



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y
de la respuesta de un reómetro de diseño propio

Rheometric characterization of powders for industrial use and calibration of
the response of a self-designed rheometer

Autor

Bianca Elena Calin Popa

Director

Khashayar Saleh (Dto. Ingeniería de Procesos Industriales- UTC)

Ponente

Esteban Calvo Bernad (Área de Mecánica de Fluidos- Eina)

Grado en Ingeniería Química

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Curso 2021/2022



Dedicatoria y agradecimientos

Primeramente, me gustaría dedicar este trabajo a mis padres, que son los que me han apoyado toda mi vida y aún más en mi trayectoria universitaria y en las miles de decisiones tomadas.

Doy gracias a Khashayar Saleh por ofrecerme este tema de TFG y por darme a conocer el gran y verdadero trabajo que hay en un laboratorio y el campo de la reología de polvos. A Mikel Leturia y Elias Daouk por orientarme y organizar mis ideas, por dedicar su tiempo libre a escucharme y ayudarme en todo lo posible y sobre todo a Lina Cayla (alumna de doctorado en la UTC). Sin ella este trabajo no habría podido llevarse a cabo. Ha sido mi fuente de motivación diaria, mi supervisora, mi compañera de laboratorio y la persona que más tiempo ha invertido en enseñarme el funcionamiento de todos los instrumentos y en resolverme todas las dudas, le estaré eternamente agradecida. Finalmente, quiero agradecerle a mi novio Neil, mi mayor motivación de este año, la persona que ha aguantado mis llantos, mi desesperación, mi incertidumbre y mi estrés, gracias por saber levantarme cuando a mi ya no me quedaban fuerzas.

Resumen

Los polvos son materiales con un comportamiento mecánico complejo. Muchas veces son vistos como un conjunto de partículas, pero en realidad son una mezcla de sólidos en forma de partículas, líquidos (agua) en su estructura o en la superficie de partículas, y gases (aire entre partículas). Con ello su comportamiento y sus características son difíciles de prever y de analizar. Pero es importante de entender y ser capaces de medir todas las propiedades que caracterizan el comportamiento de un polvo (compresibilidad, fluidez, hidrofobicidad, permeabilidad, cargas electrostáticas...). Por lo tanto, los polvos pueden comportarse como una entidad sólida, deformándose de manera plástica, por ejemplo, fluir como un líquido al ser aireado o ser comprimido como un gas.

En este proyecto se ha utilizado el nuevo instrumento GranuDrum y el clásico reómetro FT4 para medir distintos parámetros de diversos materiales (índice de cohesión, ángulo de reposo, BFE, SI, FRI...) con el objetivo de estudiar la fluidez (*flowability*) de estos materiales, además de analizar las diferentes informaciones proporcionadas por los parámetros medidos y encontrar las similitudes entre ambos resultados obtenidos con ambos instrumentos.

Finalmente, se ha realizado una pequeña parte de simulación para conocer el funcionamiento del Software LIGGGHTS basado en el método DEM y los usos que se le puede dar en el campo de los polvos.

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un
reómetro de diseño propio

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS	7
INDICE DE TABLAS	10
PARTE I: Experimentación y análisis	14
1. Introducción	14
1.1. Motivación del trabajo	14
1.2. Objetivos	15
2. Fundamento teórico: Propiedades reológicas de los fluidos	17
2.1. Introducción	17
2.2. Viscosidad	17
2.3. Fluidos newtonianos y no newtoniano	19
2.4. Tensión superficial	20
2.5. Números adimensionales	22
3. Fundamento teórico: Propiedades de polvos, medición y problemáticas	23
3.1. Tamaño de partícula	24
3.2. Densidad aparente	25
3.3. Fluidez	25
3.4. Higroscopicidad	25
3.5. Solubilidad	26
3.6. Humectabilidad	26
3.7. Dispersabilidad	26
4. Proceso GranuDrum	27

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un
reómetro de diseño propio

4.1.	Introducción	27
4.2.	Parámetros y funcionamiento	27
4.3.	Configuración e interpretación de datos	31
4.4.	Materiales y procedimiento seguido	35
4.5.	Resultados: ÍNDICE DE COHESIÓN.....	37
4.6.	Resultados: Ángulo de Reposo	45
4.7.	Conclusiones GranuDrum.....	50
5.	Proceso FT4.....	52
5.1.	Introducción	52
5.2.	Breve explicación del funcionamiento: test BFE y.....	52
5.3.	Tipos de test	54
5.4.	Resultados y discusión.....	57
5.5.	Conclusiones FT4	59
6.	Conclusiones GranuDrum y FT4	61
	PARTE II: Simulación DEM.....	63
1.	Introducción	63
2.	LIGGGHTS,PARAVIEW, ONESHAPE.....	64
2.1.	LIGGGHTS	64
2.2.	PARAVIEW	64
2.3.	ONSHAPE	65
	65
3.	Programa usado: script.....	66
	66
4.	Conclusión.....	68
	BIBLIOGRAFIA	72

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

TABLAS.....	77
PLANIFICACION TEMPORAL.....	85

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Representación del concepto de viscosidad.....	17
Figura 2.3. Relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación en diferentes materiales ⁵	20
Figura 2.4 (a) Sección de una gota esférica y representación de las fuerzas de tensión superficial (b) Interfase con radios de curvatura R1 y R2 en las direcciones ortogonales. ⁶	21
Figura 3.1 Gráfico de los procedimientos más empleados para la determinación del tamaño de partícula.....	24
Figura 4.2.1. Caja GranuDrum vista exterior	28
Figura 4.2.2. Caja GranuDrum vista interior.....	28
Figura 4.2.3. Tambor GranuDrum.....	29
Figura 4.2.4 Interfase calculada por GranuDrum.....	30
Figura 4.2.5 Ilustración simple del cálculo del índice de cohesión y el ángulo de reposo medio	31
Figura 4.3.1 Ajustes del software en la parte experimental ¹¹	32
Figura 4.3.2 Parámetros Threshold y Crop	33
Figura 4.3.3 Apartado de Images	34
Figura 4.3.4 En rojo, la posición media de la interfase y en verde las fluctuaciones de la interfase ¹¹	34
Figura 4.3.5 Apartado de Graphs	35

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

Figura 4.5.2 Gráfico del índice de cohesión (Cohesive Index) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de las Microesferas de vidrio.....	38
Figura 4.5.3 Gráfico resumen del índice de cohesión (Cohesive Index) frente a los distintos tamaños de partículas de las Microesferas de vidrio.....	39
Figura 4.5.4. Imagen tomada del grupo de partículas de tamaño de 0-20 μm	39
Figura 4.5.4 Gráfico del índice de cohesión (Cohesive Index) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de Zirconio.....	40
Figura 4.5.5 Gráfico resumen del índice de cohesión (Cohesive Index) frente a los distintos tamaños de partículas de Zirconio	40
Figura 4.5.6 Imagen de la interfase de un tamaño de partícula de 1,2-1,4 mm (derecha) y 0,1-0,2 mm (izquierda) tomada con GranuDrum	41
Figura 4.5.7 Gráfico del índice de cohesión (Cohesive Index) frente a los distintos tamaños de partículas de los Metales G	42
Figura 4.5.8 Gráfico del índice de cohesión (Cohesive Index) frente a los distintos tamaños de partículas de los Metales S	43
Figura 4.5.9 Gráfico resumen del índice de cohesión (Cohesive Index) frente a los distintos tamaños de partículas de AMBOS Metales	43
Figura 4.5.10 foto de las partículas del polvo de metal G (1,7 mm) (derecha) y la interfase calculada por GranuDrum (izquierda).....	44
Figura 4.5.11 foto de las partículas del polvo de metal S (derecha) y la interfase calculada por GranuDrum(izquierda).....	44
Figura 4.6.2 Gráfico del ángulo de reposo (Angle of repose) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de las Microesferas de vidrio.....	45
Figura 4.6.3 Gráfico resumen del ángulo de reposo (Angle of repose) frente a los distintos tamaños de partículas de las Microesferas de vidrio	46
Figura 4.6.4 Gráfico del ángulo de reposo (Angle of repose) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de Zirconio- CON MALA MEDIDA ..	46

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

Figura 4.6.5 Foto tomada del grupo de partículas de 1-1,2 mm donde se aprecia la falsa avalancha.	47
Figura 4.6.6 Gráfico del ángulo de reposo (Angle of repose) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de Zirconio- CON BUENA MEDIDA	47
Figura 4.6.7 Gráfico resumen del ángulo de reposo (Angle of repose) frente a los distintos tamaños de partículas de Zirconio	48
Figura 4.6.8 Gráfico del ángulo de reposo (Angle of repose) frente a los distintos tamaños de partículas de los Metales G	48
Figura 4.6.9 Gráfico del ángulo de reposo (Angle of repose) frente a los distintos tamaños de partículas de los Metales S	49
Figura 4.6.10 Gráfico resumen del ángulo de reposo ((Angle of repose) frente a los distintos tamaños de partículas de AMBOS Metales	49
Figura 4.6.11 Gráfico resumen propio de las conclusiones obtenidas	51
Figura 5.1.1 Reómetro FT4 ²⁰	52
Figura 5.2.1 Medidas de torque y fuerza- FT4 ²⁰	53
Figura 5.2.3. Representación del BFE (derecha) y del SE (izquierda) ²⁰	53
Figura 5.3.1 Ilustración del análisis breve del FRI ²⁵	56
Figura 5.3.2 Ilustración del cilindro de vidrio FT4 y los elementos para calcular el CBD	57
Figura 5.4.1 Gráfico del test de BFE para las Microesferas de vidrio	57
Figura 5.4.2 Gráfico del resto de test comentados en el apartado 5.3 para las Microesferas de vidrio	58
Figura 5.4.3 Gráfico del test de BFE para el Zirconio	58
Figura 5.4.4 Gráfico del resto de test comentados en el apartado 5.3 para e Zirconio... ..	59
Figura 5.5.1 Ilustración del “corte” y del movimiento en vacío que realiza el aspa cuando el polvo es muy fino.	60

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

Figura 5.5.2 Ilustración de los espacios entre partículas para un polvo cohesivo y no cohesivo ²⁷	60
Figura 5.5.3 Gráfico resumen propio de las conclusiones obtenidas	61
Figura 2.1 Geometría creada con ONSHAPE con las dimensiones de GranuDrum	65
Figura 4.1 Simulación DEM de un tambor rotativo con las mismas características que GranuDrum estático ^{33 34}	68
Figura 4.2 Simulación DEM de un tambor rotativo con las mismas características que GranuDrum en movimiento- velocidad de 12 rpm ³⁴	69
Figura 4.3 Simulación DEM de un tambor rotativo con las mismas características que GranuDrum comparación de forma ³⁸	69
Figura 4.4 Simulación DEM de un tambor rotativo- análisis de temperatura ³⁹	70
Figura 4.5 Simulación DEM de un tambor rotativo con partículas de distintos tamaños y formas ^{40,41}	70

INDICE DE TABLAS

TABLA 4.4.1	36
Tamaños de partícula de las Microsfemas de vidrio utilizados.....	36
TABLA 4.4.2	36
Tamaños de partícula de Zirconio utilizados.....	36
TABLA 4.4.3	36
Tamaños de partícula de los Mteales G utilizados	36
TABLA 4.4.4	36
Tamaños de partícula de las Esferas de vidrio utilizados	36

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un
reómetro de diseño propio

TABLA 4.5.1	38
El índice de cohesión (Cohesive Index) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de las Microesferas de vidrio	38
TABLA 4.5.3	40
El índice de cohesión (Cohesive Index) frente a la velocidad de rotación para los diferentes tamaños de partículas de Zirconio	40
TABLA 4.5.4	42
El índice de cohesión (Cohesive Index) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de los Metales G	42
TABLA 4.5.5	42
El índice de cohesión (Cohesive Index) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de los Metales S	42
TABLA 5.3.1	55
Interpretación del test de estabilidad ²⁰	55
TABLA 5.3.2	55
Interpretación del test de FRI ²⁰²²	55
TABLA 5.3.1	56
Interpretación del test de Energía específica ²⁴	56
TABLA 4.6.1	77
El ángulo de reposo (Angle of repose) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de las Microesferas de vidrio:	64
TABLA 4.6.2	68
El ángulo de reposo (Angle of repose) frente a la velocidad de rotación para los diferentes tamaños de partículas de Zirconio	68
TABLA 4.6.3	69

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un
reómetro de diseño propio

El ángulo de reposo (Angle of repose) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de los Metales G	69
TABLA 4.6.4	70
El ángulo de reposo (Angle of repose) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de los Metales S	78
TABLA 1 ANEXO	79
Valores medios del ángulo de reposo dinámico, aeración e índice de cohesión para cada valor de velocidad y de cada tamaño de polvo de las microesferas de vidrio (extraídos de los datos de GranuDrum).....	79
TABLA 2 ANEXO	80
Valores medios del ángulo de reposo dinámico, aeración e índice de cohesión para cada valor de velocidad y de cada tamaño de polvo de zirconio (extraídos de los datos de GranuDrum)	80
TABLA 3 ANEXO	81
Valores medios del ángulo de reposo dinámico, aeración e índice de cohesión para cada valor de velocidad y de cada tamaño de polvo de Metal G (extraídos de los datos de GranuDrum)	81
TABLA 4 ANEXO	82
Valores medios del ángulo de reposo dinámico, aeración e índice de cohesión para cada valor de velocidad y de cada tamaño de polvo de metal S (extraídos de los datos de GranuDrum)	82
TABLA 5 ANEXO	83
Valores extraídos de la experimentación con el reómetro FT4 (BFE,SI,FRI, CBD, energía y masa) para el polvo de Zirconio	83
TABLA 6 ANEXO	83
Valores medios extraídos de la experimentación con el reómetro FT4 (BFE,SI,FRI, CBD, energía y masa) para el polvo de Zirconio	83

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un
reómetro de diseño propio

TABLA 7 ANEXO	83
Valores extraídos de la experimentación con el reómetro FT4 (BFE,SI,FRI, CBD, energía y masa) para el polvo de Microesferas de vidrio	83
TABLA 8 ANEXO	84
Valores medios extraídos de la experimentación con el reómetro FT4 (BFE,SI,FRI, CBD, energía y masa) para el polvo de Microesferas de vidrio	84

PARTE I: Experimentación y análisis

1. Introducción

1.1. Motivación del trabajo

La reología de polvos tiene una gran importancia en una amplia gama de industrias para apoyar el desarrollo y la fabricación de nuevos productos. Los polvos contribuyen al 80% de todos los productos manufacturados. La reología de los materiales en polvo consiste en el estudio del comportamiento de los polvos vistos como conjuntos, formados por sólidos, líquidos y gases. Este estudio permite a los usuarios medir la fluidez, las propiedades de corte y las propiedades características de cada material como la densidad, entre otras.¹

No obstante, los polvos, a pesar de su gran presencia en la industria, presentan grandes desafíos; su producción, su uso para el desarrollo de un producto final y su análisis y control de calidad se dificultan debido a la complejidad de su comportamiento. La comprensión de la reología de los polvos es esencial en la optimización de los procesos de producción y el desarrollo de un producto de calidad.¹

La caracterización reológica de los materiales, por medio de ensayos reológicos, proporciona una visión global del comportamiento del material. Además, las respuestas reológicas están relacionadas con la estructura final de un compuesto, por lo que dichos ensayos juegan un rol clave en la creación de nuevos compuestos y materiales.²

Debido a la gran importancia de la reología de polvos cada vez se requieren más procesos y sistemas capaces de realizar la caracterización de polvos y capaces de prever el comportamiento de estos.

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

En el Centro de Investigación de la Universidad Tecnológica de Compiègne (UTC) se llevan a cabo numerosas investigaciones para automatizar dichos procesos de caracterización. En trabajos anteriores se realizaron estudios sobre un analizador universal de flujo de polvo, el FT4 Powder Rheometer, con el objetivo de producir un reómetro de menor tamaño de diseño propio.

El presente trabajo surge en colaboración con GranuTools, una empresa que trabaja con centros investigación internacionales buscando la mejora de los métodos de caracterización de los materiales pulverulentos.

Actualmente ofrecen una nueva propuesta: el GranuDrum. Es un dispositivo capaz de imitar las condiciones de un proceso como el mezclador giratorio en un proceso farmacéutico.³

Siguiendo esta línea de investigación, este trabajo realizará la comparación y calibración de este nuevo método de medición con el bien establecido Freeman FT4 y contribuirá como estudio preliminar para la futura creación de un reómetro de diseño propio en las instalaciones de la UTC.

1.2. Objetivos

Como objetivo principal de este trabajo se encuentra la caracterización de polvos de carácter industrial mediante 2 métodos experimentales.

Pero estos son los objetivos generales del trabajo:

- Conocer los parámetros influyentes en el comportamiento de los polvos
- Conocer el funcionamiento de las máquinas Freeman FT4 y GranuDrum
- Toma y comparación de medidas con las dos máquinas.
- Aprender a calibrar una máquina (GranuDrum) y a definir los intervalos de medida con los que trabaja y que uso se lo puede dar y en qué casos se puede usar.
- Aprender a utilizar el Software para la simulación DEM y LIGGGHTS

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

- Parametrizar la simulación DEM para diferentes polvos para la posterior simulación de su comportamiento.

2. Fundamento teórico: Propiedades reológicas de los fluidos

2.1. Introducción

Los fluidos son sustancias capaces de “fluir” adaptando su forma a los recipientes en los que están contenidos. Expresado de forma más académica, un fluido en equilibrio puede no soportar fuerzas tangenciales o cortantes.

Los fluidos pueden clasificarse como fluidos líquidos o gaseosos. Los líquidos son prácticamente incompresibles, ocupan un volumen definido y presentan superficies libres. Por lo contrario, los gases son muy compresibles y se van a expandir hasta ocupar todas las partes del recipiente que lo contenga, sin presentar una superficie libre que los limite.⁴

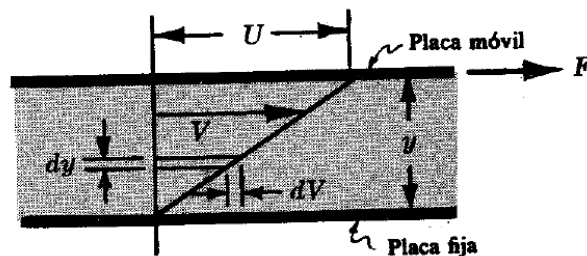


Figura 2.1 Representación del concepto de viscosidad

2.2. Viscosidad

La figura 2.1 muestra el experimento con el que Newton derivó el concepto de viscosidad. Consta de una lámina líquida de espesor b y colocada entre dos placas planas paralelas. La placa inferior está inmóvil mientras que la superior se desplaza a velocidad U . Para que este movimiento se produzca, debe ejercerse una fuerza F sobre la placa de

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

arriba. Por estas condiciones de contorno, el campo de velocidades en el fluido es lineal en la dirección Y con un gradiente de velocidad constante:

$$\frac{U}{y} = \frac{dV}{dy} \quad (1)$$

Newton confirmó experimentalmente que la fuerza necesaria para desplazar la placa superior era proporcional a la superficie de la misma y al gradiente espacial de velocidad, por lo que:

$$F \propto \frac{AU}{y} = A \frac{dV}{dy} \quad \text{o} \quad \frac{F}{A} = \tau \propto \frac{dV}{dy} \quad (2)$$

Si llamamos a τ **tensión o esfuerzo cortante**, la **viscosidad absoluta o dinámica** μ es la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo constante y el gradiente de velocidad:

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} \quad \text{o} \quad \mu = \frac{\tau}{dV/dy} \quad (3)$$

Los fluidos que siguen esta relación se les llama *fluidos newtonianos*. De acuerdo con la ec. (3) las unidades de μ son $\frac{kg \cdot s}{m^2}$.

También se puede definir el coeficiente de *viscosidad cinemática*:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

Donde ρ es la densidad.

Según la ec. (4) sus unidades son $\frac{m^2}{s}$ ya que $\frac{(kg \cdot s / m^2) (\frac{m}{s^2})}{kg/m^3} = \frac{m^2}{s}$.

En los líquidos la viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura, pero apenas se ve afectada por las variaciones de presión.

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

La viscosidad absoluta de los gases aumenta al aumentar la temperatura, pero casi no varía con la presión. En cambio, el peso específico de los gases varía con la presión cuando la temperatura es constante, haciéndose la viscosidad cinemática es inversamente proporcional a la presión en base a la ecuación de estado de los gases perfectos.⁴

2.3. Fluidos newtonianos y no newtoniano.

2.3.1. Fluidos newtonianos

Para estos fluidos, la viscosidad es independiente de gradiente de la velocidad y solo depende del estado termodinámico del fluido (especialmente de la temperatura). Los fluidos newtonianos siguen la ecuación (3) donde la viscosidad es una constante.⁵

Entre los fluidos newtonianos se encuentran el agua, el aire y gases comunes, la gasolina...

2.3.2. Fluidos no newtonianos

Por el contrario, en los fluidos no newtonianos la viscosidad varía con el gradiente de velocidad. En el caso de estos fluidos se habla de viscosidad aparente perdiendo y no siguen la ecuación (3) su sentido de ser, ya que la viscosidad deja de ser una propiedad termodinámica del fluido.

