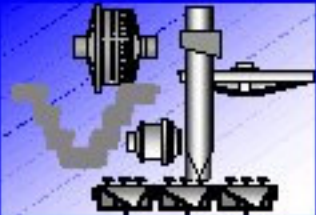




# *Introducción*



*Análisis de Sistemas Particulados*

# Antecedentes

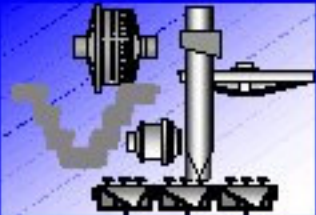
---

☺ El mineral de una operación minera consiste de diversas especies minerales, algunas de ellas de valor comercial (generalmente las menos abundantes) y otras de menor o sin valor relativo (ganga).

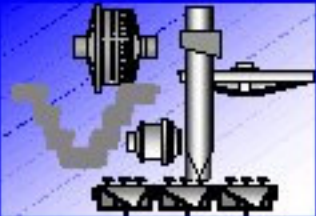
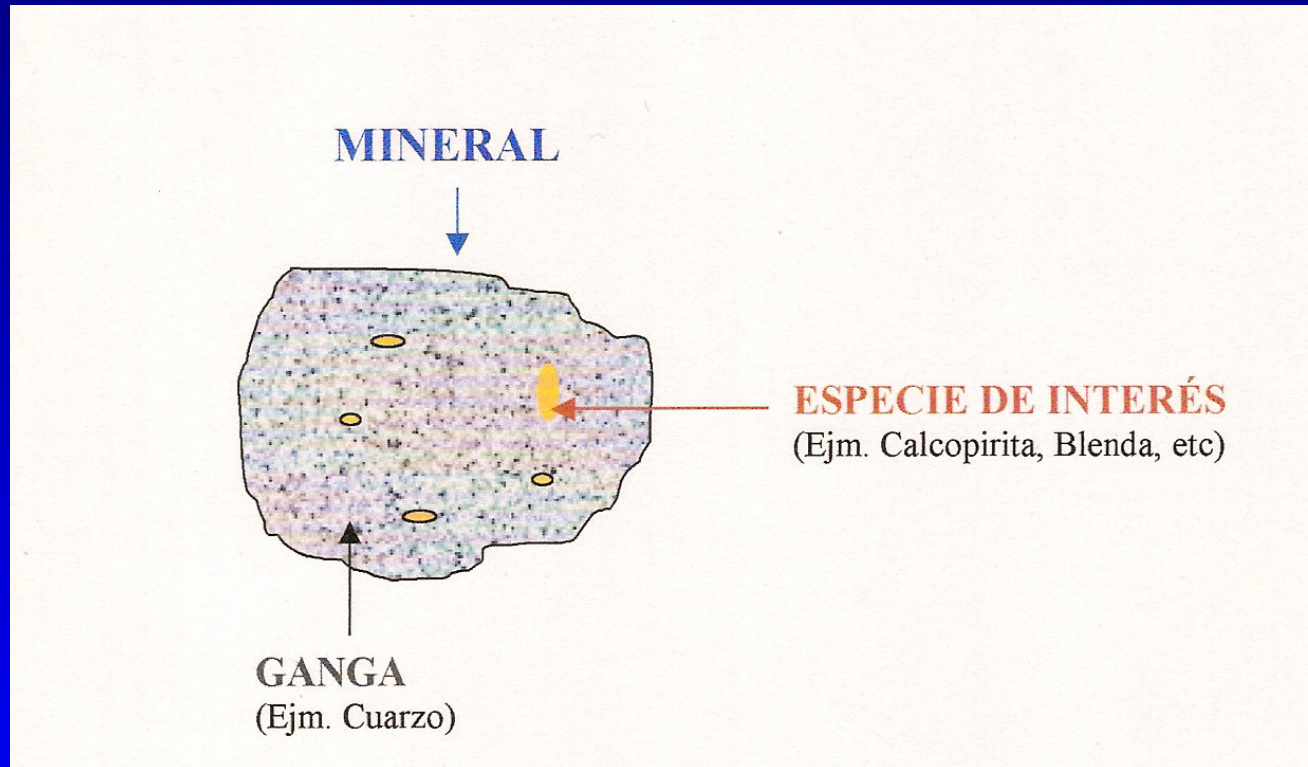
☺ Estos minerales pueden ser clasificados como metálicos o industriales, según su uso. Ciertos minerales pueden explotarse para más de un propósito y por lo tanto ser metálicos o industriales según el caso ejm. el rutilo.

☺ El procesamiento de minerales sigue a la explotación minera con el objetivo de: preparar el mineral para la extracción del metal valioso (menas metálicas) o entregar un producto final (minerales industriales y carbón).

