

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS

Gonzalo Salinas-Salas*
Fernando Espinosa-Fuentes**

Recibido: 03/12/2010

Aceptado: 25/05/2012

RESUMEN

El presente artículo de investigación presenta los elementos teóricos, la metodología, resultados y conclusiones de un trabajo desarrollado con el fin de determinar el comportamiento de la velocidad de sedimentación terminal de sistemas de partículas no coloidales de tamaño medio menor a 1.000 nm respecto de sistemas de partículas de tamaño mayor a este. Para esto se analiza el comportamiento del factor de reducción de velocidad terminal de sedimentación. Dada la extrema complejidad de la fenomenología del proceso de sedimentación de sistemas de partículas de diámetros medios menores a 1.000 nm, obliga a que este trabajo tenga un carácter experimental. Los resultados alcanzados mostraron que existe una diferencia entre el comportamiento de la velocidad de sedimentación de sistemas de partículas mayores a 1.000 nm, respecto de los sistemas de partículas cuyo tamaño es menor a este, lo que impacta en el valor que adopta el factor de corrección.

Palabras clave: velocidad de sedimentación, sistemas de partículas, factor de corrección, trabajo experimental

* Dr.-Ing. Universidad de Talca. Facultad de Ingeniería. Departamento de Tecnologías Industriales. Chile. E-mail: gsalinas@utalca.cl.

** Dr.-Ing. Universidad de Talca. Facultad de Ingeniería. Departamento de Tecnologías Industriales. E-mail: fespinos@utalca.cl.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE BEHAVIOUR OF THE SEDIMENTATION VELOCITY OF PARTICLES

ABSTRACT

In this research article we present the theoretical aspects, methodology, results and conclusions of a study developed to determine the behavior of the terminal settling velocity of noncolloidal particles systems of average sizes smaller than 1,000 nm in comparison to larger particles system. In order to do this, an analysis of the behavior of the reduction factor of terminal velocity of sedimentation was made. Due to the extreme complexity of the phenomenology of the sedimentation process of average particles systems in diameters smaller than 1,000 nm, an experimental work was required. The results indicate that there is a difference between the behavior of the velocity settling of particle systems greater than 1,000 nm, for systems of particles which size is smaller than this, what impacts the value that takes the correction factor.

Key words: velocity of sedimentation, systems of particles, correction factor, experimental work

INTRODUCCIÓN

La modelación físico-matemática que describe el proceso de sedimentación de partículas de un fluido se puede plantear a partir de un balance dinámico de fuerzas aplicado a una partícula única, a la cual se consideran solo los términos del cambio de cantidad de movimiento, la fuerza ejercida por el campo de fuerzas inerciales presente (peso), la fuerza que ejerce el fluido desplazado (empuje) y la fuerza de arrastre viscoso. Al inicio del movimiento es posible considerar que la partícula se encuentra suspendida en un estado de reposo, del cual inicia un movimiento acelerado, con el consecuente cambio de cantidad de movimiento, hasta alcanzar un equilibrio dinámico entre las fuerzas ya mencionadas, lo que conduce a una velocidad de sumergimiento constante, denominada velocidad terminal de sedimentación. El tiempo de la etapa transiente es del orden de microsegundos para partículas de orden de tamaño micrométrico, por lo que, comúnmente, para este tipo de partículas se desprecia el tiempo que requiere esta fase del movimiento [1-4].

La modelación clásica que permite determinar la velocidad terminal de sedimentación para una partícula no coloidal rígida, lisa de forma esférica, que sedimenta en un fluido viscoso del tipo newtoniano, fue planteada por Stokes en 1850, considerando que el régimen de escurrimiento laminar del fluido por sobre la partícula es laminar, con un rango de valores para el número de Reynolds menor a 0,25. De modo, que es posible determinar la velocidad terminal de sedimentación ideal, la que se denomina velocidad de Stokes (v_{Stokes}), la que se determina a partir de la ecuación (1), donde la dirección z es la línea de acción del campo inercial de fuerzas y por ende, de desplazamiento de la partícula.

$$v_{Stokes} = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot x^2 \cdot z \cdot g}{18 \cdot \mu} \quad (1)$$

Donde:

- z Factor de aceleración (-)
- ρ_p Densidad media de la partícula (kg/m^3)
- ρ_f Densidad media del fluido (kg/m^3)
- x Diámetro de la partícula (m)
- g Aceleración de gravedad (m/s^2)
- μ Viscosidad dinámica del fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

A su vez, el número de Reynolds (Re), para una partícula esférica se define mediante la ecuación (2):

$$Re = \frac{x \cdot \rho_f \cdot v_{Sedimentación}}{\mu} \quad (2)$$

Donde:

$v_{Sedimentación}$ Velocidad de sedimentación terminal efectiva (m/s)

