



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

Determinación del comportamiento de velocidad de sedimentación de micropartículas frente a cambios del potencial de hidrógeno del electrolito en que se suspenden.

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

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

JAVIER DÍAZ MORENO

**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.



UNIVERSIDAD DE TALCA
DIRECCIÓN
SISTEMA DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD DE TALCA
SISTEMA DE BIBLIOTECAS
CAMPUS CURICO

Curicó, 2022

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a todas las personas que de alguna u otra manera fueron partícipes de mi etapa como universitario y del presente trabajo.

Primero, me gustaría agradecer a mis padres, gracias por darme la oportunidad y permitirme estudiar algo que fuera de mi interés y darme todas las herramientas para que pudiera terminar este desafío de la mejor manera. Gracias por entregarme siempre, todo su apoyo incondicional en cada minuto de mi vida. Sin ustedes, no me hubiese sido posible finalizar con éxito mis estudios y convertirme en quien soy ahora.

También quiero agradecer profundamente a mi pareja, Javiera, por el constante apañe en toda esta etapa, por no permitirme fallar, por trabajar mientras yo escribía esta tesis solo para acompañarme, por cada palabra de aliento y también consejo cada vez que lo necesité. Por siempre confiar en mí, incluso cuando la cosa se veía negra, agradecimiento eterno para ti.

Eloísa, mi pequeña. Que puede que no entienda nada de lo que está acá escrito, pero espero que cuando seas capaz de entender, quiero que sepas que eres lo más importante para mí. Eres la razón por la cual cada esfuerzo vale la pena, eres lo que me anima a levantarme y también la razón por la cual intento ser una mejor persona cada día. Eres mi todo. Hija, te amo.

Por otro lado, me gustaría agradecer a mis hermanas y mis abuelos, quienes siempre me han entregado palabras de apoyo y ayuda en todo lo que han podido.

Así mismo, me gustaría agradecer al Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas. Primero que todo por su paciencia, por siempre guiarme y orientarme en todo minuto de la elaboración de esta etapa universitaria. Por compartir sus conocimientos conmigo, por retarme cuando debió hacerlo y así mismo motivarme a hacer un mejor trabajo cada día. A usted, gracias por tener una gran vocación por enseñar.

Por último, quiero agradecerles a todos mis colegas que de alguna u otra forma fueron un apoyo, una distracción y fuente de grandes momentos vividos en mi etapa universitaria. Gracias a todos

los amigos que formé en el camino, ellos saben quiénes son. Cada uno de ustedes hará que esta etapa sea inolvidable.

Javier Alejandro Díaz Moreno

*Dedicada a mis padres
Leticia Moreno Hernández y Manuel Díaz Oyarce
Gracias por guíame siempre.*

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es determinar y analizar el comportamiento de la velocidad de sedimentación terminal de micropartículas de un tamaño medio de 250 nm, las cuales están suspendidas en agua, ante cambios en el potencial iónico de la suspensión, esto se realizó añadiendo nitrato de potasio (KNO_3). Cabe mencionar que esta memoria fue realizada en base a datos de carácter secundario.

En el trabajo se describe la modelación matemática clásica de los procesos de sedimentación, se estudia además las fuerzas de interacción electroquímicas entre partículas, así como también, se describe la medición 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 obtenidos en esta memoria se analizan y discuten, en este proceso, se desprendió cuán importante son las fuerzas iónicas de la suspensión, las que influyen de manera significativa en la magnitud de las fuerzas de interacción electroquímicas y junto con ello en la variación de la velocidad de sedimentación.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN	2
1.2. Lugar de aplicación	3
1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.4. ÁREA DE INVESTIGACIÓN.....	4
1.5. POSIBLES INTERESADOS	4
1.6. OBJETIVOS.....	4
1.6.1. Objetivo general	4
1.6.2. Objetivos específicos.....	5
1.7. RESULTADOS ESPERADOS	5
1.8. TÍTULO TENTATIVO	5
1.9. metodología	5
1.10. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	7
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. MÉTODOS DE SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS.....	9
2.2. SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS	10
2.3. comportamiento de la velocidad en régimen laminar.....	13
2.4. Efectos de concentración en la sedimentación	14
2.5. La corrección de la velocidad de sedimentación de Stokes:	15
2.6. Sedimentación de partículas en un campo centrífugo	17
2.7. Comportamiento de fuerzas ELECTROQUÍMICAS ENTRE las partículas presentes en la suspensión.....	18
2.7.1. Fuerzas de interacción entre partículas electroquímicas durante el proceso de sedimentación.....	18

