



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

**DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO
DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN TERMINAL DE
MICROPARTÍCULAS SUSPENDIDAS EN AGUA, ANTE
CAMBIOS DEL ÍNDICE DE ACIDEZ DE LA SUSPENSIÓN**

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

PROF. GUÍA: DR.-ING. GONZALO SALINAS-SALAS

JORGE ANDRÉS LEÓN CASTRO

**CURICÓ - CHILE
2020**

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 las personas que de alguna u otra manera fueron participes de mi etapa como universitario y del presente trabajo.

Primero agradezco a mis queridos padres, por su cariño, esfuerzo para sacarme adelante, valores inculcados y apoyo incondicional que me brindaron en todo momento, sobre todo en los difíciles. Su apoyo hizo más sencillo superar cada obstáculo y sobreponerme a la adversidad. Sin ustedes no me habría sido posible finalizar con mis estudios y ser la persona que soy.

También quiero agradecer a mí hermana Yeny y a mí cuñado Carlos, que siempre estuvieron apoyándome y por sus consejos que sin duda fueron de gran ayuda.

De igual forma agradezco al profesor Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas, por su gran apoyo, paciencia y orientación durante toda mí etapa universitaria. Él es uno de los profesores que siempre recordaré, por su gran profesionalismo y vocación para enseñar. Gracias a sus conocimientos y apoyo me fue posible salir adelante en el desarrollo de esta memoria.

Por último, quiero agradecerles a todos mis colegas que de alguna u otra forma fueron un apoyo, sobre todo Francisco, Paulo, Carlos y Javier. Por siempre estar ahí cuando los necesité y por los buenos momentos vividos durante todos estos años que sin duda harán inolvidable mí etapa universitaria.

Gracias a cada uno de ustedes me fue posible finalizar con éxito esta memoria.

Jorge Andrés León Castro

*Dedicada a mis padres
Elba Castro Lorca y Jorge León Reyes
Gran parte de lo que soy es gracias a ustedes*

RESUMEN

Este trabajo se realizó con el objeto de determinar y analizar el comportamiento de la velocidad de sedimentación terminal de micropartículas de un tamaño medio de 500 nm suspendidas en agua, ante cambios del índice de acidez (pH), de la suspensión mediante el uso de nitrato de potasio (KNO_3). El estudio fue en base a datos de carácter secundario.

Como parte integrante del trabajo se describe la modelación matemática clásica de los procesos de sedimentación, de la interacción electroquímica entre partículas y la medición fotométrica de estas. Tras lo cual se describe detalladamente el sistema de partículas empleado, preparación de las suspensiones, la metodología experimental utilizada y los resultados alcanzados, en este caso de velocidad de sedimentación del sistema de partículas.

Los resultados son sometidos a un proceso de análisis y discusión, del cual fue posible desprender la relevancia de la variación del pH de la suspensión, el que influye significativamente en la magnitud de las fuerzas de interacción electroquímicas, las que permiten la formación de flóculos y con ello incremento de la velocidad de sedimentación. Paralelamente se hizo patente la importancia de la influencia del tiempo que requiere el proceso de formación de flóculos, de manera que mientras mayor sea el tiempo que lleve el proceso de sedimentación mayor será la formación de flóculos y por ende el incremento de la velocidad de sedimentación.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA	3
1.4. OBJETIVOS	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. RESULTADOS ESPERADOS	4
1.6. METODOLOGÍA	4
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. MÉTODOS DE SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS	7
2.2. SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS	9
2.2.1. Ley de Stokes	11
2.2.2. Campo de fuerza centrífugo	12
2.2.3. Fuerza centrífuga	14
2.2.4. Factor de incremento de aceleración gravitacional	14
2.2.5. Fuerza de flotación	15
2.2.6. Fuerza de arrastre	16
2.2.7. Área transversal de la partícula	16
2.2.8. Número de Reynolds	16
2.3. INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS	18
2.3.1. Fuerzas de van der Waals	19
2.3.2. Repulsión de Born	20

2.3.3.	Potencial Zeta	20
2.4.	FUNDAMENTOS DE ÓPTICA APLICADOS A LA DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN.....	22
2.4.1.	Ley de Lambert-Beer.....	22
2.4.2.	Área específica de extinción.....	23
2.4.3.	Tamaño de partícula en función de variables ópticas.....	24
CAPÍTULO 3.	OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES.....	25
3.1.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PARTÍCULAS	26
3.2.	CENTRÍFUGA ANALÍTICA LUMIFUGE 114	28
3.3.	EQUIPOS ADICIONALES	32
3.3.1.	Balanza de laboratorio	32
3.3.2.	Ultra-turrax	32
3.3.3.	Ultrahomogeneizador vibra-cell VCX500	32
3.3.4.	Agitador magnético	32
3.3.5.	Célula vibra del homogeneizador ultrasónico (Bioblock Scientific).....	32
3.3.6.	Medidor de conductividad y medidor de pH WTW Multilab 540	33
3.3.7.	Espectrómetro ultrasónico con potencial Zeta DT1200	33
3.3.8.	Microscopio electrónico Zeiss.....	33
3.4.	PREPARACIÓN DE LAS SUSPENSIONES.....	34
3.5.	ADQUISICIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES.....	35
CAPÍTULO 4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
4.1.	PREPARACIÓN DE LOS VALORES PARA EL ANÁLISIS	38
4.2.	DISCUSIÓN.....	40
CONCLUSIONES.....		44
REFERENCIAS		46

ANEXOS	47
A. MEDICIONES CENTRIFUGA ANÁLITICA LUMIFUGE 114.....	48
A.1 Velocidad 900 rpm	48
A.2 Velocidad 1.200 rpm	49
A.3 Velocidad 1.800 rpm	50
B. CÁLCULO VELOCIDADES NORMALIZADAS	51
B.1. Velocidades normalizadas a 900 rpm	52
B.2. Velocidades normalizadas a 1.200 rpm	53
B.3. Velocidades normalizadas a 1.800 rpm	54
C. GRÁFICOS VELOCIDADES NORMALIZADAS	55
C.1 Velocidad 900 rpm.....	55
C.2. Velocidad 1.200 rpm.....	56
C.3. Velocidad 1.800 rpm.....	57
D. EQUIPOS UTILIZADOS	58
D.1. Utraturrax T-50.....	58
D.2. Homogeneizador ultrasónico vibra-cell VCX 500	59
D.3. Agitador magnético RH digital.....	60

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.1 Diagrama cuerpo libre partícula sometida a fuerzas del campo gravitatorio. Fuente: Elaboración propia.....	10
Ilustración 2.2 Diagrama cuerpo libre, partículas están sometidas a los efectos de un campo centrífugo. Fuente: Elaboración propia	13
Ilustración 2.3 Partículas cargadas se repelan unas a otras.	18
Ilustración 2.4 Partículas sin carga, están libres para chocar y aglomerar.	19
Ilustración 3.1 Sistema de partículas Geltech 500 nm, microscopio electrónico Zeiss. Fuente: Salinas-Salas , Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen suspensionen, 2007.....	27
Ilustración 3.2 Disposición de medición centrifuga LUMiFuge 114. Fuente: L.U.M. GmbH .	28
Ilustración 3.3 Perfiles de transmisión LUMiFuge 114. Fuente: Sedimentationsverhalten von Submikrometer Partikeln in wässrigen suspensionen, Salinas-Salas, 2007	29
Ilustración 3.4 Centrifuga analítica LUMiFuge 114. Fuente: fotografía proporcionada por Dr. Ing. Gonzalo Salinas-Salas	29
Ilustración 3.5 Geometría cubeta centrifuga LUMiFuge 114, espesor de capa 1 mm, material policarbonato. Fuente: Sedimentationsverhalten von Submikrometer Partikeln in wässrigen suspensionen, Salinas-Salas, 2007	31

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 Relación entre el potencial Zeta y el potencial de PCD para suspensión Geltech 500 nm en agua, dependiendo del valor de pH. Fuente: Salinas-Salas, 2007.	27
Gráfico 3.2 Velocidad experimental de sedimentación, partículas Geltech 500 nm, sometidas a diferentes rangos de pH y velocidad de giro. Fuente: Elaboración propia en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas	36
Gráfico 4.1 Velocidad normalizada de sedimentación, partículas Geltech 500 nm, sometidas a diferentes rangos de pH y velocidad de giro. Fuente: Elaboración propia en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas	40
Gráfico A.1 Velocidad de sedimentación experimental de partículas Geltech 500 nm, a una velocidad de sedimentación de 900 rpm. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas	49
Gráfico A.2 Velocidad de sedimentación experimental de partículas Geltech 500 nm, a una velocidad de sedimentación de 1.200 rpm. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios proporcionados por Dr. Ing Gonzalo Salinas Salas	500
Gráfico A.3 Velocidad de sedimentación experimental de partículas Geltech 500 nm, a una velocidad de sedimentación de 1.800 rpm. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios proporcionados por Dr. Ing Gonzalo Salinas Salas	51
Gráfico C.1 Velocidad normalizada a 900 rpm, partículas Geltech 500 nm. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.....	55
Gráfico C.2 Velocidad normalizada a 1.200 rpm, partículas Geltech 500 nm. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.....	56
Gráfico C.3 Velocidad normalizada a 1.800 rpm, partículas Geltech 500 nm. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de analizadores centrífugos. Fuente: Powder Sampling and size sedimentation.....	8
Tabla 2.2 Estabilidad de una suspensión según el valor del potencial Zeta. Fuente: Floculación y viscosidad de suspensiones de sílice coloidal en presencia de sales de agua de mar. Cristian Romero.	21
Tabla 3.1 Tamaño del sistema de partículas utilizado, medidos con diferentes equipos de medición. Fuente: Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen. Dr.- Ing. Gonzalo Salinas Salas.....	26
Tabla 3.2 Datos técnicos centrifuga analítica LUMiFuge 114. Fuente: Sedimentationsverhalten von Submikrometer Partikeln in wässrigen suspensionen, Salinas-Salas, 2007	30
Tabla 3.3 Datos experimentales, medición centrífuga analítica LUMiFuge 114 a diferentes valores de pH y velocidades de giro. Fuente: elaboración propia en base a datos secundarios , proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.	35
Tabla 4.1 Velocidades de Stokes correspondientes a las diferentes velocidades de la centrifuga LUMiFuge 114. Fuente: Sedimentationsverhalten von Submikrometer Partikeln in wässrigen suspensionen, Salinas-Salas, 2007	39
Tabla 4.2 Valores velocidad de sedimentación normalizada. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.....	39
Tabla A.1 Datos velocidad de sedimentación experimental a una velocidad de 900 rpm. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas	48
Tabla A.2 Datos velocidad de sedimentación experimental a una velocidad de 1.200 rpm. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.....	49
Tabla A.3 Datos velocidad de sedimentación experimental a una velocidad de 1.800 rpm. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.....	50
Tabla D.1 Especificaciones técnicas Ultraturax T-50. Fuente: www.ika.com.....	58

Tabla D.3 Especificaciones técnicas agitador magnético RH digital. Fuente: www.ika.com ..60

NOMENCLATURA

Símbolo	Significado	Unidad
A_p	<i>Área específica de extinción</i>	m^2
A_T	<i>Área transversal de la partícula</i>	m^2
c	<i>Concentración volumétrica de la suspensión</i>	-
C_w	<i>Coefficiente de arrastre de la partícula</i>	-
E	<i>Extinción</i>	-
F_a	<i>Fuerza de arrastre que actúa sobre la partícula</i>	N
F_c	<i>Fuerza centrífuga</i>	N
F_f	<i>Fuerza de flotación que actúa sobre la partícula</i>	N
F_z	<i>Fuerza de aceleración</i>	N
g	<i>Aceleración de gravedad</i>	m/s^2
I	<i>Intensidad de la luz que atraviesa la cubeta con la suspensión sedimentando</i>	W/m^2
I_0	<i>Intensidad de luz que atraviesa la cubeta con la suspensión inicial</i>	W/m^2
$K(x)$	<i>Coefficiente de extinción</i>	-
L	<i>Ancho de la cubeta del equipo de medición</i>	m
m_p	<i>Masa de la partícula analizada</i>	kg
pH	<i>Índice de acidez</i>	-
ρ_f	<i>Densidad del fluido</i>	Kg/m^3
ρ_p	<i>Densidad de la partícula</i>	Kg/m^3
r	<i>Radio de giro de la partícula</i>	m
Re	<i>Número de Reynolds</i>	-
T	<i>Transmisión</i>	-
t	<i>Tiempo</i>	s
μ_f	<i>Viscosidad dinámica</i>	$Pa \cdot s$
V_p	<i>Volumen de la partícula</i>	m^3
v_{medida}	<i>Velocidad medida</i>	$\mu m/s$
$v_{normalizada}$	<i>Velocidad normalizada</i>	-

v_{St}	<i>Velocidad de Stokes</i>	$\mu\text{m/s}$
ω	<i>Velocidad angular de la partícula</i>	<i>Rad/s</i>
x	<i>Diámetro de la partícula</i>	m
y	<i>Posición de la partícula</i>	m
z	<i>Factor de incremento de aceleración gravitacional</i>	-
ζ	<i>Potencial Zeta</i>	mV

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Determinar la velocidad terminal de sedimentación de micropartículas en una suspensión es una labor importante en diversos procesos del ámbito industrial, puesto que es aplicable al diseño de equipos de descontaminación, así como también a procesos en los que es necesario separar micropartículas una vez que estas sedimentan, por ejemplo, en procesos mineros.

El Dr.-Ing. Gonzalo Salinas-Salas cuenta con un conjunto de datos experimentales, obtenidos durante su permanencia en la Technische Universität Dresden, que se emplearán como datos de carácter secundario para esta Memoria de Título.

Es por esto, que debido a que cada vez se busca mayor eficiencia en los procesos que implican sedimentación de micropartículas, se hace necesario el análisis de cambios de velocidad de sedimentación de ellas, en este caso se analiza la velocidad de sedimentación ante cambios del índice de acidez, usando a nitrato de potasio (KNO_3), como sustancia de modificación de la acidez de la suspensión.

