

# Metalurgia & Materiais

## Construção e calibração de uma cela de sedimentação gravimétrica para a medição fotométrica da distribuição do tamanho de micropartículas

(Construction and calibration of a gravimetric sedimentation cell for the photometric measurement of microparticle size distribution)

### Resumen

El presente trabajo muestra la base teórica, el desarrollo, la implementación y los resultados alcanzados al emplearse una celda de sedimentación gravimétrica para la detección de la distribución de tamaño o diámetro medio de micropartículas

**Palabras-clave:** Sedimentación, medición, fotométrica, tamaño, micropartículas.

### Abstract

*This paper present the theoretical basis, development, implementation and results of from a gravimetric sedimentation cell for determination of size distribution and median diameter of microparticles.*

**Keywords:** Sedimentation, measurement, photometric, size, microparticles.

### 1.Introducción

La determinación de la distribución de tamaño de micro partículas es un problema que está adquiriendo cada vez una importancia mayor para la industria en general y la minería en particular, ya que impacta en las tecnologías de molienda, de separación de fase y en las tecnologías medioambientales, ya que en la práctica no existe en un determinado polvo, un tamaño o diámetro único de partícula, sino que

Gonzalo Salinas-Salas

*Universidad de Talca, Departamento  
de Tecnologías Industriales  
E-mail: gsalinas@utalca.cl*

Michael Stintz

*Technische Universität Dresden,  
Institut für Verfahrenstechnik und  
Umwelttechnik  
E-mail: michael.stintz@tu-dresden.de*

Benno Wessely

*Technische Universität Dresden,  
Institut für Verfahrenstechnik und  
Umwelttechnik  
E-mail: benno.wessely@tu-dresden.de*

un tamaño o diámetro que pretende representar un conjunto de partículas de dimensiones similares, lo que implica que para la misma medida de tamaño nominal, existe un porcentaje con un tamaño mayor y otro con uno menor al valor nominal. De ahí que este trabajo presenta el principio de funcionamiento, el desarrollo y la calibración de una celda de sedimentación gravimétrica cuyas principales características son su bajo costo y su precisión.

## 2. Materiales y métodos

Esta celda utiliza como método de separación de las partículas del fluido la sedimentación gravimétrica, lo que permite evaluar distribuciones de tamaño de partículas con diámetros medios mayores a 1  $\mu\text{m}$ . A su vez el sistema de detección de posición de las partículas y por ende su distribución de tamaño el método de extinción fotométrica a partir de un haz de luz visible (Láser).

El principio físico de la separación se basa en la sedimentación de las partículas generada por el campo gravitatorio, la que es posible modelarla asumiendo que es una partícula rígida, lisa de forma esférica, que se sumerge en un fluido viscoso del tipo newtoniano, considerando sólo los términos de cambio de cantidad de movimiento, peso de la partícula, fuerza de flotación y de arrastre viscoso. Esto da lugar a la ecuación [1], donde  $z$  representa la posición de la partícula en el sentido de la aceleración de gravedad (Bernhardt, 1990):

$$m_{\text{partícula}} \cdot \frac{d\bar{z}(t)}{dt} = \bar{W}_{\text{partícula}} - \bar{F}_{\text{flotación}} - \bar{F}_{\text{arrastre}} \quad [1]$$

Como todo movimiento de un sólido, en este caso una partícula esférica en un medio viscoso, que parte de un estado de reposo, se presenta una primera fase de movimiento, en que existe una desaceleración y por lo tanto la velocidad de la partícula es variable con respecto del tiempo y la posición, a medida que la partícula se sumerge en el fluido, tiende a un estado de equilibrio dinámico, donde el peso de la partícula es compensado por la acción de las fuerzas de flotación y arrastre, alcanzando la partícula una velocidad de sumergimiento constante a la que se le denomina velocidad terminal. El tiempo que dura esta etapa transiente es del orden de micro segundos para micro partículas, por lo que se puede desprestigiar este intervalo de tiempo (Schubert et al, 1990).

El problema de evaluar matemáticamente la solución de la ecuación [1], fue resuelto analíticamente por Stokes, para un régimen de escurrimiento laminar del fluido por sobre la esfera, con valores del número de Reynolds menores a 0,25. De manera que a partir de la ecuación [1], se puede obtener la velocidad de sumergimiento terminal de una solución para la ecuación [1], la que se denomina como velocidad de Stokes, la que adopta la forma de la ecuación [2] y que tiene como dirección el campo gravitatorio (Schubert et al, 1990).

$$v_{\text{st}} = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot x^2 \cdot g}{18 \cdot \mu} \quad [2]$$

Donde:

$v_{\text{st}}$ : Velocidad de Stokes;  $\rho_p$ : Densidad media de la partícula;  $\rho_f$ : Densidad media del fluido;  $g$ : Aceleración de gravedad;  $x$ : Diámetro medio de la partícula e  $\mu$ : Viscosidad dinámica del fluido

Respecto al sistema de detección de la posición de las partículas y de su tamaño, éste se basa en la Ley de Lambert-Beer, que indica que existe un rango de

concentración de material particulado, llamado zona de linealidad de la suspensión, donde se cumple la ecuación [3].

