

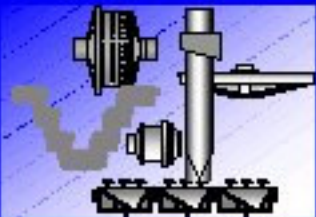
# Material particulado

Está compuesto partículas irregulares de diferentes tamaños, no obstante lo anterior, estas partículas generalmente tienen forma similar, cuando provienen de un origen común.



¿Cuál es el tamaño representativo de este material particulado?

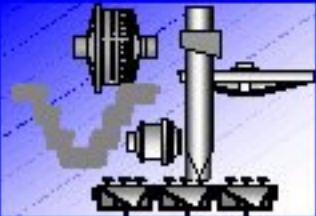
- Diámetro medio
- Media Geométrica
- Diámetros estadísticos ( $d_{32}$ ,  $d_{10}$ , etc.)



## *Material particulado*

El material particulado no es uniforme. Las partículas integrantes tienen una distribución de tamaños. Para determinar esta distribución y poder caracterizarlo se recurre a propiedades asociadas al conjunto de partículas (q, p, u):

- **Número (0)**
- **Largo (1)**
- **Área superficial (2)**
- **Masa o volumen (3)**

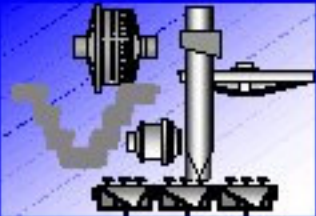
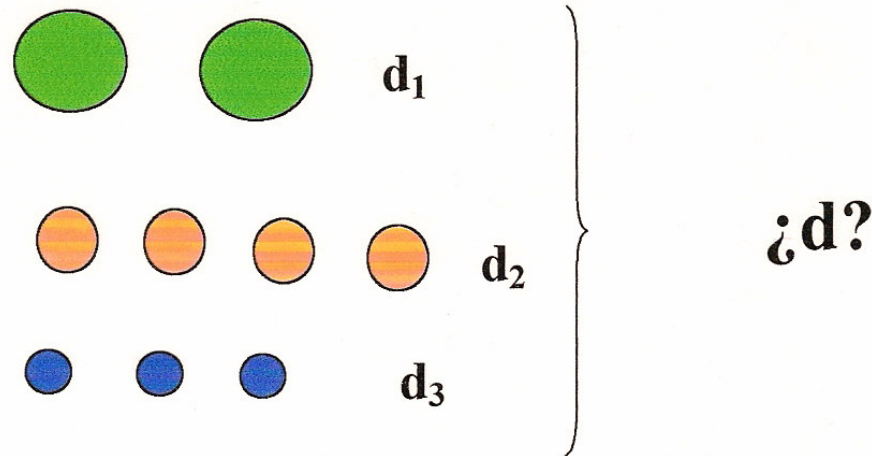


# Material particulado

## ❖ Diámetros Estadísticos

Se requiere efectuar una idealización del material particulado, para tratarlos como si fueran sistemas de tamaños más uniformes. Para esto se requiere de un manejo estadístico de la información.

### MATERIAL PARTÍCULADO



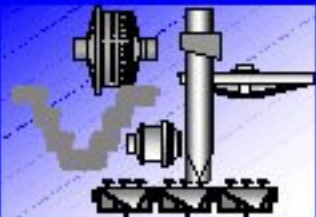
# Material particulado

## ❖ Diámetros Estadísticos

Existen varios diámetros estadísticos que pueden ser obtenidos en forma discreta por la ecuación general:

$$\bar{d}_{n q p}^{(q-p)} = \frac{\sum_i [Q_{ui} d_{ni}^{(q-u)}]}{\sum_i [Q_{ui} d_{ni}^{(p-u)}]}$$

$Q_u$  cantidad de material medido por la propiedad  $u$ :  $u = 3$   $Q_u$  es la masa la masa de la fracción representada por  $d_n$ ,  $u = 0$   $Q_u$  es el número de partículas de la fracción representada por  $d_n$ .

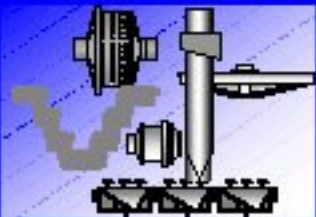


# Material particulado

## ❖ Diámetros Estadísticos

Supongamos que  $u = 0$  (número), y que las propiedades de material particulado que queremos que se mantengan son el número y el largo, en este caso el diámetro estadístico que representa a este sistema es:

$$\bar{d}_{n10}^{(1-0)} = \frac{2 d_1^{(1-0)} + 4 d_2^{(1-0)} + 3 d_3^{(1-0)}}{2 d_1^{(0-0)} + 4 d_2^{(0-0)} + 3 d_3^{(0-0)}}$$



# Material particulado

## ❖ Diámetros Estadísticos

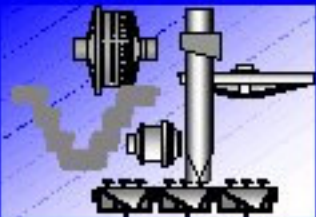
### ACTIVIDAD DE CLASES N° 2: Diámetros Estadísticos MI-42C

- a) Se requiere determinar un tamaño (diámetro) que represente a la distribución de partículas esféricas que se presenta a continuación, de manera que se mantenga, de la distribución original, tanto el **número de partículas** como el **largo** de éstas. Considere que la propiedad medida es “número” ( $u = 0$ )

  $N = 3$   $d = 4 \text{ cm}$

  $N = 4$   $d = 2 \text{ cm}$

  $N = 5$   $d = 1 \text{ cm}$





# Material particulado

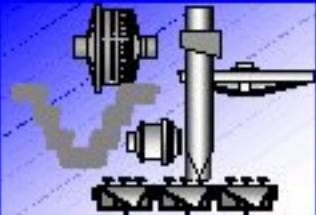
## ❖ Diámetros Estadísticos

b) Considere la siguiente distribución de tamaños:

Intervalo de Tamaño [cm]	Tamaño Promedio [cm]	Masa [g]
-8 +4	5,7	10
-4 +2	2,8	15
-2 +1	1,4	2

¿Qué valor tendría  $d_{10}$  si la propiedad medida es la masa ( $u = 3$ )?

¿ $d_{10}$  ? si  $u = 3$

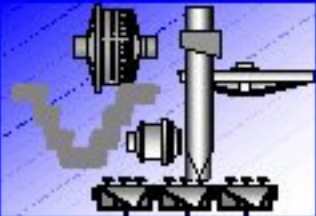


# Material particulado

## Distribución de Tamaños

Considerando que la distribución de tamaños es continua, una vez definido el tamaño nominal de una partícula, es necesario cuantificar la frecuencia con que ese tamaño aparece en el material particulado. Para esto se define las funciones:

*frecuencia  $f(x)$  y distribuciones acumuladas,  $F(x)$*





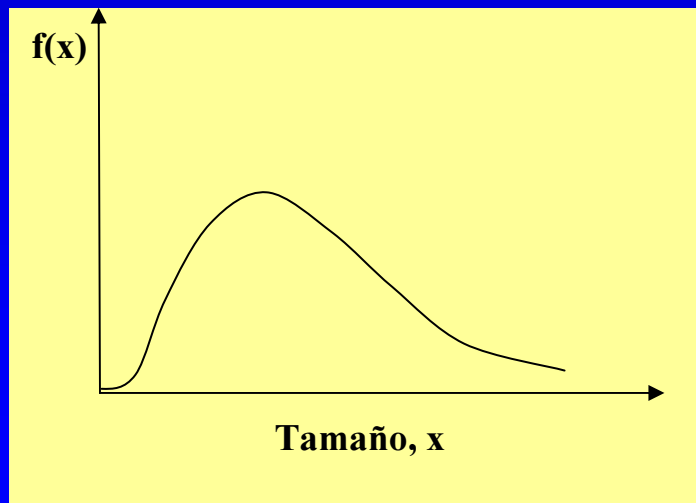
# Material particulado

## ☺ *Función frecuencia, $f(x)$ :*

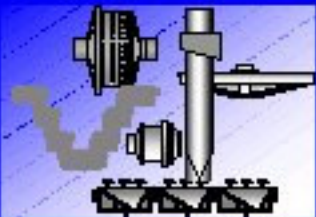
La frecuencia relativa  $f(x) dx$  tiene el siguiente significado:

- Probabilidad de encontrar en el material una partícula de tamaño comprendido entre  $x$  y  $x + dx$ .
- Fracción de partículas del material con tamaños comprendidos entre  $x$  y  $x + dx$ .