En la figura 2.3 se puede ver la diferencia de comportamiento de cuatro materiales:

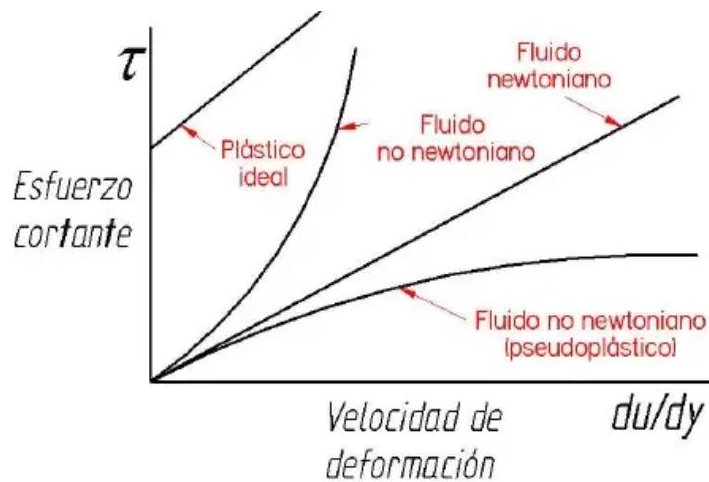


Figura 2.3. Relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación en diferentes materiales⁵

2.4. Tensión superficial

Las moléculas inmersas en una masa líquida están sometidas a la acción de fuerzas atractivas en todas las direcciones proporcionando una resultante nula. Pero las moléculas que se encuentran en la superficie están sometidas a fuerzas de cohesión generando una resultante perpendicular a la superficie. ⁴Para vencer estas fuerzas y mover las moléculas, es decir aumentar el área de superficie libre de fluido, es necesaria cierta energía. Dicha energía recibe el nombre de **tensión superficial σ** y tiene como unidades N/m.

Hay que tener en cuenta que la tensión superficial depende de los dos fluidos que se encuentran en contacto y de la temperatura. Sin embargo, un aspecto importante es que se produce una diferencia de presión cuando la superficie es curva. Considerando una interfase esférica con un radio de curvatura R y presiones p_i en el interior y p_o en el exterior, (Figura 2.3.1) con el equilibrio de fuerzas se obtiene: ⁶

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

$$\sigma (2\pi R) = (p_i - p_o)\pi R^2 \quad (5)$$

Podemos despejar la diferencia de presiones de la siguiente manera:

$$p_i - p_o = \frac{2\sigma}{R} \quad (6)$$

Con ello se puede interpretar que el valor de presión más alto se obtiene en el lado cóncavo, y este valor será alto si R es pequeño.

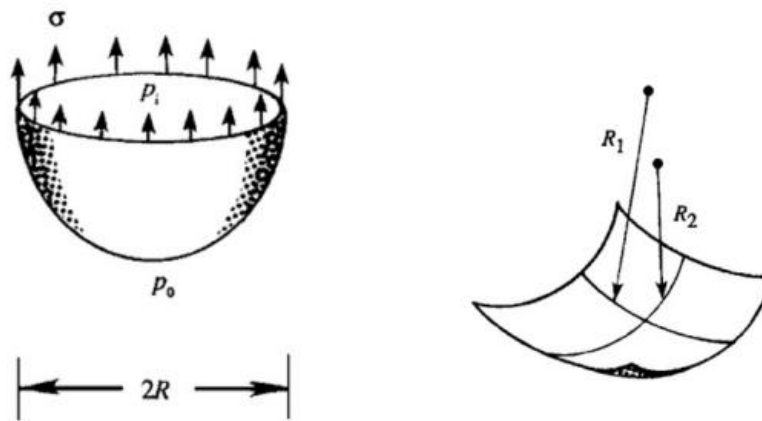


Figura 2.4 (a) Sección de una gota esférica y representación de las fuerzas de tensión superficial (b) Interfase con radios de curvatura R_1 y R_2 en las direcciones ortogonales.⁶

Para las superficies no esféricas representadas con dos radios de curvatura R_1 y R_2 (Figura 2.3.1 b) se puede expresar la diferencia de presiones como:

$$p_i - p_o = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (7)$$

Si $R_1 = R_2$ se obtendrá la ecuación (5).⁶

2.5. Números adimensionales

2.5.1. Número de Reynolds

Este número adimensional se relaciona con la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo. Es utilizado para estudiar el comportamiento viscoso de los fluidos. Si el número de Reynolds es pequeño, indica un movimiento lento y viscoso, por lo tanto, el flujo puede considerarse laminar y si es grande se caracteriza por poseer fuertes fluctuaciones. En este último caso, el flujo puede considerarse turbulento.⁷

Para un fluido que circula por el interior de una tubería recta y circular (de diámetro D), el número de Reynolds viene expresado como:⁷

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (8)$$

2.5.2. Número de Weber

Este número adimensional es muy útil cuando existe una superficie entre dos fluidos diferentes. El número de Weber se define como el coeficiente entre las fuerzas inerciales y la tensión superficial de un fluido:

$$We = \frac{\rho v^2 l}{\sigma} \quad (9)$$

Donde v y l son respectivamente, a velocidad del fluido y una longitud característica, (normalmente, el diámetro de una gota).⁷

2.5.3. Número de Bond

Este número adimensional caracteriza la relación de las fuerzas gravitacionales con las fuerzas de tensión superficial:

$$Bo = \frac{\Delta\rho g b^2}{\sigma} \quad (10)$$

Donde b es una escala de longitud característica de la geometría de flujo.

Cuando el número de Bond tiene un valor elevado, el efecto producido por la tensión superficial comparado con la gravedad son despreciables, inversamente cuando Bo tiene un valor pequeño.⁸

3. Fundamento teórico: Propiedades de polvos, medición y problemáticas

Cada polvo tiene sus propias características y en muchas ocasiones van a condicionar su calidad final. Poseen propiedades intrínsecas como la composición, granulometría, morfología, densidad... Pero su comportamiento no solo viene definido por sus características, sino que también por las interacciones que tendrá con el medioambiente, sobre todo con el aire: humedad, temperatura, carga electrostática, coeficiente de aireación... El conjunto de todas estas propiedades e interacciones tienen un impacto en el comportamiento del material.

A continuación, se detallan 7 propiedades relevantes de los polvos y las problemáticas que pueden causar.

3.1. Tamaño de partícula

El tamaño de partícula engloba a la forma además de su distribución granulométrica. Para realizar la medida del tamaño de partícula se realiza una **granulometría**. Esta medida es importante ya que influirá en otras propiedades.

Los polvos se clasifican de la siguiente manera, según la **USP**:

- Muy grueso: partículas de tamaño $>1000\mu\text{m}$
- Grueso: $355-1000\ \mu\text{m}$
- Moderadamente fino: $180-355\ \mu\text{m}$
- Fino: $125-180\ \mu\text{m}$
- Muy fino: $90-125\ \mu\text{m}^9$

Para determinar el tamaño de partícula se usan principalmente los siguientes procedimientos:

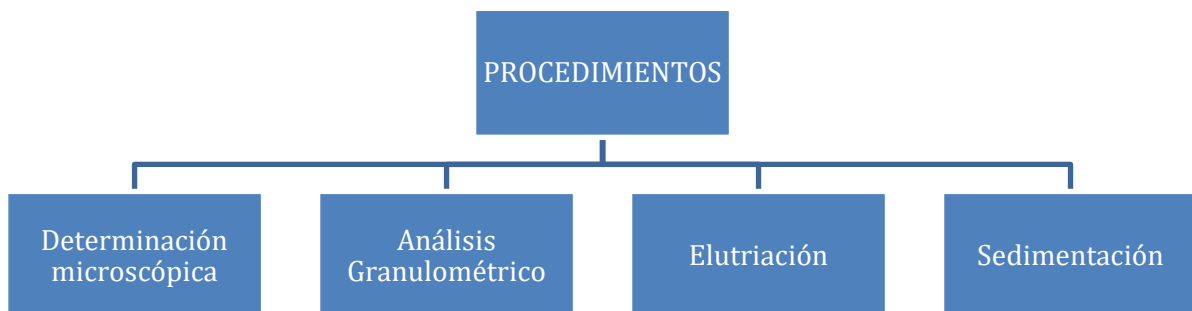


Figura 3.1 Gráfico de los procedimientos más empleados para la determinación del tamaño de partícula

Para medir el tamaño de partícula en este proyecto se ha usado el Análisis Granulométrico, en el **Apartado “Anexo”** se mostrarán los resultados. Conocer el tamaño de partícula es importante a la hora de realizar un experimento y saber que equipos se pueden usar para un tamaño y cual no.

3.2. Densidad aparente

Se define como la masa del material por unidad de volumen ocupado por este en un recipiente, comprendiendo los espacios entre sólidos (lecho de partículas). Esta propiedad se mide en kg m^3 .

Esta propiedad es esencial en la determinación de recipientes de almacenamiento o máquinas necesarias. Si su valor es grande, el coste de transporte calculado en función del volumen será menor. La masa volumétrica también influye en la hidratación del material.¹⁰

3.3. Fluides

Es la capacidad de un polvo a fluir, esta propiedad es muy importante en operaciones como: envasado, dosificación, mezcla... Causando daños en los equipos en unas ocasiones y favoreciendo los procesos de fabricación en otras. Por ello es muy importante cualquier parámetro que nos de información sobre el tipo de flujo.

Para evaluar la fluides de un polvo se pueden usar varios métodos como: medida del ángulo de reposo y ensayos de asentamiento (índice de Hauser), por ejemplo¹⁰.

Para este proyecto se realizarán medidas para determinar el ángulo de reposo.

Para analizar la fluides se usarán el instrumento GranuDrum y el reómetro Freeman FT4.

3.4. Higroscopicidad

Se define polvo higroscópico a aquel que tiende a retener humedad del aire, siendo por el proceso de absorción o adsorción. Convencionalmente, un polvo se considera higroscópico cuando el porcentaje de agua que puede retener es superior a 10%.

Un polvo saturado de agua puede dificultar su fluidez al formar **aglomerados** y causar un bloqueo en un equipo de transferencia. Para evitarlo, se precisa de un proceso previo de deshumidificación.¹⁰

Ejemplos de polvos higroscópicos son: la lactosa, soda, óxido de magnesio...

3.5. Solubilidad

Este parámetro se define como la velocidad y nivel en los que los componentes de las partículas de polvo se disuelven en otra sustancia para formar una mezcla homogénea. Esta propiedad influirá en la facilidad y rapidez de disolver un polvo en una fase acuosa en un proceso industrial, por ejemplo.

3.6. Humectabilidad

Esta propiedad describe la afinidad que tiene la superficie de las partículas con el agua. Así, partículas poco humectables no pueden ser mojadas. Este parámetro. Este parámetro se caracteriza, por ejemplo, con la medida del ángulo de contacto entre el agua y la partícula, el cual dependerá de la presión, la temperatura y la humedad para una combinación específica de líquido-sólido.

Es una propiedad importante cuando el polvo debe ser disuelto (v.g. cuando es usado como ingrediente de una bebida).¹⁰ Si el polvo es poco humectable, quedará suspendido en la superficie libre por la tensión superficial, impidiendo su rápida disolución en el líquido.

3.7. Dispersabilidad

Es la facilidad con la que los polvos se distribuyen como partículas individuales en la fase líquida (normalmente con agitación). Por ejemplo, en el campo de la nutrición infantil se utilizan polvos de alta dispersabilidad.

También hay parámetros a considerar como la superficie de las paredes (ya que hay una interacción entre la partícula y la pared), la humedad del ambiente, la tasa de aireación y la temperatura.

4. Proceso GranuDrum

4.1. Introducción

Los materiales granulares y polvos finos son muy utilizados en la industria, contribuyendo al 80% de todos los productos manufacturados. Su caracterización permitirá la comprensión de los procesos y su optimización y el desarrollo de nuevas materias, entre otras. Dichos métodos de caracterización están relacionados con sus propiedades y el comportamiento. Sin embargo, el comportamiento físico durante décadas se ha basado en viejas técnicas de medición.

Hoy en día se dispone de técnicas de medición y métodos que han sido automatizadas y que proporcionan resultados reproducibles del comportamiento de los polvos. Una de ellas corresponde al dispositivo, conocido como GranuDrum.

Este instrumento caracteriza la fluidez de un polvo observando su comportamiento dentro de un tambor giratorio.³

4.2. Parámetros y funcionamiento

Este instrumento se basa en la capacidad de imitar las condiciones de un proceso. GranuDrum es capaz de medir las propiedades de un flujo como: el ángulo de flujo dinámico, el índice cohesivo, el primer ángulo de avalancha y la aireación de un polvo.¹¹

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

El instrumento se compone, grosso modo, de 2 piezas: la “caja” y el cilindro horizontal con paredes laterales transparentes llamado tambor. Las *figuras 4.2.1 – 4.2.3* muestran los principales componentes del aparato.



Figura 4.2.1. Caja GranuDrum vista exterior



Figura 4.2.2. Caja GranuDrum vista interior

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio



Figura 4.2.3. Tambor GranuDrum

El procedimiento por seguir es el siguiente:

El cilindro es relleno hasta la mitad de su capacidad con la muestra de polvo a analizar. El tambor girará a una velocidad entre 2 y 60 rpm. Mientras éste gira, una cámara CCD toma entre 30 y 100 imágenes a una tasa de 1 imagen/segundo. En cada instantánea, GranuDrum detecta la interfase polvo-aire y calculará la posición media de dicha interfase y las fluctuaciones producidas alrededor de la superficie promedio. La interfase finalmente se representará de la siguiente manera:¹¹

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

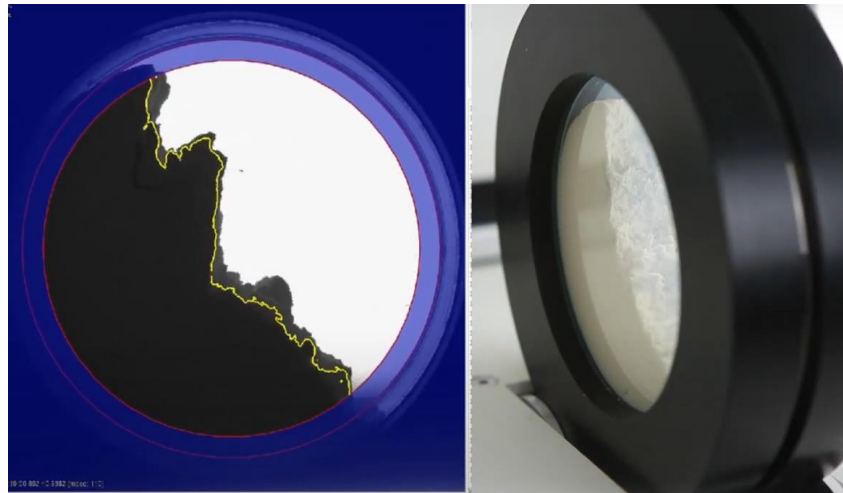


Figura 4.2.4 Interfase calculada por GranuDrum

GranuDrum también calculará el ángulo de reposo (o el ángulo de flujo) dinámico α_f a partir de la posición media de la interfase. Por otro lado, calculará el índice cohesivo dinámico σ_f con las fluctuaciones producidas en esa interfase. Siendo:

- **Ángulo de reposo:** es el mayor ángulo de inclinación que un material de la pendiente permanecerá estático sin deslizarse pendiente abajo.

Un valor bajo de este indicará una buena fluidez del polvo, en nuestro caso. El ángulo de reposo depende de múltiples parámetros como: la fricción y la forma de las partículas y las fuerzas cohesivas (Van Der Waals, fuerzas electrostáticas...) ¹²

- **Índice de cohesión:** Es un índice que indica cuánto de cohesivo es un material, y por lo tanto la fluidez del material, es decir, la capacidad que tiene de generar aglomerados.
- A diferencia del ángulo de reposo, este índice solo depende de las fuerzas cohesivas entre partículas. Al aumentar las fuerzas de cohesión también lo hará el índice de cohesión.

Además de medir los parámetros anteriores, GranuDrum es capaz de medir el primer ángulo de avalancha (°) y la aireación del polvo durante su movimiento (%)¹¹

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

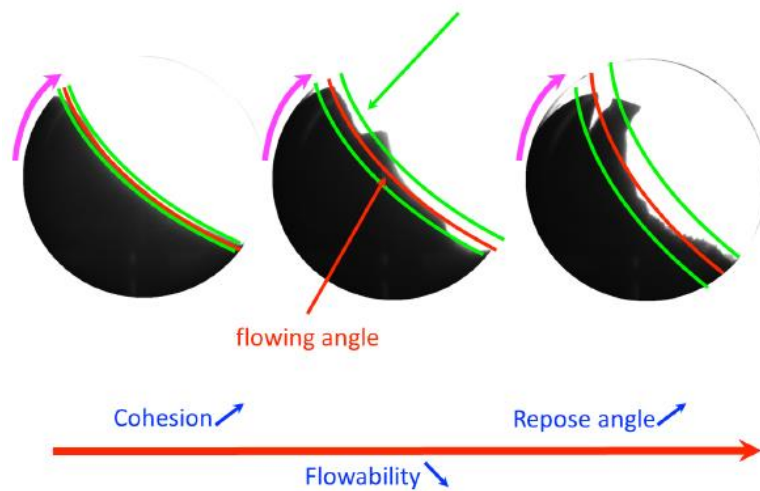


Figura 4.2.5 Ilustración simple del cálculo del índice de cohesión y el ángulo de reposo medio

En la imagen anterior, se puede ver la representación simplificada del proceso que GranuDrum realiza para calcular la interfase media (rojo), el ángulo de reposo dinámico (medido por una tangente ubicada en el centro de la curva roja) y el índice cohesivo (relacionado con las curvas verdes que representan las interfases de las fluctuaciones respecto a la posición media de la interfase).¹¹

4.3. Configuración e interpretación de datos

El Software de GranuDrum que permite el control del aparato, el tratamiento de imágenes y la medida final y dispone de diferentes parámetros a ajustar. Pueden clasificarse en tres grupos: experimentales, de video e imagen y parámetros de análisis.

4.3.1. Parámetros experimentales

A continuación, se explicarán los diferentes parámetros que se deben ajustar antes de empezar una medida:

- Sequence liste:** es la lista de velocidades en rpm que se quieren usar para realizar la medida.
- Round/min:** Se utiliza en el caso de que se quiera añadir o quitar una velocidad.
- Options:** En esta sección se seleccionan el número de imágenes a tomar, así como su tasa de adquisición.

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

Y también, se puede definir cada cuanto tiempo se va a tomar una imagen, en este caso 1000ms, es decir cada segundo se tomará una imagen.

d) En esta área se pueden seleccionar **varias opciones:**

- *Aeration*: se usa en el caso de que se quiera calcular el volumen ocupado por la muestra.
- *Hysteresis*: es la opción que he seleccionado para este proyecto. Esta opción permite a GranuDrum estudiar las velocidades en el orden dado (en este caso: 2,4,6,8,10) y a continuación en el orden inverso (en este caso: 10,8,6,4,2) para después poder analizar si hay alguna influencia en el orden o cambio de velocidades.
- *First avalanche*: GranuDrum en este caso calculará el primer ángulo de avalancha, el tambor girará a 1 rpm y estudiará el colapso del polvo. Esta opción es útil si el interés es analizar la fluidez del polvo en un proceso cuasiestático, cercano al equilibrio.

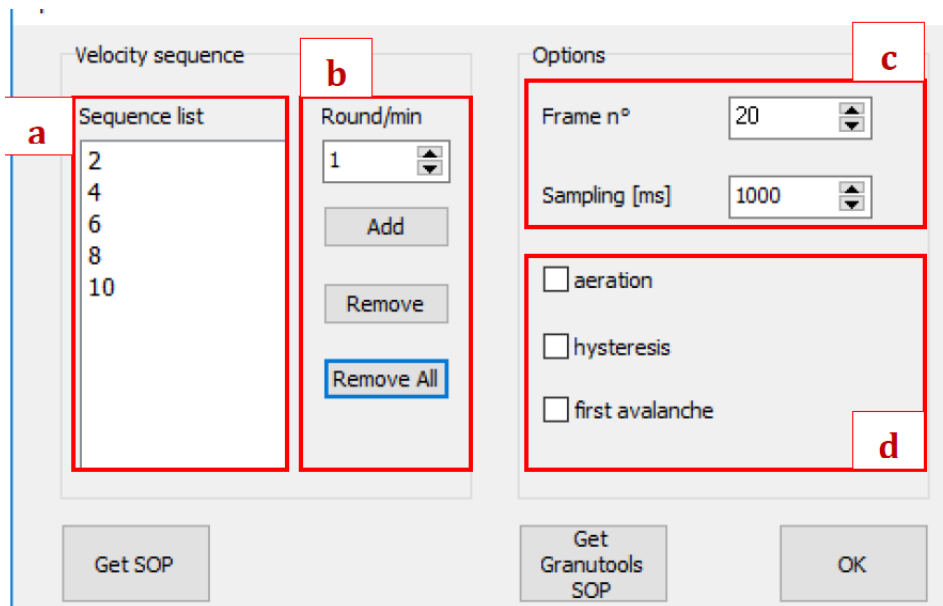


Figura 4.3.1 Ajustes del software en la parte experimental¹¹

4.3.2. Parámetros-Video y de imagen

En esta parte podemos realizar ajustes como:

- a) **Gain and exposure:** permite el control del brillo y el contraste de las imágenes). Fotografías con poco contraste entorpecen la detección de la interfase.
- b) **Image corrections:** se seleccionan ajustes internos de algoritmos de corrección.
- c) Estas opciones son muy importantes:
 - **Threshold:** selecciona el límite de intensidad luminosa que separa la zona de la imagen ocupada por el polvo de la zona aire.
 - **Crop % of frame:** aquí se selecciona el área de estudio, bien todo el tambor o bien un tanto por ciento de la zona circular visible. Es de interés para la medida en polvos muy cohesivos. Explicaré más adelante en que puede influir la selección de este parámetro.