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -A_p \cdot C_v \cdot L \quad [3]$$

Donde:

$I$ : Intensidad lumínica captada por el sensor en presencia de material particulado en la suspensión.

$I_0$ : Intensidad lumínica captada por el sensor sin material particulado en la suspensión.

$K(x)$ : Función coeficiente de extinción.

$A_p$ : Área de la partícula específica de extinción.

$L$ : Ancho de la cubeta que contiene la suspensión.

Cabe indicar que la función coeficiente de extinción es característica para un determinado tipo de partícula y de fluido y se puede evaluar tanto a partir de cálculos utilizando la teoría Mie o experimentalmente.

El valor de tamaño o diámetro de la partículas se extrae a partir de la ecuación de velocidad de Stokes [2], al reemplazar las propiedades de las sustancias empleadas y el valor de la velocidad de sedimentación de las partículas.

## 3. Resultados y discusión

La celda de sedimentación fue construida mediante módulos de acero, los cuales permiten montar una fuente emisora de luz, en este caso un emisor láser, en una torre que lo fija a una altura determinada, la que se alinea mediante barras con la posición de la cubeta que contiene la suspensión y al sensor óptico que medirá el paso de luz a través de las micro partículas evaluándose así el cambio de la intensidad lumínica. Este cambio es registrado en forma de una tensión eléctrica continua, la que es medida en forma discreta cada 100 s, siendo transmitida a un PC, que registra

los datos obtenidos. La cubeta de medida fue montada en una torre central y se fijó a ésta mediante dos prensas, las que a su vez se deslizaban por las barras de alineamiento, éstas soportaban también el filtro de luz. Por su lado, la suspensión fue ingresada a la cubeta mediante bombeo. La Figura 1 muestra una fotografía del equipo.

En cuanto a los materiales que se utilizaron en la calibración normalizada (DIN Norme 66111, 1998), estas fueron partículas monomodales de Geltech S1501 de un diámetro nominal de 1,5  $\mu\text{m}$  y partículas bimodales de Monosphere CP5000 de un diámetro medio nominal de 5,0  $\mu\text{m}$ , ambos compuestos de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), con una densidad media del orden de 2.135  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Estas partículas fueron suspendidas en agua con un índice de acidez pH 9,2, a fin de asegurar la estabilidad de la suspensión, al evitar con ello la formación de flóculos.

La Figura 2 muestra fotografías obtenidas durante los ensayos a través de un microscopio electrónico Zeiss Gemini 942, donde se presenta la forma y el tamaño de las partículas de Geltech S1500 y de Monosphere CP5000 utilizadas en la calibración.

En cuanto a la distribución de tamaño de las partículas de referencia esto se realizó mediante un espectrómetro Láser Helos Fa. Sympatec, cuyos resultados se muestran en la Figura 3.

Los resultados alcanzados por el prototipo construido, en la medición de la distribución de tamaño de partícula, se ajustan a los valores nominales entregados por el fabricante del material de referencia y a los valores

suministrados por los métodos de control que se utilizaron durante el desarrollo de los ensayos. Estos resultados se presentan en la Figura 4.

## 4. Conclusiones

De los resultados alcanzados en el prototipo construido se pudo concluir que su aplicación para la evaluación de