2.7.2.	Interacciones electrostáticas	19
2.7.3.	Energía de Van der Waals	23
2.7.4.	Repulsión de Born	23
2.7.5.	Teoría DLVO.....	24
2.8.	Fundamentos para la medición fotométrica de los procesos de sedimentación	24
CAPÍTULO 3. OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES.....		27
3.1.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PARTÍCULAS	28
3.2.	CENTRÍFUGA ANALÍTICA LUMIFUGE 114	30
3.3.	EQUIPOS ADICIONALES	34
3.3.1.	Balanza de laboratorio	34
3.3.2.	Ultra-turrax	35
3.3.3.	Ultrahomogeneizador vibra-cell VCX500	35
3.3.4.	Agitador magnético	35
3.3.5.	Célula vibra del homogeneizador ultrasónico (Bioblock Scientific).....	35
3.3.6.	Medidor de conductividad y medidor de pH WTW Multilab 540	35
3.3.7.	Espectrómetro ultrasónico con potencial Zeta DT1200	35
3.3.8.	Microscopio electrónico Zeiss.....	36
3.4.	PREPARACIÓN DE LAS SUSPENSIONES.....	36
3.5.	ADQUISICIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES.....	37
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS		42
4.1.	PREPARACIÓN DE LOS VALORES PARA EL ANÁLISIS	43
4.2.	discusión.....	48
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES		50
REFERENCIAS		52
ANEXOS		53

A.	Tablas de datos con calculos de velocidad	54
A.1	valores originales	54
A.2	concentración diluida en agua desionizada	55
A.3	concentración con 0,01 mol de KNO_3	56
A.4	concentración de 0,01 mol de KNO_3	57
A.5	concentración de 0,1 Mol de KNO_3 (pH 7,3)	58
A.6	concentración de 0,1 Mol de KNO_3 (pH 7,4)	59
B.	gráfico doble logaritmico para encontrar valor exponente N.....	61
	61
C.	equipos utilizados	62
c.1	Ultraturrax t-50	62
C.2	Agitador magnético RH digitaL	63
C.3	. Homogeneizador ultrasónico vibra-cell VCX 500	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de analizadores centrífugos. Fuente: Powder Sampling and size sedimentation.....	10
Tabla 2.2; Factores de corrección para la velocidad de sedimentación del espejo de separación para suspensiones monomodales para escurrimientos cuyo número Reynolds es menor a 0,25. Fuente (Salinas Salas, 2007, pag 10).....	16
Tabla 2.3,Exponentes para la función del factor de corrección según Richardson y Zaki. Fuente Fuente (Salinas Salas, 2007, Pag 11).....	17
Tabla 3.1, Datos técnicos centrifuga analítica LUMiFuge 114. Fuente: Sedimentationsverhalten von Submikrometer Partikeln in wässrigen suspensionen, Salinas-Salas, 2007.....	33
Tabla 3.2, valores de velocidad de sedimentación para probeta con sobrenadante original. Fuente elaboración propia en base a los datos proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.....	37
Tabla 3.3, valores de velocidad de sedimentación para probeta diluida en agua desionizada. Fuente elaboración propia en base a los datos proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.....	38
Tabla 3.4, valores de velocidad de sedimentación para probeta con diferentes valores de concentración con 0,001 Mol de nitrato de potasio (KNO_3). Fuente elaboración propia en base a los datos proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas	39
Tabla 3.5, valores de velocidad de sedimentación para probeta con diferentes valores de concentración con 0,01 Mol de nitrato de potasio (KNO_3). Fuente elaboración propia en base a los datos proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.....	39
Tabla 3.6, valores de velocidad de sedimentación para probeta con diferentes valores de concentración con 0,1 Mol de nitrato de potasio (KNO_3). Fuente elaboración propia en base a los datos proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.....	40
Tabla 3.7, valores de velocidad de sedimentación para probeta con diferentes valores de concentración con 0,1 Mol de nitrato de potasio (KNO_3). Fuente elaboración propia en base a los datos proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.....	41