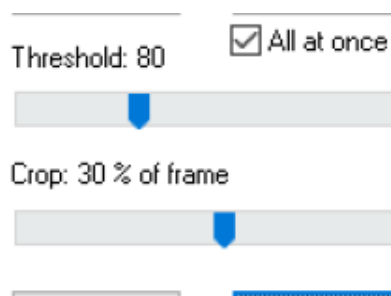


Figura 4.3.2 Parámetros Threshold y Crop

4.3.3. Análisis – Gráficos y tablas

Después de analizar la muestra en el apartado *Analysis* nos encontramos con 2 pestañas, *Images* y *Graphs*.

En cuanto a *Images* aparece en la parte inferior la primera imagen que se toma al para cada velocidad. Al hacer *clic* sobre una de las fotos se puede distinguir en rojo, la posición

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

media de la interfase y en verde las fluctuaciones de la interfase que se usará para el cálculo del índice de cohesión (Figura 4.3.3 y 4.3.4).

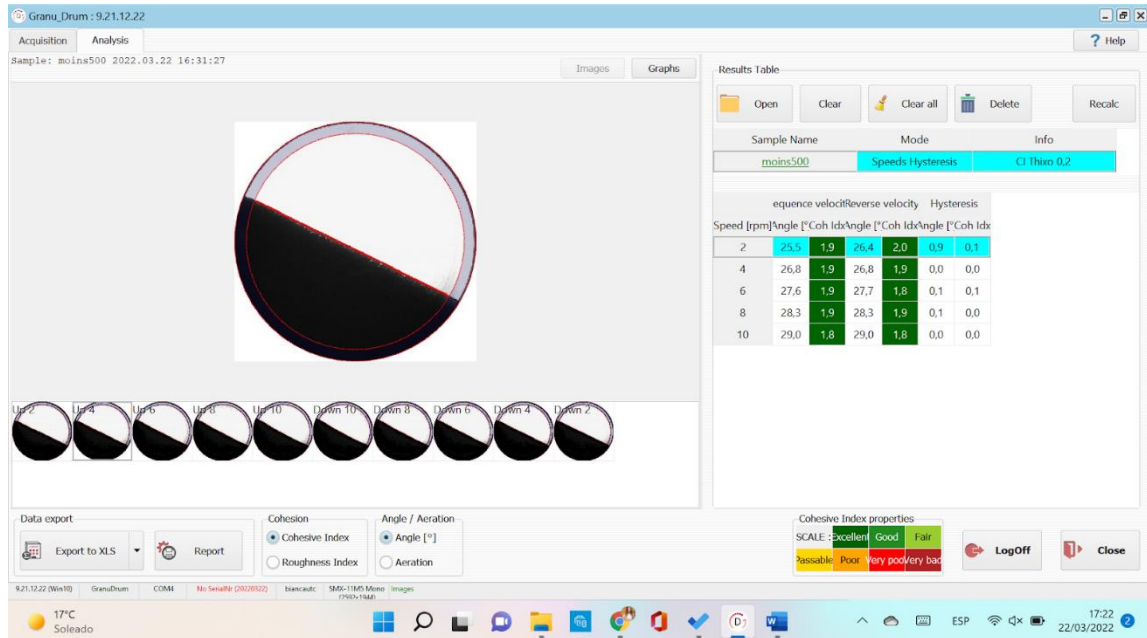


Figura 4.3.3 Apartado de Images

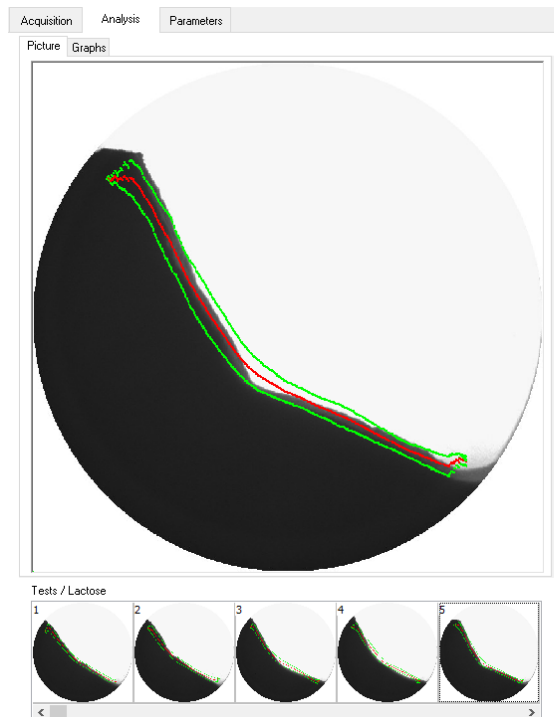


Figura 4.3.4 En rojo, la posición media de la interfase y en verde las fluctuaciones de la interfase¹¹

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

En cuanto a la pestaña de *Graphs* se muestran los resultados de manera resumida representados en dos gráficos. Un gráfico representando el índice de cohesión frente a la velocidad de rotación en rpm y otro el ángulo de reposo frente a la velocidad de rotación en rpm. Como podemos observar en la Figura 6.3.5, a la derecha se encuentran los valores numéricos medios para cada velocidad. Además, podemos observar que hay un código de color que informa de la fluidez del polvo. Para obtener todos los datos, no solo las medias, se pueden extraer en formato *Excel* (que es lo que yo he realizado para este proyecto).

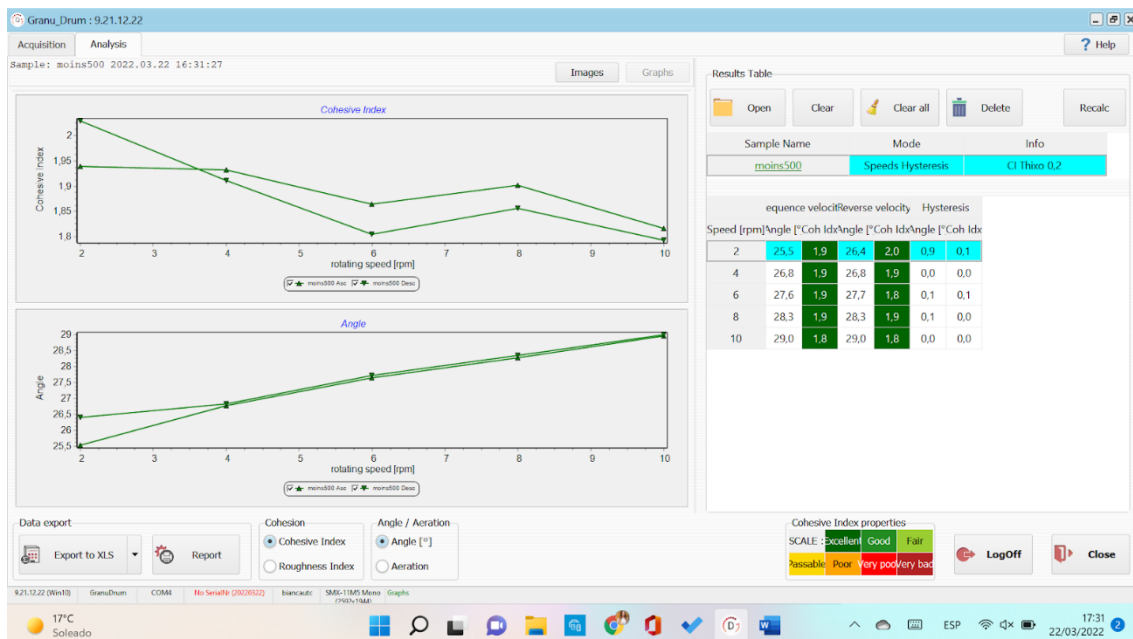


Figura 4.3.5 Apartado de *Graphs*

4.4. Materiales y procedimiento seguido

4.4.1. Materiales

Para este trabajo he usado 3 grupos de polvos:

- Esferas de vidrio
- Zirconio
- Partículas metálicas (acero inoxidable) tipo S (partículas esféricas) y G (partículas con superficies angulares).

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un
reómetro de diseño propio

En la tabla siguiente se mostrarán los distintos grupos de tamaños de partícula elegidos para realizar el estudio:

TABLA 4.4.1

Tamaños de partícula de las Microsféricas de vidrio utilizados

Tamaños de partícula en μm	0-20	0-50	40-70	70-110	100-200	200-300	300-400	400-600	1000-1300
---------------------------------------	------	------	-------	--------	---------	---------	---------	---------	-----------

TABLA 4.4.2

Tamaños de partícula de Zirconio utilizados

Tamaños de partícula en mm	0,08- 0,13	0,1-0,2	0,3-0,4	1-1,2	1,2-1,4
----------------------------	------------	---------	---------	-------	---------

TABLA 4.4.3

Tamaños de partícula de los Metales G utilizados

Tamaños de partícula en mm	0,125	0,18	0,353	0,5	0,71	1	1,14	1,18	1,7
----------------------------	-------	------	-------	-----	------	---	------	------	-----

TABLA 4.4.4

Tamaños de partícula de los Metales S de vidrio utilizados

Tamaños de partícula en μm	0,18	0,3	0,5	0,6	0,71	0,85	1	1,18	1,4	1,7	2
---------------------------------------	------	-----	-----	-----	------	------	---	------	-----	-----	---

4.4.2. Procedimiento seguido

Seguidamente se han seleccionado los valores de los parámetros mencionados en el *Apartado 4.3* utilizados en la experimentación:

- La secuencia de velocidades (2,4,6,8,10) en Histéresis
- Frame nº 40 y sampling (ms) 1000, es decir que, para cada velocidad, GranuDrum tomará 40 imágenes separadas por 1 segundo.

Se hacen pasar los 34 polvos. El tiempo de cada son unos 15 minutos.

Al terminar cada medida se extraen todo el conjunto de datos en una Hoja Excel y se autoguardan los ficheros de imágenes a analizar. La posición media de la interfaz polvo-aire se calcula por procesamiento de imagen. De este análisis, dos medidas serán extraídas: índice de cohesión, función de las fluctuaciones de la interfaz polvo-aire y es representativo de la cohesión de las partículas dentro del tambor, y el ángulo de reposo dinámico.

4.5. Resultados: ÍNDICE DE COHESIÓN

Se analizan el comportamiento de este parámetro para los diferentes materiales.

4.5.1. Microesferas de vidrio

Reuní todos los datos y realicé un gráfico de barras con las medias de los valores del índice de cohesión para cada velocidad y grupo de tamaño. Todo ello, para mostrar la dependencia del índice de cohesión con la velocidad de rotación y el tamaño de partícula. Y a continuación realice la media del índice de cohesión (color amarillo en la *Tabla 4.5.1*) para cada grupo de tamaño.

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

TABLA 4.5.1

El índice de cohesión (*Cohesive Index*) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de las Microesferas de vidrio

COHESIVE INDEX GLASS BEADS									
Speed (rpm)	Particle size (um)								
	0-20	0-50	40-70	70-110	100-200	200-300	300-400	400-600	1000-1300
2	37,62	18,55	13,03	10,41	1,94	1,64	1,65	2,29	3,81
4	35,50	17,41	12,90	8,32	1,91	1,78	1,82	2,15	3,76
6	32,87	17,97	13,09	9,83	1,90	1,80	1,95	2,18	3,63
8	29,04	18,68	13,99	10,36	1,94	1,67	1,75	2,04	4,00
10	28,43	21,08	14,97	10,90	2,02	1,74	1,83	2,04	3,83
AVERAGE	32,87	18,55	13,09	10,36	1,94	1,74	1,82	2,15	3,81

Con ello obtenemos los siguientes gráficos:

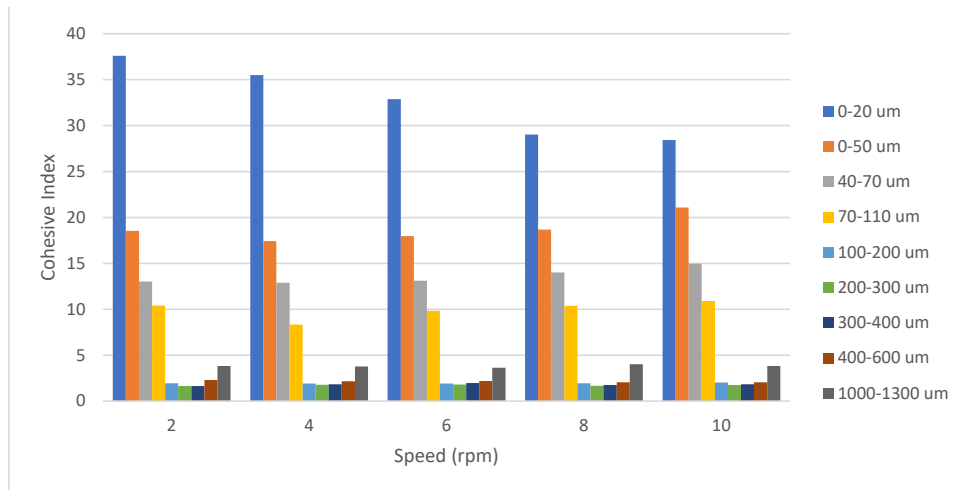
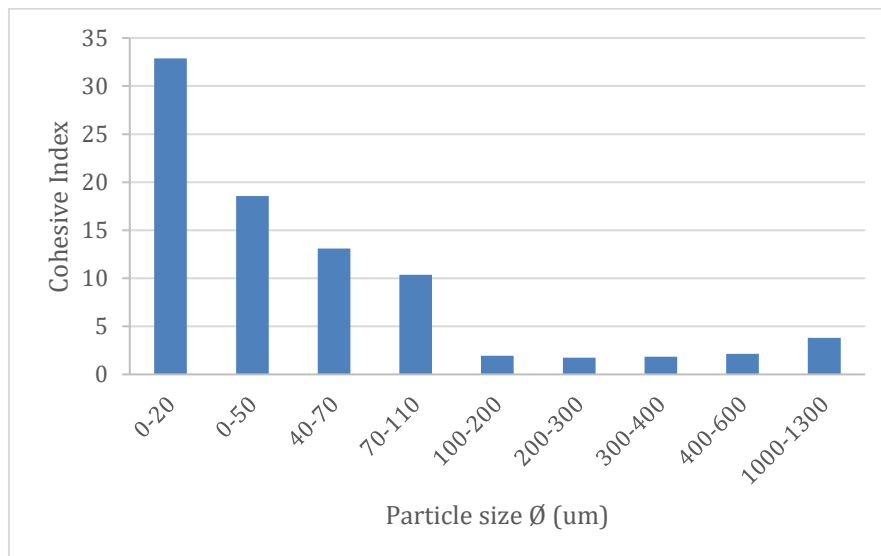


Figura 4.5.2 Gráfico del índice de cohesión (*Cohesive Index*) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de las Microesferas de vidrio



Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

Figura 4.5.3 Gráfico resumen del índice de cohesión (Cohesive Index) frente a los distintos tamaños de partículas de las Microesferas de vidrio

Podemos observar que, para las microesferas de vidrio, de menor tamaño, la cohesión inicial es muy alta. Este comportamiento puede ser debido a la presencia de pequeñas partículas en los primeros grupos de tamaños que aumentan las fuerzas cohesivas del polvo. Observamos esto sobre todo en los 4 primeros grupos, donde el tamaño de partícula es menor.

Pero en la *Figura 4.5.4* se puede ver una avalancha. A medida que aumentamos la velocidad, es decir más partículas están en movimiento, se generan pequeñas aglomeraciones de partículas, dando lugar, finalmente, a dicha avalancha. Este fenómeno hace que el índice de cohesión aumente para materiales con pequeños tamaños de partícula.



Figura 4.5.4. Imagen tomada del grupo de partículas de tamaño de 0-20 μm

Exceptuando el grupo con el menor tamaño de partícula (grupo azul – Figura 4.5.2). Esto puede deberse al aire o espacios presentes entre partículas debido al movimiento de rotación. Porque el aire actúa como lubricante y minimiza el contacto entre partículas y puede disminuir la cohesión y aumentar la fluidez, generando el efecto de **fluidización**, dando lugar a un comportamiento de adelgazamiento por cizalladura (**shear thinning behavior**).¹³ Además, con la disminución del tamaño de partícula, se crean avalanchas como la de la Figura 4.5.4 que pueden aumentar la cohesión.¹⁴

4.5.2. Zirconio

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

TABLA 4.5.3

El índice de cohesión (Cohesive Index) frente a la velocidad de rotación para los diferentes tamaños de partículas de Zirconio

COHESIVE INDEX					
Speed (rpm)	Particle size (mm)				
	0,08-0,13	0,1-0,2	0,3-0,4	1-1,2	1,2-1,4
2	1,64	1,47	1,70	2,66	3,11
4	1,50	1,62	1,68	2,40	2,84
6	1,53	1,53	1,67	2,41	3,18
8	1,55	1,46	1,55	2,46	3,04
10	1,76	1,30	1,75	2,45	3,04
AVERAGE	1,55	1,47	1,68	2,45	3,04

Con ello obtenemos los siguientes gráficos:

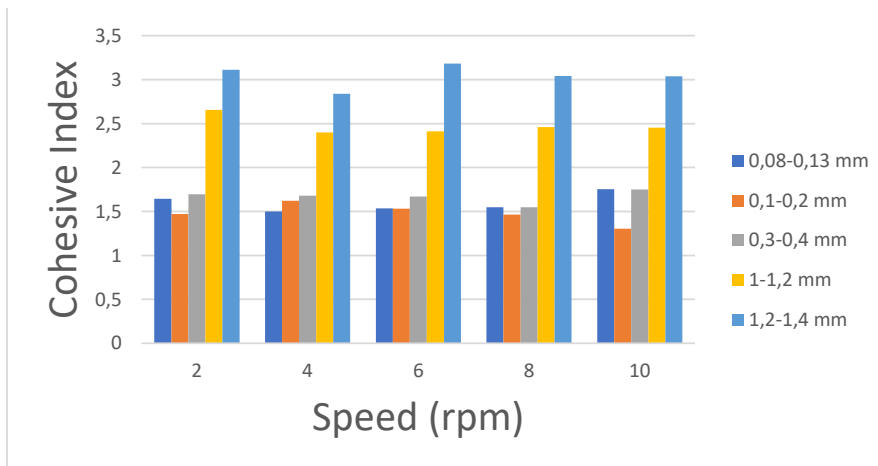


Figura 4.5.4 Gráfico del índice de cohesión (Cohesive Index) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de Zirconio

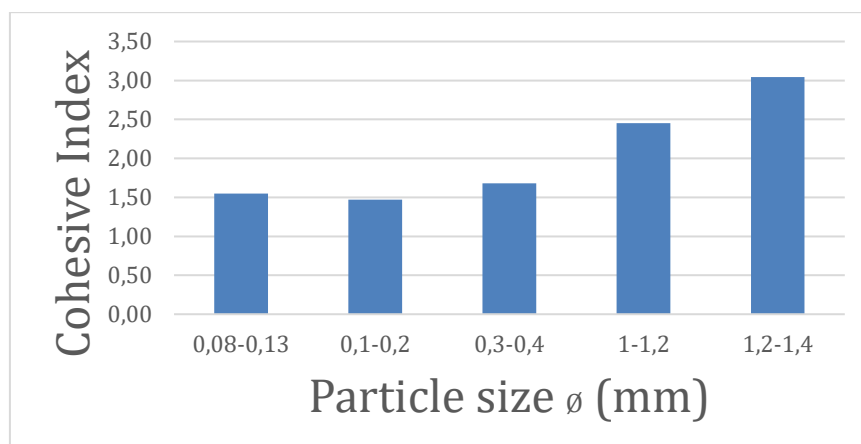


Figura 4.5.5 Gráfico resumen del índice de cohesión (Cohesive Index) frente a los distintos tamaños de partículas de Zirconio

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

En estos gráficos podemos observar que el índice de cohesión se mantiene casi constante en cada grupo de tamaño de partículas en relación con la velocidad. (Figura 4.5.4). Dicho índice es muy bajo esto es debido a la naturaleza de las partículas. Este óxido metálico pulverulento, al igual que el cobre y el magnesio¹³ se definen por su alta gravedad específica. Por lo que cuando hay movimiento la inercia de partículas domina sobre las fuerzas cohesivas.

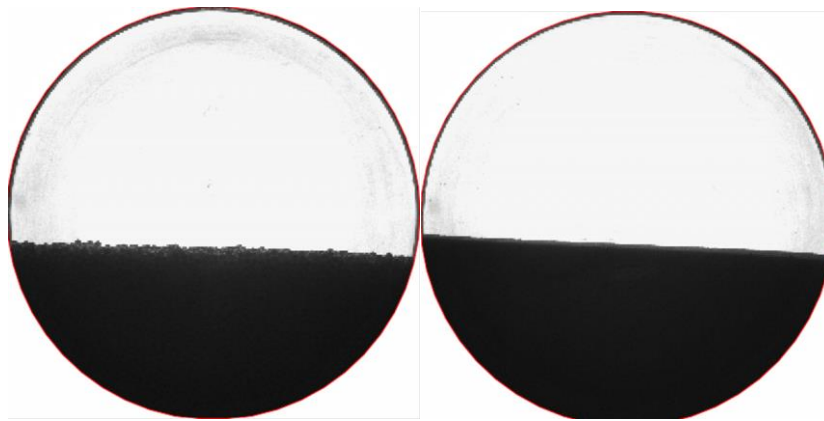


Figura 4.5.6 Imagen de la interfase de un tamaño de partícula de 1,2-1,4 mm (derecha) y 0,1-0,2 mm (izquierda) tomada con GranuDrum

En cambio, si comparamos el índice de cohesión con el tamaño de partícula vemos que este sigue siendo muy bajo, peor hay un ligero aumento al aumentar el tamaño de partícula. Este comportamiento lo vamos a despreciar ya que se debe a un error instrumental. Como podemos ver en la *Figura 4.5.6*, debido al gran tamaño de los granos el instrumento no detecta una interfase lisa, lo interpreta como si el polvo tuviese unas pequeñas fuerzas de cohesión. Lo mismo ocurre para el grupo de tamaño de partícula 1-1,2 mm.

