

CLASE 5. Propiedades de polvos



Propiedades de polvos a granel

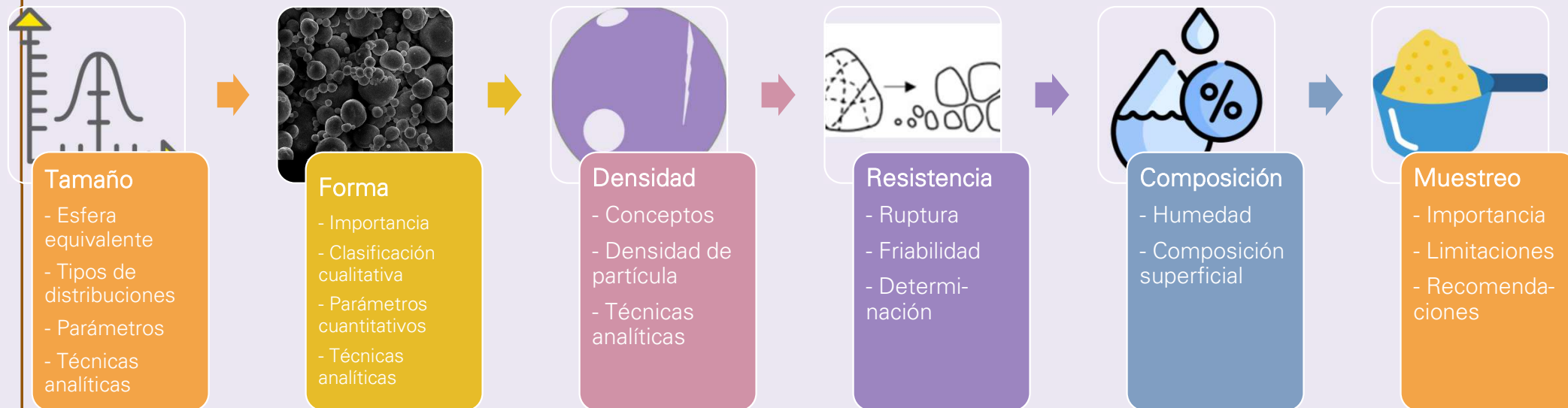
07/04/2025 – Mariana Rodríguez – marianarod@fing.edu.uy

Repasando...



- 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.

Propiedades de partícula



Agenda

- Introducción
- Propiedades de empaquetamiento
- Propiedades de flujo
- Propiedades de rehidratación

Propiedades de polvo a granel



Propiedades de empaquetamiento

- Un polvo es un material sólido complejo compuesto de un enorme número de partículas individuales, todas diferentes a su partícula vecina.
- Propiedades de empaquetamiento: cómo las partículas se disponen geométricamente y se empaquetan juntas en una masa.
- Cada vez que un polvo se vuelca en un recipiente, las partículas individuales se ubican en lugares distintos.
- No es posible predecir cuantitativamente el comportamiento del polvo, basándose solo en las propiedades inherentes o de partícula.

Es necesario medir las propiedades
del polvo a granel.

Propiedades de empaquetamiento

- Dependen de:
 - Distribución de tamaño de las partículas.
 - Distribución de forma de las partículas.
 - Rugosidad superficial.
 - Cohesividad.
 - Cambios a nivel superficial.

Densidad

- Propiedad muy utilizada a nivel industrial para ajustar condiciones de procesamiento, almacenamiento, envasado, transporte y distribución.

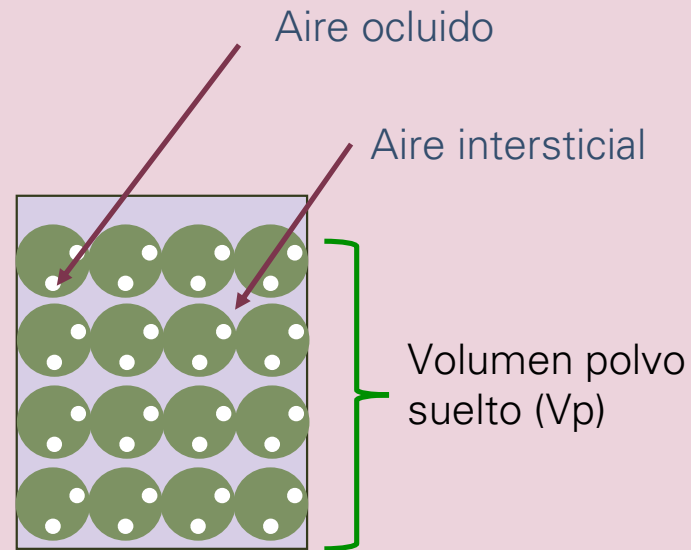


<https://www.enfamil.es/blogs/enfamil-formulas/como-se-debe-conservar-la-formula-infantil-enfamil>

Densidad

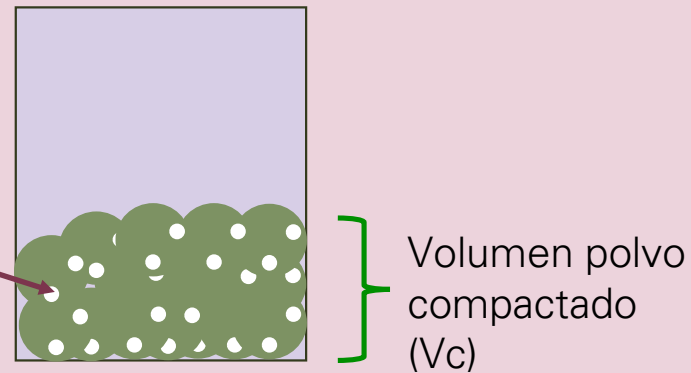


Masa de polvo
(M_p)



Compactación

Aire ocluido



Densidad aparente:

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

Densidad compactada:

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

Porosidad

- Densidad aparente (ρ_a) es la masa de las partículas que ocupan un determinado volumen de lecho.
- Porosidad (ε) es el volumen que ocupan los vacíos dentro del lecho.

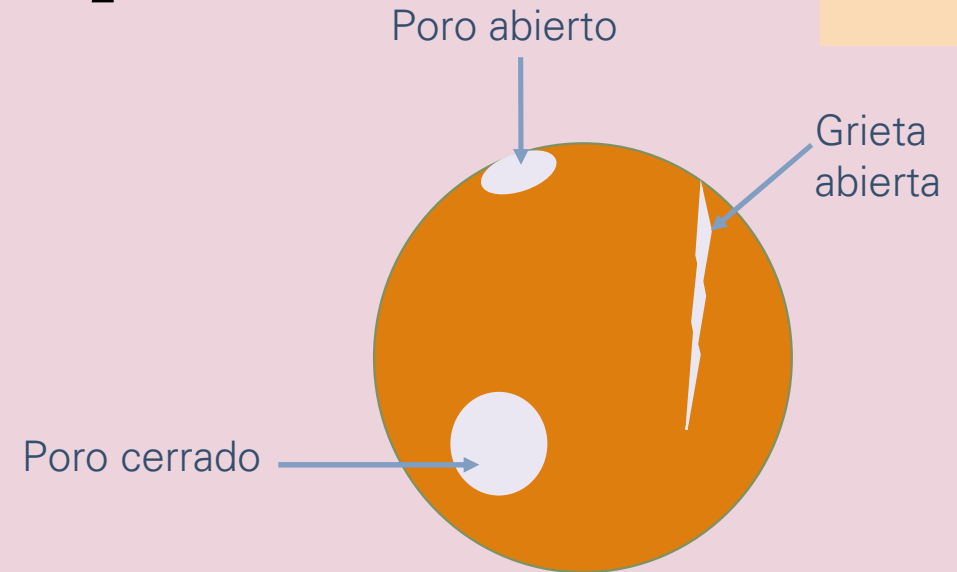
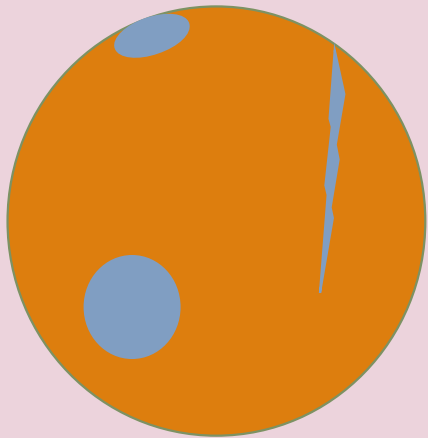
$$\varepsilon = \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_s}$$

ρ_s : Densidad de
partícula

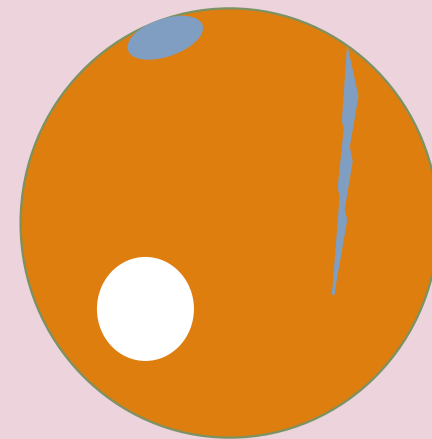
! La porosidad va a incluir o no a los poros dentro de las partículas, dependiendo de la densidad de partícula que se use.