Tabla 4.1, Representación del valor de coeficiente de Person para las líneas de tendencias encontradas en la Ilustración 14. Fuente: Elaboración propia a base de los datos proporcionados por el Dr.Ing Gonzalo Salinas-Salas.....	45
Tabla 4.2 Datos experimentales, medición centrífuga analítica LUMiFuge 114 a diferentes valores de fuerza iónica. Fuente: elaboración propia en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.....	45

ÍNDICE DE TABLAS

Ilustración 1, Diagrama cuerpo libre partícula sometida a fuerzas del campo gravitatorio. Fuente: Elaboración propia.....	12
Ilustración 2 Partículas sin carga, están libres para chocar y flocular. Fuente: http://www.zeta-meter.com/	19
Ilustración 3: La idea modelo para la estructura y el curso potencial de la doble capa eléctrica. Fuente: (Salinas Salas, 2007).....	20
Ilustración 4: Comportamiento del potencial Z en la capa difusa de acuerdo con la fuerza iónica en el electrolito. Fuente: (Salinas Salas, 2007).....	21
Ilustración 5: Partículas cargadas se repelan unas a otras. Fuente: http://www.zeta-meter.com/	22
Ilustración 6: Energías de interacción electroquímicas entre dos partículas de tamaño del orden 200 nm según la teoría DLVO. Fuente (Salinas Salas, 2007, Pag 34)	24
Ilustración 7: Imagen microscópica electrónica para monospher® 250. Fuente (Salinas Salas, 2007, Pag 61).....	28
Ilustración 10: Disposición de medición centrifuga LUMiFuge 114. Fuente: L.U.M. GmbH .31	
Ilustración 11: Perfiles de transmisión LUMiFuge 114. Fuente: Sedimentationsverhalten von Submikrometer Partikeln in wässrigen suspensionen, Salinas-Salas, 2007	31
Ilustración 12: Centrifuga analítica LUMiFuge 114. Fuente: fotografía proporcionada por Dr. Ing. Gonzalo Salinas-Salas	32
Ilustración 13: Geometría cubeta centrifuga LUMiFuge 114, espesor de capa 1 mm, material policarbonato. Fuente: Sedimentationsverhalten von Submikrometer Partikeln in wässrigen suspensionen, Salinas-Salas, 2007	34

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 Y MOTIVACIÓN

La velocidad terminal de sedimentación de micropartículas que se encuentran presentes en una suspensión es relevante en numerosos procesos industriales y de alimentos, en los cuales se desea separar el material sólido de la suspensión o mantenerlo suspendido. Dado que el comportamiento de la velocidad de sedimentación de sistemas de micropartículas depende, en términos de fuerzas mecánicas de manera directa respecto de su tamaño y en el caso de las fuerzas electroquímicas de manera inversa a este, se infiere a priori que el potencial de ionización de la fase continua de la suspensión, en este caso agua, influye significativamente en la velocidad de sedimentación del sistema de partículas. Ergo, que el conocimiento que se adquiriera del comportamiento del sistema de partículas en una suspensión frente al potencial de ionización resultaría de interés para diversas aplicaciones de ingeniería de procesos, en particular, en la tecnología de descontaminación.

El Dr.-Ing. Gonzalo Salinas-Salas proporcionó un conjunto de datos experimentales, que tienen un carácter secundario los que fueron obtenidos durante su estadía en MVT-TU.Dresden, los cuales serán empleados y fundamentan esta memoria de título.

