

Reología de polvos

Alberto Tecante

Departamento de Alimentos y Biotecnología. Facultad de Química.
Universidad Nacional Autónoma de México. Cd. Universitaria, CdMx,
04510, México
tecante@unam.mx

Resumen

La reología de polvos es un área de investigación muy activa y de gran impacto científico y tecnológico en la comprensión de las propiedades de estos materiales, así como de su comportamiento de flujo durante su manejo y procesamiento. De manera general, se presentan aquí las principales propiedades físicas de los polvos y el estudio de su comportamiento reológico bajo condiciones empíricas y fundamentales. La discusión se enfoca en los polvos industriales (*powders*) que son aquellos que se procesan para obtener productos terminados de consumo final o materias primas para procesos subsecuentes. Los polvos ambientales (*dust*), usualmente considerados contaminantes o generadores de suciedad, no son tratados aquí.

Palabras clave:

Deformación, esfuerzo, flujo, mezclado, partículas, polvos, reología, sólidos.

Introducción

Un polvo, también llamado sólido a granel, es un material granular formado por partículas de tamaño heterogéneo en el que un gas, usualmente aire, ocupa el espacio

intersticial entre las partículas. Las partículas son generalmente rígidas y pueden tener líquidos adsorbidos en su superficie o como parte de su constitución química, por ejemplo, agua, y también interaccionar entre sí de diferentes formas y en diferentes grados [1, 2]. En consecuencia, el término polvos incluye a una gran variedad de materiales provenientes de las industrias química, metalúrgica, de la construcción, farmacéutica, de cosméticos y alimentos, entre otras, lo que hace evidente su importancia. El Cuadro 1 muestra una clasificación general de polvos basada en el intervalo de tamaño aproximado de partícula.

Los polvos son muy complejos, debido a sus propiedades físicas y a su sensibilidad a muchos factores externos que pueden modificar su comportamiento cuando están en reposo o en movimiento. Con frecuencia, la distancia entre las partículas cambia durante su desplazamiento y puede producirse un empaquetamiento que afecta a su dinámica. Por ejemplo, en los polvos cohesivos las partículas pueden aglomerarse a tal punto que no se mueven como entidades individuales sino como una masa más o menos empaquetada que se des-

Cuadro 1. Clasificación de material granular por tamaño de partícula. Complementado de [2]

Tamaño (μm)	Polvo/sólido	Partícula individual	Algunos ejemplos
Entre 0.1 y 1.0	Hiperfino, ultrafino	Ultrafina	Polvos metalúrgicos
Entre 1.0 y 10	Superfino	Superfina	Cemento, carbón activado
Entre 10 y 100	Granular	Gránulo	Almidón crudo, harinas
Entre 100 y 3000	Granular grueso	Granular	Granulados farmacéuticos
Entre 3000 y 10000	Sólido triturado	Triturada	Croquetas para mascota

plaza con dificultad. Por el contrario, en los polvos no cohesivos en los cuales la separación entre partículas es mayor, estas se mueven de manera individual y muestran menos dificultad para desplazarse. Los polvos cohesivos pueden soportar esfuerzos de cizalla [3, 4] cuando están en reposo y apilarse hasta un cierto grado sin desplazarse, deslizarse, resbalarse o moverse en avalancha. Las mezclas de polvos no cohesivos de diferentes tamaños o materiales pueden con frecuencia segregarse separando los constituyentes, aun cuando están en reposo [2]. Por otro lado, en los polvos cohesivos la segregación no es usual, pero alcanzan la uniformidad cuando se mezclan con otros polvos es más difícil y consume más energía [5].

Las operaciones de proceso como la fluidización, reducción de tamaño, mezclado mecánico o neumático, transporte mecánico o neumático, clasificación por tamaño, envasado por gravedad, tableteado, granulación, entre otras, someten a los polvos a esfuerzos y deformaciones que afectan su comportamiento. Por ello, al igual que en los líquidos, la reología se vuelve indispen-

sable para entender su comportamiento mecánico y la forma en que la estática y la dinámica de estos materiales se ve afectada o influenciada por distintos factores propios de su procesamiento y manejo. A pesar de que este hecho ha sido reconocido desde hace tiempo [6], los avances más importantes en este campo han ocurrido solamente a partir de la última década del siglo XX. Existe, actualmente, un número abundante y cada vez creciente de reportes científicos sobre las propiedades y comportamiento reológico de polvos y sus propiedades de flujo. Sin embargo, una revisión exhaustiva general o específica de estos aspectos está fuera del propósito de este artículo.