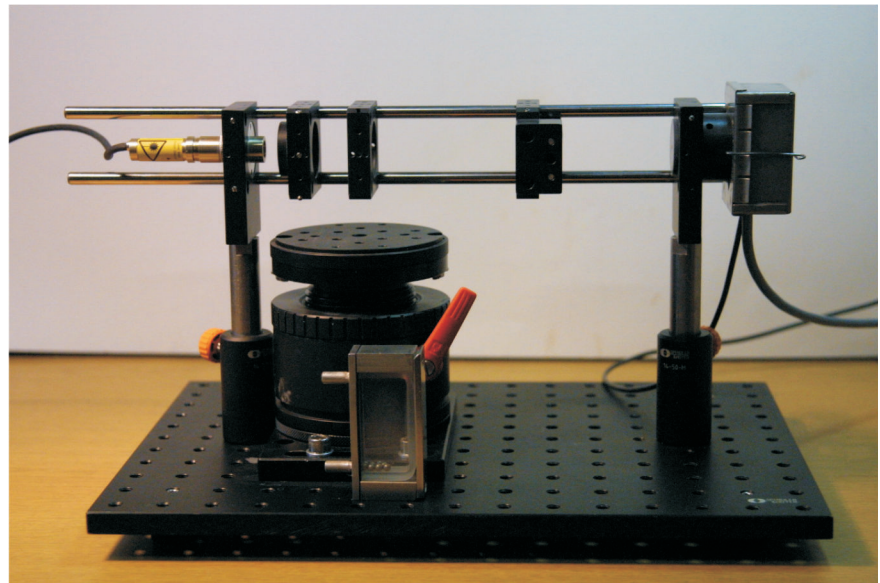


Figura 1 - Fotografía del equipo.

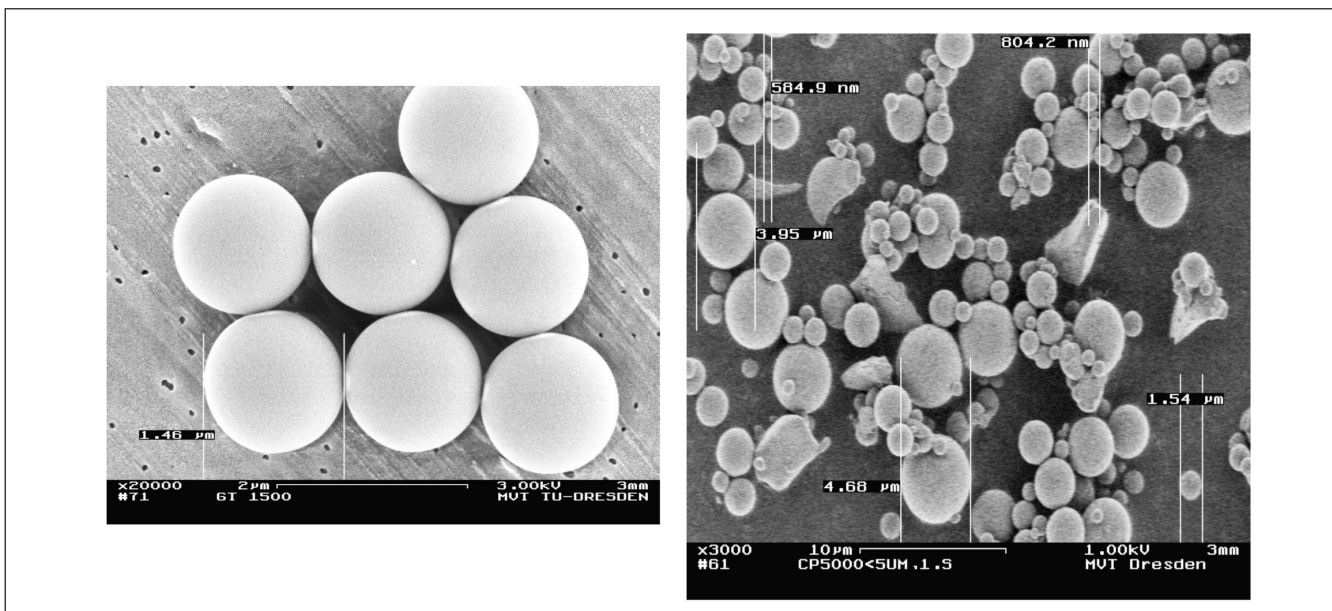


Figura 2 - Micro partículas de Geltech S1501 y Monosphere CP5000.

