

# Operaciones Unitarias 1

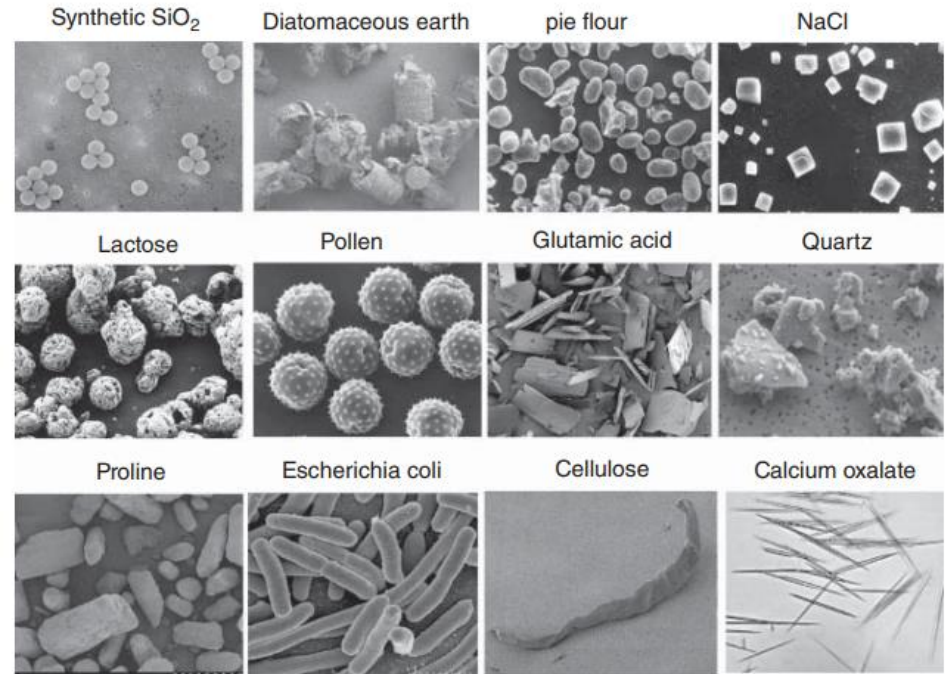
## Caracterización de sistemas particulados

# Caracterización de partículas

Los sistemas fluidos son caracterizados por su composición, temperatura y presión; ello define propiedades termofísicas relevantes como densidad, viscosidad, conductividad térmica y difusividad molecular.

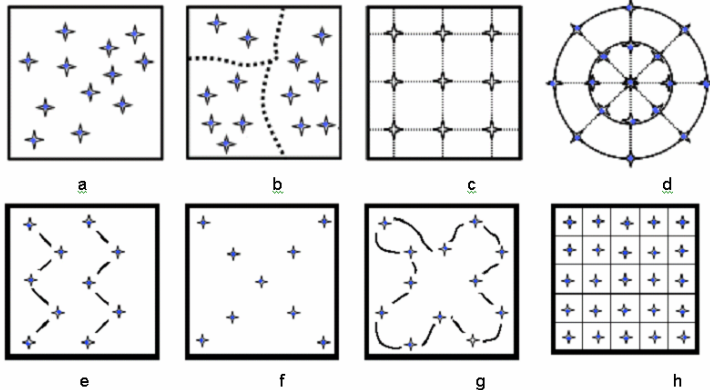
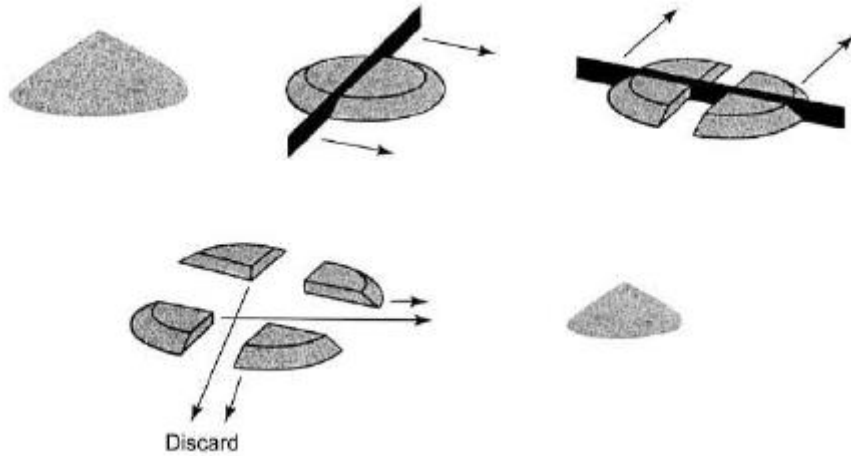
La caracterización de los sistemas particulados es más compleja: composición, tamaño, forma densidad, comportamiento mecánico (respuesta ante esfuerzos aplicados). El tamaño de partícula afecta la forma en que esta interacciona con otras partículas o con un fluido

Las operaciones industriales manejan grandes cantidades de partículas, por lo que la caracterización del sistema es del conjunto y no individual. La misma se basa en la distribución de la propiedad alrededor de cantidades medias

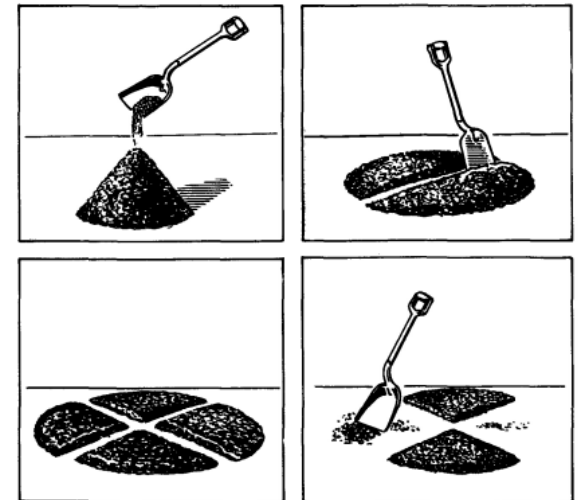


# Caracterización de los sistemas particulados muestreo

La obtención de información y su confiabilidad depende fuertemente de las técnicas de muestreo



a) aleatorio simple ; b) aleatorio estratificado; c) sistemática rejilla rectangular; d) sistemática rejilla polar; e) zig – zag; f) diagonal; g) circular; h) grilla



# Caracterización de partículas densidad

Hay tres tipos de densidad asociados con las partículas:

a) la densidad del sólido propiamente dicha,  $\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$ , densidad de una única partícula sólida.  $V_s$ : volumen ocupado por el solido

b) La densidad de partícula  $\rho_p = \frac{m_s}{V_s + V_v}$  (estructura o esqueleto), la densidad de la partícula porosa.

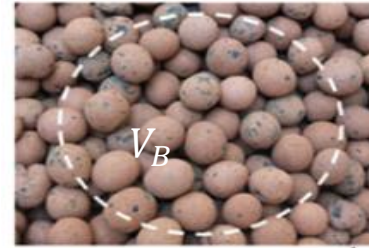
Relacionada a la porosidad  $\varepsilon = \frac{V_v}{V_s + V_v} \rightarrow (1 - \varepsilon) = \frac{V_s}{V_s + V_v}$ .