Considerando que la distribución de tamaños es continua, con rango de tamaño de partículas entre cero (muy finas) e infinito, la suma de todas las fracciones es igual a 1.



$$\int_0^{\infty} f(x) dx = 1$$



## Material particulado

Los métodos disponibles para determinar las distribuciones de tamaños, permiten medir fracciones de partículas en forma discreta. La suma de todas las fracciones posibles es igual a 1, vale decir:

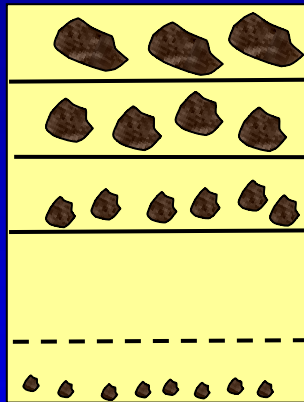
Índice k

k = 1

k = 2

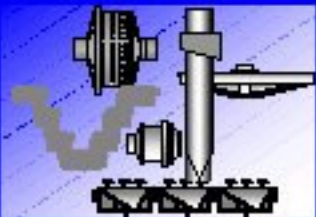
k = 3

k = N



$$\sum_{k=1}^N f_k = 1$$

- El subíndice 1 corresponde al primer tamaño sobre el cual se considera que existe una fracción de partículas.
- El subíndice N denota el último tamaño. Se considera que no existe una fracción de partículas bajo ese tamaño

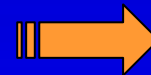
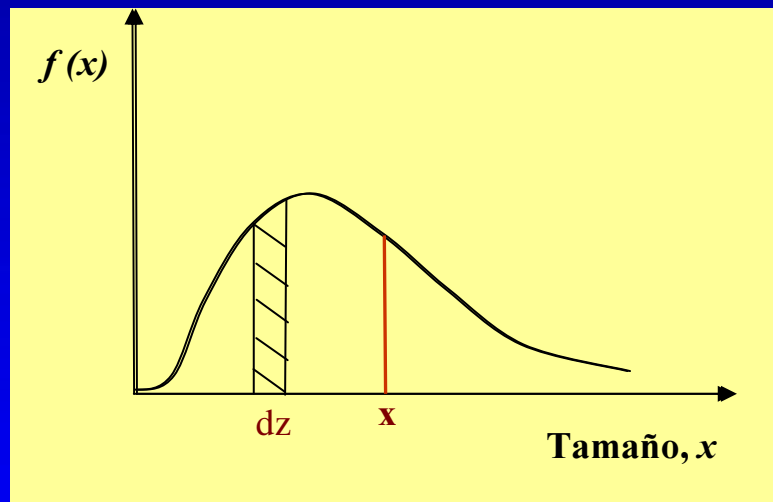


# Material particulado

## 😊 *Funciones distribución acumulada bajo y sobre tamaño, $F(x)$*

La función acumulada bajo tamaño,  $F_u(x)$ , tiene el siguiente significado:

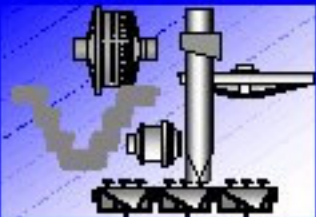
- Probabilidad de encontrar una partícula de tamaño menor a  $x$ .
- Fracción de partículas con tamaños menores a  $x$ .



$$F_u(x) = \int_0^x f(z) d(z)$$

La función acumulada sobre tamaño  $F_o(x)$  corresponde al complemento, es decir:

$$F_u(x) + F_o(x) = 1$$



# Material particulado

Se define las distribuciones discretas de la siguiente forma:

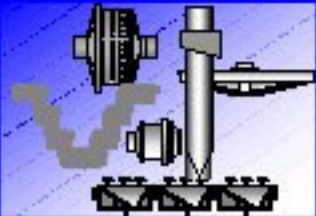
- Fracción acumulada bajo tamaño

$$F_u(x_i) = \sum_{k=i+1}^N f_k$$

- Fracción acumulada sobre tamaño

$$F_o(x_i) = \sum_{k=1}^i f_k$$

Entre  $F_u(x)$  y  $f(x)$  se establece la siguiente relación:



$$f(x) = \frac{dF_u(x)}{dx}$$

## Material particulado

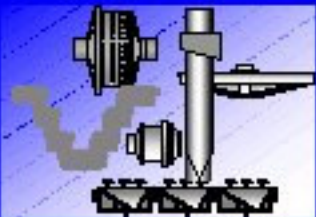
Existen diversas funciones de frecuencia  $f(x)$  (continuo) y fracciones retenidas  $f_k$  (discreto), según si se expresan en número  $f_0(x)$ , en longitud  $f_1(x)$ , en superficie  $f_2(x)$  o en masa  $f_3(x)$  de partículas contenidas en cada clase de tamaño.

Cual forma usar está directamente asociado al método experimental de medición de la frecuencia de partículas en cada fracción de tamaño. Es así como, cuando se utiliza una caracterización mediante microscopía, se realiza un conteo de partículas por tamaño y por lo tanto la frecuencia resultante es en número:  $f_0$ .

En este caso:



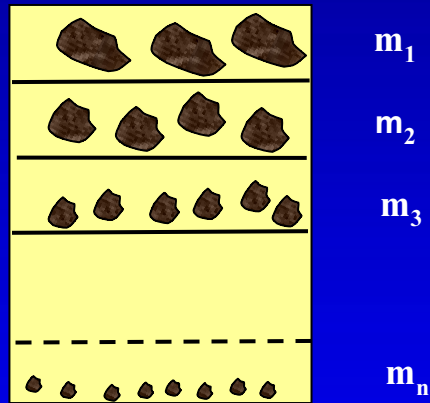
Tamaño	Nº de partículas	$f_0(x)$
$- x_1 + x_2$	$n_1$	$n_1 / \sum n_i$
$- x_2 + x_3$	$n_2$	$n_2 / \sum n_i$
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$- x_{N-1} + x_N$	$n_n$	$n_n / \sum n_i$
	$\sum n_i$	$\sum f_{0i} = 1$



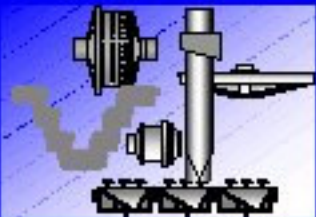
# Material particulado

En el caso más habitual, cuando se utiliza una serie de tamices, se realiza un pesaje de las partículas retenidas en cada fracción de tamaño y por lo tanto la frecuencia resultante es en masa:  $f_3$ .

En este caso:

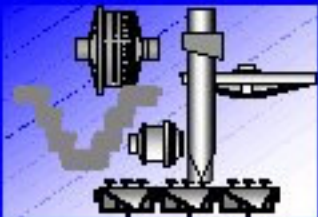


Tamaño	Masa de partículas	$F_3(x)$
$- x_1 + x_2$	$m_1$	$m_1 / \Sigma m_i$
$- x_2 + x_3$	$m_2$	$m_2 / \Sigma m_i$
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$- x_{N-1} + x_N$	$m_n$	$m_n / \Sigma m_i$
	$\Sigma m_i$	$\Sigma f_{3i} = 1$





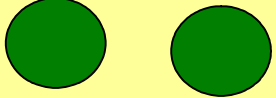


# Material particulado



*Análisis de Sistemas Particulados*

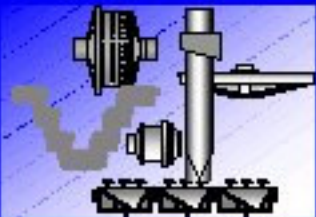
# Material particulado

Ejemplo análisis granulométrico:

	$(-x_0 + x_1)$	$N = 2$	<b>Masa = 10 g</b>
	$(-x_1 + x_2)$	$N = 4$	<b>Masa = 15 g</b>
	$(-x_2 + x_3)$	$N = 3$	<b>Masa = 5 g</b>

Con  $x_0 > x_1 > x_2 > x_3$

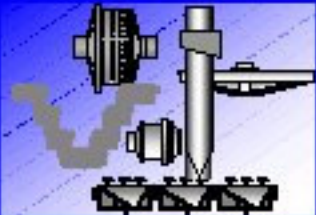
Tamaños	$f_0$ Porcentaje retenido en número	$f_3$ Porcentaje retenido en peso
$-x_0 + x_1$	$2/9 * 100 = 22,2 \%$	$10/30 * 100 = 33,3 \%$
$-x_1 + x_2$	$4/9 * 100 = 44,4 \%$	$15/30 * 100 = 50,0 \%$
$-x_2 + x_3$	$3/9 * 100 = 33,4 \%$	$5/30 * 100 = 16,7 \%$
Total	100,0%	100,0%



## Material particulado

Ejemplo análisis granulométrico:

Tamaños	$F_{u0}$ Porcentaje Acumulado Bajo Tamaño en Número	$F_{u3}$ Porcentaje Acumulado Bajo Tamaño en Peso
$x_0$	100,0%	100,0%
$x_1$	$100,0 - 22,2 = 77,8\%$	$100,0 - 33,3 = 66,7\%$
$x_2$	$77,8 - 44,4 = 33,4\%$	$66,7 - 50,0 = 16,7\%$
$x_3$	$33,4 - 33,4 = 0,0\%$	$16,7 - 16,7 = 0,0\%$



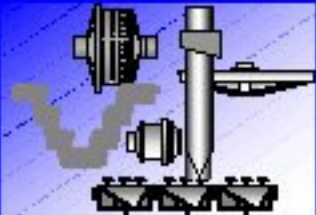
## Material particulado

- ❖ *Paso de una Función de Frecuencia a otra (caso continuo)*  
( $j$  y  $k$  pueden tomar los valores 0, 1, 2, 3)

$$f_j(x) = \frac{x^{j-k} f_k(x)}{\int_0^\infty x^{j-k} f_k(x) dx}$$

si  $\alpha_v$  cambia con  $x$

$$f_j(x) = \frac{\alpha_v(x) x^{j-k} f_k(x)}{\int_0^\infty \alpha_v(x) x^{j-k} f_k(x) dx}$$



## Material particulado

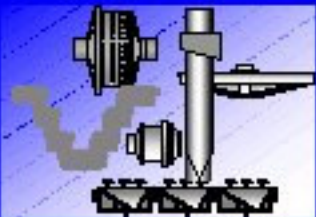
- ❖ *Paso de una Función de Frecuencia a otra* (caso discreto)  
(*j* y *k* pueden tomar los valores 0, 1, 2, 3)

$$f_j(x) = \frac{x^{j-k} f_k(x)}{\sum_0^N x^{j-k} f_k(x)}$$

Considerar, al igual que en el caso continuo, el factor de forma si este cambia.

Ejemplo para pasar de función relativa en Número ( $f_0$ ) a Peso ( $f_3$ ):

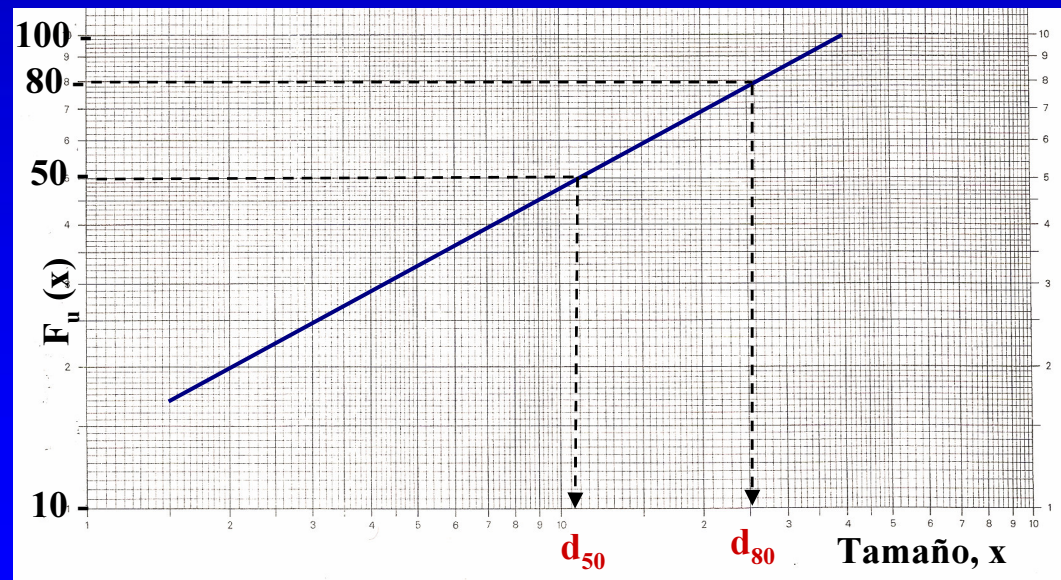
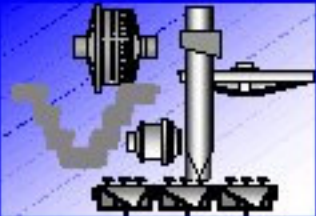
$$f_3(x) = \frac{x^{3-0} f_0(x)}{\sum_0^N x^{3-0} f_0(x)}$$



# Material particulado

## ❖ *Tamaños Característicos de una Distribución:*

- Tamaño medio; centro de gravedad
- Moda: valor de  $x$  que tiene mayor frecuencia.
- **Tamaño  $d_{50}$ :** Corresponde al tamaño bajo el cual se encuentra el 50% de la muestra (en estadística la mediana).
- Otros tamaños característicos:  $d_{75}$ ,  $d_{80}$ ,  $d_{25}$ .





# *Material particulado*

## *Modelos de Distribución de Tamaños:*

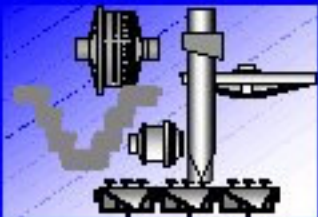
Existen varias funciones empíricas capaces de representar adecuadamente las distribuciones de tamaño de material particulado. Las más comunes son:

❖ **Distribución GAUDIN SCHUHMANN**

❖ **Distribución ROSIN-RAMMLER**

❖ **Distribución LOG - NORMAL**

En la mayoría de los casos no hay justificación teórica para preferir una función u otra, usando solamente la calidad del ajuste. La Gaudin Schuhmann tiende a representar mejor en los tamaños finos y la Rosin Rammler en los tamaños gruesos, pero no es siempre así.



# Material particulado

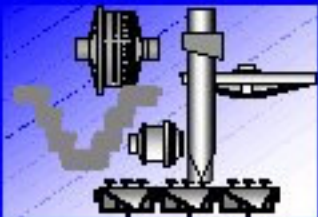
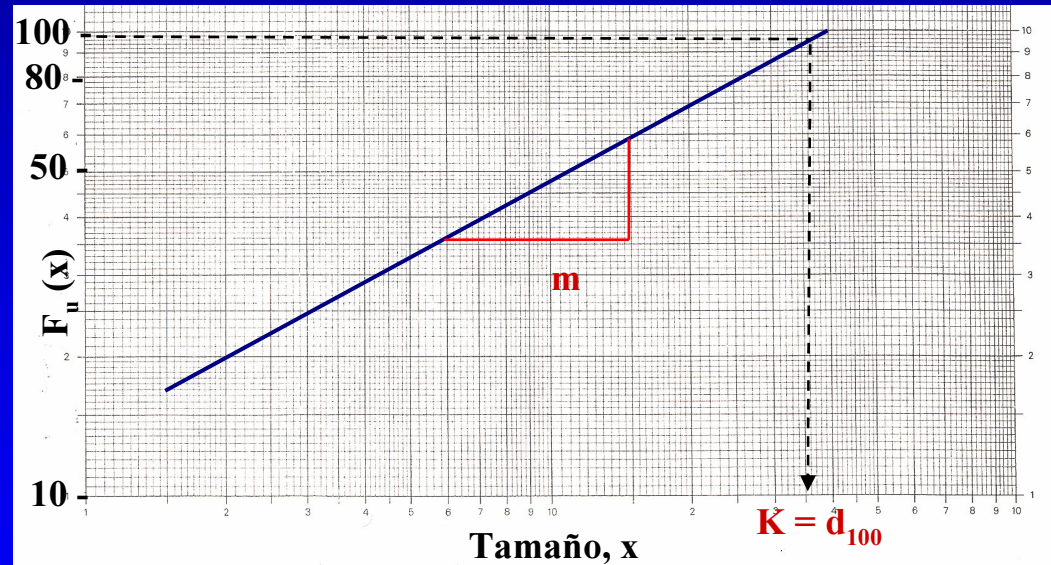
## ❖ Distribución GAUDIN-SCHUHMANN

Esta distribución de tamaño es la más utilizada, por su simpleza, para representar sistemas particulados en el campo de la mineralurgia.