Este tema de estudio resulta interesante, puesto que conocer como los cambios del valor de pH afectan la velocidad con la que sedimentan las micropartículas, ayudaría a que se mejoren los procesos industriales en los que se requiere separar micropartículas por medio de la sedimentación, por ejemplo, mejorar la eficiencia de los equipos encargados de descontaminación.

El comportamiento de este tipo de sistemas de partículas y la cada vez mayor importancia de las tecnologías de descontaminación constituyeron la motivación que se tuvo en cuenta para acometer esta memoria, ya que una de sus aplicaciones más evidentes estaría en la desestabilización de sistemas de partículas mediante floculación, lo que aumentaría la velocidad de sedimentación de las partículas, clarificando agua en menor tiempo.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema a analizar consiste en determinar el comportamiento de la velocidad de sedimentación de un sistema de partículas, de orden de tamaño submicrométrico, cuando es suspendida en agua frente a distintos valores del índice de acidez, a fin de determinar entre que rangos de valores esta suspensión sedimentará de manera estable o presentará una

desestabilización, que aumentará considerablemente su velocidad de sedimentación. Esto influye dependiendo del tipo de proceso, en la conveniencia de utilizar algún agente que modifique el índice de acidez y con ello dependiendo de la aplicación industrial mantener suspendida las partículas o sedimentarlas.

1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA

A partir de datos experimentales, proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas-Salas, los cuales se realizaron para una suspensión de partículas esféricas de dióxido de silicio (SiO_2) de un orden de tamaño de 500 nm suspendidas en agua, a la que mediante la adición de KNO_3 , se modifica el índice de acidez de la suspensión, entre valores que van de 2 a 10, aproximadamente, a estas suspensiones se les midió la velocidad de sedimentación empleando una centrifuga analítica LumiFuge-114. El análisis de estos datos, empleando técnicas de análisis utilizadas en métodos experimentales de ingeniería, permitirán establecer los rangos de pH, respecto de la velocidad de sedimentación.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Determinación y análisis del comportamiento de la velocidad de sedimentación terminal de micropartículas de un tamaño medio de 500 nm suspendidas en agua, ante cambios del índice de acidez, de la suspensión mediante el uso de nitrato de potasio, para modificar este índice.

1.4.2. Objetivos específicos

- Conocer el estado del arte en sistemas de medición de velocidad de sedimentación de sistemas de micropartículas y de la modelación del comportamiento de las micropartículas que conforman una suspensión en agua.
- Describir la modelación clásica del comportamiento de las fuerzas mecánicas y electroquímicas entre micropartículas suspendidas en agua, considerando que esta, se comporta como un electrolito.

Capítulo 1. Introducción

- Describir la metodología empleada para obtención de los valores experimentales a utilizarse.
- Analizar el comportamiento de la velocidad de sedimentación de sistemas de micropartículas suspendidas en agua, ante cambios del índice de acidez de la suspensión.
- Discutir los resultados obtenidos.

1.5. RESULTADOS ESPERADOS

Tras finalizar el estudio, se espera determinar y describir el comportamiento de la velocidad de sedimentación de micropartículas, ante cambios de su nivel de acidez.

Para lo anterior, se requiere realizar una discusión sobre los aspectos experimentales y teóricos del problema, desde la perspectiva de métodos experimentales aplicados en ingeniería.

Adicionalmente se conocerá el comportamiento del potencial Zeta, frente a cambios de acidez y su influencia en la velocidad de sedimentación terminal.

1.6. METODOLOGÍA

La metodología de esta memoria considera la modelación general del principio de funcionamiento de la centrífuga analítica LumiFuge-114.

Para comenzar se realiza una búsqueda bibliográfica y el estudio de los sistemas de medición de la velocidad de sedimentación de sistemas de micropartículas y de los fenómenos que se presentan en un proceso de sedimentación. Se debe llevar a cabo una descripción de la modelación clásica que describe el comportamiento e interacción de las fuerzas mecánicas y electroquímicas entre micropartículas suspendidas en agua, y con las características de comportamiento eléctrico del agua, ya que esta es un electrolito.

También se debe hacer una descripción de la metodología, equipos y materiales empleados para la obtención de los datos experimentales que se utilizarán en este trabajo.

Posteriormente se realiza un análisis del comportamiento de la velocidad de sedimentación de sistemas de micropartículas suspendidas en agua, frente a cambios del índice de acidez de la suspensión. Considerando el tipo de partícula y el tipo de fluido empleado para la conformación

Capítulo 1. Introducción

de la suspensión. Para finalmente, una vez realizado el estudio establecer las conclusiones de esta memoria.

Cabe destacar que, para la realización de esta memoria, se utilizará el software Microsoft Office®. Microsoft Word y Microsoft Excel respectivamente.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. MÉTODOS DE SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS

Cuando se utiliza el principio de sedimentación para el análisis granulométrico, se utiliza el hecho de que partículas de diferente tamaño tengan diferentes velocidades en un fluido en reposo. Por lo tanto, los cambios temporales y espaciales de concentración en un sedimento sistema proporciona información sustancial sobre la distribución cuantitativa de tamaños de partículas caracterizados por la velocidad de su movimiento. (Bernhardt, 1994)

Según menciona Bernhardt, 1994, “Los métodos de análisis de sedimentación se agrupan de acuerdo con los siguientes criterios fundamentales de la disposición de medición y suspensión en el recipiente de sedimentación” (pág. 109)

1. Según la posición de las partículas al inicio de la medición:

- Métodos homogéneos: las partículas se distribuyen uniformemente por todo el espacio de sedimentación.
- Métodos de inicio de línea: las partículas al principio se concentran en una capa delgada sobre el medio libre de sólidos.

2. Según el lugar de medición de cantidad de partículas:

- Método incremental: se mide la cantidad (concentración) de sólidos en una fina capa de suspensión (nivel de medición).
- Método acumulativo: se mide la cantidad total de sólidos por encima o por debajo de un nivel de medición.

3. Según el campo de fuerza:

- Métodos gravitacionales:
 - a) Método de la pipeta
 - b) Método por decantación
 - c) Método por balanza de sedimentación
- Métodos centrífugos: las técnicas centrífugas de medición se pueden clasificar como incrementales o acumulativas, inicio homogéneo o de línea.

Capítulo 2. Marco teórico

En la Tabla 2.1 se resumen los diferentes tipos de analizadores de sedimentación centrífuga existentes en el mercado.

Tabla 2.1 Clasificación de analizadores centrífugos. Fuente: Powder Sampling and size sedimentation

Homogéneo, incremental sedimentación centrífuga <ul style="list-style-type: none">• Centrífuga Simcar.• Pipeta centrífuga Ladal• Centrífuga de rayos X Ladal• Centrífuga de rayos X de escaneo Brookhaven• Brookhaven BI-DCP, disco• Foto centrífuga de disco Kaye• Fotofuge Coulter• Fotocentrífuga Technord• Fotocentrífugas de cubetas Horiba• Fotocentrífuga LUM 114-116• Fotocentrífuga de cubeta Seishin• Fotocentrífuga de cubeta Shimadzu SA-CP3	Homogéneo, acumulativo, sedimentación centrífuga <ul style="list-style-type: none">• Centrífuga Alpina• Hosokawa Mikropu 1• Limpiador de sedimento Inicio de línea, incremental, sedimentación centrífuga <ul style="list-style-type: none">• Fotocentrífuga de disco Joyce-Loebl• Brookhaven BI-DCP, disco• Fotocentrífuga• Fotocentrífuga de disco CPS Inicio de línea, acumulativo, sedimentación centrífuga <ul style="list-style-type: none">• Analizador MSA
--	--

2.2. SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS

La sedimentación es el proceso en el que comienza un movimiento de las partículas previamente inmóviles, debido al efecto del campo de aceleración o fuerza en la suspensión que consiste en partículas y líquido. Las partículas buscan tener la menor cantidad de energía posible, lo que ocurre en la parte inferior del contenedor de suspensión.

Este movimiento que realizan las partículas se ve afectado por las propiedades del líquido, las partículas y la suspensión. Los parámetros relevantes son:

- Viscosidad y densidad del líquido
- La densidad del material de partículas.
- La morfología y la forma de las partículas.
- La concentración de partículas.
- Las fuerzas de interacción entre las partículas.
- Condiciones de flujo y límite termodinámico.

Las características hidrodinámicas en la flotación y sedimentación de partículas en un fluido no son un fenómeno nuevo, puesto que ha sido utilizado con fines prácticos desde épocas remotas por la humanidad y actualmente juega un importante rol para las tecnologías de descontaminación, en la fabricación de revestimientos de todo tipo (materiales cerámicos de alta resistencia), procesamiento de minerales, electrónica y además en la industria farmacéutica.

Según menciona Salinas Salas, 2007, en un proceso de sedimentación existen, principalmente, tres tipos de fuerzas involucradas, las que corresponden a:

1. Fuerzas mecánicas, originadas por la acción de un campo de fuerza gravitatorio o centrífugo.
2. Fuerzas de tipo electroquímico, las cuales se dan por la acción de las diferencias de potencial electrostático entre las superficies de las partículas.
3. Fuerzas de van der Waals.

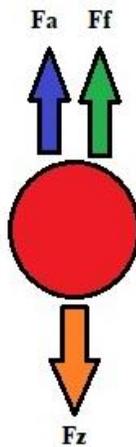
Dentro de las fuerzas que actúan hay una que predomina y es la fuerza de originada por el campo gravitatorio o centrifugo, por lo que es posible modelar el comportamiento de una partículas rígida, de una forma esférica, la cual se hunde en un fluido viscoso desde una posición conocida

Capítulo 2. Marco teórico

con una velocidad inicial nula, mediante la ecuación de D'Alambert, que corresponde a la Segunda Ley de Newton aplicada a un sólido de masa constante, considerando sólo los términos de cambio de cantidad de movimiento, el peso de la partícula, la fuerza de flotación y la de arrastre viscoso que se ejercen sobre la partícula.

El modelo físico común para la representación del proceso de sedimentación se basa en un balance dinámico de las fuerzas mecánicas; donde se asume que las partículas que sedimentan son rígidas y esféricas, lo que genera un escurrimiento de fluido alrededor de éstas. El fluido se asume, a su vez, como newtoniano y cuasi incompresible. La estructura del modelo se basa en la interacción de las fuerzas de inercia (F_i), de aceleración (F_c), de arrastre (F_r) y la flotabilidad (F_f). La aceleración de Coriolis y las fuerzas de interacción con otras partículas y con la pared de la cubeta son despreciables (Salinas Salas, 2007).

Para evaluar la velocidad de sedimentación o flotación de un sistema de partículas, se requiere establecer una ecuación que relacione las fuerzas involucradas sobre éstas, mencionadas anteriormente. En la Ilustración 2.1 se observa el diagrama de cuerpo libre para describir la situación física.



*Ilustración 2.1 Diagrama cuerpo libre partícula sometida a fuerzas del campo gravitatorio.
Fuente: Elaboración propia*

Realizando la sumatoria de fuerzas involucradas en la situación descrita, resulta la siguiente expresión:

$$\sum F = m_p \cdot \frac{d^2y(t)}{dt^2} = F_z - F_f - F_a \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

Dónde:

m_p : Masa de la partícula analizada

y : Posición de la partícula

t : Tiempo

F_z : Fuerza de aceleración

F_f : Fuerza de flotación que actúa sobre la partícula

F_a : Fuerza de arrastre que actúa sobre la partícula

La solución de la Ecuación (2.1) permite obtener el conjunto de ecuaciones que hacen posible describir el comportamiento de la aceleración, velocidad y posición de la partícula en el sentido de la aceleración de gravedad o de aceleración centrífuga, definido como eje y .

2.2.1. Ley de Stokes

La ley de Stokes hace referencia a la fuerza de fricción que experimentan los objetos esféricos que se mueven dentro de un fluido viscoso en un régimen de flujo laminar, el cual posee un bajo número de Reynolds. Generalmente, esta ley se utiliza en partículas pequeñas que se mueven a bajas velocidades.

Esta condición se puede traducir en que existe una velocidad relativa entre la esfera y el medio inferior a un cierto valor crítico. Bajo estas condiciones la resistencia que ofrece el medio se produce por efecto exclusivo de las fuerzas de roce que se oponen al deslizamiento de las capas de fluido sobre otras, a partir de la capa límite del cuerpo.

En la partícula, esto se explica diciendo que existe una aceleración de partícula y por consiguiente la velocidad no será constante respecto al tiempo y la posición. Mas, en medida que la partícula continúa hundiéndose en el fluido esta tiende a alcanzar el equilibrio dinámico entre el peso de la partícula y la fuerza de flotación, lo que lleva a que la sumatoria de fuerzas

Capítulo 2. Marco teórico

que se ejercen sobre la partícula se anulen, luego de esto, se llega a la velocidad terminal de sedimentación o velocidad de Stokes. Si se analiza esta velocidad en un tiempo infinito, se puede determinar la velocidad de Stokes, la cual se presenta en la Ecuación (2.2).

$$\frac{dy(\infty)}{dt} = v_{St} = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot x^2}{18 \cdot \mu_f} \cdot z \cdot g \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

Dónde:

v_{St} : *Velocidad de Stokes*

ρ_p : *Densidad de la partícula*

ρ_f : *Densidad del fluido*

μ_f : *Viscosidad dinámica*

2.2.2. Campo de fuerza centrífugo

La sedimentación de partículas bajo los efectos de un campo centrífugo se considera como una variación de la sedimentación bajo los efectos de la fuerza de gravedad y para ello se cambia dicha fuerza por la aceleración centrífuga ($A_z = \omega^2 \cdot r$).

Las partículas al sedimentar en un campo de fuerzas gravitatorias presentan los siguientes efectos:

- Movimiento acelerado de las partículas en campos centrífugos
- Trayectorias radiales en vez de paralelas
- Fuerza de Coriolis

En la Ilustración 2.2, se puede observar el diagrama de cuerpo libre de una partícula sometida a efectos de un campo centrífugo.