$V_v$ : volumen ocupado por el poro interno.

c) La densidad aparente, (*bulk density*)  $\rho_B = \frac{m_s}{V_v + V_B + V_s}$  que corresponde a un conjunto de partículas acomodadas libremente. Puede medirse asociada a la concentración volumétrica  $C = \frac{V_s}{V_v + V_B + V_s}$ .  $V_B$ : volumen inter partícula

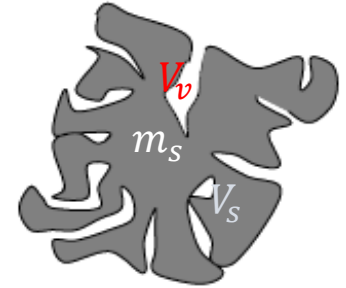
$$\rho_p = \rho_s(1 - \varepsilon) = 2522 \text{ kg.m}^{-3}; \rho_B = \rho_s C = 2054 \text{ kg.m}^{-3}$$

a)  $\rho_s = 2600 \text{ kg.m}^{-3}$

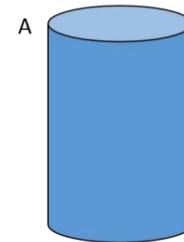


c)  $C = 79\%$

b)  $\varepsilon = 3\%$

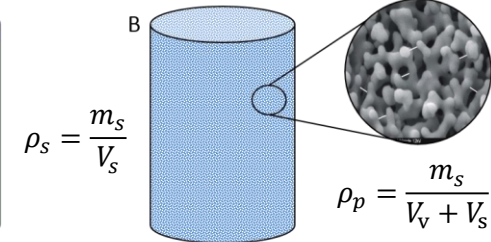


Solido no poroso

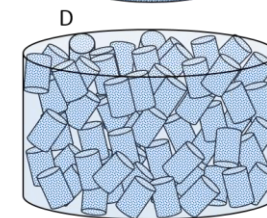
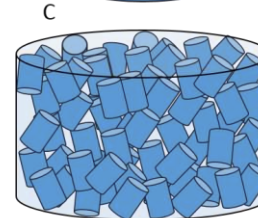


$$\rho_B = \frac{m_s}{V_B + V_s}$$

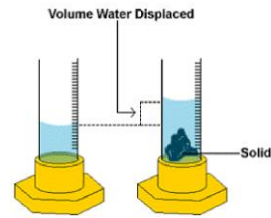
Solido poroso



$$\rho_p = \frac{m_s}{V_v + V_s}$$

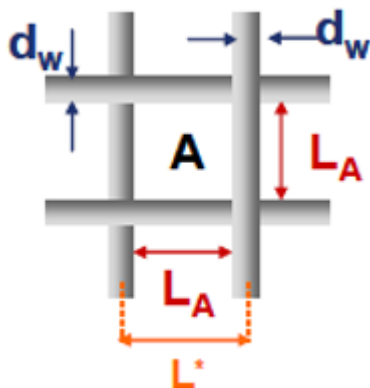


$$\rho_B = \frac{m_s}{V_v + V_B + V_s}$$



## Tamaño o malla de partículas Tamices analíticos

MESH (malla) es una medida del tamaño de partícula; es utilizada en la determinación de la distribución del tamaño de partícula de un material granular



$$Nro. MESH = \frac{1}{L^*} [in] ; Nro. MESH = \frac{25,4}{L^*} [mm]$$

$$L^* = \frac{25,4}{MESH} = L_A + d_W [mm]$$

El área libre de una malla es:  $A_0 = \frac{\text{área vacío}}{\text{área total}} 100$

$$A_0 = \frac{L_A^2}{(L_A + d_W)^2} 100 = \left(1 - \frac{MESH d_W}{25,4}\right)^2 100$$

Si el tamiz forma un ángulo  $\theta$  con la horizontal:

$$A_e = A_0 \cos \theta$$

## Escala de tamices estándar Tyler

Esta escala de tamices está basada en una abertura de 0.0029 in., que es la abertura del tamiz estándar de 200 mallas y 0.0021 in. de diámetro de alambre, tal como ha sido adoptada por el National Bureau of Standard.

Mallas	Abertura efectiva, in.	Abertura efectiva, mm	Abertura aproximada, in.	Diámetro del alambre, in.
	1.050	26.67	1	0.148
†	0.883	22.43	2	0.135
	0.742	18.85	3	0.135
†	0.624	15.85	4	0.120
	0.525	13.33	5	0.105
†	0.441	11.20	6	0.105
	0.371	9.423	7	0.092
2½†	0.312	7.925	8	0.088
3	0.263	6.680	9	0.070
3½†	0.221	5.613	10	0.065
4	0.185	4.699	12	0.065
5†	0.156	3.962	14	0.044
6	0.131	3.327	16	0.036
7†	0.110	2.794	18	0.0328
8	0.093	2.362	20	0.032
9†	0.078	1.981	22	0.033
10	0.065	1.651	24	0.035
12†	0.055	1.397	28	0.028
14	0.046	1.168	32	0.025
16†	0.0390	0.991	36	0.0235
20	0.0328	0.833	40	0.0172
24†	0.0276	0.701	44	0.0141
28	0.0232	0.589	48	0.0125
32†	0.0195	0.495	50	0.0118
35	0.0164	0.417	54	0.0122
42†	0.0138	0.351	60	0.0100
48	0.0116	0.295	63	0.0092
60†	0.0097	0.246	66	0.0070
65	0.0082	0.208	70	0.0072
80†	0.0069	0.175	75	0.0056
100	0.0058	0.147	80	0.0042
115†	0.0049	0.124	84	0.0038
150	0.0041	0.104	90	0.0026
170†	0.0035	0.088	96	0.0024
200	0.0029	0.074	100	0.0021
270	0.0021	0.053	105	0.0024
325	0.0017	0.044	110	0.0021

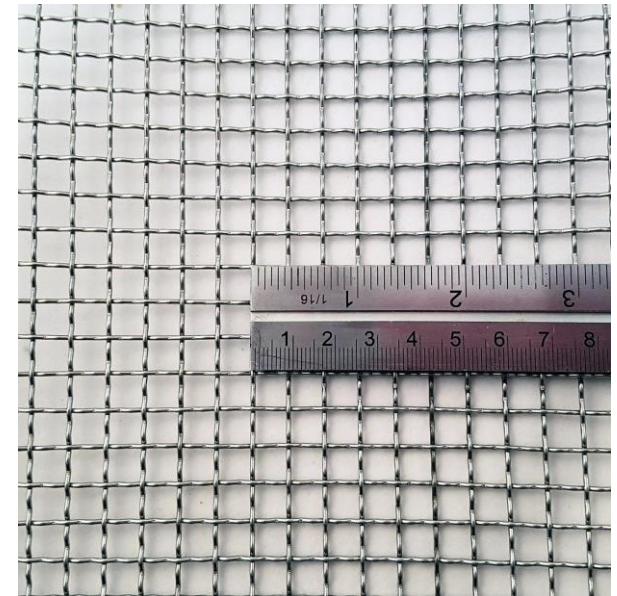
\*Estos tamices se incluyen cuando se desea un intervalo de tamizado más estrecho, completando la serie estándar utilizada habitualmente. Con esta inclusión, la relación de los diámetros de las aberturas entre dos tamices sucesivos es de  $1:\sqrt{2}$  en vez de  $1:\sqrt{2}$ .