¿Cuáles eran las densidades de partícula?

- Densidad **efectiva** de partícula: incluye poros abiertos y cerrados.
- Densidad **verdadera** de partícula: excluye poros abiertos y cerrados.



- Densidad **aparente** de partícula: excluye sólo poros abiertos.



Determinación de densidad aparente

- Se vuelca el polvo hasta llenar un recipiente de volumen conocido y luego se pesa.
- Es una medida muy difícil de estandarizar.
- A veces se usa embudo recortado con trampa o tapa.
- Es recomendable estandarizar la altura desde la que se vuelva el polvo.
- Es recomendable comparar muestras usando el mismo recipiente/probeta.
- En algunos casos luego de volcar el polvo, se lo deja reposar 10 minutos antes de nivelar.

Densidad aparente

- Distintos términos para referirse a la densidad aparente:

DENSIDAD AIREADA

Estrictamente: densidad cuando las partículas están separadas por un film de aire, no en contacto directo.

Uso más frecuente: densidad luego de que el polvo fue aireado.

DENSIDAD SUELTA

DENSIDAD VERTIDA

Densidad

Table 3.3. Approximate bulk density and moisture of different food powders.

Powder	Bulk density (kg/m ³)	Moisture content (%)
Baby formula	400	2.5
Cocoa	480	3–5
Coffee (ground and roasted)	330	7
Coffee (instant)	470	2.5
Coffee creamer	660	3
Corn meal	560	12
Corn starch	340	12
Egg (whole)	680	2–4
Gelatin (ground)	680	12
Microcrystalline cellulose	610	6
Milk	430	2–4
Oatmeal	510	8
Onion (powdered)	960	1–4
Salt (granulated)	950	0.2
Salt (powdered)	280	0.2
Soy protein (precipitated)	800	2–3
Sugar (granulated)	480	0.5
Sugar (powdered)	480	0.5
Wheat flour	800	12
Wheat (whole)	560	12
Whey	520	4.5
Yeast (active dry baker's)	820	8
Yeast (active dry wine)		8

Barbosa-Cánovas et al. (2005)

Densidad polvos alimentarios:
300-800 kg/m³

Densidad de partícula en polvos
alimentarios~ 1400 kg/m³

ALTA POROSIDAD:
interna y/o externa

Determinación de densidad compactada

- Es la densidad de un polvo que se alcanza al golpear, sacudir o hacer vibrar el recipiente de medición.
- El recipiente puede golpearse manualmente, aunque hay formas de estandarizarlo para obtener condiciones más reproducibles.

Densidad: determinación instrumental

Hay muchos
equipos
similares de
distintas
marcas.



Densidad: determinación instrumental

DENSIDAD
AIREADA



Densidad: determinación instrumental



Densidad: determinación instrumental

ACONDICIONAMIENTO



COMPACTACIÓN



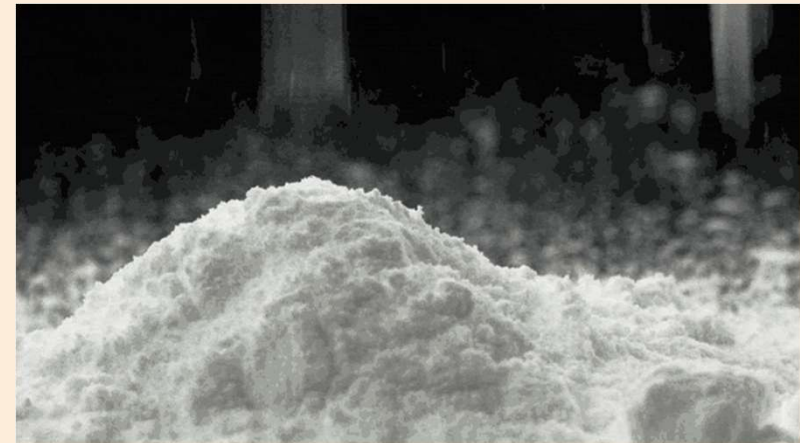
Propiedades de flujo

- La fluidez es una propiedad deseable en los polvos, indica su facilidad para fluir.
- A pesar de ser sólidos, deben ser transportados, dispensados, mezclados y fraccionados fácilmente.

Propiedades de flujo

¿Qué tiene que pasar para que un polvo fluya?

- Superar la resistencia al flujo para que las partículas se deslicen unas sobre otras.
- La fluidez depende principalmente de las características superficiales de las partículas: regularidad, esfericidad, carga.
- Implica vencer las interacciones superficiales entre las partículas en contacto.
- Interacciones superficiales: fricción interna y cohesión.



Propiedades de flujo

FRICCIÓN INTERNA: es la resistencia friccional de Coulomb de una partícula al moverse sobre otra bajo presión normal.

¿Qué pasa cuando no hay presión normal?

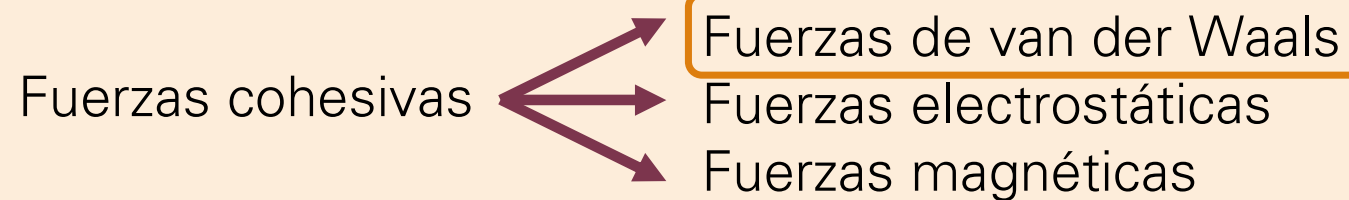
Igual pueden existir fuerzas de atracción entre las partículas que resisten el flujo: **COHESIÓN**.

Las fuerzas cohesivas aumentan mucho con la presión normal.

Fuerza de atracción entre partículas		Características
Fuerzas de van der Waals		Interacción en partículas $< 1\mu\text{m}$
Fuerzas electrostáticas		Interacciones entre superficies de partículas cargadas
Entrelazamiento mecánico		Superficies irregulares se entrelazan entre sí. Son fuerzas débiles pero bloquean mecánicamente a las partículas evitando su separación.
Puentes líquidos		Disolución superficial o transición vítrea, fusión y cohesión. Cohesión débil, los enlaces pueden romperse durante manipulación y procesamiento.
Puentes sólidos		Transición vítrea, fusión y unión. Fuerza fuerte y estable.

Propiedades de flujo

En polvos secos:



A menor tamaño de partícula, mayor área de contacto superficial por unidad de masa de polvo y mayor atracción de van der Waals entre partículas.

A menor distancia entre partículas, mayor atracción de van der Waals.

Al compactar un polvo, aumenta su cohesividad (disminuye su fluidez)

Propiedades de flujo

Presencia de líquido

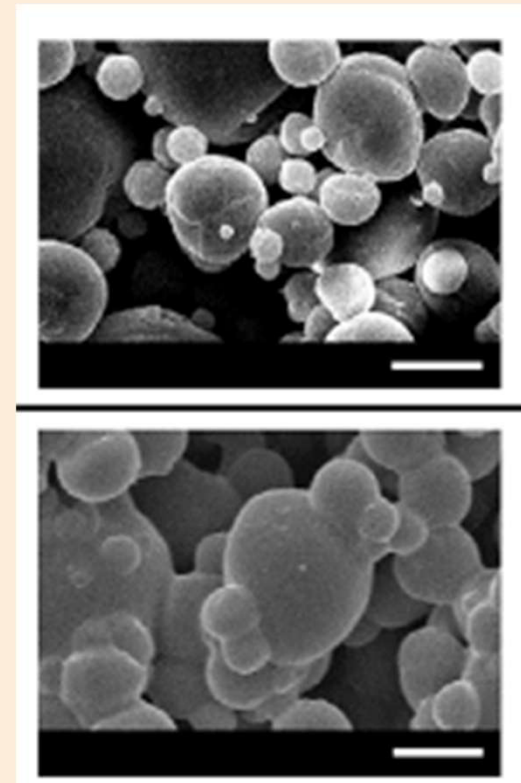


Presencia de líquido en la superficie:
aumenta área de contacto entre
partículas

Se forman puentes líquidos entre las partículas en sus puntos de contacto.