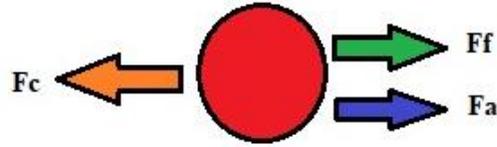


Ilustración 2.2 Diagrama cuerpo libre, partículas están sometidas a los efectos de un campo centrífugo. Fuente: Elaboración propia

La sumatoria de las fuerzas que actúan sobre una partícula sometida a los efectos de un campo gravitatorio, corresponde a la Ecuación (2.3)

$$\sum F = m_p \cdot \frac{d^2y(t)}{dt^2} = F_c - F_f - F_a \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

Dónde:

m_p : Masa de la partícula analizada

y : Posición de la partícula

t : Tiempo

F_c : Fuerza centrífuga

F_f : Fuerza de flotación que actúa sobre la partícula

F_a : Fuerza de arrastre que actúa sobre la partícula

Al igual que en la sedimentación por efectos del campo gravitatorio, la partícula alcanza una velocidad de sedimentación terminal lo que implica que la aceleración es igual a cero, esto es relevante, puesto que, este principio permite determinar la velocidad de Stokes.

2.2.3. Fuerza centrífuga

Esta fuerza corresponde al efecto del campo gravitacional o centrífugo al cual está sometido la masa de la partícula, esta fuerza define la dirección de la velocidad de la partícula y matemáticamente se expresa mediante la Ecuación (2.4).

$$F_c = m_p \cdot \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{y}) = \rho_p \cdot V_p \cdot z \cdot g \quad \text{Ecuación (2.4)}$$

Dónde:

$\vec{\omega}$: *Aceleración angular*

g : *Aceleración de gravedad*

V_p : *Volumen de la partícula*

z : *Factor de incremento de aceleración gravitacional*

Para el caso de una partícula sometida a un campo de fuerza centrífuga, la fuerza centrífuga es la predominante, cuya evaluación se realiza según la Ecuación (2.5).

$$F_c = \omega^2 \cdot r = z \cdot g \quad \text{Ecuación (2.5)}$$

2.2.4. Factor de incremento de aceleración gravitacional

La sedimentación por la acción de un campo centrífugo es mayor que la producida por un campo gravitatorio, esto se debe a que la velocidad de rotación engendra una fuerza centrífuga que incrementa significativamente la velocidad de las partículas dentro del fluido, lo que provoca que por efectos inerciales estos se dirijan más rápido a la zona de sedimentación del equipo de medición, disminuyendo así el tiempo de sedimentación. Es por esto, que en un ensayo de medición de la distribución de tamaño de partículas resulta conveniente la implementación de

Capítulo 2. Marco teórico

un campo centrífugo, provocado por la rotación del equipo de medición en torno a un radio de giro determinado.

Al considerar que la sedimentación y/o flotación puede ocurrir en la presencia de un campo centrífugo de fuerzas, es necesario definir un factor de incremento de aceleración gravitacional, el cual es un factor comparador entre la aceleración de gravedad y centrífuga. El factor de incremento de aceleración gravitacional queda definido en la Ecuación (2.6). Cabe destacar que, en un campo gravitacional puro, el factor de incremento adopta el valor unitario.

$$z = \frac{\omega^2 \cdot r}{g} \quad \text{Ecuación (2.6)}$$

Dónde:

z : *Factor de incremento de aceleración gravitacional*

ω : *Velocidad angular de la partícula*

r : *Radio de giro de la partícula*

g : *Aceleración de gravedad*

2.2.5. Fuerza de flotación

La fuerza de flotación (también conocida como empuje) es la fuerza que ejerce el fluido que desplaza la partícula al estar contenida en él, tiene la misma dirección que el campo gravitatorio, pero en sentido contrario a éste. Para evaluar la fuerza de flotación que actúa sobre la partícula, es necesario evaluar la Ecuación (2.7). Cabe mencionar que, en un campo gravitacional puro, el valor del factor de incremento de aceleración gravitacional toma el valor unitario, en el caso de estar en presencia de un campo centrífugo, tomará el valor que corresponda.

$$F_f = V_p \cdot \rho_f \cdot z \cdot g \quad \text{Ecuación (2.7)}$$

2.2.6. Fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre es una combinación entre las fuerzas de inercia y de roce, se origina por efectos viscosos del fluido sobre la superficie sólida de la partícula, puesto que, al existir un movimiento de un cuerpo sólido en fluido, aparecen estos esfuerzos de corte proporcionales al gradiente de velocidad relativa entre el sólido y el fluido. Esta fuerza depende del tipo de fluido, como del origen de escurrimiento que se genere y para el caso de fluidos newtonianos como el agua, esta fuerza depende de un coeficiente empírico llamado coeficiente de arrastre, el cual se determina a partir del número Reynolds. La Ecuación (2.8) corresponde a la fuerza de arrastre.

$$F_a = \frac{\rho_f}{2} \cdot C_w \cdot (Re) \cdot A_T \cdot v_{st}^2 \quad \text{Ecuación (2.8)}$$

C_w : Coeficiente de arrastre de la partícula

Re : Número de Reynolds

A_T : Área transversal de la partícula

v_{st} : Velocidad de Stokes

2.2.7. Área transversal de la partícula

Para realizar la evaluación del área transversal de la partícula se emplea la Ecuación (2.9).

$$A_T = \frac{\pi}{4} \cdot x \quad \text{Ecuación (2.9)}$$

2.2.8. Número de Reynolds

El número de Reynolds es un número adimensional, el cual relaciona las fuerzas de inercia de un fluido con sus fuerzas viscosas. Este número permite la clasificación de un flujo como laminar, de transición o turbulento, por otra parte, permite la evaluación del coeficiente de arrastre. Su expresión para flujo por la partícula corresponde a la Ecuación (2.10) (Schubert, 2003).

Capítulo 2. Marco teórico

$$Re = \frac{\rho_f \cdot v_{St} \cdot x}{\mu} \quad \text{Ecuación (2.10)}$$

Dónde:

Re : *Número de Reynolds*

ρ_f : *Densidad del fluido*

v_{St} : *Velocidad de Stokes*

x : *Diámetro de la partícula*

μ_f : *Viscosidad dinámica del fluido*

2.3. INTERACCIONES ENTRE PARTÍCULAS

Entre las partículas que sedimentan pueden formarse diferentes fuerzas de interacción. Estas fuerzas se conectan en distintos grados de niveles de la partícula, el fin de que esto ocurra es que se puedan ir uniendo unas con otras, hasta formar un conjunto de partículas, para que así estas puedan dominar el movimiento en la fase dispersa. Cabe mencionar, que la transición es difícil de determinar analíticamente, lo que puede llevar a que los resultados no sean concordantes con lo que se puede apreciar en la literatura.

Podremos cambiar las características de una suspensión al comprender las interacciones de una partícula individual con otra. En ocasiones buscamos maximizar las fuerzas repulsivas entre ellos, como en la Ilustración 2.3 para así producir suspensiones estables. Las repulsiones mutuas entre partículas adyacentes impiden la unión de grandes y rápidas sedimentaciones de aglomerados. (Zeta-Meter).

Uno de los mayores efectos de la superficie son los fenómenos electroquinéticos. Cada partícula contiene una carga eléctrica que suele ser de naturaleza negativa, aunque también puede ser positiva. Estas cargas producen fuerzas de repulsión electrostática entre las partículas adyacentes. Si la carga es suficientemente elevada las partículas permanecen discretas, dispersas y en suspensión, como se aprecia en la Ilustración 2.3. (Zeta-Meter).

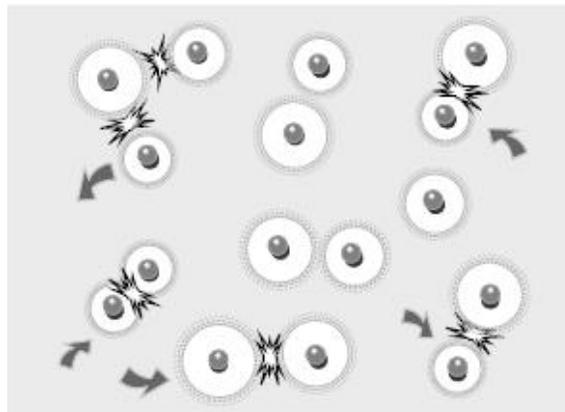


Ilustración 2.3 Partículas cargadas se repelan unas a otras.

Fuente: <http://www.zeta-meter.com/>

Reduciendo o eliminando estas cargas se obtiene el efecto opuesto, situación que se busca en los tratamientos de purificación de agua, para así filtrar las partículas que la enturbian. Las partículas se aglomeran y sedimentan fuera de la suspensión, como se observa en Ilustración 2.4.

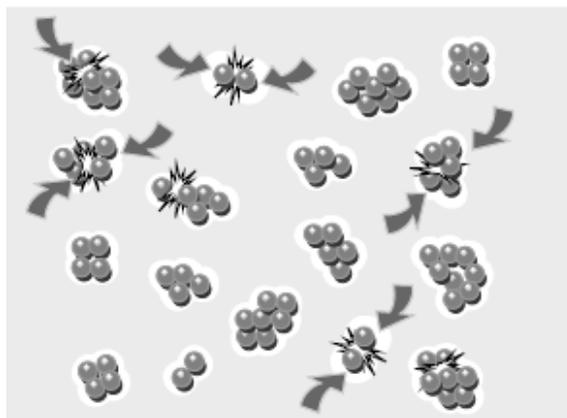


Ilustración 2.4 Partículas sin carga, están libres para chocar y aglomerar.

Fuente: <http://www.zeta-meter.com/>

En esta memoria, se analiza la influencia de las fuerzas de interacción en el proceso de sedimentación. Las fuerzas de interacción pueden definirse como la suma de las fuerzas de van der Waals, fuerzas electrostáticas, de repulsión de Born, entre otros. La teoría DLVO, se basa en el equilibrio entre las fuerzas opuestas de repulsión electrostática y atracción tipo van der Waals y explica por qué algunas partículas se aglomeran mientras que otras no lo hacen.

2.3.1. Fuerzas de van der Waals

La fuerza de van der Waals es definida como la fuerza omnipresente en todos los sistemas. La causa de las interacciones de van der Waals son los momentos de dipolo eléctrico de las moléculas o átomos en la superficie de interacción. La siguiente ecuación se puede utilizar para calcular las interacciones de van der Waals Se aplica a dos partículas esféricas igualmente grandes con un diámetro de x , que están a una distancia entre sí. (Salinas Salas, 2007).

$$J_{VW}(a) = -\frac{A_H}{12} \cdot \left[\frac{x^2}{(a+x_p)^2 - x^2} + \frac{x_p^2}{(a+x_p)^2} + 2 \cdot \ln \left\{ 1 - \left(\frac{x_p}{a+x_p} \right)^2 \right\} \right] \quad \text{Ecuación (2.11)}$$

Donde A_H es una propiedad de los materiales denominada constante de Hamaker, que depende del tipo de sustancia de la partícula y del líquido

2.3.2. Repulsión de Born

La energía de repulsión del Born, Ecuación (2.12) se convierte en un tamaño ya no despreciable a distancias de adhesión muy pequeñas (menos de 0,2 nm), ya que es indirectamente proporcional a la 7a potencia de la distancia.

$$J_B(a) = \frac{1,55 \cdot 10^{-60}}{2} \cdot \frac{x}{a^7} \cdot A_H \quad \text{Ecuación (2.12)}$$

2.3.3. Potencial Zeta

El potencial Zeta (ζ) es una medida de la magnitud de la repulsión o atracción electrostática (o de carga) entre las partículas, y es uno de los parámetros fundamentales que se sabe que afectan la estabilidad. Su medición aporta información detallada de las causas de la dispersión, agregación o floculación, y se puede aplicar para mejorar la formulación de dispersiones, emulsiones y suspensiones.

Por lo que, si se consideran solo los efectos repulsivos y atractivos, una suspensión será estable cuando el potencial Zeta posea un elevado valor absoluto, pues en tal caso la partícula manifiesta una alta carga superficial. A continuación, en la Tabla 2.2, se presentan valores de potencial Zeta que indican la estabilidad relativa de una suspensión.

Tabla 2.2 Estabilidad de una suspensión según el valor del potencial Zeta. Fuente: Flocculación y viscosidad de suspensiones de sílice coloidal en presencia de sales de agua de mar. Cristian Romero.

Estabilidad	Valor potencial Zeta (mV)
Extrema, muy buena	-100 a -60
Razonable	-60 a -40
Moderada	-40 a -30
Umbral de ligera dispersión	-30 a -15
Umbral de aglomeración	-15 a -10
Fuerte aglomeración y precipitación	-5 a 5

La medición del potencial Zeta tiene importantes aplicaciones en una amplia gama de industrias; por ejemplo: cerámica, productos farmacéuticos, medicina, procesamiento de minerales, electrónica y tratamiento del agua.

En el tratamiento del agua, el monitoreo de la dosificación con mediciones de potencial Zeta puede reducir los costos asociados al uso de los aditivos químicos mediante la optimización del control de la dosificación en tiempo real.

2.4. FUNDAMENTOS DE ÓPTICA APLICADOS A LA DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

Los métodos más comunes para la determinación de la velocidad de partículas son del tipo óptico, estos se basan en el principio físico de la reducción o decaimiento que presenta la intensidad luminosa de un haz de luz que atraviesa por un espesor determinado de una suspensión que se encuentra contenida en una cubeta.