Propiedades físicas

Los polvos tienen propiedades físicas que les dan identidad en términos de su composición fisicoquímica, así como de su comportamiento bajo condiciones estáticas y dinámicas. La identidad puede ser individual, es decir, de las partículas que forman el polvo, o colectiva propia de toda la masa de polvo. La discusión detallada de todas y cada una de las propiedades físicas puede ser consultada en [1, 2, 7]. No

obstante, conviene señalar las propiedades más relevantes asociadas con el comportamiento de los polvos durante su manejo y procesamiento mecánico.

Adhesión: Es la adherencia entre un polvo y una superficie sólida. Es una propiedad de interfase de carácter primordialmente físico. Es débil en comparación con la adhesión química y usualmente es reversible.

Ángulo de reposo: Es el ángulo formado entre el plano horizontal y el perfil inclinado que forma una pila de polvo a granel cuando cae por gravedad y reposa sobre el plano. Es medido por el interior de la pila de polvo (Figura 1a).

Ángulo de reposo vertido: Es el ángulo de reposo por debajo del punto de fluidez del polvo a granel. Es el ángulo de reposo máximo o más pronunciado (Figura 1a).

Ángulo de reposo drenado: Es el ángulo de reposo cuando una pila de polvo emerge gradualmente y se desliza o se mueve en avalancha más allá de la periferia de la pila sobre un plano horizontal previamente enterrado en el polvo (Figura 1b).

Ángulo de deslizamiento: Es el ángulo formado por el perfil del polvo a granel cuando estando inicialmente estático escapa por la abertura del recipiente que lo contiene. Es medido por el interior del polvo que queda dentro del contenedor y debe indicarse la forma de dicho recipiente y su abertura [6] (Figura 1c).

Ángulo de fricción en la pared: Es el ángulo de inclinación de un plano inicialmente horizontal cuando su inclinación provoca el deslizamiento del polvo (Figura 1d).

Cohesión: La cohesión es la adherencia de las partículas de polvo a granel entre sí. Representa la resistencia del polvo a la cizalla [3] ante la aplicación de una carga normal de compresión.

Compresibilidad: Es el cambio de la densidad a granel con la presión aplicada al polvo.

Densidad: Usualmente es la densidad de la partícula que forma el polvo. En las mezclas de polvos es la densidad de las partículas que las forman.

Densidad a granel: Es la relación entre la masa de un polvo no compactado intencionalmente, también llamado no aireado, y el volumen que ocupa dicha masa. Depende del grado de compactación del polvo en el momento de la medición.

Densidad compactada: Es la relación entre la masa y el volumen de un polvo que ha sido compactado intencionalmente hasta un cierto grado.

Falla interna: Es la cizalla inducida por la aplicación de una carga normal conocida y controlada sobre una cama de polvo.

Fricción en la pared: Es la fuerza de fricción entre un polvo y una superficie sólida cuando hay movimiento. Usualmente el polvo se mueve y la superficie sólida está estática. Sin embargo, también puede ocurrir el caso contrario.

Permeabilidad: Es la tasa de migración del fluido intersticial, usualmente aire, a través del polvo por efecto de un gradiente de presión. Es importante en los polvos aireados, es decir, aquellos sometidos a operaciones de fluidización o de transporte neumático.

Resistencia a la tracción: Es la fuerza por unidad de área de superficie necesaria para romper una cama de sólido a granel compactado, sin presencia de cizalla, sobre el plano donde ocurre la fractura.

Tamaño de partícula: Es el tamaño expresado mediante un diámetro promedio conveniente [8] referido con frecuencia al diámetro equivalente de una esfera.

Volumen específico: Es el inverso de la densidad a granel.

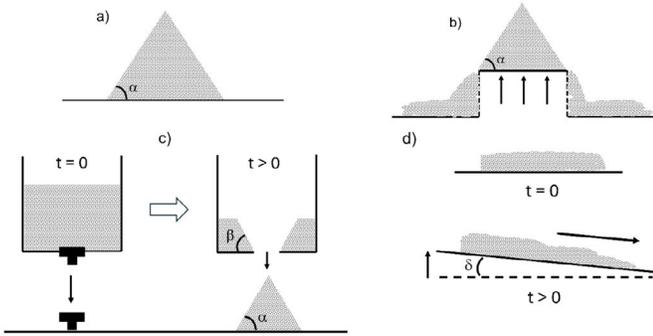


Figura 1. Representación esquemática de: a) ángulo de reposo y ángulo de reposo vertido (ángulo de reposo máximo), α , b) ángulo de reposo drenado, α , c) ángulo de deslizamiento, β , y d) ángulo de fricción en la pared, δ .