Considerando el caso de la sedimentación de un conjunto o sistema de partículas, las cuales se trasladan simultáneamente a través del fluido, siguiendo la dirección del campo de fuerzas, desplazan un volumen equivalente de fluido, generando con ello un escurrimiento de este en el sentido opuesto al movimiento de las partículas y reduciendo con ello su velocidad terminal de sedimentación. La magnitud de esta reducción de velocidad depende directamente de la concentración volumétrica de partículas presentes en la suspensión, por lo que es conveniente definir la velocidad normalizada de sedimentación terminal (v_{sn}), la que se obtiene al dividir la velocidad de sedimentación terminal por la velocidad de Stokes aplicada a una partícula cuyo tamaño corresponde al promedio del sistema. De manera que la velocidad normalizada de sedimentación terminal queda definida por la ecuación (3).

$$v_{sn} = \frac{v_{Sedimentación}}{v_{Stokes}} \quad (3)$$

A su vez, esta definición de velocidad normalizada de sedimentación terminal efectiva puede extenderse a partir de la ecuación de continuidad de masa, al concepto de factor de corrección de la velocidad terminal de sedimentación de sistema de partículas (F_c), ya que sería posible estimar esta velocidad terminal a partir de la velocidad de Stokes de su partícula de tamaño medio. Luego, este factor de corrección (F_c) es idéntico a la velocidad normalizada de sedimentación de un sistema de partículas. Por lo que se emplea la ecuación (4), para determinarlo.

$$F_c = \frac{v_{\text{Sedimentación}}}{v_{\text{Stokes}}} \quad (4)$$

Si se consideran solo los efectos asociados al principio de conservación de masa y al proceso de sedimentación, modelados a través de la ecuación de continuidad, es posible inferir que la velocidad de sedimentación de un sistema de partículas depende de la concentración de partículas presentes en la suspensión, o sea, a través de su porosidad. Ergo, es posible plantear una primera forma del factor corrección, definido a través de la ecuación (5).

$$F_c = (1 - C) \quad (5)$$

Donde:

C Concentración volumétrica del sistema de partículas (-)

(1-C) Porosidad (-)

Empero, durante la sedimentación de un sistema de partículas se presentan fuerzas de interacción de origen hidrodinámico entre las distintas partículas que sedimentan, ya que estas poseen distinto tamaño y, por ende, desarrollan distintas velocidades. Estas fuerzas de carácter hidrodinámico se manifiestan en el arrastre y/o succión que las partículas de mayor diámetro realizan sobre las de menor diámetro y/o por el cambio de impulso de las partículas que desarrollan una mayor velocidad, tienen sobre otras de menor velocidad que desvían sus trayectorias y en la formación de puentes

hidráulicos entre partículas. Todo esto reduce la velocidad de sedimentación terminal efectiva del sistema de partículas [3-8].

Los trabajos desarrollados por Einstein [9] permitieron considerar estos efectos, lo que permitió generar una segunda modelación matemática que es más exacta, para evaluar el factor de corrección, la que es aplicable a suspensiones con bajas concentraciones de partículas. A esta forma del factor de corrección, se le denomina factor de corrección de Einstein, [2, 3]. Cuya forma matemática se presenta en la ecuación (6).

$$F_c = \frac{(1 - C^2)}{(1 + 2,5 \cdot C)} \quad (6)$$

No obstante lo ya indicado, a los efectos de la continuidad de masa y los de carácter hidrodinámico, se les deben superponer los importantísimos efectos que tienen las fuerzas superficiales de origen electro-químico que se establecen entre las partículas. Estas fuerzas son originadas por la carga electrostática superficial de las partículas y las características eléctricas del fluido, el que se comporta como un electrolito. Luego, la magnitud como la polaridad de la carga eléctrica superficial de las partículas y la concentración del ion hidrógeno libre o índice de acidez (pH) del electrolito pasan a jugar un rol en extremo relevante en el fenómeno de sedimentación. Estos efectos pueden cuantificarse a partir de la magnitud del potencial Zeta de la suspensión. Cabe reiterar la importancia de estos efectos en el caso de que las partículas que conforman la suspensión sean de tamaño sub-micrométrico, ya que la superficie de las partículas expuestas al electrolito, se incrementa considerablemente respecto del volumen, a medida que el tamaño de las partículas disminuye, generando que las fuerzas de origen electro-químico se vuelvan más relevantes, respecto de las fuerzas inerciales, las que están asociadas al volumen de las partículas. La modelación matemática de esta fenomenología es la teoría DLVO, desarrollada por Derjarin, Landau,

Verwey y Overbeck [3]. Como ya se ha indicado, el efecto de superposición de todos los fenómenos ya mencionados da lugar a una reducción aun mayor de la velocidad de sedimentación terminal efectiva de los sistemas de partículas. Por lo que Richardson y Zaki [10] desarrollaron una nueva forma del factor de corrección, a partir de una modelación de carácter semi-empírico, la que se denomina ley de la potencia, la que es representada matemáticamente mediante la ecuación (7).

