



## Caracterización avanzada de polvos

Beatriz Achiaga\*, Beatriz Betto, Vitória Girardi, Lorenzo Pedrolli, Alejandro López

<sup>1</sup> Department of Mechanics, Design and Industrial Management, University of Deusto, Bilbao, Spain  
beatriz.achiaga@deusto.es

---

*El análisis reológico de los polvos desempeña un papel fundamental en la comprensión y determinación de propiedades clave como la adhesión, cohesión y fluidez, que son esenciales para optimizar los procesos en diversas industrias, tales como la alimentaria, el almacenamiento, el diseño de tolvas y la manufactura aditiva. En este contexto, la reología se refiere al estudio del comportamiento de flujo y deformación de los materiales en polvo bajo fuerzas aplicadas. Al evaluar las fuerzas superficiales—específicamente, la adhesión (adhesión de partículas a superficies), la cohesión (adhesión de partículas entre sí) y la resistencia al corte (resistencia al deslizamiento)—los profesionales de la industria pueden predecir y controlar la fluidez del polvo, un factor primordial en la eficiencia de los procesos y la calidad del producto. Este trabajo presenta el procedimiento para determinar los parámetros relevantes de una selección de polvos utilizados en distintos sectores industriales, desde la harina común hasta los polvos metálicos finos empleados en la sinterización selectiva por láser (SLS).*

---

## 1. Introducción

La reología de los polvos es un campo crucial para comprender y optimizar procesos industriales en los que la manipulación de materiales pulverizados desempeña un papel esencial. La capacidad de predecir y controlar la fluidez del polvo no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también garantiza la calidad del producto final en una amplia gama de aplicaciones, desde alimentos como la harina común, hasta materiales avanzados como los polvos metálicos empleados en la fabricación aditiva y la metalurgia en polvo, e incluso fármacos. Cuando los polvos se almacenan o se transfieren a través de tolvas y silos, el conocimiento de sus características de flujo permite a los ingenieros diseñar contenedores que minimicen los atascos y promuevan una descarga fluida. Las mediciones de adhesión y cohesión son especialmente importantes para prevenir la formación de arcos (donde las partículas se agrupan y bloquean el flujo) y el efecto de canalización (donde el flujo solo ocurre en un camino estrecho), ambos de los cuales pueden ocasionar ineficiencias operativas y riesgos de seguridad. Al aplicar conocimientos reológicos, los diseñadores pueden ajustar los ángulos de las tolvas, las formas de los orificios de salida y las configuraciones de vibración para lograr un flujo óptimo [1], [2], [3], [4].

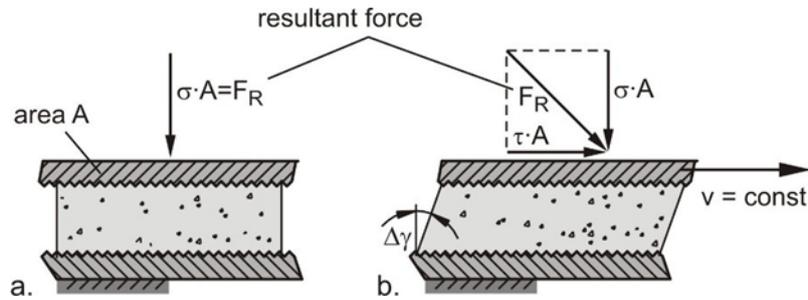
En la industria alimentaria, comprender la reología de los polvos ayuda a mantener la consistencia y calidad de productos en polvo como la harina, el azúcar y la leche en polvo. Controlar adecuadamente las propiedades de adhesión y cohesión de estos polvos es esencial para evitar problemas como la formación de grumos, la mezcla inconsistente y la dispersión desigual, lo que puede afectar la calidad del producto y aumentar el desperdicio. En la manufactura aditiva, especialmente en procesos basados en polvo como la sinterización selectiva por láser (SLS) y la impresión por inyección de aglutinante, entender el comportamiento del polvo es crucial. Una alta adhesión y cohesión pueden impedir una extensión uniforme de las capas, comprometiendo la calidad y resolución de la impresión. Las propiedades reológicas informan la selección de materiales, los métodos de deposición de capas y los parámetros de procesamiento, permitiendo a los fabricantes crear componentes con mayor precisión y fiabilidad [5], [6].

En este contexto, la evaluación de propiedades reológicas permite identificar parámetros clave como la cohesividad, el tamaño y la distribución de partículas, el contenido de humedad y las interacciones superficiales, factores que afectan directamente el comportamiento de los polvos durante su procesamiento. Estos parámetros se determinan mediante técnicas como el análisis del índice de Carr, la densidad compactada, la relación de Hausner y el uso de reómetros de polvo avanzados, que ofrecen información detallada sobre la resistencia al flujo y las condiciones óptimas de manipulación.

La metodología de ensayo con células de cizalladura fue desarrollada por A.W. Jenike[7] para el diseño de tolvas y silos, se basa en la mecánica de sólidos y se ha convertido en una herramienta clave para evaluar la fluidez y la densidad aparente de materiales granulares. Estos ensayos permiten determinar parámetros como el ángulo de fricción interna y la inclinación óptima de las paredes de tolvas, facilitando así el diseño y manipulación de polvos en procesos industriales. Debido a su importancia, se han establecido normas internacionales para su aplicación, y diversos estudios han analizado tanto la validez de los resultados obtenidos como modificaciones en el procedimiento [8], [9].