Propiedades reológicas

Fricción y cohesión: El comportamiento reológico de muchos polvos está descrito por una relación lineal, como ocurre con los sólidos elásticos y los fluidos viscosos. A esos polvos se les conoce como materiales ideales de Coulomb [2] y la relación lineal que describe su comportamiento es:

$$\tau = \mu\sigma + C \quad (1)$$

τ es el esfuerzo de cizalla [3, 4], μ es el coeficiente de fricción interna, σ es el esfuerzo normal [3, 4] y C es la cohesión del polvo. El coeficiente μ es el análogo de la viscosidad de los fluidos, dado que representa la resistencia del polvo al movimiento relativo ante la aplicación de un esfuerzo normal. La cohesión es el esfuerzo de cizalla necesario para que el polvo ceda ante la aplicación de un esfuerzo normal y empiece a fluir, dado que cuando $\tau < \mu\sigma + C$ no hay flujo. La cohesión se atribuye a la interacción entre las partículas de polvo responsable de la existencia de fuerzas internas en toda la masa de polvo [7]. Los conceptos de elasticidad y viscosidad no tienen sentido en el caso de los polvos, a menos de que las partículas que los forman no sean rígidas o que el polvo se convierta de alguna manera

en una pasta o suspensión concentrada de sólidos embebidos en un líquido, por ejemplo, un lodo, en cuyo caso el comportamiento reológico estaría descrito por las ecuaciones aplicables a los fluidos. El orden de magnitud de C sirve para distinguir los polvos cohesivos de los no cohesivos. Un polvo no cohesivo típico de esferas de vidrio ($175 \mu\text{m}$) tiene una cohesión entre 0 y 1.5 kPa, para una humedad adsorbida de 0 y 1 %, respectivamente, mientras que un polvo sustituto de crema para café tiene una cohesión entre 4.81 y 3.14 kPa, para contenidos de humedad de 0 a 7 %, respectivamente [7]. Cuando C es muy pequeño $\tau = \mu\sigma$ y, al multiplicar por el área del plano de falla del polvo, se obtiene $F = \mu N$, que es la bien conocida ecuación que relaciona la fricción entre cuerpos rígidos no granulares. La ecuación (1) suele presentarse como:

$$\tau = \sigma \tan\Phi + C \quad (2)$$

Φ es el ángulo de fricción, cuyo valor depende del material. Por ejemplo, entre 27 y 47° para alúmina, 33 y 40° para arena de cuarzo seca y 28 y 42° para harina de trigo [1]. Las desviaciones de las ecuaciones (1) y (2) requieren un análisis con la ecuación no lineal de Warren-Spring [7, 9].

Resistencia a la tracción: Esta resistencia está dada [1] por la relación:

$$T = \frac{W \text{ sen}\theta}{A} \quad (3)$$

W es el peso de la cama de polvo compactado, A es el área transversal y θ es el ángulo de inclinación en el momento en que la cama se fractura. Esta propiedad representa la tendencia del polvo compactado a resistir la escisión por la acción de una tensión de tracción y es considerada

como la manifestación macroscópica externa de fuerzas de atracción internas entre las partículas que forman el polvo [9]. La magnitud de estas fuerzas depende de la distancia entre las partículas empacadas. En los polvos cohesivos, T aumenta al aumentar la densidad de la cama compactada porque el número de partículas por unidad de volumen y la intensidad de las fuerzas entre partículas aumentan.

Resistencia a la cizalla: En los polvos no cohesivos $C \rightarrow 0$ en la ecuación (2) y cuando $\sigma = 0$ se cumple que $\tau = 0$. Entonces, el polvo no tiene resistencia a la cizalla, es decir, fluye libremente. En los polvos cohesivos, $C > 0$ y cuando $\sigma = 0$, se cumple que $\tau = C$. El polvo se resiste a la cizalla o, dicho de otra forma, está a punto de ceder y deslizarse por efecto de la presencia de un esfuerzo de cizalla. Por lo tanto, la magnitud de este esfuerzo es la resistencia a la cizalla.