$$Fc = (1 - C)^n \quad (7)$$

Donde:

n Exponente del factor de corrección (-)

A través de esta forma matemática, es posible considerar todos los efectos ya descritos y, actualmente, es la más aceptada en los ámbitos científicos y tecnológicos. Según Richardson y Zaki, el exponente del factor de corrección depende del valor que alcanza el número de Reynolds del escurrimiento del fluido por sobre las partículas, lo que se traduce en un conjunto de funciones de dicho exponente respecto del número de Reynolds, las que se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Exponentes de la función de corrección de Richardson y Zaki

| Número de Reynolds | Exponente n |
|---------------------|-------------------------|
| $Re \leq 0,2$ | 4,65 |
| $0,2 < Re < 1$ | $4,35 \cdot Re^{-0,03}$ |
| $1 < Re < 500$ | $4,45 \cdot Re^{-0,1}$ |
| $500 < Re < 300000$ | 2,39 |

Fuente: elaboración propia

Como se aprecia, el valor del exponente de la función de corrección de Richardson y Zaki para el caso de sistemas de partículas que sedimentan en un régimen de laminar, definido por valores del

número de Reynolds menores a 0,25 es $n = 4,65$, independiente de su tamaño. Cabe consignar que esta situación corresponde, generalmente, al caso de partículas de tamaño de orden micrométrico.

El objetivo del presente trabajo es determinar el comportamiento de la velocidad de sedimentación terminal de sistemas de partículas no coloidales de tamaño medio menor a 1.000 nm, respecto de sistemas de partículas cuyo tamaño es mayor a este valor. Con este objeto se procederá a analizar el comportamiento del factor de reducción de la velocidad terminal de sedimentación. Dada la extrema complejidad de la fenomenología del proceso de sedimentación de sistemas de partículas de diámetros medios menores a 1.000 nm, obligó a que este trabajo tenga un carácter netamente experimental.

1 METODOLOGÍA

El trabajo experimental se desarrolló en el Laboratorio de Partículas del Grupo de Trabajo de Técnicas de Procedimientos Mecánicos de la Universidad Técnica de Dresde, siguiendo la norma DIN 66111 sobre ensayos de sedimentación [11], a fin de disponer de datos completamente reproducibles. Estos ensayos fueron realizados empleando partículas calibradas de dióxido de silicio (SiO_2), que fueron suspendidas en agua tridestilada, desionizada y filtrada, a la que se le agregó hidróxido de potasio (KOH) con el fin de que la suspensión alcanzara un valor de índice de acidez (pH) del orden de 9,2, lo que se traduce en valores del potencial Zeta que varían entre los -50 y -60 mV. Esto permite asegurar la estabilidad de la suspensión, al impedir la formación de flóculos y aglomerados. La dispersión de las partículas en el fluido se realizó mediante agitación centrífuga de alta velocidad, la que fue seguida de la aplicación de ultrasonido.

Las partículas empleadas en el trabajo experimental son del tipo de estándares calibrados comerciales, producidas por la empresa Geltech Inc., las que corresponden químicamente a dióxido de

silicio amorfo (SiO_2); su densidad media es 2.135 kg/m^3 . Son rígidas, lisas y de forma esférica. Sus diámetros representativos corresponden al diámetro medio ($x_{50,3}$) y al diámetro de Sauter (x_{ST}), los que se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Diámetros representativos de los sistemas de partículas ensayadas

| Partícula | $x_{50,3}$ (nm) | x_{ST} (nm) |
|---------------|-----------------|---------------|
| Geltech S1501 | 1.550 | 1.560 |
| Geltech S1001 | 1.220 | 1.210 |
| Geltech S501 | 420 | 320 |
| Geltech S201 | 320 | 270 |

Fuente: elaboración propia

De los diagramas de distribución de tamaño de las partículas fue posible determinar que no existen fracciones de estas cuyo diámetro sea menor a 100 nm , así como la inexistencia de flóculos, lo que permite asegurar que los sistemas de partículas ensayados están dentro de rangos de tamaño restringidos y no presentaron características coloi-

dales, a pesar de emplearse partículas de tamaño sub-micrométrico.

Adicionalmente, se procedió a verificar su estado de las suspensiones preparadas mediante el análisis de imágenes aportadas por un microscopio electrónico Zeiss Gemini 942, las que mostraron la ausencia de partículas extrañas a la suspensión de prueba y la determinación mediante espectrometría láser con un equipo Helos Fa. Sympatec de la densidad de distribución de tamaño de partícula, las que mostraron que la dispersión del material particulado en el electrolito (agua e hidróxido de potasio) fue adecuada y confirmaron la ausencia de contaminación.

Los resultados de estas pruebas se muestran en las figuras 1 y 2, donde se presentan imágenes de los sistemas de partículas capturadas por un microscopio electrónico Zeiss Gemini 942.