2.4.1. Ley de Lambert-Beer

Matemáticamente, el decaimiento de la intensidad luminosa del haz de luz se plantea como el cociente entre la intensidad lumínica que atraviesa la suspensión, respecto de la intensidad lumínica que logra atravesar al fluido puro, este decaimiento es posible relacionarlo con 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, que técnicamente corresponde a la cubeta del equipo de medición. Lo anterior se representa matemáticamente por la Ley de Lambert-Beer, Ecuación (2.13), (Schubert, 2003)

Cabe destacar que para cada suspensión con tamaño de partículas específico existe un rango de aplicabilidad de la Ley de Lambert-Beer, llamado zona de linealidad, el cual depende de la concentración de la suspensión. Esto se explica debido a que la luz proyecta una sombra nítida en una suspensión de partículas esféricas con baja concentración, mientras que en una suspensión con alta concentración de partículas existirán efectos de superposición de sombras, sin tener certeza de lo que el sensor óptico esté midiendo, por ende, el error de medición aumentaría y no se podría lograr una medición correctamente:

$$\ln(T) = \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -A_p \cdot L \cdot c \quad \text{Ecuación (2.13)}$$

Dónde:

E : Extinción

T : Transmisión

I : Intensidad de la luz que atraviesa la cubeta con la suspensión sedimentando

I_0 : Intensidad de luz que atraviesa la cubeta con la suspensión inicial

A_p : Área específica de extinción

c : Concentración volumétrica de la suspensión

L : Ancho de la cubeta del equipo de medición

2.4.2. Área específica de extinción

Por su parte, el área específica de extinción corresponde a la relación entre el área de la sombra proyectada por la partícula, y el área transversal real de ésta. Se evalúa según la Ecuación (2.14).

$$A_p = \frac{3}{2} \cdot \frac{K(x)}{x} = \frac{E}{L \cdot c} \quad \text{Ecuación (2.14)}$$

Dónde:

A_p : Área específica de extinción

$K(x)$: Coeficiente de extinción

x : Diámetro de la partícula

E : Extinción

Cabe mencionar que el coeficiente de extinción es característico de cada tipo de suspensión, de manera que depende de (Schubert, 2003):

- El diámetro de la partícula (x)
- Las constantes ópticas del material que compone las partículas y del fluido
- La longitud de onda de la luz utilizada (λ)
- El ángulo de apertura de la luz del sistema óptico utilizado (θ)

2.4.3. Tamaño de partícula en función de variables ópticas

Al reemplazar la definición del coeficiente de extinción en la Ecuación (2.13) correspondiente a la ley de Lamber-Beer, ordenando y despejando el valor del diámetro medio de partícula se obtiene la ecuación 2.3, la cual permite obtener el valor del diámetro medio de partícula a partir de las variables ópticas.

$$x = \sqrt{\frac{4 \cdot \ln T}{\pi \cdot c \cdot k(x) \cdot L}} \quad \text{Ecuación (2.15)}$$

Dónde:

x : Diámetro de la partícula

T : Transmisión

c : Concentración volumétrica de la suspensión

$k(x)$: Coeficiente de extinción

L : Ancho de la cubeta del equipo de medición

CAPÍTULO 3. OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

3.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PARTÍCULAS

En los ensayos realizados se utilizaron sistemas de partículas de la empresa Geltech Inc, dicho sistema de partículas se utiliza como calibre de medición, así como también para procesos en los que se requiere una alta precisión en el rango de tamaño de partículas que se requiere utilizar.

Las partículas utilizadas para este estudio son de dióxido de silicio amorfo SiO_2 , con una densidad aprox. 2.135 kg/m^3 . Las cuales son esféricas y rígidas, permitiendo así una simplificación de la modelación matemática utilizada.

Para las mediciones experimentales se utilizará un sistema de partículas Geltech 500 nm, cuyo diámetro representativo es 500 nm, este tipo de sistemas de partículas suelen utilizarse para calibrar equipos de medición, o para procesos industriales de alta precisión.

Se utiliza, también un espectrómetro laser de marca HELOS y un microscopio electrónico marca Zeiss, para medir los tamaños de partículas del sistema. En la Tabla 3.1, se presenta la magnitud del tamaño representativo del sistema de partículas, de acuerdo con lo medido por cada equipo. Esto se hace con la finalidad de poder comparar los valores que se obtengan en los ensayos que vienen a continuación. Estos métodos de medición estándares para la medición de diámetros de partículas según normas DIN.

Tabla 3.1 Tamaño del sistema de partículas utilizado, medidos con diferentes equipos de medición. Fuente: Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen. Dr.- Ing. Gonzalo Salinas Salas

Muestra	Espectrómetro de difracción láser HELOS x50,3 (nm)	Microscopio electrónico x50,0 (nm)
Geltech 500 nm	420	530

A continuación, en la Ilustración 3.1 se muestra una imagen correspondiente al sistema de partículas Geltech 500 nm.

Capítulo 3. Obtención de datos experimentales

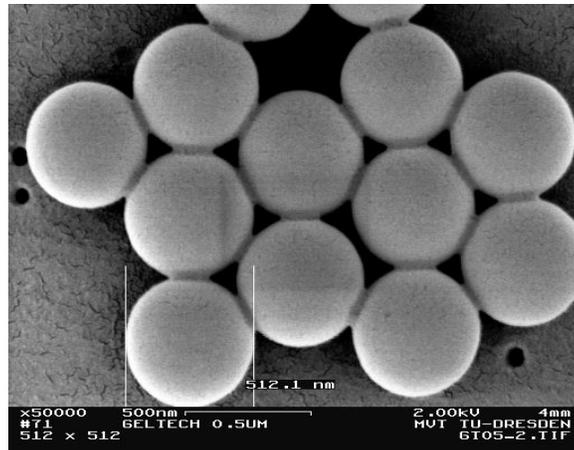


Ilustración 3.1 Sistema de partículas Geltech 500 nm, microscopio electrónico Zeiss. Fuente: Salinas-Salas , Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen suspensionen, 2007

Para el sistema Geltech 500 nm, la dependencia del potencial Zeta y el potencial de PCD en el valor de pH, se puede observar en el Gráfico 3.1. Además, de que para un valor de pH de aprox. 9,2 el potencial Zeta es aprox. -40 mV.

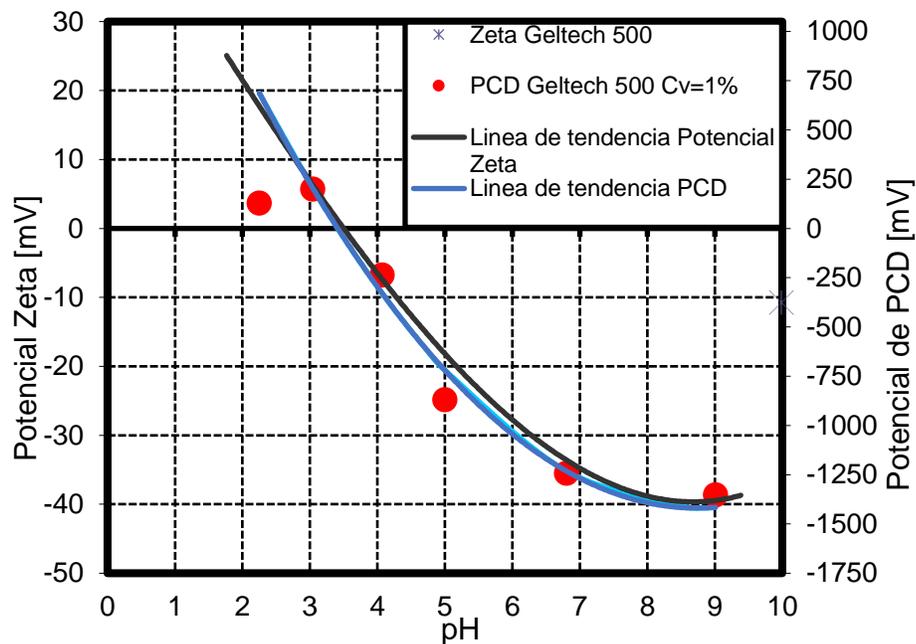


Gráfico 3.1 Relación entre el potencial Zeta y el potencial de PCD para suspensión Geltech 500 nm en agua, dependiendo del valor de pH. Fuente: Salinas-Salas, 2007.

3.2. CENTRÍFUGA ANALÍTICA LUMIFUGE 114

El equipo LUMiFuge 114 es un analizador centrífugo de partículas, se utiliza para determinar el comportamiento de desmezclado de las suspensiones concentradas. Mediante mediciones de transmisión resueltas por ubicación y tiempo, los cambios en la descomposición se registran en dispersiones. Durante todo el proceso de medición, toda la muestra se irradia con luz NIR, causando un cambio en la transmisión en las diferentes áreas de la dispersión. La transmisión dependiente de la ubicación se mide mediante una línea CCD y la transmisión dependiente del tiempo se realiza mediante instantáneas con $t < 20$ s. El resultado es un perfil de transmisión, que se registra sobre el radio de medición.

A continuación, la Ilustración 3.2 muestra la disposición de medición de la centrífuga analítica LUMiFuge 114.

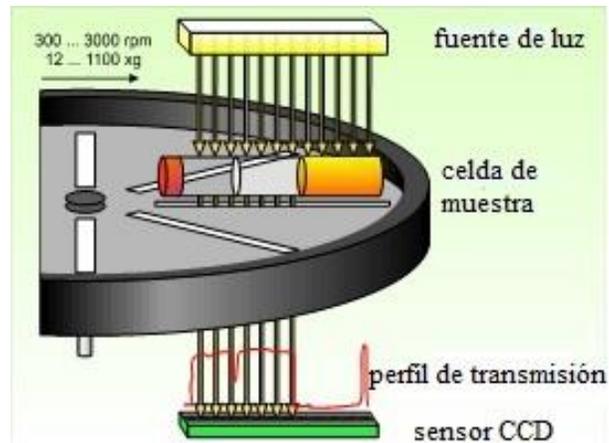


Ilustración 3.2 Disposición de medición centrífuga LUMiFuge 114. Fuente: L.U.M. GmbH

En la Ilustración 3.3 se observan los perfiles de transmisión de una medición real, a modo de ejemplo. Se logra apreciar de izquierda a derecha el perfil de luz, y de derecha a izquierda el sedimento.

Capítulo 3. Obtención de datos experimentales

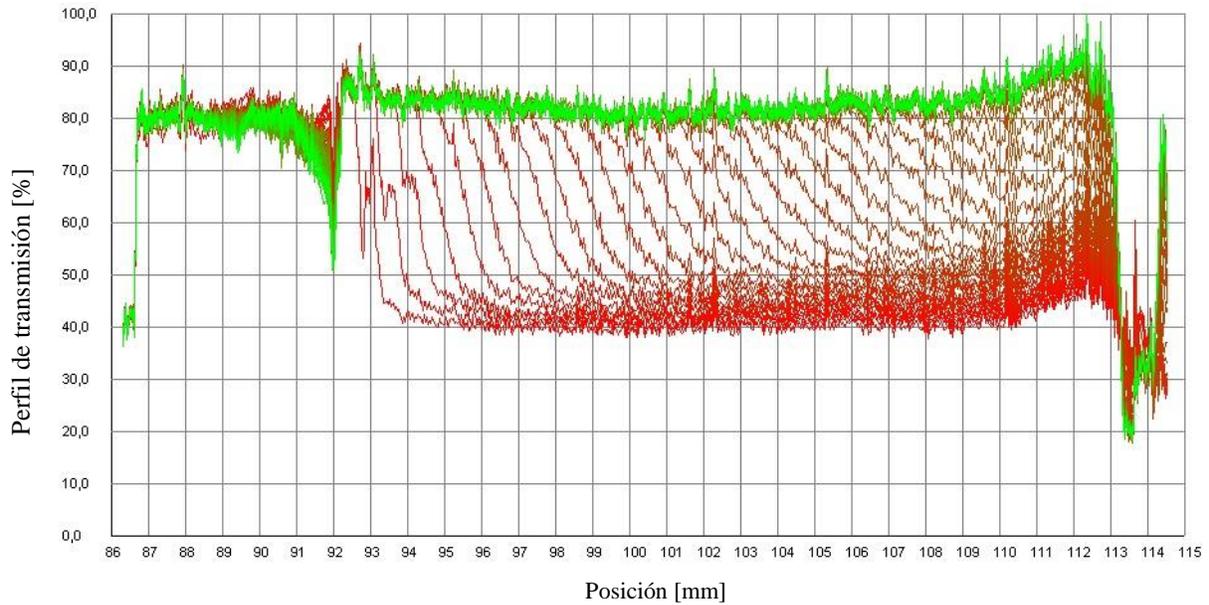


Ilustración 3.3 Perfiles de transmisión LUMiFuge 114. Fuente: Sedimentationsverhalten von Submikrometer Partikeln in wässrigen suspensionen, Salinas-Salas, 2007

A continuación, en la Ilustración 3.4 se observa la centrifuga LUMiFuge 114, la cual fue utilizada por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas-Salas para la obtención de los datos experimentales.

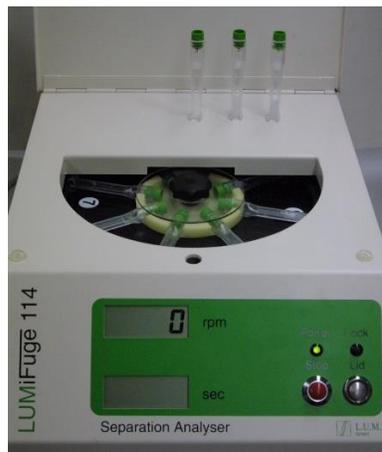


Ilustración 3.4 Centrifuga analítica LUMiFuge 114. Fuente: fotografía proporcionada por Dr. Ing. Gonzalo Salinas-Salas

Capítulo 3. Obtención de datos experimentales

Los datos técnicos más relevantes de la centrífuga analítica LUMiFuge 114 se muestran la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Datos técnicos centrifuga analítica LUMiFuge 114. Fuente: Sedimentationsverhalten von Submikrometer Partikeln in wässrigen suspensionen, Salinas-Salas, 2007

Tipo de equipo	Sistema de análisis de suspensiones LUMiFuge™
Fabricante	L.U.M GmbH
Intervalo de medida	10 s – 600 s
Velocidad de centrifugación	300 – 3000 rpm
Fuente de luz	NIR-LED
Longitud de onda en el espectro BW 50%	880 nm, 80 nm
Foto sensor	CCD sensor de una fila
Número de cubetas	8
Cubetas	Rectangulares de polystyrol, 3×7 mm ² Cilíndricas de vidrio, Ø = 11,5 mm
Volumen de prueba	0,5 cm ³ ; 2 cm ³ ; 0,15 cm ³ ; 0,3 cm ³
Rango de concentraciones volumétricas	1% hasta 90%
Rango de tamaños de partículas	50 nm - 100.000 nm
Rango de densidad de partículas	0,01 g/cm ³ 10 g/cm ³
Rango de velocidades de sedimentación	1 nm/s 750.000 nm/s

Como software de evaluación, se utilizó el programa Sepview 3.3 y posteriormente Sepview 4.0. Especialmente desarrollados para la centrífuga analítica LUMiFuge 114, los que permiten visualizar gráficamente los perfiles de transmisión, como se observa en la Ilustración 3.3. El software calcula el curso de tiempo de la descomposición a partir de los resultados de la medición. Además, también se pueden determinar las velocidades de sedimentación respectivas y, por lo tanto, se puede derivar indirectamente una declaración sobre los tamaños de partículas existentes.