$$F_u(x) = \left( \frac{x}{K} \right)^m$$

**K** = Módulo del tamaño.  
Corresponde al tamaño máximo.

**m** = Módulo de la distribución.  
Indicativo de la amplitud de la distribución (pendiente).



# Material particulado

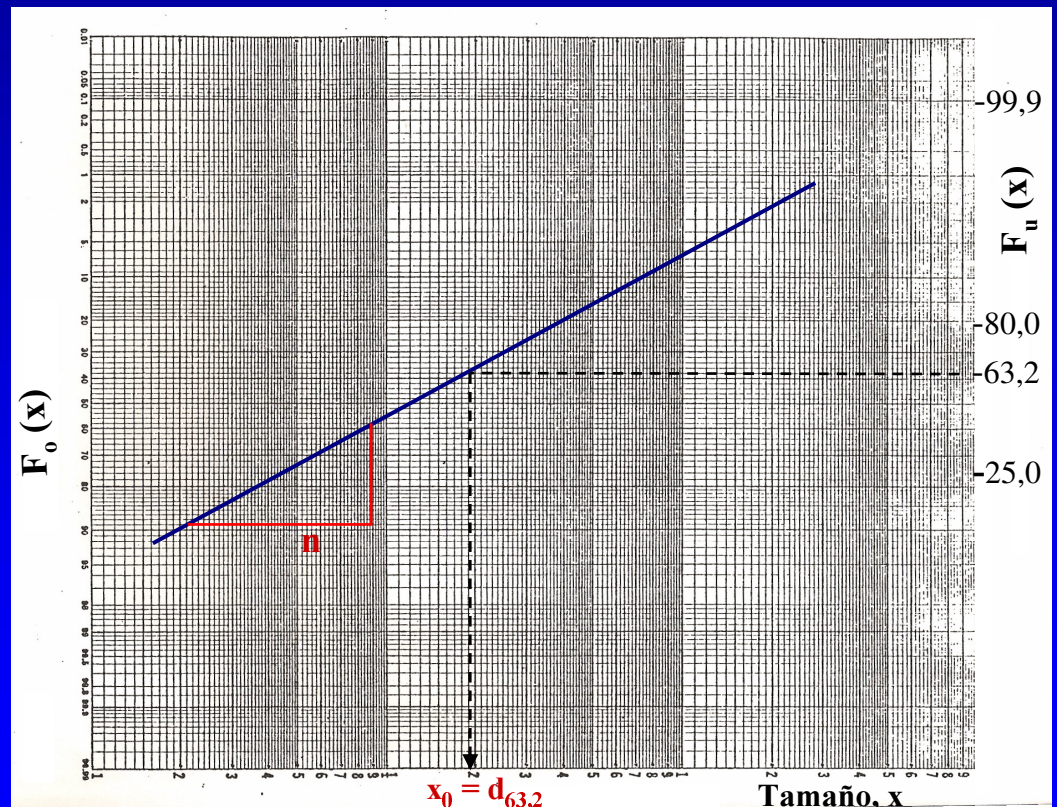
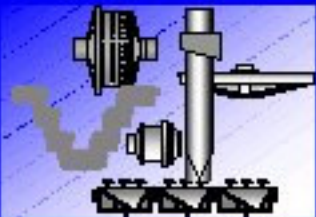
## ❖ Distribución ROSIN-RAMMLER

Esta distribución de tamaño es sigue una línea recta en un gráfico del doble logaritmo del inverso de  $F_o(x)$  versus el logaritmo del tamaño.

$$F_U(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{x_0}\right)^n\right)$$

$x_0$  = Tamaño característico y tiene unidad de longitud ( $x_0 = d_{63,2}$ ).

$n$  = Módulo de la distribución.  
Indicativo de la amplitud de la distribución (pendiente).



# Material particulado

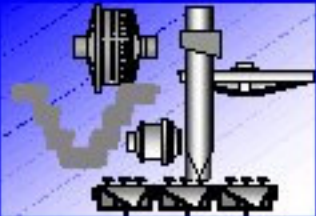
## ❖ *Distribución LOG - NORMAL*

Esta distribución tiene un significado teórico importante, ya que Kolmogorov demostró que tras sucesivas etapas de fragmentación que produzcan un número aleatorio de fragmentos de tamaños aleatorios, y sin fragmentación preferente de algunos tamaños, la distribución de tamaños de los fragmentos tenderá a una distribución log - normal.

$$F_U(x) = 2 G(x) \left( \frac{\ln(x / d_{50})}{\ln(d_{84}) - \ln(d_{16})} \right)$$

Donde G (x) es la distribución Gaussiana o Normal:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$





# Material particulado

## ❖ *Otras Propiedades del Material Particulado*

- Porosidad  $\epsilon$

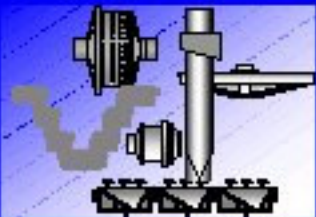
Fracción entre el volumen de los huecos y el volumen del lecho.

$$\epsilon = \frac{V_{hueco}}{V_{lecho}}$$

$V_{lecho}$  = volumen de partículas + volumen de huecos

$V_{hueco}$  = volumen de huecos

Esta propiedad se utiliza por ejemplo: en Filtración (resistencia que pone el flujo de fluido para atravesar el lecho particulado), en Molienda



# Material particulado

## ❖ *Otras Propiedades del Material Particulado*

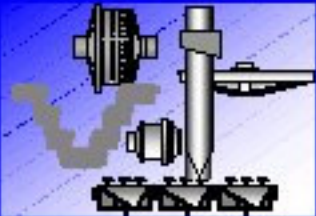
- Superficie Específica  $S_e$

Corresponde a la superficie promedio por unidad de masa.

$$S_e = \frac{\bar{S}}{\rho \bar{V}}$$

$\bar{S}$  = superficie promedio

$\bar{V}$  = volumen promedio



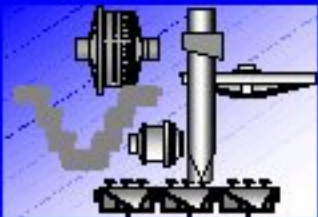


# Material particulado

## ❖ *Técnicas de Caracterización*

Existen diversos métodos para la determinación experimental del tamaño y forma de las partículas individuales y de una distribución. La selección de un método en particular depende de:

- Información deseada (Aplicación)
- Rapidez requerida
- Viabilidad del método
- Disponibilidad de equipos
- Costo del análisis

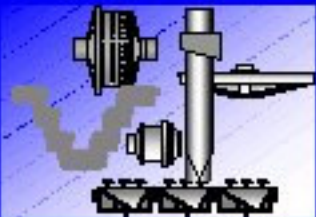


# Material particulado

## ❖ Técnicas de Caracterización

Las tablas siguientes indican los métodos más usados en la caracterización de partículas:

Método	Técnica	Rango de Tamaño [ $\mu\text{m}$ ]	Obs.
Microscopía ( $d_a$ )	-Óptica -Electrónica -Analizadores de imágenes	$10^2 - 1$ $10^2 - 10^1$	Seco/húmedo Seco Seco
Tamisaje ( $d_m$ )	-Malla alambre -Micro tamices automático	$10^5 - 30$ $30 - 5$	Seco/húmedo Seco/húmedo
Sedimentación ( $d_{st}$ )	-Pipeta de Andreasen -Centrífuga -Fotosedimentación -Acum.Sedimentos -Sedimentación R-X	$10^2 - 1$ $0.002 - 10$	Gravit/húmedo Gravit/húmedo Gravit/húmedo Gravit/húmedo Gravit/húmedo
Sensoria Local ( $d_v$ )  ( $d_a$ )	-Resist.Eléctrica (contador Coulter) -Difracción Láser -Extensión luminosa -Dispersión Óptica	$1 - 500$ $1 - 800$ $10^3 - 10^{-1}$	Húmedo  Seco/húmedo Seco/húmedo Seco/húmedo

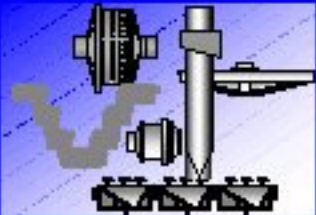


# Material particulado

## ❖ *Técnicas de Caracterización*

Las técnicas de caracterización de materiales particulados más usadas son:

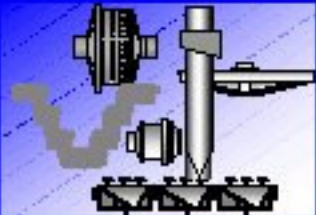
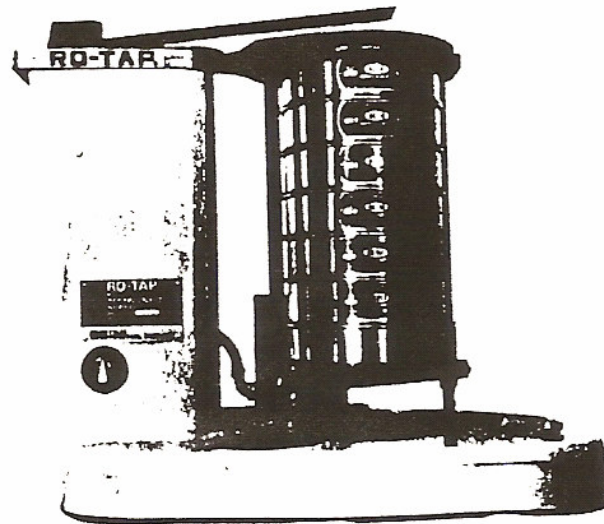
- a) Tamizaje .
- b) Técnicas de Sedimentación
- c) Métodos continuos



