



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA**

**Análisis del comportamiento de la velocidad de
sedimentación en sistemas de micropartículas en
suspensiones acuosas**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROF. GUÍA: Gonzalo Salinas Salas

Rodrigo Mardones Domínguez

**CURICÓ - CHILE
2021**

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2022

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a todas y cada una de las personas que formaron parte de esta etapa universitaria, y de mi vida.

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre Marcela, gracias por ser la mujer que eres, por todo lo que me has dado y por siempre creer en mí; también a toda mi familia, que a pesar de todas las adversidades que la vida se empeña en darnos una y otra vez, siempre logramos salir adelante, juntos, unidos.

Agradecer también a todos mis profesores que me ayudaron a formarme como profesional, en especial al profesor Gonzalo Salinas por toda la sabiduría entregada, y también por la paciencia y apoyo durante toda la realización de esta memoria, así como también me gustaría agradecer a Alejandra Cabrera por toda la ayuda y orientación que me brindo, a mis colegas de carrera, por todas esas arduas jornadas de estudios, y por esos incansables términos de semestre, también por todo esos momentos que compartimos durante tantos años, donde todos crecimos juntos y aprendimos del otro.

Por último, agradecer a mis grandes amigos, ellos saben quiénes son, no existen las palabras para definir lo geniales que son, gracias por siempre levantarme, por estar ahí, cuando más necesite, gracias por aguantar mi forma de ser, gracias por ser como son, sin ustedes la vida sería muy jodida y aburrida.

*Dedicada a mi Nina y Celeste,
Ustedes me motivan día a día para seguir adelante .*

RESUMEN

Actualmente, la literatura técnica reporta una discrepancia entre diversos autores, los que estudiaron la influencia de la concentración en el comportamiento de velocidad de sedimentación de sistemas de micropartículas, respecto a la existencia de una sobre velocidad respecto de la velocidad teórica de sedimentación, la cual es calculada con el modelo desarrollado por Stokes, en una zona o región de concentración volumétrica de la suspensión, del orden del 1%, otros investigadores no dan cuenta de esta sobre velocidad. Dada esta situación y la existencia de datos experimentales obtenidos, por el Dr.-Ing. Gonzalo Salinas-Salas , los que tienen un carácter secundario, permitirán determinar la existencia o inexistencia de esta sobre velocidad.

Durante el desarrollo de la memoria, se presentan la modelación teórica de la velocidad de sedimentación, detallando, las interacciones entre partículas que se producen al variar la concentración volumétrica de micropartículas, lo que afectaría a la velocidad efectiva de sedimentación. Luego, se describen los sistemas de partículas utilizados, los cuales son del fabricante Geltech inc., además, se presentan los equipos de laboratorios utilizado para el procedimiento de la toma de resultado, así como también el metódico procedimiento llevado para la preparación de las suspensiones a analizar.

Luego, se presentan los datos experimentales, estos son analizados y validados por tres enfoques distintos, metodológicamente debido a su riguroso procedimiento para la toma de datos, físicamente mediante la comparación con la ecuación de continuidad, y finalmente por la comparación de diversos autores que presentan resultados similares a los obtenidos experimentalmente. Estos resultados experimentales, no dan cuenta del fenómeno de sobre velocidad como hacían mención parte de la literatura técnica.

Finalmente se analiza y critican los resultados de los autores que presentaron un aumento de la velocidad de sedimentación, además se elucubra sobre las posibles causas que llevaron a estos autores a presentar dicho aumento de velocidad, para determinar finalmente que, para una suspensión, con un sistema monomodal de partículas, estable, y correctamente dispersada no se presentaría ningún aumento de velocidad de sedimentación a medida que la concentración volumétrica de micropartículas aumenta, en particular en la zona del 1%.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	¡Error! Marcador no definido.
RESUMEN	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE GRÁFICOS	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
GLOSARIO DE TERMINOS	xii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA	3
1.4. OBJETIVOS.....	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
1.5. ALCANCES	4
1.6. METODOLOGÍA.....	4
1.6.1. Primera fase	4
1.6.2. Segunda fase.....	5
1.6.3. Tercera fase.....	6
1.6.4. Cuarta Fase	6
1.7. RESULTADOS ESPERADOS	7
1.8. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA	7

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS INDIVIDUALES DE UN CAMPO DE FUERZAS MECÁNICOS.....	10
2.2. EFECTOS DE LA CONCENTRACIÓN VOLUMÉTRICA EN LA SEDIMENTACIÓN.....	14
2.3. INTERACCIÓN HIDRODINÁMICA ENTRE PARTÍCULAS.....	17
2.3.1. Modelo de Brauer & Kriegel.....	18
2.4. TEORÍA DLVO.....	18
2.4.1. Fuerzas electroestáticas.....	19
2.4.2. Fuerzas de van der Waals.....	21
2.4.3. Repulsión de Born.....	22
2.5. FUNDAMENTOS ÓPTICOS EN LA EVALUACIÓN FOTOMÉTRICA, PARA SISTEMAS DE SEDIMENTACIÓN DE MICROPARTÍCULAS.....	23
2.5.1. Ley de Labert-Beer.....	23
2.6. REPRESENTACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE MICROPARTÍCULAS.....	24
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA.....	27
3.1. EQUIPOS DE LABORATORIOS.....	28
3.1.1. Centrifuga analítica Shimadzu SA-CP3.....	28
3.1.2. Balanza de laboratorio.....	30
3.1.3. Agitador magnético.....	30
3.1.4. Homogeneizador ULTRATurrax T50.....	30
3.1.5. Espectrómetro de difracción láser HELOS.....	31
3.1.6. Medidor de conductividad y medidor de pH.....	31
3.1.7. Microscopio electrónico de barrido.....	31
3.2. SISTEMA DE PARTÍCULAS GELTECH INC.....	32

3.2.1.	Geltech 201®.....	33
3.2.2.	Geltech 1001®.....	35
3.2.3.	Geltech 1501®.....	37
3.3.	CONSIDERACIONES GENERALES	39
3.4.	PREPARACIÓN DE SUSPENSIONES DE MICROPARTÍCULAS	39
CAPÍTULO 4. Presentación y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		41
4.1.	RESULTADOS EXPERIMENTALES	42
4.1.1.	Cálculo de la velocidad de Stokes	42
4.1.2.	Velocidad experimental y velocidad normalizada.....	43
	Geltech 201®.....	44
	Geltech 1001®.....	45
	Geltech 1501®.....	47
4.1.3.	Resumen resultados	49
4.2.	VALIDACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES	50
4.2.1.	Procedimiento experimental.....	50
4.2.2.	Principio de conservación de la masa.....	51
4.2.3.	Comparación con otros autores	52
4.3.	DISCUSIÓN ENTRE LOS RESULTADOS PRESENTADOS POR LA LITERATURA TECNICA.....	56
4.3.1.	Critica a resultados de autores en discusión	57
4.3.2.	Posibles causas de los resultados presentados por los autores en discusión	59
4.4.	¿EXISTE UNA SOBRE VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DE MICROPARTÍCULAS EN LA REGIÓN DEL 1% DE CONCENTRACIÓN VOLUMÉTRICA EN SUSPENSIONES ACUOSAS?	61
CONCLUSIONES.....		62
REFERENCIAS		67

ANEXOS	70
ANEXO 1. Datos tecnicos equipos de laboratorio utilizados.	70
1.1. Balanza SARTORIUS AC 210S	70
1.2. Homogeneizador ULTRATURRAX T50	70
1.3. Espectrómetro de difracción laser Helos.....	71
1.4. Microscopio electrónico ZEISS GEMINI.....	71
Anexo 2. Distribucion de tamaño de los sistemas de particulas.....	73
2.1. Tabla de distribución de tamaño para micropartículas Geltech 201®.	73
2.2. Tabla de distribución de tamaño para micropartículas Geltech 1001®.	74
2.3. Tabla de distribución de tamaño para micropartículas Geltech 1501®.	75
ANEXO 3. Desarrollo de cálculos	76
3.1. Velocidad de Stokes Geltech 201®	76
3.2. Velocidad de Stokes Geltech 1001®	77
3.3. Velocidad de Stokes Geltech 1501®	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Fuerzas mecánicas sobre una partícula que sedimenta, fuente: Scielo.org.....	11
Figura 2.2: Ilustración doble capa, fuente: Zeta-Meter, Inc.).....	19
Figura 2.3: Representación potencial zeta, fuente: Zeta-Meter, Inc.....	20
Figura 2.4: Curva de energía total de interacción, fuente: Zeta-Meter, Inc.	23
Figura 3.1 Shimadzu SA-CP3, fuente: Imágenes entregadas por Dr. Ing. Gonzalo Salinas	29
Figura 3.2 Imagen partículas Geltech 201® a través de microscopio Zeiss, fuente: Salinas Salas.....	34
Figura 3.3 Imagen partículas Geltech 1001 ® a través de microscopio Zeiss, fuente: Salinas Salas.....	36
Figura 3.4. Imagen partículas Geltech 1501 ® fuente: Salinas Salas.....	38

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1: Comportamiento de la velocidad normalizada de sedimentación en función de la concentración volumétrica según [5], [6], [7]	16
Grafico 2.2: Comportamiento de la velocidad normalizada de sedimentación en función de la concentración volumétrica según [1], [2], [3], [4].....	16
Grafico 3.1 Distribuciones de tamaño Geltech 201® a través de espectrómetro laser HELOS. Fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.....	33
Grafico 3.2 Distribuciones de tamaño Geltech 10001® a través de espectrómetro laser HELOS. Fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.....	35
Grafico 3.3 Distribuciones de tamaño Geltech 1501®. Fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados	37
Grafico 4.1 Velocidad normalizada vs concentración volumétrica Geltech 201® fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.....	45
Grafico 4.2 Velocidad normalizada vs concentración volumétrica Geltech 1001® fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.....	46
Grafico 4.3 Velocidad normalizada v/s concentración volumétrica Geltech 1501® fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.....	48
Grafico 4.4 Resumen resultados experimentales, fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.....	49
Grafico 4.5 Comparación ecuación de continuidad v/s datos experimentales, fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.....	51
Grafico 4.6 Comparación ecuación de Richardson y Zaki [7] v/s datos experimentales Salinas Salas [8], fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.	53
Grafico 4.7 Comparación modelo Steinour [15] v/s datos experimentales, fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.	54
Grafico 4.8 Comparación modelo Brauer y Kriegel [9] v/s datos experimentales, fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.....	55
Grafico 4.9 Resultados presentados por la literatura v/s datos experimentales, fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.....	56
Grafico 4.10 Resultados Bhatti [1], Bickert [2], Johne [3], Kaye y Boardman [4].	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Cálculo de la concentración de sólido y la velocidad de sedimentación en función de las distancias de los centros de partículas fuente: Brewer [17]	18
Tabla 3.1 Caracterización de partículas Geltech utilizando espectrómetro de difracción láser y microscopio electrónico de barrido, fuente: Salinas Salas 2007	32
Tabla 3.2 Datos físicos Geltech 201® fuente: Salinas Salas [8]	34
Tabla 3.3 Datos físicos Geltech 1001® fuente: Salinas Salas [8]	36
Tabla 3.4 Datos físicos Geltech 1501® fuente: Salinas Salas [8]	38
Tabla 4.1 Velocidad de Stokes de los sistemas de partículas, fuente : Elaboración propia a partir de datos entregados.	43
Tabla 4.2 Valor velocidad normalizada en función de la concentración Geltech 201® fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.....	44
Tabla 4.3 Valor velocidad normalizada en función de la concentración Geltech 1001® fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.....	46
Tabla 4.4 Valor velocidad normalizada en función de la concentración Geltech 1501® fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.....	47

GLOSARIO DE TERMINOS

Símbolo	Definición	Unidad
a_g	: Aceleración gravedad	m/s^2
a_z	: Aceleración centrífuga	m/s^2
A_H	: Constante de Hanmaker	J
A_v	: Área específica de extinción	l/m
c	: Concentración volumétrica de solido	-
d_p	: Diámetro de la partícula	m
e	: Constante de Euler	-
E	: Extinción	-
F_f	: Fuerza flotación	N
F_g	: Fuerza generada por el campo de fuerzas	N
F_t	: Inercia de fuerzas	N
F_e	: Fuerza empuje	N
g	: Aceleración de gravedad	m/s^2
I	: Intensidad de luz	cd
J_b	: Energía repulsión de Born	J
J_{el}	: Energía de repulsión electrostática	J
J_{vw}	: Energía de Van der Waals	J
k_B	: Constante de Boltzman	J/K
$K_{(x)}$: Coeficiente de extensión	-
L	: Ancho de la cubeta	m
m_p	: Masa de la partícula	kg
n_j	: Numero de partículas	-

q_3	: Distribución incremental	l/m
Q_3	: Distribución acumulativa	-
Re	: Numero de Reynolds	-
t	: Tiempo	s
T_l	: Transmisión	-
T	: Temperatura	K
v_{ef}	: Velocidad efectiva de sedimentación	m/s
v_n	: Velocidad normalizada	-
v_s	: Velocidad de Stokes	m/s
V_p	: Volumen de fluido desplazado por la partícula	m^3
y	: Posición radial	m
z	: Factor de aceleración	-
z_j	: Carga iónica	C
ε_0	: Campo eléctrico constante	N/C
ε_r	: Constante dieléctrica	-
μ_f	: Viscosidad dinámica del fluido	$Pa \cdot s$
ρ_f	: Densidad estándar del fluido	kg/m^3
ω	: Velocidad de rotación	rad/s
ζ	: Potencial Zeta	V

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Adoptar el cambio hacia un desarrollo industrial de forma sustentable, es cada día más importante, para la sociedad actual. Dentro de estos desafíos, la contaminación generada es un problema que se puede observar fácilmente y cotidiano, como lo son, la disminución de la calidad del aire, de la calidad del agua, y otros.

Muchos sistemas e instrumentos empleados en ingeniería de procesos, dentro de ellos destacan los equipos de descontaminación, basan su principio de funcionamiento en el proceso de sedimentación. Por ejemplo, las plantas de tratamientos de aguas residuales, sistemas de extracción de minerales, etc. Es debido a esto, que entre más información se tenga, sobre los procesos de sedimentación, más eficiente será el uso de estos sistemas e instrumentos.

Actualmente, la literatura técnica reporta una discrepancia entre diversos autores, los que estudiaron la influencia de la concentración en el comportamiento de velocidad de sedimentación de sistemas de micropartículas, esto según la existencia de una sobre velocidad respecto de la velocidad teórica de sedimentación, por sobre un 50% de la velocidad teórica de sedimentación, en una zona o región de concentración volumétrica de la suspensión, del orden del 1% como lo indican investigadores tales como: Bhatti [1], Bickert [2], Johne [3], Kaye y Boardman [4]. Otros investigadores no dan cuenta de esta sobre velocidad, entre ellos: Cheng y Schachman [5], McNown y Lin [6], Richardson y Zaki [7] y Steinour [15].

Dada esta situación y la existencia de datos experimentales obtenidos, por el Dr.-Ing. Gonzalo Salinas-Salas [8], los que tienen un carácter secundario, permitirían determinar la existencia o inexistencia de esta sobre velocidad y elucubrar las posibles razones, por las cuales los resultados experimentales desarrollados, por los autores, anteriormente mencionados, los llevaron a reportar este fenómeno de sobre velocidad.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema es determinar la existencia o inexistencia de una sobre velocidad de sedimentación de micropartículas, en la región del 1% de concentración volumétrica, la cual es reportada por cierta literatura técnica.

1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA

Se realizará el análisis de un conjunto de datos experimentales, abarcando tanto: los equipos de medición utilizados, la metodología experimental empleada y la caracterización de las suspensiones utilizadas, a fin de determinar, a partir de estos datos, la existencia o no del fenómeno de sobre velocidad, y una revisión de la literatura técnica, la que esta mencionada, sucintamente, en el punto 1.1.

Además, se elucubrará sobre las posibles causas o razones por las cuales, los procedimientos experimentales realizados por los investigadores, los llevaron a reportar este fenómeno.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Determinar si existe o no una sobre velocidad de sedimentación de micropartículas en la región del 1% de concentración volumétrica en suspensiones acuosas.

1.4.2. Objetivos específicos

- Presentar estado de arte en la descripción del fenómeno de sedimentación de sistemas de micropartículas en suspensiones acuosas y su medición.
- Describir la metodología experimental y equipos de la cual se obtuvieron los resultados experimentales empleados en el presente trabajo.
- Contrastar y analizar resultados obtenidos experimentalmente, respecto con los valores reportados por la literatura técnica.

Capítulo 1. Introducción

- Analizar y criticar los resultados presentados por los autores que reportan un aumento de velocidad y elucubrar sobre las posibles razones de ese comportamiento.

1.5. ALCANCES

Este trabajo no conlleva desarrollos experimentales, ya que se emplearán datos secundarios proporcionados por el Dr.-Ing. Salinas-Salas con su respectiva autorización cumpliendo con los estándares de ética científica, que para tales efectos se aplica. En particular, las suspensiones utilizadas para la obtención de los datos experimentales se elaboraron con micropartículas de dióxido de silicio (SiO_2), denominadas, comercialmente, como Geltech 1501®, 1001®, 201®, que se emplean, industrialmente, como calibres de medida. Estas son partículas de forma esférica, las que se suspendieron y dispersaron en agua tridestilada y desionizada, a la que se le agregó hidróxido de potasio (KOH), a fin de facilitar la estabilidad de la suspensión. Luego, este trabajo tiene un carácter, eminentemente, analítico a partir de los datos experimentales de carácter secundario y de los reportado por la literatura técnica, con el objeto de discutir y analizar estos resultados.

1.6. METODOLOGÍA

Se presenta la metodología a seguir para la realización de este proyecto, en ella se detalla las actividades, recursos que se utilizaran para el cumplimiento de cada objetivo específico planteados en el punto 1.4, además del tiempo que se empleara y de los resultados esperados de cada actividad.

1.6.1. Primera fase

Presentar estado de arte en la descripción del el fenómeno de sedimentación de sistemas de micropartículas en suspensiones acuosas y su medición.:

Actividades:	❖ Definición del problema
--------------	---------------------------

Capítulo 1. Introducción

	<ul style="list-style-type: none">❖ Búsqueda de información científico sobre los procesos de sedimentación de partículas en suspensiones acuosas
Recursos:	<ul style="list-style-type: none">❖ Científicos: Memorias, libros, artículos, papers❖ Tecnológicos: Notebook, Microsoft office®, Zoom®, páginas web, traductores.
Tiempo	<ul style="list-style-type: none">❖ 12 semanas
Resultados esperados	<ul style="list-style-type: none">❖ Definición clara del problema de ingeniería a resolver (objetivo general, objetivos específicos, alcances).❖ Definición de la metodología a seguir para resolver el problema.❖ Realización de un marco teórico pertinente y de calidad para el cumplimiento de los objetivos.

1.6.2. Segunda fase

Describir la metodología experimental y equipos de la cual se obtuvieron los resultados experimentales empleados en el presente trabajo.

Actividades:	<ul style="list-style-type: none">❖ Descripción de los equipos utilizados❖ Definición del sistema de partículas❖ Descripción de la metodología para la toma de muestras
Recursos:	<ul style="list-style-type: none">❖ Científicos: Memorias, libros, artículos, papers❖ Tecnológicos: Notebook, Microsoft office®, Zoom®, páginas web, traductores.
Tiempo	<ul style="list-style-type: none">❖ 12 semanas
Resultados esperados	<ul style="list-style-type: none">❖ Conocer de forma clara los instrumentos utilizados para la obtención de resultados utilizados en la memoria❖ Definir los sistemas de partículas utilizados, y sus propiedades físicas❖ Exponer la validez en los pasos para preparar las suspensiones de micropartículas con agua desionizada .