## Tamaño o malla de partículas Tamices analíticos

El número de malla (US estándar) está relacionado con el tamaño de las aberturas en la malla y, por lo tanto, el tamaño de las partículas que pueden pasar a través de estas aberturas. Debe contarse el número de aberturas en una pulgada lineal de pantalla. Este recuento es el número de malla.

Un tamiz #3 significa que hay tres aberturas cuadradas en una pulgada lineal. Un tamiz #100 tiene 100 aberturas por pulgada lineal y así sucesivamente.

A medida que aumenta el número que indica el tamaño de la malla, disminuye el tamaño de las aberturas y, por lo tanto, el tamaño de las partículas retenidas. Números de malla más altos = tamaños de partículas más pequeños.



# Tamaño o malla de partículas Tamices analíticos; interpretación de diámetros

Malla Tyler #A<#B  $D_{p,A} > D_{p,B}$

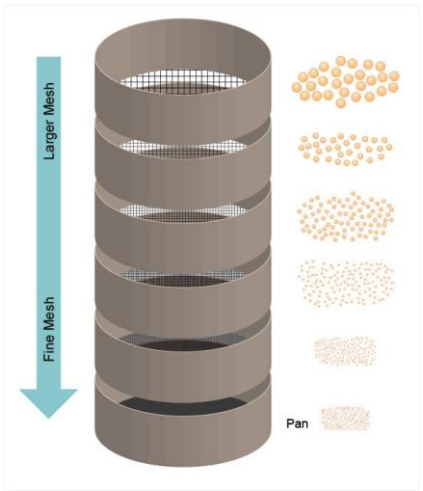
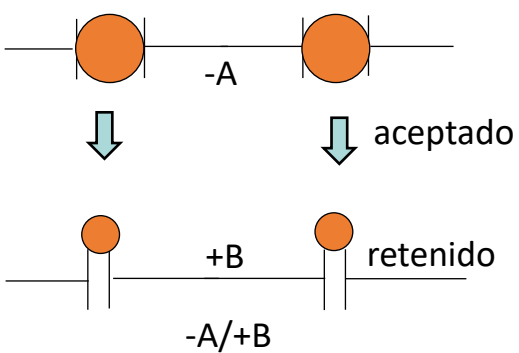


TABLE 19-6 U.S. Sieve Series and Tyler Equivalents (ASTM—E-11-61)

Sieve designation		Sieve opening		Nominal wire diam.		Tyler equivalent designation
Standard	Alternate	mm	in (approx. equivalents)	mm	in (approx. equivalents)	
107.6 mm	4.24 in	107.6	4.24	6.40	0.2520	
101.6 mm	4 in†	101.6	4.00	6.30	.2480	
90.5 mm	3½ in	90.5	3.50	6.08	.2394	
76.1 mm	3 in	76.1	3.00	5.80	.2283	
64.0 mm	2½ in	64.0	2.50	5.50	.2165	
53.8 mm	2.12 in	53.8	2.12	5.15	.2028	
50.8 mm	2 in†	50.8	2.00	5.05	.1988	
45.3 mm	1¾ in	45.3	1.75	4.85	.1909	
38.1 mm	1½ in	38.1	1.50	4.59	.1807	
32.0 mm	1¼ in	32.0	1.25	4.23	.1665	
26.9 mm	1.06 in	26.9	1.06	3.90	.1535	1.050 in
25.4 mm	1 in†	25.4	1.00	3.80	.1496	
22.6 mm*	¾ in	22.6	0.875	3.50	.1378	0.883 in
19.0 mm	¾ in	19.0	.750	3.30	.1299	.742 in
16.0 mm*	¾ in	16.0	.625	3.00	.1181	.624 in
13.5 mm	0.530 in	13.5	.530	2.75	.1083	.525 in
12.7 mm	½ in†	12.7	.500	2.67	.1051	
11.2 mm*	½ in	11.2	.438	2.45	.0965	.441 in
9.51 mm	¾ in	9.51	.375	2.27	.0894	.371 in
8.00 mm*	¾ in	8.00	.312	2.07	.0815	2½ mesh
6.73 mm	0.265 in	6.73	.265	1.87	.0736	3 mesh
6.35 mm	¼ in†	6.35	.250	1.82	.0717	
5.66 mm*	No. 3½	5.66	.223	1.68	.0661	3½ mesh
4.76 mm	No. 4	4.76	.187	1.54	.0606	4 mesh
4.00 mm*	No. 5	4.00	.157	1.37	.0539	5 mesh
3.36 mm	No. 6	3.36	.132	1.23	.0484	6 mesh
2.83 mm*	No. 7	2.83	.111	1.10	.0430	7 mesh
2.38 mm	No. 8	2.38	.0937	1.00	.0394	8 mesh
2.00 mm*	No. 10	2.00	.0787	0.900	.0354	9 mesh
1.68 mm	No. 12	1.68	.0661	.810	.0319	10 mesh
1.41 mm*	No. 14	1.41	.0555	.725	.0285	12 mesh
1.19 mm	No. 16	1.19	.0469	.650	.0256	14 mesh
1.00 mm*	No. 18	1.00	.0394	.580	.0228	16 mesh
841 micron	No. 20	0.841	.0331	.510	.0201	20 mesh
707 micron*	No. 25	.707	.0278	.450	.0177	24 mesh
595 micron	No. 30	.595	.0234	.390	.0154	28 mesh
500 micron*	No. 35	.500	.0197	.340	.0134	32 mesh
420 micron	No. 40	.420	.0165	.290	.0114	35 mesh
354 micron*	No. 45	.354	.0139	.247	.0097	42 mesh
297 micron	No. 50	.297	.0117	.215	.0085	48 mesh
250 micron*	No. 60	.250	.0098	.180	.0071	60 mesh
210 micron	No. 70	.210	.0083	.152	.0060	65 mesh
177 micron*	No. 80	.177	.0070	.131	.0052	80 mesh
149 micron	No. 100	.149	.0059	.110	.0043	100 mesh
125 micron*	No. 120	.125	.0049	.091	.0036	115 mesh
105 micron	No. 140	.105	.0041	.076	.0030	150 mesh
88 micron*	No. 170	.088	.0035	.064	.0025	170 mesh
74 micron	No. 200	.074	.0029	.053	.0021	200 mesh
63 micron*	No. 230	.063	.0025	.044	.0017	250 mesh
53 micron	No. 270	.053	.0021	.037	.0015	270 mesh
44 micron*	No. 325	.044	.0017	.030	.0012	325 mesh
37 micron	No. 400	.037	.0015	.025	.0010	400 mesh

Convención para caracterizar el tamaño de partícula según malla

"-" indica que las partículas pasan a través del tamiz.