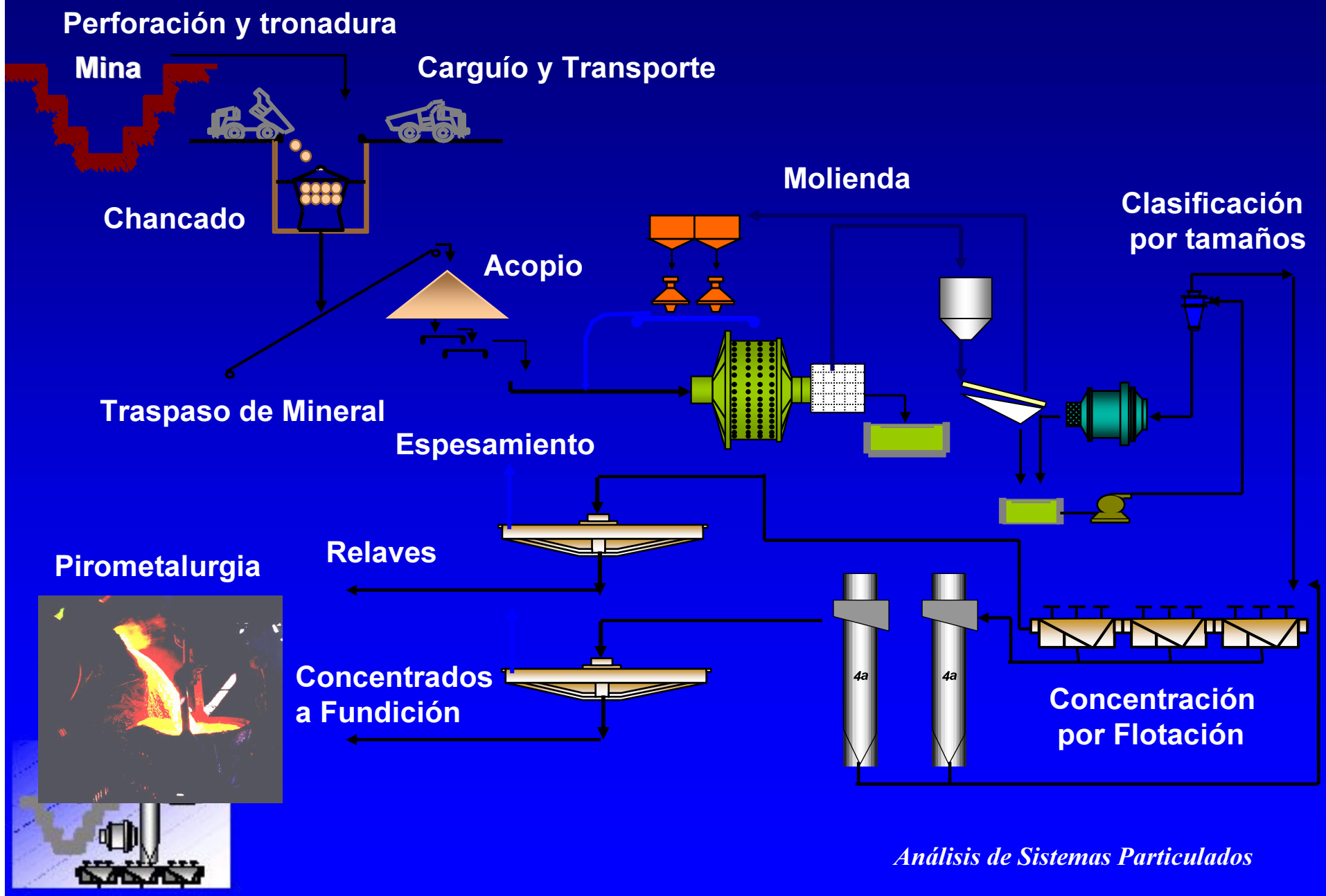
☺ Tras el procesamiento, el producto adquiere un valor de mercado y puede transarse. Por lo tanto el procesamiento de minerales genera el primer producto comercializable o con precio y mercado de referencia.