La geometría de la cubeta de análisis de la centrífuga LUMiFuge 114, se muestra en la Ilustración 3.5.

Capítulo 3. Obtención de datos experimentales

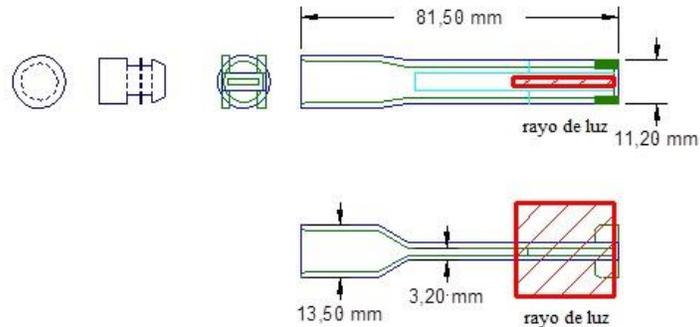


Ilustración 3.5 Geometría cubeta centrífuga LUMiFuge 114, espesor de capa 1 mm, material policarbonato. Fuente: Sedimentationsverhalten von Submikrometer Partikeln in wässrigen suspensionen, Salinas-Salas, 2007

Las centrífuga analítica LUMiFuge 114 mide el perfil de transmisión IR de una muestra que se mueve en el campo centrífugo en momentos discretos después del inicio de la centrifugación Ilustración 3.2. La transmisión está determinada por las propiedades ópticas de la cubeta, las propiedades ópticas de las partículas (sección transversal de extinción) y la concentración de partículas. Por lo tanto, la tasa de sedimentación de las partículas (o la velocidad de sedimentación del sistema de partículas) y el crecimiento del sedimento pueden derivarse de los cambios temporales en el perfil de transmisión.

Se puede medir un máximo de ocho muestras simultáneamente. Las muestras se encuentran en cubetas con sección transversal rectangular, por lo que se utilizan de serie aquellas con un ancho de separación de 2,2 mm. Sin embargo, se realizaron mediciones para las muestras muy poco concentradas ($c \leq 0,004$) con cubetas con una anchura de separación de 5 mm. Como regla general, el LUMiFuge fue operado a una velocidad de 3.000 rpm. Algunas de las mediciones de las muestras muy poco concentradas ($c \leq 0,004$) se realizaron a 2.000 rpm, aumentando así la calidad de los datos de medición. Las velocidades corresponden a múltiplos de aceleración media de 1.000 y 444 respectivamente.

3.3. EQUIPOS ADICIONALES

A continuación, se describen brevemente los equipos adicionales empleados en el ensayo realizado en los laboratorios del MVT-TU.-Dresden, Alemania. Para la obtención de los datos experimentales, que serán utilizados como datos de carácter secundario para la realización de esta memoria de título.

3.3.1. Balanza de laboratorio

Las balanzas de laboratorio por lo general son instrumentos muy precisos para la determinación de masa. En el experimento se utilizó la balanza de laboratorio SARTORIUS Analytic AC 210S el cual tiene una precisión de +/- 0,0001 gr.

3.3.2. Ultra-turrax

Para preparar los sistemas, se utilizó un homogeneizador y dispersador de mezclas Ultraturax T-50 del fabricante IKA durante 20 min, con el fin de homogenizar las muestras y hacerlas repetibles.

3.3.3. Ultrahomogeneizador vibra-cell VCX500

Este equipo es del fabricante Sonics, se utiliza para la dispersión por medio de ultrasonidos, sin embargo, este proceso conlleva un aumento de temperatura de la muestra, por lo que requiere el uso de un agitador magnético para evitar que ello suceda. El equipo vibra-cell se utilizó en dos fases, la primera de 12 min y la segunda de 2 min.

3.3.4. Agitador magnético

Los agitadores magnéticos permiten mezclar disoluciones mientras estas son enfriadas, este equipo se utiliza luego de que se utiliza el equipo vibra-cell VCX500.

3.3.5. Célula vibra del homogeneizador ultrasónico (Bioblock Scientific)

Se utiliza para la dispersión por ultrasonido. Los pulsos ultrasónicos cortos se liberan en la suspensión por medio de una sonda. Como resultado, la suspensión también experimenta un aumento de la temperatura.

3.3.6. Medidor de conductividad y medidor de pH WTW Multilab 540

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.

3.3.7. Espectrómetro ultrasónico con potencial Zeta DT1200

El DT 1200 es un espectrómetro ultrasónico para medir el tamaño de partícula, que contiene además un sensor electroacústico para medir el potencial Zeta de suspensiones y emulsiones altamente concentradas.

La información del fabricante (Dispersion Technology Inc.) y los datos técnicos son los siguientes:

Rango de medición : 10 nm - 10.000 nm

Volumen de la muestra : aprox. 120 mL

3.3.8. Microscopio electrónico Zeiss

El microscopio electrónico marca Zeiss, modelo GeminiSEM 300, rango de medición >10 (um). Fue utilizado por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas-Salas, para la obtención de fotos de las partículas.

3.4. PREPARACIÓN DE LAS SUSPENSIONES

A continuación, se describe la metodología utilizada para la preparación de las suspensiones, empleando partículas Geltech 500 nm.

Se establecieron suspensiones con diferentes valores de pH, para lo que se utilizó agua tridestilada y desionizada. La concentración volumétrica de partículas fue de 0.025. Las mediciones se realizaron con la centrifuga analítica LUMiFuge 114.

La preparación de suspensiones se realizó de la siguiente forma:

1. Elaboración de la suspensión:

- Masar la cantidad de material particulado Geltech 500 nm en función de la concentración volumétrica de partículas presentes en la suspensión, empleando una balanza electrónica.
- Medición de la cantidad necesaria de agua empleando una pipeta de medición.
- Ajuste del pH de la solución a los distintos valores de ensayo, mediante la adición de KNO_3 .
- Mezcla de los componentes en un vaso precipitado.

2. Dispersión:

Para asegurar la correcta dispersión del material particulado en la suspensión, se procedió a realizar el siguiente procedimiento:

- Someter a la suspensión a 3 min en un baño ultrasónico.
 - Someter a la suspensión a 10 min en ultra-Turrax con 10.000 rpm.
 - Someter a la suspensión a 2.5 min en vibra-cell, con ajuste 9 - 1 s y una intensidad del 80%.
 - Someter a la suspensión nuevamente a otros 10 min en el Ultra-Turrax con 10.000 rpm.
 - Someter a la suspensión a 30 min en agitador magnético.
 - Realizar el control del comportamiento de la distribución del tamaño de densidad por HELOS (difracción láser) y/o microscopía electrónica con evaluación de imagen.
3. Realizar los controles del valor del pH y la conductividad.

4. Equilibrar la suspensión mediante la utilización de un agitador magnético (cubierto con parafilm)

3.5. ADQUISICIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

Las distintas muestras se cargan en la cubetas de la centrifuga analítica LUMiFuge 114, y se procede a realizar la medición de velocidad de sedimentación de las partículas presentes en el sistema, considerando velocidades de rotación de 900, 1.200 y 1.800 rpm.

Una vez realizadas las mediciones se obtuvieron los valores de velocidad experimental. Considerando los valores de pH que se indican en la Tabla 3.3 y las velocidades de giro utilizadas para cada medición.

Tabla 3.3 Datos experimentales, medición centrífuga analítica LUMiFuge 114 a diferentes valores de pH y velocidades de giro. Fuente: elaboración propia en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.

pH	Velocidad de sedimentación (µm/s)		
	900 rpm	1200 rpm	1800 rpm
2,32	90,246	87,228	161,120
3,30	256,373	217,730	349,558
5,97	15,711	28,457	67,801
6,41	15,750	28,438	67,791
7,16	15,455	28,018	65,796
7,70	15,530	28,006	65,261

La Tabla 3.3 permite elaborar el Gráfico 3.2 comparativo, el que permite observar el comportamiento de la velocidad de sedimentación experimental de las diferentes suspensiones de partículas Geltech 500 nm, a diferentes rangos pH y velocidades de giro.

Capítulo 3. Obtención de datos experimentales

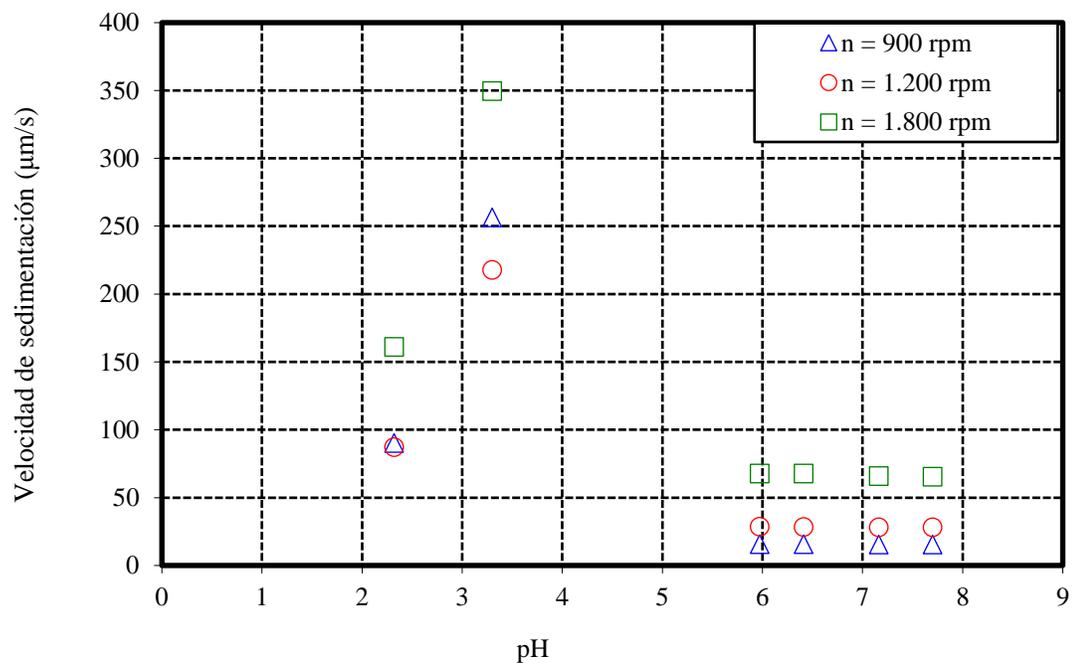


Gráfico 3.2 Velocidad experimental de sedimentación, partículas Geltech 500 nm, sometidas a diferentes rangos de pH y velocidad de giro. Fuente: Elaboración propia en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. PREPARACIÓN DE LOS VALORES PARA EL ANÁLISIS

Los resultados presentados en la Tabla 3.3 no pueden ser analizados entre sí, ya que, al considerar valores de velocidad de sedimentación (en este caso $\mu\text{m/s}$), ya que estos valores de velocidad dependen significativamente de la velocidad de rotación de la centrifuga, como lo muestra la ecuación de velocidad de Stokes, presentada en la Ecuación (2.2), donde el factor (ω^2) que corresponde a la velocidad angular amplifica los valores del campo de fuerza centrífugo, lo que impide *a priori* realizar una comparación entre valores de velocidad de sedimentación en distintas velocidades de rotación.

Por lo que, para realizar el análisis, es necesario llevar los efectos de los campos de fuerzas centrífugas a distintas velocidades de rotación a una base común, lo que significa compatibilizar los efectos de las velocidades de rotación, lo que se logra normalizando las velocidades de sedimentación. Los valores normalizados representan la fracción de la velocidad de Stokes que alcanza el sistema de partículas durante la sedimentación, de modo que se alcanza por ello a igualar los efectos del campo de fuerza centrífugo a distintas velocidades de rotación. Esto permite apreciar los efectos de las fuerzas electroquímicas, las que son de menor orden en relación a las generadas por efecto del campo de fuerza centrífugo. Esto permitirá visualizar y analizar sus efectos en el proceso de sedimentación.

La forma matemática para normalizar los valores de la velocidad de sedimentación se realiza empleando la Ecuación (4.1), la que se aplica a los valores experimentales presentados en la Tabla 3.2.

$$v_{normalizada} = \frac{v_{medida}}{v_{St}} \quad \text{Ecuación (4.1)}$$

Dónde:

$v_{normalizada}$: Velocidad normalizada

v_{medida} : Velocidad medida

v_{St} : Velocidad de Stokes

Capítulo 4. Análisis de resultados

En el caso de cada una de las velocidades que se consideraron, se obtuvieron los siguientes valores de la velocidad de Stokes (Tabla 4.1). Para el cálculo se empleó la Ecuación (2.2) y considerando las distintas velocidades de giro los siguientes valores:

Tabla 4.1 Velocidades de Stokes correspondientes a las diferentes velocidades de la centrifuga LUMiFuge 114. Fuente: Sedimentationsverhalten von Submikrometer Partikeln in wässrigen suspensionen, Salinas-Salas, 2007

Velocidad de rotación (rpm)	Velocidad de Stokes ($\mu\text{m/s}$)
900	21,40
1.200	38,05
1.800	85,61

Aplicando la Ecuación (4.1) a los valores experimentales, presentados en la Tabla 3.3, y considerando los valores presentados en la Tabla 4.1, se obtienen los valores de la velocidad normalizada, los que se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Valores velocidad de sedimentación normalizada. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas

pH	velocidad de sedimentación normalizada (-)		
	900 rpm	1200 rpm	1800 rpm
2,32	4,22	2,29	1,88
3,30	11,98	5,72	4,08
5,97	0,73	0,75	0,79
6,41	0,74	0,75	0,79
7,16	0,72	0,74	0,77
7,70	0,73	0,74	0,76

En base a los datos de la Tabla 4.2 se construye el Gráfico 4.1, el que corresponde a las velocidades de sedimentación normalizadas de las partículas Geltech 500 nm a diferentes condiciones de acidez (pH) y velocidades de giro de la centrifuga.