"+" indica que el tamiz retiene las partículas.

Típicamente, el 90% o más de las partículas estarán dentro del rango indicado.

Ejemplo, si el tamaño de partícula de un material se describe como Tyler -4/+35, entonces el 90 % o más del material pasará a través de un tamiz # 4 (partículas menores de 4,76 mm) y será retenido por un tamiz # 35. (partículas mayores de 0,420 mm). Tyler -4/+35 significa: "a través de malla 4 pero retenido por malla 35"

\*These sieves correspond to those proposed as an international (I.S.O.) standard. It is recommended that wherever possible these sieves be included in all sieve analysis data or reports intended for international publication.  
 †These sieves are not in the fourth-root-of-2 series, but they have been included because they are in common usage.

# Tamaño o malla de partículas Tamices analíticos; normas aplicables

British Fine Mesh (BSS 410) <sup>4</sup>			IMM <sup>5</sup>			U.S. Tyler <sup>6</sup>			U.S. ASTM <sup>5</sup>		
Sieve No.	Nominal Aperture		Sieve No.	Nominal Aperture		Sieve No.	Nominal Aperture		Sieve No.	Nominal Aperture	
	in.	µm		in.	µm		in.	µm		in.	µm
						325	0.0017	43	325	0.0017	44
						270	0.0021	53	270	0.0021	53
300	0.0021	53				250	0.0024	61	230	0.0024	61
240	0.0026	66	200	0.0025	63	200	0.0029	74	200	0.0029	74
200	0.0030	76							170	0.0034	88
170	0.0035	89	150	0.0033	84	170	0.0035	89			
150	0.0041	104				150	0.0041	104	140	0.0041	104
120	0.0049	124	120	0.0042	107	115	0.0049	125	120	0.0049	125
100	0.0060	152	100	0.0050	127	100	0.0058	147	100	0.0059	150
			90	0.0055	139	80	0.0069	175	80	0.0070	177
85	0.0070	178	80	0.0062	157	65	0.0082	208	70	0.0083	210
			70	0.0071	180				60	0.0098	250
72	0.0083	211	60	0.0083	211	60	0.0097	246	50	0.0117	297
60	0.0099	251							45	0.0138	350
52	0.0116	295	50	0.0100	254	48	0.0116	295	40	0.0165	420
			40	0.0125	347	42	0.0133	351	35	0.0197	500
44	0.0139	353				35	0.0164	417	30	0.0232	590
36	0.0166	422	30	0.0166	422	32	0.0195	495			
30	0.0197	500				28	0.0232	589			
25	0.0236	600									
22	0.0275	699	20	0.0250	635	24	0.0276	701	25	0.0280	710
18	0.0336	853	16	0.0312	792	20	0.0328	833	20	0.0331	840
16	0.0395	1003				16	0.0390	991	18	0.0394	1000
14	0.0474	1204	12	0.0416	1056	14	0.0460	1168	16	0.0469	1190
12	0.0553	1405	10	0.0500	1270	12	0.0550	1397			
10	0.0660	1676	8	0.0620	1574	10	0.0650	1651	14	0.0555	1410
8	0.0810	2057				9	0.0780	1981	12	0.0661	1680
7	0.0949	2411				8	0.0930	2362	10	0.0787	2000
6	0.1107	2812	5	0.1000	2540	7	0.1100	2794	8	0.0937	2380
5	0.1320	3353				6	0.1310	3327			
						5	0.1560	3962	7	0.1110	2839
						4	0.1850	4699			
									6	0.1320	3360
									5	0.1570	4000
									4	0.1870	4760





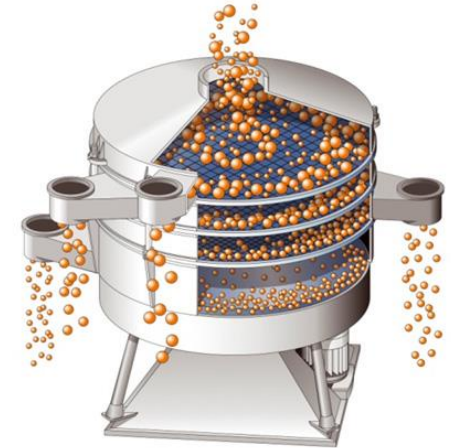
## Tamaño o malla de partículas Tamices analíticos; análisis

La distribución de partículas en un sistema granular, puede ser analizada por: distribución de tamaño, de masa o de superficie.

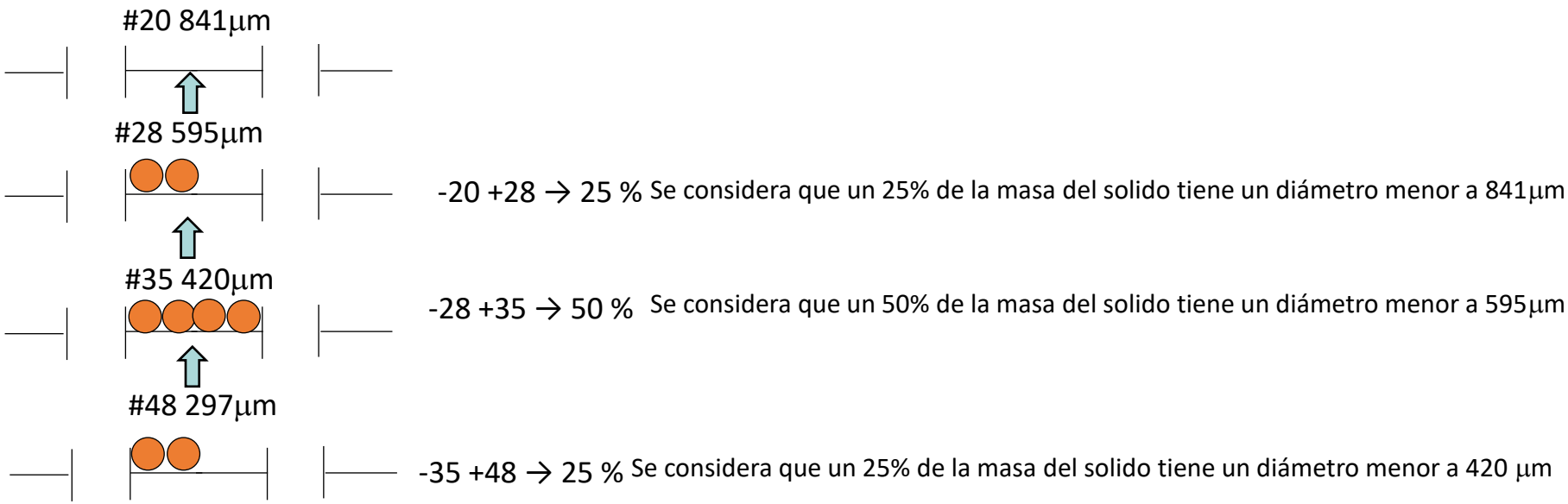
El tamizado o prueba de gradación es comúnmente utilizado para obtener la distribución de partículas gruesas ( $>50 \mu m$ ).