# Material particulado

## a) Tamizaje:

El tamizaje consiste en agitar, bajo condiciones normalizadas, una muestra contenida en una serie de recipientes, denominado tamices, los que se colocan uno sobre otro en un agitador de tamices como el que se muestra a continuación:

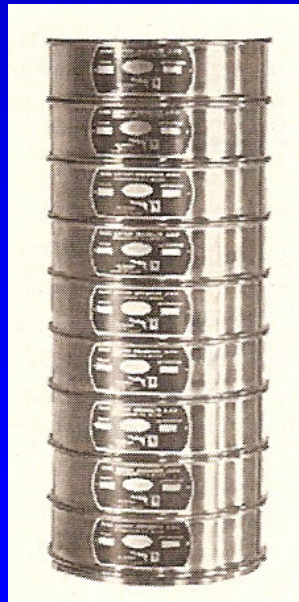
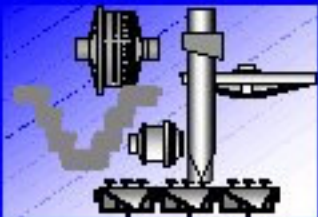




## Material particulado

Los tamices son de base circular, con aberturas de un cierto tamaño y se ordenan partiendo con el de mayor abertura, hasta llegar al de menor abertura y terminando con un fondo. Existen en diferentes tamaños dependiendo de su uso, los más utilizados son:

- Tamices de 8" de diámetro para aberturas superiores o iguales a  $38\ \mu\text{m}$ .
- Microtamices de 3" de diámetro, con malla de polyester, nylon o micromallas electroformadas, para tamaños de 15,10 y  $5\ \mu\text{m}$ .



*Análisis de Sistemas Particulados*

# Material particulado

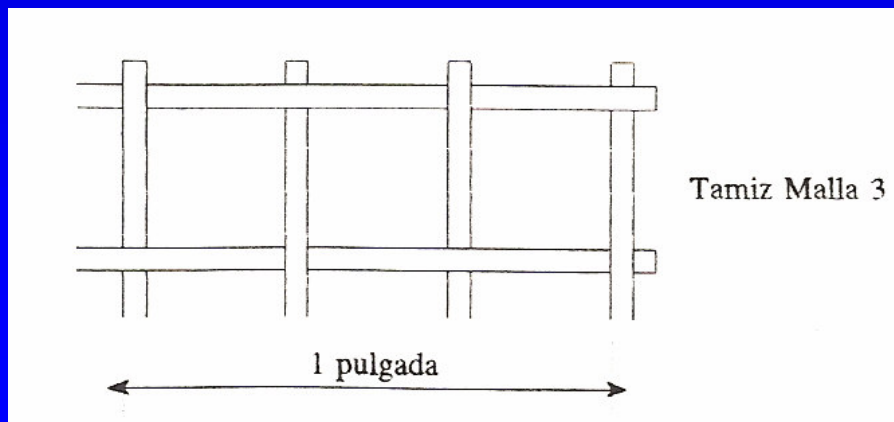
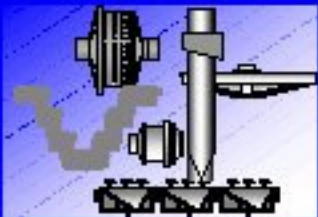
- *Serie de Tamices*

Las series de tamices se han estandarizado, existiendo varios sistemas en uso:

- (1) Serie Tyler (Americana)
- (2) Serie ASTM (Norma ASTM) (E11)
- (3) Norma Alemana DIN 4188
- (4) Serie Francesa AFNOR
- (5) Norma Inglesa BSS410

Las aberturas de los tamices son de forma cuadrada y en general, corresponden a un tejido de alambres denominado malla.



$$\text{N}^\circ \text{ de Malla} = \text{N}^\circ \text{ de aberturas que tiene el tamiz por pulgada lineal.}$$

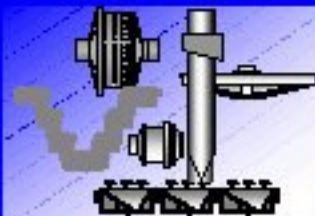


*Análisis de Sistemas Particulados*



# Material particulado

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  </div> <div>INTERNATIONAL SIEVE CHART</div> <div style="text-align: center;">  </div> </div>						
INTERNATIONAL ISO 565 (TBL 2): 1983	AMERICAN ASTM E 11-87	TYLER STD. SCREEN 1910	BRITISH BS 410: 1986		GERMAN DIN 4188: 1977	
Nominal Opening Millimetres/Microns	Alt. U.S. Standard INCH/SIEVE	Equivalent INCH/MESH	Aperture mm / $\mu$ m	Equivalent BS MESH	Aperture mm	Approx. DIN No.
26.50 mm	1.06 inch	1.05 inch	26.50 mm		25.00	
25.00 *	1	—	—		22.40	
22.40	7/8	.883	22.40		20.00	
19.00	3/4	.742	19.00		18.00	
16.00	5/8	.624	16.00		16.00	
13.20	.530	.525	13.20		14.00	
12.50 *	1/2	—	—		12.50	
11.20	7/16	.441	11.20		11.20	
9.50	3/8	.371	9.50		10.00	
—	—	—	—		9.00	
8.00	5/16	2 1/2 mesh	8.00		8.00	
6.70	.265	3	6.70		7.10	
6.30 *	1/4	—	—		6.30	
5.60	3 1/2 sieve	3 1/2	5.60	3	5.60	
4.75	4	4	4.75	3 1/2	5.00	
—	—	—	—	—	4.50	
4.00	5	5	4.00	4	4.00	2E
3.35	6	6	3.35	5	3.55	—
—	—	—	—	—	3.15	—
2.80	7	7	2.80	6	2.80	—
2.36	8	8	2.36	7	2.50	—
—	—	—	—	—	2.24	—
2.00	10	9	2.00	8	2.00	3E
1.70	12	10	1.70	10	1.80	—
—	—	—	—	—	1.60	—
—	—	—	—	—	1.50 *	4
1.40	14	12	1.40	12	1.40	—
1.18	16	14	1.18	14	1.25	—
—	—	—	—	—	1.20 *	5
—	—	—	—	—	1.12	—
1.00	18	16	1.00	16	1.00	6
850 $\mu$ m	20	20	850 $\mu$ m	18	0.900	—
—	—	—	—	—	0.800	—
—	—	—	—	—	0.750 *	8
710	25	24	710	22	0.710	—



# Material particulado



## INTERNATIONAL SIEVE CHART



INTERNATIONAL ISO 565 (TBL 2): 1983	AMERICAN ASTM E 11-87	TYLER STD. SCREEN 1910	BRITISH BS 410: 1986		GERMAN DIN 4188: 1977	
Nominal Opening Millimetres/Microns	Alt. U.S. Standard INCH/SIEVE	Equivalent INCH/MESH	Aperture mm / $\mu$ m	Equivalent BS MESH	Aperture mm	Approx. DIN No.
—	—	—	—	—	0.630	—
600	30	28	600	25	0.600 *	10
—	—	—	—	—	0.560	—
500	35	32	500	30	0.500	12
—	—	—	—	—	0.450	—
425	40	35	425	36	0.430 *	14
—	—	—	—	—	0.400	16
355	45	42	355	44	0.355	—
—	—	—	—	—	0.340 *	18E
—	—	—	—	—	0.315	—
300	50	48	300	52	0.300 *	20
—	—	—	—	—	0.280	—
250	60	60	250	60	0.250	24
212	70	65	212	72	0.224	—
—	—	—	—	—	0.200	30
180	80	80	180	85	0.180	—
—	—	—	—	—	0.170 *	35E
—	—	—	—	—	0.160	—
150	100	100	150	100	0.150 *	40
—	—	—	—	—	0.140	—
125	120	115	125	120	0.125	—
—	—	—	—	—	0.120 *	50
106	140	150	106	150	0.112	—
—	—	—	—	—	0.100	60
90	170	170	90	170	0.090	70
—	—	—	—	—	0.080	—
75	200	200	75	200	0.075 *	80
—	—	—	—	—	0.071	—
—	—	—	—	—	0.067 *	90E
63	230	250	63	240	0.063	—
—	—	—	—	—	0.060 *	100
53	270	270	53	300	0.056	110
—	—	—	—	—	0.050	120
45	325	325	45	350	0.045	—
38	400	400	38	400	0.040	—
—	—	—	—	—	0.036	130
32	450	—	32	440	0.032	—
25	500	—	—	—	0.025	200
20	635	—	—	—	0.020	—