Capítulo 1. Introducción

1.6.3. Tercera fase

Contrastar resultados obtenido experimentalmente con los valores reportados por la literatura técnica.

Actividades:	<ul style="list-style-type: none">❖ presentación de resultados indicados por la literatura técnica, como los obtenidos por el Dr.-Ing. G. Salinas Salas.❖ Contrastar resultados presentados.
Recursos:	<ul style="list-style-type: none">❖ Científicos: Memorias, libros, artículos, papers❖ Tecnológicos: Notebook, Microsoft office®, Zoom®, páginas web, traductores.
Tiempo	<ul style="list-style-type: none">❖ 8 semanas
Resultados esperados	<ul style="list-style-type: none">❖ Mostrar los efectos de la concentración volumétrica en la velocidad de sedimentación presentado por los diversos autores❖ Evidenciar la discrepancia entre los autores sobre el fenómeno de sobre velocidad de sedimentación cuando la concentración es del orden del 1%

1.6.4. Cuarta Fase

Analizar y criticar los resultados obtenidos, respecto de los reportados por la literatura técnica.

Actividades:	<ul style="list-style-type: none">❖ Análisis de los resultados obtenidos❖ Critica de los resultados presentados por los diversos autores de la literatura técnica❖ Conclusiones de la memoria❖ Revisión informe de memoria
Recursos:	<ul style="list-style-type: none">❖ Tecnológicos: Notebook, Microsoft office®, Zoom ®, páginas web, traductores.
Tiempo	<ul style="list-style-type: none">❖ 10 semanas

Resultados esperados	<ul style="list-style-type: none">❖ Elucubrar sobre las posibles causas que llevaron a los autores a obtener los resultados presentados.❖ Definir si existe o no la sobre velocidad presentada por ciertos autores cuando la concentración volumétrica es del orden de 1%.❖ Descripciones de las conclusiones obtenidas durante la realización de la memoria❖ Realizar correcciones finales del informe y de formato, preparación presentación final.
----------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

1.7. RESULTADOS ESPERADOS

Determinar la existencia o inexistencia de la sobre velocidad en la zona de concentración volumétrica del orden del 1%, a partir de los datos experimentales disponibles. Lo que permitiría elucubrar sobre las razones por las cuales fue reportado ese comportamiento por diversos autores.

1.8. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

A continuación, se dará por terminado el capítulo 1 de esta memoria, el cual funciona como presentación de esta y como introducción a la problemática de ingeniería que se presenta en el punto 1.2, se definió tanto el objetivo general como los objetivos específicos de la memoria, los alcances, la metodología a seguir junto con los recursos que se utilizaran y, por último, los resultados esperados a la finalización de esta memoria.

Luego se continuará con el capítulo 2 de la memoria, este capítulo contempla la recopilación de la información relevante sobre el estado de arte que describe el proceso de sedimentación y los principios físicos en la que se sostiene, de que forma el cambio en la concentración volumétrica de la suspensión podría provocar efectos tanto hidrodinámicos como electroquímicos, los cuales afectarían el valor de la velocidad de sedimentación, además se detallan los principios ópticos que utilizan los instrumentos de laboratorio para calcular esta velocidad de sedimentación.

Capítulo 1. Introducción

En el tercer capítulo se presentarán los equipos de laboratorio utilizados por el Dr.-Ing. Salinas-Salas para la medición de las muestras, luego se detallarán los sistemas de partículas que se ocuparon, como también los procedimientos que se siguieron para la preparación de las suspensiones a medir, así como el procedimiento para la toma de datos.

Durante el 4to capítulo se expondrán los resultados otorgados por el Dr.-Ing. Salinas-Salas, además de los resultados propuestos por la literatura técnica, esto con el fin de contrastarlos unos con otros para evidenciar la discrepancia que existe entre los autores sobre el fenómeno de sobre velocidad cuando la concentración volumétrica es del orden del 1%, además se analizaran y criticaran esos resultados con el fin de elucubrar sobre las posibles razones que llevaron a los distintos autores a reportar dichos resultados.

Por el ultimo esta memoria finalizra con las conclusiones que se obtuvieron durante toda la realización de la presente memoria. Al final del documento estar a la bibliografía ocupada para el desarrollo de la memoria, como también, los anexos en los cuales se encontrará información adicional que sirvió para la realización del estudio.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Este capítulo contempla la recopilación de la información relevante sobre el estado de arte que describe el proceso de sedimentación y los principios físicos en la que se sostiene.

La sedimentación de partículas se define como el desplazamiento de partículas en un fluido, desde un cierto nivel de energía potencial, a un nivel de energía potencial menor, este fenómeno es producido por la acción de un campo de fuerzas sobre las partículas, ya sea un campo de fuerzas gravitatorio o centrifugo, sobre un sistema de partículas (fase discontinua), presentes en una suspensión, donde la densidad de las partículas es mayor a la del fluido (fase continua).

2.1. SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS INDIVIDUALES DE UN CAMPO DE FUERZAS MECÁNICOS

La sedimentación es el proceso en el cual, ocurre un movimiento de partículas inicialmente en reposo, debido al efecto de un campo de aceleración gravitatoria o fuerzas centrifuga sobre estas, las que se encuentran suspendidas en agua en el interior de un contenedor. Las partículas se desplazan hacia un nivel mínimo de energía, que corresponde a la parte inferior del contenedor de suspensión.

Este movimiento depende de las propiedades de la suspensión. Parámetros importantes para caracterizar este proceso son: tipo del fluido (fase continua), la viscosidad, densidad y valor del índice de acidez (pH) de éste, la densidad del material de las partículas, la morfología y forma de estas, la concentración de la fase discontinua, las fuerzas de interacción que se presentan entre las partículas, así como las condiciones de escurrimiento y de carácter termodinámico.

El modelo clásico físico representativo de este fenómeno, a partir de un análisis que considera solo fuerzas mecánicas, conduce a la denominada velocidad de *Stokes*. Esta representa un modelo simple, el cual describe el equilibrio de fuerzas sobre una partícula rígida y esférica, que comienza a descender a través de un fluido newtoniano en condiciones de escurrimiento estacionario, se puede representar en el diagrama de cuerpo libre mostrado en la figura 2.1.

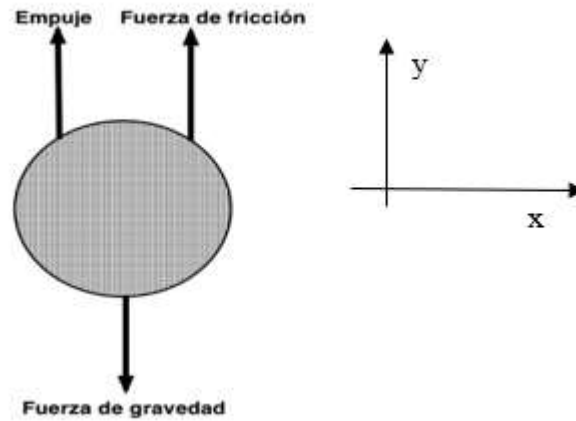


Figura 2.1: Fuerzas mecánicas sobre una partícula que sedimenta, fuente: Scielo.org

Si se realiza el equilibrio de fuerzas en el eje Y, se obtiene, considerando que todas las fuerzas son concurrentes en la misma línea de sentido y dirección, permite, plantear en términos de modulo la ecuación 2.1 que representa el equilibrio mecánico de fuerzas sobre la partícula:

$$-Ft = Fe + Ff - Fg \quad (2.1)$$

Dónde, los distintos términos que componen la ecuación 2.1 corresponden a la inercia (Ft), al impulso engendrado por el campo de fuerzas (Fg), al empuje efectuado por el fluido contra la partícula (Fe), la fuerza de roce viscoso efectuado por el fluido en contra de la partícula por efecto de su movimiento y se dirige en sentido contrario a este (Ff), el sistema de ecuaciones compuesto por las ecuaciones 2.2, 2.3, 2.5, 2.6 y 2.7, permiten la evaluación matemática de la ecuación 2.1:

$$Ft = m_p \cdot \frac{d^2y(t)}{dt^2} \quad (2.2)$$

Dónde:

m_p : Masa de partícula.

t : Tiempo

Capítulo 2. Marco teórico

$$Fg = m_p \cdot z \cdot g \quad (2.3)$$

Dónde:

g : Aceleración de gravedad estándar.

z : Factor de aceleración.

A su vez, el factor de aceleración se define como:

$$z = \frac{|\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{y})|}{|\vec{g}|} = \frac{a_z}{a_g} \quad (2.4)$$

Dónde:

ω : Velocidad de rotación.

y : Posición radial, en este caso de una partícula.

a_z : Aceleración centrífuga

a_g : Aceleración de gravedad estándar.

$$Fe = V_p \cdot \rho_f \cdot z \cdot g \quad (2.5)$$

Dónde:

V_p : Volumen de fluido desplazado por la partícula.

ρ_f : Densidad estándar del fluido.

$$Ff = 3\pi \cdot d_p \cdot \mu_f \cdot \frac{dy(t)}{dt} \quad (2.6)$$

Dónde:

d_p : Diámetro de la partícula.

μ_f : Viscosidad dinámica del fluido.

Capítulo 2. Marco teórico

Reemplazando en la ecuación 2.1 y, haciendo los arreglos y reemplazos pertinentes se obtiene la ecuación 2.7:

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + \frac{3\pi \cdot d_p \cdot \mu_f}{m_p} \cdot \frac{dy(t)}{dt} - \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} \cdot z \cdot g = 0 \quad (2.7)$$

La solución de esta ecuación permite plantear la ecuación 2.8, que permite determinar la posición de la partícula respecto del tiempo $y(t)$:

$$y(t) = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot d_p^2 \cdot z \cdot g}{18\mu_f} \left(t + \frac{d_p^2 \cdot \rho_p}{18\mu_f} e^{-\frac{18\mu_f \cdot t}{d_p^2 \cdot \rho_p}} \right) + \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot d_p^2 \cdot z \cdot g}{18\mu_f} \left(\frac{d_p^2 \cdot \rho_p}{18\mu_f} \right) \quad (2.8)$$

Derivando la expresión anterior 2.8 se obtiene la función para la velocidad, que corresponde a la ecuación 2.9:

$$v(t) = \frac{dy(t)}{dt} = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot d_p^2 \cdot z \cdot g}{18\mu_f} \left(1 - \frac{d_p^2 \cdot \rho_p}{18\mu_f} e^{-\frac{18\mu_f \cdot t}{d_p^2 \cdot \rho_p}} \right) \quad (2.9)$$

Se puede establecer, teóricamente, que la velocidad de sedimentación estacionaria (v_s) se obtiene, cuando el tiempo tiende al infinito, lo que da lugar a un equilibrio dinámico de las fuerzas concurrentes, lo que se traduce en una velocidad cuasi constante, la que se puede evaluar a través de la ecuación 2.10:

$$v_s = \frac{dy(\infty)}{dt} = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot d_p^2 \cdot z \cdot g}{18\mu_f} \quad (2.10)$$

En el caso de sedimentación de sistemas de micropartículas, cuyo orden de tamaño es menor a 10 μm , sometido a un campo de aceleración gravitatorio, que se sumerge en agua, la literatura técnica indica que se alcanza una velocidad de sedimentación constante a pocos microsegundos, por lo que es aceptable, analíticamente, considerar que la tasa de sedimentación es estacionaria.

Esta consideración no es de carácter general, ya que depende, fundamentalmente, del tipo de partículas, características, del tipo de fluidos y sus propiedades, por lo que se le debe analizar caso a caso.

Cabe indicar que los escurrimientos que se generan en este tipo de sedimentación, dado el pequeño tamaño de las partículas y las propiedades del fluido, dan lugar a escurrimientos laminares ($Re < 0,25$), lo que se confirma al aplicar los datos alcanzados de velocidad terminal presentados en el anexo 1. El número de Reynolds es un parámetro adimensional, que define la forma que adoptan las líneas de corriente del fluido cuando escurren por sobre la partícula. Lo que se evalúa empleando la ecuación 2.11.

$$Re = \frac{v_s \cdot d_p \cdot \rho_f}{\mu_f} \quad (2.11)$$

2.2. EFECTOS DE LA CONCENTRACIÓN VOLUMÉTRICA EN LA SEDIMENTACIÓN

Si se aumenta la concentración de la fase discontinua de una suspensión, la suspensión sufrirá una serie de efectos tales como:

- Cambio en la densidad media de la suspensión.
- Cambio de la viscosidad media de la suspensión.
- Cambio de velocidad de sedimentación de la fase discontinua.

Estos cambios se producen debido a las interacciones generadas entre las partículas que conforman la fase discontinua, con el fluido que constituye la fase continua, el que se comporta para el caso del agua como un dieléctrico, generando de esta manera, fuerzas electroquímicas, entre otras, que normalmente modifican sensiblemente la velocidad de sedimentación. Si este aumento de la fase discontinua no es acompañado por cambios relevantes del comportamiento dieléctrico de la fase continua, da lugar a que el aumento de la concentración de material particulado reduzca, la velocidad de sedimentación efectiva v_{se} .

Capítulo 2. Marco teórico

Algunos de los efectos relevantes provocados por un aumento de la concentración de la fase discontinua, es:

- Impactos entre partículas que sedimentan.
- Incremento de las fuerzas electroquímicas entre las partículas
- Efectos hidrodinámicos asociados al escurrimiento de las partículas

Como se mencionó, la velocidad de sedimentación estacionaria se verá afectada por el aumento de la concentración del material particulado presente en la suspensión. Por lo que diversos autores consideran los efectos de este fenómeno sobre la velocidad terminal de sedimentación, de dos formas diferentes. Los primeros consideran, que se produce una reducción de esta velocidad a medida que se incrementa la concentración de la fase discontinua. Los segundos consideran que existe una etapa inicial de crecimiento de la velocidad de sedimentación en torno a una concentración volumétrica de material particulado presente en la suspensión del orden del 1%, para luego comenzar a decaer esta velocidad progresivamente a medida que aumenta la concentración de la fase continua.

Ejemplos del primer grupo de autores son: Cheng y Schachman [5], McNown y Lin [6], Richardson y Zaki [7], cuyos resultados se aprecian en el gráfico 2.1. Para el segundo grupo de autores, se pueden citar a: Bhatti [1], Bickert [2], Johnne [3], Kaye y Boardman [4], cuyos resultados publicados se muestran en el gráfico 2.2.

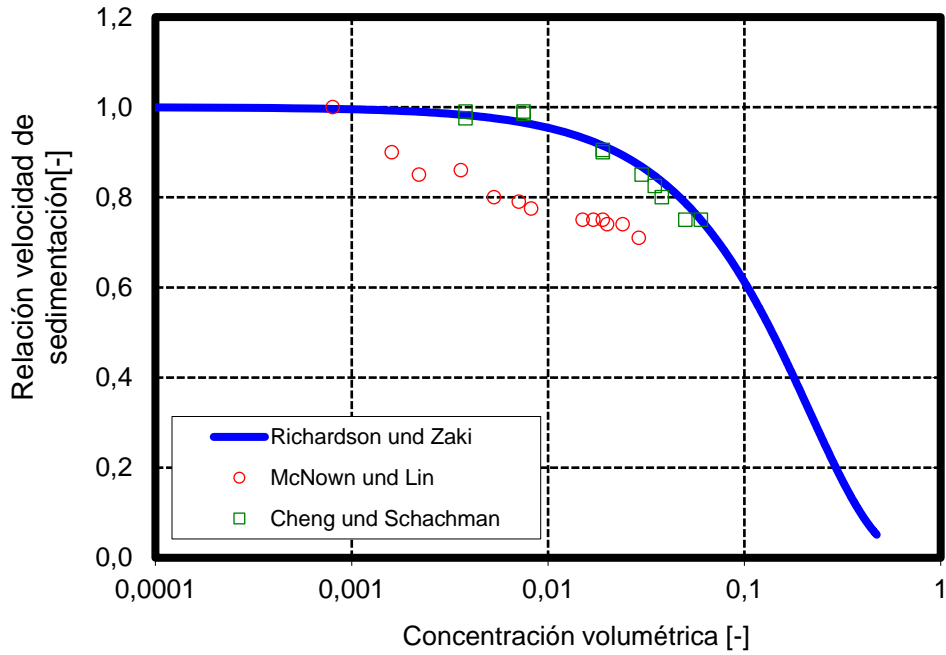


Gráfico 2.1: Comportamiento de la velocidad normalizada de sedimentación en función de la concentración volumétrica según [5], [6], [7]

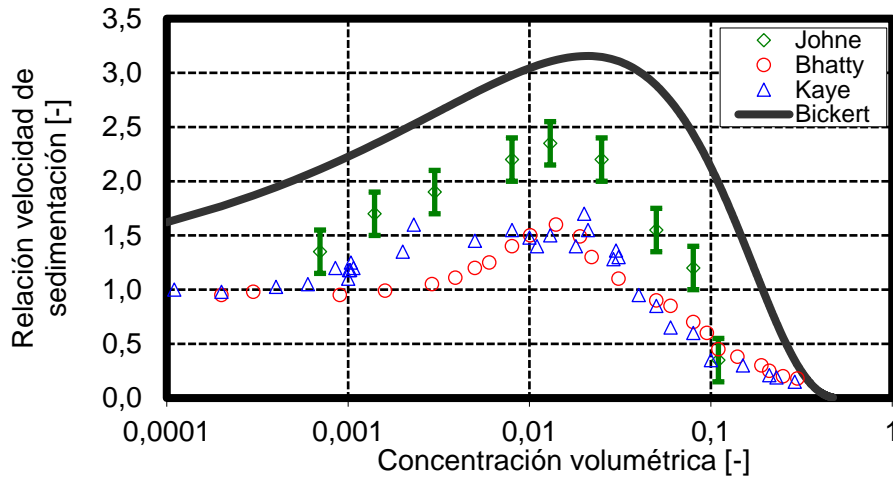


Gráfico 2.2: Comportamiento de la velocidad normalizada de sedimentación en función de la concentración volumétrica según [1], [2], [3], [4]

Capítulo 2. Marco teórico

Para representar adecuadamente el comportamiento de la velocidad efectiva de sedimentación (v_{ef}), que será medida experimentalmente respecto de la velocidad de sumergimiento terminal ideal o velocidad de Stokes, se empleará la denominada velocidad normalizada (v_n), que se define a través de la ecuación 2.12.

$$v_n = \frac{v_{ef}}{v_s} \quad (2.12)$$

Esto se realiza a fin de poder realizar comparaciones entre mediciones realizadas entre distintos campos de fuerzas centrífugas que dan lugar a velocidades de sedimentación de distintas magnitudes, las cuales, al ser normalizadas con la velocidad de Stokes, que se considera unitaria, representan, el comportamiento de la velocidad de sedimentación, en particular, para cada sistema de partículas independizándolos del campo de fuerzas al que está sometido.