# Antecedentes

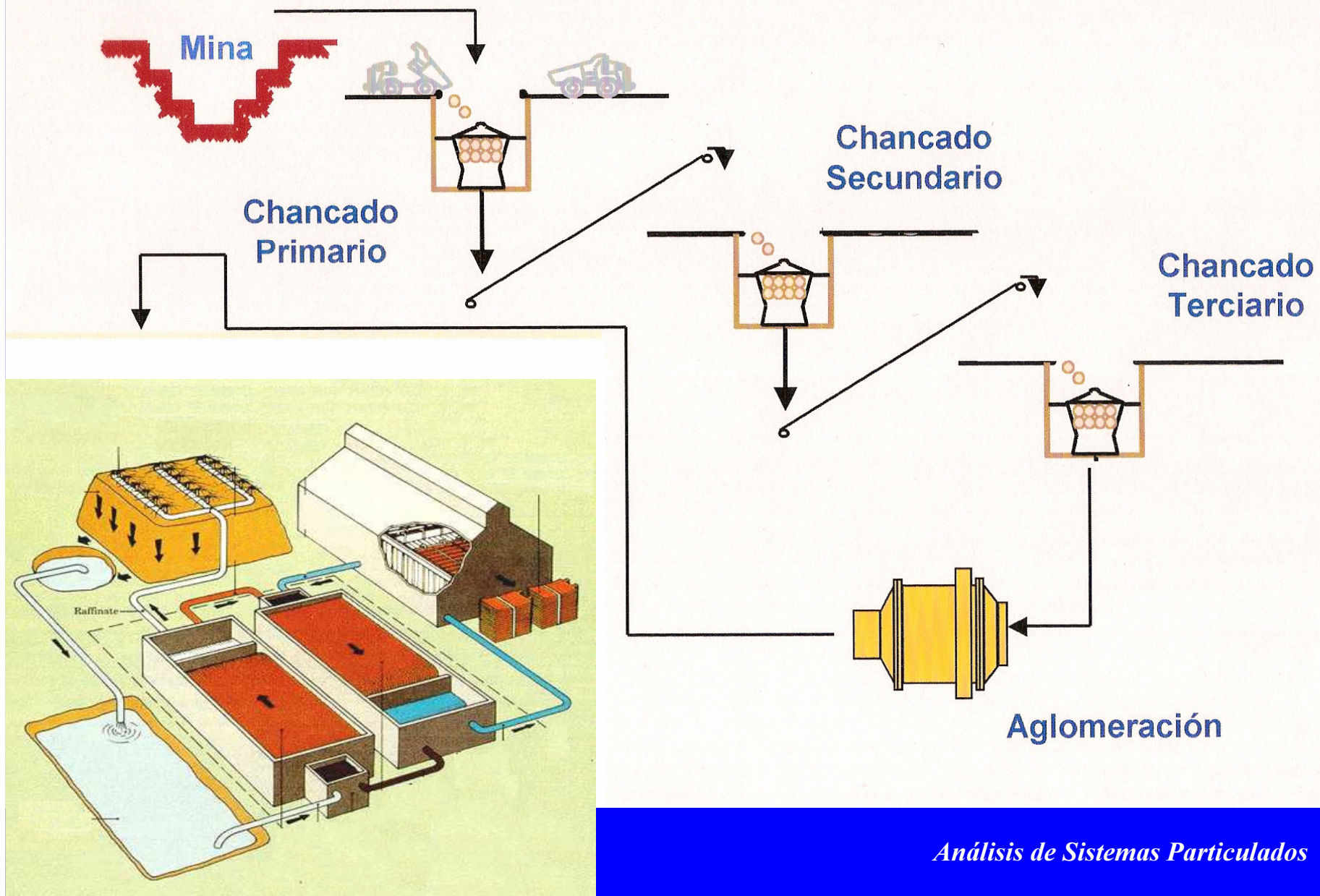


# Sulfuros de Cobre

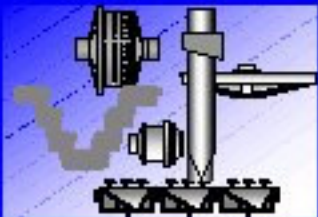
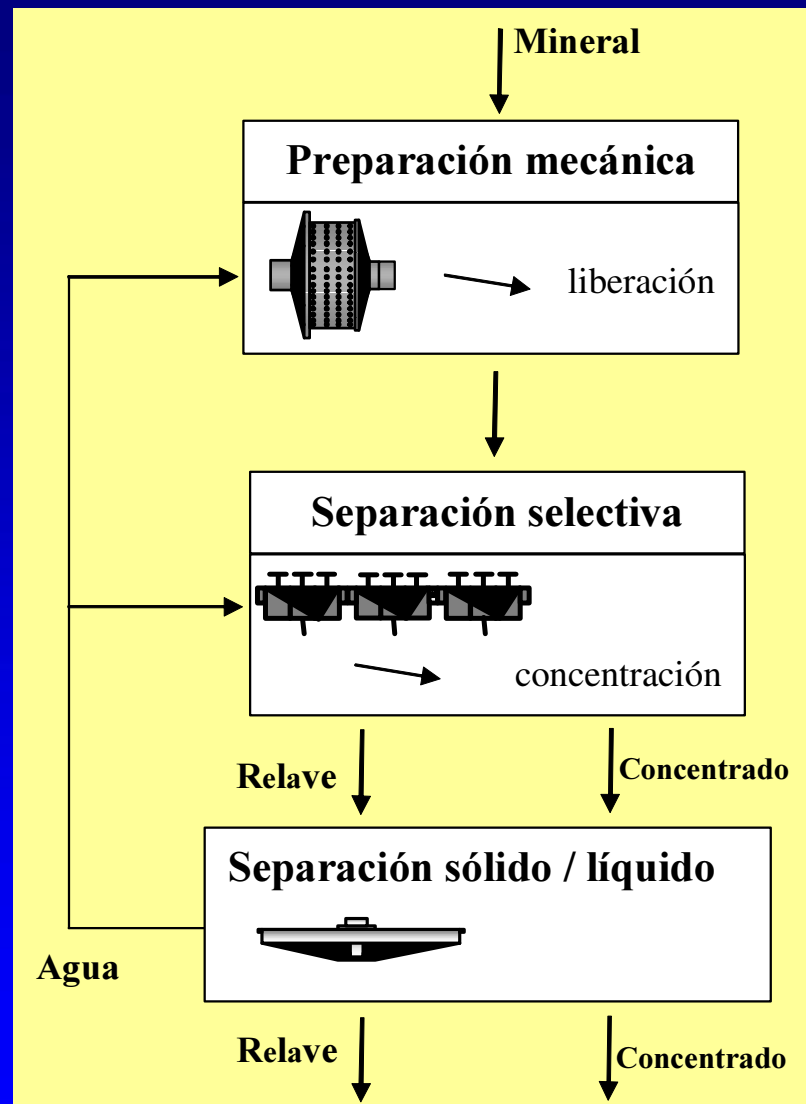




# Óxidos de Cobre



# *Etapas*

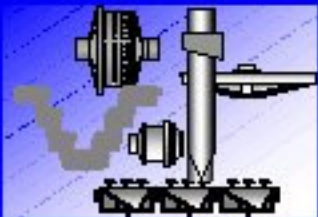
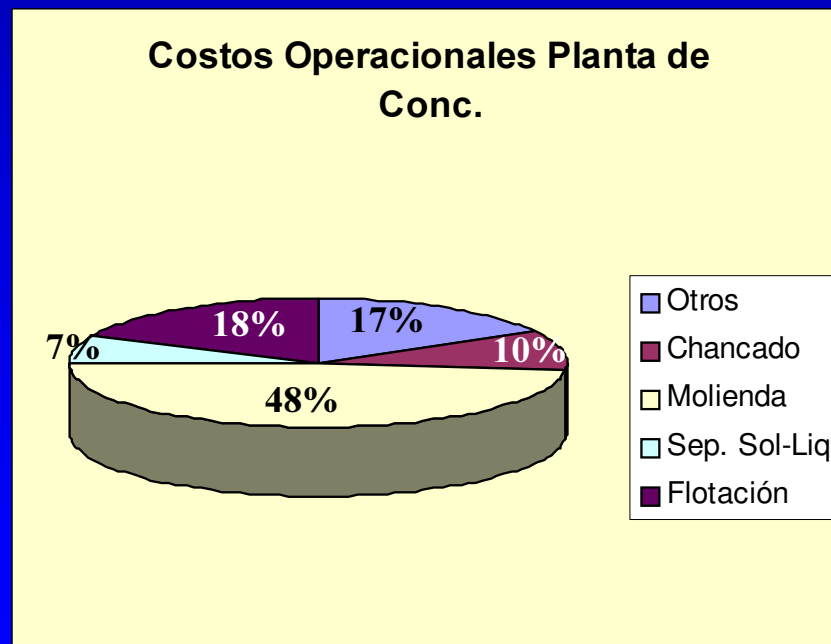


# Antecedentes

## *Importancia relativa del Tratamiento de Sistemas Particulados*

### ➤ *Costos*

Importancia de los costos involucrados en cada etapa del proceso, ejemplo los costos operacionales de una planta concentradora se distribuyen de la siguiente forma:



# ***Antecedentes***

## *Importancia relativa del Tratamiento de Sistemas Particulados*

### ➤ *Factibilidad Técnica*

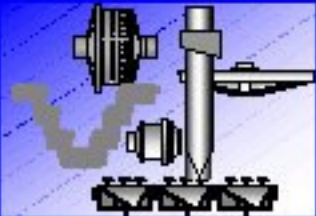
- Unidades requeridas en el proceso
- ¿Es posible y cómo?