Como resultado de la tensión superficial, se producen fuerzas capilares.

En presencia de líquido las interacciones de van der Waals se reducen ampliamente, pero las fuerzas capilares son mayores.



Rodríguez Arzuaga et al. (2024)

Propiedades de flujo

- Los polvos pueden compactarse por golpeteo o compresión mecánica.
- Compactación intencional: aglomeración, tableteo.
- Compactación inintencional: durante manejo y transporte.
- 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

Propiedades de flujo

- **Consolidación:** presión y esfuerzo que actúa sobre el polvo provocando su compactación.



Influye en las fuerzas de atracción de las partículas o la resistencia a fluir del polvo.

En general: en un polvo más consolidado se requiere una mayor fuerza para que falle y fluya.

La resistencia generada en el polvo depende de su consolidación y esto debe reflejarse en los análisis.

Métodos para determinar las propiedades de flujo

- Métodos empíricos (relación de Hausner, índice de Carr, ángulo de reposo).
- Función de flujo y fricción de pared

Relación de Hausner (H_R)

- Permite evaluar la fluidez de los polvos a partir de la determinación de sus densidades.
- Es la relación entre la densidad compactada y la densidad aparente de un polvo:

$$H_R = \frac{\text{Densidad compactada}}{\text{Densidad aparente}}$$

Relación de Hausner (H_R)

Clasificación de flujo	Relación de Hausner
Excelente	1,00 – 1,11
Bueno	1,12 – 1,18
Justo	1,19 – 1,25
Pasable	1,26 – 1,34
Pobre	1,35 – 1,45
Muy pobre	1,46 – 1,59
Muy, muy pobre	> 1,60

Bhandari et al. (2013).

- Polvos más cohesivos tienen mayores fuerzas de atracción superficial, que los ayudan a superar la gravedad.
- Las partículas pueden sostenerse alrededor de espacios vacíos.
- Al volcar el polvo, se generan más espacios vacíos (> volumen de lecho o < densidad aparente).
- La fuerza adicional de golpear o compactar superar a las de atracción y provoca que las partículas caigan en los espacios vacíos, reduciendo el volumen (aumentando densidad).

Compresibilidad o índice de Carr (I_C)

$$I_C = \frac{\text{Densidad compactada} - \text{Densidad aparente}}{\text{Densidad compactada}}$$

- El proceso de compresión ocurre en 2 etapas:
 - 1- Llenado de espacios vacíos con las partículas de $\leq$ tamaño que el vacío por movimiento de partículas.
 - 2- Llenado de espacios vacíos por deformación elástica o plástica de la partícula o fragmentación.
- A mayor compresibilidad, menor fluidez.

Compresibilidad o índice de Carr (I_C)

Clasificación de flujo	Índice de Carr
Excelente	$< 0,15$
Bueno	$0,15 - 0,18$
Pobre	$0,18 - 0,22$
Malo	$0,22 - 0,35$
Muy malo	$0,35 - 0,40$
No fluye	$> 0,40$

Juarez-Enriquez et al. (2022).

Relación de Hausner e índice de Carr (I_C)

$$H_R = \frac{\text{Densidad compactada}}{\text{Densidad aparente}}$$

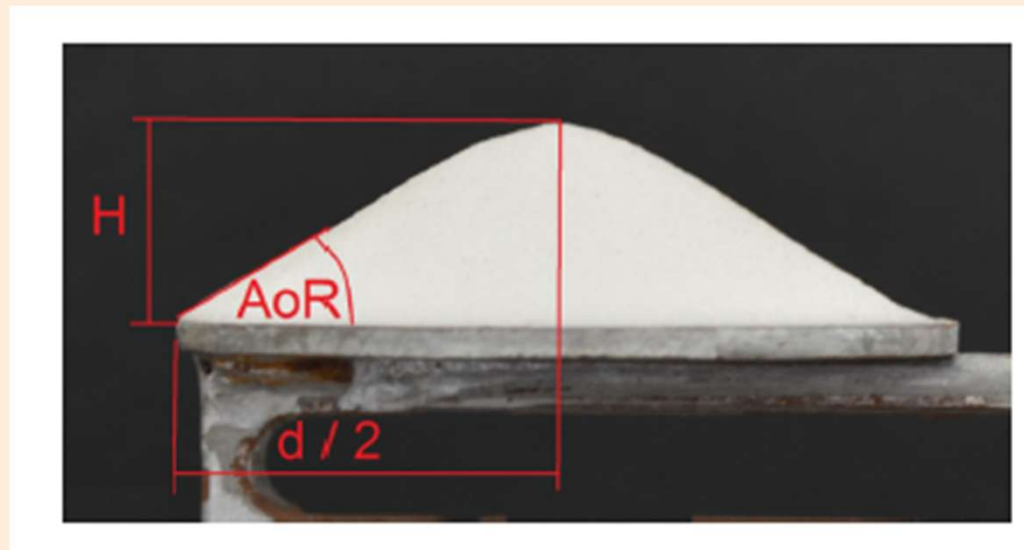
$$I_C = \frac{\text{Densidad compactada} - \text{Densidad aparente}}{\text{Densidad compactada}}$$

Entonces:

$$I_C = 1 - \frac{1}{H_R}$$

Ángulo de reposo (AoR)

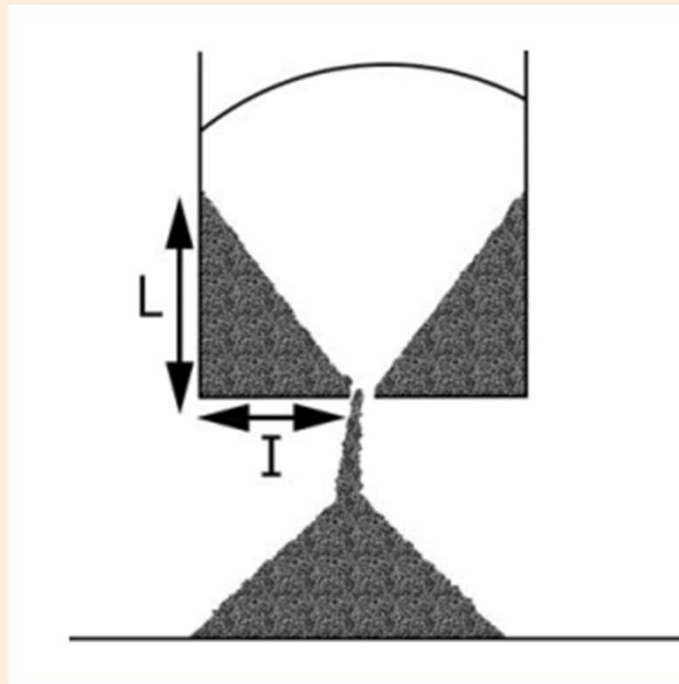
- Es el ángulo en el que un material descansa en una pila estática.
- Las condiciones en las que se formó la pila y la forma en la que se mide el ángulo influyen en el resultado.
- No es una propiedad intrínseca del material.



Macho et al. (2020).

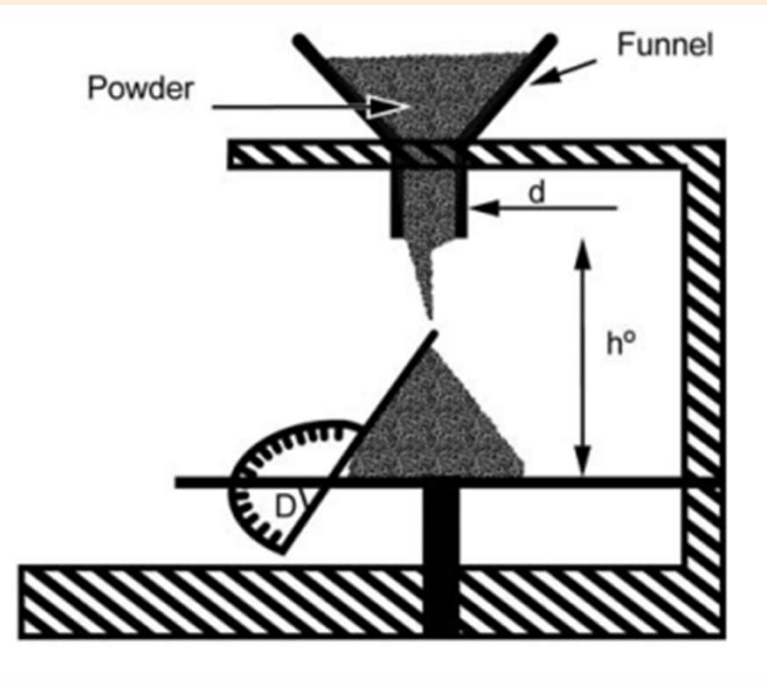
Ángulo de reposo (AoR)