A su vez, la figura 3 muestra las distribuciones acumulativas de tamaño de partícula, para los sistemas empleados en el trabajo experimental, lo que permite distinguir las fracciones de estas cuyo diámetro se encuentra bajo o sobre un cierto valor de tamaño. A su vez, permite distinguir la

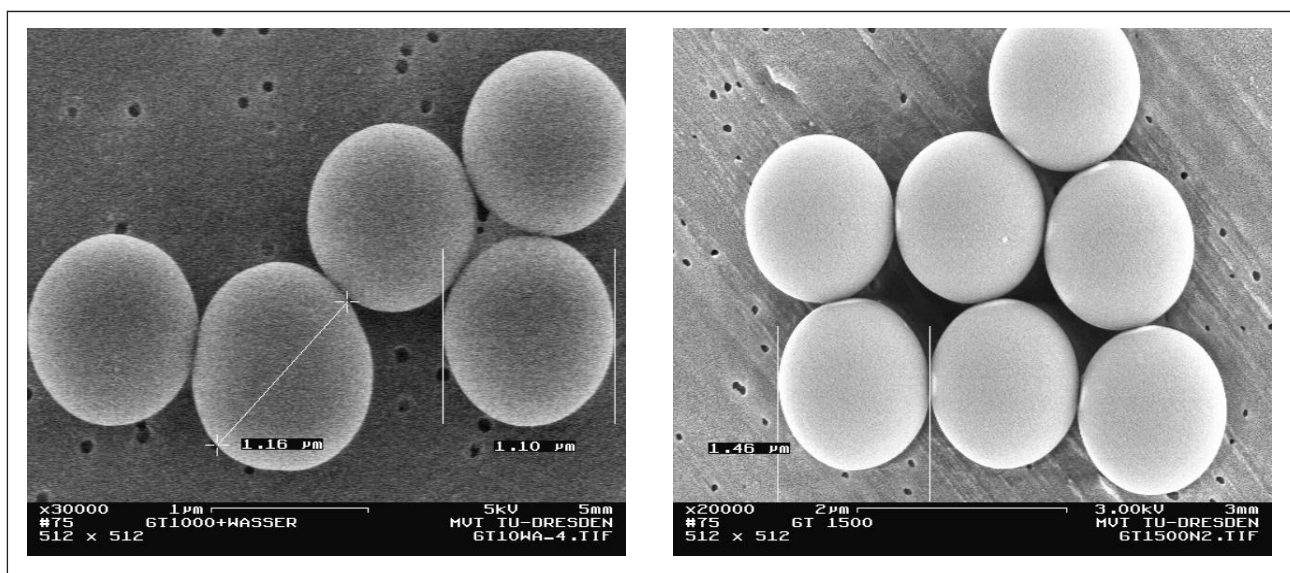


Figura 1: Imagen de las partículas de Geltech S1001 y Geltech S1501

Fuente: elaboración propia.

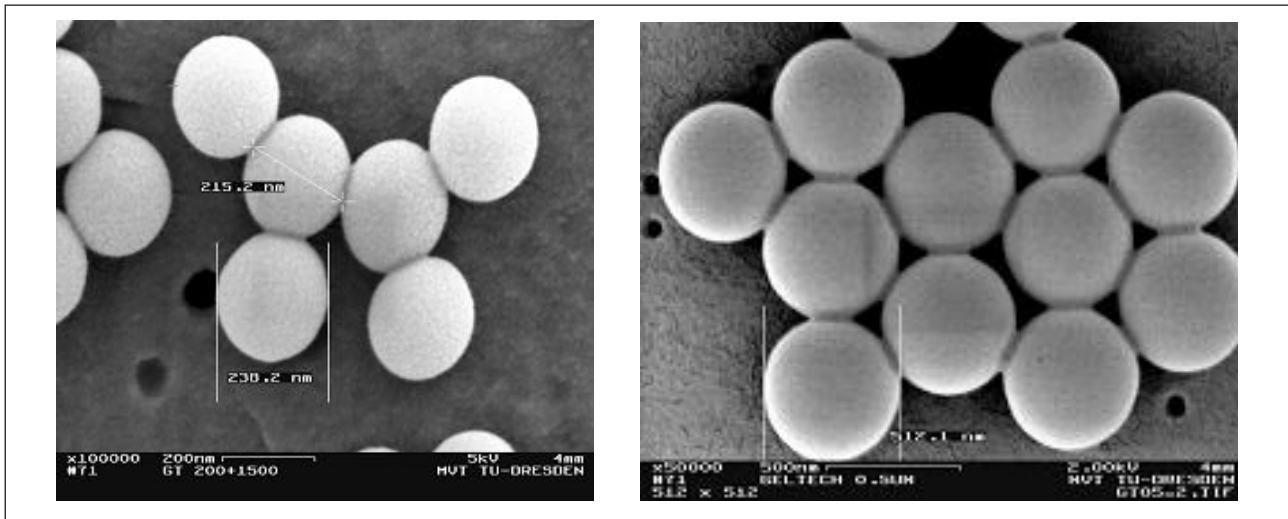


Figura 2: Imagen de las partículas de Geltech S201, Geltech S501

Fuente: elaboración propia.

inexistencia de sistemas de partículas extrañas en las suspensiones preparadas y la ausencia de flóculos.