### ➤ *Pérdidas Metalúrgicas*

- Traspasos de correas, falta de liberación, etc.
- Importancia del control adecuado de pérdidas.

### ➤ *Evaluación del Recurso*

Estudio previo del recurso a explotar. Ejm.: muestreo para cuantificar el recurso, muestreo para determinación de la ley del mineral





# Principales minerales en Chile en concentración

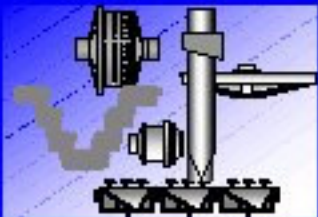
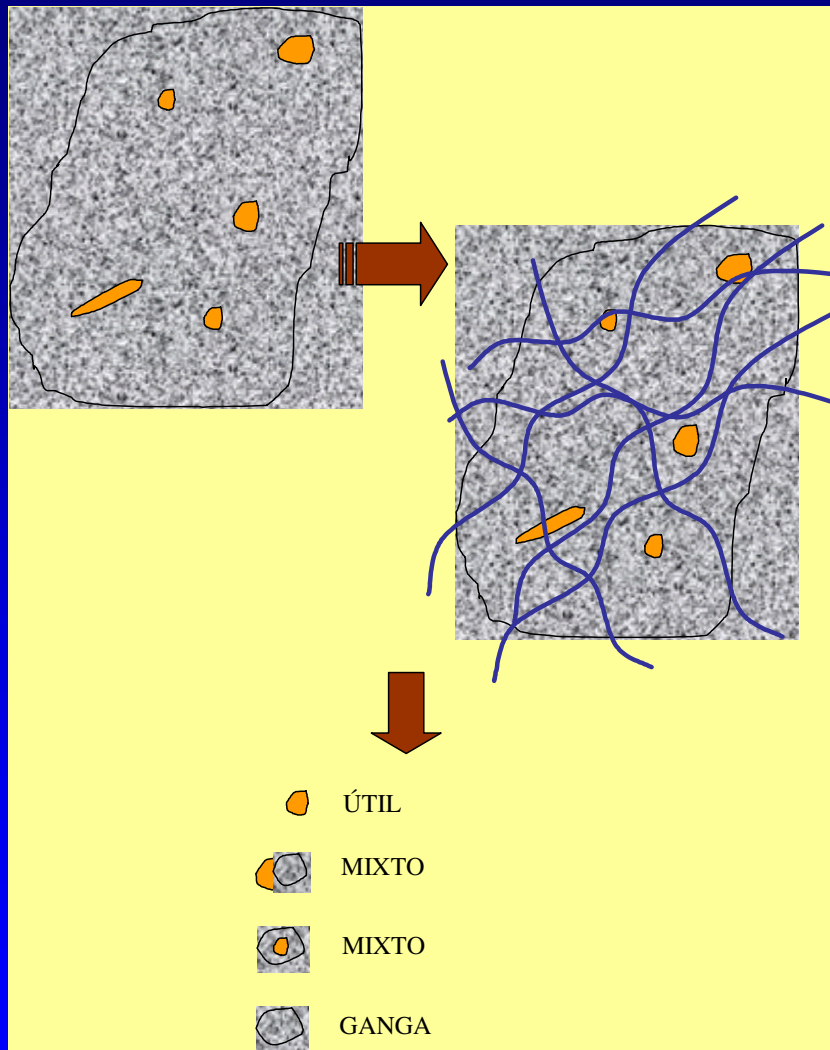
Mineral	Fórmula	Metal [%]	Gravedad Específica	Respuesta Magnética / electroestática
Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$	34,6% Cu	4,1 – 4,3	NM / C
Calcosina	$\text{Cu}_2\text{S}$	79,8% Cu	5,5 – 5,8	NM / C
Bornita	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	63,3% Cu	5,0 – 5,2	NM / C
Covelina	$\text{CuS}$	66,5% Cu	4,6	NM / C
Enargita	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	48,4% Cu	4,4	P / C
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	72,4% Fe	5,2	F / C
Molibdenita	$\text{MoS}_2$	60,0% Mo	4,7 – 5,0	NM / C
Blenda	$\text{ZnS}$	67,1% Zn	3,9 – 4,1	P / C
Galena	$\text{PbS}$	86,6% Pb	7,4 – 7,6	NM / C
Pirita	$\text{FeS}_2$	46,7% Fe	4,9 – 5,2	NM / C
Cuarzo	$\text{SiO}_2$	46,8% Si	2,7	NM / NC



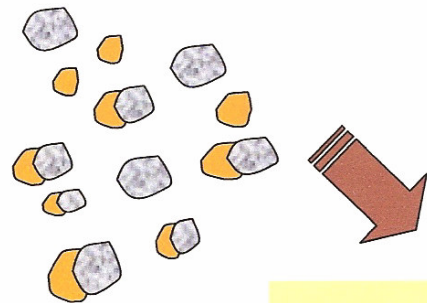
**En el caso de procesos hidrometalúrgicos encontramos principalmente la cuprita  $\text{Cu}_2\text{O}$**

*Análisis de Sistemas Particulados*

# *Liberación*



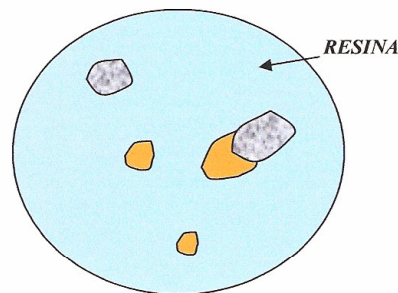
# Grado de Liberación, $G_L$



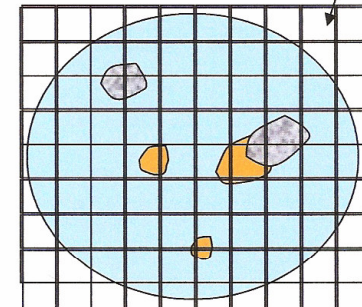
$$G_{LPi} = \frac{\text{Peso Partículas Liberadas Especie } i}{\text{Peso Total Especie } i}$$