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

4.5.3. Metales

TABLA 4.5.4

El índice de cohesión (Cohesive Index) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de los Metales G

COHESIVE INDEX METALS G									
Speed (rpm)	Particle - size (mm)								
	G120-0,125	G080-0,18	G050-0,353	G040-0,5	G025-0,71	G6018-1	G6014-1,14	G6016-1,18	G6012-1,7
2	5,64	5,76	4,93	6,59	6,82	6,45	6,15	7,03	8,74
4	4,80	4,85	2,98	3,37	4,03	4,45	5,69	4,99	7,73
6	7,35	4,62	3,28	3,21	3,86	4,31	5,89	5,48	6,96
8	6,96	5,54	3,17	3,10	3,80	4,28	5,44	5,38	7,24
10	7,10	5,91	3,22	3,18	3,79	4,42	5,49	5,24	7,84
AVARAGE	6,96	5,54	3,22	3,21	3,86	4,42	5,69	5,38	7,73

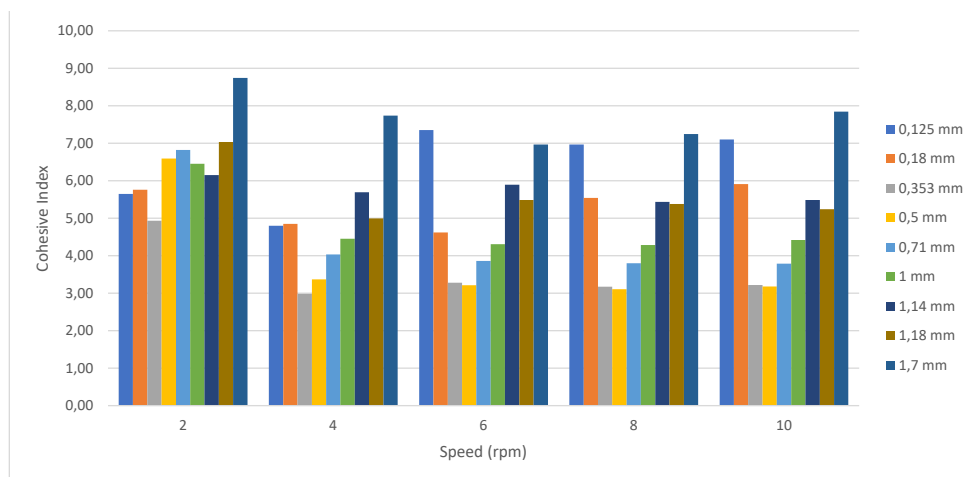


Figura 4.5.7 Gráfico del índice de cohesión (Cohesive Index) frente a los distintos tamaños de partículas de los Metales G

TABLA 4.5.5

El índice de cohesión (Cohesive Index) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de los Metales S

COHESIVE INDEX METALS S											
Speed (rpm)	Particle - size (mm)										
	S070-0,18	S110-0,3	S170-0,5	S230-0,6	S280-0,71	S330-0,85	S390-1	S460-1,18	S550-1,4	S660-1,7	S780-2
2	2,69	1,89	1,96	2,20	2,37	2,41	3,06	3,68	4,77	6,45	6,41
4	3,87	1,70	2,00	2,30	2,44	2,43	2,99	3,76	5,03	5,58	5,99
6	2,00	1,91	1,94	2,28	2,35	2,43	3,05	3,97	5,16	5,92	6,30
8	1,77	1,99	2,04	2,27	2,41	2,52	3,05	4,02	5,37	6,13	6,24
10	1,88	1,92	2,00	2,24	2,50	2,60	3,19	4,03	5,60	6,08	6,33
AVARAGE	2,00	1,91	2,00	2,27	2,41	2,43	3,05	3,97	5,16	6,08	6,30

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

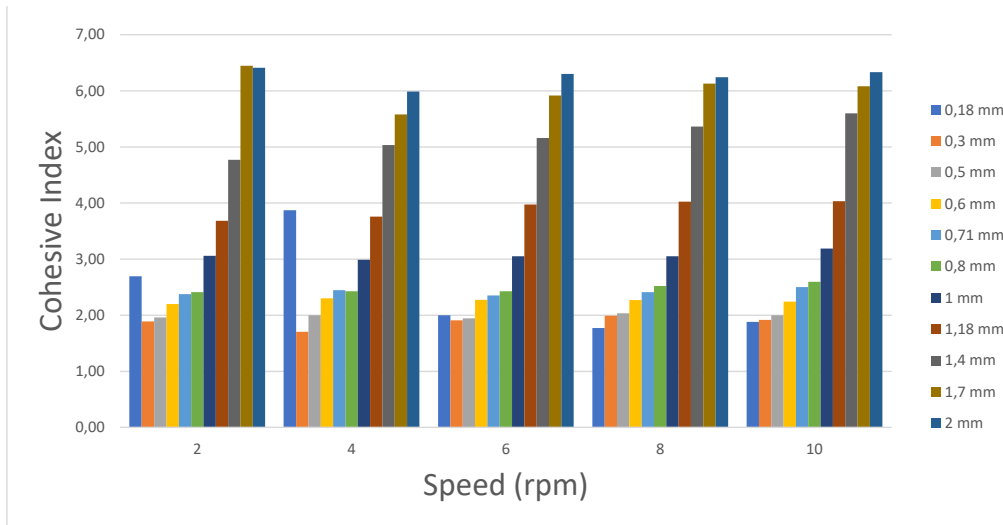


Figura 4.5.8 Gráfico del índice de cohesión (Cohesive Index) frente a los distintos tamaños de partículas de los Metales S

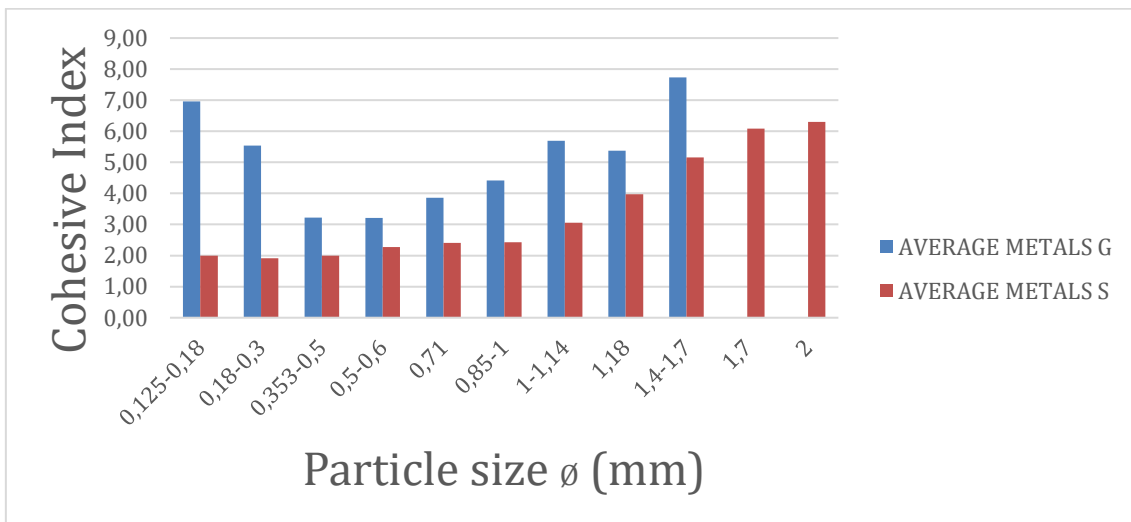


Figura 4.5.9 Gráfico resumen del índice de cohesión (Cohesive Index) frente a los distintos tamaños de partículas de AMBOS Metales

Se observa en la Figura 4.5.9 que el comportamiento de los dos polvos metálicos es el mismo. Al ser el mismo tipo de metal los dos poseen un índice de cohesión bajo, pero los polvos de los metales G (no esféricos) tienen un índice un bastante más elevado debido a la forma particular de las partículas del polvo (Figura 4.5.10) que favorece la fricción, sobre todo en las partículas de gran tamaño. Esta incrustación favorece la aglutinación de las partículas, aunque sea un efecto puramente mecánico más que cohesivo, sobre todo en polvos muy finos. Además, los ángulos de estas partículas causan errores en el instrumento al detectar mal la interfase. ¹³

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

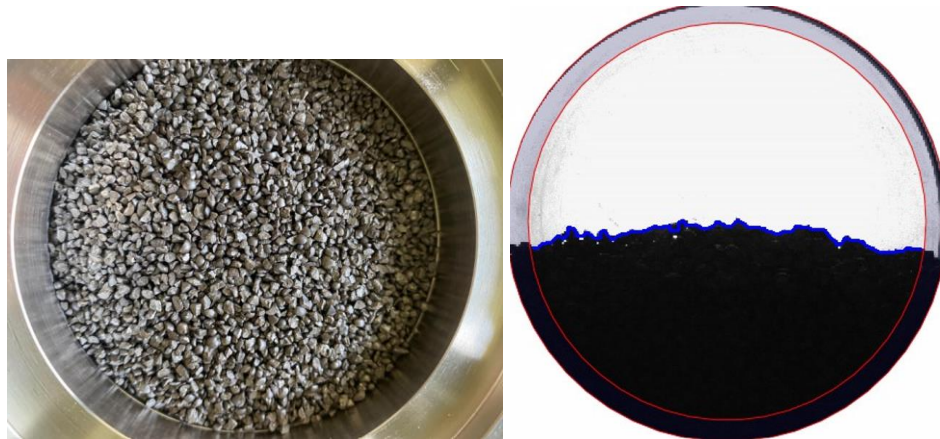


Figura 4.5.10 foto de las partículas del polvo de metal G (1,7 mm) (derecha) y la interfase calculada por GranuDrum (izquierda)

De la misma manera podemos despreciar las dos primeras medidas para los dos tamaños de partícula más pequeños de los metales G ya que analizando las imágenes tomadas se observan pequeñas “falsas” avalanchas que se producen posiblemente debido a las pequeñas irregularidades de los polvos que hacen que se produzcan pequeñas aglomeraciones incrustándose unas partículas con otras, dando errores en la interpretación de la interfase como podemos ver en la *Figura 4.5.11*.

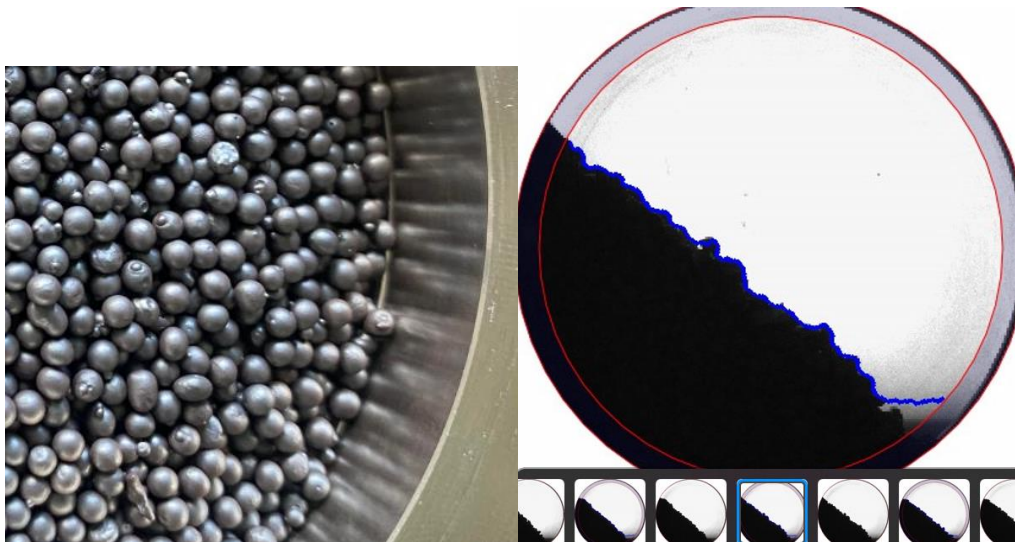


Figura 4.5.11 foto de las partículas del polvo de metal S (derecha) y la interfase calculada por GranuDrum(izquierda)

4.6. Resultados: Ángulo de Reposo

Procediendo de la misma manera que con el análisis del índice de cohesión obtenemos los siguientes resultados para el análisis del ángulo de reposo (he puesto la misma escala 0-50 °):

4.6.1. Microesferas de vidrio

Con los datos de la *Tabla 4.6.1 del anexo* obtenemos el siguiente gráfico:

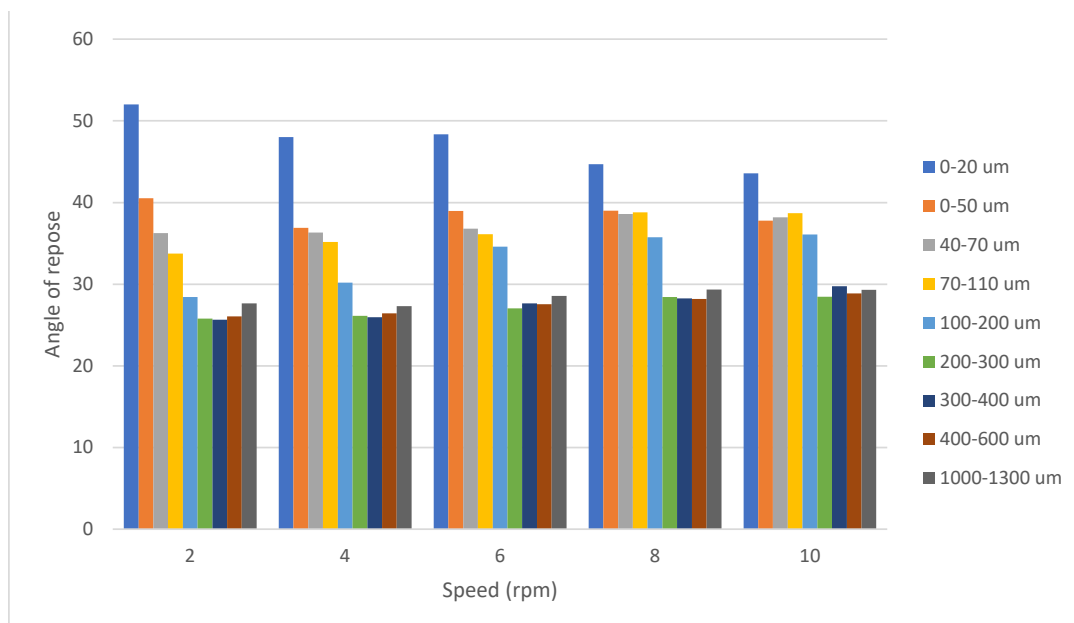


Figura 4.6.2 Gráfico del ángulo de reposo (*Angle of repose*) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de las Microesferas de vidrio

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

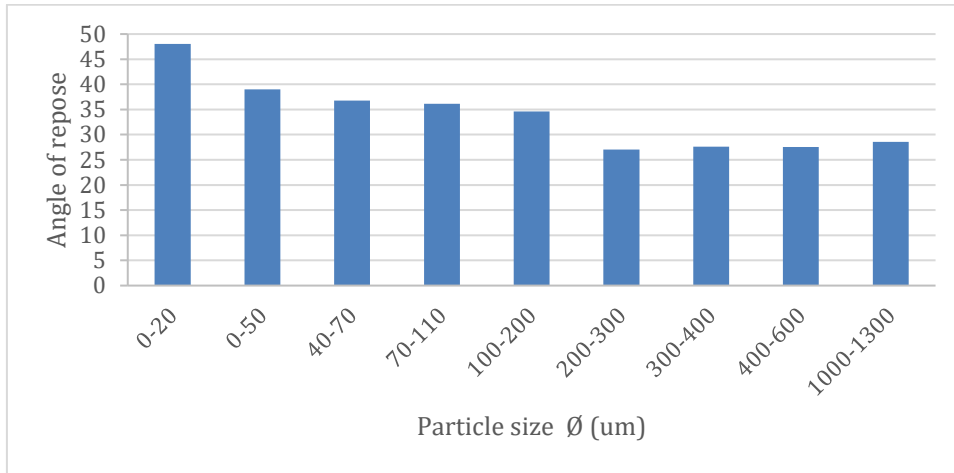


Figura 4.6.3 Gráfico resumen del ángulo de reposo (Angle of repose) frente a los distintos tamaños de partículas de las Microesferas de vidrio

Se observa que para menores tamaños de partícula el ángulo de reposo toma valores más altos y disminuye a medida que aumenta el diámetro de partícula.¹⁵ En comparación con la Figura 4.5.3 notamos que efectivamente, hay una relación entre el índice de cohesión y el ángulo de reposo, cuanto más cohesivo sea el polvo mayor será el ángulo de reposo.

4.6.2. Zirconio

Con los datos de la **Tabla 4.6.2 del anexo** obtenemos el siguiente gráfico:

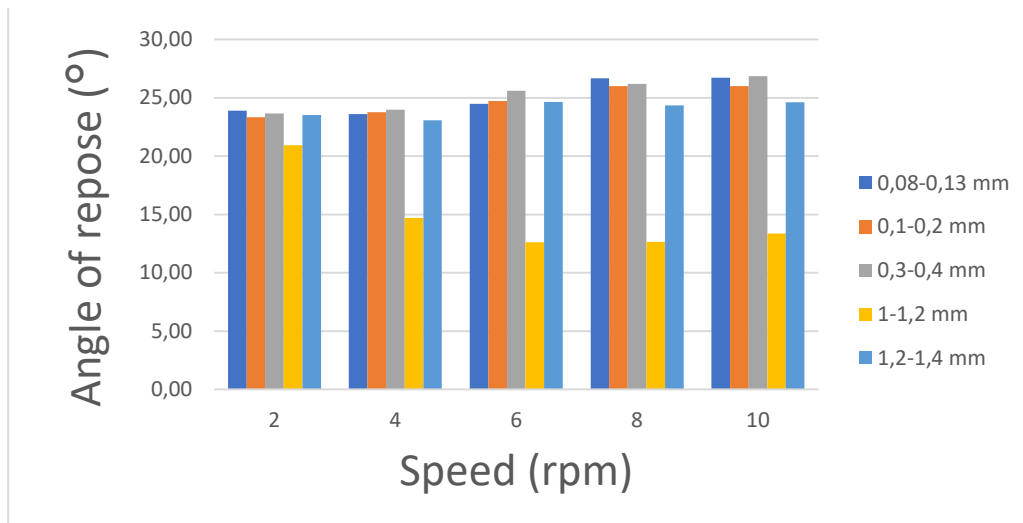


Figura 4.6.4 Gráfico del ángulo de reposo (Angle of repose) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de Zirconio- CON MALA MEDIDA

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

Como ya se vio en el apartado 4.5.2 para el grupo de tamaño de partículas de 1-1,2 mm hubo un error de GranuDrum al detectar de manera errónea la interfase debido a la forma de las partículas, creando una interfase no lisa. Y en el análisis del ángulo de reposo tuvo grandes errores en la medida ya que no calculo bien el área del tambor, como se puede ver en la *Figura 4.6.5*, que creo una falsa avalancha.



Figura 4.6.5 Foto tomada del grupo de partículas de 1-1,2 mm donde se aprecia la falsa avalancha.

A continuación, volví a realizar las medidas reduciendo un poco el área del círculo a analizar, haciendo uso del parámetro “Crop % of frame” (Apartado 4.3.2). Realizado este cambio se obtuvieron muy buenos resultados. Se puede observar que el ángulo de reposo es prácticamente constante:

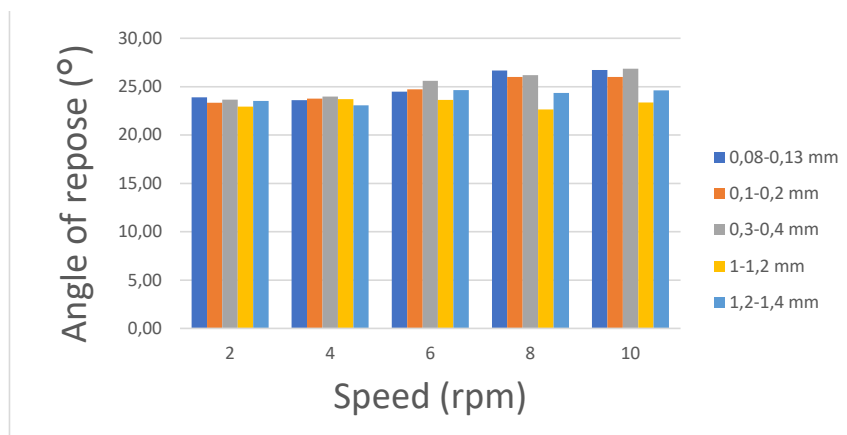


Figura 4.6.6 Gráfico del ángulo de reposo (Angle of repose) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de Zirconio- CON BUENA MEDIDA

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

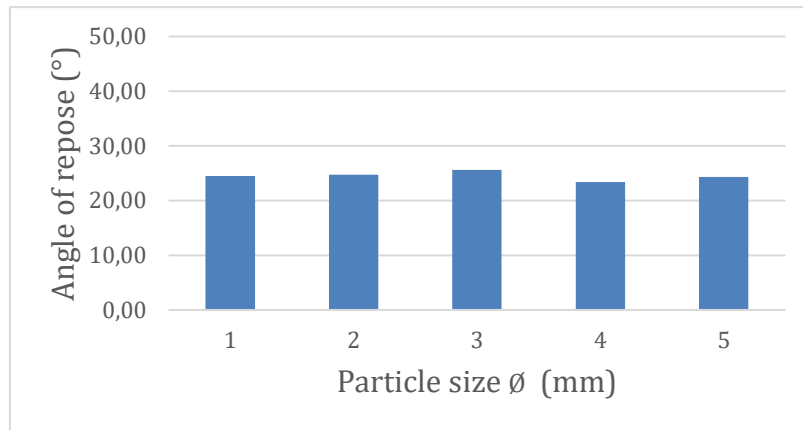


Figura 4.6.7 Gráfico resumen del ángulo de reposo (*Angle of repose*) frente a los distintos tamaños de partículas de Zirconio

Con estos resultados se puede concluir que el Zirconio no es cohesivo. Al igual que con el índice de cohesión el ángulo de reposo toma valores constantes y bajos.