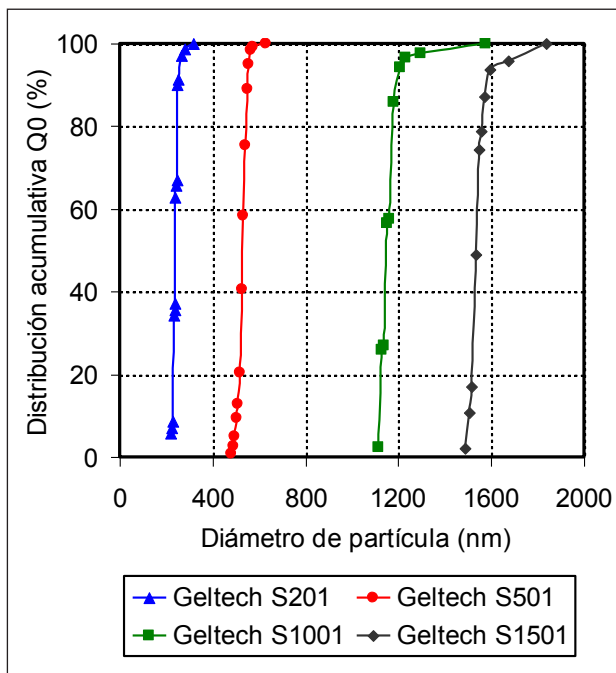


Figura 3. Densidad de distribución de tamaño acumulativo para los sistemas de partículas Geltech S201, Geltech S1001, Geltech S501 y Geltech S1501

Fuente: elaboración propia.

Por su lado, la figura 4 muestra las distribuciones incrementales de tamaño de partícula, para los sistemas empleados en el trabajo experimental, lo que permite distinguir las fracciones de partículas cuyo diámetro se encuentran dentro de cierto rango de tamaño, al mismo tiempo que confirma la inexistencia de sistemas de partículas que sean extrañas a las suspensiones preparadas, así como demuestra la ausencia de flóculos en estas.

La centrifuga analítica utilizada en los ensayos fue una máquina LUMiFuge 116, fabricada por L.U.M. GmbH., en la cual se emplearon cubetas de tipo rectangular de polystyrol de $3 \times 7 \text{ mm}^2$. En cuanto al análisis de las imágenes y la evaluación de la velocidad de sedimentación se realizó mediante el software LUM View v. 2.0, de la misma firma. Las especificaciones técnicas del equipo y del software se encuentran en detalle tratadas en [12].

En cuanto a los procedimientos de preparación de las muestras, forma de desarrollar las mediciones y el análisis de los datos entregados por la centrifuga analítica LUMiFuge 116, se analizan en detalle en [1, 12, 13].

Los valores que se obtienen en los ensayos en la centrifuga analítica corresponden a la velocidad de sedimentación efectiva del sistema de partículas analizado. Por lo que, para obtener los valores de la

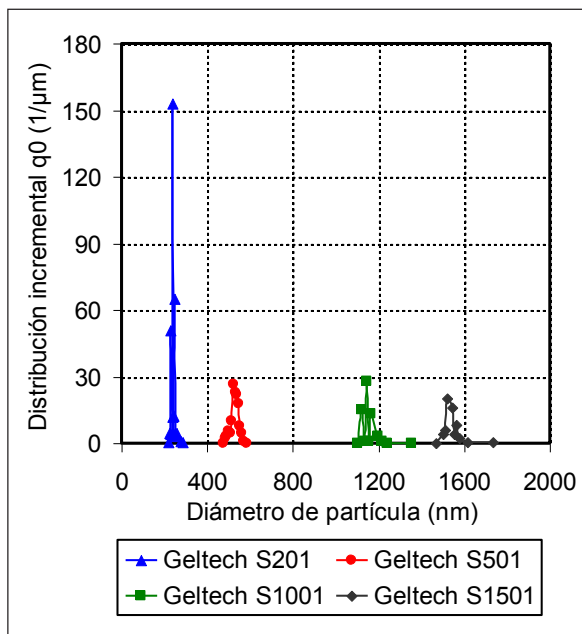


Figura 4. Densidad de distribución de tamaño incremental para los sistemas de partículas Geltech S201, Geltech S501, Geltech S1001 y Geltech S1501

Fuente: elaboración propia.

velocidad normalizada de sedimentación terminal, se emplean las ecuaciones (1) y (3) y los valores del factor de corrección de la velocidad de sedimentación de los sistemas de partículas ensayados, mediante las ecuaciones (1) y (4). Esto es posible de realizar ya que se debe considerar el hecho de que los valores del número de Reynolds para los escurrimientos estudiados, fue menor a 0,001.