ESCURRIDO



L/I

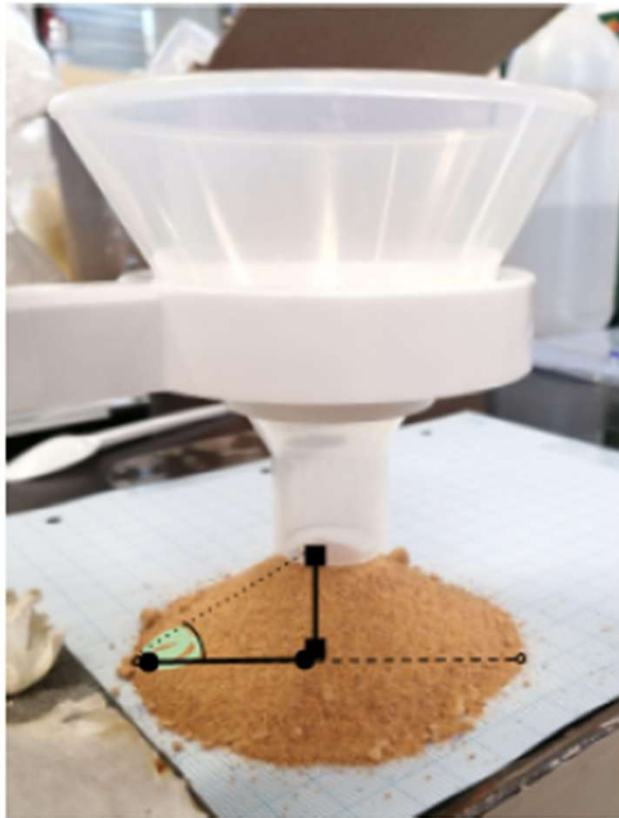
VERTIDO



Barbosa-Cánovas et al. (2005)

AoR escurrido siempre $>$ que AoR vertido porque en el primero al polvo irse deslizando se va separando, mientras que en el Segundo va convergiendo.

Ángulo de reposo (AoR)



- Diámetro
- Radio
- Altura
- Ángulo de Reposo

$$AoR = \tan^{-1}(h/r)$$

Ángulo de reposo (AoR)

Clasificación de flujo	AoR (°)
Excelente	< 30
Pobre	30 - 45
Malo	45 – 55
Muy malo	> 55

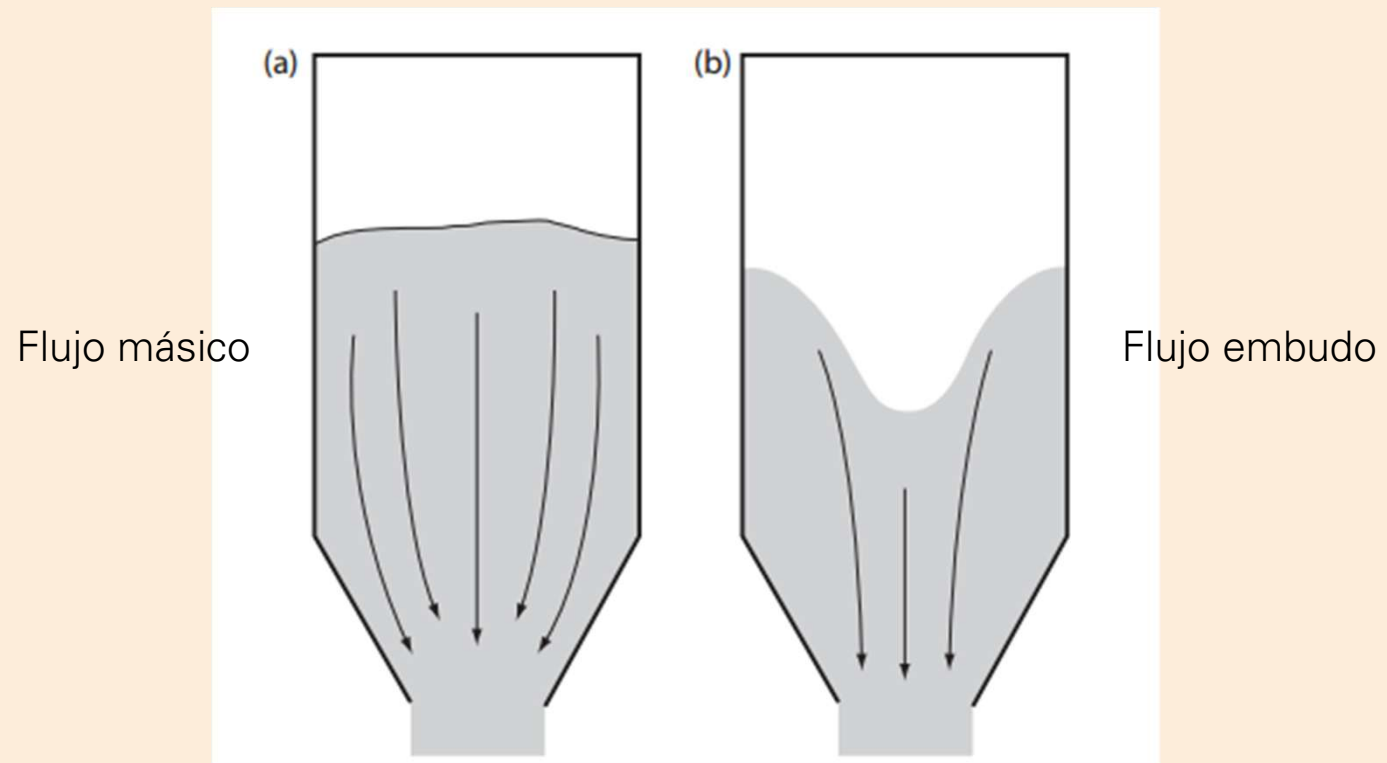
Juarez-Enriquez et al. (2022).

Función de flujo y fricción de pared

- La fricción que se desarrolla entre la pared y el polvo tendrá gran influencia en si este se desliza o no a lo largo de la pared.
- **Ángulo de fricción de pared:** describe la fricción entre el polvo y la pared del material usado para confinar el polvo (ej. tolva) la tolva bajo una determinada presión normal.
- El ángulo de fricción de pared junto con el ángulo de inclinación de la tolva tienen gran efecto en patrón de flujo: másico o embudo.
- **Ángulo efectivo de fricción interna:** es una medida de la fricción entre las partículas. Depende del tamaño, forma, rugosidad y fuerza de las partículas.

Función de flujo y fricción de pared

- Técnicas que pueden utilizarse para diseñar silos y tolvas.



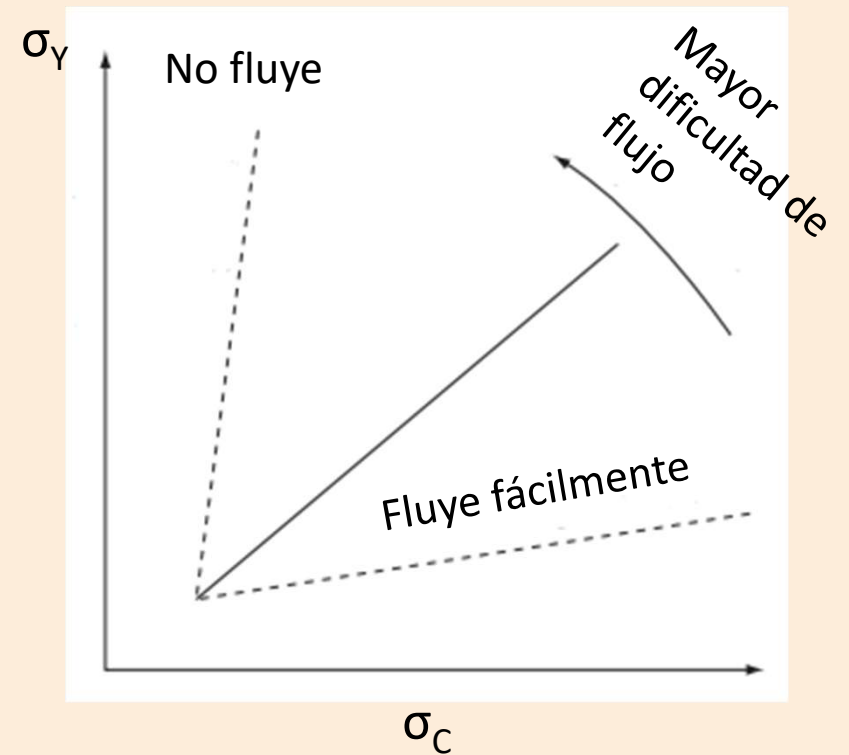
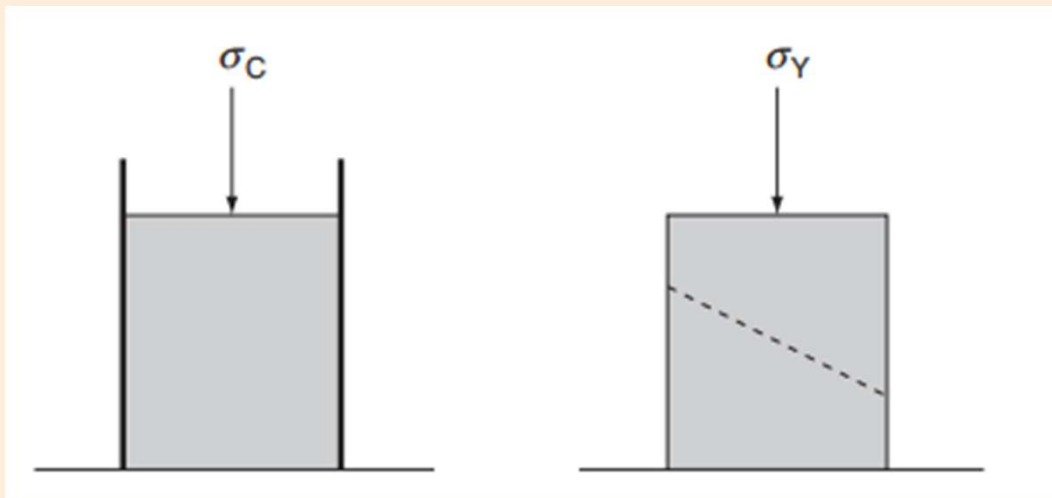
Bhandari et al. (2013)