2.3. INTERACCIÓN HIDRODINÁMICA ENTRE PARTÍCULAS

Si se modela al sistema de partículas en forma de cubo, este puede dividirse y considerarse cubos más pequeños de tamaño de arista l , además se considera el diámetro de partículas como d_p , se obtiene el siguiente modelo para la concentración de sólido.

$$c = \frac{\pi}{6} \cdot \left(\frac{d_p}{l}\right)^3 \quad (2.13)$$

Donde la expresión (d_p/l) es la distancia media entre los centros de partículas.

Brewer [17], propone la siguiente tabla (tabla 2.1), en la cual dependiendo de la expresión de distancia media de los centros de partículas (d_p/l) , puede obtener el valor para la concentración de sólido (c), y además una proporción de la velocidad de sedimentación para pares de partículas de forma esférica.

Tabla 2.1 Cálculo de la concentración de sólido y la velocidad de sedimentación en función de las distancias de los centros de partículas fuente: Brewer [17]

Distancia entre los centros de partículas l/d _p	Concentración de sólido c	Proporción velocidad de sedimentación
1	0.524	1.55
2	0.0625	1.35
4	0.00818	1.19
6	0.00242	1.12
8	0.00102	1.10
10	0.000526	1.08

2.3.1. Modelo de Brauer & Kriegel

Brauer & Kriegel [9] obtuvieron una ecuación (2.14) para obtener la velocidad normalizada de sedimentación, este modelo, que se basa en la ecuación de continuidad, pero considera los efectos hidrodinámicos que ocurren entre las partículas, para ver cómo afectan estos en la velocidad de sedimentación de micropartículas.

$$v_n = \frac{v_{ef}}{v_s} = \frac{1}{1 + \frac{c}{(1-c)^2}} \cdot \frac{1-c}{1 + \frac{1,2}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{12 \cdot c}\right)^2 - \frac{1}{2}}}} \quad (2.14)$$

2.4. TEORÍA DLVO

Se producen distintas fuerzas de interacción entre partículas que sedimentan, estas fuerzas de interacción, ya sean de atracción o de repulsión entre sí, pueden llegar hasta cierto nivel en el cual su presencia podría dominar el movimiento de la fase discontinua de la suspensión, este proceso no es de forma analítica fácilmente describible, es por esto que su falta de observación, podría llevar a presentar los resultados contradictorio, entre los autores que estudiaron la velocidad de sedimentación, a una concentración del orden del 1%. Estas fuerzas de interacción entre partículas son, según la teoría DLVO [11] [12] llamada así por sus autores Derjaguin,

Landau, Verwey y Overbeek, la suma de las las fuerzas electrostáticas, las fuerzas van der Waals y de repulsión de Born.

2.4.1. Fuerzas electroestáticas

En las suspensiones acuosas con agua, las superficies de las partículas se cargan como resultado de fallas de celosía, así como procesos de adsorción y disociación (Salinas Salas, 2007), se utiliza el modelo de doble capa para explicar cómo actúan las fuerzas eléctricas de repulsión, este modelo se interpreta como la visualización de lo qué ocurre alrededor de un ion negativo. Los iones positivos llamados contra-iones, son atraídos por la capa de iones negativos, formando una segunda capa de contra-iones, esta segunda capa llamada capa de *Stern*, provocara como se muestra en la figura 2.2 , una repulsión de los demás contra-iones que aún son atraídos por la capa negativa, además este equilibrio dinámico resulta en la formación de una capa difusa de contra-iones. Esta capa difusa de contra-iones presenta una alta concentración cerca de la capa de *Stern*, y disminuye a medida que se alejan. Los contra-iones de la capa de Stern y de la capa difusa, son los que juntos llamaremos la doble capa.

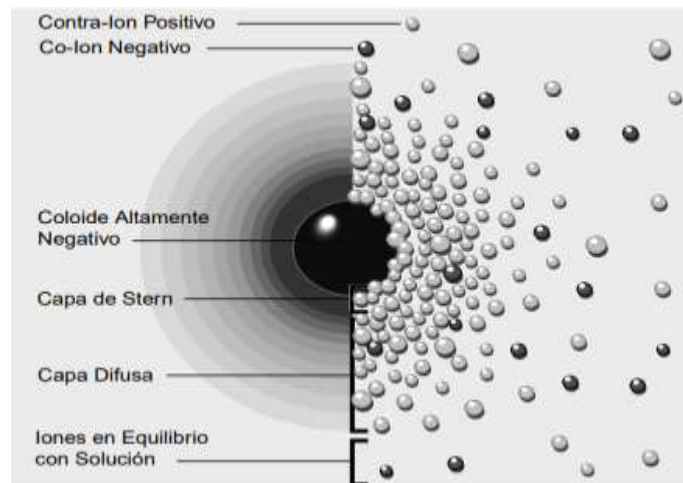


Figura 2.2: Ilustración doble capa, fuente: Zeta-Meter, Inc.)

Capítulo 2. Marco teórico

El espesor de esta doble capa depende del tipo y concentración de los iones de la solución. Los parámetros característicos de la capa doble son el potencial medible en el plano de cizallamiento (potencial Zeta) como se observa en la figura 2.3., el espesor de esta doble capa puede ser alterado, esto con la regulación del valor de pH de la solución, es decir la cantidad de iones de hidrógenos de la solución, esto con el fin de regular el valor del potencial Zeta, y controlar las interacciones entre micropartículas.

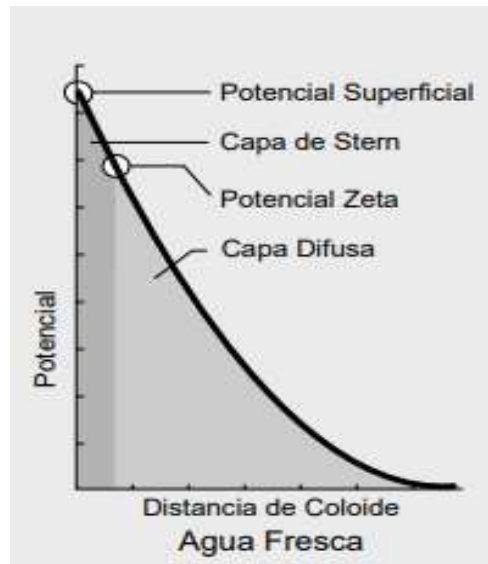


Figura 2.3: Representación potencial zeta, fuente: Zeta-Meter, Inc.

Además, se debe considerar el parámetro de Debye-Hückel (κ), que describe la caída potencial exponencial en la capa difusa (ecuación 2.15):

$$\kappa = \sqrt{\frac{e^2}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot k_B \cdot T} \sum n_j \cdot z_j^2} \quad (2.15)$$

Donde:

- e : Constante de Euler
- ϵ_r : Constante dieléctrica.
- ϵ_0 : Campo eléctrico constante
- k_B : Constante de Boltzman
- T : Temperatura
- n_j : Número de partículas
- z_j : Carga iónica

Cuando las capas dobles de dos partículas entran en contacto, las fuerzas electrostáticas entre los iones y la superficie de las partículas son efectivas, lo que generalmente provoca efecto repulsivo de partículas igualmente cargadas. La energía de repulsión electrostática de dos partículas del mismo tamaño y carga se puede calcular utilizando la ecuación (2.16) (Wiese und Healy [13]).

$$J_{el} = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot d_p}{8} \cdot \zeta^2 \cdot \ln \left\{ \frac{1 + e^{-\kappa \cdot a}}{1 - e^{-\kappa \cdot a}} - \ln(1 - e^{-2\kappa \cdot a}) \right\} \quad (2.16)$$

Dónde:

- ζ : potencial Zeta

2.4.2. Fuerzas de van der Waals

Las causas de las interacciones de van der Waals son los momentos de dipolo eléctrico de las moléculas o átomos en la superficie de interacción entre las partículas que se atraen entre sí. La ecuación 2.17 se puede utilizar para calcular las interacciones de van der Waals, J_{vw} . Se aplica a dos partículas esféricas igualmente grandes con un diámetro de d_p , que están a una distancia a entre sí.

$$J_{vw} = -\frac{A_H}{12} \cdot \left[\frac{d_p^2}{(a + d_p)^2 - d_p^2} + \frac{d_p^2}{(a + d_p)^2} + 2 \ln \left\{ 1 - \left(\frac{d_p}{a + d_p} \right)^2 \right\} \right] \quad (2.17)$$

Donde A_H es la constante Hamaker, que depende del tipo de sustancia de la partícula y del líquido. En general, es del orden de 10^{-20} J.

2.4.3. Repulsión de Born

Las fuerzas de repulsión de Born se manifiestan como un parámetro no despreciable para distancias cortas entre centro de partículas (alrededor de $< 0,2$ nm), ya que su valor es indirectamente proporcional a la distancia elevada a su séptima potencia, el modelo para la energía de repulsión de Born, (J_B) es la ecuación 2.18.

$$J_B = \frac{1,55 \cdot 10^{-60}}{2} \cdot \frac{d_p}{a^7} \cdot A_H \quad (2.18)$$

Como ya se mencionó la teoría DLVO es un método de cálculo para las fuerzas de interacción de partículas y de las energías de interacción de partículas. Las energías de interacción de partículas individuales se pueden agregar a una energía de interacción de partículas total resultante, de la forma 2.19.

$$J_T = \sum J_i \quad (2.19)$$

En la figura 2.4 se puede observar el comportamiento de la curva de la energía total resultante, así como también la diferenciación de la energía de van der Waals, como de las energías electrostática y de Born. Por lo tanto, la energía total se presenta bajo el eje si es atractiva o sobre el eje si es repulsiva.

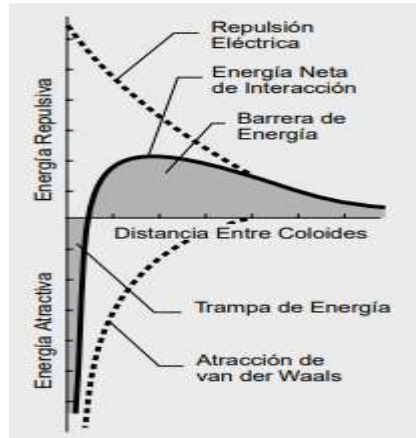


Figura 2.4: Curva de energía total de interacción, fuente: Zeta-Meter, Inc.

2.5. FUNDAMENTOS ÓPTICOS EN LA EVALUACIÓN FOTOMÉTRICA, PARA SISTEMAS DE SEDIMENTACIÓN DE MICROPARTÍCULAS

Los métodos ópticos utilizados para los procesos de sedimentación basan su principio en la evaluación de la transmisión de la luz que atraviesa un sistema de micropartículas, es decir la relación que existe entre la luz de salida, y la luz que es medida luego de atravesar el sistema de micropartículas, este decaimiento de la intensidad de la luz depende de factores tales como: concentración de la suspensión, tamaño de partículas, características de la máquina de medición, entre otros.

2.5.1. Ley de Labert-Beer

De forma matemática, la extinción de la luz se define gracias a la Ley de Labert-Beer, esta relaciona el cociente entre la intensidad lumínica que atraviesa la suspensión, respecto de la intensidad lumínica que logra atravesar al fluido puro, así como también considera otros factores tales como el tamaño de las partículas presentes en la suspensión, mediante el área de extinción, la concentración volumétrica y el espesor de la suspensión que debe atravesar el haz de luz. De esta forma la ley de Lambert-Beer se expresa en la ecuación 2.20.

$$E = -\ln T_l = \ln \frac{I_n}{I_0} = A_v \cdot c \cdot L \quad (2.20)$$

Donde:

- E : Extinción
- T_l : Transmisión
- I_n : Intensidad de la luz que atraviesa la suspensión sedimentando
- I_o : Intensidad de la luz que atraviesa la suspensión inicial
- A_v : Área específica de la extinción
- c : Concentración volumétrica
- L : Ancho de la cubeta que contiene la suspensión

A su vez, el área específica de extinción (A_v) se define como la relación entre el área de la sombra proyectada por la partícula, y el área transversal real de ésta, analíticamente su expresión se expresa en la ecuación 2.21:

$$A_v = \frac{3 k_{(x)}}{2 x} = \frac{E}{L \cdot c} \quad (2.21)$$

Donde:

- $k_{(x)}$: Coeficiente de extensión
- x : Tamaño medio de partículas

2.6. REPRESENTACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE MICROPARTÍCULAS

Para un sistema de micropartículas no se tiene un tamaño o diámetro único de partículas, es por esto que se mide un tamaño medio representativo de partículas, sin embargo, en el sistema es posible encontrar tamaños mayores y/o menores al representativo del sistema.

Capítulo 2. Marco teórico

Los diferentes métodos de medición de tamaño de partículas se basan en técnicas denominadas como incremental y acumulativa:

- técnica incremental: consiste en medir la concentración del material particulado que existe y/o atraviesa por una determinada posición espacial de la celda de medida.
- técnica acumulativa: mide la masa y el volumen total del material particulado que está contenido dentro de la celda.

“La distribución de partículas de sistemas de partículas se representan matemáticamente mediante histogramas, en donde el eje X, representa la fracción del tamaño de partículas, mientras tanto el eje Y representa la fracción de masa total dentro de un rango de tamaño” (Schubert, 2003, pag.31).

Con el fin de realizar la construcción de los diagramas acumulativo e incremental, es preciso el cálculo y la determinación de los siguientes parámetros:

Considerando la masa presente en una suspensión de partículas, su fracción bajo un tamaño i , se obtiene con la ecuación 2.22:

$$\Delta Q_{r,i} = \frac{m_i}{\sum m_i} \quad 2.22$$

Donde:

$\Delta Q_{r,i}$: Fracción de la partícula bajo el tamaño i

m_i : Masa del sistema de partículas bajo el tamaño i

$\sum m_i$: Masa total del sistema de partículas

Dada la ecuación 2.22, se define la concentración acumulativa según la ecuación 2.23:

$$Q_r(x_j) = \sum_{i=1}^j \Delta Q_r \quad 2.23$$

Capítulo 2. Marco teórico

Donde:

$Q_r(x_j)$: *Concentración acumulativa*

A su vez, la concentración incremental se define como el conjunto de fracciones de masa respecto al total del sistema de partículas, aquel grupo que toma un diámetro que se encuentra dentro de los límites definidos, así, adopta la forma de la ecuación 2.24. (Schubert, 2003, pag.32).

$$q_{r,i} = \frac{\Delta Q_{r,i}}{\Delta x_i} \quad 2.24$$

Donde:

$q_{r,i}$: *Concentración incremental*

Δx_i : *Diferencia entre los límites de tamaño definido.*

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

En este capítulo se detallará el procedimiento para la toma de muestras, cabe recordar que los datos utilizados para esta memoria son de carácter secundarios, los cuales fueron proporcionados por el Dr.Ing. Gonzalo Salinas-Salas, además se presentaran y detallaran los instrumentos de laboratorios utilizados para la toma de muestras.

3.1. EQUIPOS DE LABORATORIOS

3.1.1. Centrifuga analítica Shimadzu SA-CP3

La centrifuga Shimadzu SA-CP3 es un analizador de la distribución del tamaño de micropartículas, su funcionamiento se basa en el principio de sedimentación de partículas sometidas a un campo centrífugo, con detección fotométrica, logrando analizar disoluciones con fracciones de masa en el rango de 0,001. Por otra parte, el equipo también puede operar bajo los efectos del campo gravitatorio, utilizando los mismos principios ópticos de detección.

Contrariamente a la opinión de que las bajas concentraciones dificultan la determinación de cantidades, la medición fotométrica de la cantidad es fácil de lograr; permite la determinación de cantidades en concentraciones de sólidos o sólidos extremadamente bajas. Dependiendo del tamaño a examinar, la fracción de masa sólida requerida de la cubeta es sólo 0,001 (Salinas Salas, 2007).

Una vez seleccionado el modo de funcionamiento, el proceso de sedimentación de las partículas comenzará después del inicio de la centrifuga. Esto cambia la concentración de sólidos en el plano de medición dependiendo del tiempo. Para medir la concentración, un haz de luz se pasa a través de la cubeta y su cambio de intensidad es registrado por un detector. Los valores de luz se alimentan a un convertidor análogo-digital como señales eléctricas y se reenvían al ordenador interno.



Figura 3.1 Shimadzu SA-CP3, fuente: Imágenes entregadas por Dr. Ing. Gonzalo Salinas

Los datos técnicos más relevantes de la centrifuga Shimadzu SA-CP3 son presentados a continuación:

- Tipo : Sistema de análisis de tamaño de partícula centrífuga SA-CP3
- Fabricante : Shimadzu Corporation Kyoto Japón
- Puntos de medición : 84 mm o 90 mm desde el punto giratorio
- Rango de velocidad : 500 a 5.000 rpm
- Lámpara : Halógena
- Filtro : Protección térmica de filtro + 1 filtro de color (verde)
- Sensor fotográfico : Silicon Photocell
- Lugares de muestra : 1
- Rotor del sensor de distancia : 73 mm (sensor 1) y 84 mm (sensor 2)
- Cubeta : Rectangular en cristal de cuarzo, $8 \times 14 \text{ mm}^2$
- Volumen de muestra : 3 ml
- Masa de sólidos por : 0.001
- Rango de tamaño de partícula : 20 a 150.000 nm

3.1.2. Balanza de laboratorio

Las balanzas de laboratorio son generalmente instrumentos de medición muy precisos para determinar la masa sólida requerida. En particular, para este estudio es de suma importancia una alta precisión en la forma de medir la concentración de la fase discontinua En los experimentos, la escala de laboratorio SARTORIUS Analytic AC 210S es la utilizada con una precisión de +/- 0.0001 gr. Por último, cabe mencionar que en el anexo 1.1, se encuentran los datos técnicos de la balanza SARTORIUS.

3.1.3. Agitador magnético

Estos agitadores de laboratorio se utilizaron para mezclar bien la suspensión durante el enfriamiento, mientras dure el proceso de dispersión. Sólo son adecuados para cantidades de muestra relativamente pequeñas, de lo contrario una buena mezcla ya no está garantizada. La ventaja es que, debido a la baja necesidad de energía, las muestras también se pueden mezclar durante la noche. El agitador usado para este trabajo es de la marca IKA.

3.1.4. Homogeneizador ULTRATurrax T50

Un dispositivo de dispersión de alto rendimiento que consiste en un agitador cerrado, la varilla de dispersión y la unidad de accionamiento más la unidad de control. Debido a las revoluciones extremadamente altas, la suspensión se aspira axialmente a través de la parte inferior de la varilla de dispersión y se libera radialmente a través de las ranuras laterales. Esto conduce a enormes turbulencias, por lo que la suspensión se dispersa normalmente bien. Por otro lado, debido a las altas fuerzas de cizallamiento que se producen, también es necesario hacer algunas demandas sobre el sólido en términos de estabilidad y resistencia. Se utilizó el homogeneizador ULTRATurrax T50 del fabricante IKA, los datos técnicos se encuentran en el anexo 1.2.

3.1.5. Espectrómetro de difracción láser HELOS

El estado de dispersión de la suspensión es controlado por el espectrómetro de difracción láser después de la preparación de la muestra. Sobre la base de la distribución total de tamaño del volumen Q3 y la distribución de densidad específica del volumen q3, se estima si el grado de dispersión es suficiente o no. Los datos técnicos de los espectrómetros de difracción láser HELOS según el fabricante SYMPATEC, se encuentran en el anexo 1.3.

3.1.6. Medidor de conductividad y medidor de pH

Este instrumento se utiliza para determinar el valor de pH y la conductividad. Al principio de la serie de medición, se debe realizar una calibración con soluciones de búfer.