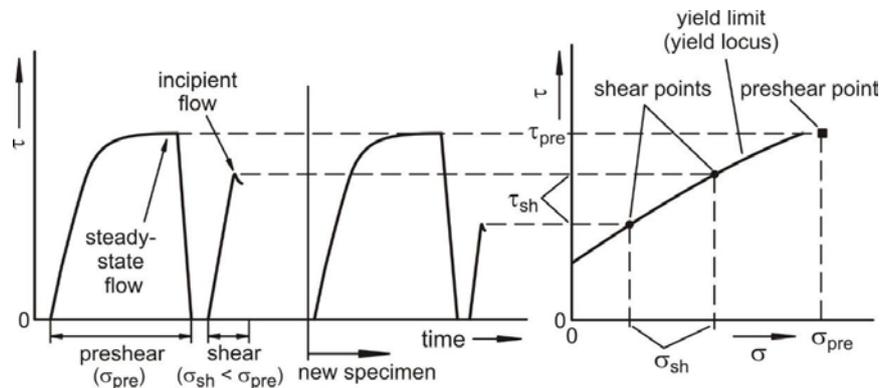
A pesar de la disponibilidad de distintos tipos de celdas de cizalladura, existen pocos estudios comparativos entre ellos, lo que genera incertidumbre sobre la consistencia de sus mediciones. Investigaciones previas han mostrado similitudes generales en tendencias de resultados entre diferentes dispositivos[8], pero aún persisten dudas sobre su equivalencia. En contraste, la medición reológica de fluidos ha avanzado hasta lograr coherencia entre distintos dispositivos, lo que aún no se ha logrado plenamente en la evaluación de polvos. Dado el uso generalizado de estas pruebas, es esencial abordar estas diferencias para mejorar la confiabilidad de las mediciones en la industria [10].

Para determinar las propiedades de fluidez de las partículas se realizan ensayos de cizalladura. El objetivo de un ensayo de cizalladura es medir el límite de fluencia (yield locus) de un compacto. En el ensayo, una muestra de sólido a granel se carga verticalmente con una tensión normal,  $\sigma$  (Fig. 1a). Posteriormente, se aplica una deformación cortante sobre la muestra moviendo la placa superior con una velocidad constante,  $v$ . Esto da como resultado una tensión de cizalladura horizontal,  $\tau$ . Al aumentar la tensión de corte, la fuerza resultante,  $FR$  aumenta. El ensayo consiste principalmente en dos etapas, la consolidación de la muestra y posteriormente la cizalladura hasta la rotura [11].



**Figura 1:** Muestra de compacto: a. carga inicial con tensión normal  $\sigma$ ; b. deformación cortante (velocidad  $v = \text{constante}$ ). Adaptado de [11]

Para la consolidación, la muestra se somete a una tensión normal bien definida,  $\sigma = \sigma_{pre}$ . Al comienzo de la cizalladura, la tensión cortante  $\tau$  aumenta con el tiempo. Con el tiempo, la curva se vuelve más plana y, finalmente, la tensión de corte permanece constante, siendo esta  $\tau_{pre}$ . Una vez que se ha alcanzado una tensión constante, ni la resistencia al corte (ni la fuerza) ni la densidad aparente aumentan más. Por lo tanto, la muestra sólida a granel se corta con una tensión normal constante,  $\sigma$ , una tensión de corte constante,  $\tau$ , y una densidad aparente constante,  $\rho_b$ . Por lo tanto, el flujo, o deformación plástica, se produce con una densidad aparente constante. Este tipo de flujo, alcanzado en el corte previo, se denomina flujo en estado estacionario. El estado del sólido a granel después de alcanzar el flujo en estado estacionario se denomina “consolidado críticamente con respecto a la tensión normal,  $\sigma_{pre}$ ”. La tensión característica para esta consolidación se corresponde la tensión principal  $\sigma_1$ . La densidad aparente,  $\rho_b$ , y la tensión de corte,  $\tau_{pre}$ , alcanzadas en el flujo en estado estacionario son características de la tensión normal aplicada en cizalladura,  $\sigma_{pre}$ . En principio, se alcanzará un estado idéntico de consolidación, caracterizado por la misma densidad aparente,  $\rho_b$ , y la misma tensión de corte,  $\tau_{pre}$ , con otras muestras del mismo material bajo la misma tensión normal,  $\sigma_{pre}$ . Después de que la muestra se haya consolidado mediante el procedimiento de precarga, la deformación de corte se invierte hasta que la tensión de corte,  $\tau$ , se reduce a cero. El par de valores de la tensión normal y la tensión cortante en el flujo en estado estacionario ( $\sigma_{pre}$ ,  $\tau_{pre}$ ) se representa en un diagrama de tensión normal-tensión cortante (diagrama  $\sigma, \tau$ , Fig. 2, derecha). El punto ( $\sigma_{pre}$ ,  $\tau_{pre}$ ) se denomina “punto de precarga”.