Función de flujo y fricción de pared

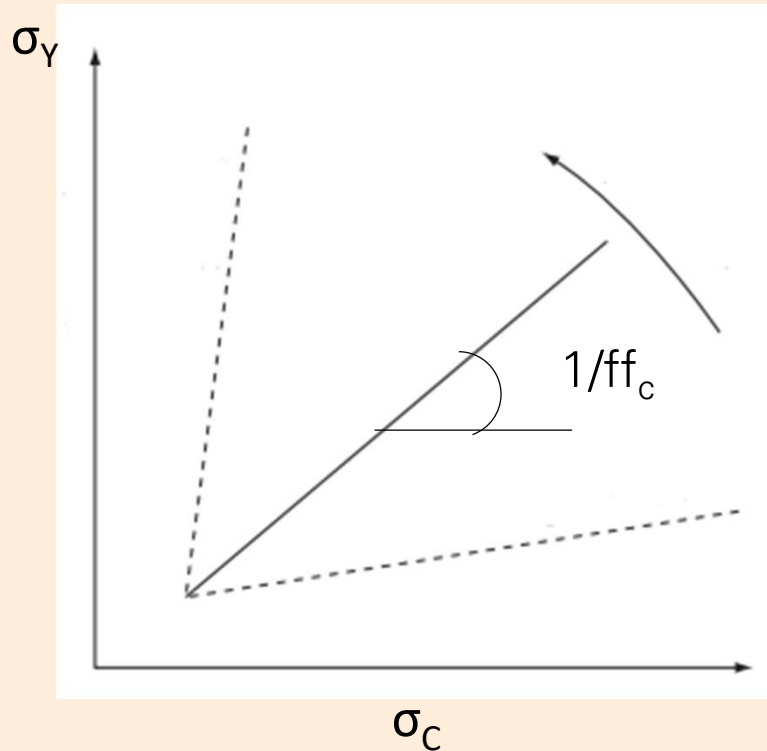
- Jenike (1964) desarrolló un análisis para calcular el tamaño mínimo de apertura de la tolva y ángulo mínimo de inclinación para prevenir formación de arcos cohesivos y flujo másico.
- Requiere medir 3 propiedades:
 - Función de flujo
 - Ángulo efectivo de fricción interna
 - Ángulo de fricción con la pared (*hopper wall yield locus*)

Función de flujo

- Resistencia que desarrolla un polvo en una superficie expuesta.
- Límite de fluencia o límite elástico no confinado (σ_Y) a una determinada tensión de consolidación (σ_C).



Función de flujo

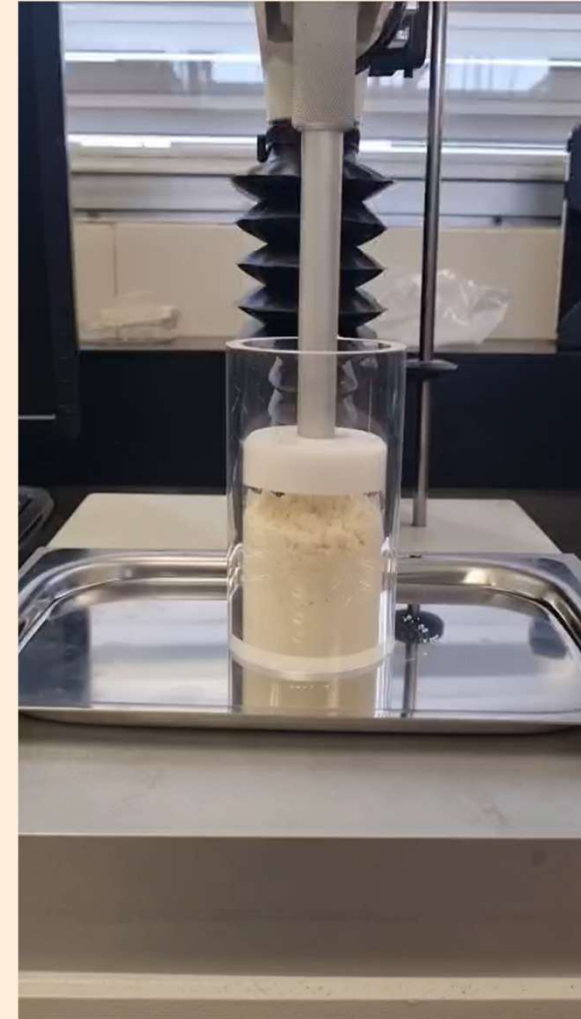
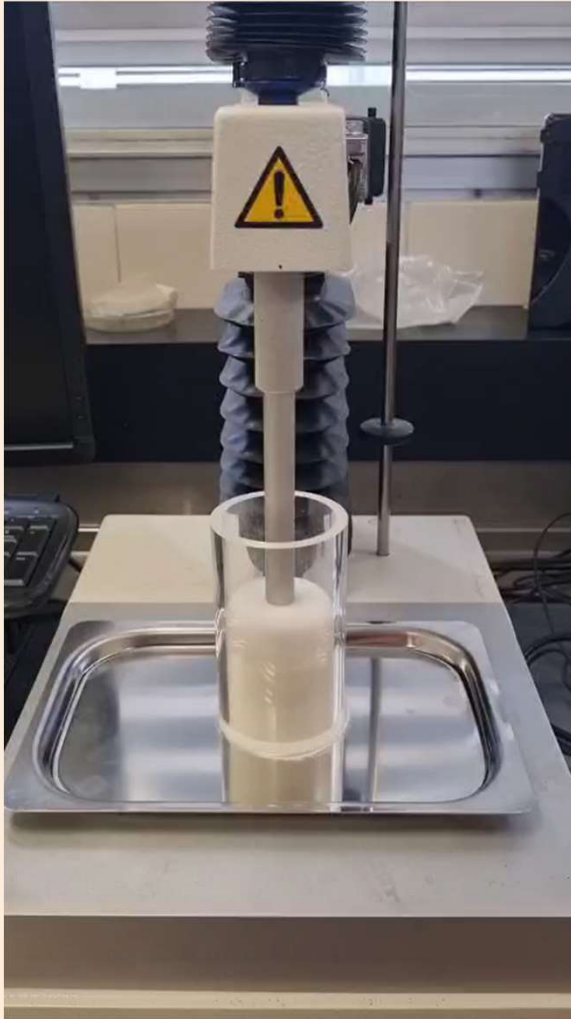


Adaptada de Bhandari et al. (2013)

- Índice de factor de flujo (ff_c): $ff_c = \frac{\sigma_Y}{\sigma_C}$

ff_c	Clasificación de flujo
< 1	No fluye
1 – 2	Muy cohesivo
2 – 4	Cohesivo
4 – 10	Fluye fácilmente
> 10	Fluye libremente

Función de flujo



Propiedades de flujo

- Dependen de:
 - Tamaño de partícula.
 - Forma de partícula
 - Propiedades superficiales.
 - Contenido de humedad.
 - Cristalinidad.
 - Otros aspectos de la composición.