3.1.7. Microscopio electrónico de barrido

Tipo de microscopio electrónico capaz de producir imágenes de alta resolución de la superficie de la muestra mediante la aplicación de un haz de electrones para formar una imagen. Este equipo se utilizó para la medición y control del tamaño de los sistemas de partículas, toma de fotografías de estas y la verificación de que la suspensión no contenga otras partículas. El microscopio usado fue del fabricante ZEISS, y los datos técnicos se pueden encontrar en el anexo 1.4.

3.2. SISTEMA DE PARTÍCULAS GELTECH INC.

Para la preparación de las suspensiones de medición, se utilizaron partículas proporcionadas por Geltech inc. Estas son partículas de dióxido de silicio (SiO_2) y se caracterizan en su mayoría por ser rígidas, lisas y de forma esférica. Algunos de los criterios decisivos para la selección de estas partículas son las siguientes:

- El tamaño medio de partículas oscila entre los 200 nm y los 1500nm, por lo que son ideales para la maquina centrifuga que se ocupara.
- Las partículas son de una forma esférica para estabilizar el flujo de partículas y así poder evaluar los fenómenos hidráulicos.
- Existe una dependencia significativa del potencial zeta de las partículas según valor de pH de la suspensión.

Las partículas Geltech son partículas esféricas, lisas, rígidas, elaboradas en base a dióxido de silicio amorfo (SiO_2) con una densidad de aprox. 2.135 kg/m^3 La tabla 3.1 presenta los tamaños nominales de los sistemas de partículas utilizados, medidos mediante un espectrómetro de difracción láser HELOS y con un microscopio electrónico marca Zeiss.

Tabla 3.1 Caracterización de partículas Geltech utilizando espectrómetro de difracción láser y microscopio electrónico de barrido, fuente: Salinas Salas 2007

Partícula	Espectrómetro de difracción láser (HELOS)		Microscopio electrónico	
	X _{50,3} , nm	X _{ST} , nm	X _{50,0} , nm	X _{mod,0} , nm
Geltech 201®	320	270	239	238
Geltech 1001®	420	320	530	526
Geltech 1501®	1550	1560	1534	1520

3.2.1. Geltech 201®

De un muestreo de partículas, se determina el tamaño de distribución de partículas utilizando el espectrómetro de difracción laser HELOS, en el grafico 3.1 se observa la distribución tanto acumulativa (Q_3) como incremental (q_3) del tamaño de partículas. En la figura 3.2. se puede observar una imagen de la partícula geltech 201®, obtenidas a través del microscopio electrónico Zeiss.

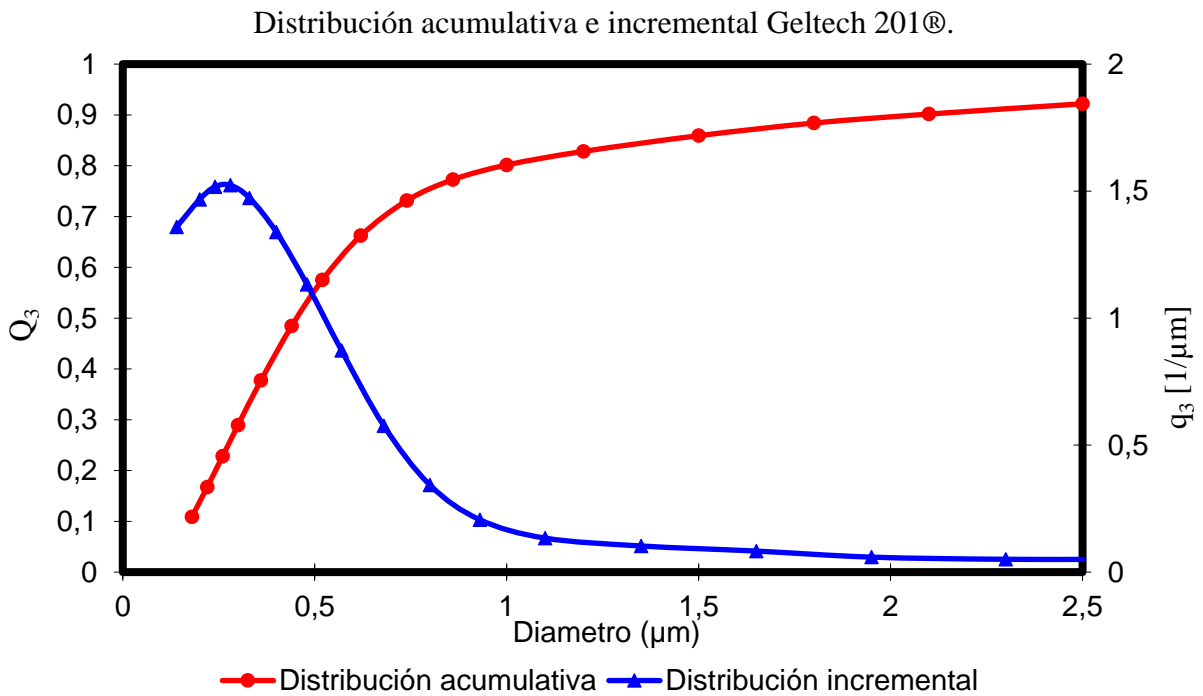


Gráfico 3.1 Distribuciones de tamaño Geltech 201® a través de espectrómetro laser HELOS.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados

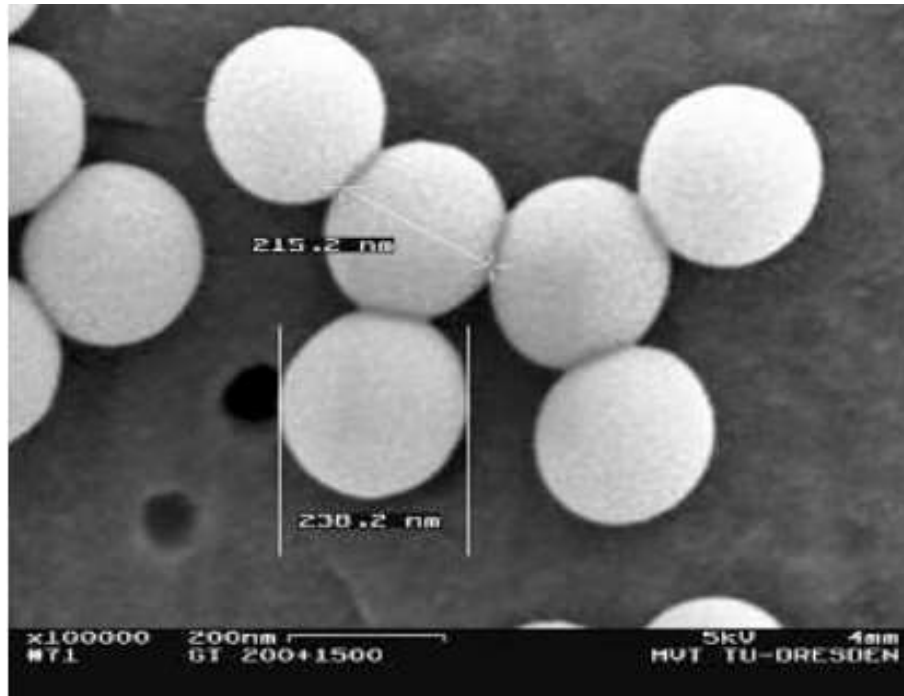


Figura 3.2 Imagen partículas Geltech 201® a través de microscopio Zeiss, fuente: Salinas Salas

Por último, en la tabla 3 se encuentran los datos físicos de la partícula Geltech 201®

Tabla 3.2 Datos físicos Geltech 201® fuente: Salinas Salas [8]

Geltech 201®	
Diámetro nominal	200 nm
Diámetro real	250 nm
Densidad	2122 kg/m ³

3.2.2. Geltech 1001®

De un muestreo de partículas, se determina el tamaño de distribución de partículas utilizando el espectrómetro de difracción laser HELOS, en el grafico 3.2 se observa la distribución tanto acumulativa (Q_3) como incremental (q_3) del tamaño de partícula.

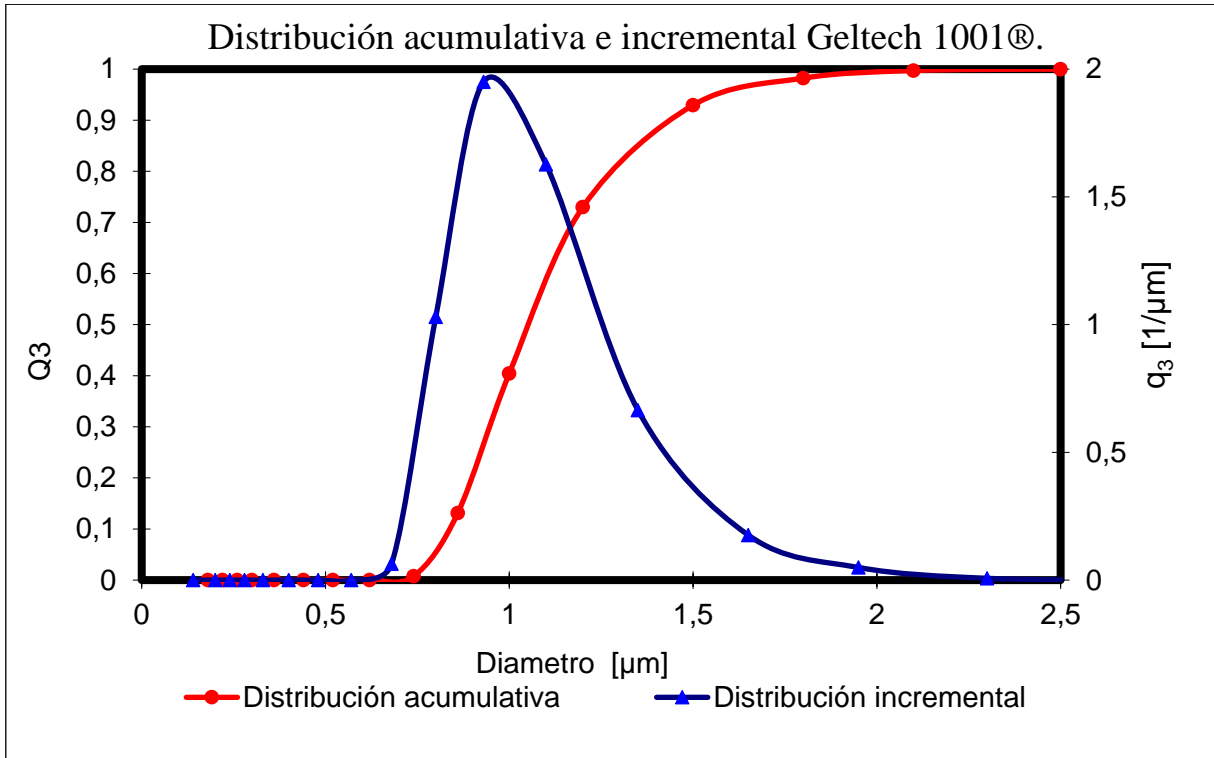


Gráfico 3.2 Distribuciones de tamaño Geltech 10001® a través de espectrómetro laser HELOS. Fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

A continuación, en la figura 3.3. se puede observar una imagen de la partícula Geltech 1001®, obtenidas a través del microscopio electrónico Zeiss:

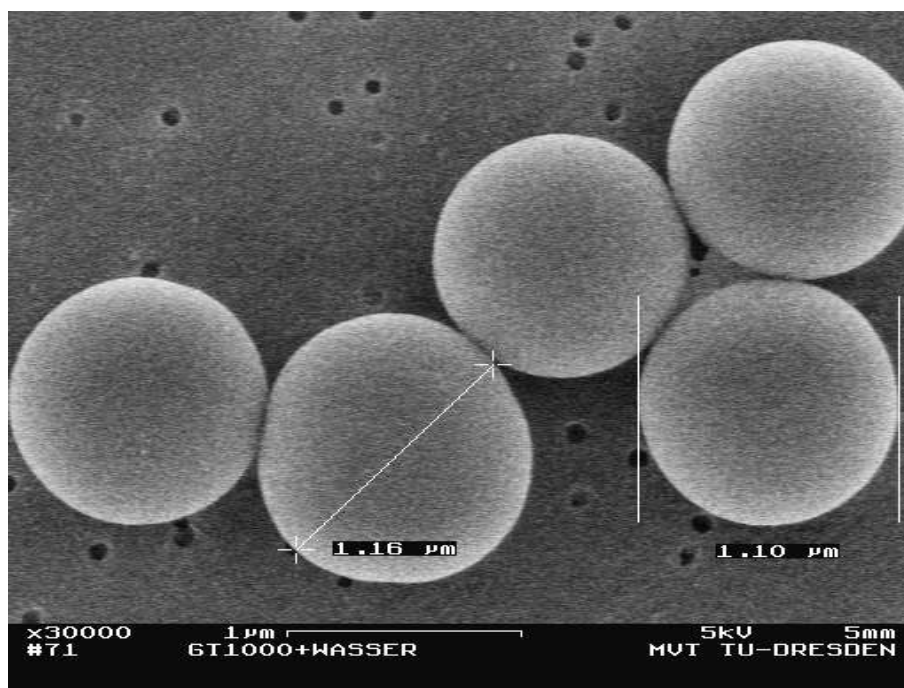


Figura 3.3 Imagen partículas Geltech 1001 ® a través de microscopio Zeiss, fuente: Salinas Salas

Por último, en la tabla 4 se encuentran los datos físicos de la partícula Geltech 1001®.

Tabla 3.3 Datos físicos Geltech 1001® fuente: Salinas Salas [8]

Geltech 1001®	
Diámetro nominal	1000 nm
Diámetro real	1200 nm
Densidad	2200 kg/m ³

3.2.3. Geltech 1501®

De un muestreo de partículas, se determina el tamaño de distribución de partículas utilizando difracción laser, en el grafico 3.3 se observa la distribución tanto acumulativa (Q_3) como incremental (q_3) del tamaño de partícula.

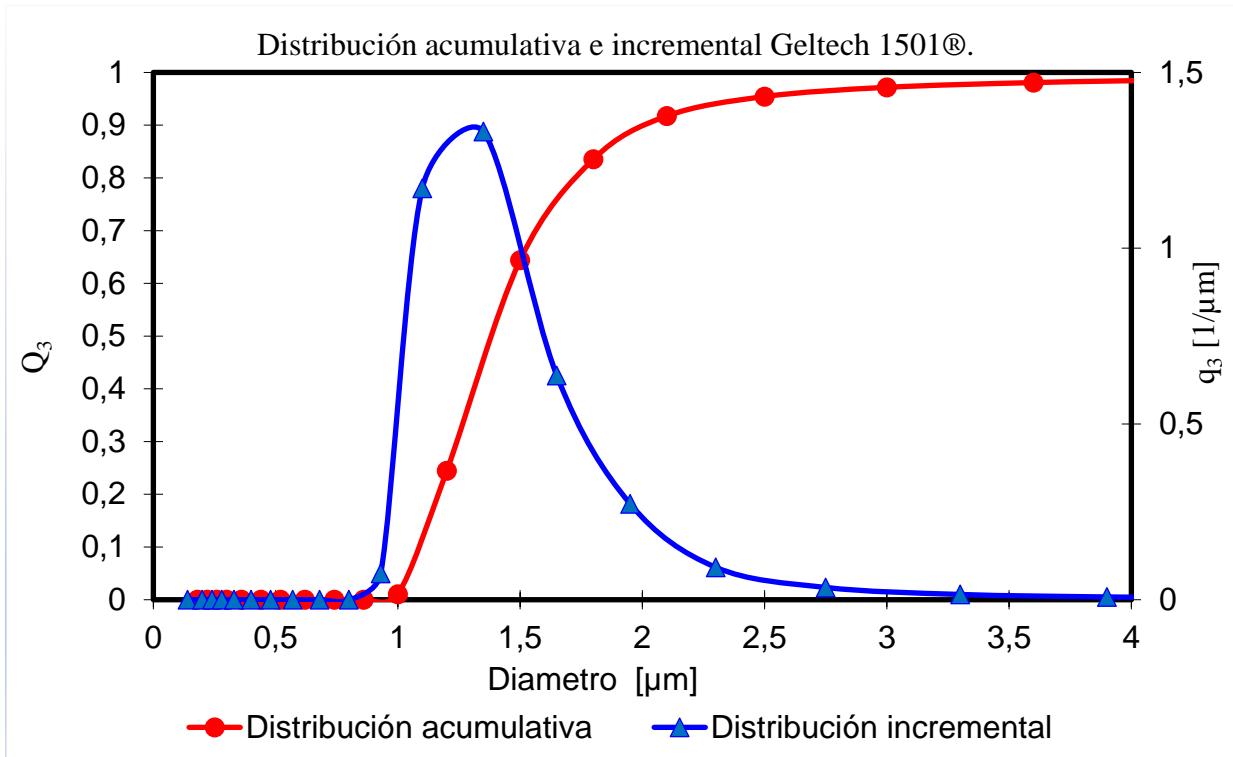


Grafico 3.3 Distribuciones de tamaño Geltech 1501®. Fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados

A continuación, en la figura 3.4. se puede observar una imagen de la partícula Geltech 1501®, obtenidas a través del microscopio electrónico Zeiss:

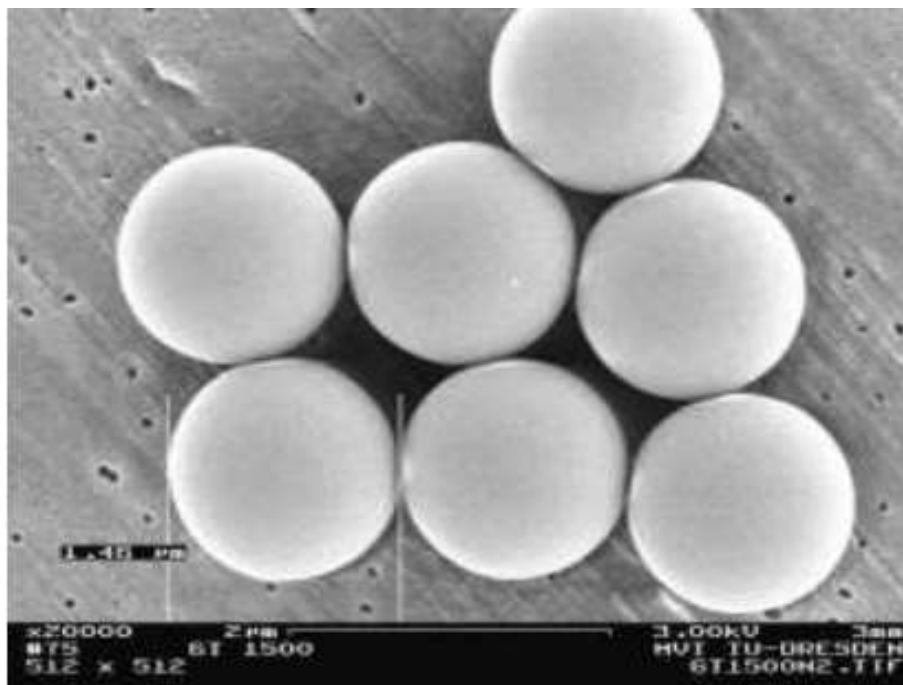


Figura 3.4. Imagen partículas Geltech 1501® fuente: Salinas Salas

Por último, en la tabla 3 se encuentran los datos físicos de la partícula Geltech 1501®.