4.6.3. Metales

Con los datos de la *Tabla 4.6.2 y 4.6.3 del anexo* obtenemos los siguientes gráficos:

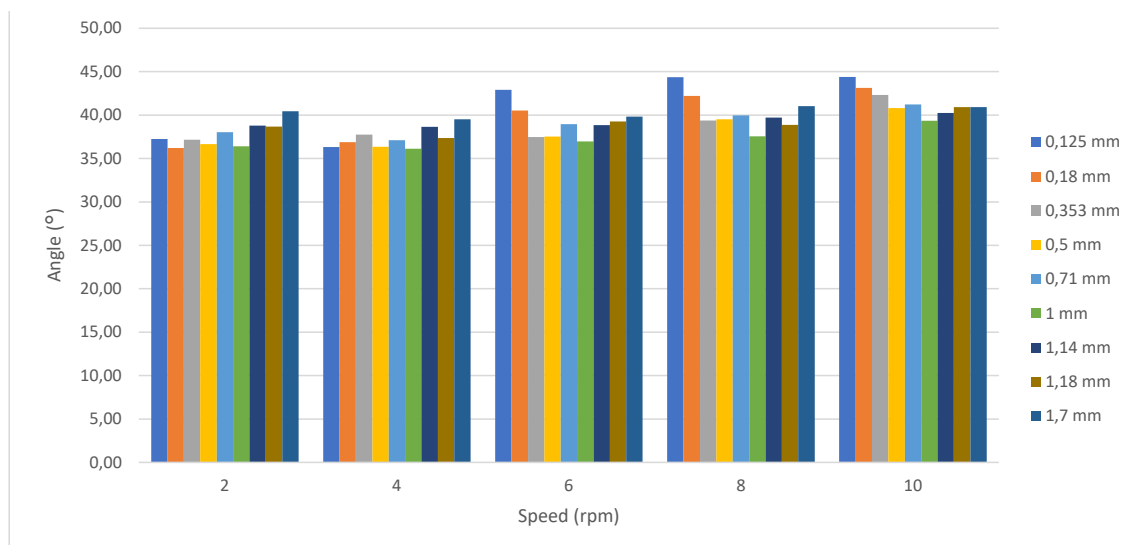


Figura 4.6.8 Gráfico del ángulo de reposo (*Angle of repose*) frente a los distintos tamaños de partículas de los Metales G

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

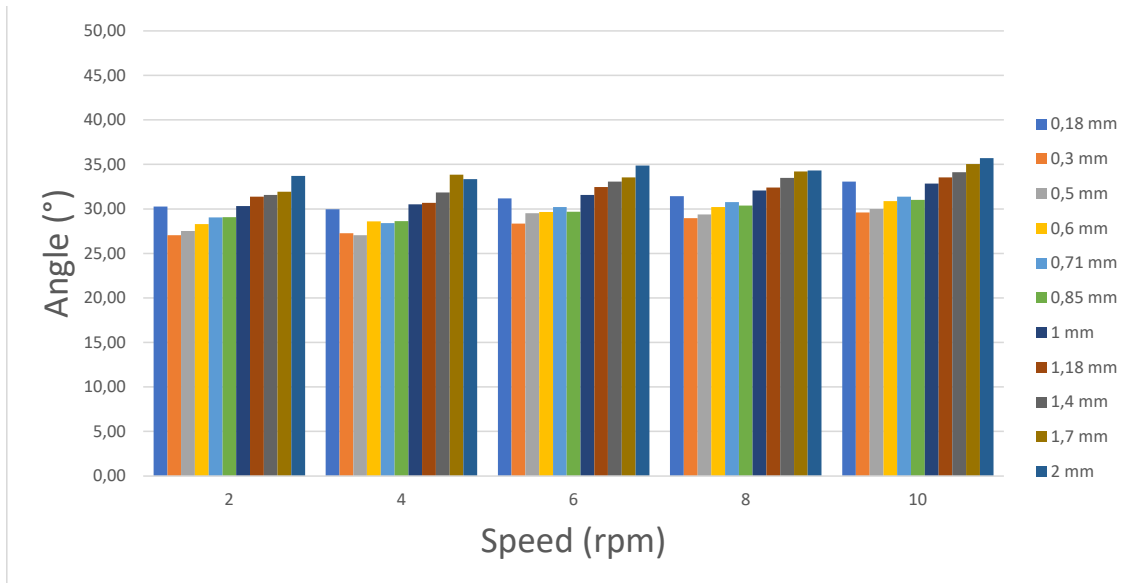


Figura 4.6.9 Gráfico del ángulo de reposo (Angle of repose) frente a los distintos tamaños de partículas de los Metales S

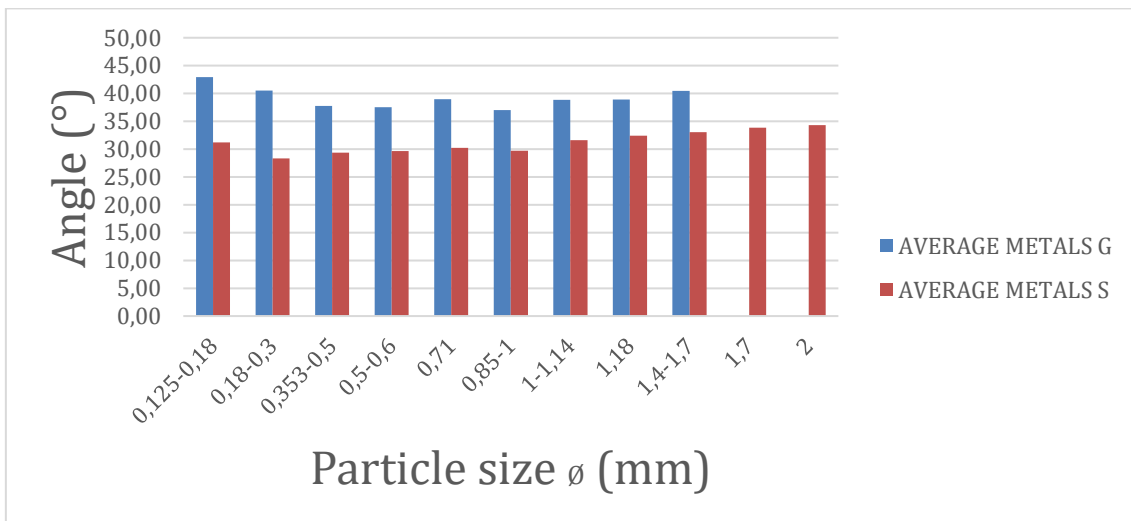


Figura 4.6.10 Gráfico resumen del ángulo de reposo ((Angle of repose) frente a los distintos tamaños de partículas de AMBOS Metales

En cuanto a los metales podemos constatar que el ángulo de reposo no ha sido influenciado por la velocidad o el tamaño de partícula ya que se puede considerar prácticamente constante. Si que se puede observar una ligera diferencia debida a la forma entre los metales G, cuyas partículas no son esféricas y los metales S, cuyas partículas si que lo son.

4.7. Conclusiones GranuDrum

Después de haber analizado los resultados se concluye que se pueden observar 3 comportamientos distintos:

- Polvos cuya capacidad de flujo se vuelve más pobre al aumentar la velocidad de rotación, como es el caso de las microesferas de vidrio (exceptuando el primer grupo en el que se produce el efecto de la fluidización y numerosas avalanchas). A este comportamiento se le llama espesamiento por cizalladura (Shear Thickening behaviour o Dilatant)¹¹¹⁶¹⁷
- Polvos cuya capacidad de flujo se mantiene constante con el cambio de velocidad o con el cambio del tamaño de partícula, como es el caso del Zirconio o en el caso de ambos metales (descartando los errores instrumentales en el índice de cohesión). Este comportamiento recibe el nombre de Newtoniano.¹⁶¹¹
- El último comportamiento que podríamos percibir pero que en este proyecto no se ha observado se dan en polvos cuya capacidad de flujo se mejora cuando aumenta la velocidad de rotación. A este comportamiento recibe el nombre de adelgazamiento por cizalladura (shear thinning behaviour).^{16 11}

También se ha llegado a la conclusión de que a partir de un tamaño de partícula igual a 100 – 200 µm se observa un índice de cohesión constante, este comportamiento puede ser explicado mediante el **número de Bond** explicado en el *apartado 2.5.3 (pag.17)*.

En este proyecto se puede explicar de la siguiente manera:¹⁸

Partimos de la **relación:** $\frac{\text{Fuerzas interparticulares}}{\text{peso de partículas}}$ donde en el peso de las partículas interviene la densidad y el tamaño de partícula.

En polvos cohesivos, como las microesferas de vidrio:

Cuando el tamaño de partícula es muy pequeño las fuerzas interparticulares prevalecen aumentando las fuerzas de ficción, aumentando la cohesión y disminuyendo la capacidad de fluir. Cuando se supera los 100-200 µm el denominador prevalece sobre el numerador,

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

reduciendo la cohesión y aumentando la fluidez, otorgando al polvo cohesivo un comportamiento “No cohesivo”.¹⁸

En polvos no cohesivos como el Zirconio:

Las fuerzas interparticulares prevalecen constantes y lo que va a aumentar su fluidez será el tamaño de partícula y sobre todo, la gran densidad de sus partículas en comparación a las microesferas de vidrio, por ejemplo.¹⁸

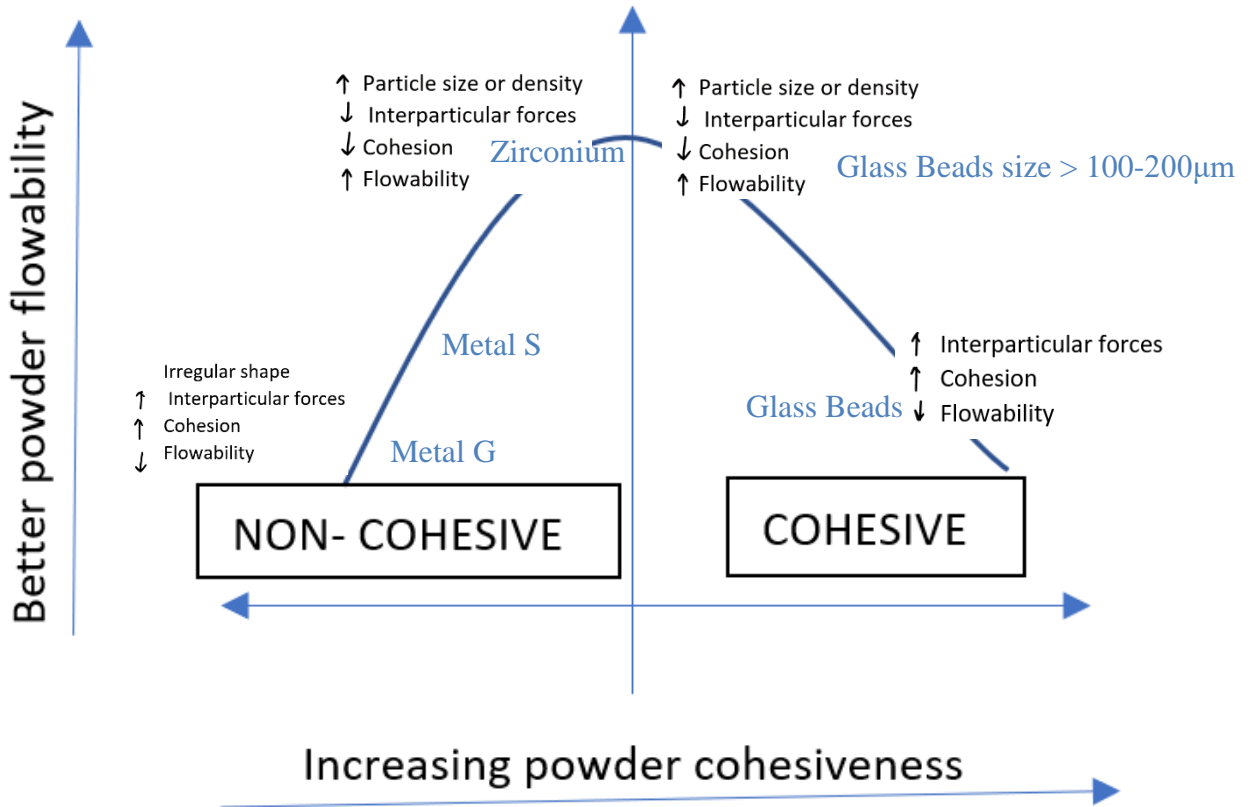


Figura 4.6.11 Gráfico resumen propio de las conclusiones obtenidas

5. Proceso FT4

5.1. Introducción

Hoy en día sigue siendo un gran desafío caracterizar las propiedades del flujo de un polvo. Para satisfacer estas necesidades se creó el FT4 que ahora es considerado un medidor de flujo de polvo universal. Destaca por su capacidad de simular las condiciones de un procesamiento de un polvo como por ejemplo realizando la medida en condiciones de estado consolidado, o moderadamente estresado, aireado o fluidizado. Ofrece la posibilidad de medir la resistencia de un polvo al flujo mientras el polvo está en movimiento y también permite calcular la resistencia al cizallamiento y medir las propiedades a granel (densidad, compresibilidad y permeabilidad).¹⁹

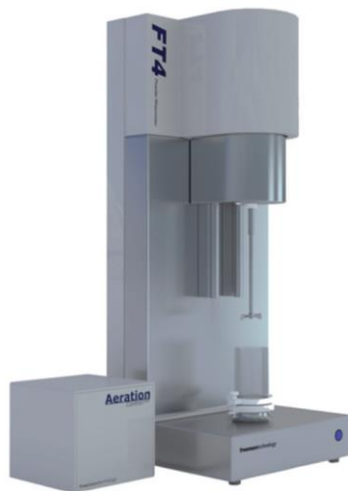


Figura 5.1.1 Reómetro FT4²⁰

5.2. Breve explicación del funcionamiento: test BFE y

El reómetro FT4 está compuesto principalmente de dos elementos: el cilindro de vidrio y la hélice (en este proyecto se ha usado un recipiente cilíndrico vidrio de 50 mm de diámetro y una hélice de longitud 48 mm).

El instrumento mide la resistencia del material pulverulento a la fluidez. Esta medida se obtiene con el movimiento ascendente y descendente de la hélice por el interior del lecho de partículas. Cuanta más resistencia oponga el polvo más difícil será que este fluya.

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

El instrumento mide tanto resistencias verticales como rotacionales, en forma de fuerza y torque. Estos a su vez contribuyen al cálculo de la energía total.^{20,21}

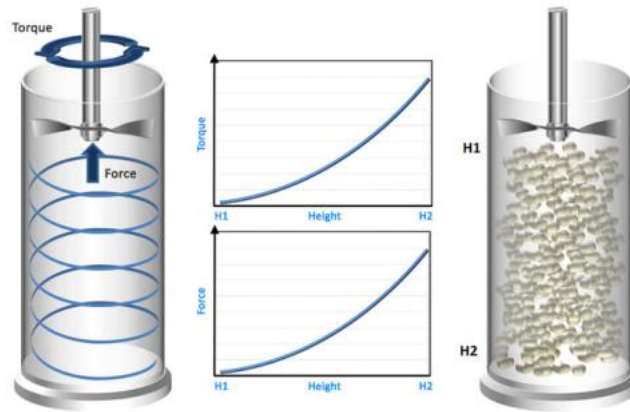


Figura 5.2.1 Medidas de torque y fuerza- FT4²⁰

Existen dos maneras evaluar la fluidez de un polvo:

- La hélice realiza un movimiento descendente obligando a que el polvo fluya, ya que este está encerrado en el cilindro (“*confined flow test*”). Este test recibe el nombre de **BFE (Basic Flow Energy)**.
- La hélice asciende sin forzar al polvo a fluir ya que, en este caso, la parte superior del recipiente no está cerrado. Este test recibe el nombre de **SE (Specific Energy)**.^{20,21}



Figura 5.2.3. Representación del BFE (derecha) y del SE (izquierda)²⁰

5.3. Tipos de test

5.3.1. BFE

Generalmente en la primera parte de una prueba se alcanza un nivel de energía que indica un “estado estacionario”. A esta “energía estabilizada” se le llama **BFE (Basic Flow Energy)** y es medida en el movimiento ascendente del aspa. Viene definido como:

$$\text{BFE (ml)} = \text{Flow energy of test 7} \quad (11)$$

Esta medida depende de muchos **parámetros**:

- Propiedades físicas del polvo como: forma, densidad, cohesión...
- Propiedades ambientales: humedad, fuerzas electrostáticas, contenido de aire...

El estudio de BFE es muy útil si queremos analizar la influencia de un factor específico en las propiedades del polvo.

Normalmente un BFE bajo representa un polvo que fluye bien y un BFE alto muestra que el polvo fluye mal. Pero esto no es siempre así, ya que hay casos donde se mide un alto valor de BFE en un polvo cohesivo. **Por lo tanto, valores altos o bajos no son necesariamente desfavorables, pueden indicar que el polvo es difícil de procesar, pudiendo compactar fácilmente o variar su fluidez.**

5.3.2. SI

El “*Stability Index*” (**SI**) compara las energías medidas durante el movimiento descendente desde el primer ciclo hasta el séptimo, ofreciendo información cuantitativa del cambio producido en las propiedades del polvo. Viene definido de la siguiente manera:

$$SI = \frac{\text{Flow energy of test 7}}{\text{Flow energy of test 1}} \quad (12)$$

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

TABLA 5.3.1

Interpretación del test de estabilidad²²

SI \approx 1	SI > 1	SI < 1
Polvo estable, sus propiedades no cambian	Propiedades del polvo son afectadas por causas como: -Segregación -Aglomeración -Cargas electrostáticas	Propiedades del polvo son afectadas por causas como: -Desgaste -Desaglomeración -Por acción de un agente de flujo

5.3.3. FRI

El **FRI (Flow Rate Index)** cuantifica la sensibilidad del flujo a la velocidad de flujo. Corresponde a la relación entre la energía a 10 mm/s y a 100mms/s de la punta del aspa. Viene definido de la siguiente manera:²³

$$FRI = \frac{\text{Flow Energy of test 11 (10mm/s)}}{\text{Flow Energy of test 8 (100/s)}} \quad (13)$$

TABLA 5.3.2

Interpretación del test de FRI ^{22,24}

FRI \approx 1	FRI > 1
En polvos no cohesivos se observa que son menos sensibles al caudal. El contacto entre partículas no se ve a penas afectado por la velocidad del aspa. Si se estuviese en el caso de un polvo ideal no cohesivo, la energía se podría considerarse independiente del caudal.	Esta situación se suele dar en polvos cohesivos ya que son más sensibles al cambio de caudal. Son polvos inestables, requieren menos energía una vez que comienzan a fluir más rápido. Son polvos difíciles de manejar ya que su fluidez variará mucho durante su procesamiento (peligroso).