Efecto del tamaño y forma de partícula

Particuology 10 (2012) 203–208



ELSEVIER

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Particuology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/partic



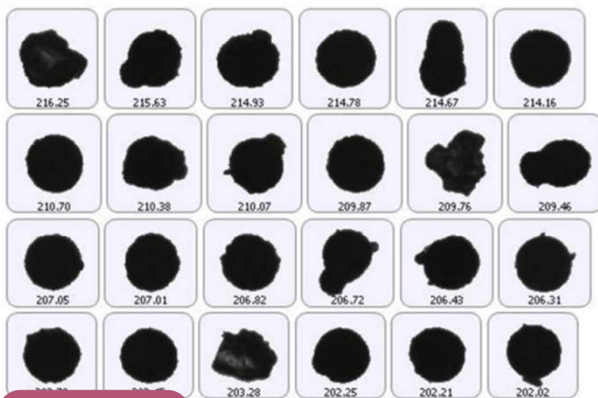
Effect of particle shape and size on flow properties of lactose powders

Xiaowei Fu^{a,*}, Deborah Huck^b, Lisa Makein^b, Brian Armstrong^a, Ulf Willen^b, Tim Freeman^a

Table 1

Summary of particle size and shape characteristics

	FlowLac [®] 100	InhaLac [®] 230	SpheroLac [®] 100
CED (μm)			
<i>D</i> [v,0.1]	61.9	47.6	77.1
<i>D</i> [v,0.5]	140.2	94.6	151.7
<i>D</i> [v,0.9]	221.6	120.3	238.2
HSC			
<i>D</i> [n,0.1]	0.77	0.69	0.68
<i>D</i> [n,0.5]	0.91	0.82	0.83
<i>D</i> [n,0.9]	0.96	0.91	0.91



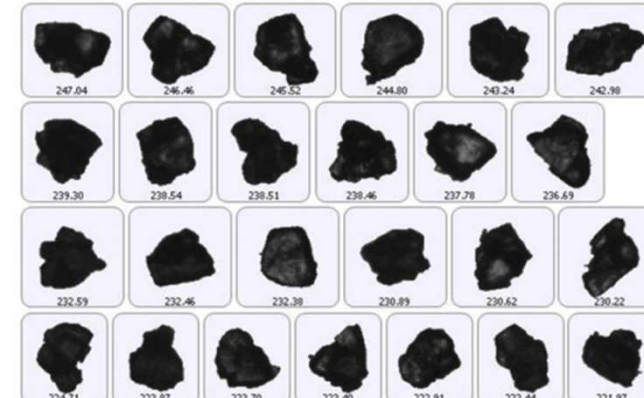
FlowLac 100

Forma más circular



InhaLac 230

Menor tamaño



SpheroLac 100

Efecto del tamaño y forma de partícula

EFFECTO TAMAÑO

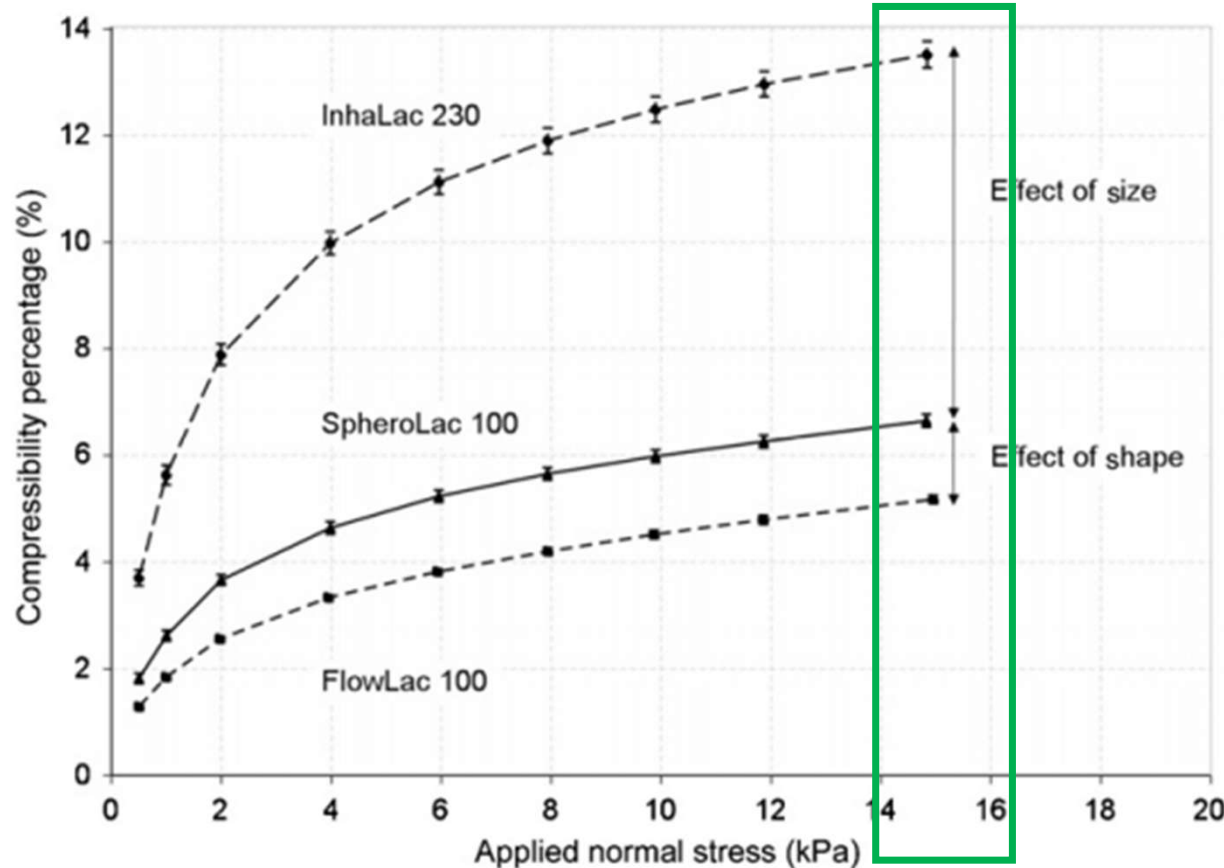
Comparando lactosas con igual forma:
SpheroLac 100 51 % < compresibilidad que InhaLac 230.

InhaLac 230: menor diámetro, > cohesividad

EFFECTO FORMA

Comparando lactosas con igual tamaño:
SpheroLac 100 + compresible que FlowLac 100.

SpheroLac 100: forma + irregular > compresibilidad.



Efecto del tamaño y forma de partícula

Lactosa	Forma	Tamaño	Compresibilidad a 15 kPa (%)	Clasificación
FlowLac 100	Circular	Mayor	5,17	Excelente
InhaLac 230	Irregular	Menor	13,50	Excelente
SpheroLac 100	Irregular	Mayor	6,65	Excelente

Clasificación de flujo	Índice de Carr
Excelente	< 0,15
Bueno	0,15 – 0,18
Pobre	0,18 – 0,22
Malo	0,22 – 0,35
Muy malo	0,35 – 0,40
No fluye	> 0,40

Efecto de la composición superficial



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 46 (2005) 182–187

COLLOIDS
AND
SURFACES
B

www.elsevier.com/locate/colsurfb

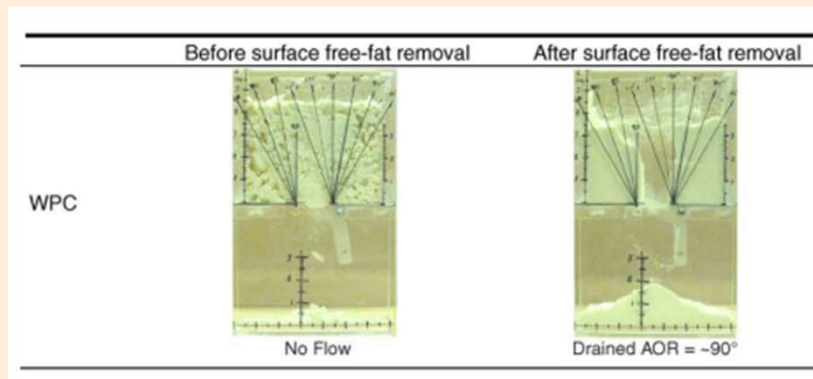
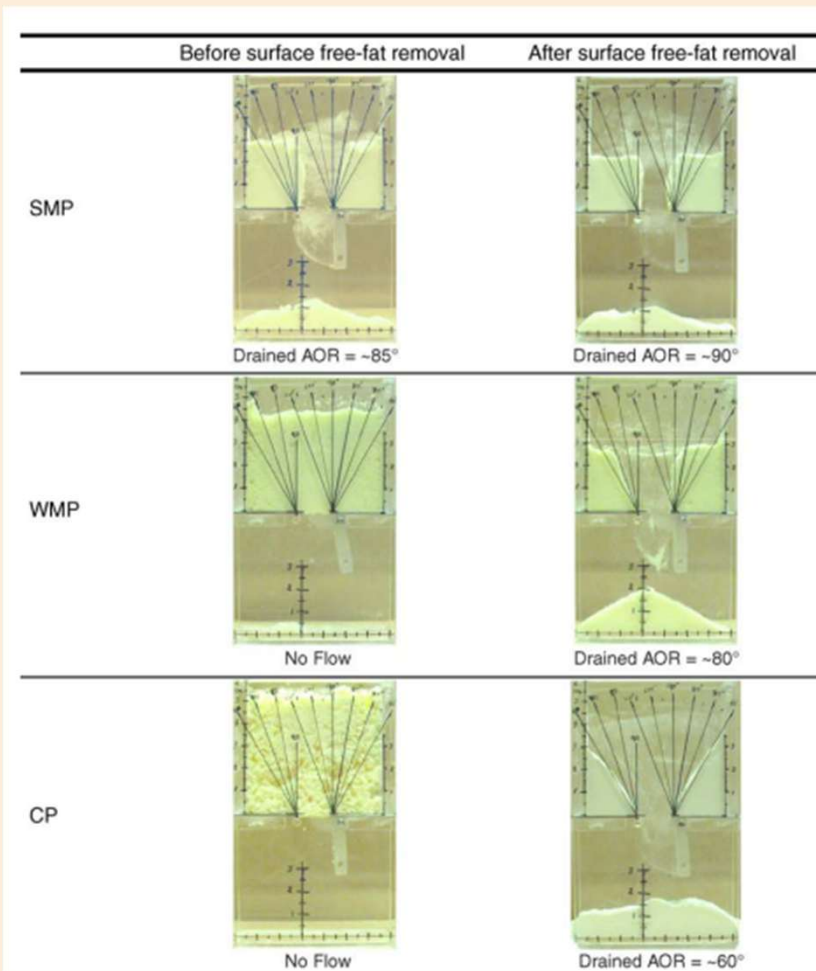
Effect of surface composition on the flowability of industrial spray-dried dairy powders