Las características del fenómeno que ocurre y se manifiesta a través de los datos disponibles resulta ser de gran interés, ya que permiten introducirse en la temática fisicoquímica del proceso de sedimentación y/o flotación los que se emplean en un conjunto de procesos industriales, siendo una de sus aplicaciones más conocidas las tecnologías de descontaminación. A este respecto, me hizo mucho sentido, las palabras de Dennis Gabor, quien planteaba que el desafío de la tecnología actual no es satisfacer las necesidades y deseos comunes, si no que resolver los problemas ocasionados por la tecnología pasada. Donde ejemplos de sus efectos se pueden apreciar en fenómenos como el calentamiento global, el adelgazamiento de la capa de ozono, la desaparición de especies, el monocultivo, etc. El poder desarrollar un trabajo con un marcado carácter científico-tecnológico, constituye en mi primer paso concreto en aportar a mejorar las condiciones ambientales del planeta y con ello asegurar el futuro de mi hija.

1.2. LUGAR DE APLICACIÓN

La aplicación de este estudio será en la Universidad de Talca, constituyendo los módulos de memoria I y II del currículum de la carrera de Ingeniería Civil Mecánica. En cuanto a la obtención de los datos experimentales, esto se realizó en los laboratorios de MVT-TU.-Dresden, Alemania, por el Dr.-Ing. Gonzalo Salinas-Salas, quien lo cedió como datos secundarios para ser empleados en esta memoria.

1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La totalidad de los modelos tradicionales empleados para describir el comportamiento de la velocidad de sedimentación de un sistema de partículas, parte de un concepto básico, que la suspensión es estable, esto es que las fuerzas electroquímicas generadas por el potencial iónico presente en la suspensión son despreciables. Sin embargo, si estas fuerzas adquieren un valor significativo, que no es descrito en la modelación clásica mecánica del proceso de sedimentación genera que toda esta modelación se vuelva inútil.

De ahí la importancia de conocer el comportamiento de la velocidad de sedimentación de micropartículas, frente al potencial iónico que es el origen de las fuerzas electroquímicas que afectan el comportamiento de la velocidad de sedimentación, a partir de lo descrito por la teoría DVLO en términos de la evaluación de la magnitud de estas fuerzas. Esto da lugar a la existencia de dos grandes tipos de suspensiones, las estables, donde las fuerzas mecánicas son las relevantes y las inestables, donde las fuerzas electroquímicas son las relevantes. Es por esto que resulta de singular interés, conocer la relación que se presenta entre la velocidad de sedimentación y el potencial iónico y de ser posible plantear una relación matemática de carácter empírico entre ellos.

1.4. ÁREA DE INVESTIGACIÓN.

- Ingeniería de procesos.
- Comportamiento y caracterización de suspensiones.
- Medición de velocidad de sedimentación.
- Comportamiento electroquímico de suspensiones.
- Fenómenos de sedimentación.
- Métodos experimentales en ingeniería.

1.5. POSIBLES INTERESADOS

En esta memoria resulta de interés para la industria de procesos, en los cuales se empleen procesos de sedimentación y/o flotación, que va desde la industria farmacológica hasta la industria minera, alimenticia, en particular, la potabilización del agua y tratamiento de residuos. Ya que permitiría optimizar el uso de distintos productos que se emplean, ya sea para la separación de fases o el sostenimiento de la suspensión de la fase discontinua (partículas), en la fase continua (fluido).

1.6. OBJETIVOS

1.6.1. Objetivo general

Determinación del comportamiento de velocidad de sedimentación de partículas submicrométricas, frente a cambios del potencial de hidrógeno del agua con la cual conforma una suspensión.

1.6.2. Objetivos específicos

- Determinar el estado del arte en sistemas de medición de velocidad de sedimentación de sistemas de micropartículas y de la modelación del comportamiento de las fuerzas entre las micropartículas que conforman una suspensión en agua.
- Analizar el comportamiento de las fuerzas electroquímicas entre micropartículas suspendidas en agua, considerando a esta como un electrolito.
- Describir la metodología empleada para obtención de los valores experimentales a utilizarse.
- Obtener un modelo del comportamiento de la velocidad de sedimentación de sistemas de micropartículas suspendidas en agua, ante cambios del potencial zeta de la suspensión.

