

CLASE 4. Propiedades de polvos



Propiedades de partícula

Agenda

- Introducción
- Tamaño de partícula
- Forma de partícula
- Densidad de partícula
- Resistencia de partícula
- Composición
- Muestreo

Polvos alimentarios

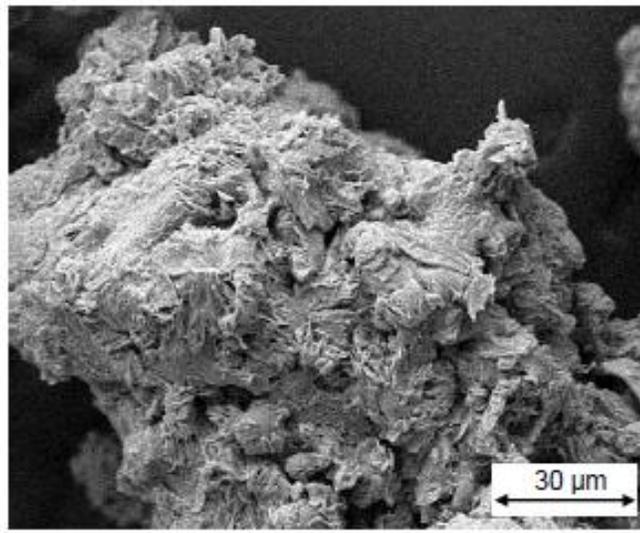
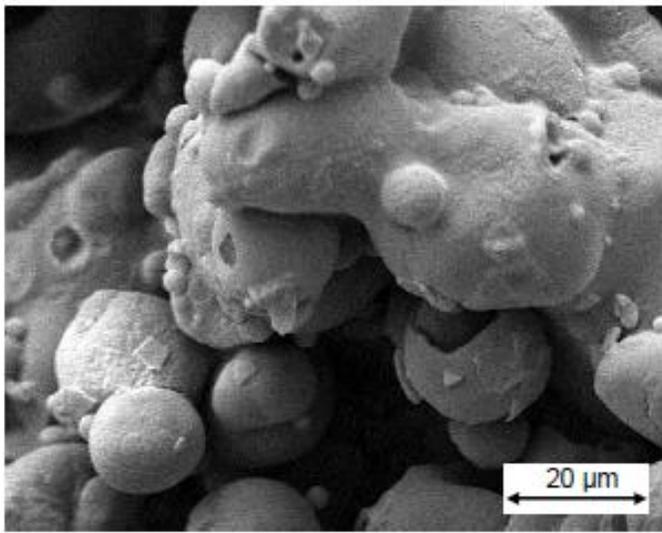


- Muy presentes en la industria alimentaria.
- Son materias primas, ej. harinas, especias, aditivos.
- Son productos terminados, ej. leche en polvo, café instantáneo.
- Se clasifican no solo por su composición o microestructura, sino también por su tamaño de partícula, propiedades químicas y físicas y su funcionalidad.

Polvos alimentarios



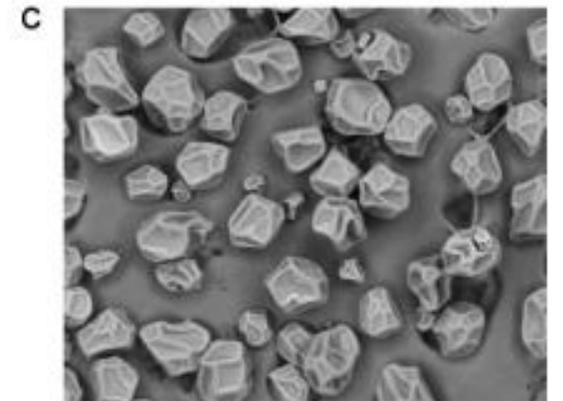
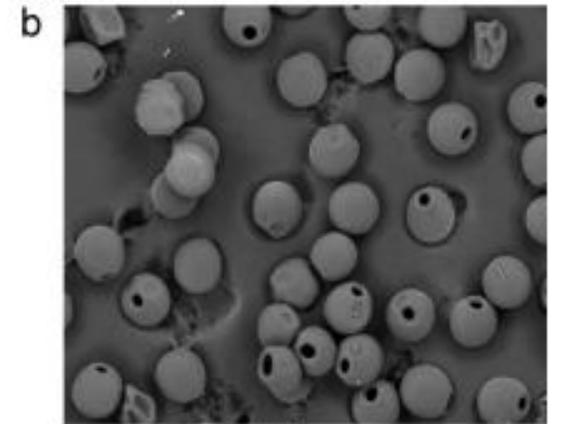
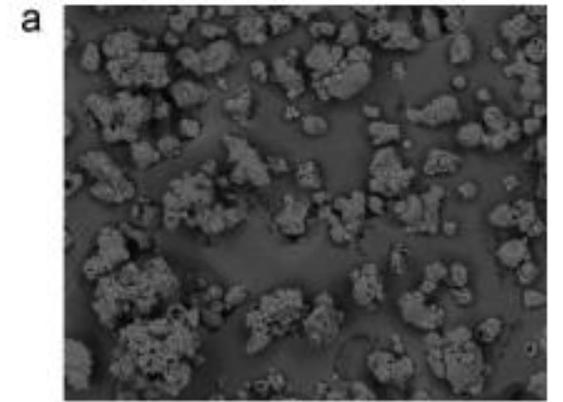
- Un polvo puede considerarse como un sistema disperso de 2 fases, en el que partículas sólidas de distintos tamaños están dispersas en una fase continua gaseosa.
- Para caracterizarlos completamente debemos conocer:
 - Las propiedades de la partícula como una entidad individual.
 - Las propiedades del conjunto de partículas.
 - Las interacciones entre esos conjuntos de partículas y un fluido.



Palzer & Fowler (2010)

Propiedades de partícula

Fang et al. (2012)



Propiedades de partícula

- Incluyen: la distribución de tamaño, la forma, la densidad de partícula, la composición y la estructura interna.
- Hay algunas propiedades, como las fuerzas de interacción, que existen en la interfase de las propiedades de partícula y las propiedades del polvo a granel.



Tamaño de partícula

- Es una de las propiedades de partícula más importantes porque afecta muchos aspectos del comportamiento del polvo a granel (fluidez, rehidratación, compresibilidad).
- ¿Cómo se determina?
- Usualmente se describe como un parámetro unidimensional, pero entonces ¿cómo describe el tamaño de un objeto tridimensional?



Tamaño de partícula

- En la práctica, las partículas que forman un polvo no suelen tener forma esférica perfecta.
- En los polvos alimentarios existen enormes variaciones de forma:
 - Polvos con extrema irregularidad. Ej.: especias molidas.
 - Polvos con formas casi esféricas. Ej. almidón.
 - Polvos con formas cristalinas bien definidas. Ej. azúcar granulado y sal.



Ghodki & Goswami (2016)



Imagen propia

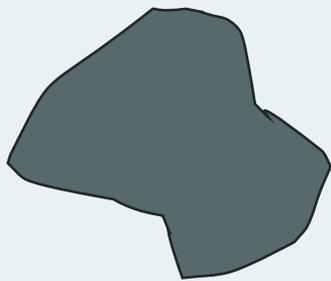


Saputro et al. (2017)

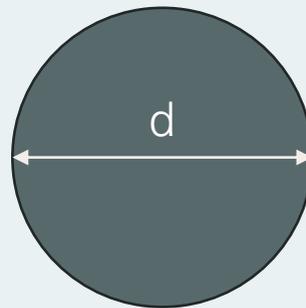
Tamaño de partícula

CONCEPTO DE ESFERA EQUIVALENTE

- Esfera: partícula 3-D
- Sólo se necesita un parámetro 1-D para definir completamente su geometría y tamaño: el diámetro.
- Diámetro de esfera equivalente de una partícula: diámetro de una esfera que tiene el mismo valor de una propiedad de la partícula. Ej.: volumen o el área superficial proyectada.



Partícula

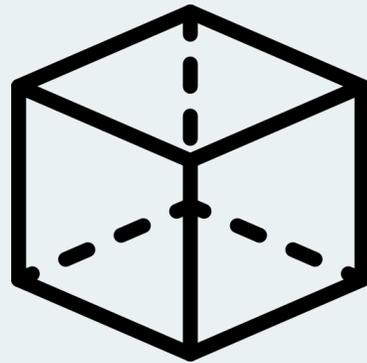


Esfera
equivalente

- ❖ d es el diámetro de volumen esférico equivalente de la partícula: si el volumen de la partícula es igual al de una esfera de diámetro d .
- ❖ d es el diámetro del área esférica proyectada equivalente de la partícula: si el área proyectada de la partícula es igual al área proyectada de una esfera de diámetro d .

Tamaño de partícula

CONCEPTO DE ESFERA EQUIVALENTE



Volumen= 1 unidad³

D volumen= 1,24 unidad³

D área sup.= 1,38 unidad³

D perímetro proy.= 1,27 unidad³

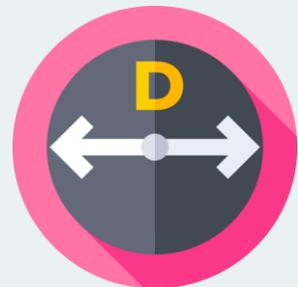
Tamaño de partícula

Distintos instrumentos para medir tamaño de partícula en general miden distintos diámetros equivalentes.

Propiedades más usadas para definir diámetros equivalentes:

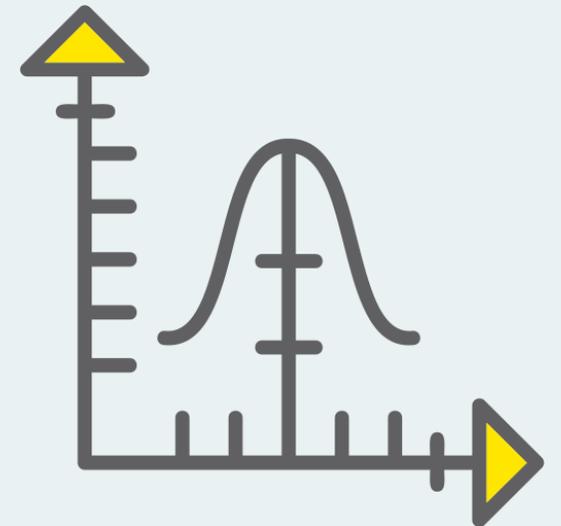
Diámetro esférico equivalente	Propiedad equivalente de esfera y partícula
Masa	Masa
Volumen	Volumen
Área superficial	Área superficial
Área proyectada	Área proyectada en 2-D
Sedimentación	Velocidad terminal en un fluido
Malla (tamiz)	Tamaño de apertura a través del que pasa

Bhandari et al. (2013).