Esther H.-J. Kim^a, Xiao Dong Chen^{a,*}, David Pearce^b

Efecto de la composición superficial

	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

Efecto de la composición superficial



Efecto de la humedad

- Mayores humedades se asocian con mayor cohesividad, principalmente debido a formación de puentes inter-partícula.
- Muchos polvos alimentarios son higroscópicos

Polvo	Humedad (%)	Densidad aparente vertida (kg/m ³)	Compresibilidad	Cohesión (g/cm ²)
Sal fina	Seca	1260	0,02	~ 0
	0,6	780	0,12	50
Azúcar	Seca	620	0,152	~ 10
	0,1	500	0,185	~ 14
Almidón	Seco	810	0,12	~ 6
	18,5	690	0,15	~ 13
Fórmula infantil	Seca	460	0,08	37
	2,7	450	0,19	Demasiado cohesiva

Efecto de la cristalinidad

- La dureza, la cohesión y la compresibilidad de los polvos amorfos difieren de las de los polvos cristalinos.
- La densidad y la dureza de las partículas de los polvos cristalinos son altas, por lo que el polvo puede ser menos compresible bajo presión.
- Los polvos amorfos se deforman y compactan más, y tienden a aglomerarse bajo presión. Puede generar apelmazamiento en el fondo de una bolsa.

Efecto de otros aspectos composición

- Los agentes “anti-caking” o anti-aglomerante se agregan a las formulaciones para mejorar la fluidez de los polvos.
- Reducen las fuerzas entre partículas y la cohesividad y aumentan la densidad aparente.
- Efecto dependiente de concentración.
- Agente anti-caking y partículas deben tener afinidad superficial para lograr un aumento significativo de la densidad.
- Ejemplos (GRAS): dióxido de silicio, aluminosilicato de sodio, fosfato de calcio tribásico, estearato de calcio.

Efecto de agentes antiaglomerantes

Polvo	Agente	Concentración (%)	Densidad aparente vertida (kg/m ³)	Compresibilidad
Azúcar	Ninguno	-	700	0,066
	Estearato de calcio	0,5	870	0,039
	Dióxido de silicio	0,5	750	0,052
	Fosfato de calcio tribásico	0,5	760	0,044
Sal fina	Ninguno	-	1010	0,080
	Estearato de calcio	0,1	1140	0,032
	Dióxido de silicio	0,1	1100	0,045
	Fosfato de calcio tribásico	0,1	1160	0,025
Proteína de soja	Ninguno	-	270	0,040
	Estearato de calcio	1,0	270	0,041
	Dióxido de silicio	1,0	270	0,036
	Fosfato de calcio tribásico	1,0	310	0,024

Propiedades de rehidratación

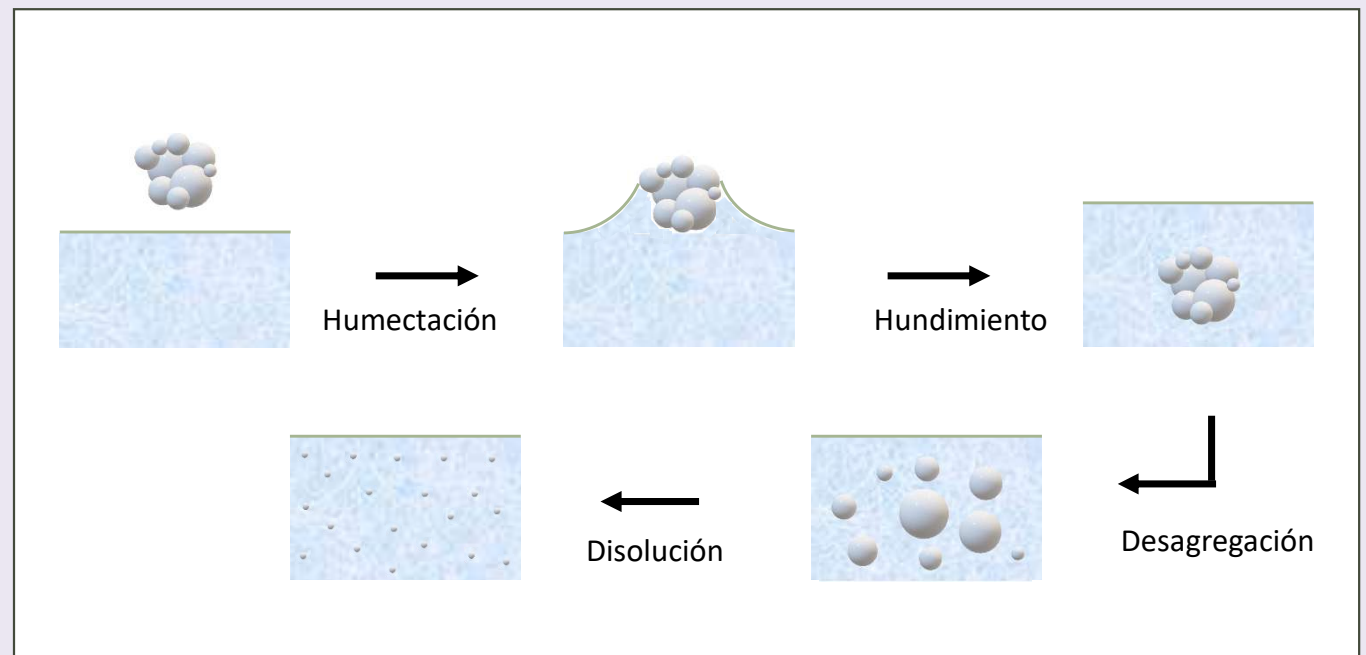
- Los polvos son materiales particulados con grandes áreas superficiales.
- La cantidad y velocidad de absorción de agua depende de las propiedades del polvo a granel y de sus propiedades superficiales (área superficial total, porosidad, grasa superficial).



Reconstitución de un polvo

- Puede dividirse en las siguientes etapas:

- 1- Humectación
- 2- Hundimiento
- 3- Desagregación
- 4- Disolución



Adaptada de Forny et al. (2011)

Humectación

- Proceso por el cual la fase gaseosa que rodea las partículas de polvo se sustituye por una fase líquida.
- Depende de la tensión interfacial entre la superficie y la fase líquida.
- **Humectabilidad:** capacidad de las partículas de un polvo de superar la tensión interfacial entre el sólido y el líquido a una determinada temperatura.
- En algunos casos también coincide con hinchamiento. Ej.: polvos proteicos.
- Depende de: tamaño de partícula, porosidad, composición superficial.

Determinación de humectabilidad de un polvo

- **ÍNDICE DE HUMECTABILIDAD:** tiempo (en segundos) requerido para que una cierta cantidad de polvo penetre en la superficie de agua en reposo.
- Depende de temperatura.
- Se recomienda mantener la relación sólido/líquido requerida para la reconstitución, durante el análisis.