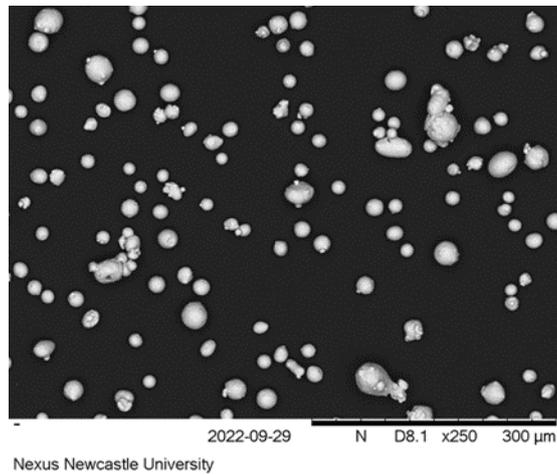


**Figura 2:** Muestra de compacto: a. carga inicial con tensión normal  $\sigma$ ; b. deformación cortante (velocidad  $v = \text{constante}$ ) Adaptado de [11]

Este trabajo revisa los procedimientos empleados para caracterizar la reología de una selección de polvos utilizados en distintos sectores industriales, destacando su impacto en aplicaciones específicas. Desde garantizar la uniformidad en la mezcla de productos alimenticios, hasta optimizar la compactación y sinterización de polvos metálicos, el conocimiento reológico resulta fundamental para desarrollar estrategias que incrementen la productividad y reduzcan defectos en los productos terminados. Para ello se realizan ensayos a diferentes temperaturas y humedad que afectan al comportamiento de las partículas cuando son manipuladas.

## 2. Materiales y métodos

Los materiales empleados en esta investigación fueron polvo de fabricación aditiva suministrado por Oerlikon 316L con un tamaño de partícula entre 20 y 60  $\mu\text{m}$ . Por otra parte, se analizaron carbonato cálcico suministrado por Sigma-Aldrich con tamaño medio de partícula de 50  $\mu\text{m}$ , azúcar granulado o de mesa de la Azucarera con tamaño medio de 600  $\mu\text{m}$  y maicena con tamaño de 15  $\mu\text{m}$ .



**Figura 3:** SEM polvo 316L con escala de x250.

La metodología empleada fue de acuerdo a las recomendaciones de Anton Paar [12]. La fluidez de un sólido a granel se caracteriza principalmente por su resistencia a la fluencia libre,  $\sigma_c$ , en función de la tensión de consolidación,  $\sigma_1$ , y del periodo de almacenamiento,  $t$ . Normalmente, la relación  $ffc$  entre la tensión de consolidación,  $\sigma_1$ , y la resistencia a la fluencia libre,  $\sigma_c$ . Cuanto mayor sea  $ffc$ , es decir, cuanto menor sea la relación entre la resistencia a la fluencia libre,  $\sigma_c$ , y la tensión de consolidación,  $\sigma_1$ , mejor fluye un sólido a granel.

El equipo empleado para caracterizar los diferentes materiales ha sido el reómetro Anton Paar con diferentes materiales y condiciones con el fin de evaluar la fluidez y el comportamiento a cizalladura, siendo uno de los parámetros principales que afectan a la fluidez del material el tamaño de las partículas [13].

De forma similar a la clasificación utilizada por Jenike [14], se puede definir el comportamiento del flujo de la siguiente manera:

$ffc < 1$  no fluye

$1 < ffc < 2$  muy cohesivo

$2 < ffc < 4$  cohesivo

$4 < ffc < 10$  de fácil fluidez

$10 < ffc$  de fluidez libre



**Figura 4:** Utillaje de la celda de cizalladura inferior y superior.

Las condiciones de ensayo empleadas en el presente trabajo fueron las mismas para todos los materiales analizados con el fin de evaluar la influencia del tamaño de partícula y de las condiciones de ensayo en la fluidez del material. En la tabla 1 se muestran las condiciones de los ensayos. Para realizar el ensayo se establecieron tres puntos de precarga y 3 puntos de cortante, siendo la presión máxima 9kPa.

**Tabla 1:** Condiciones de ensayo.

Precarga- (kPa)	Tensión normal (kPa)	Tensión normal de cizalladura (kPa)	Velocidad de rotación (1/min)
3		1.2	0.005
3		1.8	0.005

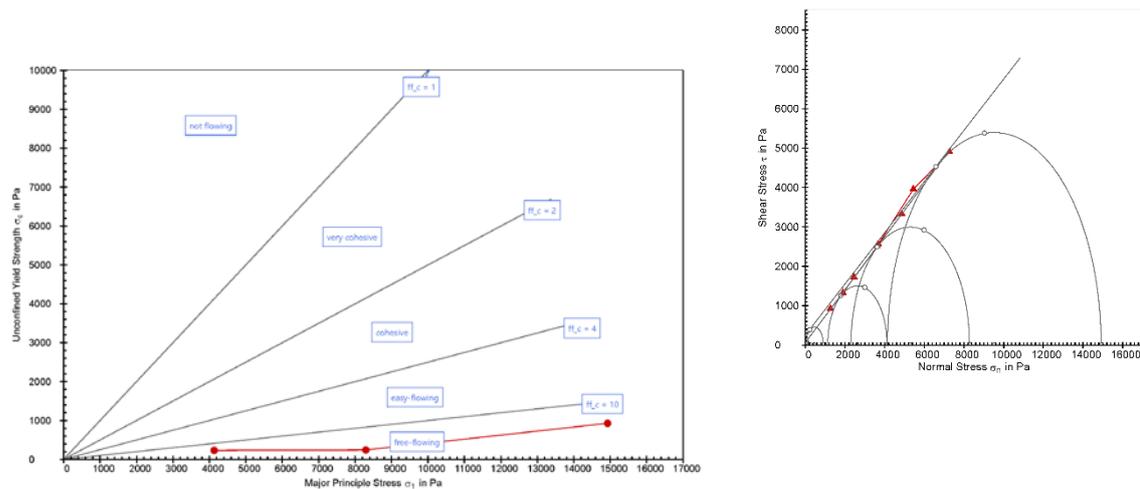
3	2.4	0.005
6	2.4	0.005
6	3.6	0.005
6	4.8	0.005
9	3.6	0.005
9	5.4	0.005
9	7.2	0.005