PESO TOTAL DE LO NARANJA

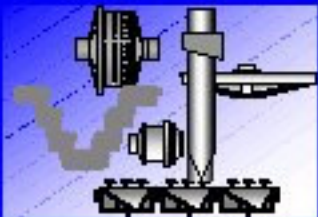
BRIQUETA PARA MICROSCOPIA



RETÍCULA

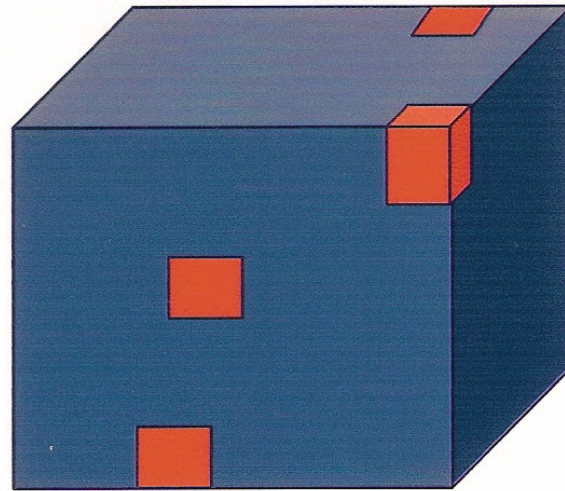


$$G_{Lai} = \frac{\text{Area Partículas Liberadas Especie } i}{\text{Area Total Especie } i}$$

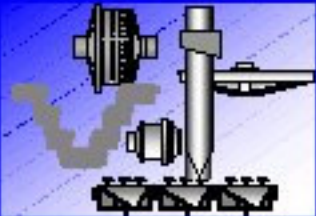


*Análisis de Sistemas Particulados*

## Grado de Liberación, $G_L$



$$G_{LSi} = \frac{\Sigma \text{ [Red Square] } \text{ Superficie Liberada } i}{\text{ Superficie Total Roca }}$$



# *Grado de Liberación, $G_L$*

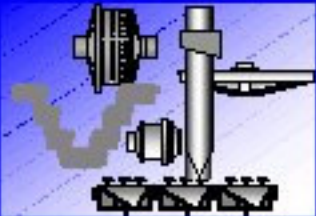
---

## ❖ *Tamaño de Liberación*

Corresponde al tamaño al cual las partículas de la especie de interés están totalmente liberadas de la ganga.

Habitualmente no se alcanza el 100% de liberación por razones técnico – económicas, por lo cual es común decir por ejemplo:

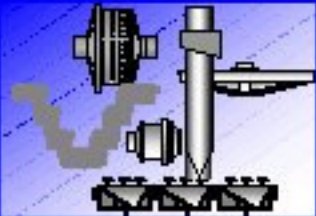
“un 80% del mineral está liberado bajo 150 micrones”, en este caso los 150 micrones corresponden al tamaño de referencia que depende del proceso en estudio.





# *Caracterización:*

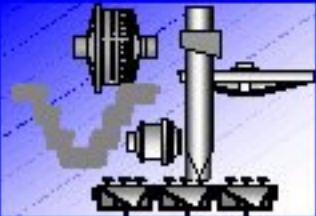
- **Partícula**
- **Material Particulado**
- **Pulpas de Mineral**



## *Actividad N° 1:*

*Defina y caracterice a:*

- **Partícula**
- **Material Particulado**
- **Sistemas Particulados**



# Material Particulado

**Mineral**

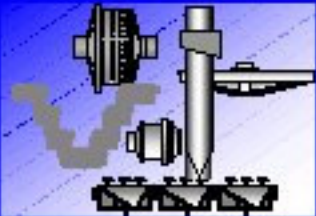


**Etapas de Reducción  
de Tamaño**



**Partículas**

**Material  
Particulado**



*Análisis de Sistemas Particulados*

# Material Particulado



→ **Tamaño**

→ **Forma**

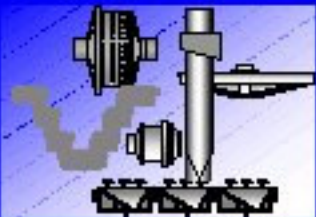
→ **Densidad**

→ **Superficie**

**Distribución de tamaños** ←

**Superficie Específica** ←

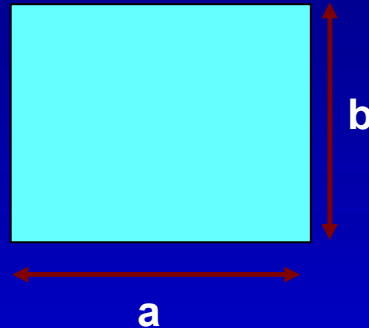
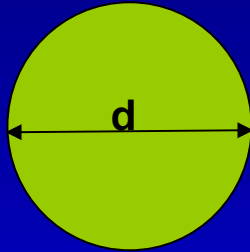
**Densidad** ←



*Análisis de Sistemas Particulados*

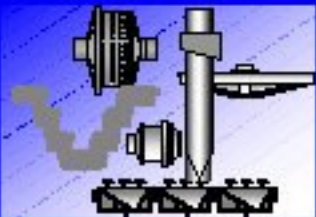
# Partícula

## Tamaño:



El tamaño de una partícula irregular es difícil o imposible de determinar en forma exacta. Los términos LONGITUD, ANCHO, ESPESOR y DIÁMETRO; tienen poco significado, ya que se presentan muchos valores distintos.