1.7. RESULTADOS ESPERADOS

Determinar el comportamiento de la velocidad de sedimentación con respecto al cambio del potencial iónico de la suspensión. De ser posible, plantear una relación matemática que sirva de base para el desarrollo de un modelo posterior que describa el comportamiento de este fenómeno.

1.8. TÍTULO TENTATIVO

Determinación del comportamiento de velocidad de sedimentación de partículas submicrométricas, frente a cambios del potencial de hidrógeno del electrolito con el cual conforman una suspensión.

1.9. METODOLOGÍA

Primero se realizará un análisis del estado del arte, relativo al comportamiento de micropartículas sometidas en un fluido dieléctrico el cual presenta cambios del potencial iónico. Estos son aspectos teóricos en los cuales, junto a las fuerzas mecánicas de la sedimentación

Capítulo 1. Introducción

aparecen fuerzas de carácter electroquímico que significan variaciones asociadas al potencial iónico.

Ahora bien, dado que se pretende determinar el comportamiento de la influencia del potencial iónico sobre la velocidad de sedimentación en términos efectivos, se realizará un análisis a partir de un conjunto de datos experimentales tomados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas-Salas en los laboratorios de MVT-TU.-Dresden, Alemania.

Con estos datos, se procederá a describir la forma en la que fueron tomados, que implica tanto la preparación de las suspensiones, la identificación de las partículas, del medio con el cual variará el potencial iónico, las mediciones del potencial iónico y una descripción de los equipos involucrados.

Esta situación da lugar a un conjunto de datos que se graficará en forma de un diagrama logarítmico y luego se realizará un análisis de estos valores y su comportamiento, siendo posible, eventualmente, el establecimiento de líneas de tendencias que pueden dar lugar a ajustes de curvas, vale decir, entrar con un valor de potencial iónico y establecer cuál es el valor de la velocidad de sedimentación de las partículas.

Luego, con estos datos y realizado este análisis, permitirá obtener algunas conclusiones del comportamiento de sistemas de partículas, los cuales podrían operar en ambos sentidos, es decir acelerar o reducir el proceso de sedimentación.

Cabe destacar que para la realización del análisis cuantitativo se utilizarán los softwares Microsoft Excel y Microsoft Word.

1.10. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

- **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN:** En esta sección se presenta la motivación del estudio, el planteamiento del problema, la solución propuesta, los objetivos del estudio, los alcances, la metodología a seguir y los resultados esperados.
- **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO:** En esta sección se presenta la revisión bibliográfica necesaria para la realización y comprensión de la memoria, abordando temas de medición de distribución de partículas.
- **CAPÍTULO III: OBTENCIÓN DATOS EXPERIMENTALES:** En esta sección se presenta la caracterización de los sistemas de partículas, además de las construcciones de gráficos incrementales y acumulativos asociados, además de las velocidades de sedimentación. Por otro lado, también se describen las máquinas y herramientas utilizadas para la obtención de los datos.
- **CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS:** En esta sección se presenta el análisis cuantitativo y cualitativo de los resultados obtenidos anteriormente.
- **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES:** En esta sección se presentan las conclusiones del estudio a partir de lo realizado.
- **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:** En esta sección se presenta el material bibliográfico utilizado.

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. Dependiendo de la posición que tengan las partículas cuando se inicia la medición, se pueden encontrar los siguientes métodos:
 - 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. Basándonos en el lugar donde se realiza la medición de la 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. Dependiendo del tipo de 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.

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

<p>Homogéneo, incremental sedimentación centrífuga</p>	<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
<p>Homogéneo, acumulativo, sedimentación centrífuga</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Centrífuga Alpina • Hosokaw a Mikropu 1 • Limpiador de sedimento
<p>Inicio de línea, incremental, sedimentación centrífuga</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Fotocentrífuga de disco Joyce-Loebl • Brookhaven BI-DCP, disco • Fotocentrífuga • Fotocentrífuga de disco CPS
<p>Inicio de línea, acumulativo, sedimentación centrífuga</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Analizador MSA

2.2. SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS

La sedimentación es el proceso en el cual las partículas que inicialmente se encontraban inmóviles inician su movimiento debido al efecto del campo de aceleración o las fuerzas que actúan en la suspensión de la partícula y el líquido. Las partículas buscan tener la menor cantidad de energía posible, lo que se consigue en el la parte inferior del recipiente.