### 3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados reológicos de los materiales analizados. En cada figura se representa el yield locus ( $\tau$  vs  $\sigma$ ), siendo crucial observar la pendiente y la curvatura de la línea para evaluar la cohesión del polvo. Se detalla una tabla resumen al final con los valores de ffc y su correspondiente clasificación.

- Acero 316L: A 20 °C y 80 °C muestra fluidez libre (ffc > 10), lo que lo hace ideal para procesos como la sinterización selectiva por láser (SLS).
- Carbonato cálcico: A 20 °C presenta fluidez fácil (ffc  $\approx$  6). A mayor temperatura y humedad (30–40 °C, HR = 80 %), se observa un comportamiento cohesivo (ffc < 4).
- Azúcar: Transita de comportamiento fluido a muy cohesivo al aumentar la humedad relativa (ffc disminuye de 5 a <2).
- Maicena: Mejora su fluidez con la temperatura (ffc de 2 a >4), pero no con la humedad, donde permanece cohesiva.

En el caso del polvo de acero 316L se llevaron a cabo diversos ensayos no satisfactorios debido a la cohesión de los mismos y densidad aparente de los mismos. Sin embargo, se obtuvieron resultados coherentes con temperatura ambiente y a 80°C, mostrados en las figuras 5 y 6 respectivamente. Cabe señalar que en todo momento los resultados obtenidos del ffc fueron que el polvo tiene características de fluidez libre, siendo este requisito indispensable para tecnologías de fabricación tales como la pulvimetalurgia y la fabricación aditiva.



**Figura 5:** Resultados del límite de fluencia (yield locus) del material a temperatura y humedad ambiente.

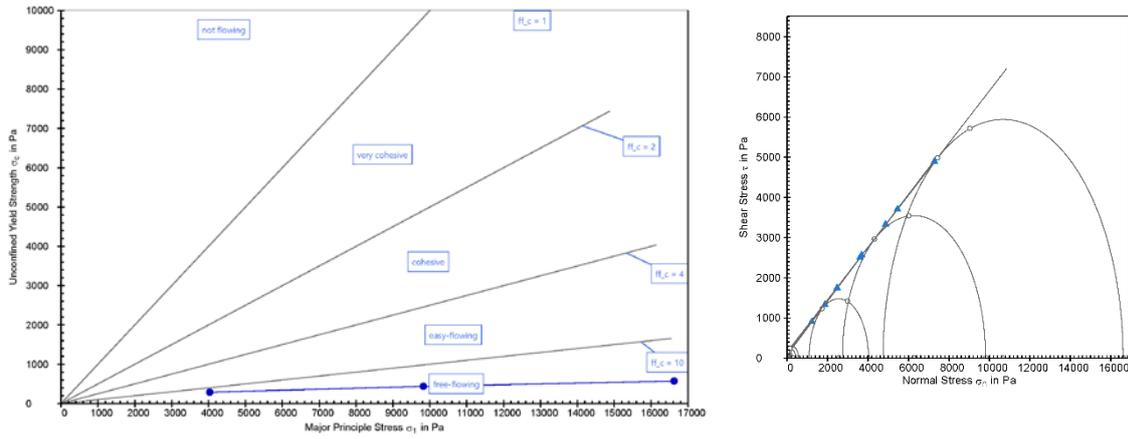


Figura 6: Resultados del límite de fluencia (yield locus) del material a temperatura 80°C y humedad ambiente.

Se llevaron a cabo ensayos en el carbonato calcico a temperatura y humedad ambiente dando como resultado un material de fácil fluidez como se puede observar en la Figura 7. Con el objetivo de analizar la influencia de la temperatura y de la humedad en la fluidez del polvo, dando como resultado un cambio en su comportamiento de fluido a cohesivo. Este cambio es debido a la generación de enlaces de Van der Waals en la superficie del polvo (puentes de hidrógeno).