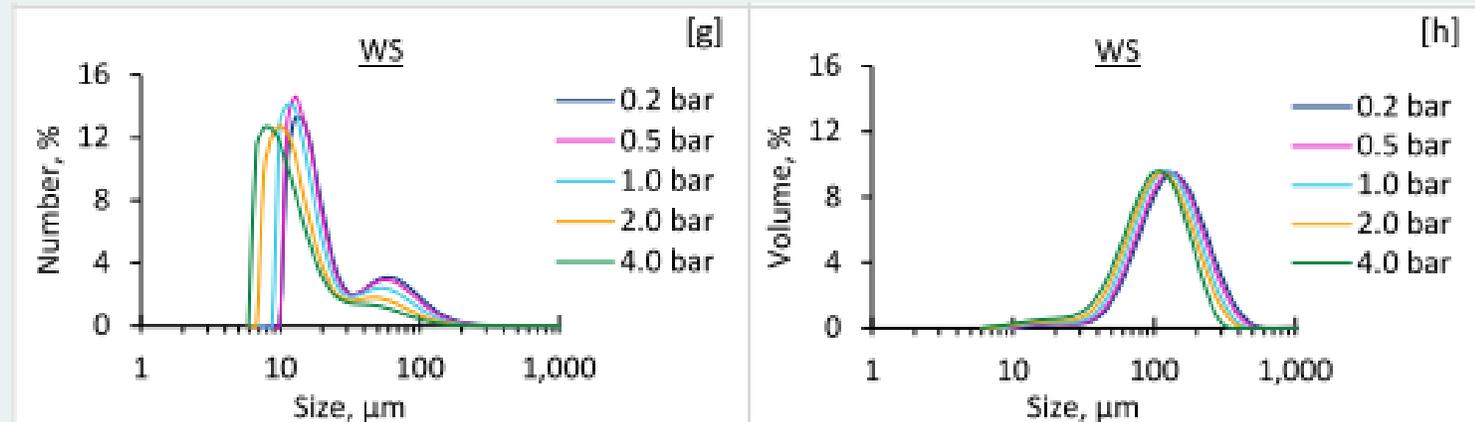
Distribución de tamaño de partícula

- Generalmente no todas las partículas que conforman un polvo tienen el mismo tamaño de partícula.
- Existen distintos tipos de instrumentos para determinar la distribución de tamaño de partícula, que se clasifican:
 1. Tamizado
 2. Técnicas de conteo microscópico
 3. Sedimentación
 4. Difracción laser



Tipos de distribución de tamaño de partícula

- Para cada material particulado existen cuatro tipos distintos de distribución de tamaño de partícula, dependiendo del parámetro medido:
 - Por número: $f_N(x)$
 - Por superficie: $f_S(x)$
 - Por masa (o volumen): $f_M(x)$
 - Por longitud: $f_L(x)$ ❌



Representaciones gráficas de la distribución de tamaño de partícula

Histograma

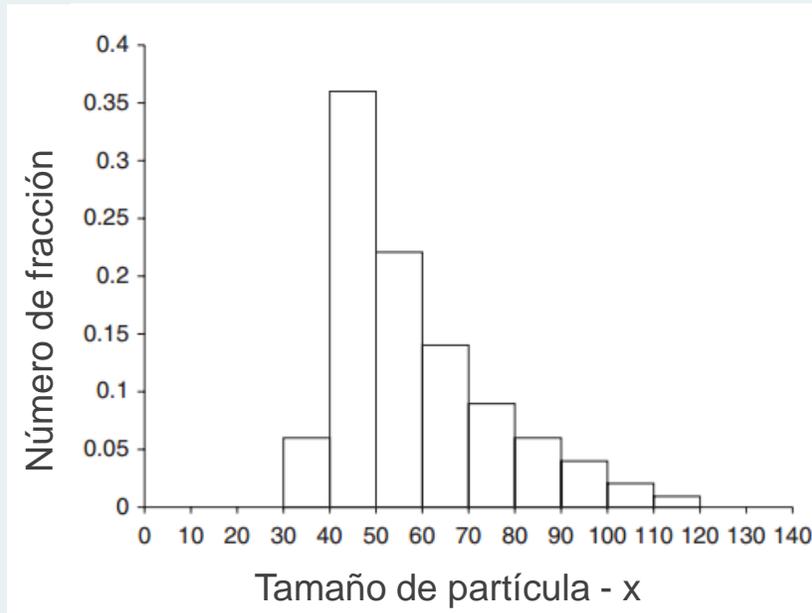


Diagrama acumulativo

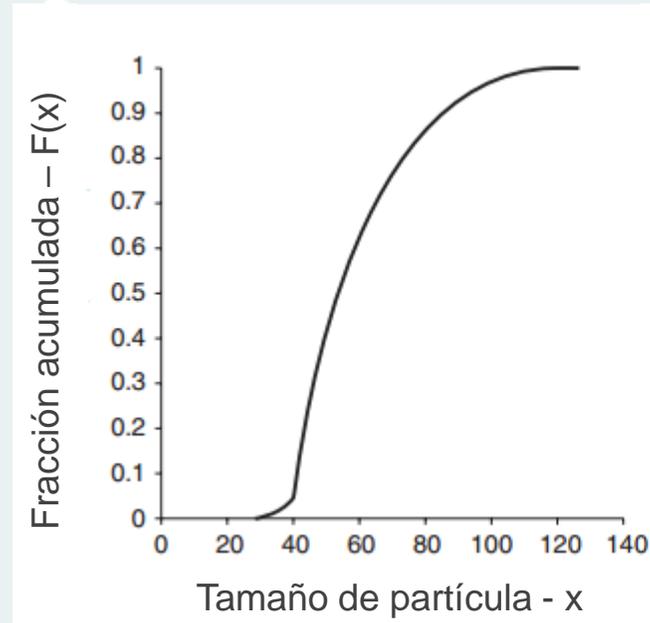
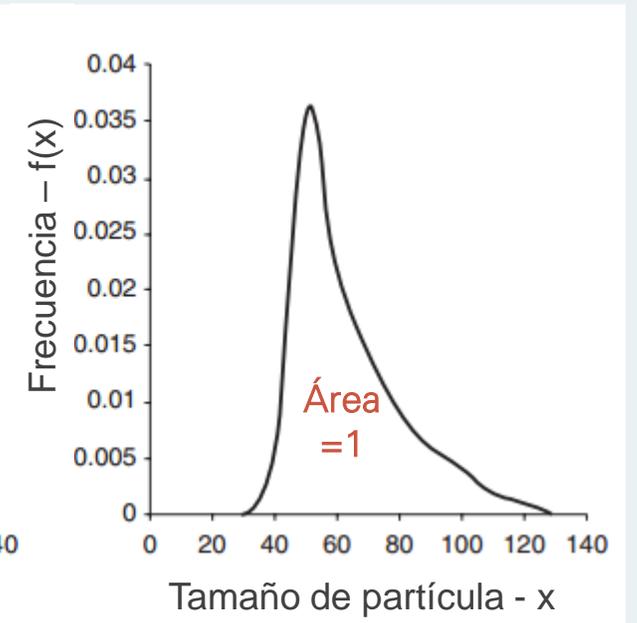


Diagrama continuo



Adaptadas de Bhandari et al. (2013).

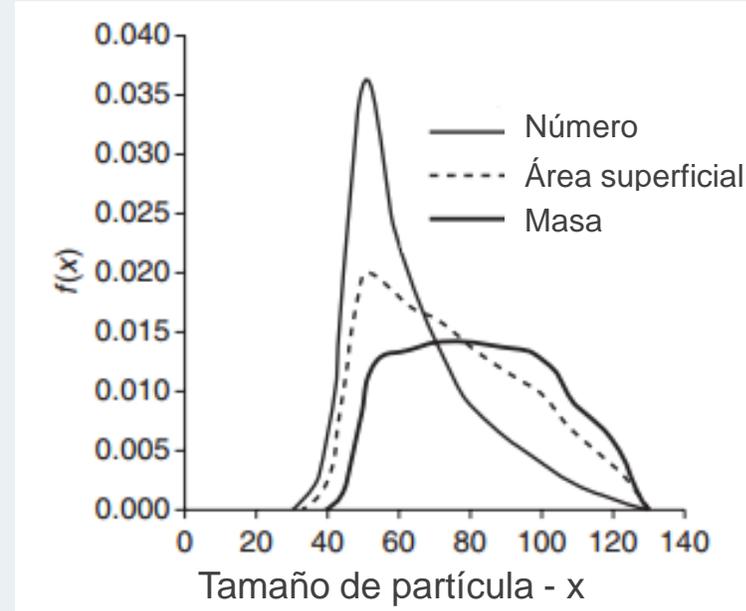
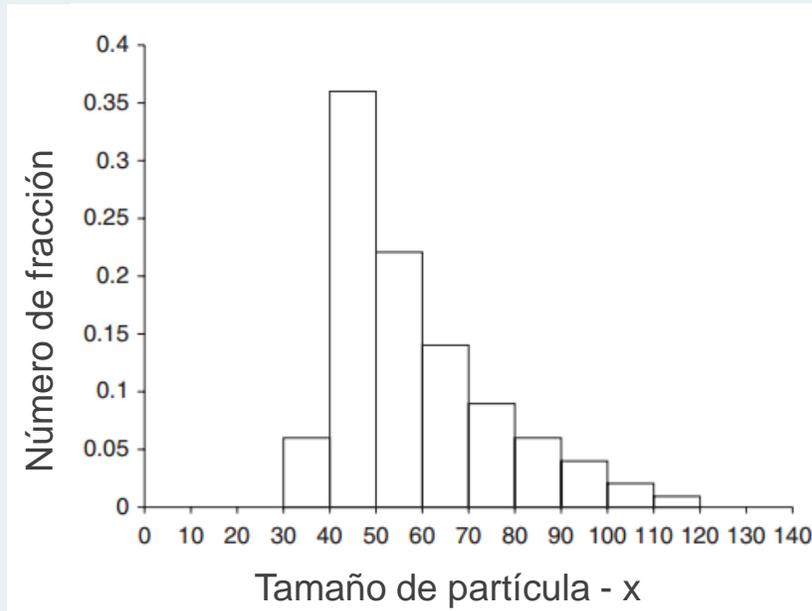
- El área bajo la curva del diagrama continuo = 1.
- El área bajo la curva del diagrama continuo entre: $x=0$ y $x=x$ es igual a $F(X)$

$$f(x) = \frac{dF(x)}{d(x)}$$

$$F(x) = \int_0^x f(x)dx$$

Representaciones gráficas de la distribución de tamaño de partícula

Histograma



! Solo se pueden comparar distribuciones definidas de igual forma.