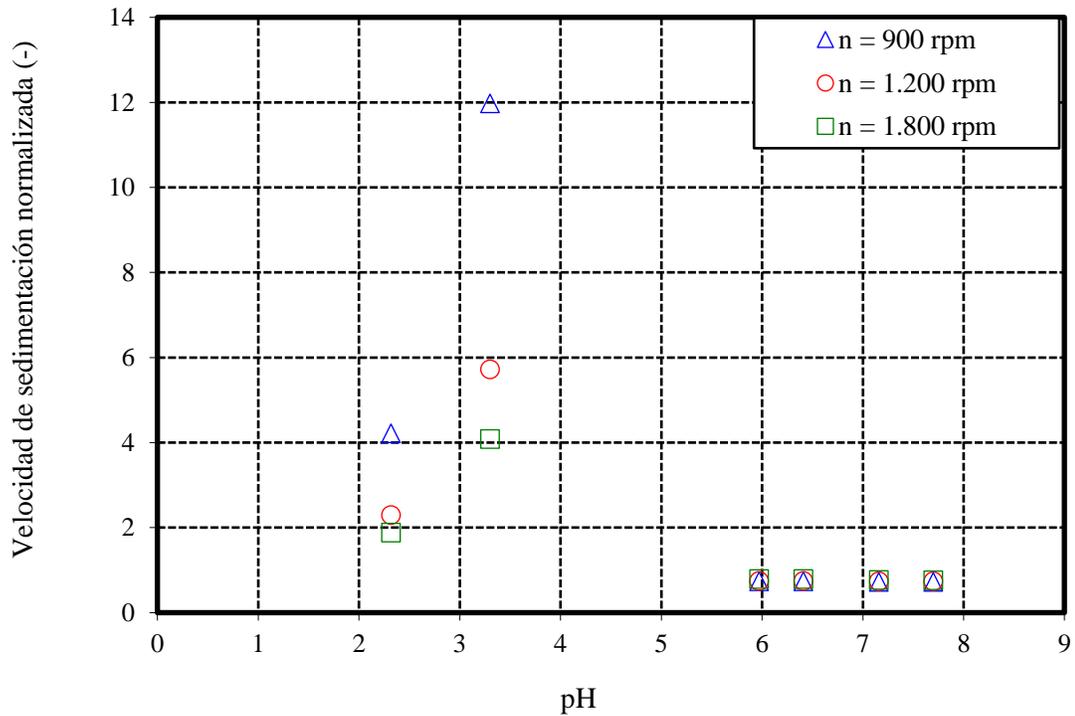


Gráfico 4.1 Velocidad normalizada de sedimentación, partículas Geltech 500 nm, sometidas a diferentes rangos de pH y velocidad de giro. Fuente: Elaboración propia en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas

4.2. DISCUSIÓN

A partir de los valores presentados en la Tabla 4.2 y su representación en el Gráfico 4.1, es posible inferir la aparición de una región de valores del índice de acidez (pH) de la suspensión que la vuelve inestable. Esto es que el sistema de partículas se inestabiliza, lo que da lugar a la formación de flóculos, los que son conjuntos de partículas presentes en la suspensión que por efectos electroquímicos se engendran fuerzas en direcciones distintas a la de la velocidad de sedimentación que dan por resultado la atracción entre ellas y la conformación de un racimo o cluster de partículas, al que se le denomina flóculo. Estos flóculos poseen una masa mayor a la de una partícula única y por lo tanto desarrollan una velocidad de sedimentación mayor. El proceso de floculación de partículas comienza cuando las fuerzas de rechazo electrostático y de repulsión de Born, entre partículas, son menores a las fuerzas de atracción van der Waals, las que se vuelven dominantes en el proceso de floculación, permitiendo, no solo, formar los flóculos, sino darles estabilidad a estos ya formados. A su vez, este fenómeno aparece ante

Capítulo 4. Análisis de resultados

variaciones del valor de acidez (pH), el que modifica la concentración de iones de hidrogeno presentes en el agua de la suspensión, la que se comporta como un electrolito, lo que modifica el ancho de la carga eléctrica superficial de las partículas y por ende su atmosfera de influencia de su carga eléctrica, permitiendo la formación de dipolos eléctricos entre partículas de cargas superficiales distintas. De las tres fuerzas involucradas en este proceso, la fuerza electroestática, la fuerza de van der Waals y la fuerza de Born, donde la más sensible ante variaciones de la acidez de la suspensión es la fuerza electroestática. Al punto que la fuerza de rechazo electrostático, para el caso estudiado, se reduce a medida que el valor del pH de la suspensión disminuye, y por ende conlleva a cambios, en el valor del potencial Zeta de las partículas.

Luego a menores valores de pH se reducen las fuerzas de repulsión entre partículas adyacentes y por ende aumentan su capacidad de formar flóculos, lo que se traduce en un incremento de la velocidad de sedimentación del sistema de partículas. Al punto que en el caso que las fuerzas de repulsión electroestáticas sean nulas, se engendra el denominado punto isoeléctrico, en el cual solo existiría la fuerza de repulsión de Born para evitar la formación de flóculos, cabe indicar que esta fuerza es muy pequeña en relación a las fuerzas de van der Waals, lo que da lugar a que la suspensión se inestabilice completamente al adquirir una alta capacidad para la formación de flóculos y por ende de altas velocidades de sedimentación. Cabe destacar que este proceso requiere de tiempo, por lo que, el tiempo que requiere la formación de un flóculo es un parámetro dominante, pero no existe una modelación que permita calcularlo. El caso opuesto, son las suspensiones estables, las que se presentan en el rango de acidez básico, esto es valores relativamente altos de pH, donde las fuerzas de repulsión electroestática son las dominantes y por ende no se da lugar, prácticamente, a la formación de flóculos y sus correspondientes incrementos de velocidad.

Cabe mencionar el hecho que los valores de la velocidad normalizada, para el caso de suspensiones estables, sean menores a uno, se debe al hecho que la velocidad de Stokes se evalúa para el caso de la sedimentación de una partícula única, sin interacciones de ningún tipo con otras. Pero dado que se trata de un sistema de partículas, donde miles de estas sedimentan simultáneamente se engendran interacciones hidrodinámicas y mecánicas, que modifican este valor de velocidad.

Capítulo 4. Análisis de resultados

Las partículas tienen tres fuerzas que están actuando sobre ellas, las fuerzas mecánicas que son las que las empujan al fondo de la cubeta, las fuerzas hidrodinámicas que tienen un comportamiento variable y las fuerzas electroquímicas, donde estas últimas las mueven en una dirección distinta a la trayectoria de sedimentación, idealmente de forma perpendicular, ya que de acuerdo a su comportamiento atraen o rechazan partículas entre sí. Por lo tanto, en determinadas condiciones, las fuerzas electroquímicas tienen la capacidad de desviar de su trayectoria dominante de sedimentación de las partículas, lo que da lugar a que no exista una trayectoria lineal hacia la base del campo centrifugo. Esta situación se traduce en una reducción de la velocidad de sedimentación y la formación de flóculos, que como ya se indicó requieren de tiempo para su formación de modo que mientras más tiempo dure el proceso de sedimentación mayor será la formación de flóculos, así como su tamaño.

Considerando los datos experimentales, este efecto del tiempo en el proceso de formación de flóculos se aprecia claramente a través del cambio de la velocidad de sedimentación (Gráfico 4.1), donde se aprecia, claramente que la velocidad de sedimentación normalizada para el caso de velocidades de rotación de 900 rpm es significativamente mayor que para el caso de 1.200 rpm y esta a su vez es mayor que la de 1.800 rpm. Por ende, el tiempo que dispone la suspensión para la formación de flóculos se va reduciendo de la misma manera. Si se considera como base de referencia de tiempo a la disponibilidad de este en el proceso de sedimentación partículas a 1.800 rpm, se desprende que el tiempo que dispone este proceso de formación de flóculos a una velocidad de 1.200 rpm es 2,25 veces mayor y para el caso de 900 rpm es 4 veces mayor. Esta evaluación de tiempo disponible se realiza a partir de la ecuación de velocidad de Stokes, presentada en la Ecuación (2.2).

Todo lo anterior, reafirma la existencia de una dependencia del tiempo en el proceso de floculación, puesto que mientras más tiempo están en contacto las partículas se permite que las fuerzas electroquímicas actúen formando los flóculos y por lo tanto desestabilizando la suspensión. Por lo que, se desprende que la sedimentación no solo depende de la velocidad de giro de la centrifuga, sino del tiempo que dura el proceso de sedimentación. La disponibilidad de tiempo hace posible que las partículas se atraigan, además, las fuerzas electroquímicas normalmente son menores a las fuerzas mecánicas, es por ello que su acción solo se manifiesta si se dispone de tiempo. En general, cuando menor sea la velocidad de rotación, mayor será el

Capítulo 4. Análisis de resultados

tiempo para la formación de flóculos, de modo que los flóculos formados serán más grandes y fuertes, que los que se pueden formar a velocidades de rotación más pequeñas. Como corolario de lo anterior, la sedimentación a altas velocidades da lugar a la formación de menos y más débiles flóculos, ya que se dispondría de menos tiempo.

Este análisis se realizó en función de la información disponible y presentada en el Gráfico 4.1, el que muestra dos zonas claramente diferenciadas. La primera comprende el rango de valores de pH de la suspensión entre 2 y 4 aproximadamente, donde se muestran los efectos de inestabilidad de la suspensión asociados a cambios de los valores de la fuerza electrostática de repulsión que disminuye significativamente, lo que permite la formación de flóculos, debido a la incremento relativo de las fuerzas electroquímicas respecto a las fuerzas mecánicas, lo que se ve traducido en velocidades de sedimentación significativamente mayores a la velocidad de Stokes. La segunda zona corresponde al rango de valores de pH de la suspensión entre 6 y 8 aproximadamente, donde la suspensión se comporta de manera estable, ya que las fuerzas electroquímicas actúan rechazando las partículas que conforman el sistema, impidiendo la formación de flóculos y no alterando las trayectorias de sedimentación de las partículas generadas por las fuerzas mecánicas. Esto se ve traducido en velocidades de sedimentación menores a la velocidad de Stokes, dado la sedimentación simultánea del colectivo de partículas, y por ende las interacciones hidrodinámicas y mecánicas entre ellas que reducen su velocidad de sedimentación.

CONCLUSIONES

El desarrollo de la presente memoria requirió alcanzar un cierto grado de conocimiento de los elementos teóricos aplicados al proceso de sedimentación de sistemas de micropartículas suspendidas en agua. Esto se logró a través del conocimiento del estado del arte en sistemas de medición de velocidad de sedimentación de sistemas de micropartículas y de la modelación del comportamiento de las micropartículas que conforman una suspensión en agua.

Fue posible describir la modelación clásica del comportamiento de las fuerzas mecánicas y electroquímicas entre micropartículas suspendidas en agua, considerando que esta, se comporta como un electrolito, esto último, se realizó a través de la teoría DLVO.

Se describió la metodología empleada para la obtención de los datos experimentales, así como se realizó la descripción de los equipos utilizados y de la preparación de las suspensiones.

Se realizó el análisis de los resultados experimentales, el cual se desarrolla a través del comportamiento de la velocidad de sedimentación de sistemas de micropartículas suspendidas en agua, ante cambios del índice de acidez de la suspensión. Para lo cual fue necesario normalizar esta velocidad, para permitir su análisis, ya que con ello fue posible llevar los efectos mecánicos generados por el campo centrifugo al mismo nivel y hacer visible los efectos de las fuerzas electroquímicas, y a partir de estas realizar su comparación y establecer las causas de las diferencias de los valores de velocidad detectados.

A partir de los resultados obtenidos de las velocidades normalizadas, los que se presentan en el Gráfico 4.1, fue posible determinar la influencia que tiene el tiempo en el proceso de formación de flóculos y por lo tanto en la inestabilización de la suspensión, atribuyendo en la crítica de resultados, como causa de esta inestabilización y formación de flóculos a la modificación del espesor de la atmosfera de carga eléctrica de las partículas, lo que se genera por la acción de los cambios de concentración de iones presentes en el electrolito, lo que se manifiesta por cambios del pH de la suspensión. Paralelamente, se determinó que el proceso de floculación depende del tiempo, por lo tanto, para que este se desarrolle se requiere de disponer de un cierto tiempo. Esto se apreció claramente en los valores experimentales, los que muestran que mientras más tiempo están en contacto las partículas en la suspensión, se permite que las fuerzas electroquímicas actúen formando los flóculos y por lo tanto desestabilizando la suspensión.

Conclusiones

Como conclusión general de este trabajo, se puede indicar que se cumplió plenamente con el objetivo general de la memoria, ya que fue posible determinar y analizar el comportamiento de la velocidad de sedimentación terminal de micropartículas de un tamaño medio de 500 nm suspendidas en agua, ante cambios del índice de acidez (pH), de la suspensión mediante el uso de nitrato de potasio (KNO_3), para modificar este índice. Cuyos resultados son coherentes con lo indicado en la literatura técnica analizada y, por ende, se consideran como válidos y representativos del fenómeno físico-químico estudiado. Lo que quedó documentado adecuadamente en la memoria en sus diversas fases de trabajo.