El movimiento que realizan las partículas se ve afectado por las propiedades del líquido, la suspensión y las partículas. Se consideran como los parámetros más importantes los siguientes:

Capítulo 2. Marco teórico

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

En las fuerzas que actúan hay una que predomina, esta fuerza es que se origina por el campo centrífugo, por lo que es posible modelar el comportamiento de una partícula esférica, rígida, que se hunde en un fluido viscoso desde una posición conocida con nula velocidad inicial, tomando en cuenta la ecuación de D'Alambert, la cual es la Segunda ley de Newton, solo que se aplica a un sólido de masa constante, solo tomando en cuenta los cambios de cantidad de movimiento, el peso de la partícula, la fuerza de flotación y arrastre 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 1 se observa el diagrama de cuerpo libre para describir la situación física.



Ilustración 1, Diagrama cuerpo libre partícula sometida a fuerzas del campo gravitatorio.

Fuente: Elaboración propia

Realizando la sumatoria de fuerzas externas que actúan sobre la partícula, se representa en la ecuación 2.1:

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

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 .

2.3. COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD EN RÉGIMEN LAMINAR.

En condiciones de que una esfera se sumerja en un fluido que da lugar a un escurrimiento laminar es posible aplicar la ecuación de Navier-Stokes que permite evaluar la fuerza de fricción que experimentan los objetos que se mueven dentro de un fluido viscoso en un régimen de escurrimiento laminar, el cual posee un bajo número de Reynolds, que para el caso de esferas es 0,25.

Esta condición permite determinar el valor de la velocidad relativa entre la esfera y el fluido en este régimen de escurrimiento laminar. Ya que, bajo estas condiciones, la resistencia que ofrece el fluido por efecto de las fuerzas de roce que se oponen al movimiento, se debe al deslizamiento de las capas de fluido en forma de láminas, a partir de la capa límite del cuerpo o partícula de forma esférica.

Para efectos de la partícula, esto se traduce en una desaceleración inicial de esta, hasta el momento en que las fuerzas mecánicas que actúan sobre ella alcancen un equilibrio dinámico entre el peso de la partícula, la fuerza de flotación y la fuerza de roce lo que da a lugar a que la sumatoria de fuerzas externas que se ejercen sobre la partícula se anulan, para efectos prácticos. Con lo que la partícula alcanza la velocidad terminal de sedimentación o velocidad de Stokes. Esta velocidad en un tiempo infinito teóricamente y finito en términos prácticos se puede evaluar mediante 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*

x : *Diámetro de la partícula*

$\frac{dy(\infty)}{dt}$: *derivada de la posición evaluada en tiempo infinito*

g : *aceleración de gravedad*

z : *Factor de incremento de aceleración de gravedad*

2.4. EFECTOS DE CONCENTRACIÓN EN LA SEDIMENTACIÓN

Cuando sedimentan más de una partícula, o sea un colectivo de partículas, da lugar a que exista una concentración de partículas en la suspensión, lo que da lugar a los siguientes efectos en ésta

- Variación la densidad media de la suspensión
- La viscosidad aparente y desviación del comportamiento del flujo newtoniano sufren un incremento.
- Al ocurrir interacciones de partículas de diferentes tipos, ocurre un cambio en la velocidad de sedimentación de partículas individuales.

Es aquí, donde nos encontramos con el concepto de velocidad de sedimentación efectiva $v_{s,eff}$, la cual, se puede expresar como, la tasa de sedimentación de partículas individuales alterada por la forma y la concentración. Con el aumento de concentración de partículas, ocurren distintos efectos de interacción entre las partículas. Los más importantes son:

- Impactos entre partículas.
- Interferencia hidrodinámica entre las partículas y sus corrientes.
- Las fuerzas de interacción electrostáticas entre las partículas.
- Difusión de las partículas más pequeñas.