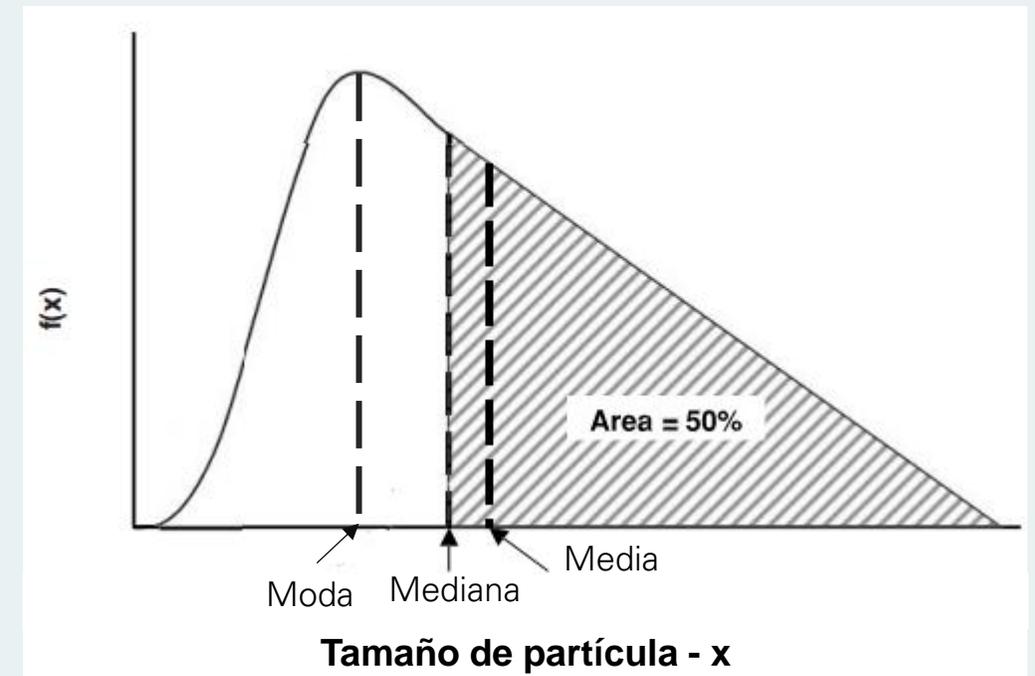
Adaptadas de Bhandari et al. (2013).

Medidas de la tendencia central

- Son parámetros utilizados para describir cuantitativamente la tendencia central de una distribución.
- Su objetivo es representar a una población de partículas con un único número.
- Estas medidas no indican el ancho ni la variación en una distribución.
- Las tres medidas más importantes de la tendencia central de una distribución son: la mediana, la media y la moda.

Medidas de la tendencia central

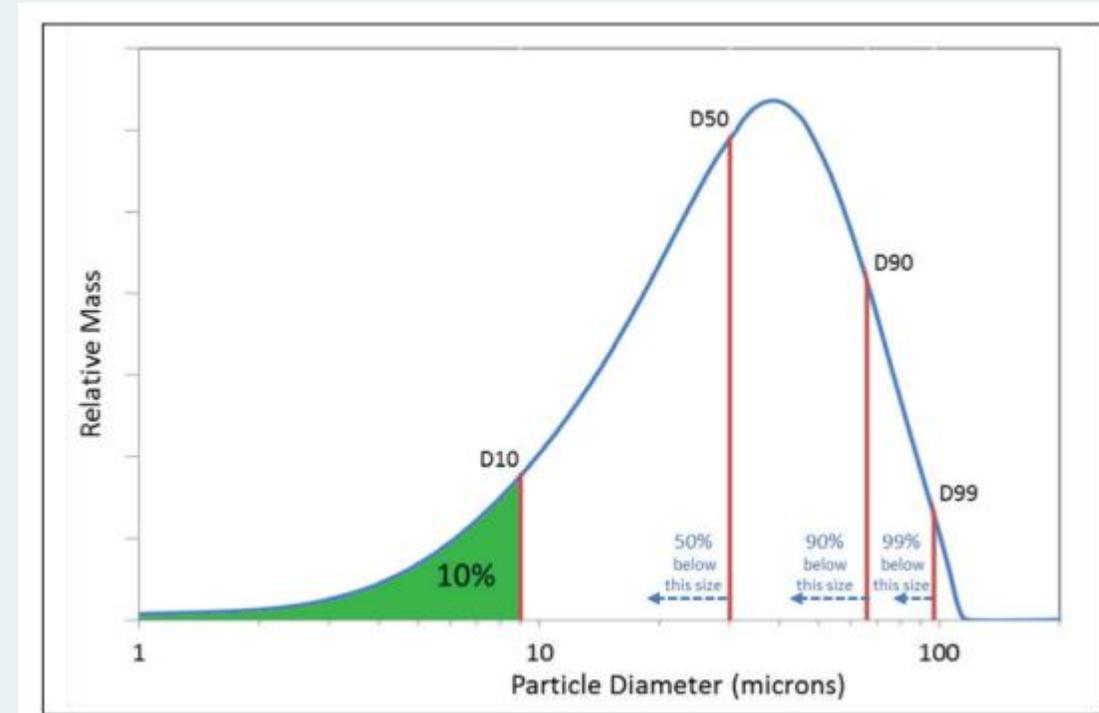
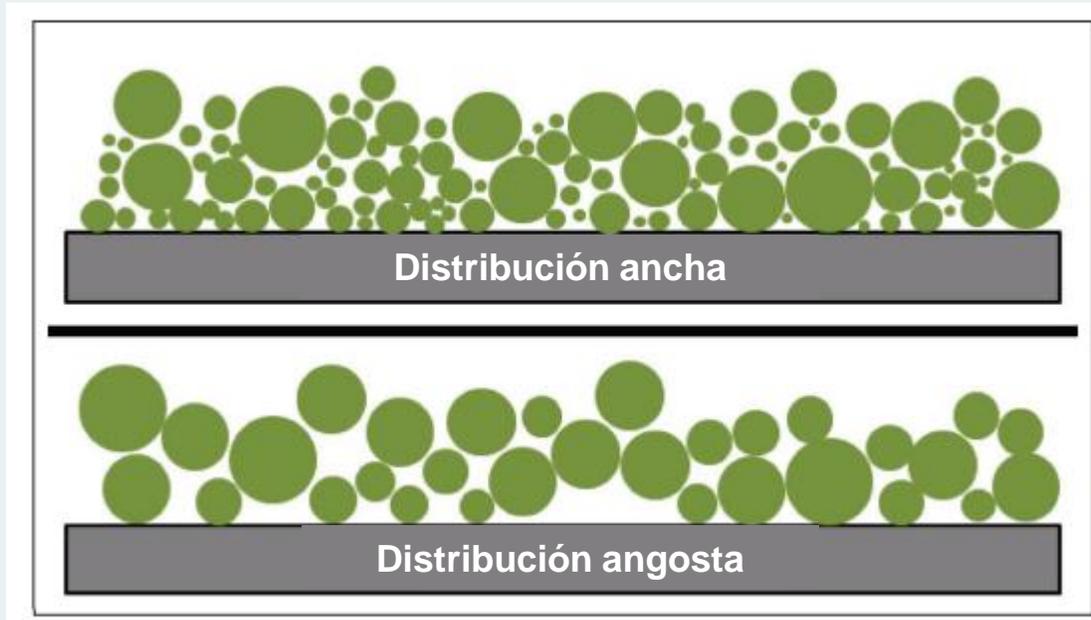
- **Mediana (o D50):** es el valor que divide a la distribución en dos mitades iguales.
- La mediana puede leerse fácilmente de la distribución acumulativa, como el tamaño de partícula para el cual: $F(x) = 0,5$
- Existen muchas definiciones de la **media** (aritmética, geométrica, harmónica), pero la más utilizada es la aritmética: $\int_0^{\infty} xf(x)dx$
- La **moda** es el tamaño que se presenta con mayor frecuencia, en la distribución de frecuencia.
-  Estos valores refieren a un tipo de distribución particular: el mismo polvo puede tener valores de mediana o media distintos en una distribución por número que en una por superficie o volumen.



Adaptadas de Barbosa-Cánovas et al. (2005).

Distribución de tamaño de partícula

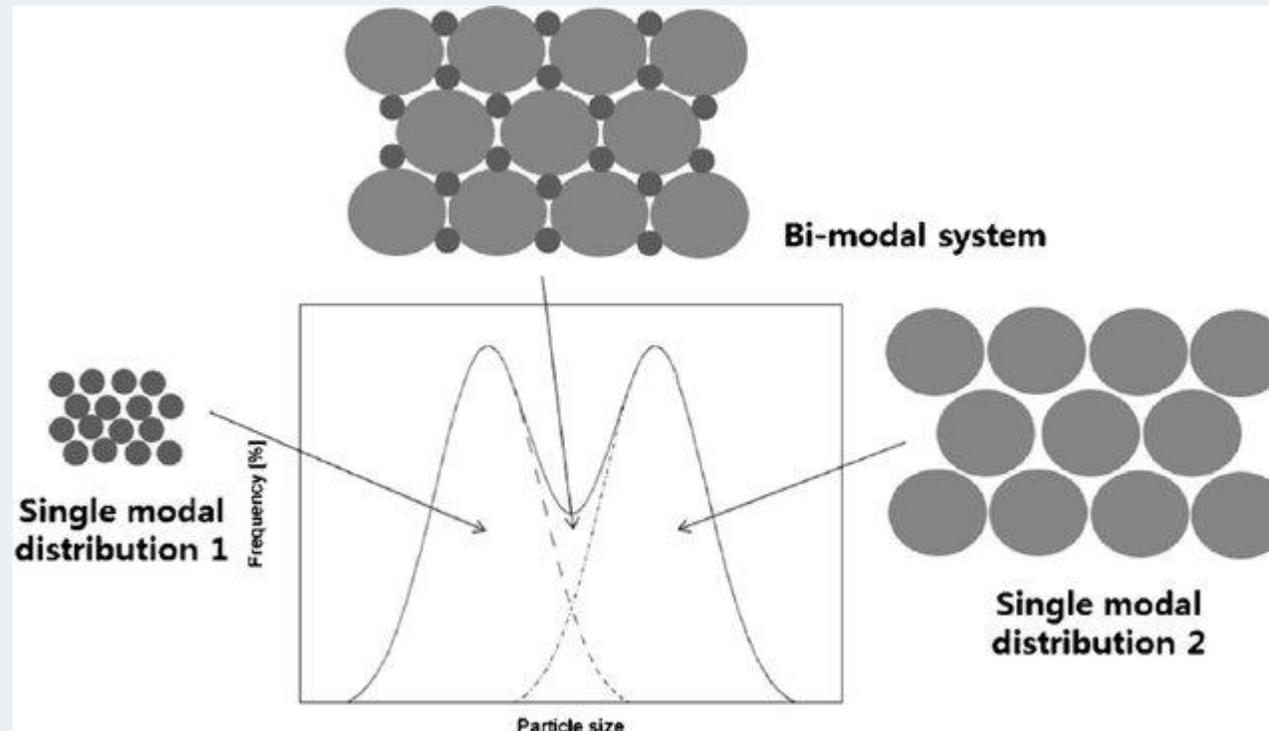
- ¿Pero qué hay del ancho o la variación de tamaño?