En el caso de las partículas irregulares, que constituyen la generalidad, se utiliza el concepto de: **“DIÁMETRO NOMINAL O EQUIVALENTE”**



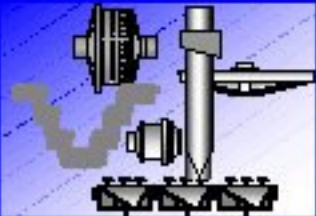


# Partícula

## *Diámetro Equivalente:*

Diámetro de una esfera que se comporta de la misma forma que una determinada partícula, cuando es sometida a una operación específica. Se asigna dependiendo del método de medición aplicado, dentro de los diámetros más utilizados están:

- a) Diámetro de Stokes: medido por técnicas de sedimentación ( $d_{st}$ )
- b) Diámetro del Área Proyectada: medido por microscopía ( $d_A$ ), análisis de imágenes.
- c) Diámetro de la Malla: medido por tamizaje ( $d_M$ )



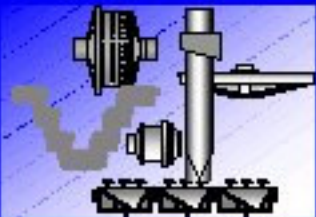
## Partícula

*Diámetro de Stokes* ( $d_{st}$ ):

$$d_{st} = \left[ \frac{18 \mu}{\Delta \rho g} v_s \right]^{1/2}$$

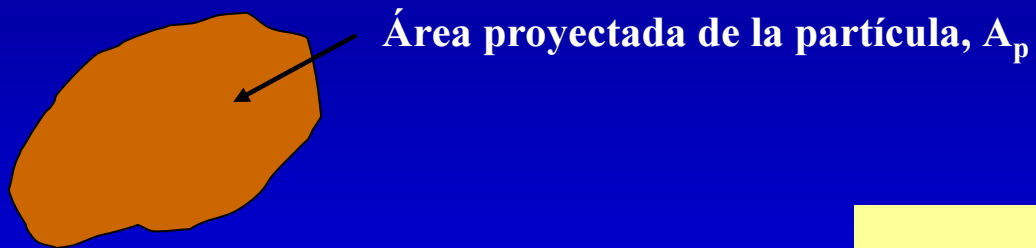
Donde:

- $\mu$  = Viscosidad (dinámica) del fluido [g/(cm s)]
- $\Delta \rho$  = Diferencia entre la densidad del sólido y la del líquido [g/cm<sup>3</sup>]
- $v_s$  = Velocidad terminal de sedimentación de la partícula [cm/s]
- $g$  = Aceleración de gravedad [cm/s<sup>2</sup>]

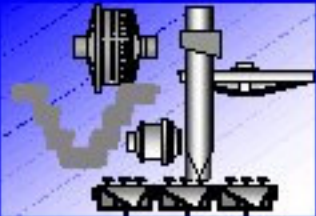
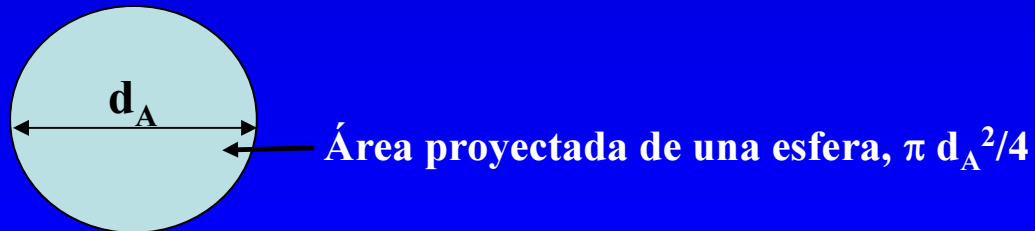


## Partícula

*Diámetro del Área Proyectada ( $d_A$ ):*

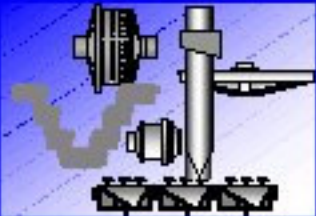
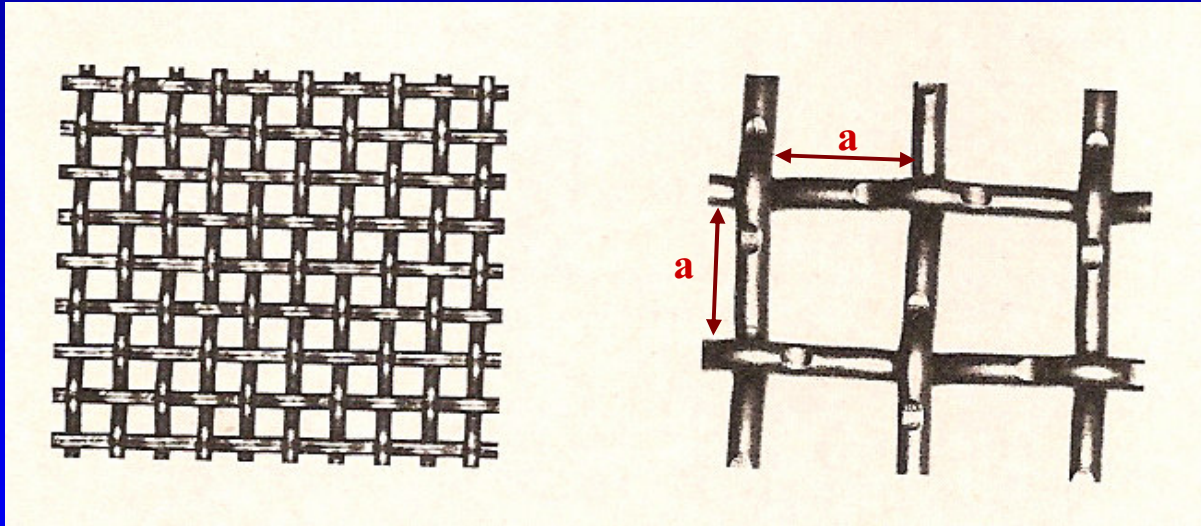


$$d_A = \sqrt{\frac{4 A_p}{\pi}}$$



# Partícula

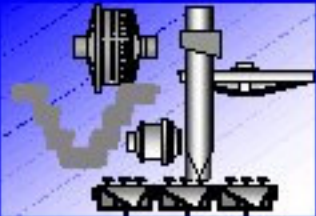
*Diámetro de la Malla ( $d_M$ ):*



# Partícula

*Dentro de los Diámetros más usados están:*

- Diámetro de la Superficie,  $d_S = (S_P/\pi)^{1/2}$
- Diámetro del Volumen,  $d_V = (6 V_P/\pi)^{1/3}$
- Diámetro de Stokes ( $d_{St}$ )
- Diámetro de la Malla ( $d_M$ )
- Diámetro del Área Proyectada ( $d_A$ )
- Diámetro de Ferret ( $d_{ft}$ ): diámetro que resulta de trazar las tangentes a la partícula perpendiculares a la dirección de barrido, cuando esta se encuentra en una posición de máxima estabilidad.