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

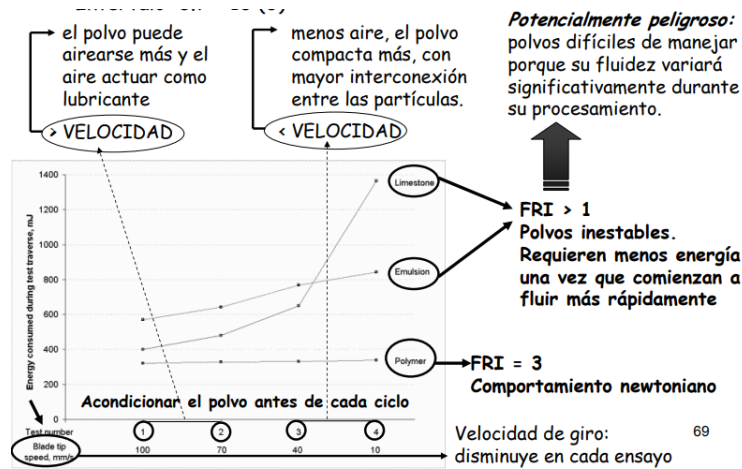


Figura 5.3.1 Ilustración del análisis breve del FRI²⁵

5.3.4. SE

La Energía Específica, **SE (Specific Energy)**, es una medida que indica como va a fluir el polvo en un ambiente no definido o de bajo estrés. El SE se calcula a partir del trabajo realizado en el movimiento del aspa hacia arriba en sentido de las agujas del reloj a través del polvo desde el fondo de cilindro. (Generando una leve elevación y bajo estrés).²⁶

TABLA 5.3.1

Interpretación del test de Energía específica²⁶

SE > 10	5 < SE < 10	SE < 5
Alta cohesión	Cohesión moderada	Baja cohesión

5.3.5. CBD

La Densidad a granel Condicionada, **CBD (Conditioned Bulk Density)**, es la calculada a partir de la masa inicial calculada al principio de la muestra gracias a la balanza que se encuentra debajo del cilindro de vidrio y el volumen compacto. Este volumen es calculado después de que el reómetro FT4 indique que debemos retirar el exceso de polvo que sobresale del cilindro. Por lo tanto, el test de CBD se puede definir como:²⁶

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

$$CBD = \frac{\text{Split mass}}{\text{Split volume}} \left(\frac{g}{ml} \right)$$

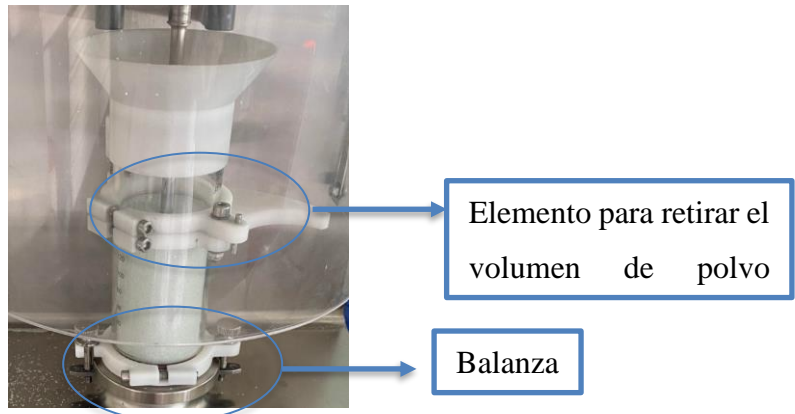


Figura 5.3.2 Ilustración del cilindro de vidrio FT4 y los elementos para calcular el CBD

5.4. Resultados y discusión

En esta parte del proyecto se ha querido analizar, mediante los test comentados anteriormente, el comportamiento de los diferentes polvos.

Cabe destacar que no he analizado los polvos metálicos ya que cabía la posibilidad de que el instrumento (sobre todo la hélice y el cilindro de cristal) sufriese daños.

Tampoco he analizado los grupos de tamaño mayores a 1 mm de diámetro porque al intentarlo había partículas que se quedaban atrapadas entre la punta de la hélice y el cilindro. Ya que la hélice tiene 48 mm de diámetro y el cilindro 50 mm, por lo que toda partícula de diámetro mayor o igual a 1mm se queda encastrada causando daños y errores en la medida.

5.4.1. Microesferas de vidrio

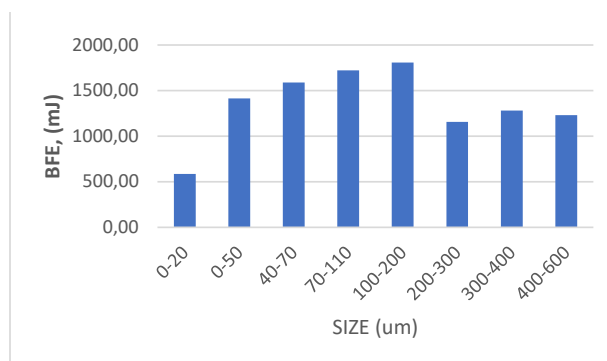


Figura 5.4.1 Gráfico del test de BFE para las Microesferas de vidrio

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

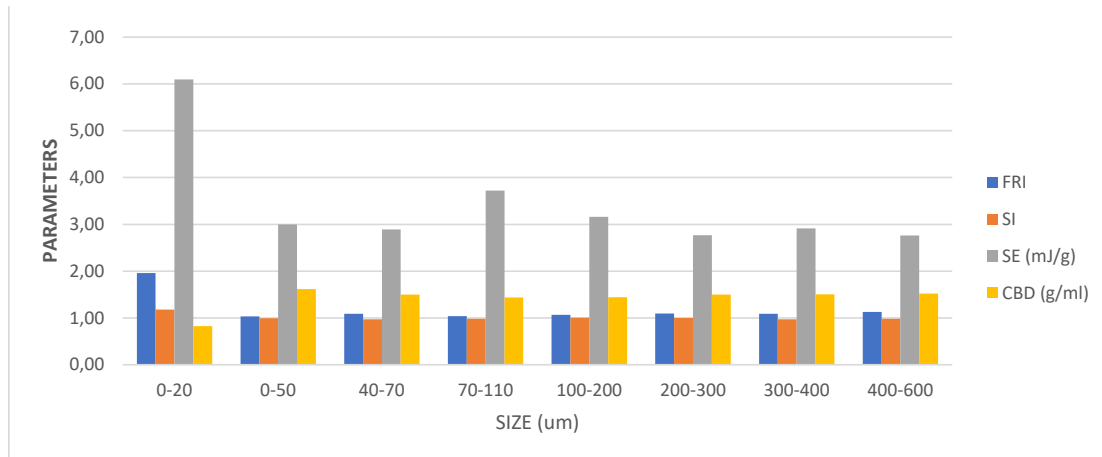


Figura 5.4.2 Gráfico del resto de test comentados en el apartado 5.3 para las Microesferas de vidrio

5.4.2. Zirconio

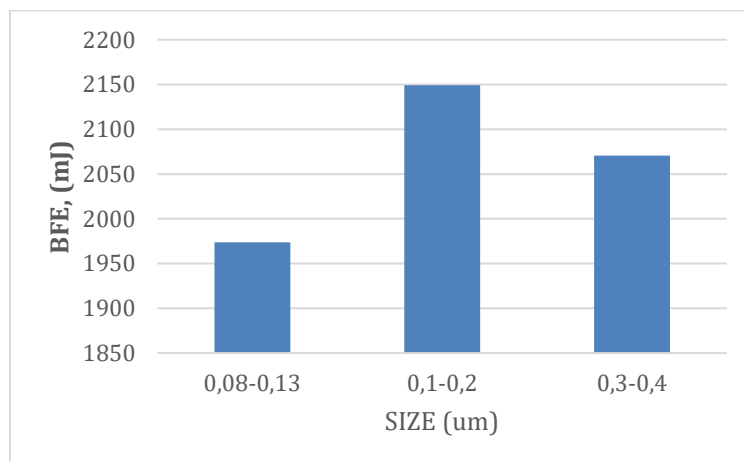


Figura 5.4.3 Gráfico del test de BFE para el Zirconio

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

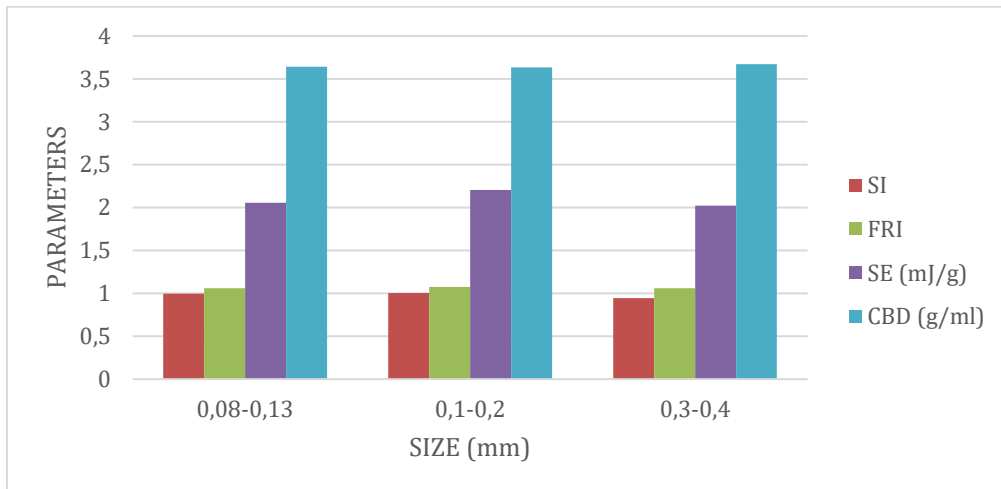


Figura 5.4.4 Gráfico del resto de test comentados en el apartado 5.3 para e Zirconio

5.5. Conclusiones FT4

Observamos que para las Microesferas de vidrio el FRI es > 1 para el primer grupo de tamaño de partículas indicando que este es cohesivo, que es un polvo inestable que requiere menos energía una vez que comienzan a fluir más rápido. Para el resto de los grupos el FRI es aproximadamente 1, lo que quiere decir que no se consideran polvos cohesivos y que el contacto entre partículas no es afectado por la velocidad del aspa. Para el Zirconio vemos que el FRI toma un valor aproximado de 1 por lo que se concluye que es un polvo no cohesivo,

El mismo análisis hacemos con los valores de SI. Tanto los valores del Zirconio como los de las Microesferas de vidrio son aproximadamente 1, lo que indica que es un polvo que no sufre cambios en sus propiedades al aplicar un estrés. Exceptuando el primer grupo de las Microesferas de vidrio donde se obtiene un valor > 1 de SI, lo que indica que las propiedades del polvo son afectadas (puede ser por causas como: segregación, aglomeración o cargas electrostáticas, por ejemplo).

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

Para los valores de BFE observamos un comportamiento muy distinto, pero con la misma tendencia para los 2 tipos de polvo.

Cuando el tamaño de partícula es muy pequeño (polvo muy fino, con menos espacios entre partículas) se necesita menos energía para desplazar la masa ya que al ser tan compacto y compresible se observa que el aspa realiza una especie de “corte” en el polvo y a continuación esta se desplaza en vacío.



Figura 5.5.1 Ilustración del “corte” y del movimiento en vacío que realiza el aspa cuando el polvo es muy fino.

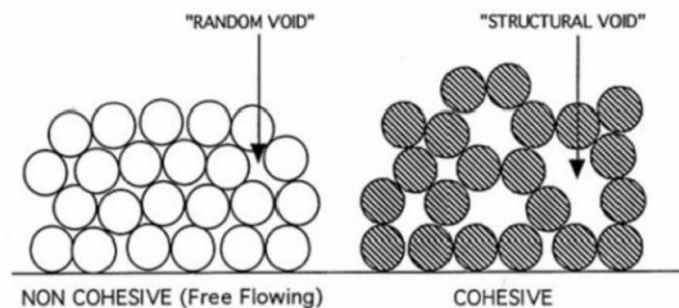


Figura 5.5.2 Ilustración de los espacios entre partículas para un polvo cohesivo y no cohesivo

27

El BFE aumenta con el aumento del tamaño de partícula al haber más espacios entre partículas y, por lo tanto, más volumen a desplazar. Esto ocurre hasta sobrepasar el tamaño de 100-200 μm donde se observa sobre todo en las Microesferas de vidrio que el BFE comienza a ser constante.

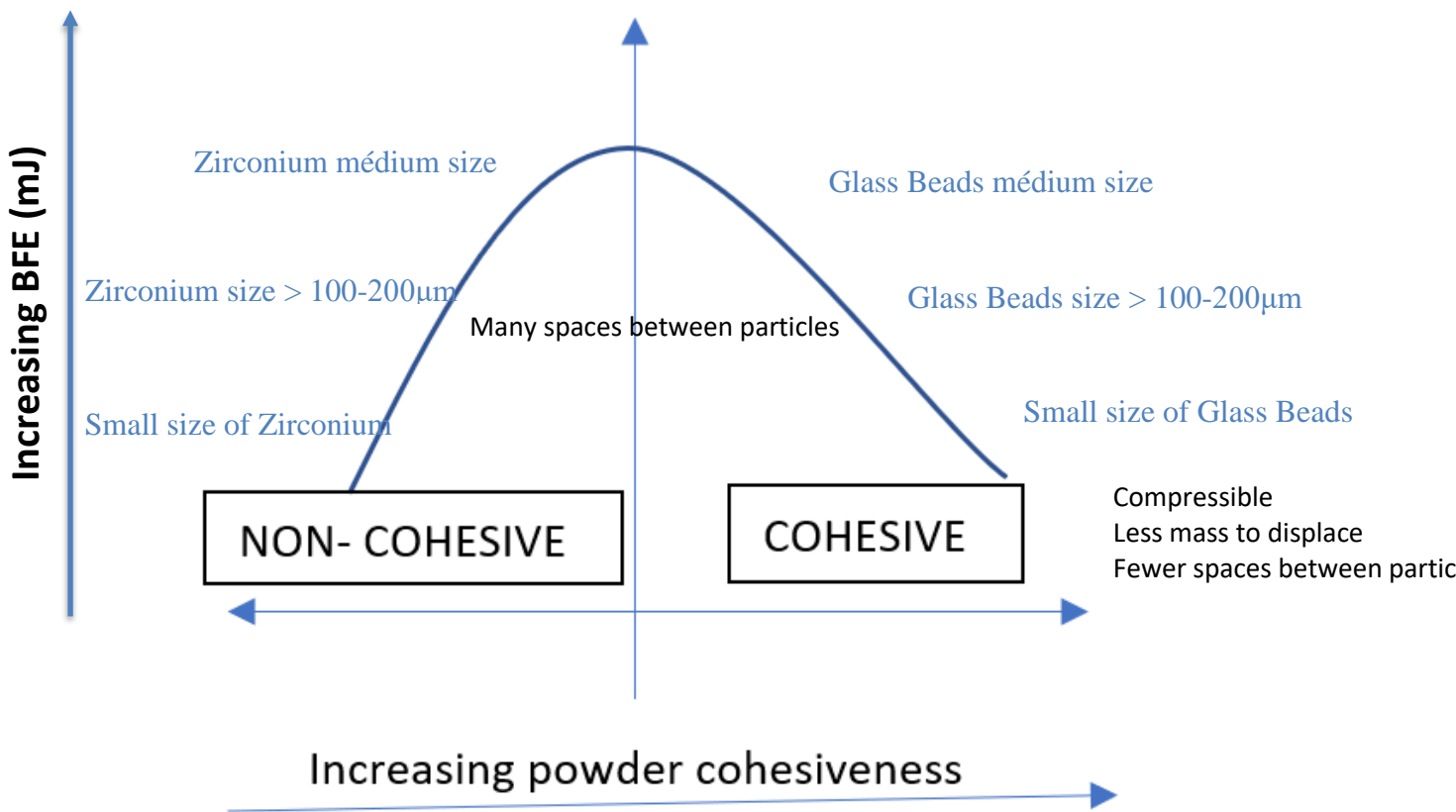


Figura 5.5.3 Gráfico resumen propio de las conclusiones obtenidas

6. Conclusiones GranuDrum y FT4

Con los dos métodos utilizados se han obtenido resultados muy semejantes, destacando sobre todo la similitud del índice de cohesión y el ángulo de reposo con los resultados del BFE.

Los dos tipos de análisis me han hecho llegar a la misma conclusión final, las Microesferas de menor tamaño presentan un comportamiento cohesivo y el Zirconio y los metales presentan un comportamiento no cohesivo. La cohesión o no cohesión viene definida por las propiedades de los polvos (el tamaño de partícula principalmente), la forma de las partículas y las fuerzas interparticulares.

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

Este proyecto ha permitido ver que el GranuDrum es un instrumento que da una medida rápida (7 min sin histéresis aproximadamente), tiene una fácil manipulación, después de introducir la muestra no necesita personal para realizar ninguna acción, no se debe vaciar el tambor para repetir una medida, rápida exportación de los datos en ficheros Excel, es portátil por su tamaño y peso y una buena repetibilidad.

Pero en cambio, a partir de un tamaño de partícula mayor (en torno a 1 mm de diámetro) se producen errores en la detección de la interfase creando una interfase falsamente no lisa. También, en ocasiones, el instrumento posee errores de medida al detectar falsas avalanchas o al detectar de manera errónea el área del tambor, sobre todo en el análisis del índice de cohesión (Cohesive Index).

Por lo contrario, el reómetro FT4 es un instrumento más lento (20 min por una sola medida), se necesita al usuario para retirar el exceso de volumen, para repetir una medida se debe realizar el proceso de llenado y la introducción de la muestra desde el principio y al igual que GranuDrum no es apto para tamaños de partículas de más de 1 mm de diámetro.

En cambio, ofrece un análisis completo del polvo y tiene mejor repetibilidad.

Con ello se puede concluir que el GranuDrum es un instrumento que se podría utilizar para un análisis donde se quiera saber de manera rápida si un polvo es cohesivo o no o como pre-medida a un otro proceso. Por lo tanto, el instrumento ideal sería un reómetro FT4 que fuese más rápido y que no tuviese la necesidad de la presencia del usuario mediante la medida.

PARTE II: Simulación DEM

1. Introducción

La simulación es una herramienta innovadora que permite reproducir de manera virtual diferentes procesos y elementos, además de estudiar el comportamiento, analizar distintos parámetros, la dependencia de unas variables con otras, etc...

Lo más importante de la capacidad de comparar diferentes diseños, diferentes alternativas, sin tener que invertir tanto dinero y tiempo y sin tener que gastar energía o materiales.²⁸

En este proyecto se pretende realizar la simulación de partículas basada en el método DEM (Discrete element method). Este permite optimizar instalaciones y procesos. Puede obtener un nivel de información que posiblemente no se pueda alcanzar con experimentos y permite realizar movimientos superficiales como la traslación, rotación, etc.²⁹ El objetivo de esta pequeña segunda parte era sobre todo aprender el lenguaje Liggghts.y comprender la simulación DEM.

2. LIGGGHTS, PARAVIEW, ONESHAPE

2.1. LIGGGHTS

LIGGGHTS es un software “open source” de simulación para el método Este programa es una versión mejorada de LAMMPS (simulador de dinámica molecular clásica). LIGGGHTS fue creado con el objetivo de enforzar su uso en aplicaciones industriales. Hoy en día es utilizado por una gran variedad de instituciones en todo el mundo.

Un fichero LIGGGHTS contendrá información como: el tipo de partículas, sus propiedades y parámetros, el campo de simulación, características geométricas del entorno y el movimiento de estas (en ciertos casos), las características de la inserción de partículas, número de iteraciones y componentes físicas. En este proyecto he realizado este fichero (*apartado 3*) en el Bloc de notas de mi portátil.

A continuación, LIGGGHTS ejecutará este fichero con el fin de realizar la simulación. Con ello podemos analizar distintas variables a cada instante como por ejemplo la velocidad, las fuerzas aplicadas, la posición de partículas, etc. El programa crea un fichero VTK que ofrece la posibilidad de visualizar la simulación con otro programa alternativo.³⁰

2.2. PARAVIEW

Paraview es un programa que lee ficheros VTK, por lo tanto, que nos permite visualizar las simulaciones efectuadas con LIGGGHTS. El programa leerá todos los datos contenidos en el fichero y los representará en una escala y en diferentes colores. Ofrece también el registro en video de la simulación y la posibilidad de comprobar que todo el script realizado y compilado con LIGGGHTS coincide con la realidad de lo que queremos simular.

2.3. ONSHAPE

ONSHAPE es un programa de CAO (Concepción Asistida por Ordenador) gratuito y que se puede usar en línea, de manera online, sin la necesidad de descargar el programa en el ordenador y al crearte una cuenta te permite almacenar todos los archivos en el almacenamiento propio del programa. He utilizado ONSHAPE en este proyecto para realizar la geometría del tambor utilizado en el script de LIGGGHTS.