- Varianza: σ^2
- Desviación estándar: σ
- Span = $\frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}}$

Distribución de tamaño de partícula

- Distribuciones unimodales, bimodales, multimodales.



Tamizado

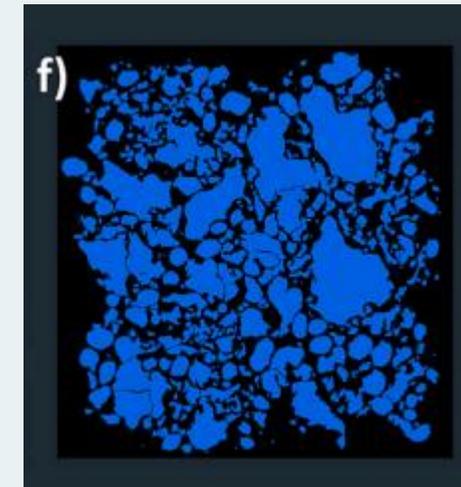
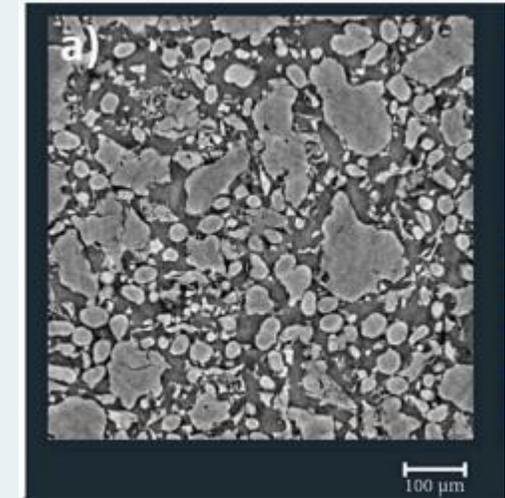
- Es una de las técnicas más simples, económicas y reproducibles.
- Principio: similitud de geometría.
- Tamaño de partícula se define por tamaño de la apertura del tamiz por el que pasa o no pasa la partícula.
- Existen tamices en el rango: 5 μm – 4 mm.
- 5-10 tamices se apilan en orden ascendente de apertura, se coloca el material previamente pesado en la parte superior. Se pone una tapa arriba y colector abajo. Se hacen vibrar por un determinado tiempo.
- Tamizado húmedo: útil para polvos muy finos, para materiales que forman agregados durante tamizado en seco, o materiales suspendidos en líquidos.
- Resultados dependen de: movimiento aplicado, tiempo, geometría de la superficie del tamiz, número de partículas, propiedades físicas de las partículas (forma, adherencia, fragilidad).



<https://cientecinstrumentos.cl/comparar/producto/gilsonic-ultrasiever-sonic-sifter-ga-8/>

Microscopía

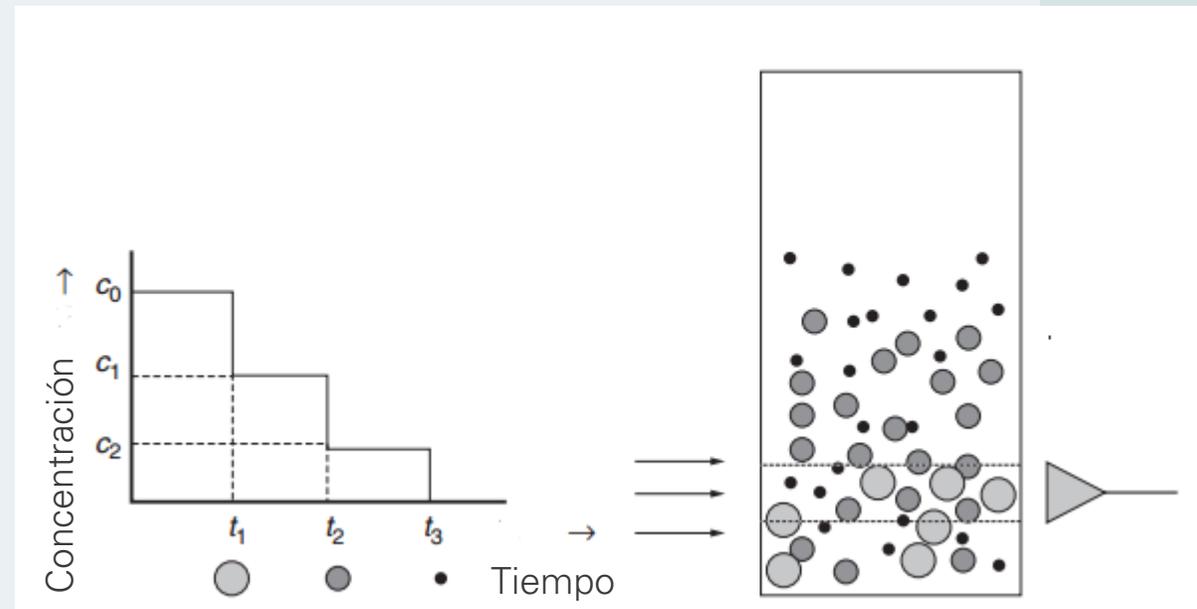
- Es el método más directo.
- Microscopía óptica, SEM, TEM.
- Las partículas suspendidas en un líquido se colocan en un slide y se observan bajo el microscopio.
- Las partículas se observan y se determina su tamaño.
- El método tradicional es muy laborioso, actualmente existen técnicas de análisis de imágenes computacionales.
- **Ventaja:** método directo
- **Desventajas:** se debe tener mucho cuidado al muestrear y preparar la suspensión de forma de que las partículas estén bien dispersas sin tocarse.



Adaptada de: Sivakumar et al. (2024)

Sedimentación

- Son los métodos más numerosos y variables.
- Principio: en caída libre, las partículas en un fluido alcanzan una velocidad terminal (v_T) que depende de su tamaño y está dada por la Ley de Stokes: $v_T = \frac{h}{t} = D_{Stokes}^2 \times \frac{(\rho_s - \rho_f)g}{18\eta_f}$



Adaptada de Bhandari et al. (2013).

- Como no es práctico seguir la sedimentación de cada partícula individual, se sigue el cambio de concentración de las partículas en el tiempo, a una altura.
- Limitaciones: partículas con forma muy distinta a la esférica no sedimentan verticalmente.
- **Desventajas:** se debe tener mucho cuidado al muestrear, porque se toman muestras pequeñas que deben ser representativas y la dispersión es fundamental para obtener resultados adecuados.

Sedimentación

- Se obtiene el diámetro de Stokes: tamaño de la partícula esférica equivalente que sedimenta a la misma velocidad que la partícula irregular.

- Se expresa en distribución de volumen o de masa.

• SEDIMENTACIÓN GRAVIMÉTRICA

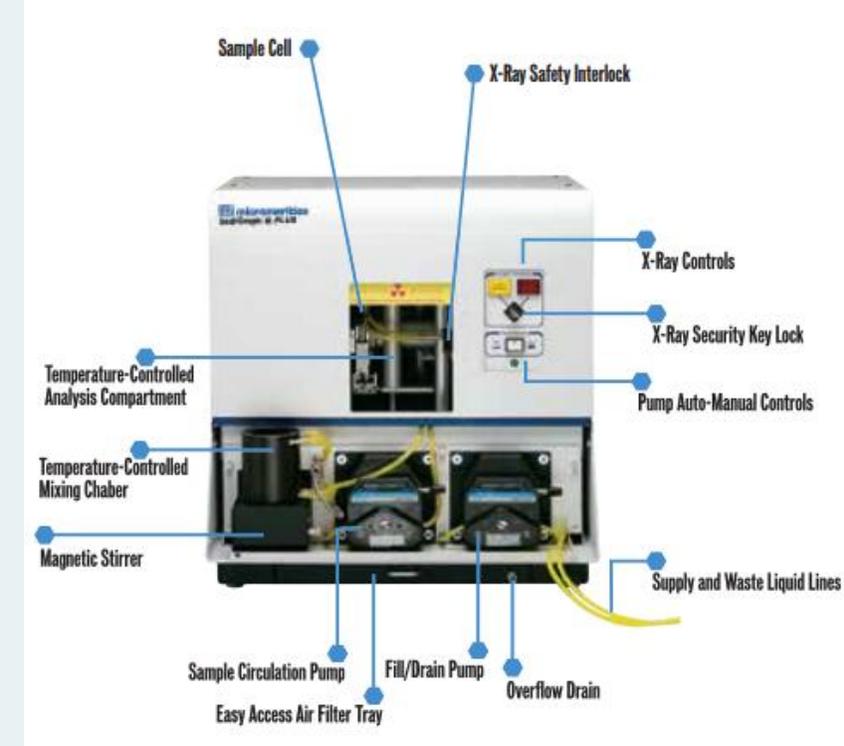
- Para partículas 2 – 300 μm , donde la Ley de Stokes es válida.

Partículas > 300 μm : pueden sedimentar en régimen turbulento, no cumple Stokes.

Partículas < 2 μm : pueden influir más influenciadas movimiento Browniano que Stokes.

• SEDIMENTACIÓN CENTRÍFUGA

El rango de validez del método se amplía a 0,01 – 300 μm .