Tabla 3.4 Datos físicos Geltech 1501® fuente: Salinas Salas [8]

Geltech 1501®	
Diámetro nominal	1500 nm
Diámetro real	1560 nm
Densidad	2150 kg/m ³

3.3. CONSIDERACIONES GENERALES

La calidad y las características de las suspensiones son independientes de la centrifuga a utilizar, la cual en este caso será la Shimadzu SA-CP3, es por esto por lo que debe prestar especial atención a la preparación de la muestra, para así garantizar un estado de dispersión reproducible y estable, por lo que se deben obtener distribuciones de tamaño lo más estrecho posible.

Las partículas Geltech vienen presente en forma de polvo, por lo que las muestras se realizaron a partir del polvo de partículas Geltech® junto con agua desionizada (agua DI) usada en forma de fase continua, el agua DI fue previamente filtrada a través de una membrana de tamaño de poro 200 nm.

Para las muestras a estudiar, se ajustó el valor del pH a un valor específico, esto se logra mediante la utilización de soluciones acuosas de hidróxido de potasio (KOH), y de ácido nítrico (HNO₃), el valor de pH y conductividad de cada suspensión, fueron medidos y registrados antes de cualquier experimento de sedimentación de las suspensiones.

3.4. PREPARACIÓN DE SUSPENSIONES DE MICROPARTÍCULAS

Con el fin de estudiar la influencia de la concentración de partículas en la velocidad de sedimentación, se establecieron muestras a partir de partículas Geltech con agua DI, las concentraciones variaron desde los 0,001 hasta los 0.05, la centrifuga utilizada para las mediciones fue la Shimadzu SA-CP3.

El agua desionizada se utilizó como medio de suspensión, y el pH de la suspensión se fijó en el orden de 9 con solución KOH. La calidad de la dispersión se comprobó mediante difracción láser antes de cada medición.

La preparación y dispersión de las suspensiones se llevó a cabo por separado para cada punto de concentración de acuerdo con las siguientes especificaciones.

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Los pasos para preparar las muestras fueron los siguientes:

❖ Enfoque de suspensión:

- Pesar el polvo Geltech según la función de componente de concentración de volumen sólido de la suspensión con la ayuda de una báscula electrónica.
- Medición de la cantidad necesaria de líquido con la ayuda de una pipeta de medición.
- Ajuste del pH de la solución a un valor del orden de 9 .
- Mezcla de polvo y agua en un vaso.
- 30 min en agitador magnético .

❖ Dispersión:

- 3 min en un baño ultrasónico .
- 10 min en ultra-Turrax con 10.000 rpm.
- 2.5 min en vibracell, con ajuste 9 - 1 s y una intensidad del 80%.
- Otros 10 min en el Ultra-Turrax con 10.000 rpm .
- 30 min en agitador magnético .
- Control del comportamiento de la distribución del tamaño de densidad por HELOS (difracción láser) y/o microscopía electrónica con evaluación de imagen.

❖ (Configuración y) Control del valor del pH, control de la conductividad.

❖ Equilibrio de la suspensión por agitador magnético (cubierto con Parafilm).

**CAPÍTULO 4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE
RESULTADOS**

Capítulo 4. Análisis de resultados

En este capítulo se expondrán los resultados utilizados para la realización de esta memoria, cabe recalcar que los datos aquí presentados fueron proporcionados por el Dr.-Ing. Gonzalo Salinas Salas, los cuales son de carácter secundarios, así como también los resultados presentados por otros autores que estudiaron los efectos de la concentración en la sedimentación esto, con el fin de determinar la existencia o inexistencia de esta sobre velocidad de sedimentación reportadas por algunos autores de la literatura técnica.

4.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1.1. Cálculo de la velocidad de Stokes

Para obtener el valor de la velocidad normalizada, y comprobar si existe o una sobre velocidad de sedimentación cuando la concentración es del orden del 1%, es necesario tener un valor de referencia, para esto se utilizará el valor de la velocidad de Stokes, en el cual el efecto provocado por la concentración volumétrica de las micropartículas no es considerado.

Para conocer el valor teórico de la velocidad de Stokes, es necesario conocer primero, los parámetros físicos que definen tanto a las micropartículas como al fluido (densidades, diámetros, viscosidad), luego se debe conocerla velocidad de giro en rpm a la que fue programada la centrifuga Shimadzu SA-CP3, esto para obtener el valor del campo de fuerzas centrifugas que se genera, para los sistemas de partículas más grandes fue necesario cambiar esta velocidad de giro para obtener resultados más confiables en la medición, el valor de la velocidad de Stokes (v_s), calculado con la ecuación 2.10, para cada sistema de partículas y ajustes de velocidad de giro, se presenta en la tabla 6.

Capítulo 4. Análisis de resultados

Tabla 4.1 Velocidad de Stokes de los sistemas de partículas, fuente : Elaboración propia a partir de datos entregados.

Sistema de partículas	Rpm	$v_s (\mu\text{m}/\text{s})$
Geltech 201®	2000	20,076
Geltech 1001®	500	30,916
	750	69,560
	1000	123,662
Geltech 1501®	500	50,355
	750	113,298
	1000	201,418

4.1.2. Velocidad experimental y velocidad normalizada

Mediante la utilización de la centrifuga Shimadzu SA-CP3, se midió la velocidad de sedimentación (v_{ef}) de cada sistema de partículas en función de su concentración volumétrica de la parte discontinua. La concentración varió entra el rango de un 0 y un 5% aproximadamente, lo que permitirá verificar el aumento o no, de la velocidad de concentración cuando la concentración es del orden de 1%. Es preciso recalcar, que luego de cada dilución de la suspensión, estas volvieron a seguir los pasos de preparación mencionados en el punto 3.4 del capítulo anterior, esto con el fin de asegurar una correcta dispersión de la muestra y que no existan disturbios en la medición.

Luego, utilizando la ecuación 2.12, se procede a calcular el valor de la velocidad normalizada v_n , usando como valor de referencia la velocidad de Stokes v_s , la cual ya fue calculada en el punto 4.1.1. Hay que recordar que el valor de la velocidad normalizada es el cociente entre el valor teórico del valor experimental de la velocidad efectiva de sedimentación y la velocidad de Stokes, , utilizando el valor de la velocidad normalizada, se facilita el análisis de los datos que se presentan:

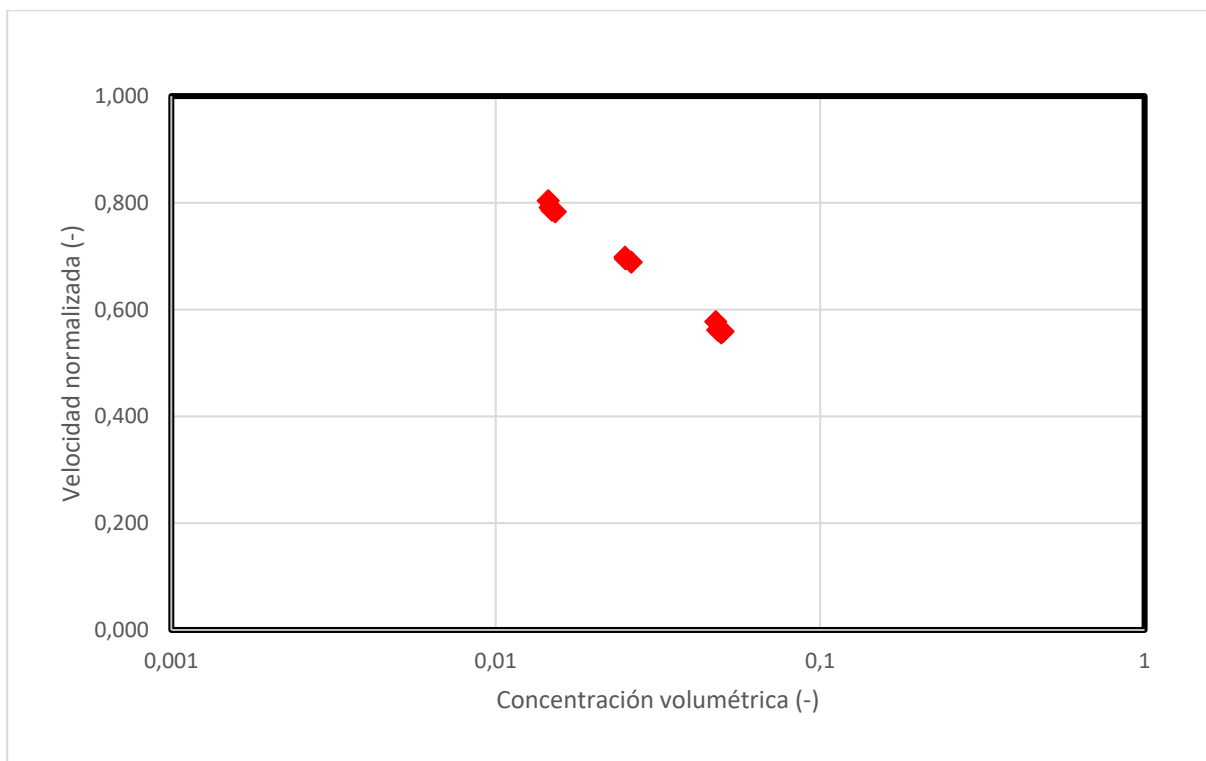
Capítulo 4. Análisis de resultados

Geltech 201®

Los valores obtenidos tras la medición de las suspensiones con micropartículas Geltech 201®, están presentados en la tabla 7. Además, en la FIGURA 4.1. se puede observar el comportamiento de esta velocidad normalizada en la forma de un gráfico semilogarítmico.

Tabla 4.2 Valor velocidad normalizada en función de la concentración Geltech 201® fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.

Geltech 201®			
Concentración	V_s ($\mu\text{m/s}$)	Velocidad experimental ($\mu\text{m/s}$)	V_n ($\mu\text{m/s}$)
0,00%	20,076	17,739	0,884
1,45%		16,136	0,804
1,47%		15,884	0,791
1,49%		15,786	0,786
1,53%		15,724	0,783
2,50%		14,017	0,698
2,51%		13,953	0,695
2,62%		13,829	0,689
4,77%		11,587	0,577
4,83%		11,276	0,562
4,95%		11,168	0,556
5,02%		11,223	0,559



*Gráfico 4.1 Velocidad normalizada vs concentración volumétrica Geltech 201® fuente:
Elaboración propia a partir de datos entregados.*

Geltech 1001®

Los valores obtenidos tras la medición de las suspensiones con micropartículas Geltech 1001®, están presentados en la tabla 8, , además en el gráfico 4.2. se puede observar el comportamiento de esta velocidad normalizada, Recordar que para este sistema de micropartículas se utilizaron diferentes velocidad de Stokes según la velocidad en rpm a la que funciono la centrifuga utilizada.

Capítulo 4. Análisis de resultados

Tabla 4.3 Valor velocidad normalizada en función de la concentración Geltech 1001® fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.

Geltech 1001®			
Concentración	V_S ($\mu\text{m}/\text{s}$)	Velocidad experimental ($\mu\text{m}/\text{s}$)	V_n ($\mu\text{m}/\text{s}$)
0,997%	30,916	25,680	0,896
2,033%		24,361	0,850
4,885%		21,333	0,745
1,173%	69,560	55,435	0,860
1,846%		52,275	0,811
5,484%		44,801	0,695
1,086%	123,662	97,117	0,847
2,064%		93,678	0,817
4,969%		82,791	0,722

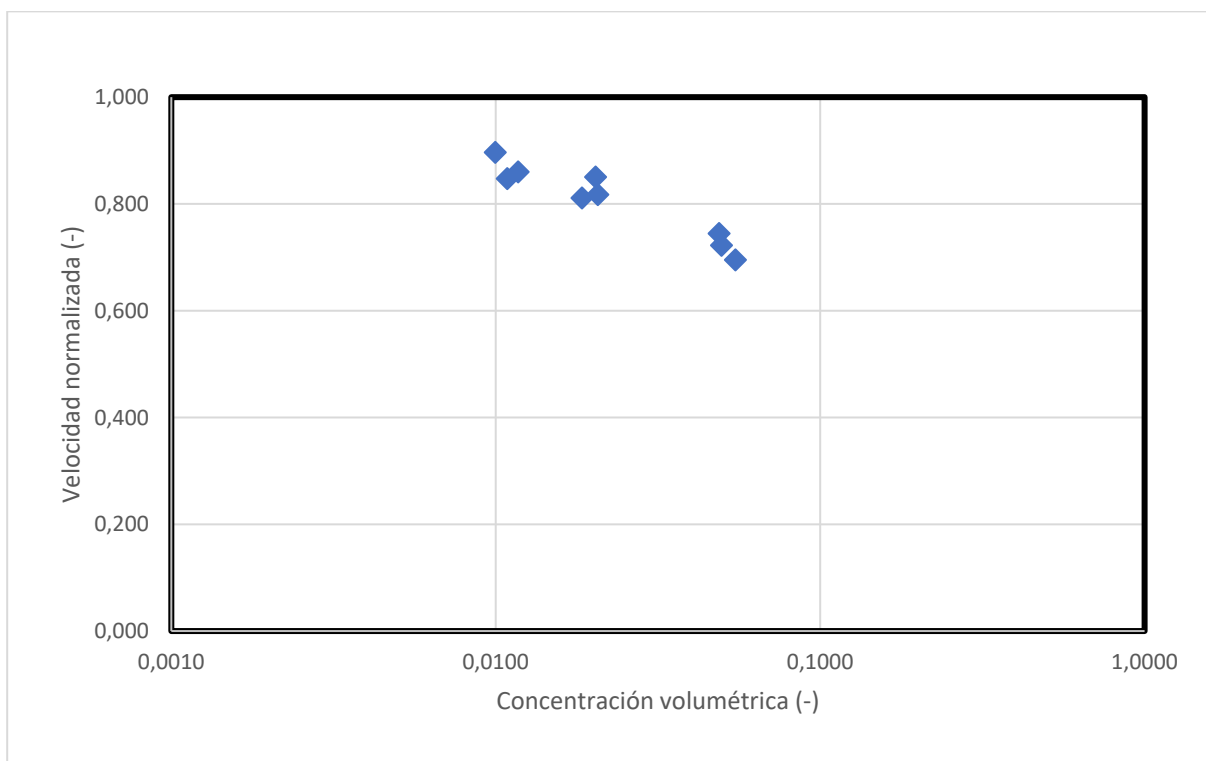


Grafico 4.2 Velocidad normalizada vs concentración volumétrica Geltech 1001® fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.

Capítulo 4. Análisis de resultados

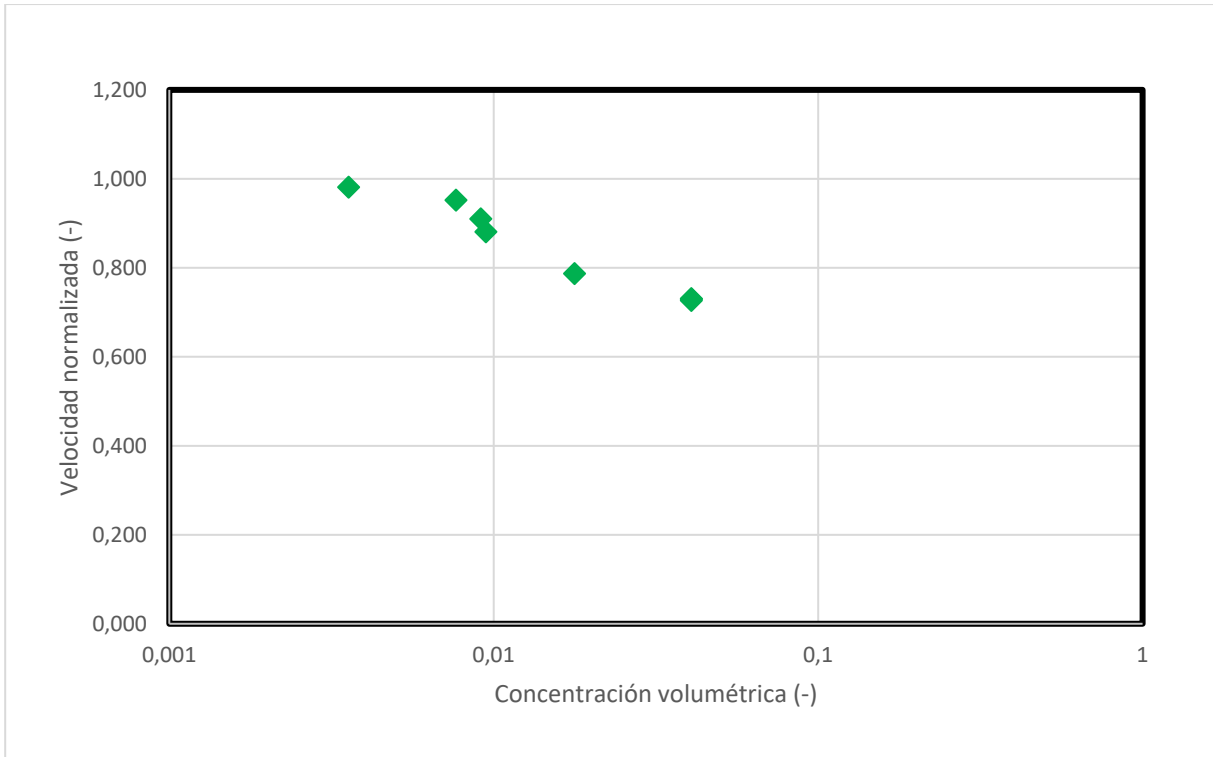
Geltech 1501®

Los valores obtenidos tras la medición de las suspensiones con micropartículas Geltech 1501®, están presentados en la tabla 9, al igual que para las micropartículas Geltech 1001® se utilizaron diferentes velocidades de Stokes, , además en el gráfico 4.3. se puede observar el comportamiento de esta velocidad normalizada.

Tabla 4.4 Valor velocidad normalizada en función de la concentración Geltech 1501® fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.

Geltech 1501®			
Concentración	$V_S (\mu m/s)$	Velocidad experimental ($\mu m/s$)	$V_n (\mu m/s)$
0,357%	50,355	49,408	0,981
0,765%		47,936	0,952
0,912%		45,813	0,910
0,946%		44,346	0,881
4,066%		36,744	0,730
1,774%	113,298	89,174	0,787
4,066%		82,782	0,731
4,066%	201,418	146,363	0,727

Capítulo 4. Análisis de resultados



*Gráfico 4.3 Velocidad normalizada v/s concentración volumétrica Geltech 1501® fuente:
Elaboración propia a partir de datos entregados.*

4.1.3. Resumen resultados

A continuación, en el gráfico 4.4. se presenta un gráfico comparativo de los resultados obtenidos experimentalmente.