REFERENCIAS

Bernhardt. (1994). *Particle size analysis. Clasification and sedimentation methods*. Freiberg, Alemania: Brian Scarlett.

R.H, M. (1996). *Zetapotential und Partikelladung in der Laborpraxis*.

Romero, C. (2018). *Floculación y viscosidad de suspensiones de sílice coloidal en presencia de sales de agua de mar* . Concepción .

Salinas Salas, G. (2007). *Sedimentationsverhalten von Submikrometer Partikeln in wässrigen suspensionen*.

Schubert, H. (2003). *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik*. Weinheim: Wiley-VCH.

Zeta-Meter. (s.f.). *Zeta Potential: A complete course in 5 minutes*. Staunton. Recuperado el 12 de diciembre de 2020

ANEXOS

A. MEDICIONES CENTRIFUGA ANÁLITICA LUMIFUGE 114

A continuación, se presentan los datos de las mediciones a las diferentes velocidades de giro, con sus gráficas correspondientes.

A.1 Velocidad 900 rpm

En la Tabla A.1, se presentan los valores de velocidad de sedimentación a una velocidad de centrifuga correspondiente a 900 rpm. Con los que posteriormente se construyó el Gráfico A.1.

*Tabla A.1 Datos velocidad de sedimentación experimental a una velocidad de 900 rpm.
Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing.
Gonzalo Salinas Salas*

pH	velocidad de sedimentación ($\mu\text{m/s}$)
2,32	90,246
3,30	256,373
5,97	15,711
6,41	15,750
7,16	15,455
7,70	15,530

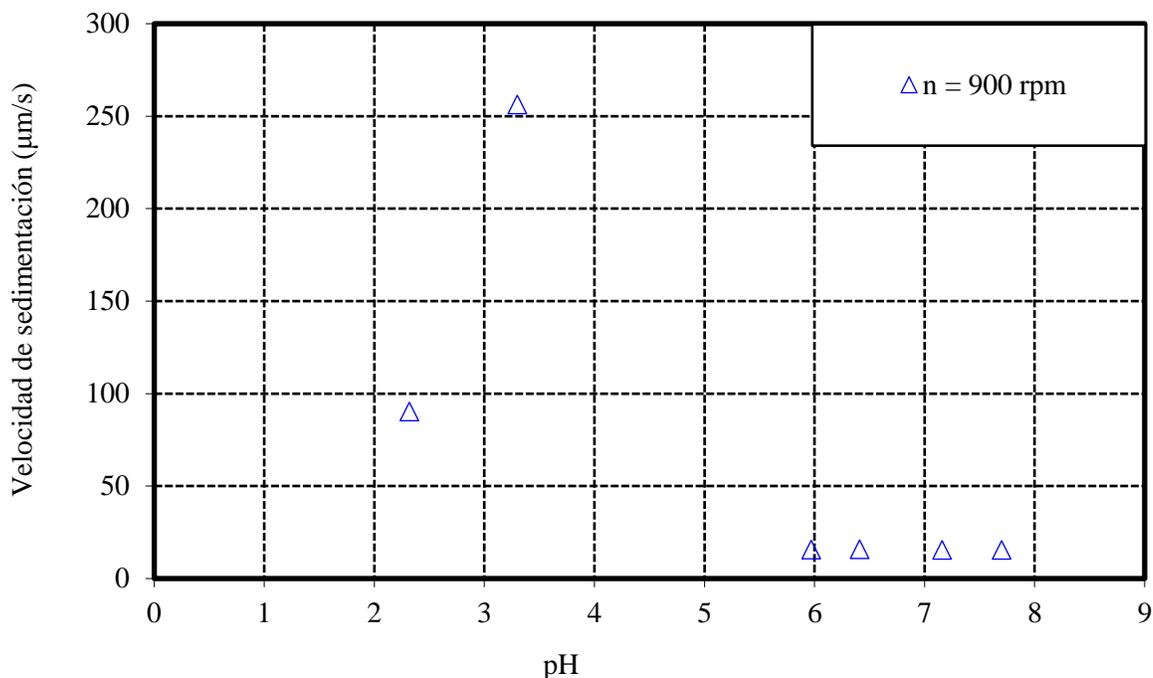


Gráfico A.1 Velocidad de sedimentación experimental de partículas Geltech 500 nm, a una velocidad de sedimentación de 900 rpm. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas

A.2 Velocidad 1.200 rpm

En la tabla A.2 se presentan los valores de velocidad de sedimentación a una velocidad de centrifuga correspondiente a 1.200 rpm. Con los que, posteriormente, se construyó el Gráfico A.2.

Tabla A.2 Datos velocidad de sedimentación experimental a una velocidad de 1.200 rpm. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas

pH	velocidad de sedimentación (µm/s)
2,32	87,228
3,30	217,730
5,97	28,457
6,41	28,438
7,16	28,018
7,70	28,006

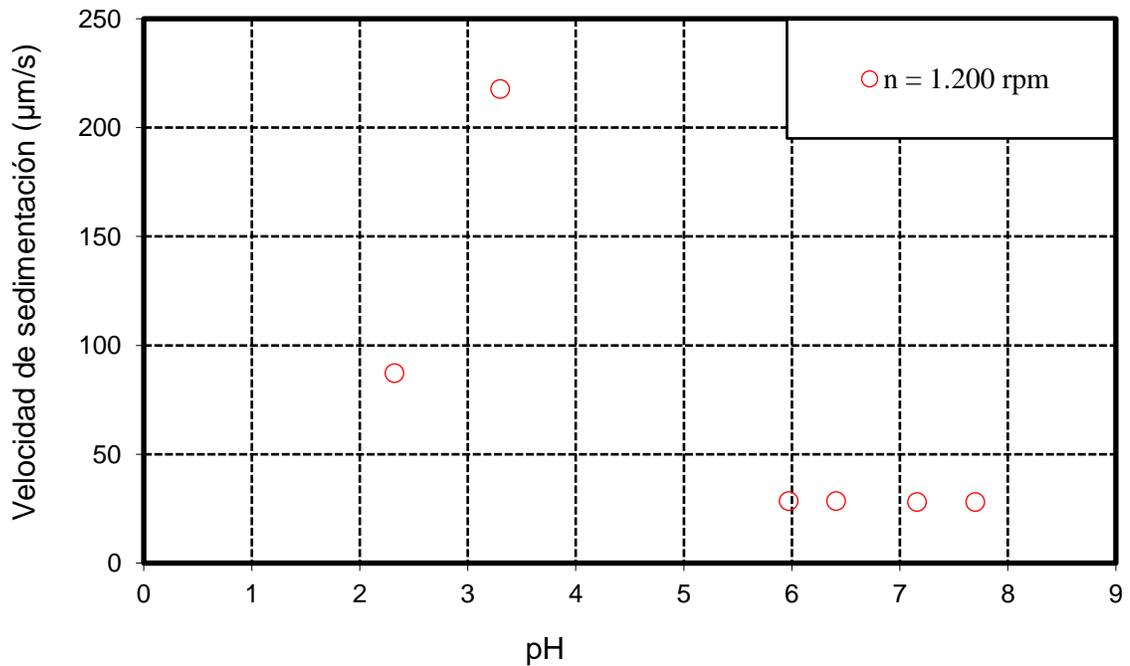


Gráfico A.2 Velocidad de sedimentación experimental de partículas Geltech 500 nm, a una velocidad de sedimentación de 1.200 rpm. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios proporcionados por Dr. Ing Gonzalo Salinas Salas

A.3 Velocidad 1.800 rpm

En la Tabla A.3 se presentan los valores de velocidad de sedimentación a una velocidad de centrifuga correspondiente a 1.800 rpm. Con los que, posteriormente, se construyó el Gráfico A.3.

Tabla A.3 Datos velocidad de sedimentación experimental a una velocidad de 1.800 rpm. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas

pH	velocidad de sedimentación (µm/s)
2,32	161,120
3,30	349,558
5,97	67,801
6,41	67,791
7,16	65,796
7,70	65,261

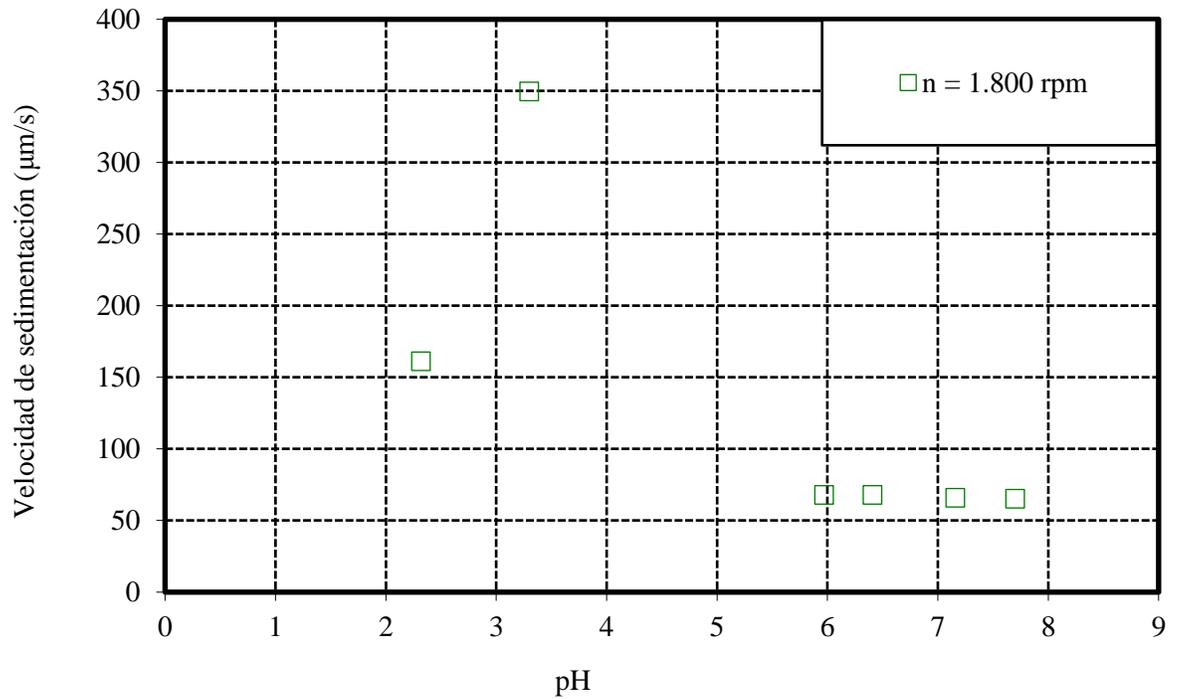


Gráfico A.3 Velocidad de sedimentación experimental de partículas Geltech 500 nm, a una velocidad de sedimentación de 1.800 rpm. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas

B. CÁLCULO VELOCIDADES NORMALIZADAS

Como se mencionó durante la realización de esta memoria, para establecer una comparación es necesario llevar los efectos de los campos de fuerzas centrífugas a distintas velocidades de rotación a una base común. A continuación, se presenta el proceso de cálculo de la velocidad normalizada el que se hace empleando la Ecuación (4.1) la que corresponde a la velocidad normalizada, se procede a realizar los cálculos.

Siendo la ecuación de velocidad normalizada la siguiente:

$$v_{normalizada} = \frac{v_{medida}}{v_{St}}$$

Para efectos de cálculos se utilizan los valores correspondientes a las velocidades de Stokes para cada velocidad de la centrifuga. Los cuales se encuentran en la Tabla 4.1.

Las velocidades de sedimentación experimentales (medida), corresponden a las de la Tabla 3.3.

B.1. Velocidades normalizadas a 900 rpm

- **pH 2,32**

$$v_{normalizada} = \frac{90,24 \text{ } (\mu\text{m/s})}{21,4 \text{ } (\mu\text{m/s})} = 4,22$$

- **pH 3,30**

$$v_{normalizada} = \frac{256,37 \text{ } (\mu\text{m/s})}{21,4 \text{ } (\mu\text{m/s})} = 11,98$$

- **pH 5,97**

$$v_{normalizada} = \frac{15,71 \text{ } (\mu\text{m/s})}{21,4 \text{ } (\mu\text{m/s})} = 0,73$$

- **pH 6,41**

$$v_{normalizada} = \frac{15,75 \text{ } (\mu\text{m/s})}{21,4 \text{ } (\mu\text{m/s})} = 0,74$$

- **pH 7,16**

$$v_{normalizada} = \frac{15,45 \text{ } (\mu\text{m/s})}{21,4 \text{ } (\mu\text{m/s})} = 0,72$$

- **pH 7,70**

$$v_{normalizada} = \frac{15,53 \text{ } (\mu\text{m/s})}{21,4 \text{ } (\mu\text{m/s})} = 0,73$$

B.2. Velocidades normalizadas a 1.200 rpm

- **pH 2,32**

$$v_{normalizada} = \frac{87,22 \text{ } (\mu\text{m/s})}{38,05 \text{ } (\mu\text{m/s})} = 2,29$$

- **pH 3,30**

$$v_{normalizada} = \frac{217,73 \text{ } (\mu\text{m/s})}{38,05 \text{ } (\mu\text{m/s})} = 5,72$$

- **pH 5,97**

$$v_{normalizada} = \frac{28,45 \text{ } (\mu\text{m/s})}{38,05 \text{ } (\mu\text{m/s})} = 0,75$$

- **pH 6,41**

$$v_{normalizada} = \frac{28,43 \text{ } (\mu\text{m/s})}{38,05 \text{ } (\mu\text{m/s})} = 0,75$$

- **pH 7,16**

$$v_{normalizada} = \frac{28,018 \text{ } (\mu\text{m/s})}{38,05 \text{ } (\mu\text{m/s})} = 0,74$$

Anexos

- **pH 7,70**

$$v_{normalizada} = \frac{28,006 \text{ } (\mu\text{m/s})}{38,05 \text{ } (\mu\text{m/s})} = 0,74$$

B.3. Velocidades normalizadas a 1.800 rpm

- **pH 2,32**

$$v_{normalizada} = \frac{161,12 \text{ } (\mu\text{m/s})}{85,6 \text{ } (\mu\text{m/s})} = 1,88$$

- **pH 3,30**

$$v_{normalizada} = \frac{349,55 \text{ } (\mu\text{m/s})}{85,6 \text{ } (\mu\text{m/s})} = 4,08$$

- **pH 5,97**

$$v_{normalizada} = \frac{67,8 \text{ } (\mu\text{m/s})}{85,6 \text{ } (\mu\text{m/s})} = 0,79$$

- **pH 6,41**

$$v_{normalizada} = \frac{67,79 \text{ } (\mu\text{m/s})}{85,6 \text{ } (\mu\text{m/s})} = 0,79$$

- **pH 7,16**

$$v_{normalizada} = \frac{65,79 \text{ } (\mu\text{m/s})}{85,6 \text{ } (\mu\text{m/s})} = 0,77$$

- **pH 7,70**

$$v_{normalizada} = \frac{65,26 (\mu m/s)}{85,6 (\mu m/s)} = 0,76$$

C. GRÁFICOS VELOCIDADES NORMALIZADAS

A continuación, se presentan los gráficos correspondientes a las velocidades normalizadas.