1,000 micrometres (microns) = 1.00 mm

\* INCLUDED FOR COMMON USE

USA © F&S MAR/90

## Material particulado

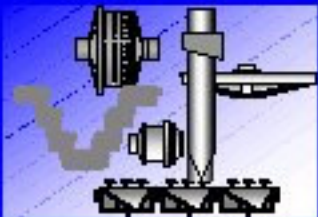
Las series de tamices están estandarizadas en cuanto a la relación entre mallas consecutivas. Las más usuales son:

Serie Normal = Tiene una relación de  $2^{1/2}$

Serie Doble = Tiene una relación de  $2^{1/4}$

Debido a esta relación geométrica entre tamices consecutivos, es normal caracterizar el tamaño de una fracción entre tamices, por el promedio geométrico entre las aberturas de dichos tamices, es decir:

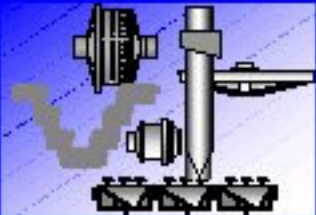
$$\langle X \rangle = (X_i \cdot X_{i+1})^{1/2}$$



## Material particulado

Ejemplo: si se toma como referencia el tamiz 70:

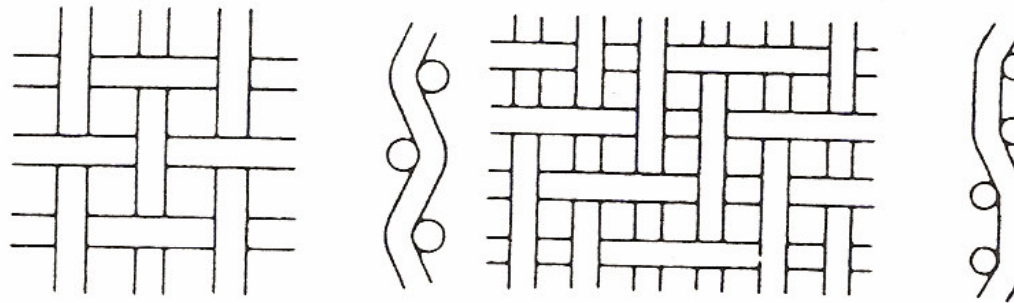
Malla ASTM	Abertura $\mu\text{m}$	Serie Normal	Serie Doble
50 60	297 250	$210 * (2)^{1/2} = 297$	$210 * (2)^{1/4} = 249,7$
<b>70</b>	<b>210</b>		
80 100	177 149	$210 / (2)^{1/2} = 149$	$210 / (2)^{1/4} = 176,7$



## Material particulado

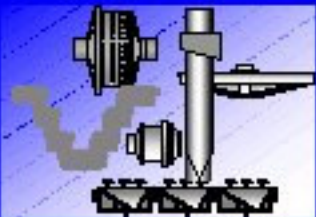
En relación con el tejido de los alambres, se tiene dos casos:

- abertura  $\geq 75 \mu\text{m}$   $\Rightarrow$  tejido simple
- abertura  $< 63 \mu\text{m}$   $\Rightarrow$  tejido cruzado



a) Tejido simple

b) Tejido cruzado





# Material particulado

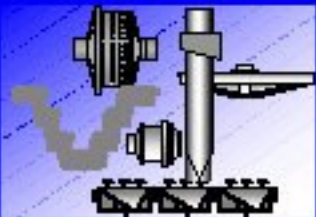
- Tipos de Tamizaje: Seco o Húmedo

Los tamizajes pueden realizarse tanto en seco como en húmedo, con las siguientes ventajas y desventajas:

a) Tamizaje en seco

Desventajas:

1. Las partículas finas por efectos eléctricos se pegan a las partículas gruesas y constituyen un todo.
2. Fragilidad de la partículas.
3. Grado de aglomeración (por razones físicas y efectos químicos)
4. Pérdida de las partículas finas en forma de polvo (si se pierde por efecto de polvo más del 0,5% de la muestra en el tamizaje, hay que repetirlo).

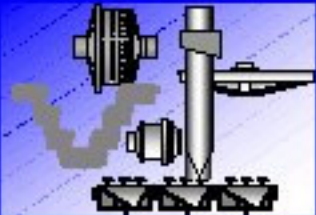


# Material particulado

- Tamizaje ventajas:

Ventajas:

1. Procedimiento más fácil y rápido.
2. No se trabaja con un medio externo (como sería el agua u otro líquido).





# Material particulado

## b) Tamizaje en húmedo

Usa principalmente agua como medio de ayuda al tamizaje, siempre que el material no sea repelente a esta, en caso contrario se utilizan otros agentes humectantes.

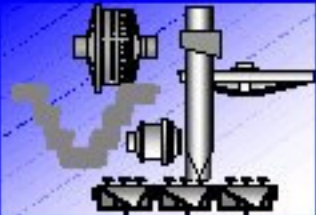
Este tipo de tamizaje se puede realizar en forma manual o bien en forma automática.

### Desventajas:

1. Uso de un medio ajeno, agua generalmente.
2. Etapas posteriores de filtrado y secado.

### Ventajas:

1. No hay pérdida de polvo.
2. No hay aglomerados (ayuda a desarmarlos).
3. Evita la corriente estática, la que hace que las partículas finas se peguen a las gruesas.



# Material particulado

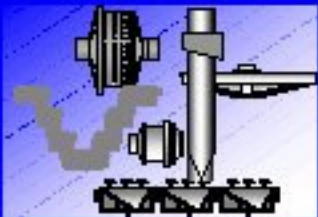
## **Normas Generales de Tamizaje:**

### **i) Deslame o Eliminación de Finos**

Usualmente, para evitar problemas con los finos (lamas) se realiza un deslame que consiste en poner la muestra sobre un tamiz de protección (ejem. 60#) bajo el cual se instala el tamiz de deslame (ejem. 200#), luego y con la ayuda de agua se procede a separar los finos hasta obtener la salida de agua clara sin sólidos en suspensión.

Las fracciones sobre ambas mallas se juntan, se filtran, se secan y se pesan, pasando a constituir el material a tamizar en seco.

Las lamas se filtran, secan y pesan, agregando dicho peso al que se obtenga en el fondo del tamizaje en seco, vale decir, bajo la malla de deslame.



# Material particulado

## ii) Duración del Tamizaje

Para evitar ruptura de las partículas existen normas (BSI) con respecto al tiempo del tamizaje:

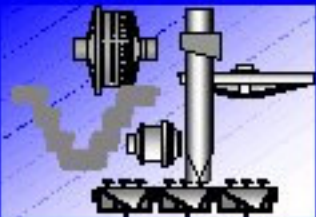
- 1.- Se tamiza 5 minutos en un agitador de tamices.
- 2.- Se para el tamizaje mecánico y se tamiza manualmente por 2 minutos (tamiz por tamiz).

Se pesan las fracciones bajo tamaño obtenidas en el tamizaje manual y se determina que porcentaje representa cada fracción, con respecto a la muestra inicial.

Si alguno de estos porcentajes supera el 0,2% se tamiza por otros 5 minutos y se repite la operación anterior, hasta obtener el objetivo ( $\leq 0.2\%$ ).

- 3.- Antes de empezar un nuevo ciclo de tamizaje, se debe juntar la fracción bajo tamaño de cada malla con el sobre tamaño de la malla siguiente.

En general para minerales normales el tiempo de tamizaje es del orden de 15 a 30 minutos.



## Material particulado

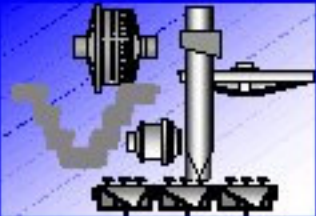
### iii) Peso de la Muestra

La cantidad de muestra requerida para el tamizaje está limitada por:

- Cantidad suficiente para que sea representativa del total.
- Cantidad suficiente para que las partículas tengan oportunidad de encontrar una abertura en la posición más favorable.