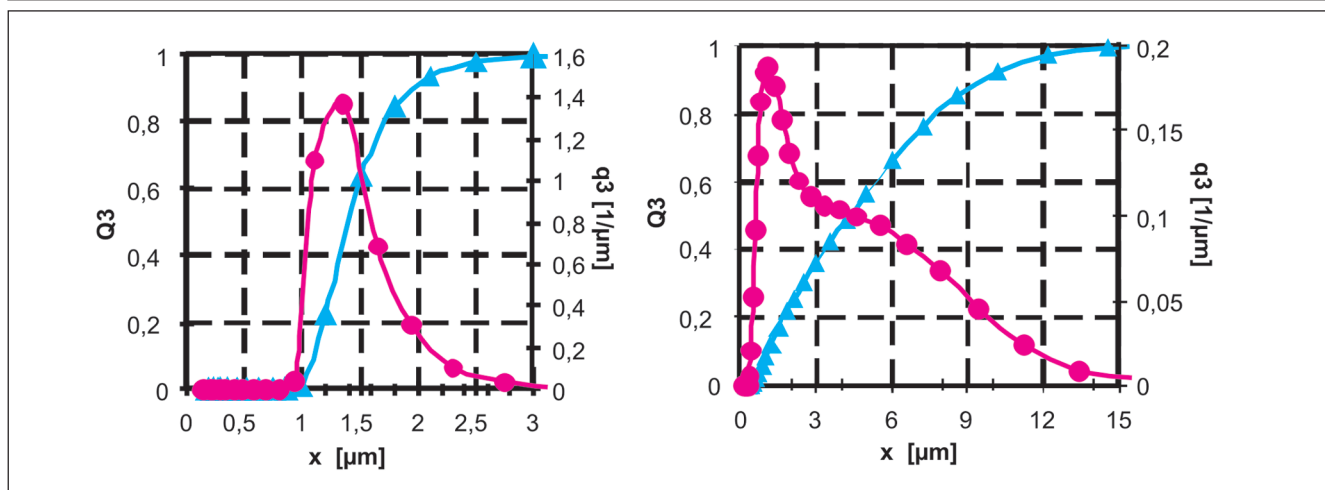


Figura 3 - Distribuição de tamanho de partículas de Geltech S1501 y Monosphere CP5000.

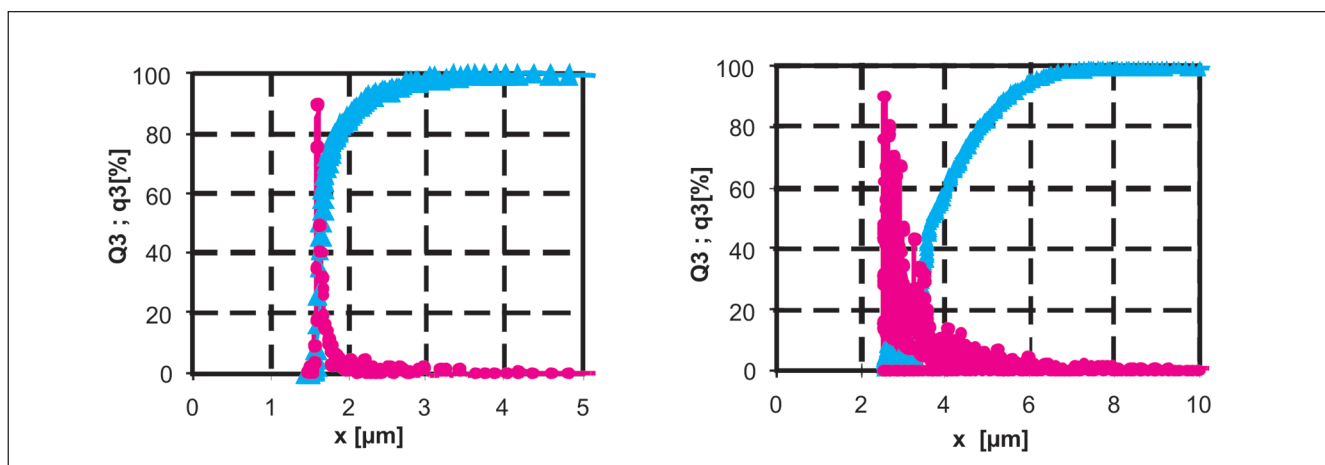


Figura 4 - Distribuição de tamanho de partículas de Geltech S1501 y Monosphere CP5000 medidos por la cela construida.

la distribución de tamaño de micro partículas fue no solo eficiente, sino que preciso. Además, presentó las ventajas de su simplicidad de construcción, bajo costo, relativa facilidad de operación y con niveles de precisión satisfactorios, ya que el error medio cometido con el sistema de partículas monomodales Geltech S1501 no superó el 5% del valor nominal, mientras que con el sistema de partículas bimodales Monosphere CP5000, reprodujo su modalidad y con un error medio del orden de un 10%.

En cuanto a las desventajas del equipo, éstas radican en la larga duración de cada ensayo, lo que incrementa las posibilidades que éste sufra alteraciones externas, tales como la formación de corrientes convectivas por efecto de calor que ingrese a la suspensión o simplemente el efecto de vibraciones mecánicas sobre la celda.

## 5. Referencias

- BERNHARDT, C. Granulometrie. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1. Auflage, 1990.400 p.
- NORMA DIN 66111 sobre Métodos de Sedimentación. DIN Norme 66111 Über Sedimentationsmethoden, 1998.8 p.
- SCHUBERT H., HEIDENREICH E., LIEPE F., Neeße T. Mechanische Verfahrenstechnik, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 3. Auflage, 1990. 407 p.

Artigo recebido em 22/05/2006 e aprovado em 22/04/2009.

**REM - Revista Escola de Minas**  
[www.rem.com.br](http://www.rem.com.br)