- **C.1. Velocidad 900 rpm**

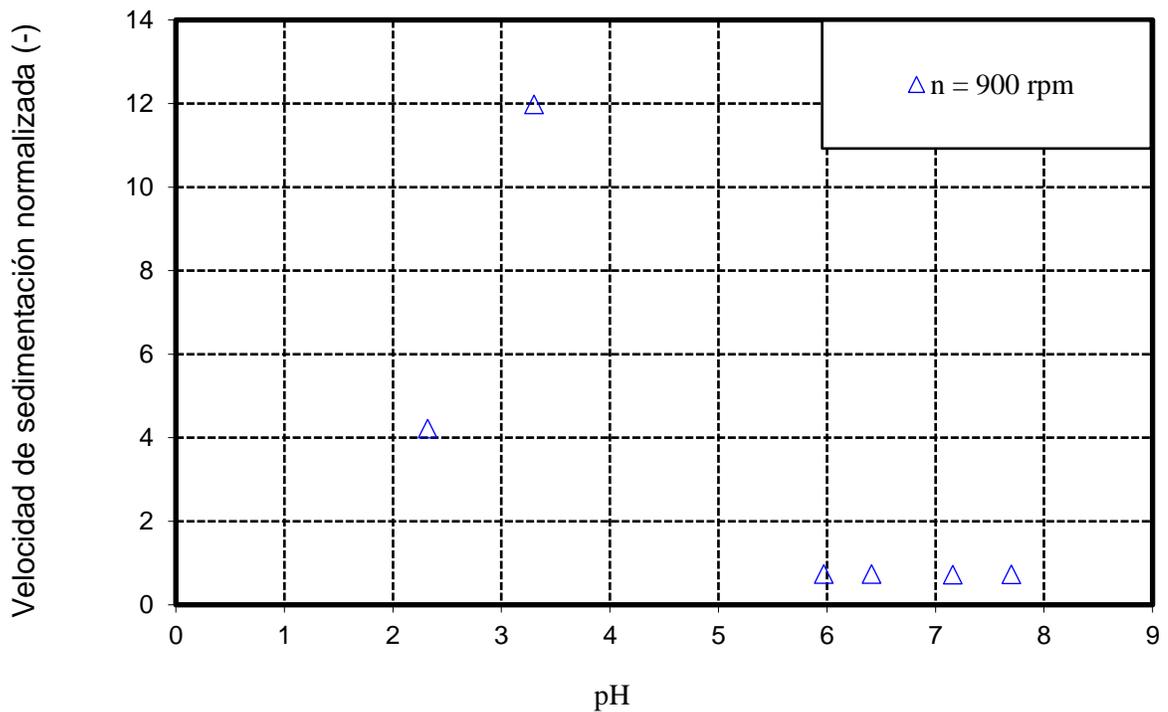


Gráfico C.1 Velocidad normalizada a 900 rpm, partículas Geltech 500 nm. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas

C.2. Velocidad 1.200 rpm

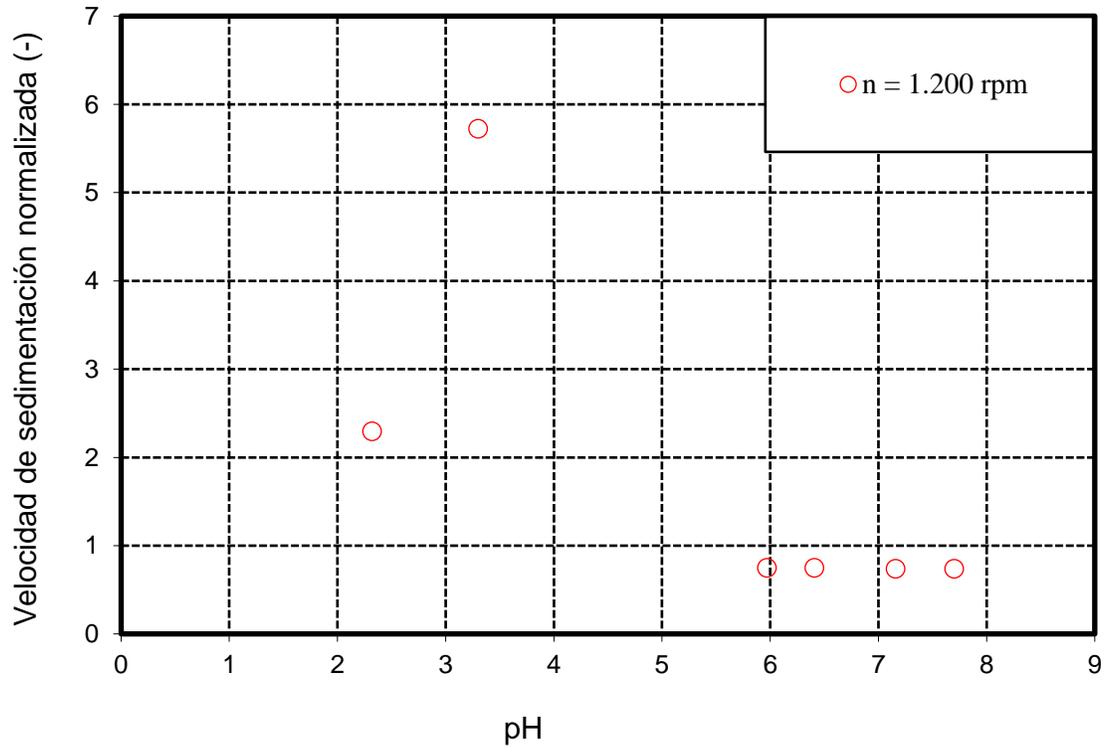


Gráfico C.2 Velocidad normalizada a 1.200 rpm, partículas Geltech 500 nm. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas

C.3. Velocidad 1.800 rpm

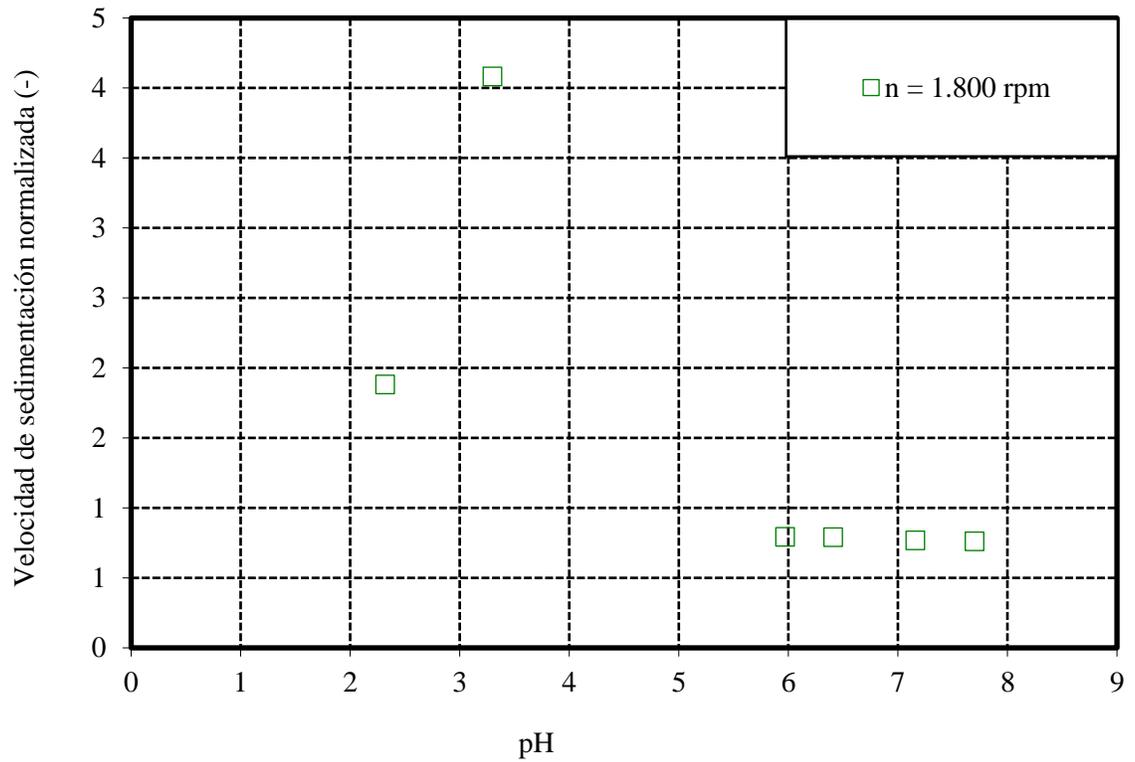


Gráfico C.3 Velocidad normalizada a 1.800 rpm, partículas Geltech 500 nm. Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas

D. EQUIPOS UTILIZADOS

D.1. Ultraturrax T-50

Es un instrumento dispersador para volúmenes entre 250 mL a 300 mL (H₂O), posee un indicador digital de velocidad. En la tabla D.1 se presentan las especificaciones técnicas.

Tabla D.1 Especificaciones técnicas Ultraturrax T-50. Fuente: www.ika.com

Información Técnica	
Potencia del consumo del motor	1100 W
Potencia del suministro del motor	700 W
Rango de volumen (H ₂ O)	0.25 - 30 l
Max. viscosidad	5000 mPas
Rango de velocidad	600 - 10000 rpm
Desviación de velocidad	1 %
Control de velocidad	progresión
Indicador de velocidad	LED
Ruido sin el elemento	72 dB(A)
Diametro del brazo de extensión	16 mm
Longitud del brazo de extensión	220 mm
Tipo de proceso	lote
Tiempo permitido encendido	100 %
Dimensiones (An x Al x Pr)	115 x 355 x 139 mm
Peso	5.85 kg
Temperatura ambiental permitida	5 - 40 °C
Permissible ambient conditions	80% (up to 31°C), decreasing linearly to max. 50 (@40°C)
Clase de protección de acuerdo al DIN EN 60529	IP 20
Voltaje	220 - 240 / 100 - 120 V
Frecuencia	50/60 Hz
Consumo de energía	1100 W

D.2. Homogeneizador ultrasónico vibra-cell VCX 500

Utilizado para la dispersión ultrasónica. Los pulsos de ultrasonidos son emitidos a la suspensión por una sonda, lo que hace experimentar un aumento en la temperatura de la mezcla. A continuación, se presentan las especificaciones técnicas del equipo.

Fuente de alimentación

- Potencia de salida: 500 W; frecuencia: 20 kHz
- Remote actuation compatible
- Dimensiones (H x W x D) 9 1/4" x 7 1/2" x 13 1/2" (235 x 190 x 340 mm) peso: 15 lbs. (6.8 kg)

Convertidor sellado

- Cristales de titanato de circonato de plomo piezoeléctrico (PZT)
- Diámetro: 2 1/2" (63.5 mm)
- Longitud: 7 1/4" (183 mm) peso: 2 lbs. (900 g)

Convertidor de cable

- Longitud cable: 6' (1.8 m)

Sonda estándar

- Diámetro de la punta: 1/2" (13 mm) con capacidad de procesamiento: 10 mL to 250 mL
- Longitud: 5 3/8" (136 mm) peso: 3/4 lb. (340 g) Titanium alloy Ti-6Al-4V

D.3. Agitador magnético RH digital

Los agitadores magnéticos permiten mezclar disoluciones mientras estas son enfriadas, este equipo se utiliza luego de que se utiliza el equipo vibra-cell VCX500. En la tabla D.3 se presentan las especificaciones técnicas.

Tabla D.3 Especificaciones técnicas agitador magnético RH digital. Fuente: www.ika.com

Número de puestos de agitación	1
Max. cantidad a agitar (H ₂ O)	15 l
Potencia del suministro del motor	2 W
Dirección de rotación del motor	izquierda
Indicación de velocidad valor programado	LED
Control de velocidad	Botón
Rango de velocidad	100 - 2000 rpm
Exactitud de ajuste de la velocidad	50 rpm
Longitud de la barra de agitación	20 - 80 mm
Autocalentamiento de la placa (RT:22°C/duración:1h)	28 +K
Potencia de calefacción	600 W
Indicación de temperatura valor programado	LED
Unidad de temperatura	°C
Rango de temperatura de calefacción	50 - 320 °C
Control de calentamiento	Botón
Temperature setting range	50 - 320 °C
Velocidad de calentamiento	6 K/min
Ext. para conectar el sensor de temperatura	ETS-D5
Circuito de seguridad regulable	100 - 360 °C
Material de la superficie de la placa	Acero inoxidable 1.4301
Dimensiones de la superficie de la placa	Ø 135 mm
Dimensiones (An x Al x Pr)	160 x 100 x 250 mm
Peso	3.845 kg
Temperatura ambiental permitida	5 - 40 °C
Humedad relativa permitida	80 %
Clase de protección de acuerdo al DIN EN 60529	IP 21
Voltaje	230 / 115 / 100 V
Frecuencia	50/60 Hz
Consumo de energía	620 W