tamaño de corte D_{50c} requerido o de aplicación a las condiciones reales para el rebose o salida de finos.

La tabla siguiente sirve para obtener el D_{50c} de aplicación.

% paso del rebose (<i>overflow</i>) para un tamaño determinado (\emptyset)	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% \rightarrow 1.25,

tamaño (micras) de aplicación = 149 micras

D_{50c} (aplicación) requerido = $1.25 \times 149 = 186$ micras para aplicación

5. Dimensionado y Selección de un Hidrociclón



Obtención del D_{50c} (base)

A continuación se procede a obtener el D_{50c} (base) que es el tamaño corte que proporciona un hidrociclón estándar trabajando en condiciones de base.

Obtenido el D_{50c} (base) podremos determinar el tamaño del hidrociclón y el número necesario para alcanzar los requerimientos del proceso.

Para obtenerlo es necesario calcular tres factores de corrección (C_i):

1. Factor de corrección que corrige la influencia de la variación de la concentración en volumen estándar de sólidos en la alimentación (C_1):
2. Factor de corrección que corrige una caída de presión diferente a la estándar dentro del hidrociclón (C_2):
3. Factor de corrección que corrige las variaciones de la densidad de sólidos y líquidos (C_3):

5. Dimensionado y Selección de un Hidrociclón



Obtención de C_1

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

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

Obtención de C_2

$$C_2 = 3.27 \cdot \Delta P^{-0.28}$$

ΔP = Caída de presión en kPa

Obtención de C_3

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

ρ_s, ρ_l = Densidades en gr/cm^3



5. Dimensionado y Selección de un Hidrociclón

Cálculo de D_{50c} (base)

Una vez obtenido los factores de corrección se está en disposición de calcular el D_{50c} (base):

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

Obtención del diámetro del hidrociclón ($D_{\text{ciclón}}$)

Con el valor D_{50c} (base) ya se puede obtener el diámetro del hidrociclón con la siguiente expresión:

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

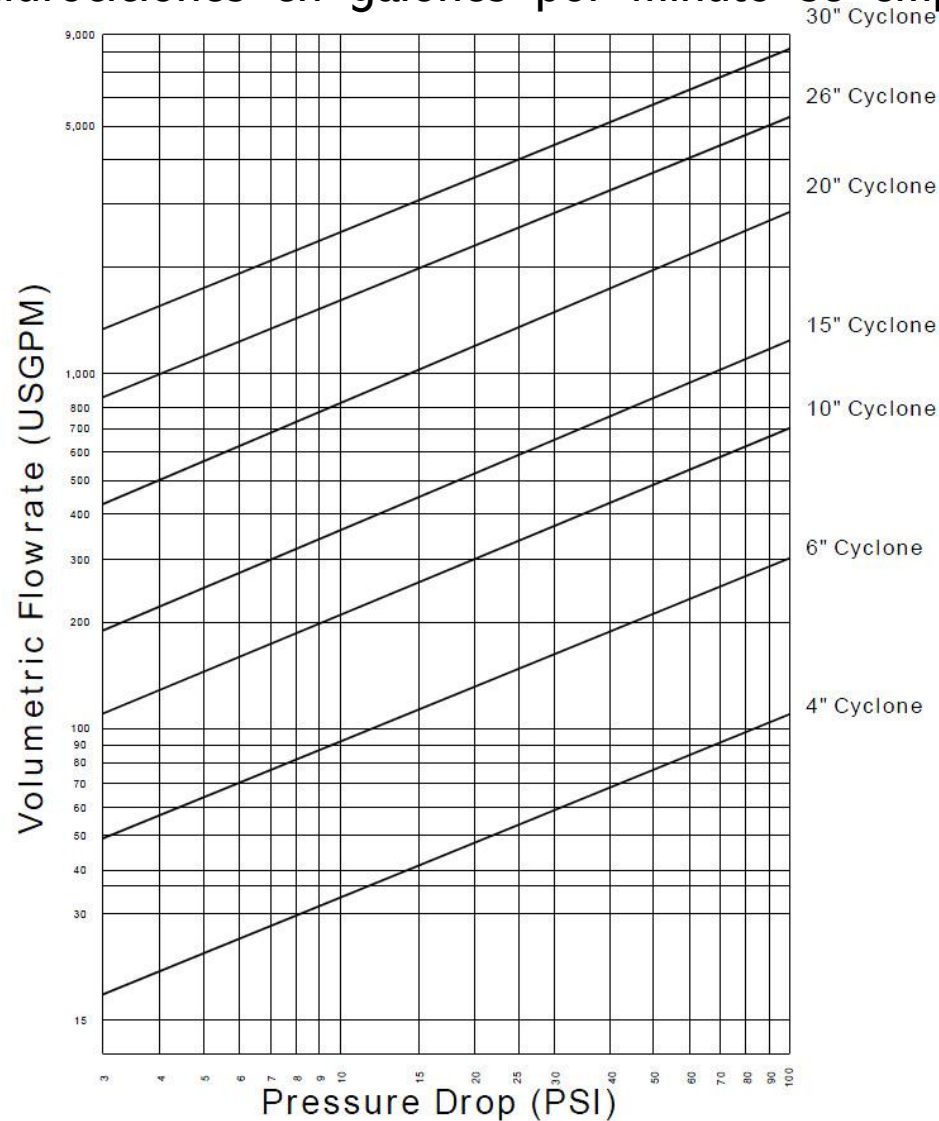
D_{50c} (base) vendrá dado en micras y el $D_{\text{ciclón}}$ en centímetros.

5. Dimensionado y Selección de un Hidrociclón



Cálculo del número de hidrociclones

Con el valor del diámetro del hidrociclón en pulgadas, el caudal necesario a tratar por los hidrociclones en galones por minuto se empleará el siguiente ábaco:




Referencias para consulta:



euitc

Ejercicios Resueltos de Tecnología Mineralúrgica




Pedro Martínez Pagán
Dr. Ingeniero de Minas

Universidad Politécnica de Cartagena

rai
ediciones

McGraw-Hill **HANDBOOKS**

SLURRY SYSTEMS HANDBOOK



- Examines hydraulics of slurry flows
- Details equipment used in making and processing slurries
- Covers ASME codes



BAHA ABULNAGA

Universidad Politécnica de Cartagena **UPCT** EUROPEAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY "Think humans first"

OCW UPCT

TECNOLOGÍA MINERALÚRGICA, 2ª ed. (2020)


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



SEVENTH EDITION

WILLS' Mineral Processing Technology

AN INTRODUCTION TO THE PRACTICAL ASPECTS OF ORE TREATMENT AND MINERAL RECOVERY



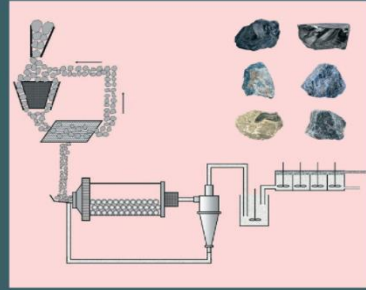
B.A. Wills • T.J. Napier-Munn

and staff of the **JKMRC** and staff of the **THE UNIVERSITY OF QUEENSLAND**


BH

Minerals and Coal Process Calculations

D.V. Subba Rao



CRC Press
Taylor & Francis Group
A BAKER BOOK



SME MINERAL PROCESSING & EXTRACTIVE METALLURGY HANDBOOK

VOLUME ONE & TWO

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

SME