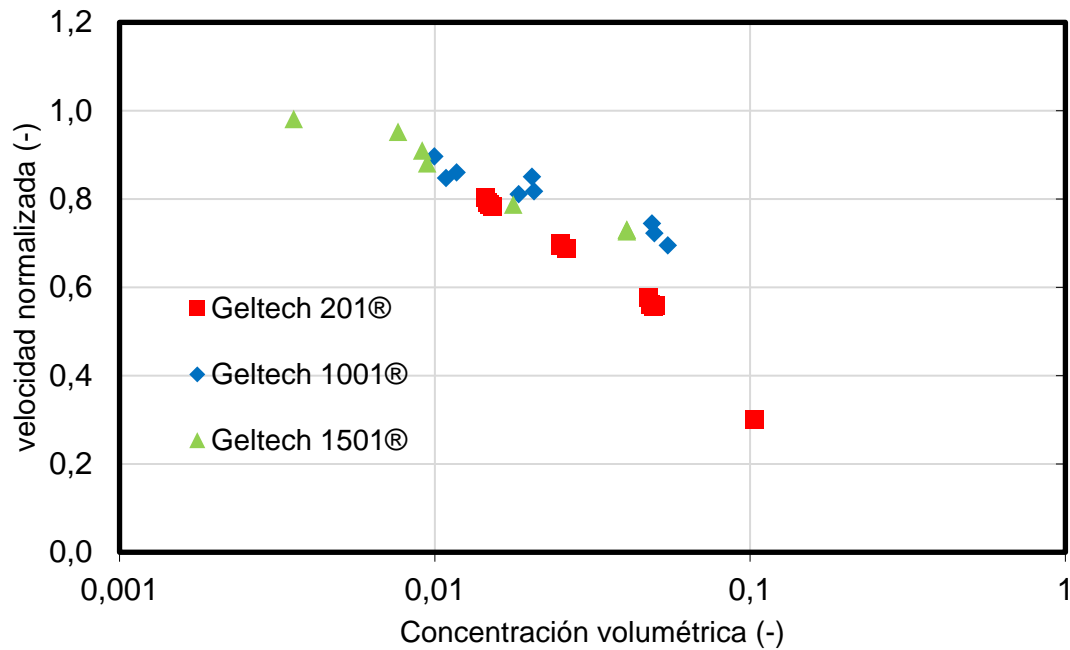


Gráfico 4.4 Resumen resultados experimentales, fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.

Como se observa, en los tres sistemas de partículas utilizados, los cuales tienen diferentes diámetros, se observa el mismo comportamiento de disminución para la velocidad de sedimentación, además de esto, las magnitudes de los valores presentados son similares, por lo que se observa una reproducibilidad de los resultados. Esto toma sentido ya que a pesar de que los sistemas de partículas de mayor tamaño (geltech 1501®), sedimentan a una velocidad efectiva más alta que las de menor diámetro, es en el cálculo y análisis de la velocidad normalizada, que se logran apreciar de forma correcta el comportamiento de la velocidad de sedimentación en función de la concentración volumétrica de micropartículas.

4.2. VALIDACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con el fin de validar la confiabilidad de estos resultados, se consideran tres factores importantes para su aceptación.

4.2.1. Procedimiento experimental

Debido al minucioso procedimiento para la preparación de las muestras, el cual fue seguido por el Dr.-Ing. Salinas Salas, en donde todos los Parámetros que pudieran desviar las mediciones fueron debidamente controlados.

El valor de pH se midió y ajustó a valor del orden de 9, esto permite asegurar una estabilidad de la suspensión, el pH que mide la cantidad de iones de hidrogeno H, regula el valor del potencial z, para asegurar que no existan fuerzas electroquímicas que puedan provocar aglomeraciones de partículas, provocando algún efecto sobre la velocidad de sedimentación, este valor de pH fue medido en distintas etapas, en la preparación de la suspensión, luego de la dispersión de la suspensión, y luego al momento de la toma de datos, todo este minucioso procedimiento para asegurar una toma correcta de la muestra.

Además, las suspensiones siguieron un específico procedimiento para asegurar una correcta dispersión de las muestras, el cual fue descrito en el punto 3.4. es por esto, además de la regulación de la estabilidad de la muestra por medio del control del pH de ella, que se puede afirmar que no existen desviaciones en la toma de dato de la velocidad de sedimentación de las muestras.

4.2.2. Principio de conservación de la masa

Existe un fenómeno físico de contra flujo en el líquido, el cual es provocado debido al desplazamiento de las micropartículas, este contra flujo, provocara un disminución en la tasa de velocidad de sedimentación del sistema. Este fenómeno de conservación de la masa es reportado por la ecuación de continuidad, la que adapta la forma de la ecuación 4.1 la que indica que entre mayor sea la concentración de la parte discontinua, la velocidad de sedimentación tendería a disminuir.

$$v_n = (1 - c) \tag{4.1}$$

En el grafico 4.5 se puede observar el comportamiento de la ecuación de continuidad, el cual coincide con el comportamiento de los resultados expuestos en el punto 4.1.

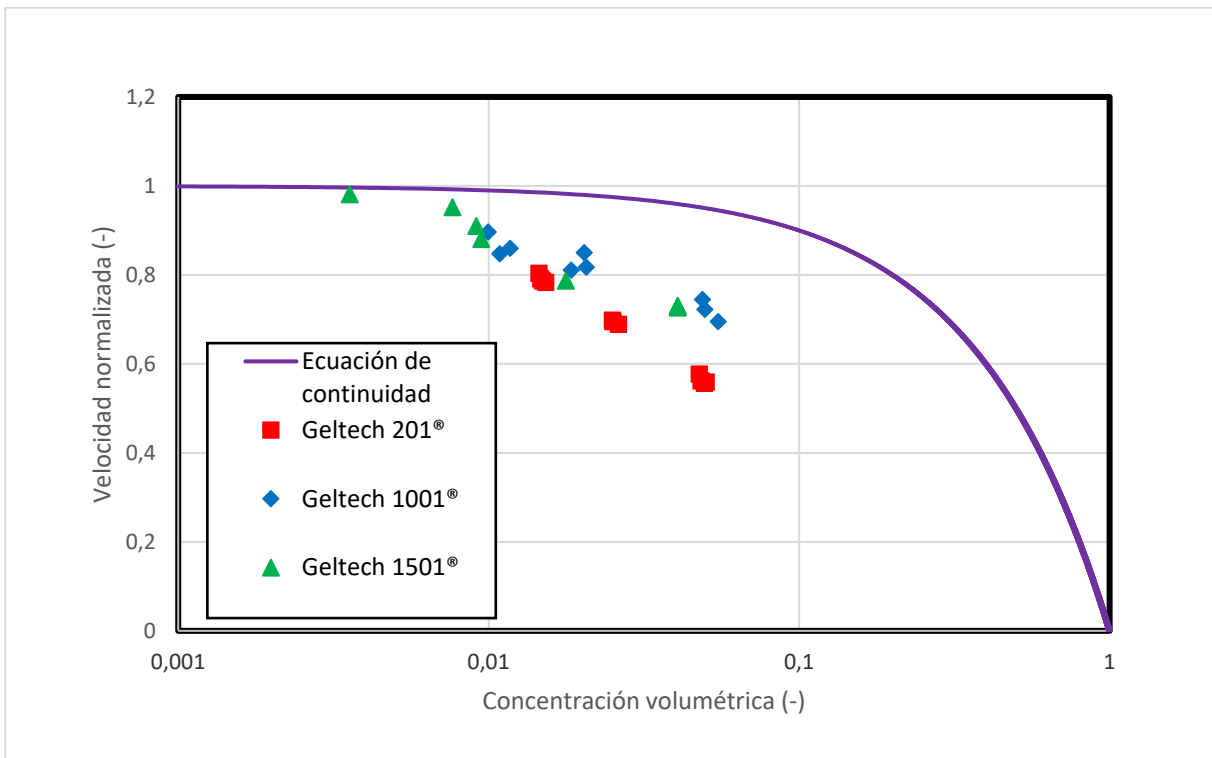


Gráfico 4.5 Comparación ecuación de continuidad v/s datos experimentales, fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.

Capítulo 4. Análisis de resultados

Se puede observar del gráfico 4.5 que, a pesar de que el comportamiento de los resultados experimentales coinciden con la curva de la ecuación de continuidad, las pendientes no son iguales, sin embargo coinciden en que, al aumentar la concentración de la parte sólida, la velocidad de sedimentación efectiva disminuye, por eso según lo observado por el gráfico 4.5, se puede afirmar mediante la comparación de la ecuación de continuidad que los datos experimentales son válidos, ya que presentan una disminución de velocidad al aumentar la concentración de la parte discontinua.

4.2.3. Comparación con otros autores

El uso de ecuación de continuidad para el cálculo de la velocidad de sedimentación no es preciso, debido a qué, cómo se explicó durante el capítulo 2 de esta memoria, existen distintas interacciones (hidrodinámicas y electroquímicas), entre las partículas, las cuales no son consideradas en la ecuación de continuidad.

Richardson y Zaki [7], propone un modelo semi-empírico basado en la ecuación de continuidad, el cual es de la forma de la ecuación 4.2.

$$v_n = (1 - c)^n \quad 4.2$$

Donde, la ecuación de continuidad corresponde a la situación física, mientras que el exponente n , que se emplea para la corrección de la ecuación de continuidad, es de carácter, eminentemente, empírico. La expresión propuesta por Richardson y Zaki, se planteó después de un conjunto de ensayos experimentales que le permitieron establecer rangos valóricos, para el exponente n , para distintos regímenes de escurrimiento, los que se plantea a través del número de Reynolds del flujo sobre la partícula.

Capítulo 4. Análisis de resultados

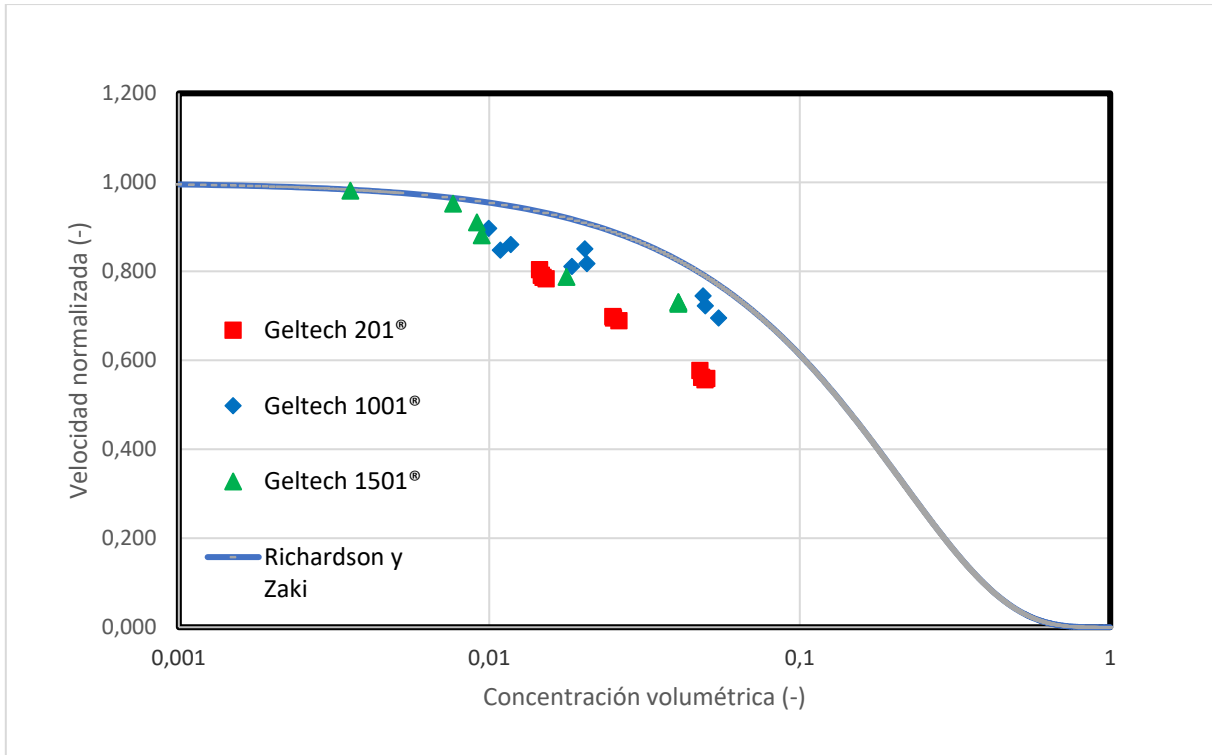


Grafico 4.6 Comparación ecuación de Richardson y Zaki [7] v/s datos experimentales Salinas Salas [8], fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.

Como se puede observar en el gráfico 4.6, el modelo propuesto por Richardson y Zaki [7] es más preciso con los resultados obtenidos experimentalmente, que el de ecuación de continuidad, sigue la tendencia de la disminución de la velocidad de sedimentación a medida que se aumenta la concentración de sólidos al igual que los resultados experimentales, y su pendiente, gracias al factor de corrección n propuesto por los autores, se asemeja más con los resultados experimentales presentados. Además, este modelo es uno de los más aceptados por la comunidad de ingeniería y la científica a la fecha.

Capítulo 4. Análisis de resultados

Otro modelo similar es del Steinour [15], que también tiene un carácter semi-empírico, al igual que el anterior fue derivado a partir de la experimentación con partículas esféricas, y adopta la forma de la ecuación 4.3:

$$\frac{v_{ef}}{v_s} = (1 - c)^2 \cdot 10^{-1,82c} \quad 4.3$$

En el grafico 4.7 se puede ver una curva generada por la ecuación 4.3, se puede apreciar, que el modelo propuesto por Steinour [15], sigue el comportamiento ya presentados por la ecuación de continuidad y del modelo de Richardson y Zaki [7], el que también es concordante con los resultados experimentales, además se observa que existe una mayor similitud con las pendientes de los datos obtenidos experimentalmente.

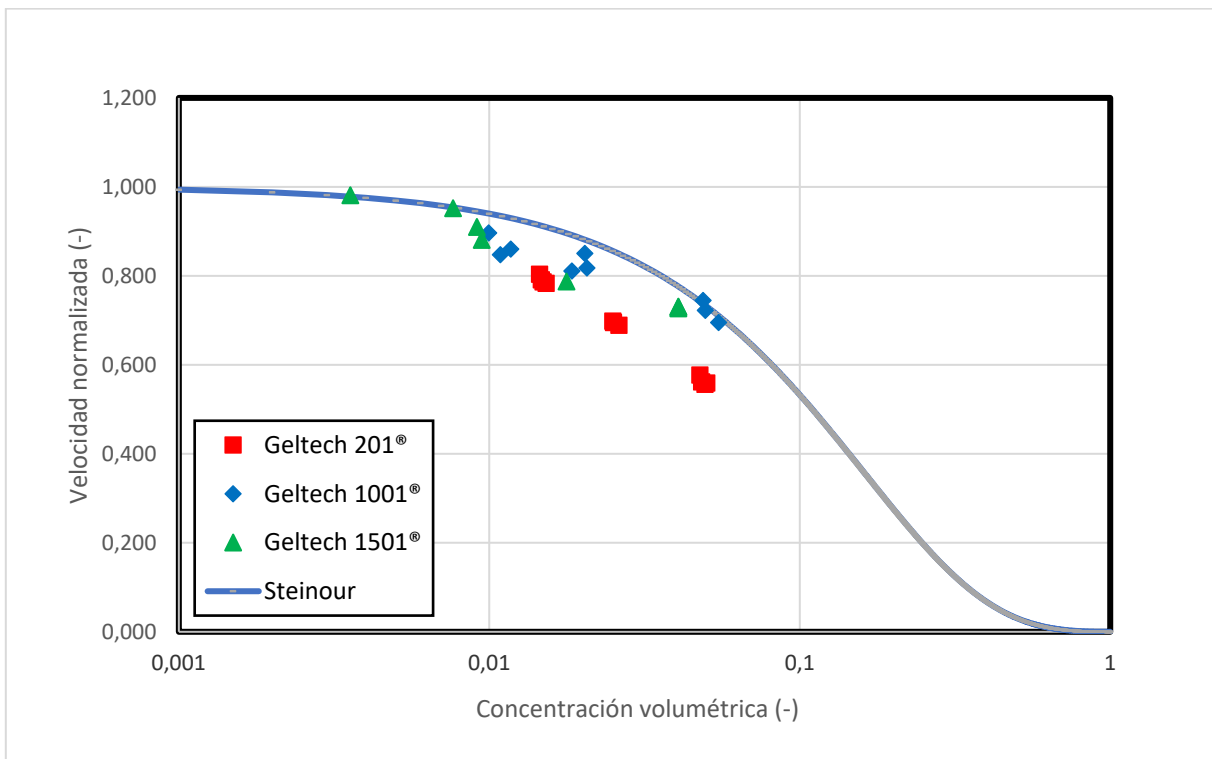


Grafico 4.7 Comparación modelo Steinour [15] v/s datos experimentales, fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.

Capítulo 4. Análisis de resultados

Por último, también se presentan los resultados de Brauer y Kriegel [9], que como se mencionó en el capítulo 2.3, presentó un modelo propio, el cual considera los efectos hidrodinámicos que se producen entre las partículas, a continuación, en el grafico 4.8 se pueden observar sus resultados v/s los obtenidos experimentalmente.

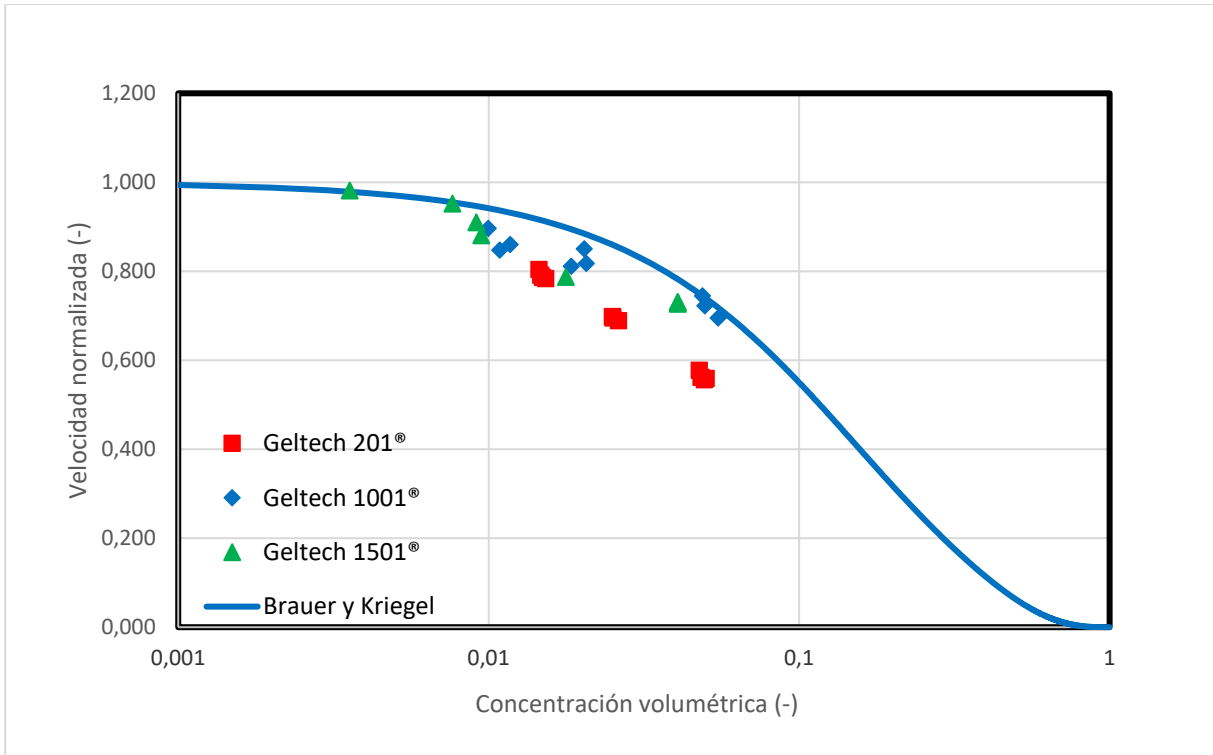


Gráfico 4.8 Comparación modelo Brauer y Kriegel [9] v/s datos experimentales, fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.