Dilatancia: Es el aumento de volumen de un polvo cuando es sometido a deformaciones de cizalla [10]. Esta propiedad es importante durante el vaciado de silos.

Deslizamiento a punto: En general, los polvos cohesivos tienen “memoria”. El deslizamiento a punto (*ready sliding*) es un estado determinado por la historia previa de perturbación del polvo [1]. Por esta razón, puede ser necesario acondicionar previamente la muestra de polvo con una historia conocida antes de examinar la propiedad reológica o mecánica de interés.

Fluidez: Es la facilidad con la que una masa de polvo se desplaza una cierta distancia en un intervalo de tiempo. Es la respuesta dinámica de los polvos ante la aplicación de alguna cinemática particular. La dinámica

y la cinemática están relacionadas por alguna propiedad del polvo que gobierne su respuesta. Existen diferentes criterios para calificar la fluidez y así clasificar a los polvos. Las propiedades intrínsecas de los polvos y su interacción con factores externos afectan su fluidez.

Determinación experimental de las propiedades reológicas de los polvos

Existen diferentes métodos para determinar la fluidez de los polvos mediante la medición de alguna propiedad particular. Los métodos varían según se trate de polvos no aireados, aquellos con la fase gas intersticial natural, o polvos aireados cuya fase gas intersticial es modificada de alguna manera, por ejemplo, por fluidización. Los métodos pueden ser empíricos o fundamentales dependiendo del aparato que se use para aplicar la cinemática. La discusión se centra aquí en los polvos cohesivos no aireados [7-11, 12].

Pruebas cualitativas o empíricas: Sirven para comparar comportamientos de distintos polvos, por ejemplo, para propósitos de control de calidad. La fluidez se determina midiendo el ángulo de reposo y sus variantes por medio de embudos, cilindros con fondo cónico con orificio de descarga, y silos de diferente tamaño y sección transversal en los que el polvo fluye por gravedad o por vibración del dispositivo cuando la gravedad es insuficiente. La fluidez del polvo puede también ser caracterizada mediante el índice de Carr [7]:

$$\text{Índice de Carr} = \left(\frac{\text{densidad compactada} - \text{densidad a granel}}{\text{densidad compactada}} \right) 100 \quad (4)$$

y la relación de Hausner [7], H:

$$H = \frac{\text{densidad compactada}}{\text{densidad a granel}} \quad (5)$$

El Cuadro 2 muestra el uso de varios criterios para clasificar la fluidez de los polvos.

Pruebas fundamentales: En estas pruebas se aplica una cinemática controlada de esfuerzos o deformaciones. Se examinan las propiedades de falla interna de la masa de polvo no aireado como el ángulo de fricción en la pared, el ángulo efectivo de fricción interna, la función de falla, que representan la resistencia del polvo a fluir [13]. Adicionalmente, la cohesión y la resistencia a la tracción son específicas del comportamiento de flujo del polvo. Todas estas propiedades dependen notablemente del estado de compactación del polvo, el cual es significativo en los polvos cohesivos y prácticamente nulo en los no cohesivos o de flujo libre. La humedad, la temperatura y el tiempo de consolidación también pueden afectar a estas propiedades. Los instrumentos que se usan son esencialmente celdas de cizalla mono, bi, triaxiales y sus variantes como el anillo de cizalla, así como reómetros de polvos modernos [13, 14]. Asimismo, existen celdas comerciales específicas para determinar el ángulo de fricción en la pared y la resistencia a la tracción [15].

Cuadro 2. Criterios empíricos de fluidez de polvos. Compilado de [16, 17]

Fluidez	Ángulo de reposo (°)	H	Índice de Carr
Excelente	25 a 30	1.00 a 1.11	5 a 11
Buena	31 a 35	1.12 a 1.18	12 a 17
Adecuada ^(a)	36 a 40	n.e.	n.e.
Aceptable ^(b)	41 a 45	1.19 a 1.34	18 a 22
Pobre ^(c)	46 a 55	1.35 a 1.45	26 a 31
Muy pobre	56 a 65	1.46 a 1.59	35 a 38
Extremadamente pobre	Mayor de 66	Mayor de 1.60	Mayor de 38

^{a)}no necesita ayuda, ^(b)puede demorarse, ^(c)es necesario someterlo a vibración, n.e. no especificado.