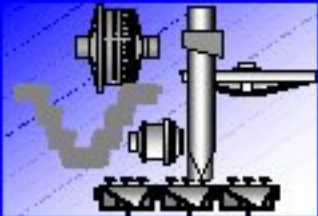
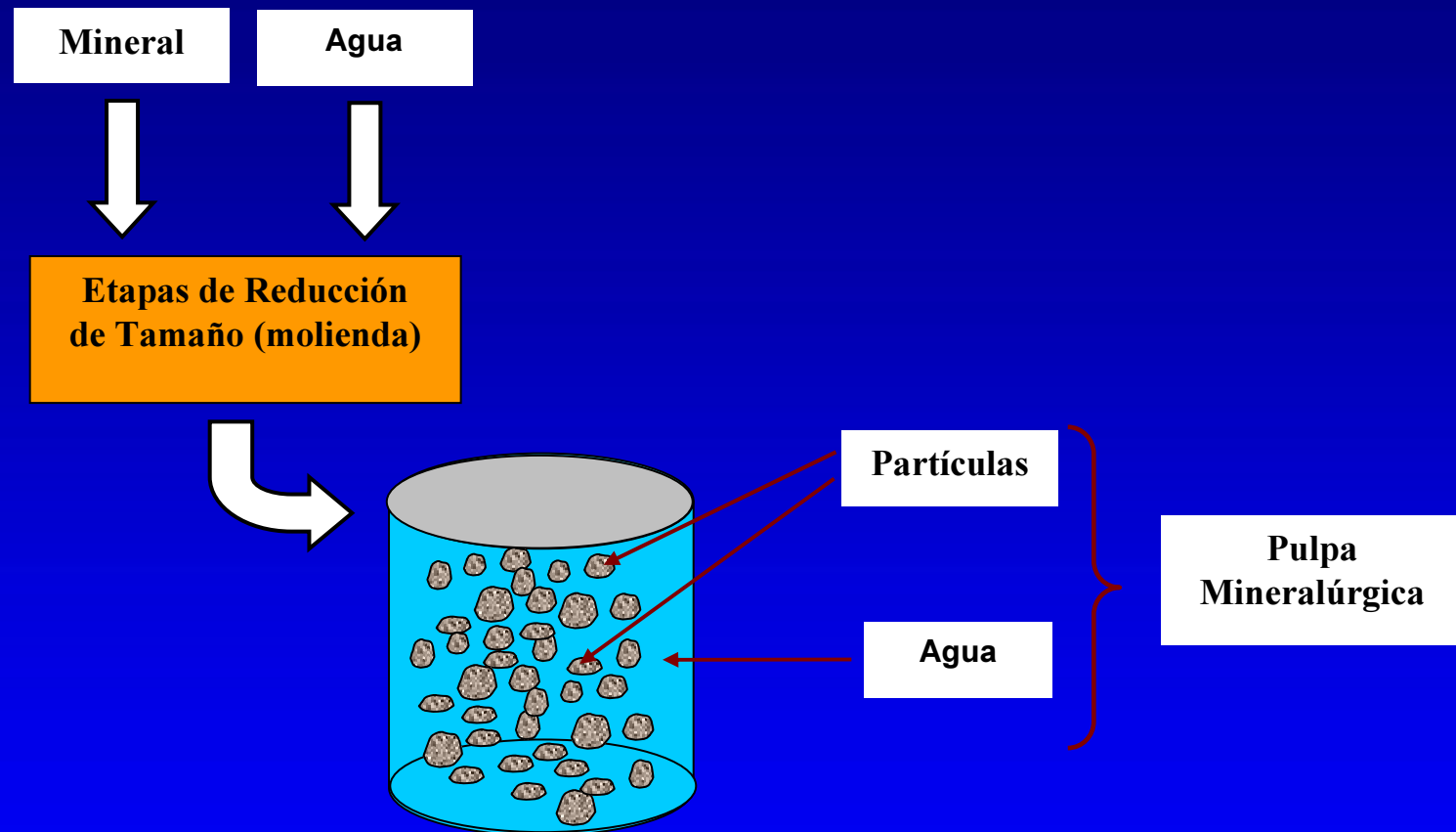
Para tamices de 8" de diámetro se debe cumplir que:

- 1.- Peso de la muestra = 100 g, si la gravedad específica ( $\gamma_s$ ) es mayor que 3.
- 2.- Peso de la muestra = 50 g, si  $\gamma_s < 3$ .
- 3.- La precisión del peso de la muestra debe ser  $\pm 0,05$  g.
- 4.- La cantidad de muestra depende de la abertura del tamiz y del diámetro de este.

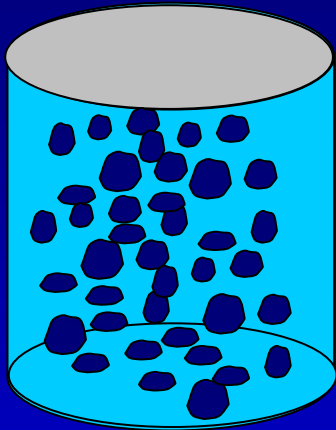




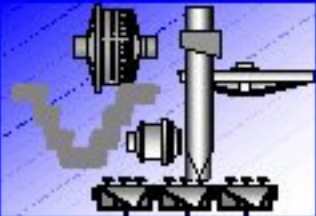
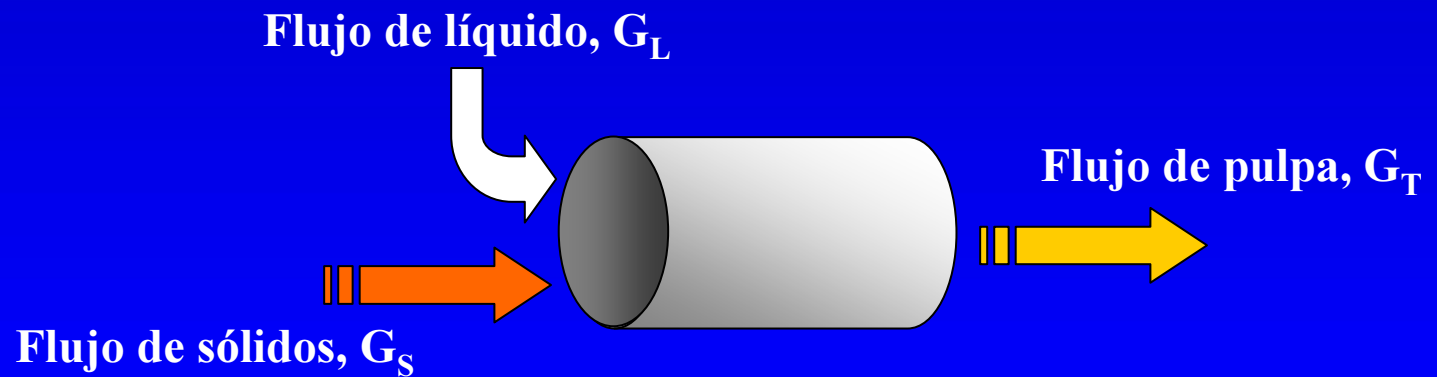
# *Pulpas mineralúrgicas*



## Pulpas mineralúrgicas



- Densidad de pulpa
- Concentración de sólidos, en peso y en volumen
- Dilución
- Viscosidad



## *Pulpas mineralúrgicas*

Para expresar la composición de una pulpa de minerales y sus propiedades, se adopta la siguiente notación:

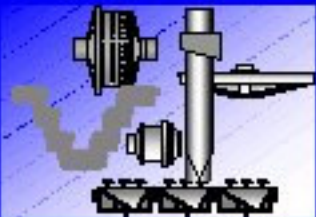
Flujo		Subíndices	
Notación	Tipo	Notación	Tipo
G	Másico (t/h)	S	Sólido
		L	Líquido
Q	Volumétrico (m <sup>3</sup> /h)	T	Pulpa

**Flujo másico:**

$$G_T = G_S + G_L$$

**Flujo volumétrico:**

$$Q_T = Q_S + Q_L$$





## Pulpas mineralúrgicas

❖ Densidades:

$$\rho_s = \frac{G_s}{Q_s} \quad (t/m^3)$$

$$\rho_L = \frac{G_L}{Q_L} \quad (t/m^3)$$

$$\rho_T = \frac{G_T}{Q_T} \quad (t/m^3)$$

❖ Gravedad específica del sólido,  $\Gamma_s$ :

$$\Gamma_s = \frac{\rho_s}{\rho_L}$$

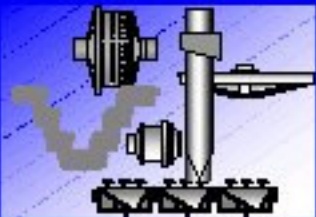
❖ Concentraciones de sólidos:

En peso:

$$C_P = \frac{G_s}{G_T} 100 \quad (\%)$$

En volumen:

$$C_V = \frac{Q_s}{Q_T} 100 \quad (\%)$$



## Pulpas mineralúrgicas

❖ Dilución:

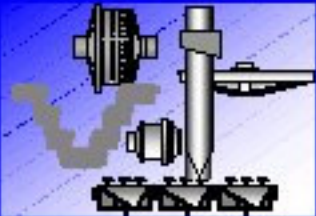
$$D = \frac{G_L}{G_S}$$

❖ Humedad en base húmeda, H (%):

$$H = 100 \frac{P_L}{P_{Total}}$$

Utilizada cuando el contenido de sólidos es muy alto. No corresponde a una pulpa si no a un sólido húmedo.