Es conveniente destacar que la centrífuga analítica LUMiFuge 116 posee ocho (8) emplazamientos para cubetas; esto permitió que se realizaran ocho ensayos de manera simultánea, lo que permitió contar con una considerable cantidad de valores experimentales, tanto para cada sistema de partículas ensayadas así como para sus distintas concentraciones volumétricas.

2 RESULTADOS

Los ensayos realizados mostraron claramente la existencia del factor de corrección y el definido a través de la ley de la potencia, empleando los

exponentes definidos por Richardson y Zaki (Ec. 6), que son los que mejor muestran este fenómeno de reducción de la velocidad de sedimentación terminal (ver figura 5), donde se representan simultáneamente los distintos factores de corrección mencionados en la introducción, como los valores experimentales obtenidos de la velocidad normalizada de sedimentación terminal en los ensayos realizados. Todos estos valores se representan en un gráfico logarítmico ocupando la abscisa la porosidad de los sistemas de partículas ensayados, mientras que la ordenada es ocupada por el logaritmo del factor de corrección de Einstein, el de Richardson y Zaki y los valores de la velocidad normalizada de sedimentación terminal de los sistemas de partículas ensayados.

Cabe indicar que esto es posible, ya que las definiciones de la velocidad normalizada de sedimentación terminal, definida por la ecuación (3) y del factor de corrección definido por la ecuación (4), lo permiten, ya que ambas están en función de la velocidad de Stokes, la que es definida a través de la ecuación (1) y de la concentración volumétrica de los sistemas de partículas en una manera explícita y, por ende, de forma implícita de su porosidad.

Respecto del comportamiento de los factores de corrección de la velocidad terminal de un sistema de partículas, mostrado en la figura 5, es posible apreciar que este factor definido mediante la ley de la potencia, cuya forma matemática se representa en la ecuación 7 y empleando los exponentes de Richardson y Zaki, indicados en la tabla 1, predice de una mejor manera el valor que alcanzaría la velocidad de sedimentación terminal de un sistema de partículas, que la formulación propuesta por Einstein (F_c por Einstein), la que es definida a través de la ecuación 6.

Esto se debe a que la ley de la potencia es una formulación semi-empírica, por lo que permite integrar los efectos de las fuerzas electroquímicas a las fuerzas de origen puramente mecánicas e hidrodinámicas, lo que no es representado en la formulación de Einstein, que considera efectos

netamente hidrodinámicos. Esto es especialmente relevante en suspensiones elaboradas a partir de sistemas de partículas de orden de tamaño menores a 1.500 nm, ya que en estos sistemas se genera que la magnitud relativa de las fuerzas de tipo electroquímico se incrementa, respecto de la magnitud de las fuerzas mecánicas e hidrodinámicas, lo que se traduce en una reducción aun mayor de la velocidad de sedimentación terminal del sistema de partículas, que la estimada por Richardson y Zaki, la que se plantea en función del número de Reynolds de escurrimiento, respecto de la concentración volumétrica de partículas en la suspensión.

En relación con el comportamiento de los valores obtenidos por los sistemas de partículas ensayados, cabe considerar el hecho que a medida que el tamaño de las partículas micrométricas existentes en las suspensiones disminuye, da lugar a que exista una mayor cantidad de partículas en ésta a igualdad de concentración volumétrica. Lo anterior da lugar a varios efectos, entre los cuales destaca el hecho que tanto la masa como el volumen individual de cada partícula disminuye a medida que decrece su tamaño, en una mayor proporción de que lo hace su área superficial exterior, lo que conduce a que la magnitud de las fuerzas generadas por la acción de un campo mecánico de fuerzas, como lo serían el gravitatorio o el centrífugo, se reduzcan en una proporción similar sobre las partículas presentes en la suspensión, mientras que las fuerzas de origen electroquímico se vean incrementadas significativamente, ya que estas dependen de la magnitud de la superficie expuesta de partículas al fluido viscoso o electrolito. Un último elemento a considerar es la aparición de la fuerza difusión osmótica [15], que reduciría aún más la velocidad terminal de sedimentación por el flujo de masa desde la zona de mayor concentración, región con material que sedimenta, a la zona de menor concentración de este, o sea el fluido claro.