Clasificación usada en sector lácteo

Índice de humectabilidad (s)	Clasificación
> 120	No humectable
60 - 120	Puede humectarse
30 - 60	Humectable
< 30	Muy humectable

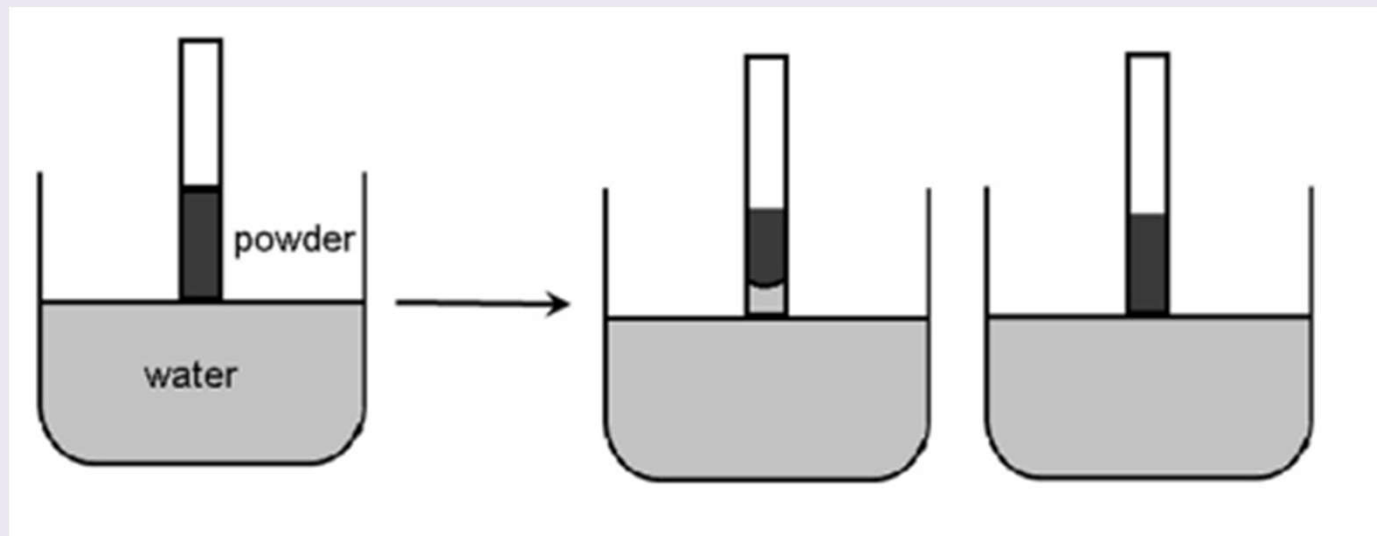
Determinación de humectabilidad de un polvo

ÍNDICE DE HUMECTABILIDAD



Determinación de humectabilidad de un polvo

- MÉTODO DE WASHBURN: se basa en el ascenso capilar.



Ji et al. (2016)

Hundimiento

- **HUNDIBILIDAD:** capacidad de las partículas o aglomerados de hundirse debajo de la superficie de agua.
- Muchas veces este término es intercambiable con el de humectación.
- La determinación de índice de humectabilidad incluye el hundimiento.
- Depende ampliamente de: tamaño y densidad de partículas.

Desagregación

- **DISPERSABILIDAD:** capacidad de desagregarse en partículas más pequeñas.
- Aumenta con: tamaño de partícula y disminuye con alta concentración de finos.

Determinación de dispersabilidad

- **ÍNDICE DE DISPERSABILIDAD:** % de materia seca que puede pasar a través de un tamiz de determinada apertura luego de agitación durante 15 s.

$$ID(\%) = \frac{(100 + w)X_{DM}}{w \frac{100 - X_{RW}}{100}}$$

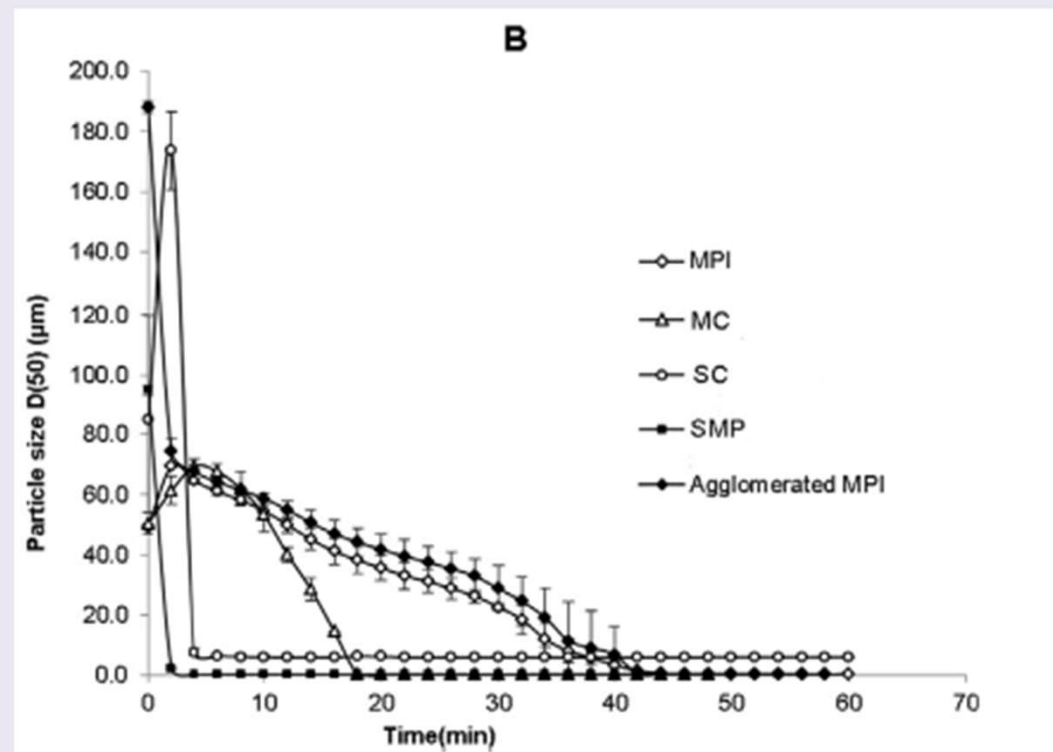
Donde:

- w es la masa de polvo usada.
- X_{DM} (% m/m) es la materia seca del filtrado
- X_{RW} (% m/m) es el contenido de humedad del polvo.

En sector lácteo: ID > 95%: polvo instantáneo

Determinación de dispersabilidad

- Por difracción laser:



Ji et al. (2016)

Disolución

- **SOLUBILIDAD:** desaparición total de estructuras granulares.
- Considerada la determinante en la calidad de reconstitución de un polvo.
- Solubilidad rápida favorecida por: presencia de pequeñas moléculas hidrofílicas en superficie

Determinación de solubilidad de polvos

- **ÍNDICE DE SOLUBILIDAD:** medida de la capacidad de disolverse en agua.
- Se expresa como % obtenido como la diferencia entre el volumen reconstituido y el volumen de sedimento.



Referencias tablas y figuras

- Forny, L.; Marabi, A.; Palzer, S. (2011). Wetting, disintegration and dissolution of agglomerated water soluble powders. *Powder Technology*, 206(1–2), 72–78.
- Ji, J.; Fitzpatrick, J.; Cronin, K.; Crean, A.; Miao, S. (2016). Assessment of measurement characteristics for rehydration of milk protein based powders. *Food Hydrocolloids*, 54: 151-161.
- Juárez-Enriquez, E.; Olivas, G.I.; Zamudio-Flores, P.B.; Perez-Vega, S.; Salmeron, I.; Ortega-Rivas, E.; Sepulveda, D.R. (2022). A review on the influence of water on food powder flowability. *Journal of Food Process Engineering*, 45(5), e14031.
- Macho, O.; Demková, K.; Gabrišová, L.; Cierny, M.; Mužíková, J.; Galbavá, P.; et al. (2020). Analysis of static angle of repose with respect to powder material properties. *Acta Polytechnica*, 60(1): 73-80.
- Rodríguez Arzuaga, M.; Abraham, A.G.; Suescun, L.; Medrano, A.; Ahrné, L.; Díaz, M.; Báez, J.; Añón, M.C. (2024). Storage stability of model infant formula powders produced under varying wet-mix processing conditions. *International Dairy Journal*, 155: 105968.
- Schuck, P.; Dolivet, A.; Jeantet, R. (2012). *Analytical Methods for Food and Dairy Powders*. John Wiley & Sons, Ltd.

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.
- Fu, X.; Huck, D.; Makein, L.; Armstrong, B.; Willen, U.; Freeman, T. (2012). Effect of particle shape and size on flow properties of lactose powders. *Particuology*, 10(2): 203-208.
- Kim, E.H.J., Dong Chen., X.; Pearce, D. (2005). Effect of surface composition on the flowability of industrial spray-dried dairy powders. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 46: 182-187.