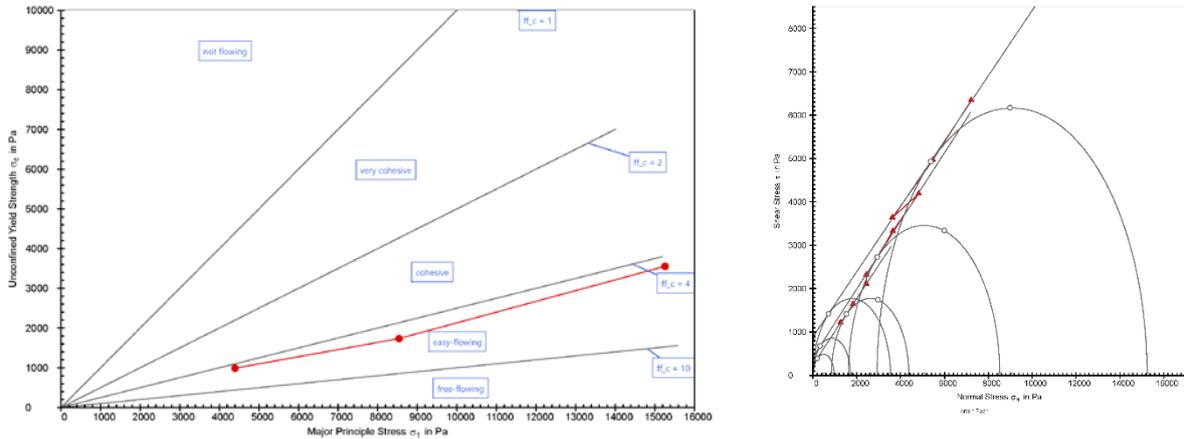
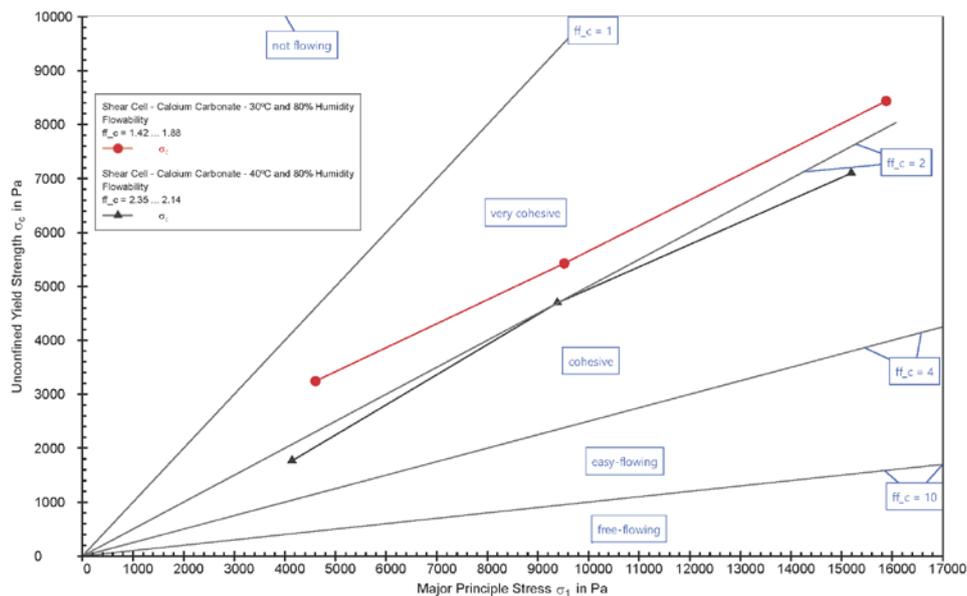


Figura 7: Resultados del límite de fluencia (yield locus) del material a temperatura y humedad ambiente.



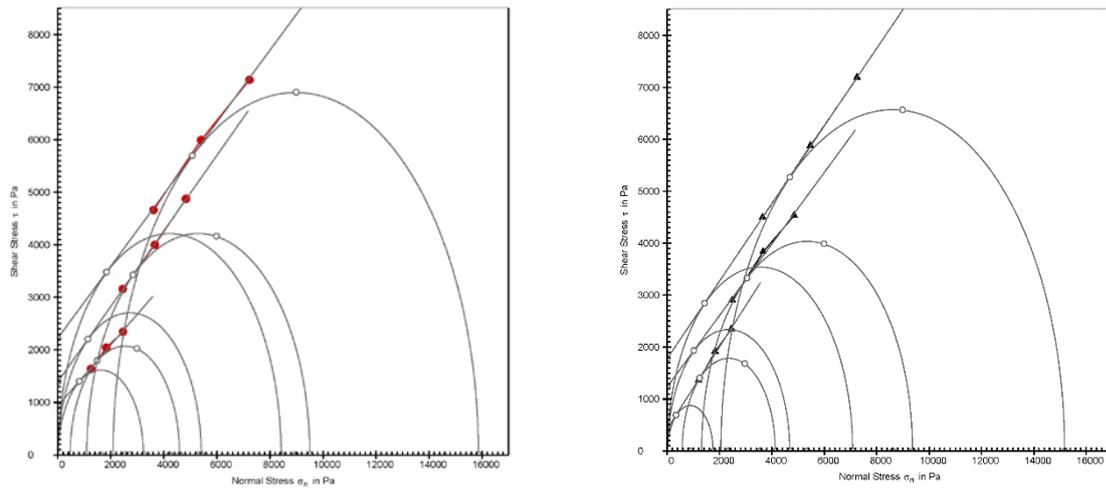


Figura 8: Resultados del límite de fluencia (yield locus) del material a temperatura y humedad ambiente. Rojo a 30°C y una humedad relativa del 80% y Negro 40°C con humedad relativa de 80%.