Celda de cizalla y anillo de cizalla: La celda de cizalla o celda Jenike [18] y su variante el anillo de cizalla se usan para determinar la fluidez de los polvos cohesivos. Los fundamentos de su funcionamiento, ventajas, desventajas y limitaciones pueden consultarse en [1, 2, 11, 13, 18]. Las pruebas con estos dispositivos se consideran fundamentales, porque examinan la respuesta del polvo ante la aplicación de esfuerzos normales, σ , conocidos y controlados sobre una cama de polvo estática (celda) o dinámica (anillo) y se determinan los esfuerzos de cizalla, τ , resultantes. Con los pares de datos σ - τ se construye la curva de cedencia (*yield locus*) y con ella se determina la cohesión, el ángulo de fricción interna y la resistencia a la tracción límite. La fluidez se determina a partir del análisis con los semicírculos de Mohr [1, 2, 11, 13, 18] como se ilustra en la Figura 2.

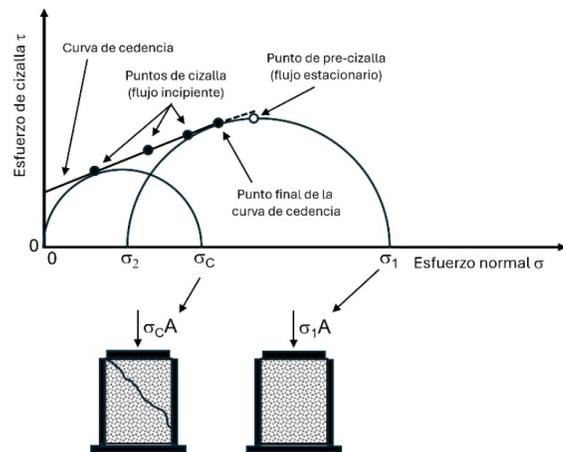


Figura 2. Curva de cedencia y semicírculos de Mohr para localizar el esfuerzo normal de cedencia no confinado, σ_c (flujo incipiente), y el esfuerzo normal de consolidación, σ_1 (flujo másico), como se muestra esquemáticamente debajo de la gráfica

El factor de flujo, ff , [7, 11], se calcula como:

$$ff = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \quad (6)$$

El valor de ff se usa como criterio de fluidez [18] como se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Fluides de acuerdo con el criterio de ff [7, 11, 18]

ff	Condición
Menor de 1	No hay flujo
Entre 1 y 2	Muy cohesivo, mucha dificultad para fluir
Entre 2 y 4	Cohesivo, fluye con dificultad
Entre 4 y 10	Poco cohesivo, fluye con facilidad
Mayor de 10	No cohesivo, fluye libremente

Reómetros de polvos

Las primeras investigaciones sistemáticas con estos equipos se hicieron principalmente con reómetros para fluidos adaptados para poner en movimiento con un dispositivo de palas verticales rectas una masa de polvo contenida en una copa cilíndrica (Figura 3a). El comportamiento del polvo ante cinemáticas estacionarias angulares o no estacionarias oscilatorias fue examinado mediante la variación del torque con la rapidez o el esfuerzo de cizalla según el reómetro utilizado y los resultados presentados como “viscosidad” del polvo [19]. Actualmente, se ha popularizado el uso de un reómetro de polvos [14, 20] en el que se aplica una cinemática helicoidal con un dispositivo de dos hojas horizontales de forma triangular torcida en sentido contrario que desciende y asciende al mismo tiempo que gira angularmente sobre su eje en el interior de la masa de polvo (Figura 3b).

Según el fabricante [14], la cinemática helicoidal usada con distintos accesorios permite caracterizar la dinámica de flujo de polvos no aireados, aireados, consolidados, así como propiedades a granel como compresibilidad y permeabilidad. Adicionalmente, el acoplamiento de una celda de cizalla al reómetro permite determinar las propiedades señaladas en la sección precedente.