Como se puede observar, Brauer y Kriegel tampoco presentan un aumento de la velocidad de sedimentación, sino que presentan un comportamiento similar a los obtenidos experimentalmente, y a los modelos presentados por Steinour [15] y Richardson & Zaki [7], a pesar de que los modelos presentados por autores presentan enfoques distintos .

4.3. DISCUSIÓN ENTRE LOS RESULTADOS PRESENTADOS POR LA LITERATURA TECNICA

Actualmente, existen distintos autores que han reportado resultados en la literatura técnica, tal como fue mencionado en el punto 2.2, que indican que existe una sobre velocidad de sedimentación, en un rango de concentración volumétrica de partículas del orden del 1%. Entre estos autores se puede señalar a: Bhatti [1], Bickert [2], Johne [3], Kaye y Boardman [4]. En el grafico 4.8 se muestran los resultados presentados por los autores mencionados v/s los valores obtenidos experimentalmente.

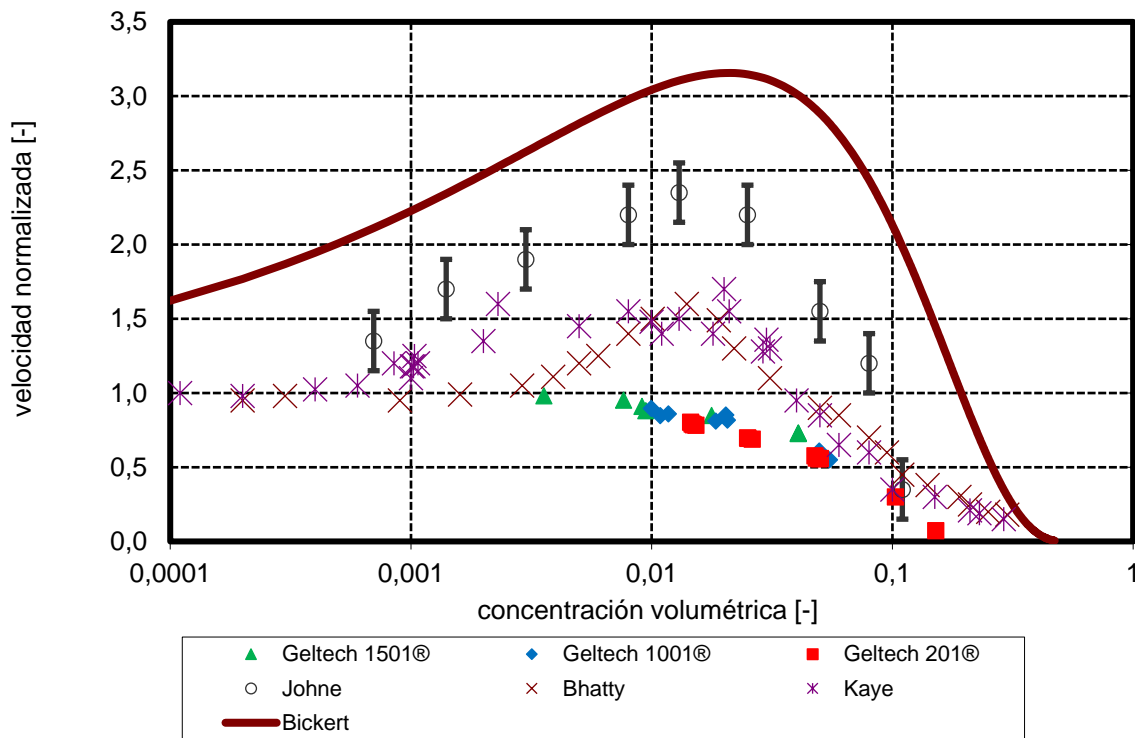


Grafico 4.9 Resultados presentados por la literatura v/s datos experimentales, fuente:

Elaboración propia a partir de datos entregados.

Como se puede observar en el gráfico 4.9 existe una discrepancia entre los resultados que fueron obtenidos experimentalmente, contra los resultados que fueron presentados por esos autores (Bhatti [1], Bickert [2], Johne [3], Kaye y Boardman [4]), esta serie de autores presentan en sus resultados un aumento de la velocidad de sedimentación cuando la concentración volumétrica es del orden del 1%, al contrario de los resultados obtenidos experimentalmente, los cuales solos presentan una disminución de la velocidad de sedimentación a medida que aumenta la concentración .

4.3.1. Crítica a resultados de autores en discusión

En el gráfico 4.10 se presentan los resultados que fueron presentados por Bhatti [1], Bickert [2], Johne [3], Kaye y Boardman [4].

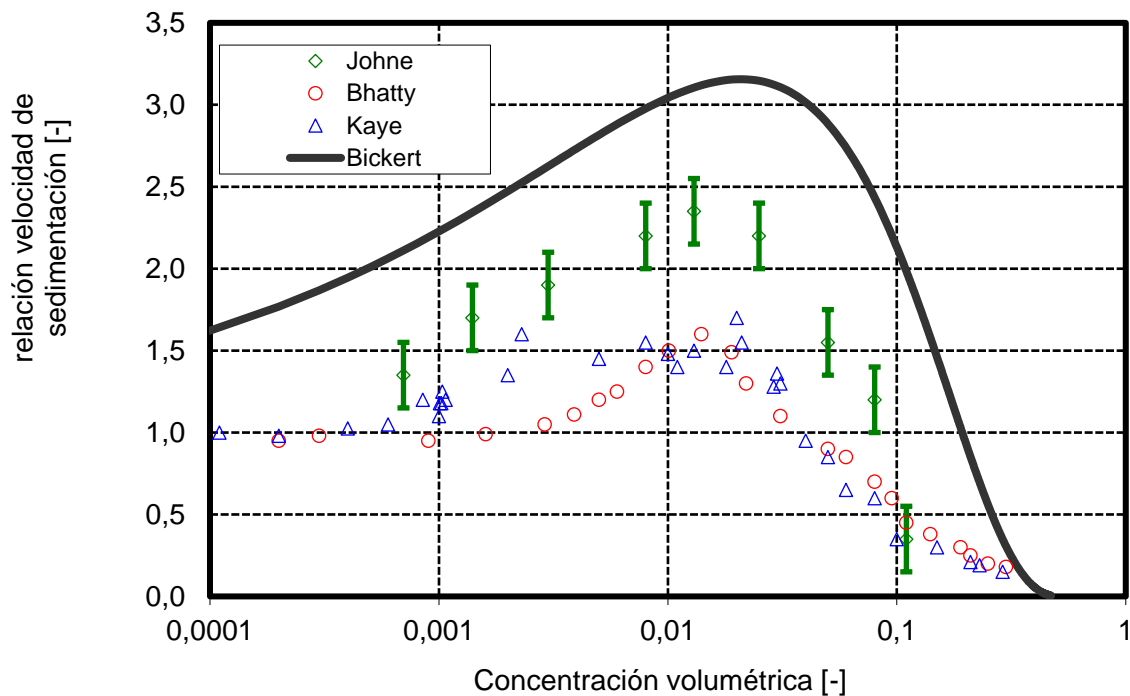


Grafico 4.10 Resultados Bhatti [1], Bickert [2], Johne [3], Kaye y Boardman [4].

Capítulo 4. Análisis de resultados

Se observa qué, si bien todos los autores presentado en el grafico 4.10, están de acuerdo en que existe un fenómeno de sobre velocidad alrededor del área de 1% de concentración volumétrica, la magnitud de los valores para la velocidad normalizada presentados, son muy dispares entre sí, mientras que hay autores que presentan un aumento de no más de un 50% en su peak, otros señalan un aumento de velocidad hasta tres veces sobre la velocidad terminal de Stokes.

Bickert [2] presentó un modelo, pero como se puede observar en el grafico 4.10, su velocidad normalizada comienza con un valor sobre 1, es decir que su velocidad de sedimentación cuando la concentración volumétrica es mínima ya presenta un aumento con respecto a la velocidad nominal de Stokes, recordando que el valor de velocidad normalizada es el cociente entre la velocidad experimental y la velocidad teórica de Stokes. Es por esto por lo que este modelo resulta no creíble, ya que cuando la concentración de partículas es mínima, no existen interacciones entre las partículas que puedan afectar el proceso de sedimentación.

Luego en los estudios presentados por Johnne [3], se observa que existe un gran margen de error en sus resultados. Además , que presentan que la velocidad de sedimentación alcanza su valor mínimo cuando la concentración es del orden del 10% , mucho antes de lo que el resto de la literatura presenta. Por estas razones se presunta que existen errores en estos resultados.

Los resultados presentado por Kaye [4], son muy irregulares en algunas regiones de concentración volumétrica, por lo que se sospecha que pudo haber existido inestabilidades en la muestra , por lo que los resultados presentados por Kaye resultan poco confiables.

Por último, los resultados presentados por Bhatta [1], parecen ser los más estables de los presentados en el grafico 4.9, pero como se mencionó, no existe una reproducibilidad entre los valores presentados en los resultados de estos autores, solo existe una similitud con los resultados propuestos por Kaye, los cuales como se mencionó en el párrafo anterior, presenta muchas irregularidades en ciertas zonas de concentración, mientras que en la comparación con los otros autores, las diferencias son más marcadas entre los valores de la velocidad normalizada.

4.3.2. Posibles causas de los resultados presentados por los autores en discusión

Existe la posibilidad de que haya existido una floculación de partículas, lo que afecta directamente a la velocidad efectiva de sedimentación, esta aglomeración de partículas puede deberse principalmente por la existencia de efectos electroquímicos entre ellos.

Una desestabilización de la muestra provocaría efectos entre las partículas tal como fue presentado en el punto 2.4, los que podría provocar la creación de racimos de partículas, esto afectaría directamente en la velocidad de sedimentación, provocando un aumento en la velocidad efectiva, ya que para cuerpos de mayor tamaño la velocidad de sedimentación es mayor. Mediante una correcta estabilidad de la suspensión se pueden reducir las posibles fuerzas que lograrían aglomeraciones de partículas.

Durante la preparación de las muestras se detalló, en el punto 3.4., un exagerado control del valor de pH de la muestra, el cual se ajustó a un valor de 9 con la ayuda de solución de KOH, esto con el fin de asegurar una correcta estabilidad de la muestra y así evitar la aparición de fuerzas electroquímicas.

El procedimiento mencionado en el párrafo anterior no es contemplado en los resultados presentados por los autores que mencionan la sobre velocidad de sedimentación, por lo que se presume, que una incorrecta estabilización en la preparación de muestras fue lo que llevó a los autores a presentar dichos resultados.

Otra posible causa, es que no poseían una distribución de tamaño estrecha de micropartículas, es decir, si en una suspensión monomodal de partículas, existiese porcentaje de ellas que posean un diámetro mayor y que escapen del valor nominal estimado, esas partículas de mayor tamaño decantarían de forma más rápida, lo que afecta en el valor de la velocidad normalizada. ya que el valor de referencia utilizado, en este caso el valor de la velocidad de Stokes es directamente proporcional al diámetro de partícula, por esto es necesario utilizar una distribución de tamaño de partículas lo más estrecho posible.

Capítulo 4. Análisis de resultados

Los autores no mencionan los detalles de la distribución de tamaño de partículas de los sistemas que utilizaron. Por otro lado, en la preparación de las suspensiones ocupadas para esta memoria, se utilizaron sistemas de partículas con una distribución de tamaño estrecho como se muestra en el capítulo 3.2., para así asegurar un sistema monomodal de partículas.

Una última posible causa es la aparición de efectos hidrodinámicos entre las micropartículas, pero esta hipótesis resulta inverosímil, aun más observando el modelo presentado por Brauer y Kriegel en el punto 4.2, en el cual no se manifiesta el supuesto aumento de velocidad en su modelo, el cual presentaba una corrección para la velocidad de sedimentación, utilizando un enfoque en los efectos hidrodinámicos entre las partículas.

4.4. ¿EXISTE UNA SOBRE VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DE MICROPARTÍCULAS EN LA REGIÓN DEL 1% DE CONCENTRACIÓN VOLUMÉTRICA EN SUSPENSIONES ACUOSAS?

El principal objetivo de este trabajo es determinar la existencia o no, de una sobre velocidad de sedimentación, cuando la concentración de partículas está en la región del 1% de concentración volumétrica.

En el punto 4.1 se presentaron los resultados proporcionados por el Dr.Ing Salinas Salas, los cuales fueron analizados y validados luego en el punto 4.2. en tres diferentes enfoques, por su minucioso procedimiento experimental, físicamente mediante la comparación con la ecuación de continuidad, y mediante la comparación con los resultados presentados por otros autores que como se mencionó son los más aceptados por la comunidad de ingeniería y la científica a la fecha.

Luego, el punto 4.3 se presentaron los resultados por los autores que mencionan un aumento de velocidad, estos fueron analizados y criticados, con el fin de dirimir si pudo haber existido desviaciones y errores en la toma de muestras por parte de los autores. Además, se elucubro sobre las posibles razones por los cuales pudo llevar a los autores a presentar esos resultados, y se infirió que pudo haber existido errores básicamente en el procedimiento experimental llevado por los autores, los cuales no controlaron de forma adecuado todos los parámetros que pudieron afectar los resultados para la velocidad de sedimentación de micropartículas.

Por eso se determina que, para una suspensión, con un sistema monomodal de partículas, estable, y correctamente dispersada no se presentaría ningún aumento de velocidad de sedimentación a medida que la concentración volumétrica de micropartículas aumenta, en particular en la zona del 1%.

CONCLUSIONES

Para la realización de este trabajo, se logró confeccionar un marco teórico sólido y preciso, a partir del análisis del estado del arte en el tema, lo que es presentado en el segundo capítulo. Este marco teórico permite adquirir los conocimientos necesarios, para comprender, de forma clara la problemática planteada, de modo de determinar el comportamiento de la velocidad de sedimentación en función de la concentración volumétrica de partículas, en el rango de medición del equipo empleado, cuyo principio de funcionamiento es óptico, por lo que analiza con mucha precisión el comportamiento de suspensiones diluidas de agua, en particular la zona de interés. En la revisión del estado del arte permitió elaborar, una descripción del proceso de sedimentación de micropartículas, así como, el modelo teórico presentado por Stokes que modela la velocidad de sedimentación de micropartículas en régimen laminar, del mismo modo que se dio cuenta de la forma en que la concentración volumétrica del sólido (fase discontinua), puede generar interacciones entre estas partículas, las que alteran la velocidad de sedimentación. Para finalizar el capítulo se detallan los fundamentos ópticos de los equipos utilizados, así como los conocimientos necesarios para la interpretación del comportamiento de la distribución de tamaño de partículas en un sistema monomodal. Todo lo anterior, sirvió como base para desarrollar una adecuada comprensión del fenómeno y realizar un análisis de los resultados obtenidos experimentalmente y su contrastación con los existentes en la literatura técnica.

Luego, como segunda conclusión que se obtiene del trabajo, es la descripción detallada del trabajo experimental realizado, para la obtención de los datos de las mediciones desarrolladas. Dentro de esto se describen los diferentes sistemas de partículas utilizados, para la preparación de las suspensiones, así como las características del fluido en el cual se dispersaron (fase continua), en este caso agua, la que se estabilizó mediante la adición de hidróxido de potasio (KOH). A su vez, los sistemas de micropartículas empleados corresponden a calibres industriales, provistos por la empresa Geltech Inc.®, en tres distintos tamaños nominales los que corresponden a 200nm, 500nm, 1500nm. Cabe agregar que estas partículas, son de dióxido de silicio (SiO_2), comúnmente denominadas vidrio, y poseen características que son relevantes para su escurrimiento durante el proceso de sedimentación, ya que son de forma esférica y lisas. A su vez estos calibres presentan, una distribución de tamaño perfectamente monomodal, lo que

Conclusiones

se determinó previo a la preparación de la suspensión, y después de la preparación de la suspensión, a partir de una muestra tomada de estas. También se detalla paso a paso el proceso de la preparación de las suspensiones empleadas, y la forma en que se aseguró una adecuada dispersión del sistema de partículas para la conformación de la suspensión. Su estabilidad, como ya se indicó, se asegura mediante la adición de KOH y el control del valor del pH de la suspensión, que es del orden de 9, a fin de asegurar la estabilidad de la suspensión, para evitar procesos de floculación o la formación de “clúster” al momento de realizar las mediciones. Estas mediciones fueron realizadas empleando una centrifuga analítica Shimadzu SA-CP3, la cual esta descrita en tercer capítulo junto con el resto de los instrumentos y equipos de laboratorio que fueron utilizados tanto para la preparación de las suspensiones como las mediciones de distribución de tamaño y velocidad.

El tercer objetivo de este trabajo era presentar y contrastar los resultados obtenidos, con respecto a los presentados por la literatura técnica, para eso, primero se realiza el cálculo de la velocidad de Stokes para cada sistema de partículas, este valor se calcula teóricamente y se utiliza como valor de referencia para calcular la velocidad normalizada v_n . La velocidad normalizada se calcula a fin de realizar comparaciones validas entre sistemas de partículas de distinto tamaño, que son sometidas a distintos campos de fuerza centrífuga. Esta situación da lugar a velocidades de sedimentación de distintas magnitudes, las cuales, al ser normalizadas con la velocidad de Stokes, representan, el comportamiento de la velocidad de sedimentación, permitiendo así, realizar su análisis y comparación. Los resultados experimentales que fueron obtenidos para los sistemas de partículas Geltech 201®, Geltech 1001® y Geltech 1501®, fueron representados y graficados, donde se pudo observar que su comportamiento, no se presenta un aumento en la velocidad de sedimentación, en un determinado rango de concentración volumétrica, como lo mencionan ciertos autores. La confiabilidad de estos resultados se validó desde tres enfoques:

- a) A partir del meticuloso procedimiento experimental desarrollado, en el cual se aseguró una correcta dispersión de la fase discontinua en la suspensión, así como la estabilización de éstas.

Conclusiones

- b) Segundo, según el principio de conservación de masa, existe un flujo de la fase continua en sentido opuesto al movimiento de las partículas. Esto daría lugar a una disminución en su velocidad de sedimentación, y se encuentra modelado a partir de la ecuación de continuidad. Este modelo y sus resultados fueron comparados con los resultados experimentales obtenidos, pudiéndose observar que el comportamiento de ambas curvas era similar, pero se diferencian en sus pendientes, dado que la ecuación de continuidad no considera los posibles efectos de interacción entre las partículas y el medio continuo.
- c) Tercero, al comparar los resultados experimentales obtenidos, con los generados a partir de los modelos propuestos por distintos autores, y que son de uso general, entre los cuales se encuentran los modelos semi-empíricos de Richardson y Zaki [7], además del de Steinour [15], los que se basan en la ecuación de continuidad, y considera factores de corrección, los que fueron obtenidos en forma empírica. Por otro lado, el modelo desarrollado por Brauer y Kriegel [9] que es de carácter hidrodinámico, por lo que también considera la ecuación de continuidad, pero agrega los efectos de interacciones hidrodinámicas que se presentan durante la sedimentación. Todos estos modelos, siguen un comportamiento análogo al comportamiento de los resultados obtenidos experimentalmente. Es decir, no se presenta un aumento de velocidad de sedimentación, en particular, en la zona que indican otros autores, que es del orden del 1% de concentración volumétrica.
- d) Por último, los resultados experimentales obtenidos, fueron validados en términos de tendencias, y de inexistencia del fenómeno de sobre velocidad de sedimentación, en función de la concentración volumétrica, por los resultados experimentales reportados por otros autores, como: Cheng y Schachman [5], McNown y Lin [6].