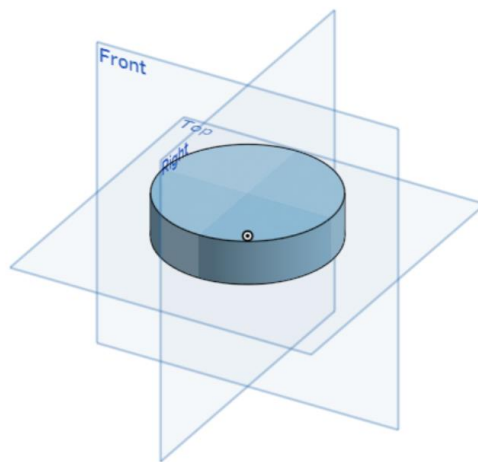


Figura 2.1 Geometría creada con ONSHAPE con las dimensiones de GranuDrum

3. Programa usado: script

A continuación, voy a explicar las líneas de código usadas para realizar la simulación:

<pre> ### WALL IMPORT FOR CAD # Preliminaries atom_style sphere atom_modify map array boundary f f f newton off communicate single vel yes units si </pre>	<p>Boundary: Indica si los límites son fijos (f f f) o periódicos (p p p)</p> <p>En esta parte se indican que tipo de átomos son utilizados, si la tercera ley de Newton es aplicada y en que unidades están introducidos los parámetros (SI, en este caso)³¹³²</p>
<pre> # Declare domain region domain block -1 1 -1 1 -1 1 units box create_box 1 domain # Neighbor listing neighbor 0.001 bin neigh_modify every 1 check no </pre>	<p>Aquí podemos observar las especificaciones del tamaño de la caja de simulación y de los posibles contactos entre partículas.</p> <p>El número 1, es debido a que se tienen 1 tipo de material (suponemos que las microesferas de vidrio y el tambor están hechos del mismo material de vidrio). Normalmente, habría que considerar el material de las partículas del polvo estudiado y el material del tambor.</p>
<pre> # Material and interaction properties required fix m1 all property/global youngsModulus peratomtype 1 24e-9 fix m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 1 0.25 fix m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 1 0.6 fix m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1 0.1 </pre>	<p>Especificaciones de las propiedades del material (el polvo, en este caso).</p>

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

<pre>## Import mesh from cad: fix cad all mesh/surface/stress file meshes/granu_drum.stl type 1 wear finnie fix granwalls all wall/gran model hertz tangential history mesh n_meshe 1 meshes cad</pre>	<p>Importar el fichero CAD con la forma del recipiente</p>
<pre>##Particle insertion #distributions for insertion fix pts1 all particletemplate/sphere 15485863 atom_type 1 density constant 2600 radius constant 0.001 fix pdd1 all particledistribution/discrete 32452843 1 pts1 1 group bdv_group region domain region gd cylinder z 0 0 0.0107 -0.00107 0.00107 units box #particle insertion fix ins bdv_group insert/stream seed 32452867 distributiontemplate pdd1 & nparticles 6000 massrate 0.1 insert_every 1000 & overlapcheck yes all_in no vel constant 0.0 0.0 -1.0 & insertion_face inface</pre>	<p>Inserción de partículas: Se describen las partículas que se van a insertar (tipo de material, radio y densidad), así como la composición de estas. Finalmente, la región específica de inserción. En esta parte de indica el número de partículas, la tasa de inserción y la velocidad inicial.</p>
<pre>#Define the physics pair_style gran model hertz tangential history #Hertzian without cohesion pair_coeff * *</pre>	<p>En estas líneas se define el modelo físico que se va a utilizar. (En <i>pair_coeff</i>, se pueden introducir diferentes interacciones entre diferentes tipos de partículas)</p>
<pre># Time step an Gravity timestep 0.00001 fix gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0</pre>	<p>Introducción del <i>time step</i> y la gravedad</p>
<pre>#output settings, include total thermal energy compute 1 all erotate/sphere thermo_style custom step atoms ke c_1 vol thermo 10000 thermo_modify lost ignore norm no</pre>	<p>Aquí se definen que valores se quieren estudiar en el archivo y la frecuencia de presentar escritos los valores termodinámicos</p>

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

<pre>#insert the first particles so that dump is not empty run 1 dump dmp all custom/vtk 200 granudrum_process*.vtk id type type x y z ix iy iz vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz radius dump dmpstl all granu_drum/stl 200 post/dump*.stl</pre>	Genera un conjunto de archivos “dump” para contener la información
---	--

4. Conclusión

Varios problemas e incertidumbres al inicio de mi proyecto, no me han permitido avanzar de la manera esperada y por lo tanto, me ha impedido realizar la simulación del movimiento general de partículas. He realizado una búsqueda bibliográfica para realizar la siguiente conclusión.

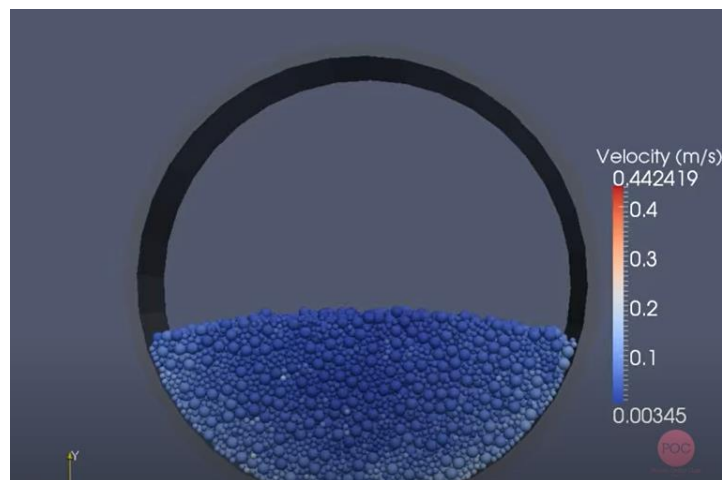


Figura 4.1 Simulación DEM de un tambor rotativo con las mismas características que GranuDrum estático^{33 34}

En la *figura 4.1* podemos observar un tambor estático, donde, según el código de color, vemos que las partículas poseen velocidad prácticamente nula. Sin embargo, en la *figura 4.2* se puede observar el comportamiento de partículas de un polvo no cohesivo. Las partículas que se encuentran en el fondo realizarán un leve movimiento ascendente hasta toparse con la interfase partículas-aire. En ese momento, las partículas se deslizarán en sentido descendente por la superficie de la interfase, con mayor velocidad. Dichas partículas están representadas con un color naranja-rojo en la *figura 4.2*, donde también

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un
reómetro de diseño propio

se puede destacar que, en el centro de este lecho de partículas, estas poseen velocidad cero, por lo tanto, se mantienen estáticas mientras el resto permanece en un continuo movimiento.^{35,36}

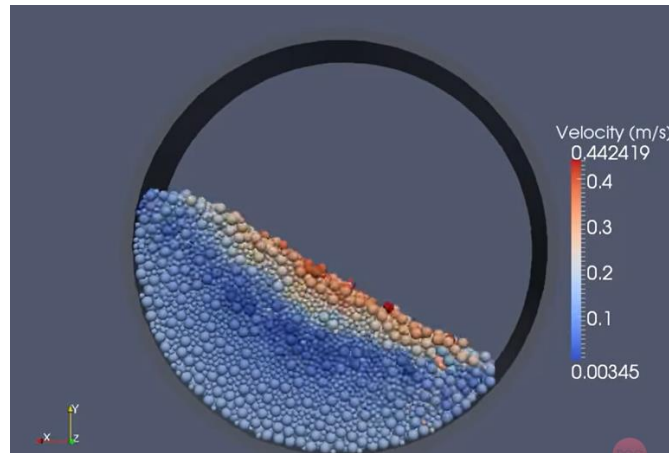


Figura 4.2 Simulación DEM de un tambor rotativo con las mismas características que GranuDrum en movimiento- velocidad de 12 rpm³⁴

En la figura 4.3 se observa el mismo comportamiento para una velocidad de 36 rpm en partículas de diferente forma (C6, cuadrada y D5steel esférica). También se puede remarcar que para las partículas de forma cuadrada se producen avalanchas, sin embargo, se puede observar el mismo comportamiento que en el caso de la figura anterior (figura 4.2). Se observa el mismo movimiento ascendente-descendente de partículas y la velocidad nula o casi nula en el centro del lecho.³⁷

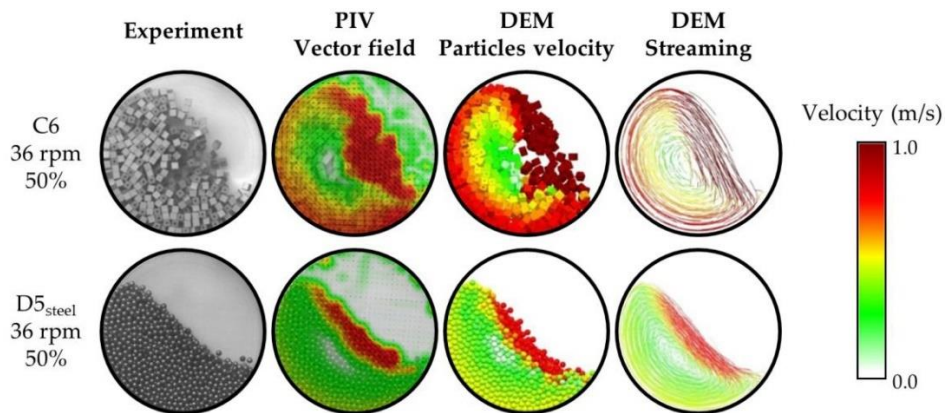


Figura 4.3 Simulación DEM de un tambor rotativo con las mismas características que GranuDrum comparación de forma³⁸

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

Las *figuras 4.4 y 4.5* sirven para ilustrar otros posibles estudios que se realizan con la simulación DEM, en estos casos, un análisis de la temperatura con el movimiento del lecho de partículas y la simulación realizada con una combinación de varios tipos de partículas con tamaños y formas distintas.

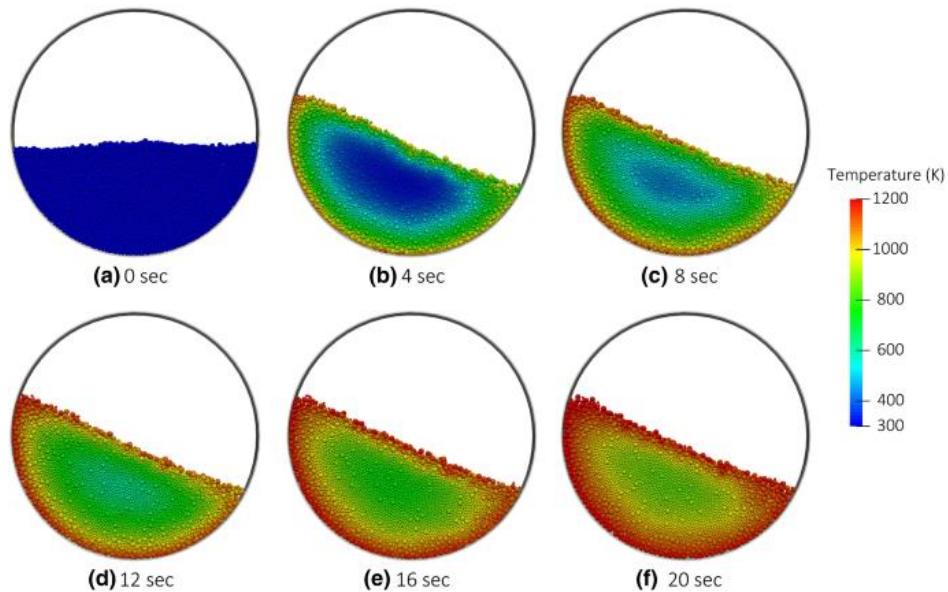


Figura 4.4 Simulación DEM de un tambor rotativo- análisis de temperatura³⁹

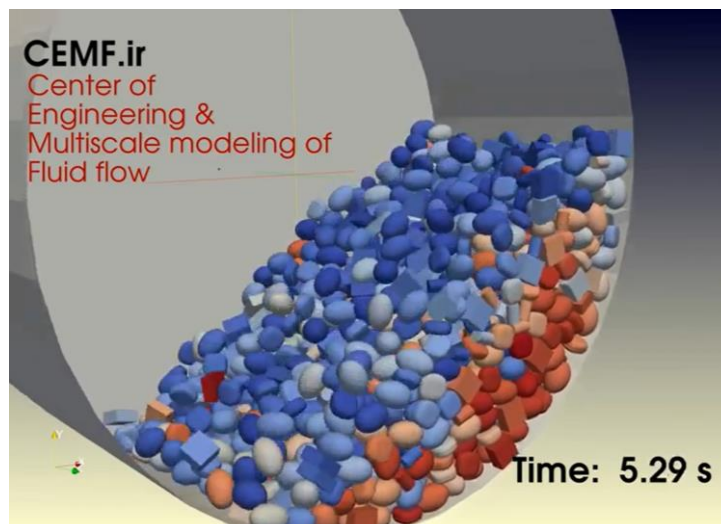


Figura 4.5 Simulación DEM de un tambor rotativo con partículas de distintos tamaños y formas^{40,41}

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

En conclusión, la simulación DEM en este proyecto puede servir para el análisis del comportamiento de diferentes polvos y de diferentes parámetros y su influencia sobre la fluidez. También, será posible simular y predecir el comportamiento de los polvos ante un cambio en el proceso o en el diseño de manera mucho más rápida, económica y eficaz que si se hiciera de manera experimental.

BIBLIOGRAFIA

1. Reología de Materiales en Polvo – guíalab. Accessed April 23, 2022. <https://www.guialab.com.ar/notas-tecnicas/reologia-de-materiales-en-polvo/>
2. Reología y propiedades reológicas - Infinitia Research. Accessed April 23, 2022. <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/reologia-y-propiedades-reologicas-de-los-materiales/>
3. Granutools | Our company. Accessed April 23, 2022. <https://www.granutools.com/en/granutools>
4. Renald V.Giles. *Mecánica de Los Fluidos e Hidráulica Mc Graw Hill*.
5. Fluidos Newtonianos y No Newtonianos | PDF | Viscosidad | Fluido. Accessed May 9, 2022. <https://es.scribd.com/document/470945443/FLUIDOS-NEWTONIANOS-Y-NO-NEWTONIANOS>
6. Pijush K.Kundu Ira M.Cohen. *Fluid Mechanics Second Edition.*; 2002.
7. Números Adimensionales | PDF | Numero Reynolds | Mecánica. Accessed May 9, 2022. <https://es.scribd.com/document/292695574/Numeros-Adimensionales>
8. número de Bond | Oilfield Glossary. Accessed May 11, 2022. https://glossary.oilfield.slb.com/es/terms/b/bond_number
9. Polvos Farmaceuticos | PDF | Medicamentos con receta | Sal (química). Accessed May 25, 2022. <https://es.scribd.com/doc/38854770/POLVOS-FARMACEUTICOS>
10. Les 7 propriétés des poudres que vous devez connaître | Palamatic Process. Accessed May 25, 2022. <https://www.palamaticprocess.fr/blog/les-7-proprietes-des-poudres-que-vous-devez-connaître>
11. *How to Run Measurements and Make Data Interpretation with Fast Guide.* www.GranuTools.com
12. Angulo de Reposo | La guía de Física. Accessed May 16, 2022. <https://fisica.laguia2000.com/fisica-mecanica/angulo-de-reposo>

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

13. Flowability and cohesion determination of metal powders using Granuheap and Granudrum. Accessed May 28, 2022. https://www.granutools.com/en/news/84_flowability-and-cohesion-determination-of-metal-powders-using-granuheap-and-granudrum
14. Quintanilla MAS, Valverde JM, Castellanos A. The transitional behaviour of avalanches in cohesive granular materials. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. 2006;2006(07):P07015-P07015. doi:10.1088/1742-5468/2006/07/P07015
15. GRANUTOOLS. HOW TO GAIN A FULL UNDERSTANDING OF POWDER FLOW PROPERTIES, AND THE BENEFITS OF DOING SO. Accessed June 16, 2022. https://ondrugdelivery.com/wp-content/uploads/2019/11/102_Nov_2019_Granutools.pdf
16. GranuTools. Determination of flow ability and cohesion in metal powders using the GranuDrum. Metal Powders.
17. GranuTools. GranuDrum : The New Rheometer for Powder. Application notes.
18. Capece M, Silva KR, Sunkara D, Strong J, Gao P. On the relationship of inter-particle cohesiveness and bulk powder behavior: Flowability of pharmaceutical powders. *International Journal of Pharmaceutics*. 2016;511(1):178-189. doi:10.1016/J.IJPHARM.2016.06.059
19. FT4 Powder Rheometer | Powder Flow Tester | Powder Flow. Accessed May 27, 2022. https://www.freemantech.co.uk/powder-testing/ft4-powder-rheometer-powder-flow-tester?gclid=CjwKCAjw7cGUBhA9EiwArBAvosBDYTXQIm7wrK8l4ImZZK K3X2wL0P_KhlcUtvHgFYF6F_g_KHhVXB0CCx4QAvD_BwE
20. FT4 Powder Rheometer | Powder Flow Tester | Powder Flow. Accessed June 18, 2022. <https://www.freemantech.co.uk/powder-testing/ft4-powder-rheometer-powder-flow-tester>
21. Preziosi L. POLITECNICO DI TORINO Numerical simulation of the Freeman FT4 powder rheometer An application of the Discrete Element Method Internal supervisor Academic year.

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

22. Powder Flow | Powder Testing | Powder Rheology. Accessed May 27, 2022. <https://www.freemantech.co.uk/>
23. Leturia M, Benali M, Lagarde S, Ronga I, Saleh K. Characterization of flow properties of cohesive powders: A comparative study of traditional and new testing methods. *Powder Technology*. 2014;253:406-423. doi:10.1016/J.POWTEC.2013.11.045
24. Ming LI. *Study of the FT4 Powder Rheometer: Comparison of the Test Methods and Optimization of the Protocols.*; 2017.
25. Fernández Arévalo M. MODULO III MODULO III SECCION 1 SECCION 1 SÓLIDOS PULVERULENTOS SÓLIDOS PULVERULENTOS.
26. Freeman Technology. *W INSTRUCTION Specific Energy W7031 Issue A.*; 2008.
27. (21) Part #3 - Breaking down of a PhD: Powder flow and cohesion, where it comes from, how to fix it. Part 1 of 2 (or maybe 3, who knows) | LinkedIn. Accessed June 6, 2022. <https://www.linkedin.com/pulse/part-3-breaking-down-phd-powder-flow-cohesion-where-campanelli/>
28. Simulación de procesos industriales | Automatización VLD 2020. Accessed June 8, 2022. <https://www.vld-eng.com/blog/simulacion-procesos-industriales/>
29. Le meilleur de la DEM avec CADFEM | CADFEM. Accessed June 8, 2022. <https://www.cadfem.net/fr/industries-et-applications/applications/methode-des-elements-discrets.html>
30. 1. Introduction — LIGGGHTS v3.X documentation. Accessed June 10, 2022. https://www.cfdem.com/media/DEM/docu/Section_intro.html#what-is-liggghts-r-public
31. Bosch C, Padr' P, Supervisor P, Feng YT. *Discrete Element Simulations with LIGGGHTS.*; 2014.
32. Norouzi HR, Zarghami R, Sotudeh-Gharebagh R, Mostoufi N. Coupled CFD-DEM Modeling: Formulation, Implementation and Application to Multiphase Flows. *Coupled CFD-DEM Modeling: Formulation, Implementation and Application to Multiphase Flows*. Published online September 19, 2016:1-416. doi:10.1002/9781119005315

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

33. Chand R, Khaskheli MA, Qadir A, Ge B, Shi Q. Discrete particle simulation of radial segregation in horizontally rotating drum: Effects of drum-length and non-rotating end-plates. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2012;391(20):4590-4596. doi:10.1016/J.PHYSA.2012.05.019
34. DEM simulation with LIGGGHTS - YouTube. Accessed June 10, 2022. <https://www.youtube.com/watch?v=z12Raodkw1w>
35. Wes GWJ, Drinkenburg AAH, Stemmerding S. Heat transfer in a horizontal rotary drum reactor. *Powder Technol.* 1976;13(2):185-192. doi:10.1016/0032-5910(76)85003-6
36. Yamamoto M, Ishihara S, Kano J. Evaluation of particle density effect for mixing behavior in a rotating drum mixer by DEM simulation. *Adv Powder Technol.* 2016;27(3):864-870. doi:10.1016/j.appt.2015.12.013
37. Hlosta J, Jezerská L, Rozbroj J, Žurovec D, Nečas J, Zegzulka J. DEM Investigation of the Influence of Particulate Properties and Operating Conditions on the Mixing Process in Rotary Drums: Part 2—Process Validation and Experimental Study. *Processes 2020, Vol 8, Page 184*. 2020;8(2):184. doi:10.3390/PR8020184
38. Hlosta J, Jezerská L, Rozbroj J, Žurovec D, Nečas J, Zegzulka J. DEM Investigation of the Influence of Particulate Properties and Operating Conditions on the Mixing Process in Rotary Drums: Part 2—Process Validation and Experimental Study. *Processes 2020, Vol 8, Page 184*. 2020;8(2):184. doi:10.3390/PR8020184
39. Yazdani E, Hashemabadi SH. DEM simulation of heat transfer of binary-sized particles in a horizontal rotating drum. *Granular Matter 2018 21:1*. 2018;21(1):1-11. doi:10.1007/S10035-018-0857-3
40. Norouzi HR, Zarghami R, Sotudeh-Gharebagh R, Mostoufi N. Coupled CFD-DEM Modeling: Formulation, Implementation and Application to Multiphase Flows. *Coupled CFD-DEM Modeling: Formulation, Implementation and Application to Multiphase Flows*. Published online September 19, 2016:1-416. doi:10.1002/9781119005315

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un
reómetro de diseño propio

41. Rotating Drum with Non-Spherical Particles: A DEM Simulation - CEMF.ir.
Accessed June 10, 2022. <https://www.cemf.ir/rotating-drum-with-non-spherical-particles-a-dem-simulation/>

ANEXO

TABLAS

TABLA 4.6.1

El ángulo de reposo (Angle of repose) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de las Microesferas de vidrio:

ANGLE OF REPOSE											
Speed (rpm)	Particle size (um)										
	0-20	0-50	40-70	70-110	100-200	200-300	300-400	400-600	1000-1300		
2	52,02	40,52	36,26	33,75	28,41	25,80	25,66	26,04	27,66		
4	48,00	36,91	36,33	35,16	30,21	26,12	25,95	26,42	27,31		
6	48,35	38,98	36,81	36,13	34,60	27,05	27,64	27,53	28,57		
8	44,69	39,01	38,60	38,81	35,74	28,45	28,27	28,19	29,34		
10	43,56	37,77	38,18	38,69	36,09	28,48	29,76	28,88	29,29		
AVARAGE	48,00	38,98	36,81	36,13	34,60	27,05	27,64	27,53	28,57		

TABLA 4.6.2

El ángulo de reposo (Angle of repose) frente a la velocidad de rotación para los diferentes tamaños de partículas de Zirconio

ANGLE OF REPOSE						
Speed (rpm)	Particle size (mm)					
	0,08-0,13	0,1-0,2	0,3-0,4	1-1,2	1,2-1,4	
2	23,89	23,35	23,66	20,94	23,52	
4	23,61	23,76	23,98	14,70	23,07	
6	24,49	24,71	25,60	12,62	24,63	
8	26,67	26,01	26,19	12,64	24,34	
10	26,72	26,01	26,84	13,37	24,62	
AVARAGE	24,49	24,71	25,60	13,37	24,34	