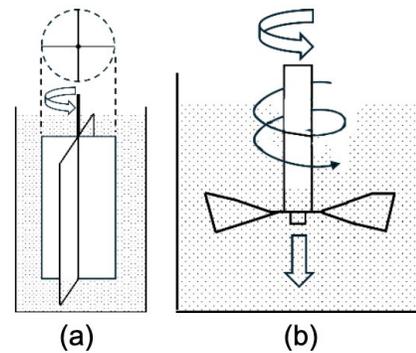


Figura 3. (a) Palas rectas, (b) hojas torcidas

Conclusión

Existen muchos métodos diferentes para analizar el comportamiento mecánico de polvos. La reología de polvos permite determinar ese comportamiento bajo condiciones usuales de manejo y procesamiento de estos materiales. Los métodos pueden agruparse en empíricos y fundamentales. Los primeros usan mediciones simples y rápidas que permiten diagnosticar y resolver situaciones prácticas durante el procesamiento. Sin embargo, su utilidad puede ser limitada a actividades específicas como el control de calidad. Los segundos permiten comprender de una mejor manera las propiedades y el comportamiento del polvo con base en el estudio de su mecánica fundamental. El término fluides no deja de ser relativo, porque el flujo real de un polvo depende de sus propiedades y de la cinemática aplicada en los diferentes instrumentos usados para su evaluación.

Referencias

- [1] R. L. Brown, J. C. Richards, Principles of Powder Mechanics. Essays on the Packing and Flow of Powders and Bulk Solids, Pergamon, Oxford, UK, 1970.
- [2] R. M. Nedderman, Statics and Kinematics of Granular Materials, Cambridge University Press, New York, 1992.
- [3] J. M. Aguilera, L. D. Hidalgo, Glosario de Términos Reológicos para Alimentos en español y en portugués, Gráficas Barrastil, Valencia, España, 1996.
- [4] Groupe Français de Rhéologie, Dictionnaire de Rhéologie : Français, Anglais, Allemand, Espagnol, Société d'Éditions du Bâtiment et des Travaux Publics, Paris, France, 1990.

- [5] I. Gijón-Arreortúa, A. Tecante, Mixing time and power consumption during blending of cohesive food powders with a horizontal helical double-ribbon impeller, *Journal of Food Engineering* 149 (2015) 144–152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.10.013>
- [6] B. H. Kaye, *Powder Mixing*, Chapman & Hall, London, UK, 1997.
- [7] G. V. Barbosa-Cánovas, E. Ortega-Rivas, P. Juliano, H. Yan, *Food Powders: Physical Properties, Processing and Functionality*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2005.
- [8] M. Anderliesten, *Mean Particle Diameters. From Statistical Definition to Physical Understanding*, Gildeprint, Enschede, The Netherlands, 2008.
- [9] P. García-Triñanes, S. Luding, H. Shi, Tensile strength of cohesive powders, *Advanced Powder Technology* 30 (2019) 2868–2880. <https://doi:10.1016/j.appt.2019.08.017>
- [10] M. E. Cates, M. D. Haw, C. B. Holmes, Dilatancy, jamming, and the physics of granulation, *Journal of Physics: Condensed Matter* 17(24) (2008) S2517–S2531. <https://doi:10.1088/0953-8984/17/24/010>
- [11] D. Schulze, *Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [12] M. Peleg, Flowability of food powders and methods for its evaluation - a review, *Journal of Food Process and Engineering* 1 (1977), 303–328.
- [13] L. Svarovsky, *Powder Testing Guide: Methods of Measuring the Physical Properties of Bulk Powders*. Elsevier Applied Science Publishers LTD, Great Britain, 1987.
- [14] <https://www.micromeritics.com/ft4-powder-rheometer/?lang=es> (consultado en marzo de 2024).
- [15] <https://www.ajax.co.uk/powdertest.htm#group-1> (consultado en marzo de 2024).
- [16] Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos (FEUM). Ángulo de reposo (2021) <https://pdfcoffee.com/feum-angulo-reposo-2-pdf-free.html> (consultado el 12 de junio de 2024)
- [17] Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos (FEUM). Densidad aparente y densidad compactada de los polvos (2021). <https://pdfcoffee.com/densidad-polvos-4-pdf-free.html> (consultado el 12 de junio de 2024)
- [18] A. W. Jenike, Storage and flow of solids. Bulletin. No. 123 of the Engineering Experiment Station, Vol 53, No. 26, November 1964. University of Utah, Salt Lake City, United States. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1067072/m1/1/> (consultado en marzo de 2024).
- [19] A. Barois-Cazenave, P. Marchal, V. Falk, L. Choplin, Experimental study of powder rheological behaviour, *Powder Technology* 103 (1999) 58–64.
- [20] R. Freeman, Measuring the flow properties of consolidated, conditioned and aerated powders — A comparative study using a powder rheometer and a rotational shear cell, *Powder Technology* 174 (2007) 25–33. <https://doi:10.1016/j.powtec.2006.10.016>