Conclusiones

Otra conclusión se obtiene del análisis que se les realizó a los resultados presentados por algunos autores de la literatura técnica, en los cuales sus valores, presentan un aumento de la velocidad de sedimentación en función de la concentración de la fase discontinua, en particular en la zona del 1% de concentración volumétrica de micropartículas. Estos resultados fueron criticados y se concluyó que pudieron existir errores o parámetros que no fueron debidamente controlados, los cuales llevaron a esos autores a presentar ese comportamiento de la velocidad de sedimentación, Bickert [2], presenta un modelo en donde el valor inicial ya presenta un aumento con respecto a la velocidad estacionaria de Stokes, el cual debería ser el valor cuando la concentración no afecta el sistema, es decir es mínima, por eso se considera poco confiable, Otro autor Johnne [3], presenta resultados con un alto grado de incertidumbre, además, de que decae a un valor mínimo de forma anticipada al resto de los resultados presentados mientras que Kaye [4] presenta muchas irregularidades en los resultados que publicó, por lo que se sospecha de una posible inestabilidad de la muestra. Por esto se dedujo que, a pesar de que todos estos autores reportan un fenómeno de sobre velocidad de sedimentación de micropartículas, las magnitudes y las tendencias de sus resultados son dispares entre sí, es decir, no logran reproducir los valores entre ellos, al contrario de los resultados obtenidos experimentalmente.

Por último, se elucubró sobre las posibles razones por las cuales llevaron a los autores, a presentar ese aumento en la velocidad de sedimentación, se determinó que lo más probable, es la aparición de aglomeración o racimos de partículas, esto producido por las interacciones electroquímicas que pueden existir entre las partículas en un medio acuoso, las cuales aparecen, al no llevar un correcto control de algunos parámetros de solución, en este caso el pH de la solución que representa la cantidad de iones de hidrogeno (H), los registros, mediciones e influencia del valor de pH de las soluciones, no son considerador por los autores anteriormente mencionados. Otra causa es que no se traten de sistemas monomodales de micropartículas, esto puede producirse si se tiene una distribución de tamaño de partículas poco estrecha, es decir existe un porcentaje de partículas cuyos diámetros son muy alejados del valor medio de tamaño de partículas calculado, por lo que estos cuerpos de mayor tamaño, sedimentan más rápidos que el resto de las partículas de diámetro medio, estos distintos tamaños de partículas, no son advertidos por los instrumentos de medición, los cuales miden los valores como un único

Conclusiones

sistema monomodal de partículas, por esto los valores de la velocidad efectiva y por lo tanto la velocidad normalizada se verán afectados, lo que pudo producir el fenómeno. Una última posible causa, mencionaba aparición de efectos hidrodinámicos que pueden afectar la sedimentación, esta fue descartada debido al modelo de Brauer y Kriegel, ellos presentan un modelo enfocado en los efectos hidrodinámicos, y no presentan en sus resultados ningún aumento de velocidad que pueda respaldar a los autores en discusión.

De forma general se puede concluir que se realizó un trabajo, el cual satisface los cumplimientos tantos de los objetivos específicos como del objetivo general del proyecto, se determina que, para una suspensión, con un sistema monomodal de micropartículas, estable, y correctamente dispersada, no se presentaría ningún aumento de velocidad de sedimentación a medida que la concentración volumétrica de micropartículas aumenta, en particular en la zona del 1%. Además, se presentaron posibles causas que llevaron a algunos autores a presentar un aumento de velocidad en sus resultados, estas hipótesis sirven como base para futuras investigaciones, en las que se debería desarrollar un modelo semi-empírico, en el que se dé cuenta la influencia del valor del pH de la solución, que a la fecha con los datos en posesión, el comportamiento estaría en una condición crítica cuando el pH es de orden de 3 para luego comenzar a descender la floculación y por ende el incremento de velocidad, donde el valor 3 es la condición máxima para este tipo de suspensiones según lo reportado por León Castro [16], que dio cuenta de ese punto crítico de valor de pH.

REFERENCIAS

- [1] Bhatti I. J.
Cluster formation during sedimentation of dilute suspensions
Science and Technologie 21 (1986), 9, S.953-967
- [2] Bickert G.
Sedimentation feinsten suspendierter Partikeln im Zentrifugalfeld
Dissertation; Universität Fridericiana Karlsruhe (1997)
- [3] Johne R.
Einfluß der Konzentration einer monodispersen Suspensionen auf die
Sinkgeschwindigkeit ihrer Teilchen
Fortschritt-Berichte VDI - Reihe 3, (1966)
- [4] Kaye B. H. und Boardman R. P.
Cluster formation in dilute suspensions
3er Congr. Europ. Fed. Chem. Eng. London (1962), A 17–21
- [5] Cheng P. Y. , Schachman H. K.
Studies on the validity of the Einstein viscosity law and Stokes law of sedimentation
Journal Polymer Sci. 16 (1955), S.19-30
- [6] McNown J. S., Lin P. N.
Sediment concentration and fall velocity.
Proceedings of the Second Midwestern Conference on Fluid Mechanics (1952), S.401-412

Referencias

- [7] Richardson J. F., Zaki W. N.
Sedimentation and Fluidisation. Part I
Trans. Inst. Chem. Eng. 32 (1954), S.35-53
- [8] Salinas-Salas G.
Dissertacion: „Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen“
Fakultät Maschinenwesen an der Technischen Universität Dresden (2007)
- [9] Brauer, H., & Kriegel, E.
Kornbewegung bei der sedimentation.
Chem. Ing. Techn. 38 (1966)
- [10] Happel J., Brenner H.
Low Reynolds number hydrodynamics with special applications to particulate media
Noordhoff International Publishing Leyden (1973)
- [11] Deryarin B. V., Landau L.
Theory of the stability of strongly charged hydrophobic sols and the adhesion of strongly charged particles in solution electrolytes.
Acta Physiochim. URSS 14 (1941), S.633 – 662
- [12] Vervey E. J. W., Overbeek J.
Theory of the stability of Lyophobic Colloids
Elsevier Amsterdam, (1941)
- [13] Wiese G. R., Healy T. W.
Trans Faraday Soc. 66 (1970)

Referencias

- [14] Zeta-Meter, Inc.
Potencial Zeta: Un Curso Completo en 5 Minutos
- [15] H. Steinour.
Rate of sedimentation: Non-flocculated suspensions of uniform spheres
Ind. Eng. Chem. Vol. 36 N° 7. (1944)
- [16] J. Leon Castro
Determinación y análisis del comportamiento de la velocidad de sedimentación terminal de micro partículas suspendidas en agua, ante cambios del índice de acides de la suspensión.
Universidad de Talca (2020)
- [17] Brauer H.
Grundlagen der Einphasen-und Mehrphasenströmungen
Sauerländer A. G., 1. Auflage (1971)

ANEXOS

ANEXO 1. DATOS TECNICOS EQUIPOS DE LABORATORIO UTILIZADOS.

1.1. Balanza SARTORIUS AC 210S

Capacidad de resolución	210 g x 0.1 mg
Linealidad	0.2 mg
Rango capacidad	Simple (fijo)
Peso de calibración	150g
Características de peso calibración interna	
Peso de prueba de esquina	100 g
Tolerancia de esquina	0.3 mg
Peso de precarga	100 g
Tolerancia de precarga	10>51mV
Clase de peso de calibración	E2

1.2. Homogeneizador ULTRATURRAX T50

Potencia del consumo del motor	1100 W
Potencia del suministro del motor	700 W
Rango de volumen	0.25 – 30 l
Máxima viscosidad	5000 mPa s
Rango de velocidad	600 – 10000 rpm
Desviación de velocidad	0,01
Control de velocidad	Progresión
Indicador de velocidad	LED
Ruido sin el elemento	72 dB
Diámetro del Brazo de extensión	16 mm

Longitud del brazo de extensión	220 mm
Tipo de proceso	Lote
Tiempo permitido encendido	1
Dimensiones (an x al x pr)	115 x 355 x 139 mm
Peso	5.85 kg
Temperatura ambiental permitida	5° – 40 °C
Condiciones ambientales admisibles de humedad	80 % hasta 31 °C, disminuyendo linealmente hasta máximo 50% en 40°C
Clase de protección de acuerdo con DIN EN 60529	IP 20
Voltaje	220 – 240 / 100 -120 V
Frecuencia	50/60 Hz
Consumo de energía	1100 W

1.3. Espectrómetro de difracción laser Helos

Principio de funcionamiento	Difracción laser a 632,8 nm
Rango de medición	f a 20 mm: 180 – 35000 nm
	f a 100 mm: 900 – 175000 nm
Dispositivo de medición	Detector de elementos múltiples con 31 elementos semicirculares
Evaluación	Fraunhofer o MIE
Salida	Distribución acumulativa Qi
	Distribución de densidad qi

1.4. Microscopio electrónico ZEISS GEMINI

Resolución máxima	0.8 nm a 15 Kv, de 1,4 nm a 1kv y 2,4 nm a 0,2 Kv
Rango potencial de aceleración	0.02 V – 30 kV
Corriente del haz	10 pA – 300 nA

Detectores de electrones	Detector de electrones secundarios SE-Everhart-Thornley
	Detector de electrones secundarios de alta resolución, SE in lens
	Detector de electrones retro dispersados AsB
	Detector de electrones retro dispersados de alta resolución EsB in lens
	Detector de catodoluminiscencia, CL
Software	SmartSem
Detectores del sistema de análisis químico	Detector de rayos X EDX, Oxford Inca Energy 350X-MAX 50, con resolución lineal de 127eV en Mn K α de 1 a 100.000cps
	Espectrómetro WDX, Oxford Inca Wave 500, con círculo de Rowland de 210 mm y rango 2 θ de 33° a 135° C

ANEXO 2. DISTRIBUCION DE TAMAÑO DE LOS SISTEMAS DE PARTICULAS.

2.1. Tabla de distribución de tamaño para micropartículas Geltech 201®.

Diámetro	Variación diámetro	Masa		Distribución acumulativa másica	Distribución incremental másica	Diámetro medio
d_p (μm)	Δd_p (μm)	m_i (g)	$\Delta Q3i$	Q3	$q3$ ($1/(\mu m)$)	d_p (μm)
0,18	0,18	39,61	0,66111	0,66111	3,67283	0,09
0,22	0,04	7,34	0,12245	0,78356	3,06137	0,2
0,26	0,04	4,39	0,07328	0,85684	1,83199	0,24
0,3	0,04	2,77	0,04630	0,90314	1,15747	0,28
0,36	0,06	2,46	0,04105	0,94419	0,68421	0,33
0,44	0,08	1,67	0,02793	0,97212	0,34910	0,4
0,52	0,08	0,82	0,01367	0,98579	0,17090	0,48
0,62	0,1	0,47	0,00786	0,99365	0,07858	0,57
0,74	0,12	0,22	0,00367	0,99732	0,03056	0,68
0,86	0,12	0,08	0,00134	0,99866	0,01116	0,8
1	0,14	0,04	0,00060	0,99926	0,00428	0,93
1,2	0,2	0,02	0,00034	0,99960	0,00168	1,1
1,5	0,3	0,01	0,00021	0,99981	0,00070	1,35
1,8	0,3	0,01	0,00009	0,99990	0,00031	1,65
2,1	0,3	0,00	0,00004	0,99994	0,00013	1,95
2,5	0,4	0,00	0,00003	0,99997	0,00007	2,3
3	0,5	0,00	0,00002	0,99998	0,00004	2,75
3,6	0,6	0,00	0,00001	0,99999	0,00002	3,3

2.1. Tabla de distribución de tamaño para micropartículas Geltech 1001®.

Diámetro	Variación diámetro	Masa		Distribución acumulativa másica	Distribución incremental másica	Diámetro medio
d_p (μm)	Δd_p (μm)	m_i (g)	ΔQ_{3i}	Q_3	q_3 ($1/(\mu m)$)	d_p (μm)
0,52	0,08	0	0	0	0	0,48
0,62	0,1	0	0	0	0	0,57
0,74	0,12	0,0244886	0,02591313	0,02591313	0,21594277	0,68
0,86	0,12	0,24140625	0,25544914	0,28136227	2,12874283	0,8
1	0,14	0,33952586	0,35927648	0,64063875	2,56626058	0,93
1,2	0,2	0,24447784	0,2586994	0,89933816	1,29349702	1,1
1,5	0,3	0,08112584	0,08584503	0,98518319	0,28615011	1,35
1,8	0,3	0,01177616	0,0124612	0,99764439	0,04153732	1,65
2,1	0,3	0,00199599	0,0021121	0,99975648	0,00704032	1,95
2,5	0,4	0,00023013	0,00024352	1	0,00060879	2,3
3	0,5	0	0	1	0	2,75
3,6	0,6	0	0	1	0	3,3
4,2	0,6	0	0	1	0	3,9
5	0,8	0	0	1	0	4,6

2.3. Tabla de distribución de tamaño para micropartículas Geltech 1501®.

Diámetro	Variación diámetro	Masa		Distribución acumulativa másica	Distribución incremental másica	Diámetro medio
$d_p (\mu m)$	$\Delta d_p (\mu m)$	$m_i (g)$	ΔQ_{3i}	Q_3	$q_3 (1/(\mu m))$	$d_p (\mu m)$
0,62	0,1	0	0	0	0	0,57
0,74	0,12	0	0	0	0	0,68
0,86	0,12	0	0	0	0	0,8
1	0,14	0,01305391	0,03189925	0,03189925	0,22785177	0,93
1,2	0,2	0,17588279	0,42979697	0,46169622	2,14898486	1,1
1,5	0,3	0,16237362	0,39678521	0,85848143	1,32261735	1,35
1,8	0,3	0,0426079	0,10411903	0,96260045	0,34706342	1,65
2,1	0,3	0,01104536	0,02699107	0,98959152	0,08997022	1,95
2,5	0,4	0,00303279	0,0074111	0,99700262	0,01852776	2,3
3	0,5	0,00084147	0,00205627	0,99905889	0,00411254	2,75
3,6	0,6	0,00025044	0,00061198	0,99967088	0,00101997	3,3
4,2	0,6	8,0918E-05	0,00019774	0,99986861	0,00032956	3,9
5	0,8	3,0821E-05	7,5316E-05	0,99994393	9,4145E-05	4,6
6	1	1,0819E-05	2,6438E-05	0,99997037	2,6438E-05	5,5
7,2	1,2	4,8696E-06	1,19E-05	0,99998227	9,9164E-06	6,6
8,6	1,4	5,0706E-06	1,2391E-05	0,99999466	8,8506E-06	7,9
10,2	1,6	1,6856E-06	4,1189E-06	0,99999878	2,5743E-06	9,4
12,2	2	2,1353E-07	5,218E-07	0,9999993	2,609E-07	11,2
14,6	2,4	0	0	0,9999993	0	13,4
17,4	2,8	0	0	0,9999993	0	16
20,6	3,2	4,3738E-08	1,0688E-07	0,99999941	3,34E-08	19
24,6	4	1,2128E-07	2,9638E-07	0,9999997	7,4094E-08	22,6
29,4	4,8	1,2193E-07	2,9796E-07	1	6,2075E-08	27
35	5,6	0	0	1	0	32,2

ANEXO 3. Desarrollo de cálculos

3.1. Velocidad de Stokes Geltech 201®

Según los valores obtenidos para el sistema Geltech 201®, los cuales se muestran a continuación, y utilizando la ecuación 2.10 se obtiene el valor de la velocidad de Stokes.

Densidad de partícula (ρ_p)	: 2122 (kg/m ³)
Densidad del fluido (ρ_f)	: 997,8 (kg/m ³)
Diámetro de partícula (d_p)	: 0,25 (µm)
Velocidad de giro (rpm)	: 2000
Viscosidad dinámica del fluido (μ_f)	: 0,00096 Pa·s
Radio de giro	: 0,11256 m

$$v_s = \frac{(2122 - 997,8) \cdot (0,25 \cdot 10^{-6})^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 2000}{60}\right)^2 \cdot 0,11256}{18 \cdot 0,00096} = 20,0762 \frac{\mu m}{s}$$

3.2. Velocidad de Stokes Geltech 1001®

Según los valores obtenidos para el sistema Geltech 1001®, los cuales se muestran a continuación, y utilizando la ecuación 2.10 se obtiene el valor de la velocidad de Stokes.

Para este sistema se utilizaron distintas velocidad de giro para obtener mejores resultados debido a su diámetro.

Densidad de partícula (ρ_p)	: 2200 (kg/m ³)
Densidad del fluido (ρ_f)	: 997,8 (kg/m ³)
Diámetro de partícula (d_p)	: 1,2 (µm)
Velocidad de giro (rpm)	: 500, 750, 1000
Viscosidad dinámica del fluido (μ_f)	: 0,00096 Pa·s
Radio de giro	: 0,11256 m

$$v_s = \frac{(2200 - 997,8) \cdot (1,2 \cdot 10^{-6})^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 500}{60}\right)^2 \cdot 0,11256}{18 \cdot 0,00096} = 30,92 \frac{\mu m}{s}$$

$$v_s = \frac{(2200 - 997,8) \cdot (1,2 \cdot 10^{-6})^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 750}{60}\right)^2 \cdot 0,11256}{18 \cdot 0,00096} = 69,56 \frac{\mu m}{s}$$

$$v_s = \frac{(2200 - 997,8) \cdot (1,2 \cdot 10^{-6})^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 1000}{60}\right)^2 \cdot 0,11256}{18 \cdot 0,00096} = 123,66 \frac{\mu m}{s}$$

3.3. Velocidad de Stokes Geltech 1501®

Según los valores obtenidos para el sistema Geltech 1001®, los cuales se muestran a continuación, y utilizando la ecuación 2.10 se obtiene el valor de la velocidad de Stokes. Para este sistema se utilizaron distintas velocidad de giro para obtener mejores resultados debido a su diámetro

Densidad de partícula (ρ_p)	: 2150 (kg/m ³)
Densidad del fluido (ρ_f)	: 997,8 (kg/m ³)
Diámetro de partícula (d_p)	: 1,5 (µm)
Velocidad de giro (rpm)	: 500, 750, 1000
Viscosidad dinámica del fluido (μ_f)	: 0,00096 Pa·s
Radio de giro	: 0,11256 m

$$v_s = \frac{(2150 - 997,8) \cdot (1,5 \cdot 10^{-6})^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 500}{60}\right)^2 \cdot 0,11256}{18 \cdot 0,00096} = 123,66 \frac{\mu m}{s}$$

$$v_s = \frac{(2150 - 997,8) \cdot (1,5 \cdot 10^{-6})^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 750}{60}\right)^2 \cdot 0,11256}{18 \cdot 0,00096} = 123,66 \frac{\mu m}{s}$$

$$v_s = \frac{(2150 - 997,8) \cdot (1,5 \cdot 10^{-6})^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 1000}{60}\right)^2 \cdot 0,11256}{18 \cdot 0,00096} = 123,66 \frac{\mu m}{s}$$