La muestra se coloca en la parte superior de una pila o nido de tamices, con tamaños de malla que disminuyen con la altura en la pila, y el dispositivo se agita.

Se pesa cada tamiz, de modo que el resultado es una distribución de la masa de partículas con diámetros entre cada tamaño de tamiz.



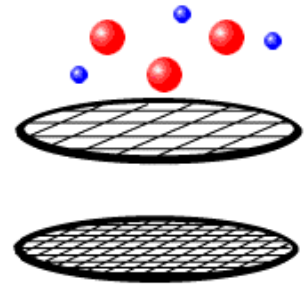
# Tamaño o malla de partículas Tamices analíticos; criterio de adjudicación de diámetros según análisis



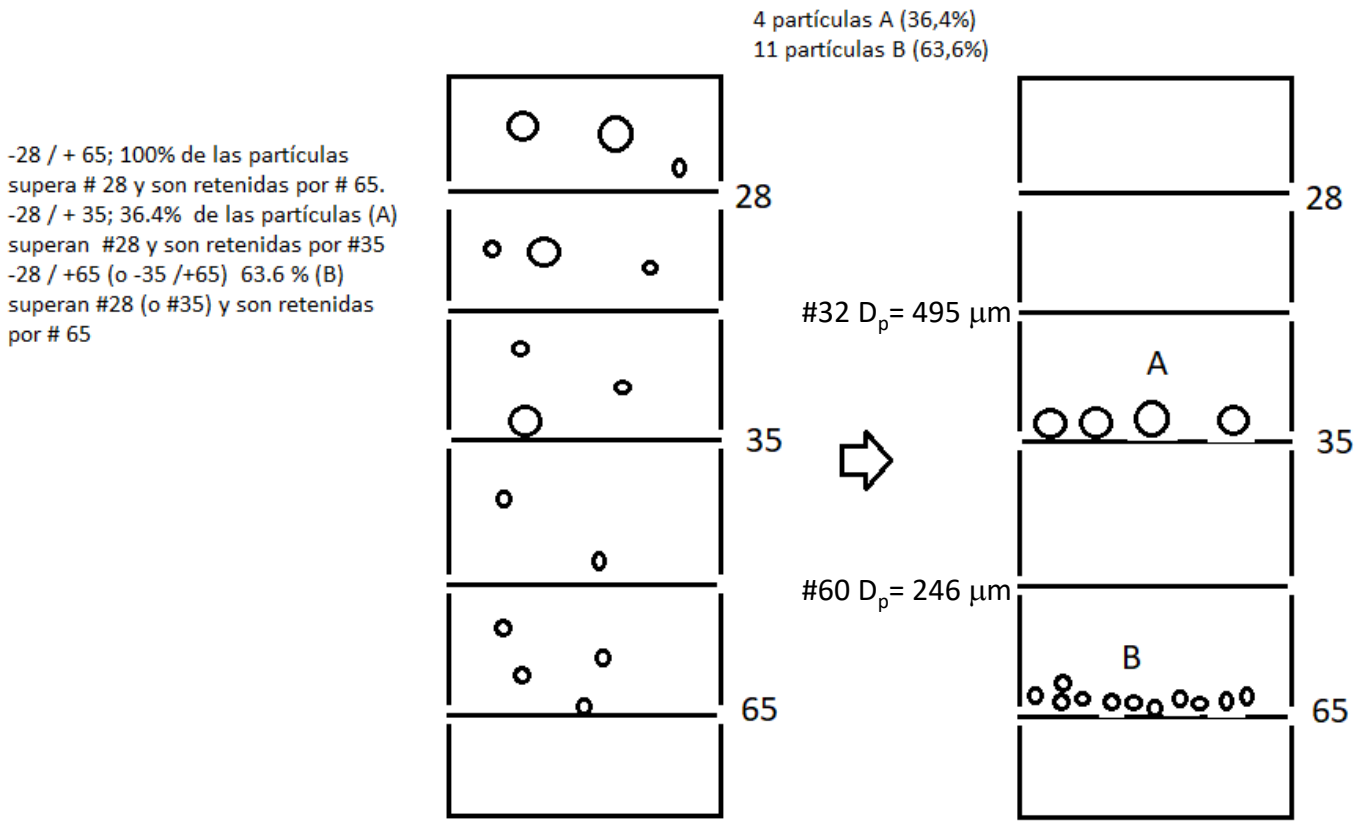
En consecuencia :  $D_{p\ inf} = 297\ \mu m$  (#48) y  $D_{p\ sup} = 841\ \mu m$  (#20)

Consideraciones de tamaño:

- Partículas grandes  $D_p \geq 1000\ \mu m$
- Partículas intermedias  $40\ \mu m \leq D_p < 1000\ \mu m$
- Partículas pequeñas  $40\ \mu m > D_p$