En este caso se analizó la influencia de la humedad en la fluidez del material a temperatura ambiente variando la humedad siendo el ensayo 1 a una humedad ambiente, el 2 a una humedad del 50% y el ensayo 3 una humedad del 80%. Se puede observar en la figura 9 como cambia de un comportamiento fluido a un comportamiento cohesivo.

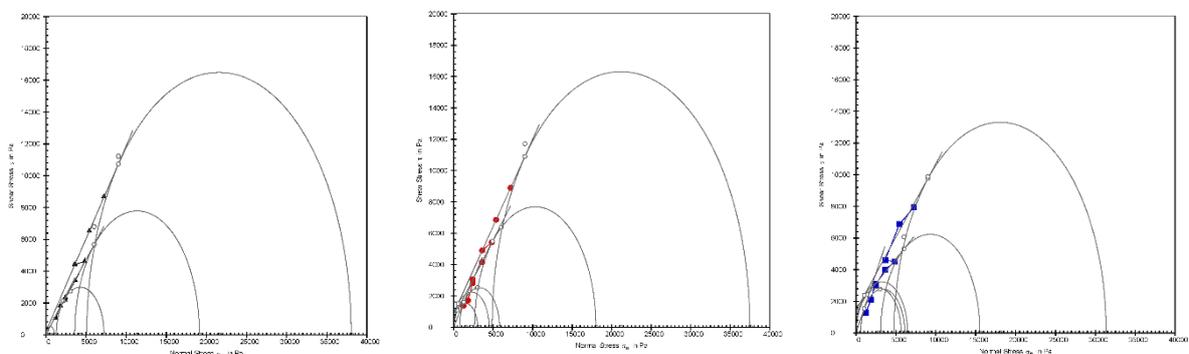
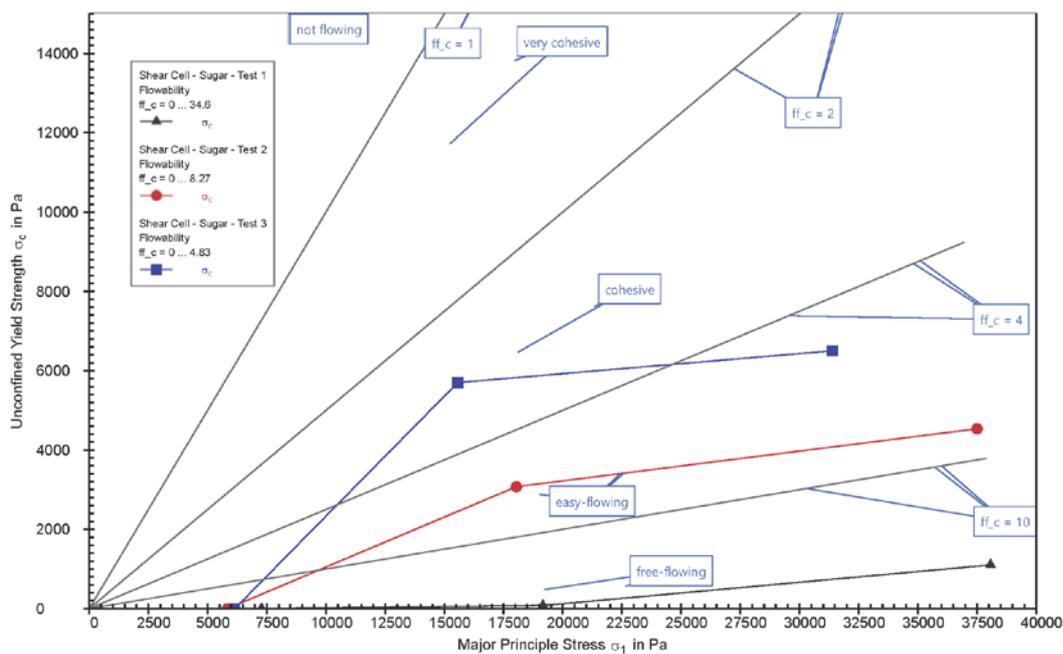
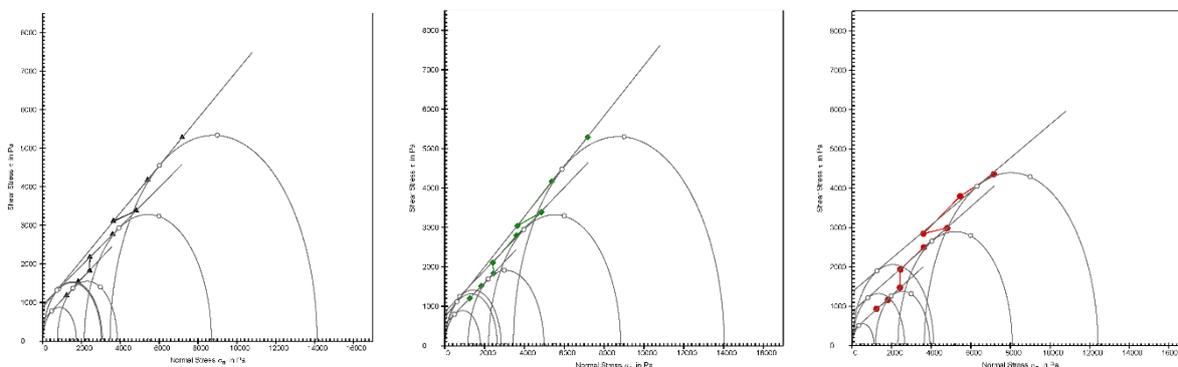
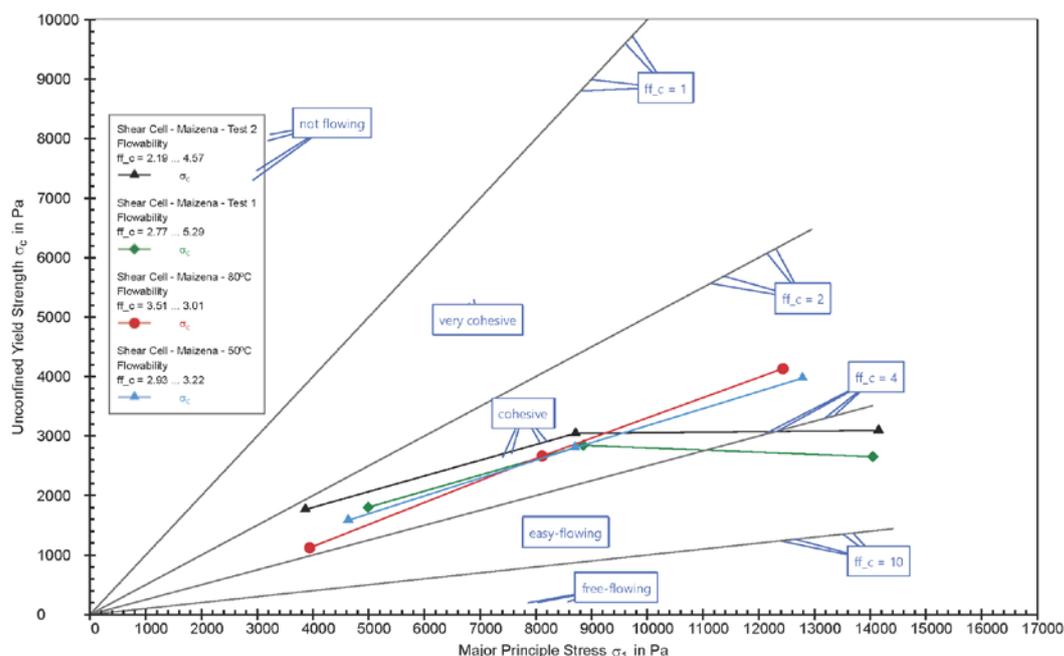