## *Partícula*

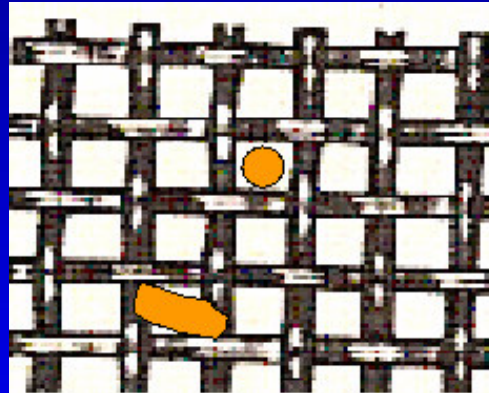
¿Qué características de estos minerales llaman la atención?



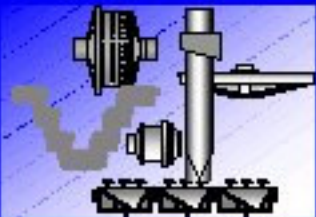
# Partícula

## Forma:

La forma de las partículas es importante en la mayoría de los procesos. Por ejemplo, en los procesos de clasificación, flotación, separación sólido – líquido, etc.; una partícula esférica no se comporta igual que una partícula laminar.



La forma de las partículas se define con diversos indicadores, basados en una o dos dimensiones características de la partícula. Los más utilizados son: el **factor de forma de superficie**  $\alpha_s$ , el **factor de forma de volumen**  $\alpha_v$  y la **esfericidad**  $\psi$ .

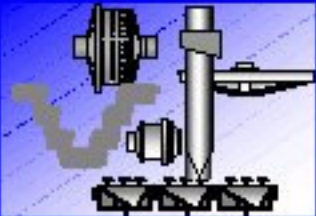


## Partícula

Los factor de forma de: superficie  $\alpha_s$ , de volumen  $\alpha_v$  y la esfericidad  $\psi$  son factibles de definir ya que, en partículas irregulares, las razones:

$$\frac{S_P}{d_P^2} \quad y \quad \frac{V_P}{d_P^3}$$

son constantes.



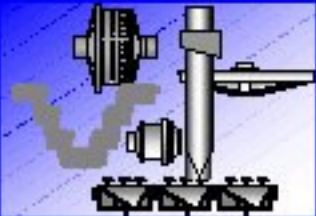
# Partícula

Las partículas son generalmente de forma irregular, para determinar su forma se utiliza la apreciación visual y los factores de forma:

## *Apreciación Visual*

Existen términos que permiten describir la forma de una partícula, por ejemplo:

- ❖ *Acicular*: forma de aguja
- ❖ *Angular*: forma puntiaguda a forma burdamente poliédrica.
- ❖ *Cristalina*: forma geométrica libremente desarrollada en un medio fluido.
- ❖ *Dendrítica*: ramificaciones en forma cristalina.
- ❖ *Fibroso*: regular o irregularmente filamentado.
- ❖ *Esférica*: forma globular



# Partícula

## *Factores de Forma*

El factor de forma depende del diámetro nominal usado para medir la partícula. Para los factores de forma de superficie y de volumen se tiene:

**Factor de Forma de Superficie**  $\alpha_{sn}$  :

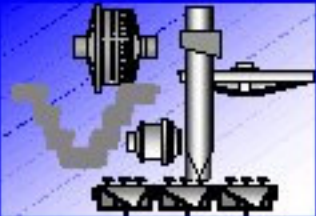
$$\alpha_{sn} = \frac{S_P}{d_n^2}$$

donde:

$S_p$  = Área superficial de una partícula irregular

$d_n$  = Diámetro nominal de una partícula irregular

Ejm.: Para una esfera, cuyo diámetro nominal sea el diámetro del área proyectada el valor de  $\alpha_{sn}$  es  $\pi$ .





# Partícula

Factor de Forma de Volumen  $\alpha_{vn}$  :

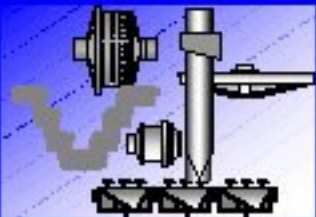
$$\alpha_{vn} = \frac{V_P}{d_n^3}$$

donde:

$V_p$  = Volumen de una partícula irregular

$d_n$  = Diámetro nominal de una partícula irregular.

Ejm.: Para una esfera, cuyo diámetro nominal sea el diámetro del área proyectada el valor de  $\alpha_{vn}$  es  $\pi/6$ .



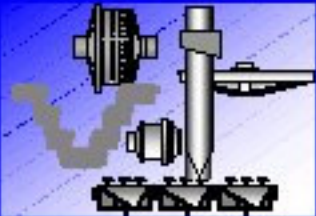
# Partícula

## Esfericidad $\psi$ :

El concepto de  $\psi$  corresponde a la razón entre el área superficial de una esfera ( $S_e$ ) y el de una partícula ( $S_p$ ) ambas de igual volumen ( $V_e = V_p$ ). Su expresión es la siguiente:

$$\psi = \frac{S_e}{S_p} = 4,84 \frac{(\alpha_{vA})^{2/3}}{\alpha_{sA}}$$

Ejm.: Para una esfera, cuyo diámetro nominal sea el diámetro del área proyectada el valor de  $\psi$  es 1.