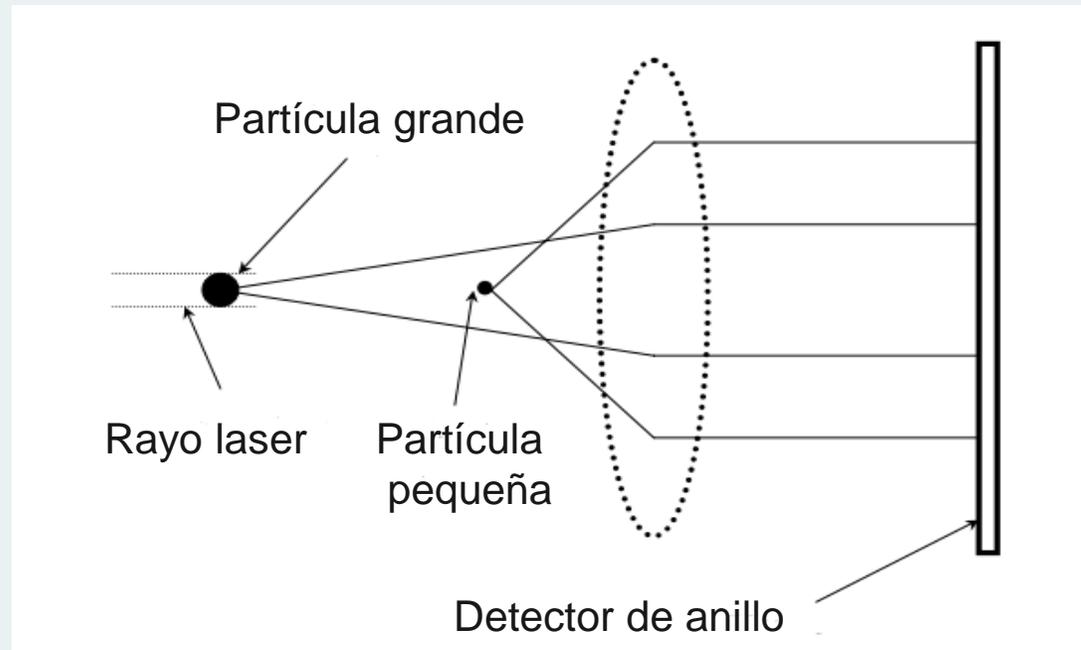
<https://micromeritics.com/products/sedigraph/>



<https://www.brookhaveninstruments.com/product/bi-dcp-particle-size-analyzer/>

Difracción laser

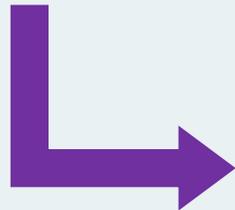
- Es el método más usado actualmente, es rápido y reproducible.
- Muy aplicado en dispersiones húmedas y secas de polvos.
- Partículas: 0,1 – 3000 μm , aproximadamente.
- Método secundario: no miden directamente la distribución de tamaño de partícula.
- Miden el patrón de difracción formado al pasar una luz laser a través del polvo y luego se aplica la teoría de la dispersión de la luz para calcular la distribución de tamaño de partícula.



Partículas más grandes difractan la luz a ángulos más chicos.

Difracción laser

- **Teoría de Mie:** analiza la interacción de la luz con una partícula esférica homogénea, considerando la retrodispersión, difracción, refracción y absorción de la luz.
- Conociendo el índice de absorción y de refracción de la partícula, se calcula la distribución de tamaño de partícula que daría el patrón de difracción obtenido.
- **Fraunhofer:** aproximación a la teoría de Mie, puede usarse al desconocer los índices de absorción y refracción de la partícula.



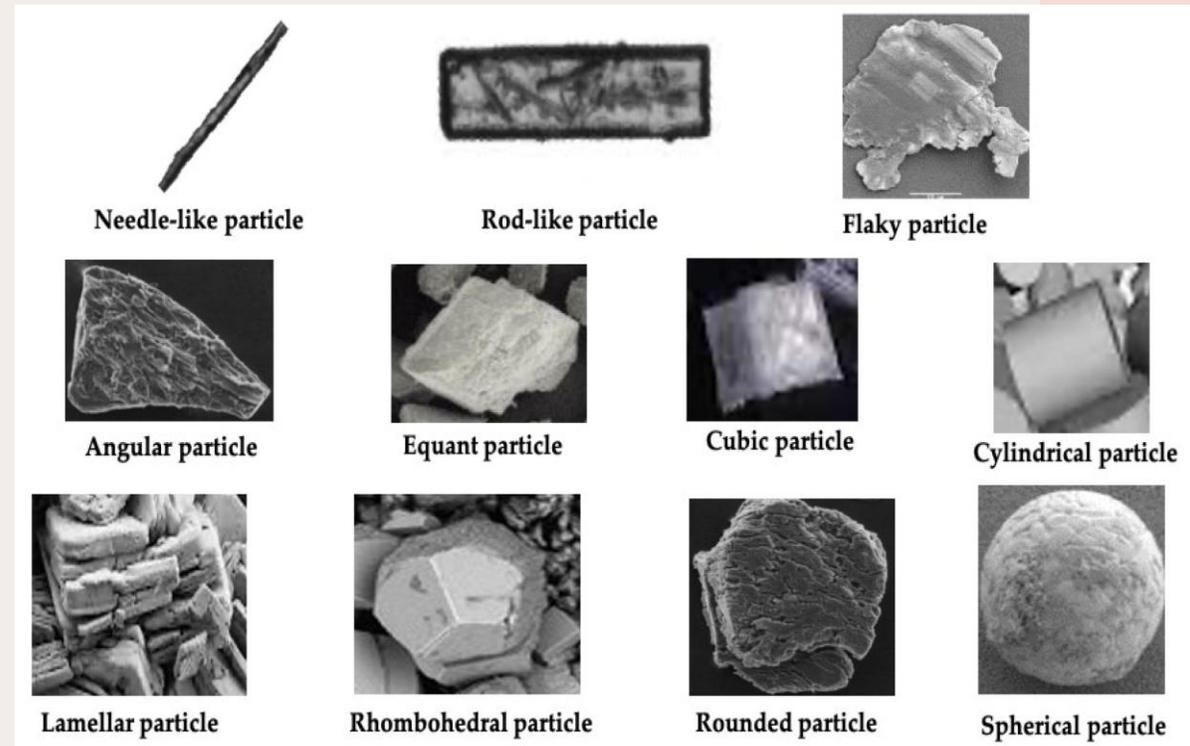
Válida para:

- Partículas grandes respecto a λ .
- Ángulo de observación pequeño.
- Partículas no transparentes.



Forma de partícula

- Impactan en las propiedades del polvo a granel.
- Dificultad: las partículas son objetos 3-D, formas muy complejas.
- Caracterización básica: forma esférica, de aguja, de plato.



Ulusoy (2023).



Útil cuando las partículas tienen forma regular con poca variación entre ellas

Forma de partícula

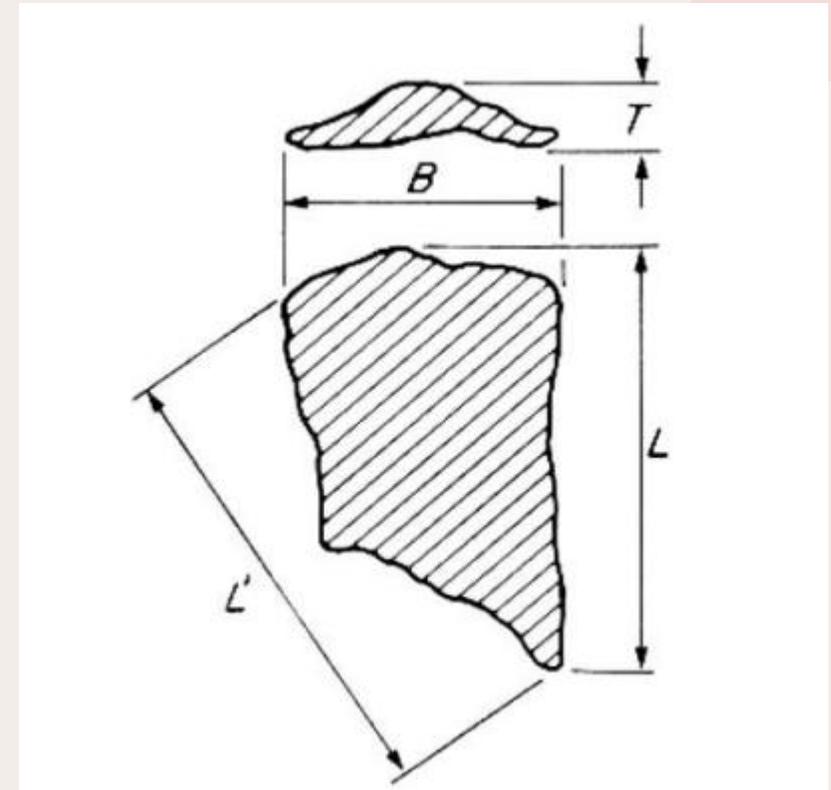
- Evaluación cuantitativa es muy compleja en partículas reales.
- Métodos ópticos utilizan imagen 2-D de las partículas.

Esfericidad:
$$\Phi_S = \frac{6V_P}{x_P S_P}$$

x_p : diámetro equivalente de una partícula

s_p : área superficial de una partícula

V_p : volumen de una partícula



Barbosa-Cánovas et al. (2005).

L: largo

B: ancho

T: espesor

L/B: Elongación

B/T: Aplanación

Forma de partícula

- Análisis de imágenes automatizado.
- Preparación reproducible de muestra.
- Captura imágenes individuales.
- Procesamiento de imágenes.
- Generación de resultados.



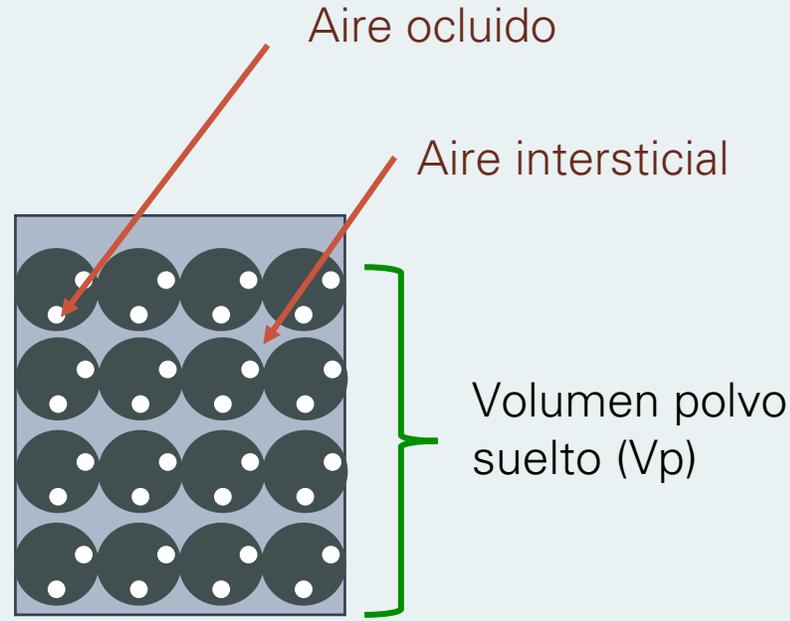
Análisis morfológico	Sistema de imagen automatizado estático
Rango de tamaño de partículas	0,5 μm a 1300 μm (el límite superior se puede extender en el caso de algunas aplicaciones*)
Propiedades medidas de partícula	Tamaño, forma, transparencia, conteo, localización
Parámetros de tamaño de partícula	Diámetro de círculo equivalente (CE), longitud, ancho, perímetro, área, distancia máxima, volumen de esfera equivalente (SE), longitud total de fibra, ancho de fibra
Parámetros de forma de partícula	Relación de aspecto, circularidad, convexidad, elongación, circularidad de alta sensibilidad (HS), solidez, elongación de fibra, rectitud de fibra
Parámetro de transparencia de partículas	Promedio de intensidad, desviación estándar de intensidad