La influencia de la concentración de partículas en la tasa efectiva de sedimentación se tiene en cuenta en la literatura de dos maneras generalmente diferentes, la corrección de los parámetros de sustancia en las ecuaciones de movimiento en forma de la llamada función de corrección de velocidad, la que depende de la concentración de partículas existentes en la suspensión, la que modifica la velocidad de Stokes. Estos son:

- La suspensión es una mezcla homogénea entre una fase discontinua (partículas) y una fase continua (líquido), por lo que, las propiedades físicas de esta suspensión, tales como, la densidad y la viscosidad dependen, de la concentración de la fase discontinua, o sea, de la cantidad de partículas que existe en la suspensión. Como resultado, las velocidades de las partículas se ven modificadas por estas propiedades, las que están directamente relacionadas con las ecuaciones de movimiento que definen a la velocidad de Stokes lo que obliga a utilizar un factor de corrección que considere estos elementos.
- La fase discontinua (partículas) se considera que fluyen con la misma velocidad representativa al tamaño de éstas, y se ven sometidas a un conjunto de fuerzas de interacción entre ellas y el fluido que modifica su velocidad al moverse en el área entre dos partículas, siguiendo el principio de conservación de la masa, por lo que, la evaluación de la velocidad de Stokes aplicándose una corrección que considere estos efectos es satisfactoria para el conjunto de partículas. (Salinas Salas, 2007)

2.5. LA CORRECCIÓN DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DE STOKES:

Dados los efectos que se producen por las fuerzas entre las partículas, durante el proceso de sedimentación generan una modificación de la velocidad terminal de sedimentación o velocidad de Stokes se consideran estos efectos, en la llamada la corrección de la velocidad de sedimentación de Stokes se lleva a cabo utilizando un valor que proviene de las denominadas funciones de corrección de velocidad, las cuales se plantean a partir de elementos teóricos, de carácter semi empírico o directamente de carácter empírico. De modo que el valor que adopta para una determinada situación el factor de corrección corrige la velocidad terminal de sedimentación o velocidad de Stokes empleándose la ecuación 2.3.

$$v_{S,eff} = K_F \cdot v_{S,TF}$$

ecuación 2.3

Capítulo 2. Marco teórico

Donde:

$v_{S,eff}$: Velocidad efectiva de sedimentación de las partículas individuales

K_F : Factor de corrección de la velocidad de sedimentación

$v_{S,TF}$: Velocidad de sedimentación de las partículas individuales

Además, se debe mencionar, que existen diversos modelos para determinar la función de corrección de la velocidad de sedimentación. En la Tabla 2.2, se presentan algunos de estos modelos para calcular el factor de corrección de las suspensiones monomodales, o sea, de un tamaño único de partículas, para escurrimientos cuyo número de Reynolds son menores a 0,25 durante el proceso de sumergimiento.

Tabla 2.2: Factores de corrección para la velocidad de sedimentación del espejo de separación para suspensiones monomodales para escurrimientos cuyo número Reynolds es menor a 0,25. Fuente (Salinas Salas, 2007, pag 10)

Autor	Factor de corrección; K_F	
Ecuación de continuidad	$(1 - c)$	2.4
Richardson y Zaki	$(1 - c)^n$	2.5
Steinour	$(1 - c)^2 \cdot 10^{-1,82 \cdot c}$	2.6

Dado que la función propuesta por Richardson & Zaki, que es de carácter semi empírico es la más utilizada en los procesos de sedimentación, dado que tiene la ventaja, de que depende del régimen de escurrimiento del fluido por sobre las partículas, se consideran valores para el exponente “n” dependientes de un rango de regímenes de escurrimiento. Esta función semi empírica presenta el aspecto empírico en el valor del exponente y el aspecto científico en la ecuación de continuidad, la que se encuentra elevada al exponente. En la Tabla 2.3, se pueden apreciar las distintas formas que adopta el exponente de la ecuación de Richardson & Zaki.

Tabla 2.3, Exponentes para la función del factor de corrección según Richardson y Zaki.