También se puede calcular la **humedad en base seca** lo que correspondería a  $P_L / P_S$



## Pulpas mineralúrgicas

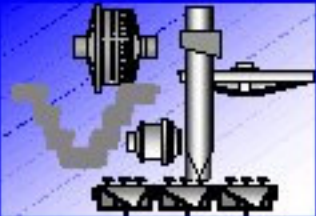
### ❖ Relaciones entre las variables:

$$\rho_T = \frac{\rho_S \rho_L}{\rho_S (1 - C_P) + \rho_L C_P}$$

$$C_P = \frac{\rho_S}{\rho_T} C_V$$

$$D = \frac{1 - C_P}{C_P}$$

$$\rho_T = \rho_L + (\rho_S - \rho_L) C_V$$



# Pulpas mineralúrgicas

## ❖ Viscosidad:

Es la propiedad de un fluido que indica su resistencia al esfuerzo tangencial. Es función de la temperatura. La unidad de medida más utilizada es el centipoise, cP, (equivalente a 1 g/(cm s)). El agua pura a 20 °C tiene una viscosidad de 1,002 cP.

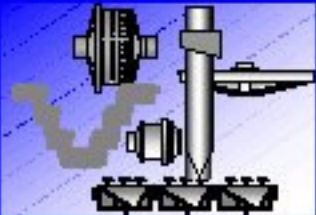
La viscosidad se puede expresar como:

$$\mu = \frac{\tau}{dv/dy}$$

donde:

$\tau$  = Esfuerzo de corte.

$dv/dy$  = Tasa de deformación angular de la mezcla ( $v$  = velocidad del fluido,  $y$  = distancia perpendicular a la dirección del flujo).



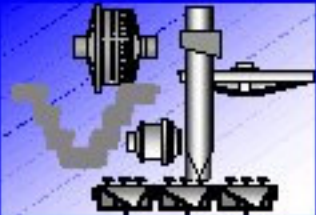
## *Pulpas mineralúrgicas*

Para determinar la viscosidad de una pulpa,  $\mu_p$ , en función de la viscosidad del agua,  $\mu$ , y de la concentración de sólidos en volumen,  $C_v$ , se utiliza la ecuación de Wellman:

$$\frac{\mu_p}{\mu} = \frac{\exp^{(-10,4 C_v)}}{\left(1 - \frac{C_v}{0,62}\right)^8}$$

Aunque esta ecuación no lo indica, otras variables (como el pH) también inciden en la viscosidad. Es usual también expresar la viscosidad cinemática,  $\nu$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ), de un fluido, que corresponde al cociente entre la viscosidad ( $\text{kg}/\text{m s}$ ) y la densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) del fluido:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$



## Pulpas mineralúrgicas

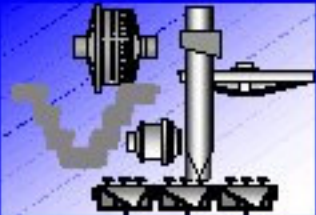
### ❖ Formas de medición de densidades, flujos y concentraciones de una pulpa mineralúrgica

≈ Métodos batch de medición de la densidad del sólidos ( $\rho_s$ )

- Por volúmenes desplazados:

$$\rho_s = \frac{M_s}{(V_F - V_i)}$$

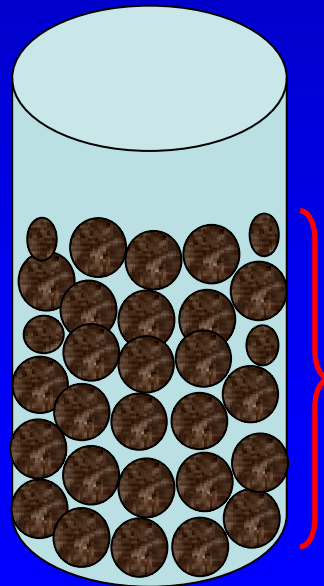
$M_s$	=	masa del sólido
$V_F$	=	volumen final probeta con agua + mineral
$V_i$	=	volumen inicial probeta con agua



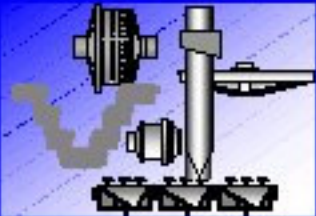
# Pulpas mineralúrgicas

- Medición directa:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_{apS}}$$



$V_{apS}$  = volumen aparente del sólido



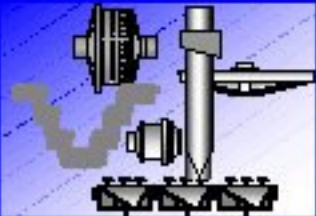


## *Pulpas mineralúrgicas*

- Por Picnometría:

Se utiliza una pequeña botella con tapón de vidrio esmerilado que termina en un capilar o tapón con termómetro. Procedimiento:

1. Limpiar, secar y pesar la botella vacía con tapón ( $P_1$ ).
2. Cortar aproximadamente 50 g de la muestra bajo 65# Ty. Se introducen unos pocos gramos de mineral, dentro de la botella (picnómetro) y se pesa con su tapón ( $P_2$ ).
3. Se agrega agua hasta la mitad de la botella (interesa que el mineral quede cubierto por el líquido).
4. Se introduce el picnómetro, sin tapón dentro de una cámara de vacío, con el fin de eliminar el aire atrapado por el mineral (tiempo aprox. 3 a 5 min.).
5. Se completa el volumen con agua hasta que salga por el capilar y se pesa ( $P_3$ ).
6. Se efectúa la última pesada ( $P_4$ ) después de vaciar la botella y volver a llenarla solamente con agua.



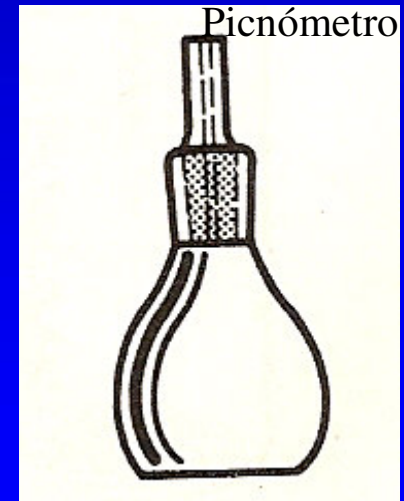
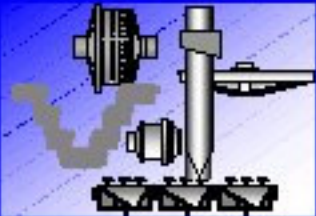
## Pulpas mineralúrgicas

La densidad se determina mediante la relación:

$$\delta_m = \frac{\delta_l (p_2 - p_1)}{(p_4 + p_2) - (p_1 + p_3)}$$

$\delta_m$  y  $\delta_l$  son la densidad del mineral y del agua respectivamente.

La densidad del líquido (agua) es función de la temperatura y se obtiene de tablas, determinando previamente la temperatura (promedio). Bibliografía: Perry, Manual de Ing. Química.

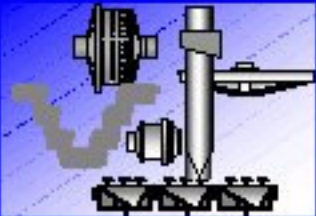


## Pulpas mineralúrgicas

≈ Métodos batch de medición de la densidad de pulpa ( $\rho_T$ )

- Medición directa:

$$\rho_T = \frac{M_T}{V_T} = \frac{M_S + M_L}{V_S + V_L} = \frac{M_S + \rho_L V_L}{V_S + V_L}$$



## *Pulpas mineralúrgicas*

- Balanza de Marcy

Equipo utilizado en plantas de procesamiento de minerales como control de densidades de pulpa. La balanza utiliza un recipiente de volumen conocido, 1000 cm<sup>3</sup>, el que sirve para contener la pulpa cuya densidad se va a medir. Se puede leer directamente, a partir de la escala de lectura calibrada de fábrica, la densidad de la pulpa, o bien, conocida la densidad del sólido se puede conocer la concentración de sólidos en peso,  $C_p$ .