<https://www.malvernpanalytical.com/es/products/product-range/morphologi-range/morphologi-4>

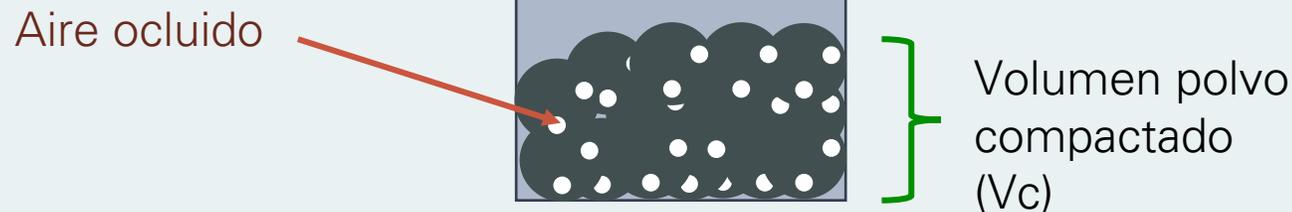
Densidad



Masa de polvo
(M_p)



Compactación



Densidad aparente:

$$\rho_a [kg/m^3] = \frac{M_p}{V_p}$$

Densidad compactada:

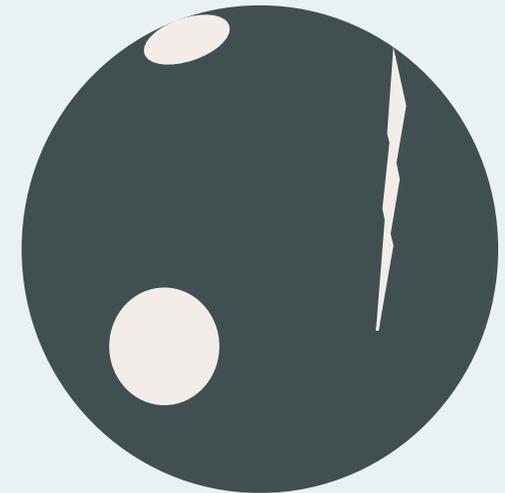
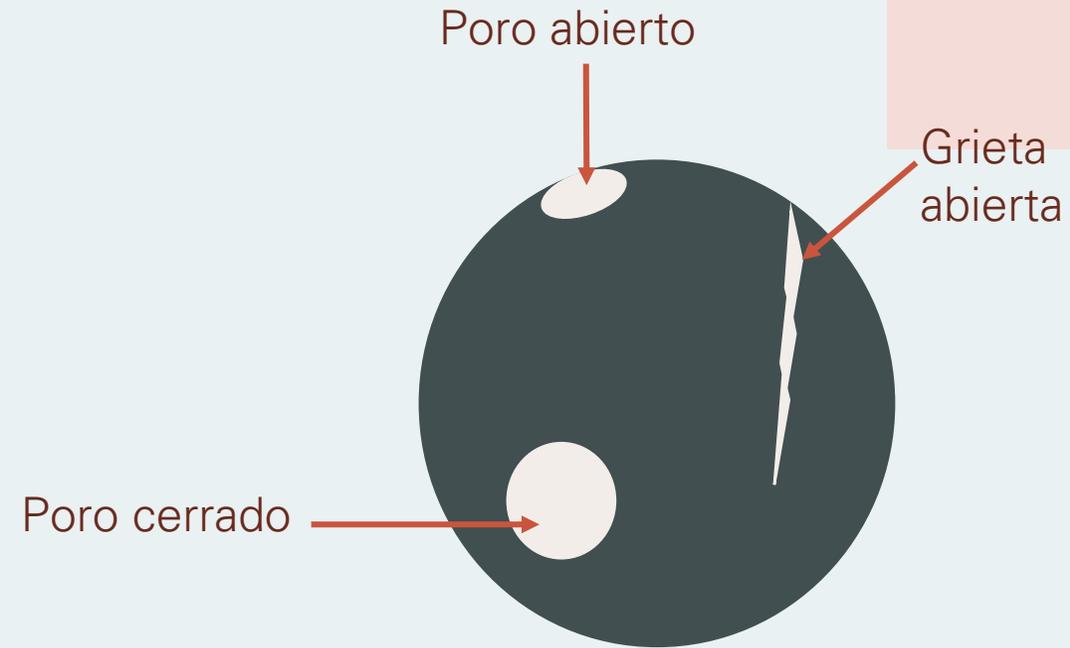
$$\rho_c [kg/m^3] = \frac{M_p}{V_c}$$

Densidad de partícula

- También existen distintos tipos.

- **Densidad efectiva de partícula**

Masa de la partícula dividida sobre el volumen que ocupa, incluyendo poros abiertos y cerrados.

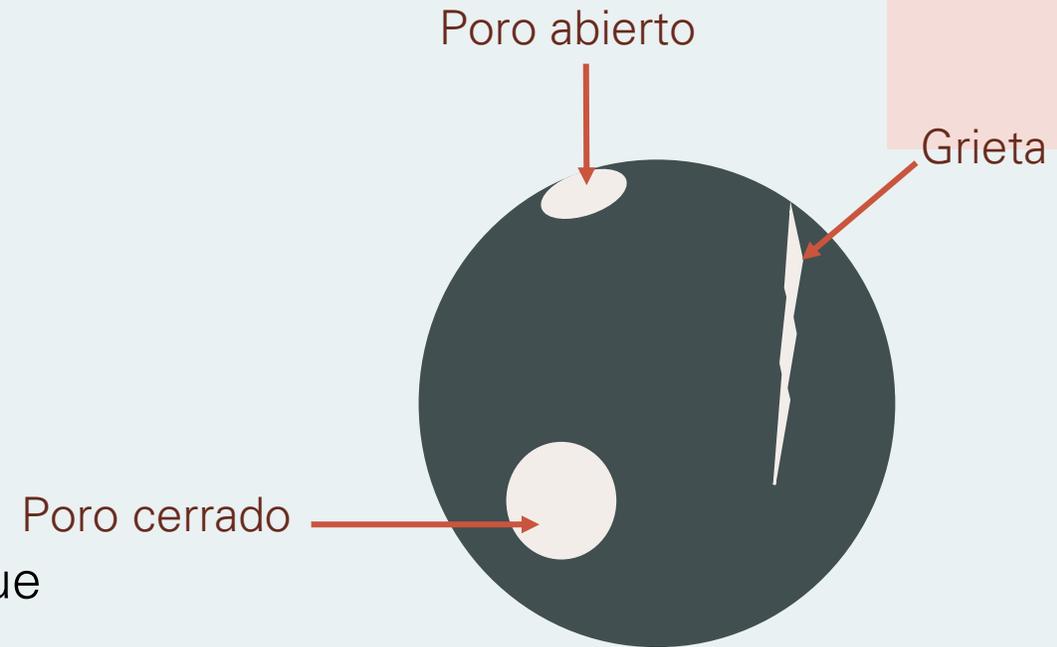


Densidad de partícula

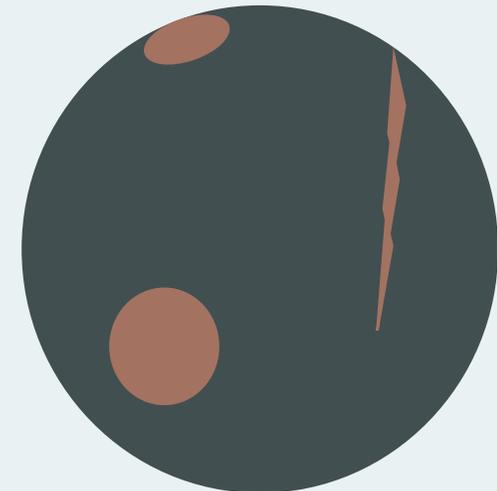
- **Densidad verdadera de partícula**

Masa de la partícula dividida sobre el volumen que ocupa, excluyendo poros abiertos y cerrados.

Polvo alimentario	Densidad de partícula (kg/m ³)
Sacarosa	1590
Almidón	1500
Proteína globular	~1400
Grasa	900-950
Sal	2160



Es la densidad del material sólido del que está hecho la partícula.



Densidad de partícula

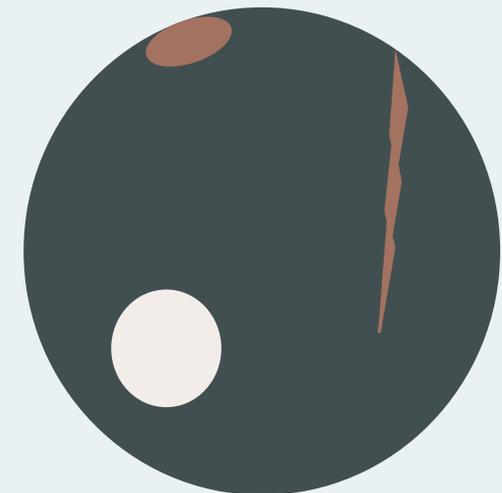
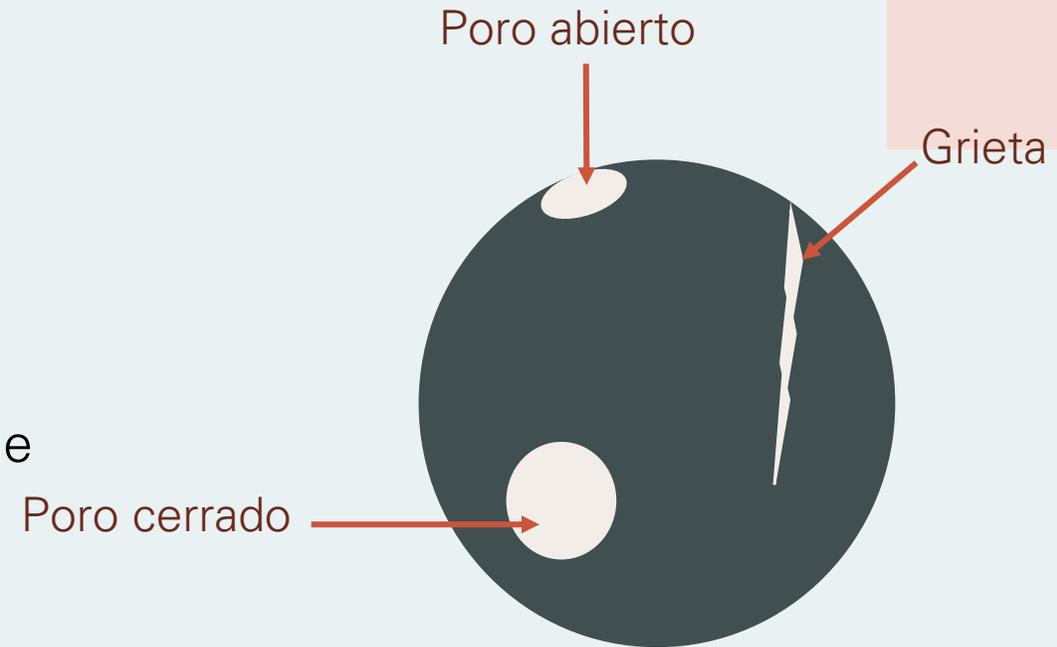
- Densidad aparente de partícula

Masa de la partícula dividida sobre el volumen que ocupa, excluyendo sólo poros abiertos.