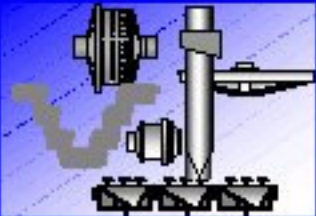


# Partícula

## Razón de Superficie Específica $R_s$ :

Corresponde a la razón entre la superficie específica de la partícula  $S_o$ , (área/unidad de masa) y la superficie específica de una esfera, donde  $d_M$  corresponde al diámetro de la malla.

$$R_s = \frac{S_o}{\frac{6}{\rho d_M}}$$



# Partícula

## *Determinación de los Factores de forma $\alpha_{sn}$ y $\alpha_{vn}$*

### a) Experimentalmente:

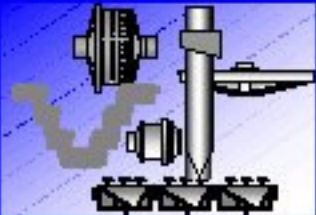
#### Factor de Forma de Volumen $\alpha_{vn}$

Se puede determinar para tamaños sobre 150  $\mu\text{m}$ , por medición de número, tamaño medio, masa y densidad de una fracción de nuestra particulada, la cual presenta una distribución de tamaños cerrada.

$$\alpha_{vn} = \frac{M}{\rho N d_n^3}$$

donde:

M = masa de las partículas  
 $\rho$  = densidad del material  
N = número de partículas.



# Partícula

## Factor de Forma de Superficie $\alpha_{sn}$

Es muy difícil cuantificar el área superficial en partículas pequeñas.  $\alpha_{sn}$  se puede obtener en forma aproximada por analogía geométrica con mediciones realizadas para partículas gruesas.

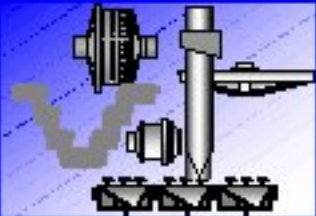
### b) Método de Heywood:

Para contar con valores más precisos de  $\alpha_{sn}$  y  $\alpha_{vn}$ , se recurre a este método. Según Heywood las partículas tienen dos características que las distinguen:

#### b.1) Proporción relativa LARGO – ANCHO - ESPESOR

*Razón de Elongación:*

$$R_E = \frac{\text{Largo de la partícula}}{\text{Ancho de la partícula}}$$



# Partícula

*Razón de Aplanamiento:*

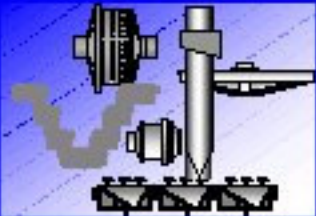
$$R_F = \frac{\text{Ancho de la partícula}}{\text{Espesor de la partícula}}$$

## b.2) Forma Geométrica

Las expresiones encontradas por Heywood son:

Factor de Forma de Volumen  $\alpha_{vA}$

$$\alpha_{vA} = \frac{\alpha_{vAe}}{R_F \sqrt{R_E}}$$



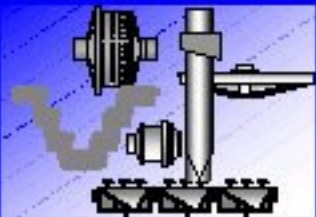
## Partícula

### Factor de Forma de Superficie $\alpha_{sA}$

$$\alpha_{sA} = 1,57 + K_g \left( \frac{\alpha_{vae}}{R_F} \right)^{4/3} \left( \frac{R_E + 1}{R_E} \right)$$

### Valores Referenciales para $\alpha_{vae}$ y $K_g$

GRUPO DE FORMA	$\alpha_{vae}$	$K_g$
Formas Geométricas:		
-Tetraédrica	0.328	4.36
-Cúbica	0.696	2.55
-Esférica	0.524	1.86
Formas Aprox.:		
-Angular Tetraédrica	0.380	3.30
-Angular Prismoidal	0.470	3.00
-Sub-angular	0.510	2.60
-Redondeada	0.540	2.10



nota: Las ecuaciones anteriores son aplicadas si  $R_E$  y  $R_F$  están contenidas en el intervalo 1 y 3.



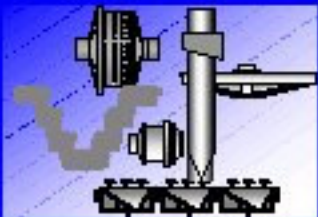
# Partícula

## Métodos para Estimar $\alpha_{sA}$ y $\alpha_{vA}$

### a) *Por Microscopía*

Pasos a seguir:

- i) Asignación del grupo de forma fijando los parámetros  $K_g$  y  $\alpha_{vAe}$ .
- ii) Estimación de las razones  $R_E$  y  $R_F$  ( $R_F$  difícil de estimar).
- iii) Cálculo de  $\alpha_{sA}$  y  $\alpha_{vA}$  usando las ecuaciones anteriores.

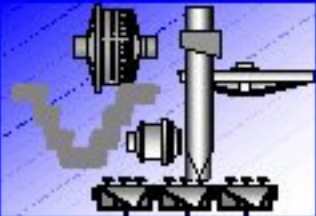


# Partícula

## *b) Por Análisis de Lotes*

Utilizado para estudiar partículas de tamaños superiores a los 100  $\mu\text{m}$  y evitar el cálculo de  $R_F$ .

- i) Preparación de la muestra a una fracción de tamaño cerrada (no amplia).
- ii) Determinación del volumen promedio de una partícula, por ejm. a partir del peso de un número conocido de ellas y datos de la densidad verdadera.
- iii) Determinar el diámetro del área proyectada " $d_A$ " para calcular  $\alpha_{vA}$ .
- iv) Estimación de  $R_E$ , determinando largo y ancho de la partícula.  $R_F$  se despeja de ecuación del factor de forma de volumen, con  $\alpha_{vae}$  de tabla.
- v) Cálculo de  $\alpha_{sA}$ , con  $K_g$  de la tabla anterior.



## Partícula

### Valores Típicos de Factores de Forma:

Tipo de Mineral	$\alpha_{vA}$	$\alpha_{sA}$	$\Psi$
<b>Part. Redondeadas:</b> - Arena - Polvos de Fundición	0.32-0.41	2.7-3.4	0.817
<b>Part. Angulares de Minerales Pulverizados:</b> - Carbón, Arena, Piedra Caliza.	0.20-0.28	2.5-3.2	0.655
<b>Part. Escamosas:</b> - Talco, Yeso.	0.12-0.16	2.0-2.8	0.543
<b>Láminas muy finas:</b> - Mica, grafito	0.01-0.03	1.6-1.7	0.216