Una explicación más precisa del incremento de las fuerzas electroquímicas, dentro de un sis-

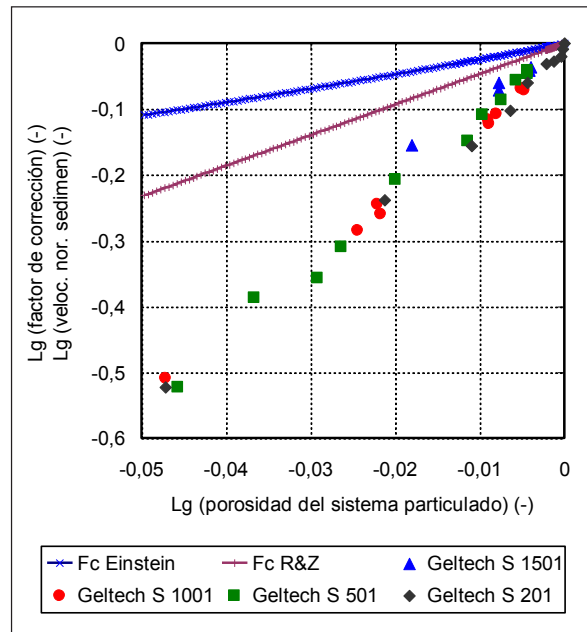


Figura 5. Comportamiento de los factores de corrección considerados y los valores experimentales obtenidos de la velocidad normalizada de sedimentación terminal, respecto de la porosidad de la suspensión

Fuente: elaboración propia.

tema de partículas que sedimenta, se encuentra en el hecho que al existir una mayor cantidad de partículas en la suspensión por efecto de su disminución de tamaño, que conduce a que el área superficial de las partículas en contacto con el fluido, el que se comporta como un electrolito, aumente significativamente. Esto conduce a que las fuerzas electroestáticas, las de van der Waals y las de atracción de Born, se manifiesten en mayor medida, de acuerdo con la magnitud del potencial Zeta, como lo indica la teoría DLVO [1-3, 13]. Esto conduce a un relevante aumento de las fuerzas de repulsión entre las partículas adyacentes y con ello la conformación de una red tridimensional dinámica de partículas, lo que reduce significativamente su velocidad de sedimentación individual, así como de todo el sistema de partículas.

Considerando lo anterior y el significativo incremento a igual concentración volumétrica

que conlleva la superficie expuesta al electrolito de las partículas de orden tamaño micrométrico y sub-micrométrico no coloidales, respecto del tamaño de las partículas que fueron analizadas por Richardson y Zaki en 1954, se puede inferir que podría existir una reducción de la velocidad de sedimentación terminal, aun mayor al representado a través del exponente de la función de corrección, determinada en ese momento.

Luego, este decremento de la velocidad de sedimentación terminal puede ser integrado al factor de corrección definido a través de la ley de la potencia mediante la proposición de nuevos valores para su exponente n . Estos nuevos valores para el exponente n se determinaron a partir de los valores experimentales obtenidos y que se representan en la figura 5, donde se procedió a ajustar estos valores experimentales, mediante curvas de tendencia lineales, lo que permitió determinar los valores que alcanza el exponente n y verificar la consistencia del ajuste a través de sus respectivos coeficientes de determinación múltiples (R^2).

La tabla 3 presenta los valores determinados para los exponentes que adopta el factor de corrección de la velocidad terminal de sedimentación definido mediante la ley de la potencia, a partir de los valores experimentales, así como sus respectivos coeficientes de determinación múltiples (R^2), para los sistemas de partículas ensayados.

Como se aprecia en la figura 5 y en la tabla 3, existe una directa relación entre el valor que adopta el exponente del factor de corrección a partir de la ley de la potencia, respecto del tamaño de las partículas que conforman el sistema de partículas que sedimenta. Esto se traduce en un incremento del valor de este exponente, a medida que disminuye el tamaño de promedio de las partículas, las que tienden a un valor cuasi constante en el orden de 11,3, para sistemas de partículas de tamaño menor o igual a 1.000 nm, diferenciándose de los sistemas compuestos por partículas de un tamaño mayor a este, como lo es en el caso del sistema compuesto por partículas de tamaño promedio de 1.500 nm,

donde el exponente alcanza un valor de 8,62.

Tabla 3. Exponentes experimentales y coeficientes de determinación obtenidos para la el factor de corrección de la velocidad terminal de sedimentación a partir de la aplicación la ley de la potencia.

| <i>Diámetro medio de partículas (nm)</i> | <i>Exponente n (-)</i> | <i>R²</i> |
|--|------------------------|----------------------|
| 320 | 11,34 | 0,976 |
| 420 | 11,32 | 0,991 |
| 1.220 | 11,24 | 0,988 |
| 1.550 | 8,62 | 0,991 |

Fuente: elaboración propia

Los valores presentados en la tabla 3, de los coeficientes de determinación múltiples permiten afirmar, a partir de los elevados valores que alcanzan estos coeficientes y la gran cantidad de ensayos realizados, tanto para las mismas concentraciones, como para las distintas concentraciones volumétricas presentadas, que existe un buen nivel de reproducibilidad, de precisión y de confianza en los valores experimentales, lo que es atribuible a que el trabajo experimental se realizó siguiendo estrictamente la norma DIN 66111, el uso de materiales de referencia calibrados y de diversos equipos de control.

3 CONCLUSIONES

Del trabajo desarrollado es posible concluir que la evaluación de la velocidad terminal de sedimentación de un sistema de partículas de orden de tamaño micrométrico y sub-micrométrico no coloidales realizadas a partir de la velocidad de Stokes, requiere del empleo de un factor de corrección, con el fin de predecirla correctamente.