Figura 9: Resultados del límite de fluencia (yield locus) del material a temperatura ambiente. Test 1 a una humedad relativa ambiente (negro), test 2 del 50% (rojo) y test 3 del 80% (azul).

Para la maicena se analizó tanto la influencia de la humedad como de la temperatura en la fluidez del material, siendo el ensayo 1 a una humedad y temperatura ambiente, el 2 a una humedad del 50% y el resto a humedad ambiente modificando la temperatura de 50°C y 80°C. Observando los resultados el material es cohesivo, llegando a un punto que al aplicar mayor tensión los enlaces se rompen y cambia el comportamiento a estado fluido a temperatura ambiente. En cambio, con la humedad no se observan roturas de enlace siendo el comportamiento en todo momento cohesivo.



**Figura 10:** Resultados del límite de fluencia (yield locus) del material a temperatura ambiente. Test 1 (verde) a una humedad relativa ambiente, test 2 (negro) del 50% y ensayo a humedad ambiente y temperaturas de 50°C (azul) y 80 °C (rojo).

Los resultados muestran que la fluidez de los polvos depende de **temperatura**, **humedad relativa** y **tamaño de partícula**, en consonancia con lo reportado por Suhag et al. [2], Hearn et al. [5] y Batistão et al. [6]. En la tabla 2 se muestra un resumen de los resultados obtenidos de cada material.

**Tabla 2:** Condiciones de ensayo.

Material	T (°C)	HR (%)	ffc estimado	Clasificación
Acero 316L	20 / 80	40	>10	Fluidez libre
Carbonato cálcico	20 / 30-40	40 / 80	~6 / 2-4	Fluidez fácil / Cohesivo
Azúcar	20	40-80	5 → <2	Fluido → Muy cohesivo
Maicena	20-80	40-50	2-4	Cohesivo → Fluidez fácil

El **acero inoxidable 316L** presenta un comportamiento de **fluidez libre (ffc > 10)** en todas las condiciones evaluadas, lo cual valida su aplicación en tecnologías de fabricación aditiva, como se observa también en [5].

Materiales como el **azúcar** y la **maicena**, altamente higroscópicos, aumentan significativamente su cohesión con la humedad, resultado coherente con [2], que destaca el efecto de los enlaces de Van der Waals superficiales.

En el caso del **carbonato cálcico**, se observa una sensibilidad particular a la combinación de humedad y temperatura, como ya indicaron Koynov et al.[10]. Su transición de fluidez fácil a cohesiva evidencia la necesidad de considerar factores ambientales en su manipulación.