Es igual a la densidad verdadera, si la partícula no tiene poros cerrados.

Se mide por picnometría.

Se ha sugerido moler el polvo como forma de abrir poros cerrados y determinar densidad verdadera por picnometría.



Determinación de densidad aparente de partícula

Determinación de densidad de partícula aparente: métodos de desplazamiento.

- Picnometría líquida
- Picnometría de gas

Picnometría líquida

- Sirve para polvos finos y gruesos.
 - Polvos finos: botella de 50 mL.
 - Polvos más gruesos: botellas más grandes.
- Líquido: solvente especial que no disuelve, interactúa ni penetra el material particulado. Con baja tensión superficial para evitar que adhiera aire.

$$\rho_s = \frac{(m_s - m_0)\rho}{(m_1 - m_0) - (m_{sl} - m_s)}$$

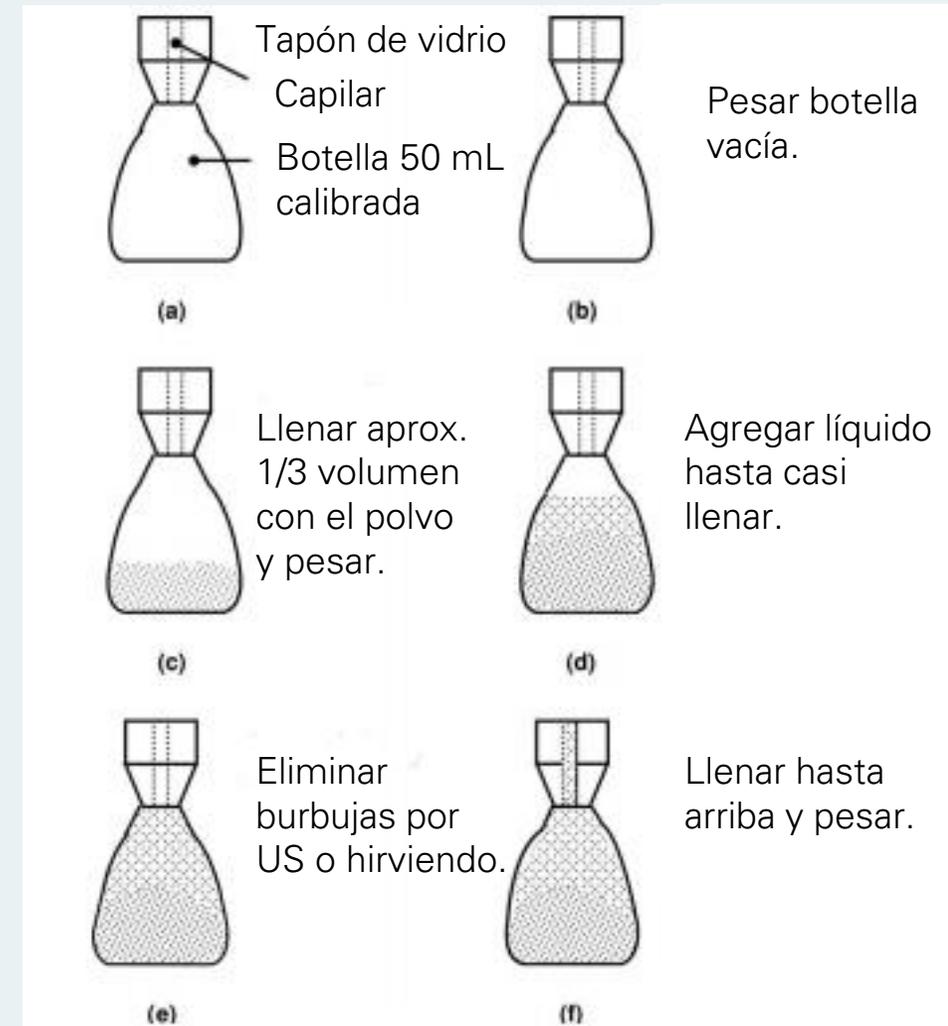
Donde:

m_s = peso de botella llena con polvo

m_0 = peso de botella vacía

ρ = densidad del líquido

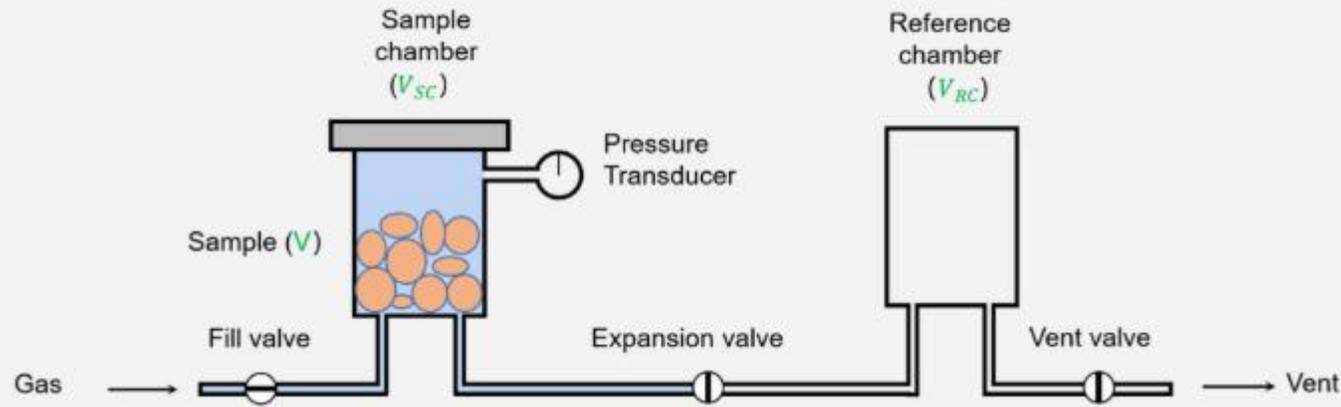
m_{sl} = peso de botella llena con polvo + líquido



Adaptada de Barbosa-Cánovas et al. (2005).

Picnometría de gas

- Mide el desplazamiento de aire u otro gas (ej. helio)



<https://www.analis.com/categ/gas-pycnometer>

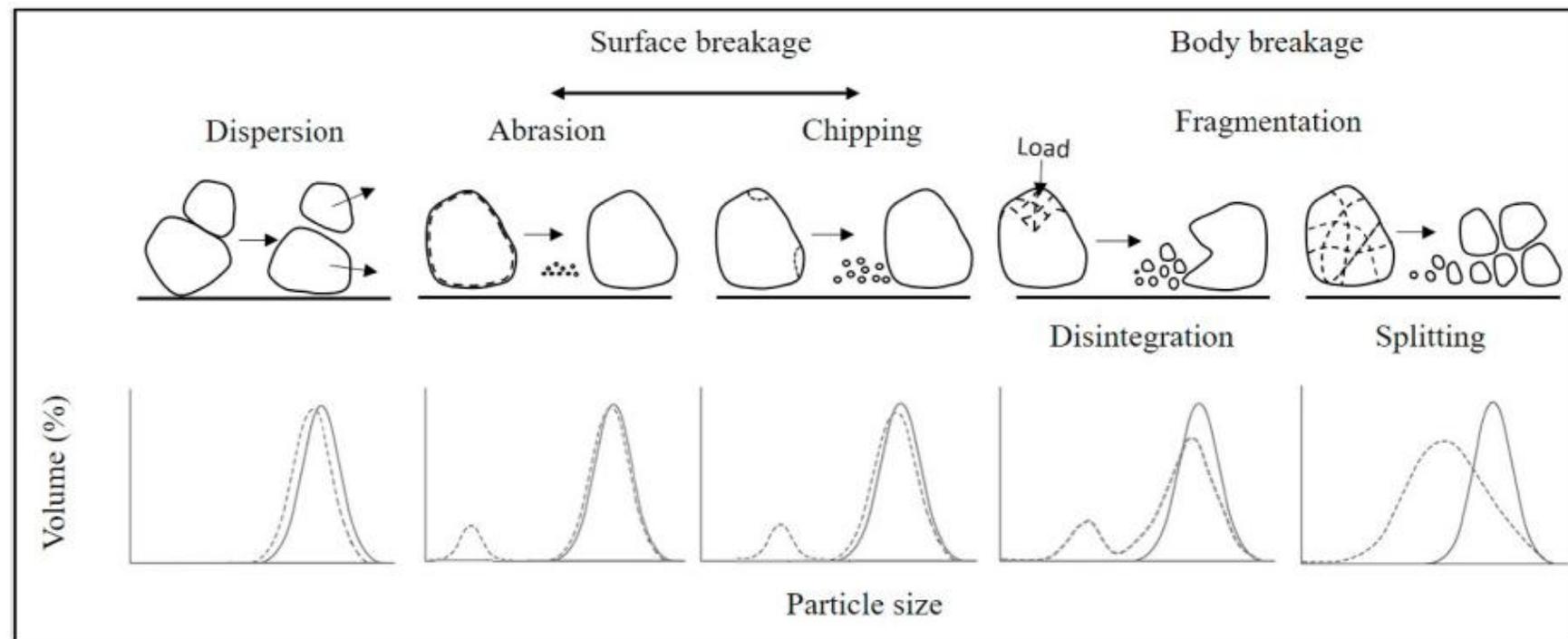


<https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/ultrapyc/?srsltid=AfmBOopTjuglRdW5VnIEfJtaiOK6DJzpjSQfzLH1X0PNSizNYkHrrdh0>