Lo anterior tiene especial importancia en el diseño de equipos de medida y de sistemas y equipos de separación de material particulado en

suspensión, por lo que este factor se debe considerar tanto en el diseño, como en la operación de estos con el objetivo de incrementar su precisión, eficacia y eficiencia.

De las formas matemáticas para la evaluación del factor de corrección analizadas, el definido a partir de la ley de la potencia, empleando los exponentes de Richardson y Zaki, presenta la mayor precisión en la predicción de la velocidad terminal de sedimentación para un sistema de partículas cuyo tamaño es del orden de 1.000 nm. No obstante, se determinó una diferencia entre los valores del exponente del factor de corrección propuesto por Richardson y Zaki y los datos experimentales, por lo que en el caso analizado es conveniente y necesario emplear exponentes para este factor, mayores al convencionalmente empleado, ($n = 4,65$).

Por su lado, los valores del exponente de este factor no son constantes, sino que dependen del tamaño promedio de las partículas que conforman el sistema presente en una suspensión y, por ende, del número de Reynolds del escurrimiento del fluido por sobre ellas, lo que es concordante con los trabajos de Richardson y Zaki.

A este respecto, se determinó que dicho exponente se incrementa a medida que disminuye el tamaño de las partículas que sedimentan, tendiendo a estabilizarse para los sistemas de partículas de tamaño menor o igual a 1.000 nm. Luego, el emplear un valor del orden de 11,3 para este exponente del factor de corrección definido a partir de la ley de la potencia resulta adecuado, a la luz de los valores experimentales obtenidos para sistemas de partículas de tamaño menor o igual a 1.000 nm.

Lo anterior implica que la ley de la potencia da cuenta adecuadamente de la compleja fenomenología de la sedimentación de sistemas o conjuntos de partículas no coloidales de ese orden de tamaño.

4 AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al Grupo de Trabajo de Técnicas de Procedimientos

Mecánicos de la Universidad Técnica de Dresde, (Arbeitsgruppe für Mechanische Verfahrenstechnik an der Technische Universität Dresden), por las facilidades prestadas para el desarrollo del trabajo experimental.

REFERENCIAS

- [1] F. Babick, G. Salinas-Salas, T. Sobisch, D. Lerche; "Particle interactions in dispersions of micro and nanoparticles". PARTEC 2007 - Word Congress on Particle Technology, 2007, Nürnberg, Deutschland, (2007).
- [2] B. Hoffmann, K. Husemann; „Sinkgeschwindigkeit kugelförmiger Teilchen in Suspension bei laminar bzw. turbulenter Umströmung - Exakte Lösung der Bewegungsgleichung“. Chem. Ing. Techn. 75, 3, pp. 757-763, (2003).
- [3] H. Schubert, E. Heidenreich, F. Liepe, T. Neeße; Mechanische Verfahrenstechnik; Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1990, 2. Auflage.
- [4] M. Zogg; Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik; B. G. Teuner Stuttgart, 1993, 3. Auflage.
- [5] G. Batchelor; "Sedimentation in a dilute dispersion of spheres". Journal Fluid Mechanics 119, pp. 379-408. (1982).
- [6] C. Bernhardt; Granulometrie; Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1990, 1. Auflage.
- [7] R. Davis, A. Acrivos; "Sedimentation of noncolloided particles at low Reynolds numbers". Ann Rev. Fluid Mech. 17, pp. 91-118, (1985).
- [8] S. Ripperger, G. Salinas-Salas, M. Stintz, B. Bessely. "Untersuchungen der Sedimentation von nanoskaligen Partikeln im Zentrifugalfeld". Filtrieren & Separieren, 15, 2, pp. 220-238, (2002).
- [9] A. Einstein; "Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen". Annalen der Physik IV Folge19, pp. 289-306, (1906).
- [10] J. Richardson, W. Zaki; "Sedimentation and Fluidisation". Part I, Trans. Inst. Chem. Eng., pp. 35-53, (1954).
- [11] DIN Norme 66111 Über Sedimentationsmethoden, (1989).

- [12] www.lum-gmbh.com/pages/products/lumifuge/products_lumifuge_specifications.htm
- [13] A. Ettmayr, G. Bickert, W. Stahl, W.; "Zur Konzentrationsabhängigkeit des Sedimentationsvorgangs von Feinstpartikelsuspensionen in Zentrifugen". *F & S (Filtern und Separieren)* 15, 2, pp. 58-65 (2001).
- [14] F. Babick, M. Stintz, G. Salinas-Salas, G; "Sedimentation of Colloidal Particles, Experimental study on the influence of the ionic strength on the hindrance function". 12th IACIS International Conference on Surface and Colloid Science 2006 - Beijing, China, (2006).
- [15] M. Mason, W. Weaver; "The settling of small particles in a fluid". *Phys. Rev*, 2, pp. 412-426, (1924).