Los valores de  $f_{fc}$  son compatibles con la clasificación propuesta por Jenike , que sigue vigente como guía operativa. Sin embargo, tal y como han mostrado Koynov et al. [10], es indispensable avanzar hacia la **estandarización de métodos y equipos**, debido a la variabilidad de los resultados entre distintos sistemas de medida.

En conjunto, esta caracterización reológica avanzada permite establecer criterios más precisos para seleccionar y acondicionar polvos según su aplicación, contribuyendo a **reducir defectos, mejorar la repetibilidad y optimizar la eficiencia** en procesos industriales.

## 4. Conclusiones

El estudio de la reología de polvos es esencial para mejorar la eficiencia y calidad en diversas industrias, incluyendo la alimentaria, la manufactura aditiva y el almacenamiento de materiales a granel. Los ensayos realizados con distintos materiales han permitido evaluar cómo factores como la humedad, la temperatura y la cohesión afectan la fluidez y comportamiento de los polvos. Se ha confirmado que materiales como el acero inoxidable 316L presentan fluidez libre, siendo ideales para aplicaciones como la pulvimetalurgia, mientras que otros, como el carbonato cálcico y la maicena, experimentan cambios significativos en sus propiedades de flujo debido a la formación de enlaces intermoleculares.

Los resultados obtenidos resaltan la necesidad de establecer estándares más precisos para la medición de la fluidez de los polvos, ya que diferentes dispositivos y condiciones pueden generar variaciones en los datos. A pesar de los avances en la caracterización de materiales pulverulentos, todavía existen incertidumbres sobre la equivalencia de los resultados obtenidos con distintos equipos de medición. Por ello, es fundamental seguir investigando para optimizar los procedimientos y garantizar mediciones más consistentes y aplicables a los requerimientos industriales.

## 5. Referencias

- [1] J. A. Uhrin, S. Shafiekhani, and S. S. H. Rizvi, “Rheological Behaviors of Lactose Hydrolyzed and Unhydrolyzed Skim Milk Concentrates and Reconstituted Powder Samples,” *Food Bioproc Tech*, Nov. 2024, doi: 10.1007/s11947-024-03386-0.
- [2] R. Suhag, A. Kellil, and M. Razem, “Factors Influencing Food Powder Flowability,” *Powders*, vol. 3, no. 1, pp. 65–76, Feb. 2024, doi: 10.3390/powders3010006.
- [3] M. A. I. Shuvo, M. Z. Bin Sultan, and A. R. R. Ferdous, “Applicability of sawdust as a green additive to improve the rheological and filtration properties of water-based drilling fluid: an experimental investigation,” *J Pet Explor Prod Technol*, vol. 14, no. 1, pp. 303–315, Jan. 2024, doi: 10.1007/s13202-023-01706-2.
- [4] S. Zinatlou Ajabshir et al., “Flow behaviour of zeolite powders at high process temperatures,” *Powder Technol*, vol. 409, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.powtec.2022.117818.
- [5] W. Hearn, L. Cordova, A. Raza, A. Dahl-Jendelin, and E. Hryha, “Impact of powder properties on deoxidation and densification of carbon steels during powder bed fusion – Laser beam,” *Powder Technol*, vol. 431, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.powtec.2023.119046.
- [6] B. F. Batistão, V. E. Pinotti, M. L. de Lima, A. D. G. Rodrigues, S. de T. Amancio-Filho, and P. Gargarella, “Wet chemical surface functionalization of AA2017 powders for additive manufacturing,” *Powder Technol*, vol. 443, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.powtec.2024.119938.
- [7] A. W. Jenike and J. R. Johanson, “Bins Loads,” *Journal of the Structural Division*, vol. 94, no. 4, pp. 1011–1041, Apr. 1968, doi: 10.1061/JSDEAG.0001928.
- [8] 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 Technol*, vol. 174, no. 1–2, pp. 25–33, May 2007, doi: 10.1016/J.POWTEC.2006.10.016.
- [9] R. K. Eckhoff and P. G. Leversen, “A further contribution to the evaluation of the Jenike method for design of mass flow hoppers,” *Powder Technol*, vol. 10, no. 1–2, pp. 51–58, Jul. 1974, doi: 10.1016/0032-5910(74)85031-X.

- [10] S. Koynov, B. Glasser, and F. Muzzio, "Comparison of three rotational shear cell testers: Powder flowability and bulk density," *Powder Technol*, vol. 283, pp. 103–112, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.powtec.2015.04.027.
- [11] D. Schulze, "Flow Properties of Powders and Bulk Solids." [Online]. Available: [www.dietmar-schulze.de](http://www.dietmar-schulze.de)
- [12] A. Paar and P. Rheology, "POWDER SHEAR CELL-TIPS & TRICKS."
- [13] W. Nan, M. Ghadiri, and Y. Wang, "Analysis of powder rheometry of FT4: Effect of particle shape," *Chem Eng Sci*, vol. 173, pp. 374–383, 2017, doi: 10.1016/j.ces.2017.08.004.
- [14] A. W. Jenike, "Storage and flow of solids. Bulletin No. 123; Vol. 53, No. 26, November 1964," Nov. 1976, doi: 10.2172/5240257.