# Tamaño o malla de partículas Tamices analíticos; criterio de adjudicación de diámetros según análisis



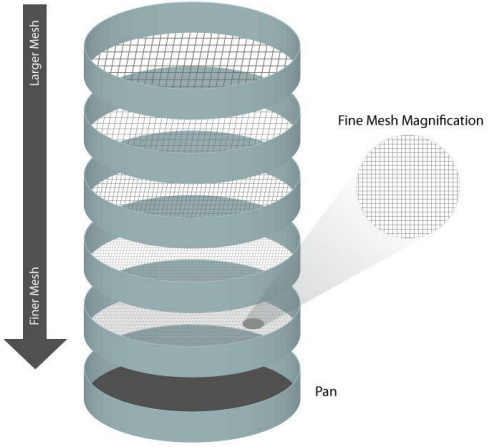
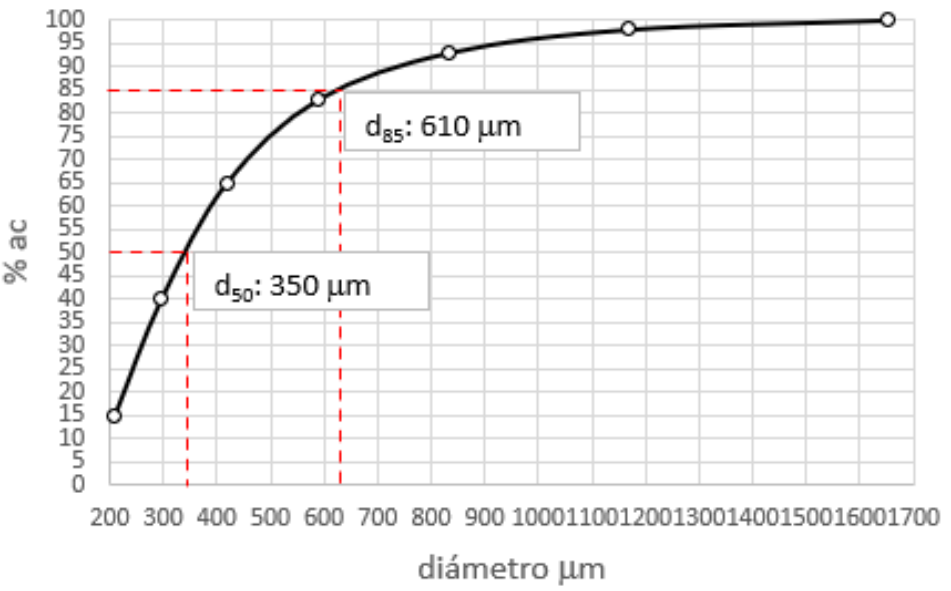
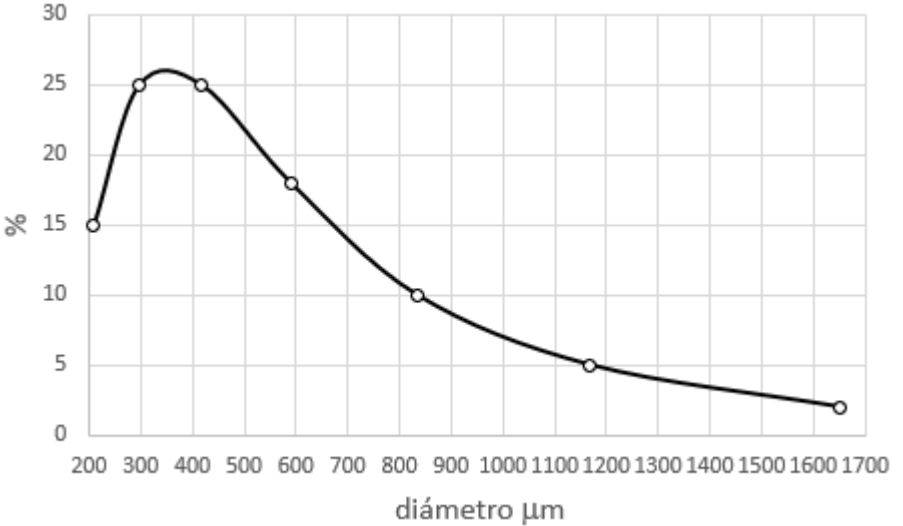
La convención (-) significa que supera, es aceptado; (+) que retiene; en la escala Tyler se adopta para el diámetro A, el inmediato superior a #35 (#32, 495  $\mu\text{m}$ ); se adopta para el diámetro B el inmediato superior a #65 (#60, 246  $\mu\text{m}$ ). El rango de diámetros será  $246 \mu\text{m} < D_p < 495 \mu\text{m}$

# Tamaño o malla de partículas Tamices analíticos; determinación de diámetros

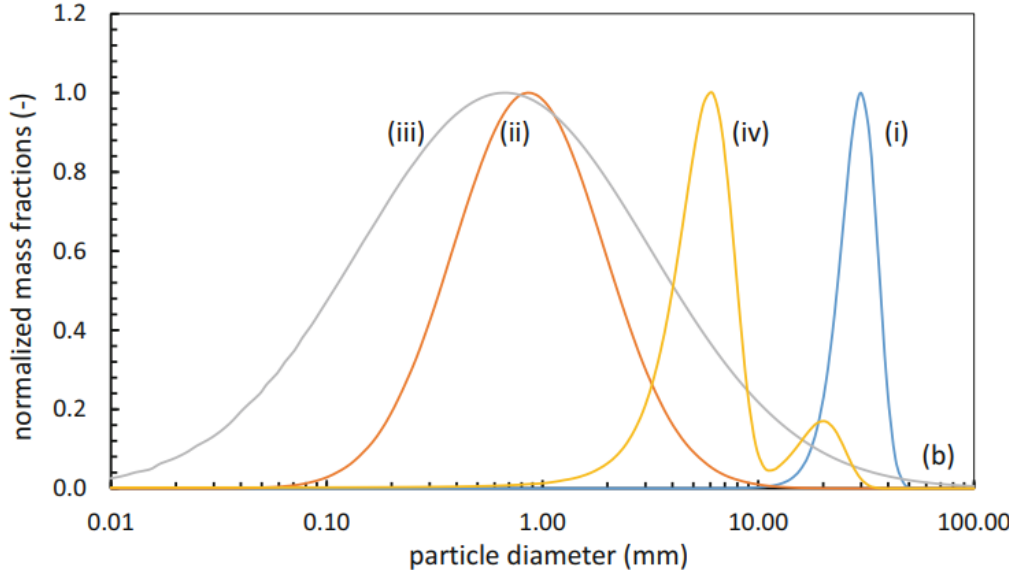
Rango de #	mm	% (w/w)	% acumulado
-#10 ;+#14	1651	2	100
-#14 ;+#20	1168	5	98
-#20 ;+#28	833	10	93
-#28 ;+#35	589	18	83
-#35 ;+#48	417	25	65
-#48 ;+#65	295	25	40
-#65	208	15	15

$d_{50}$  representa el tamaño de partícula en el que el 50% de las partículas (en masa) son más pequeñas

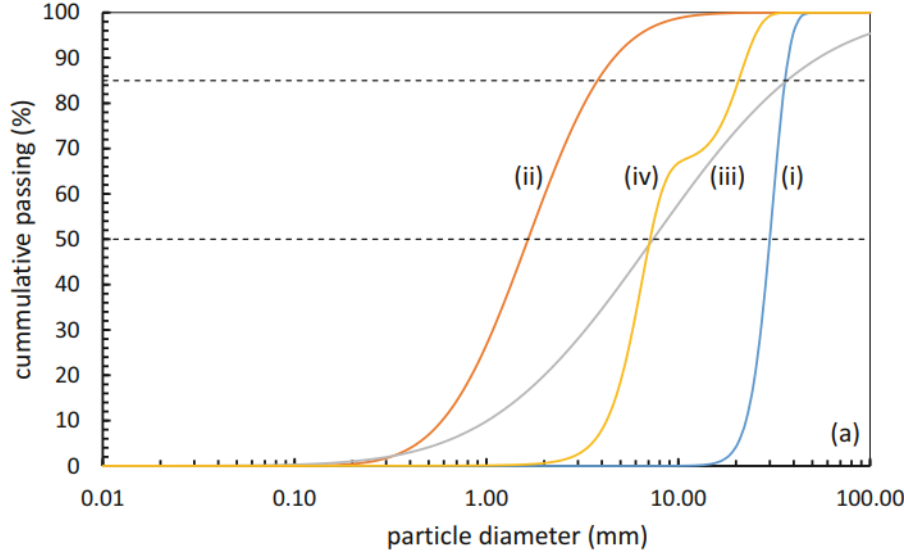
$d_{85}$  representa el umbral análogo del 85%.