Fuerza o resistencia de partícula

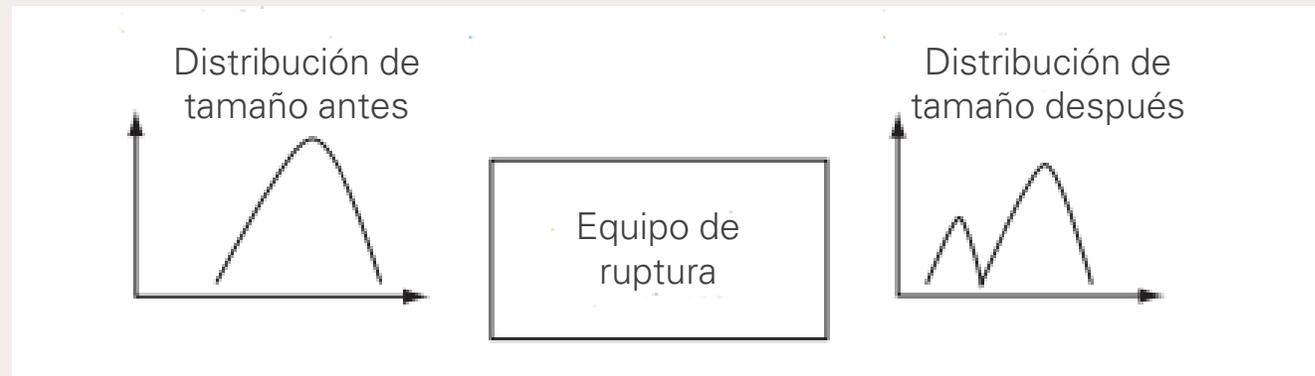
- La fuerza de partícula se relaciona con su tendencia a romperse.
- La ruptura de las partículas es en general indeseable, excepto en el contexto de las de reducción de tamaño de partícula, como la molienda.
- Polvos alimentarios susceptibles a fuerzas durante manejo y transporte, que puede generar ruptura especialmente de los agregados.

- Ruptura de agregados: reduce tamaño, genera finos/polvillos, riesgo de explosión, impacto negativo en propiedades tecnológicas.



Resistencia de partícula

- Suele medirse con métodos empíricos que someten a las partículas a fuerzas de ruptura y miden el tamaño de partícula antes y después.
- Resultado depende de: equipo utilizado, tipo e intensidad de fuerza aplicada.
- Útiles a modo comparativo.



Adaptada de Bhandari et al. (2013).

Resistencia de partícula

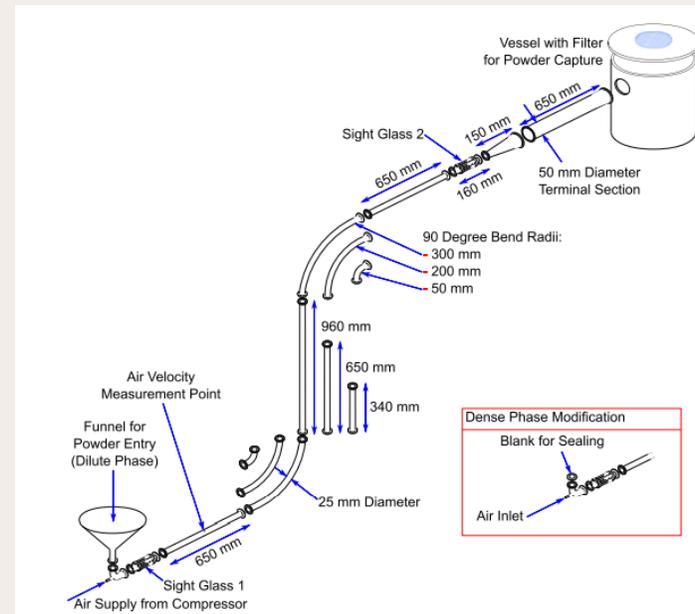
- Equipos de ruptura

Densidad compactada

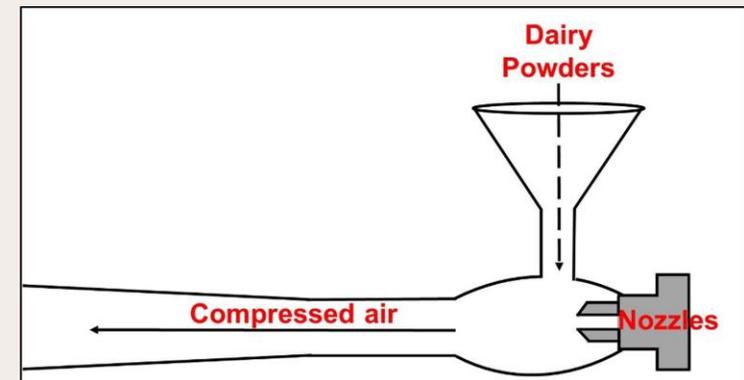


<https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/tap-density-tester-ultratap-500/?srsltid=AfmBOor88gAZYdCDR2LQlbJhPIO5p5Vlj9PTPKX26W8e0irnReqzBQ1d>

Transportadores neumáticos



Hanley et al. (2011).



Han et al. (2021b).

Friabilidad

- Habilidad de las partículas de polvo de fragmentarse en partículas más pequeñas.

$$F (\%) = \frac{D_{50;50kPa} - D_{50;400kPa}}{D_{50;50kPa}} \times 100$$

Ejemplo

Humedad y composición

- La humedad cumple un rol vital en muchos aspectos del manejo de polvos.
- Afecta la cohesividad de los polvos, impactando los impactos de aglomeración y granulación, pero también aumentando susceptibilidad a pegajosidad y *caking* y reducción de fluidez.
- La composición química del polvo también es muy relevante.
 - ↳ Composición del polvo a granel
 - ↳ Composición superficial

Composición superficial

- Depende de la composición, el procesamiento al que fue sometido el material (secado, mezclado, recubrimiento, aglomeración, envasado, transporte, almacenamiento).
- Composición superficial impacta fuertemente en las propiedades tecno-funcionales del polvo (rehidratación, apelmazamiento o *caking*, pegajosidad, fluidez).

Product	Bulk composition (wt.%)			Surface composition (%)		
	Lactose	Protein	Fat	Lactose	Protein	Fat
SMP	58	41	1	36	46	18
WMP	40	31	29	2	–	98
CP	13	12	75	1	–	99
WPC	8	86	6	6	41	53

Kim et al. (2002).

Muestreo

- Muestra: “Porción del todo seleccionada de manera tal que sea realmente representativa del todo” (Barbosa-Cánovas et al., 2005).
- A diferencia de los fluidos, las propiedades de los polvos cambian con la carga aplicada. Ej. consolidación, segregación, atrición.
- Todas las partículas deben tener la misma probabilidad de ser incluidas en la muestra.
- Es preferible muestrear de una corriente en movimiento, ej.: en cinta transportadora o durante descarga.
- Es preferible muestrear de toda la corriente durante varios períodos de tiempo igualmente espaciados, en lugar de muestrear una parte de la corriente durante todo el tiempo.
- Dos opciones: **1.** Unir las muestras, dividir las en porciones iguales y medirlas.
2. Analizar todas las muestras y luego agregar los resultados.

Nunca representa realmente todos los aspectos de la población.

Referencias figuras

- Fang, Y.; Rogers, S.; Selomuya, C.; Chen, X.D. (2012). Functionality of milk protein concentrate: Effect of spray drying temperature. *Biochemical Engineering Journal*, 62: 101-105.
- Ghodki, B.M.; Goswami, T.K. (2016). Effect of grinding temperatures on particle and physicochemical characteristics of black pepper powder. *Powder Technology*, 299: 168-177.
- Han, J.; Fitzpatrick, J.; Cronin, K.; Miao, S. (2021a). Dairy powder breakage: Mechanisms, characterization methods, impacted properties and influencing factors. *Trends in Food Science & Technology* 114: 608-624.
- Han, J.; Fitzpatrick, J.; Cronin, K.; Miao, S. (2021b). Investigation of the influence of powder characteristics on the breakage of dairy powders. *Food Research International*, 150: 110775.
- Hanley, K.J.; Byrne, E.P.; Cronin, K.; Oliveira, J.C.; O'Mahony, J.A.; Fenelon, M.A. (2011). Effect of pneumatic conveying parameters on physical quality characteristics of infant formula. *Journal of Food Engineering*, 106: 236-244.
- Hong, J.P.; Yoon, S.W.; Hwang, T.; Oh, J.; Hong, S.C.; Lee, Y.; Nam, J.D. (2012). High thermal conductivity epoxy composites with bimodal distribution of aluminum nitride and boron nitride fillers. *Thermochimica Acta*, 537: 70-75.
- Kim, E.H.J.; Chen, X.D.; Pearce, D. (2002). Surface characterization of four industrial spray-dried dairy powders in relation to chemical composition, structure and wetting property. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 26: 197-212.
- Palzer, S.; Fowler, M. (2010). Generation of specific product structures during spray drying of food. *Food Science and Technology*, 24(4): 44-45.
- Panchal, B.; Toikkanen, O.; Hokkanen, S.; Outinen, M.; Heino, A.; Partanen, R. (2025). Interactive role of particle size, shape, and structure in impact strength and breakage behavior of agglomerated dairy powders. *Powder Technology*, 452: 120595.
- Saputro, A.D.; Van de Walle, D.; Kadivar, S.; Sintang, M.D.B.; Van der Meeren, P.; Dewettinkck, K. (2017). Investigating the rheological, microstructural and textural properties of chocolates sweetened with palm sap-based sugar by partial replacement. *European Food Research and Technology*, 243: 1729–1738.
- Sivakumar, C.; Nadimi, M.; Stobbs, J.A.; Karunakaran, C.; Paliwal, J. (2024). A comprehensive assessment of microscopic characterization techniques to accurately determine the particle size distribution of roller-milled yellow pea flours. *Powder Technology*, 434: 119374.
- Ulusoy, U. (2023). A Review of Particle Shape Effects on Material Properties for Various Engineering Applications: From Macro to Nanoscale. *Minerals*, 13(1), 91.

Bibliografía

- Barbosa-Cánovas, G.V.; Ortega-Rivas, E.; Juliano, P.; Yan, H. (2005). Food Powders. Physical Properties, Processing, and Functionality. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.
- Bhandari, B.; Bansal, N.; Zhang, M.; Schuck, P. (2013). Handbook of food powders. Processes and properties. Woodhead Publishing Ltd, Cambridge.