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

TABLA 4.6.3

El ángulo de reposo (Angle of repose) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de los Metales G

ANGLE OF REPOSE METALS G										
Speed (rpm)	Particle - size (mm)									
	G120-0,125	G080-0,18	G050-0,353	G040-0,5	G025-0,71	G6018-1	G6014-1,14	G6016-1,18	G6012-1,7	
2	37,25	36,21	37,16	36,67	38,04	36,42	38,80	38,68	40,45	
4	36,32	36,87	37,75	36,36	37,11	36,13	38,65	37,37	39,51	
6	42,92	40,53	37,48	37,52	38,95	36,98	38,85	39,27	39,82	
8	44,36	42,22	39,38	39,51	39,98	37,56	39,70	38,88	41,04	
10	44,39	43,13	42,31	40,82	41,24	39,36	40,25	40,91	40,92	
AVARAGE	42,92	40,53	37,75	37,52	38,95	36,98	38,85	38,88	40,45	

TABLA 4.6.4

El ángulo de reposo (Angle of repose) frente a la velocidad de rotación de los distintos tamaños de partículas de los Metales S

ANGLE OF REPOSE METALS S											
Speed (rpm)	Particle - size (mm)										
	S070-0,18	S110-0,3	S170-0,5	S230-0,6	S280-0,71	S330-0,85	S390-1	S460-1,18	S550-1,4	S660-1,7	S780-2
2	30,26	27,05	27,50	28,29	29,04	29,07	30,32	31,38	31,58	31,92	33,71
4	29,95	27,27	27,06	28,60	28,40	28,62	30,50	30,69	31,84	33,85	33,33
6	31,18	28,34	29,51	29,65	30,20	29,69	31,58	32,47	33,06	33,53	34,87
8	31,43	28,95	29,37	30,20	30,75	30,37	32,08	32,41	33,49	34,21	34,31
10	33,06	29,61	29,98	30,86	31,38	31,01	32,85	33,54	34,13	35,03	35,72
AVARAGE	31,18	28,34	29,37	29,65	30,20	29,69	31,58	32,41	33,06	33,85	34,31

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

TABLA 1 ANEXO

Valores medios del ángulo de reposo dinámico, aeración e índice de cohesión para cada valor de velocidad y de cada tamaño de polvo de las microesferas de vidrio (extraídos de los datos de GranuDrum)

BDV 1									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	1,02	52,02	37,62	1,57	1,03	51,38	37,60	1,58	
4	1,05	48,00	35,50	1,61	1,06	49,99	31,81	1,60	
6	1,06	48,35	32,87	1,60	1,07	48,77	36,75	1,61	
8	1,08	44,69	29,04	1,55	1,08	45,68	31,55	1,59	
10	1,09	43,56	28,43	1,53	1,09	44,18	31,16	1,57	
BDV 2									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,98	40,52	18,55	1,27	0,98	38,92	17,37	1,27	
4	0,98	36,91	17,41	1,27	0,98	39,83	17,86	1,27	
6	0,99	38,98	17,97	1,31	0,99	38,29	17,34	1,29	
8	0,98	39,01	18,68	1,35	0,98	37,44	18,86	1,34	
10	0,99	37,77	21,08	1,34	0,99	37,77	19,71	1,33	
BDV 3									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,93	36,26	13,03	1,16	0,93	37,60	13,99	1,16	
4	0,92	36,33	12,90	1,17	0,92	36,15	12,77	1,17	
6	0,92	36,81	13,09	1,20	0,93	36,23	15,78	1,19	
8	0,92	38,60	13,99	1,22	0,92	37,42	15,42	1,23	
10	0,92	38,18	14,97	1,26	0,92	37,84	15,12	1,25	
BDV4									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,95	33,75	10,41	1,08	0,94	35,42	11,19	1,10	
4	0,93	35,16	8,32	1,10	0,94	36,21	9,94	1,11	
6	0,93	36,13	9,83	1,16	0,93	36,49	9,35	1,16	
8	0,93	38,81	10,36	1,17	0,93	38,01	10,99	1,18	
10	0,93	38,69	10,90	1,21	0,93	38,81	10,81	1,20	
BDV 5									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,94	28,41	1,94	1,03	0,95	28,88	2,17	1,04	
4	0,94	30,21	1,91	1,04	0,94	29,72	1,80	1,04	
6	0,94	34,60	1,90	1,09	0,95	33,88	1,90	1,09	
8	0,94	35,74	1,94	1,13	0,94	34,90	1,88	1,12	
10	0,94	36,09	2,02	1,16	0,94	36,03	2,69	1,16	
BDV 6									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,92	25,80	1,64	1,03	0,93	25,84	1,80	1,04	
4	0,93	26,12	1,78	1,03	0,93	25,54	1,77	1,03	
6	0,93	27,05	1,80	1,04	0,93	27,13	1,70	1,03	
8	0,93	28,45	1,67	1,05	0,93	28,50	1,68	1,05	
10	0,93	28,48	1,74	1,06	0,93	29,22	1,68	1,06	
BDV7									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,93	25,66	1,65	1,05	0,93	26,37	1,90	1,05	
4	0,93	25,95	1,82	1,05	0,93	26,78	1,83	1,05	
6	0,94	27,64	1,95	1,04	0,94	27,70	1,78	1,04	
8	0,94	28,27	1,75	1,05	0,94	28,34	1,74	1,05	
10	0,94	29,76	1,83	1,06	0,94	29,02	1,97	1,06	
BDV 8									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	1,00	26,04	2,29	1,11	1,01	26,40	2,24	1,10	
4	1,01	26,42	2,15	1,10	1,01	26,76	2,14	1,10	
6	1,01	27,53	2,18	1,09	1,02	27,67	2,11	1,09	
8	1,01	28,19	2,04	1,07	1,01	28,27	2,10	1,08	
10	1,01	28,88	2,04	1,07	1,01	28,91	2,06	1,08	
BDV 9									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,97	27,66	3,81	1,31	0,97	27,06	3,61	1,30	
4	0,97	27,31	3,76	1,30	0,97	27,57	3,92	1,31	
6	0,98	28,57	3,63	1,30	0,98	28,64	3,75	1,30	
8	0,99	29,34	4,00	1,31	0,99	28,60	3,72	1,30	
10	0,99	29,29	3,83	1,30	0,99	29,31	3,97	1,27	

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

TABLA 2 ANEXO

Valores medios del ángulo de reposo dinámico, aeración e índice de cohesión para cada valor de velocidad y de cada tamaño de polvo de zirconio (extraídos de los datos de GranuDrum)

ZY1									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,96	23,89	1,64	1,02	0,96	23,12	1,36	1,02	
4	0,96	23,61	1,50	1,03	0,96	23,58	1,57	1,02	
6	0,96	24,49	1,53	1,05	0,96	25,19	1,46	1,04	
8	0,96	26,67	1,55	1,07	0,96	25,95	1,51	1,07	
10	0,95	26,72	1,76	1,10	0,95	26,73	1,68	1,10	
ZY2									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,96	23,35	1,47	1,02	0,96	23,85	1,35	1,02	
4	0,96	23,76	1,62	1,02	0,96	24,31	1,54	1,02	
6	0,96	24,71	1,53	1,04	0,96	25,32	1,50	1,04	
8	0,96	26,01	1,46	1,05	0,96	25,98	1,58	1,05	
10	0,96	26,01	1,30	1,07	0,96	26,73	1,38	1,07	
ZY3									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,95	23,66	1,70	1,03	0,94	24,18	1,69	1,03	
4	0,95	23,98	1,68	1,04	0,95	23,82	1,78	1,03	
6	0,95	25,60	1,67	1,04	0,95	24,72	1,70	1,04	
8	0,95	26,19	1,55	1,04	0,95	25,39	1,66	1,04	
10	0,95	26,84	1,75	1,05	0,95	26,07	1,67	1,05	
ZY4									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,91	20,34	5,95	1,32	0,94	12,73	1,53	1,23	
4	0,93	14,52	5,58	1,28	0,93	13,00	3,14	1,24	
6	0,94	11,72	1,18	1,23	0,93	13,06	1,61	1,25	
8	0,94	11,81	1,15	1,22	0,93	13,29	1,85	1,24	
10	0,94	11,84	1,27	1,23	0,94	12,29	1,80	1,23	
ZY5									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,92	23,52	3,11	1,14	0,92	22,07	2,80	1,13	
4	0,93	23,07	2,84	1,14	0,92	22,42	2,95	1,14	
6	0,93	24,63	3,18	1,16	0,93	23,42	2,92	1,14	
8	0,94	24,34	3,04	1,16	0,93	23,95	2,91	1,15	
10	0,94	24,62	3,04	1,17	0,94	24,57	2,98	1,16	
ZY4 RECAL									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,89	20,94	3,44	1,10	0,92	13,07	1,33	1,09	
4	0,92	14,70	4,47	1,09	0,92	13,43	2,51	1,08	
6	0,92	12,62	1,17	1,09	0,92	14,46	0,75	1,11	
8	0,92	12,64	0,85	1,08	0,92	13,51	1,03	1,10	
10	0,92	13,37	0,70	1,09	0,92	13,59	1,15	1,08	
ZY4 GOOD									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,98	22,64	2,66	1,11	0,98	22,00	2,38	1,11	
4	0,98	22,76	2,40	1,12	0,98	22,31	2,32	1,12	
6	0,99	22,87	2,41	1,12	0,99	22,64	2,47	1,12	
8	0,99	23,36	2,46	1,13	0,99	23,91	2,39	1,12	
10	0,99	24,47	2,45	1,14	0,99	23,71	2,39	1,13	

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

TABLA 3 ANEXO

Valores medios del ángulo de reposo dinámico, aeración e índice de cohesión para cada valor de velocidad y de cada tamaño de polvo de Metal G (extraídos de los datos de GranuDrum)

G080-0,18										
Sequence velocity					Reverse velocity					
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]
2	1,02	36,21	5,76	1,09	1,03	36,46	4,80	1,08		
4	1,03	36,87	4,85	1,08	1,03	36,42	4,37	1,08		
6	1,04	40,53	4,62	1,12	1,04	40,62	4,50	1,12		
8	1,04	42,22	5,54	1,14	1,03	42,15	5,07	1,13		
10	1,03	43,13	5,91	1,15	1,03	44,97	5,06	1,15		
G025- 0,71										
Sequence velocity					Reverse velocity					
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]
2	0,94	38,04	6,82	1,22	0,93	37,14	5,71	1,20		
4	0,94	37,11	4,03	1,20	0,94	37,92	3,92	1,20		
6	0,95	38,95	3,86	1,21	0,95	39,64	3,97	1,21		
8	0,95	39,98	3,80	1,20	0,95	39,91	3,86	1,20		
10	0,95	41,24	3,79	1,19	0,95	41,24	3,73	1,20		
G040-0,5										
Sequence velocity					Reverse velocity					
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]
2	1,00	36,67	6,59	1,15	1,02	37,70	6,83	1,16		
4	1,01	36,36	3,37	1,15	1,01	37,61	3,45	1,15		
6	1,02	37,52	3,21	1,15	1,02	37,80	3,19	1,15		
8	1,03	39,51	3,10	1,15	1,03	38,82	3,27	1,15		
10	1,03	40,82	3,18	1,14	1,03	40,92	3,21	1,15		
G050-0,353										
Sequence velocity					Reverse velocity					
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]
2	0,93	37,16	4,93	1,12	0,93	35,44	3,11	1,11		
4	0,94	37,75	2,98	1,12	0,94	37,17	2,91	1,12		
6	0,95	37,48	3,28	1,13	0,94	38,12	3,05	1,13		
8	0,95	39,38	3,17	1,14	0,95	38,68	3,38	1,13		
10	0,95	42,31	3,22	1,14	0,95	41,48	3,21	1,14		
G120-0,125										
Sequence velocity					Reverse velocity					
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]
2	0,88	37,25	5,64	1,10	0,88	36,37	4,97	1,09		
4	0,88	36,32	4,80	1,10	0,88	37,24	5,37	1,10		
6	0,88	42,92	7,35	1,17	0,88	44,27	6,27	1,17		
8	0,88	44,36	6,96	1,18	0,87	44,46	6,14	1,19		
10	0,87	44,39	7,10	1,20	0,87	42,39	7,02	1,20		
G012-1,7										
Sequence velocity					Reverse velocity					
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]
2	0,87	40,45	8,74	1,39	0,86	39,58	9,43	1,41		
4	0,87	39,51	7,73	1,39	0,87	40,07	7,43	1,37		
6	0,89	39,82	6,96	1,38	0,88	39,26	7,43	1,37		
8	0,89	41,04	7,24	1,38	0,89	40,95	7,62	1,37		
10	0,90	40,92	7,84	1,39	0,89	41,38	7,12	1,36		
G6014-1,4										
Sequence velocity					Reverse velocity					
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]
2	0,94	38,80	6,15	1,32	0,94	38,97	6,40	1,34		
4	0,96	38,65	5,69	1,31	0,95	38,59	5,70	1,31		
6	0,97	38,85	5,89	1,31	0,97	38,86	5,61	1,32		
8	0,98	39,70	5,44	1,30	0,97	38,94	5,26	1,31		
10	0,98	40,25	5,49	1,30	0,98	39,51	5,43	1,31		
G6016-1,18										
Sequence velocity					Reverse velocity					
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]
2	1,00	38,68	7,03	1,30	1,01	38,80	7,20	1,28		
4	1,01	37,37	4,99	1,28	1,01	38,65	4,77	1,29		
6	1,03	39,27	5,48	1,28	1,03	39,44	5,37	1,29		
8	1,03	38,88	5,38	1,28	1,03	40,31	5,40	1,28		
10	1,04	40,91	5,24	1,27	1,04	39,50	5,05	1,27		
G6018-1										
Sequence velocity					Reverse velocity					
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]
2	0,94	36,42	6,45	1,26	0,94	37,35	5,39	1,25		
4	0,95	36,13	4,45	1,25	0,95	37,02	4,44	1,25		
6	0,96	36,98	4,31	1,26	0,96	37,87	4,07	1,26		
8	0,97	37,56	4,28	1,26	0,97	37,42	4,26	1,25		
10	0,97	39,36	4,42	1,26	0,97	38,50	4,17	1,25		

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

TABLA 4 ANEXO

Valores medios del ángulo de reposo dinámico, aeración e índice de cohesión para cada valor de velocidad y de cada tamaño de polvo de metal S (extraídos de los datos de GranuDrum)

S110-0,3									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,96	27,05	1,89	1,05	0,96	26,97	1,91	1,05	
4	0,97	27,27	1,70	1,05	0,97	27,34	1,86	1,05	
6	0,98	28,34	1,91	1,05	0,97	28,33	1,91	1,05	
8	0,98	28,95	1,99	1,06	0,98	28,24	1,94	1,06	
10	0,98	29,61	1,92	1,06	0,98	29,61	1,98	1,06	
S170-0,5									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,93	27,50	1,96	1,05	0,93	28,25	1,91	1,06	
4	0,94	27,06	2,00	1,06	0,94	27,85	1,95	1,06	
6	0,95	29,51	1,94	1,06	0,95	28,87	2,05	1,06	
8	0,95	29,37	2,04	1,07	0,95	29,44	2,07	1,07	
10	0,95	29,98	2,00	1,07	0,95	30,04	1,98	1,06	
S230-0,6									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,96	28,29	2,20	1,09	0,96	28,29	2,26	1,09	
4	0,97	28,60	2,30	1,09	0,96	28,63	2,19	1,09	
6	0,97	29,65	2,28	1,09	0,97	29,64	2,22	1,09	
8	0,98	30,20	2,27	1,09	0,98	30,23	2,33	1,10	
10	0,98	30,86	2,24	1,10	0,98	30,87	2,19	1,09	
S280-0,71									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,92	29,04	2,37	1,10	0,92	28,80	2,44	1,11	
4	0,93	28,40	2,44	1,11	0,93	28,47	2,50	1,11	
6	0,94	30,20	2,35	1,11	0,93	30,18	2,53	1,12	
8	0,94	30,75	2,41	1,11	0,94	30,77	2,39	1,11	
10	0,94	31,38	2,50	1,11	0,94	31,36	2,63	1,11	
S330-0,85									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,95	29,07	2,41	1,11	0,95	29,07	2,53	1,10	
4	0,96	28,62	2,43	1,11	0,96	28,82	2,42	1,11	
6	0,96	29,69	2,43	1,11	0,96	29,83	2,44	1,11	
8	0,97	30,37	2,52	1,11	0,97	30,38	2,51	1,12	
10	0,97	31,01	2,60	1,12	0,97	31,04	2,57	1,12	
S390-1									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	1,02	30,32	3,06	1,17	1,02	30,29	3,00	1,18	
4	1,03	30,50	2,99	1,17	1,03	30,51	3,00	1,17	
6	1,04	31,58	3,05	1,17	1,04	31,48	3,03	1,17	
8	1,04	32,08	3,05	1,17	1,04	32,20	3,02	1,17	
10	1,05	32,85	3,19	1,18	1,05	32,71	3,13	1,17	
S550- 1,4									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,98	31,58	4,77	1,27	0,99	31,76	5,11	1,27	
4	1,00	31,84	5,03	1,28	1,00	31,96	5,19	1,26	
6	1,01	33,06	5,16	1,28	1,01	33,17	5,13	1,27	
8	1,02	33,49	5,37	1,29	1,02	32,94	5,04	1,28	
10	1,02	34,13	5,60	1,29	1,03	34,18	5,20	1,28	
S660-1,7									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,99	31,92	6,45	1,31	0,98	31,80	5,51	1,32	
4	1,00	33,85	5,58	1,32	1,00	32,49	5,73	1,32	
6	1,01	33,53	5,92	1,32	1,01	34,82	6,26	1,34	
8	1,02	34,21	6,13	1,32	1,02	34,56	6,05	1,33	
10	1,03	35,03	6,08	1,33	1,03	34,89	5,88	1,32	
S780-2									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,98	33,71	6,41	1,32	0,98	32,97	6,04	1,34	
4	0,99	33,33	5,99	1,33	0,99	34,07	6,02	1,31	
6	1,00	34,87	6,30	1,33	1,00	34,70	6,45	1,33	
8	1,01	34,31	6,24	1,32	1,01	34,59	5,92	1,34	
10	1,02	35,72	6,33	1,33	1,02	35,67	6,10	1,32	
S070-0,18									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,98	30,26	2,69	1,03	0,98	28,28	1,67	1,03	
4	0,98	29,95	3,87	1,04	0,98	27,76	1,85	1,03	
6	0,98	31,18	2,00	1,06	0,98	29,94	1,78	1,05	
8	0,98	31,43	1,77	1,06	0,98	31,53	1,81	1,07	
10	0,98	33,06	1,88	1,09	0,98	33,15	1,92	1,09	
S460-1,18									
Sequence velocity					Reverse velocity				
Speed [rpm]	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	Aeration	Angle [°]	Cohesive Inc	Roughness Index	
2	0,93	31,38	3,68	1,21	0,92	31,27	3,79	1,21	
4	0,93	30,69	3,76	1,20	0,93	31,42	3,82	1,21	
6	0,95	32,47	3,97	1,22	0,95	31,98	4,28	1,21	
8	0,95	32,41	4,02	1,21	0,95	32,99	4,08	1,22	
10	0,96	33,54	4,03	1,22	0,96	33,57	3,96	1,24	

Caracterización reométrica de polvos de uso industrial y de la respuesta de un reómetro de diseño propio

TABLA 8 ANEXO

Valores medios extraídos de la experimentación con el reómetro FT4 (BFE, SI, FRI, CBD, energía y masa) para el polvo de Microesferas de vidrio

SIZE (um)	AVERAGE OF					
	BFE, mJ	SI	FRI	SE, mJ/g	CBD, g/ml	Split Mass, g
0-20	585,04	1,18	1,96	6,10	0,82	131,72
0-50	1414,00	0,99	1,03	3,00	1,62	258,42
40-70	1587,02	0,97	1,09	2,89	1,50	239,55
70-110	1720,26	0,9824297	1,040229	3,720177	1,4385	230,16
100-200	1808,592	1,005836	1,0663655	3,161471	1,4445	223,05
200-300	1155,649	0,9982082	1,093977	2,766083	1,50125	240,2
300-400	1280,17	0,9719424	1,090542	2,9145	1,504625	240,74
400-600	1229,508	0,9828094	1,126347	2,760705	1,519687	243,15

ARCHIVOS ADJUNTOS AL TFG:

- **ANÁLISIS GRANULOMETRICO DE LAS MICROESFERAS DE VIDRIO**
- **ANÁLISIS GRANULOMETRICO DEL ZIRCONIO**
- **ANÁLISIS GRANULOMETRICO DE LOS METALES S**
- **ANÁLISIS GRANULOMETRICO DE LOS METALES G**

PLANIFICACION TEMPORAL

ACTIVIDAD	INICIO	DURACIÓN (días)	FIN
Asignación del TFG	04/03/2022		04/03/2022
Documentación			
Lectura de manuales de uso de máquinas y curso de seguridad	08/03/2022	10	18/03/2022
Lectura de manuales sobre simulación DEM	18/03/2022	8	25/03/2022
Ensayos			
Selección de polvos polvorientos	25/03/2022	3	29/03/2022
Ensayos GRANUDRUM	01/04/2022	13	29/04/2022
Ensayos Freeman FT4	02/05/2022	10	13/05/2022
Simulación y resultados			
Simulación DEM	2/05/2022	13	20/05/2022
Análisis de resultados	20/05/2022	14	03/06/2022
Redacción			
Redacción del TFG	21/04/2022	50	10/06/2022