# Tamaño o malla de partículas Tamices analíticos; *particle size distribution PSD*

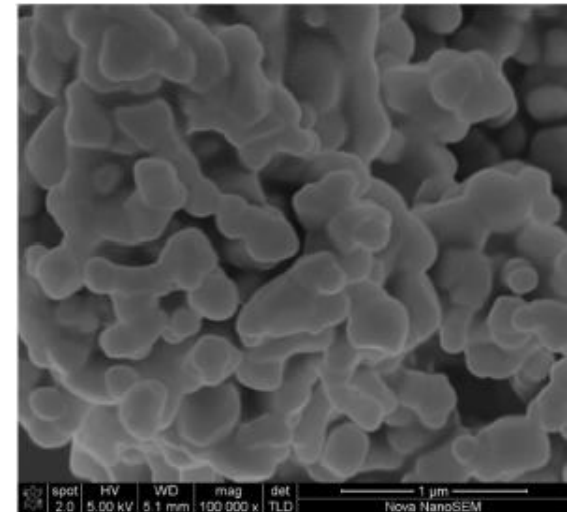
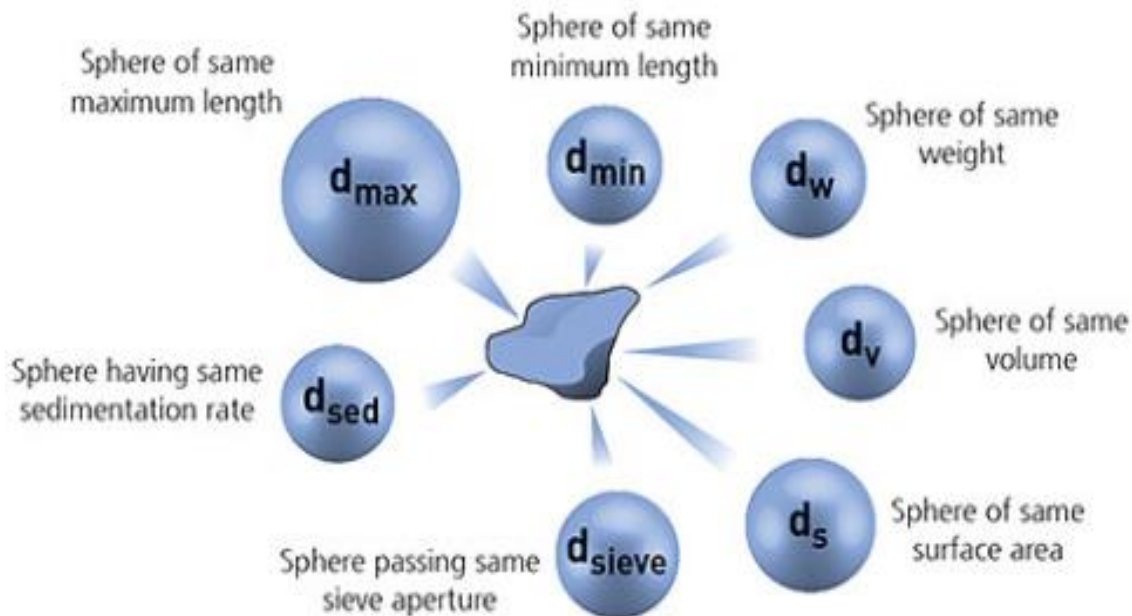


Las distribuciones "estrechas" son aquellas en las que la mayor parte de las partículas caen dentro de un rango de tamaño pequeño; las distribuciones "amplias" se extienden como un rango más grande; las distribuciones "bimodales" contienen dos grupos separados de partículas de tamaño similar separadas por un rango de tamaño con relativamente menos partículas.



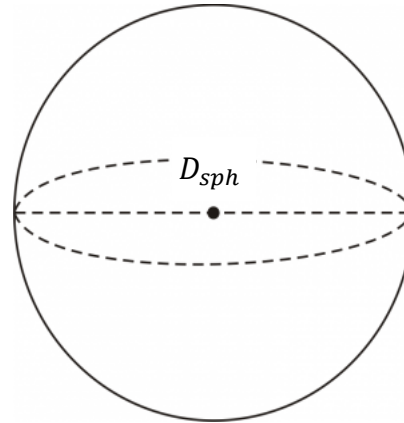
## Caracterización de partículas tamaño, diámetro

- Una pregunta obvia es: ¿Cuál es el diámetro de partícula? Su respuesta no es simple. La mayoría de los materiales tienen una forma muy irregular.
- En ingeniería es siempre deseable realizar cálculos usando el diámetro; por lo tanto, se requiere una base simple para describir la partícula de forma irregular que se puede utilizar en la comunicación y los cálculos.
- Este es el origen del concepto de diámetro esférico equivalente, en el que alguna propiedad física de la partícula está relacionada con una esfera que tendría la misma propiedad, p. ejemplo, el volumen



## Caracterización de partículas tamaño, diámetro, área, volumen de una esfera

Característica geométrica de una esfera	Ecuación
Circunferencia	$\pi D_{sph}$
Área superficial	$\pi D_{sph}^2$
Área proyectada	$\pi \frac{D_{sph}^2}{4}$
Volumen	$\pi \frac{D_{sph}^3}{6}$



### Superficie específica de una esfera

$$S_{Vsph} = \frac{Sup\ sph}{Vol\ sph} = \frac{\pi D_{sph}^2}{\pi \frac{D_{sph}^3}{6}} = \frac{6}{D_{sph}} \rightarrow D_{sph} = \frac{6}{S_{Vsph}}$$

## Caracterización de partículas tamaño, dimensiones equivalentes

Para partículas no esféricas debe especificarse el tamaño y la forma geométrica del cuerpo, así como, en su interacción con fluidos, su orientación con respecto a su dirección de flujo.

Para una forma de partícula dada, se elige alguna dimensión como la longitud característica y las demás dimensiones se asocian a la magnitud elegida. Una elección común es el diámetro equivalente.

Diámetro de una esfera de volumen equivalente ( $D_V$ ):  $V_{sph} = \pi \frac{D_{sph}^3}{6} \rightarrow D_{sph} = (6V_{sph}/\pi)^{1/3}$

diámetro de una esfera que posee el mismo volumen de la partícula ( $V_p$ ) que se desea caracterizar.  $D_V = (6V_p/\pi)^{1/3}$

Diámetro de una esfera de superficie equivalente ( $D_S$ ):  $S_{sph} = \pi D_{sph}^2 \rightarrow D_{sph} = (S_{sph}/\pi)^{1/2}$

diámetro de una esfera que posee la misma superficie externa de la partícula ( $S_p$ ) que se desea caracterizar.

$$D_S = (S_p/\pi)^{1/2}$$

Diámetro de una esfera de relación  $S_p/V_p$  equivalente; diámetro medio de Sauter ( $D_{SV}$ , SMD,  $d_{32}$ ):

diámetro de una esfera que posee la misma relación de superficie externa ( $S_p$ ) por unidad de volumen ( $V_p$ ) que la partícula que se desea caracterizar:

$$S_{V,p} = \frac{S_p}{V_p} = \pi D_{SV}^2 \frac{6}{\pi D_{SV}^3} \rightarrow \frac{S_p}{V_p} = \frac{6}{D_{SV}} \rightarrow D_{SV} = 6 \frac{V_p}{S_p} = \frac{6}{S_{V,p}} \left. \begin{array}{l} S_p = \pi D_S^2 \\ V_p = \frac{\pi D_V^3}{6} \end{array} \right\} \frac{S_p}{V_p} = 6 \frac{\pi D_S^2}{\pi D_V^3} = 6 \frac{D_S^2}{D_V^3} \rightarrow 6 \frac{V_p}{S_p} = \frac{D_V^3}{D_S^2} = D_{SV} = d_{3,2}$$



## Caracterización de partículas tamaño, factor de forma, esfericidad

La esfericidad es un factor de forma que se define como:

$$\psi = \frac{\text{área superficial esfera con igual volumen que la partícula}}{\text{área superficial de la partícula}}$$

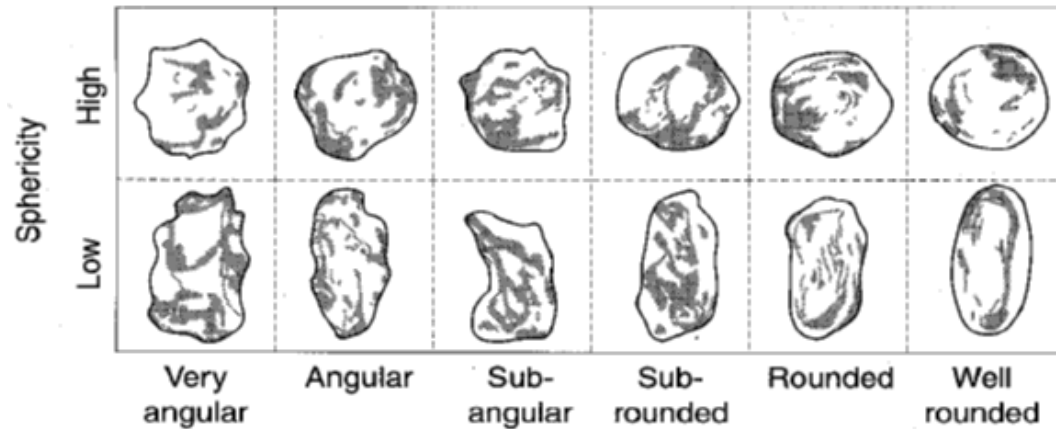
Si  $V_p = \frac{\pi D_V^3}{6} \rightarrow D_V = \left[ \frac{6V_p}{\pi} \right]^{1/3} \rightarrow \pi D_V^2 = \pi \left[ \frac{6V_p}{\pi} \right]^{2/3} = \left[ (6V_p)^2 \pi \right]^{1/3}$  área superficial esfera con igual volumen partícula

$$\psi = \frac{\left[ (6V_p)^2 \pi \right]^{1/3}}{S_p}$$

En términos de  $D_V$  y  $D_S$   $\psi = \frac{S_0}{S_p} = \frac{\pi D_V^2}{\pi D_S^2} = \left( \frac{D_V}{D_S} \right)^2$

$$\left. \begin{array}{l} S_p = \pi D_S^2 \\ V_p = \frac{\pi D_V^3}{6} \end{array} \right\} \frac{S_p}{V_p} = 6 \frac{\pi D_S^2}{\pi D_V^3 D_V} = \frac{6}{D_{SV}} \rightarrow \left( \frac{D_S}{D_V} \right)^2 \frac{1}{D_V} = \frac{1}{D_{SV}} \rightarrow \frac{1}{\psi D_V} = \frac{1}{D_{SV}} \rightarrow D_{SV} = \psi D_V$$

# Caracterización de partículas tamaño, factor de forma, esfericidad



ejemplo de material *rounded* (liso) pero no esférico

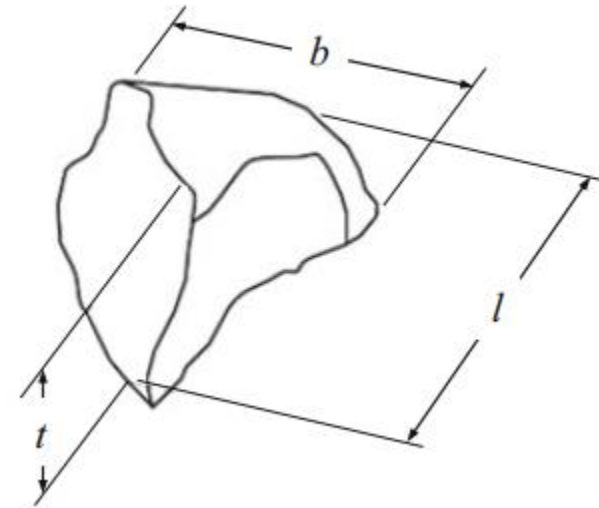
Geometric solids	$\psi$	Irregular solids	$\psi$
Sphere	1	Broken solids	0.63
Octahedron	0.846	Coal, bituminous	0.625
Prisms		Coal, crushed	0.63–0.75
$a \times a \times 2a$	0.767	Coal, pulverized	0.73
$a \times 2a \times 2a$	0.761	Sandstone, crushed	0.8–0.9
$a \times 2a \times 3a$	0.725	Iron catalyst	0.58
Cylinders		Mica	0.28
$h = 2r$	0.874	Salt	0.84
$h = 3r$	0.86	Sand round	0.86
$h = 20r$	0.58	Sand sharp	0.66
Discs		Silica	0.55–0.63
$h = r$	0.827	Sillimanite	0.75
$h = r/3$	0.594	Wheat	0.85
$h = r/15$	0.254		
Cube	0.806		
Cone	0.794		
Hemisphere	0.84		
Dodecahedron	0.91		
Icosahedron	0.939		

## Caracterización de partículas tamaño, factor de forma, estima de la esfericidad

La esfericidad de la partícula a menudo se estima calculando la relación entre el diámetro más pequeño y el diámetro más grande de una partícula:  $t/l$ . Cuanto más cerca esté esta relación del valor de uno, más cerca estará la forma de la partícula de la de una esfera.

$$\psi_{apr} = \frac{\pi(0,928d_G)^2}{0,995SA_{ellip}}$$
$$d_G = [lbt]^{1/3}$$
$$SA_{ellip} = 4\pi \left[ \frac{(lb)^\lambda + (lt)^\lambda + (bt)^\lambda}{3 - 0,0842(1 - 27lbt(l + b + t)^{-3})} \right]^{\frac{1}{\lambda}}$$

$\lambda = 1,5349$



On the characterization of size and shape of irregular particles  
G.H. Bagheri <sup>a,\*</sup>, C. Bonadonna <sup>a</sup>, I. Manzella <sup>a</sup>, P. Vonlanthen <sup>b</sup>