Fuente Fuente (Salinas Salas, 2007, Pag 11)

Número de Reynolds	Exponente n
$Re \leq 0.25$	4,65
$0.25 < Re < 1$	$4,35 \cdot Re^{-0.03}$
$1 < Re < 500$	$4,45 \cdot Re^{-0.1}$
$500 < Re < 300,000$	2,39

2.6. SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS EN UN CAMPO CENTRÍFUGO

La sedimentación de partículas en un campo centrífugo es considerada como una variante al proceso de sedimentación bajo el efecto del campo de fuerzas gravitatorio, cuya aceleración es constante. En cambio, en un campo de aceleración centrífuga, este valor varía directamente con la posición de las partículas, respecto del eje de rotación, y por ende, la magnitud de la fuerza sobre éstas. A su vez, el campo centrífugo, amplifica la fuerza ejercida sobre la partícula respecto del campo gravitatorio, lo que da lugar a la aparición de un factor de amplificación (z), el cual multiplica a la aceleración de gravedad. Y corresponde a la división del valor de la aceleración centrífuga ($\omega^2 \cdot r$) dividido por la aceleración de gravedad (g). Se asumen para el movimiento de las partículas en el campo centrífugo diversas suposiciones, siendo las más relevantes, las siguientes:

- Movimiento acelerado de las partículas, siguiendo la dirección del campo centrífugo
- Las trayectorias de las partículas son radiales
- Se desprecian los efectos de la aceleración de Coriolis
- Se desprecian las Fuerzas hidrodinámicas

2.7. COMPORTAMIENTO DE FUERZAS ELECTROQUÍMICAS ENTRE LAS PARTÍCULAS PRESENTES EN LA SUSPENSIÓN.

2.7.1. Fuerzas de interacción entre partículas electroquímicas durante el proceso de sedimentación.

Dado el tamaño de orden submicrométrico de las partículas ensayadas (250 nm de diámetro medio) implica que la superficie de estas partículas es considerable en términos de las fuerzas asociadas a ella, respecto a las fuerzas mecánicas, ya que, alrededor de la partícula se genera una atmosfera iónica que genera fuerzas que interactúan electroquímicamente, a través del electrolito, que es el agua, que presenta distintas concentraciones de iones de hidrógeno. Estas fuerzas electroquímicas adoptan tres tipos que son:

- a) Fuerzas electroestáticas
- b) Fuerzas de van der Waals
- c) Fuerzas de Born

La suma de estas fuerzas, dan lugar a la atracción o repulsión de acuerdo con la carga eléctrica existente en las partículas y a la concentración de ion hidrógeno existente en el agua donde sedimentan (electrolito). La magnitud de estas fuerzas por tratarse de partículas muy pequeñas, cuya inercia es baja, son capaces de desviar a éstas de las direcciones de movimientos, que tienen por efecto del campo de aceleración centrífugo, lo que da a lugar a que las partículas de diferente carga eléctrica superficial se unan para neutralizarse y comienzan a conformar un flóculo, que al tener más masa se acelera respecto de las partículas aisladas. La Ilustración 2, muestra el comportamiento que presentarían las partículas ante la acción de estas fuerzas electroquímicas.

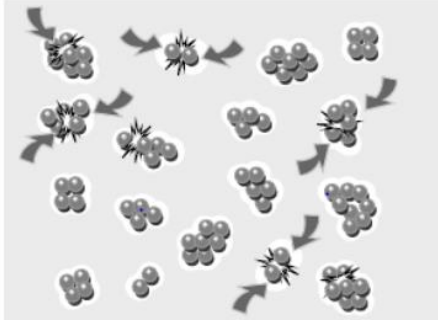


Ilustración 2 Partículas sin carga, están libres para chocar y flocular. Fuente:

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

La modelación matemática del comportamiento de estas fuerzas, se le denomina teoría DLVO. Esta teoría, plantea la acción simultanea de estas fuerzas superficiales ya indicada, de manera conjunta, y que se producen por la coexistencia simultanea de una atmosfera iónica, alrededor de la partícula de espesor variable que actúa sobre la superficie y la concentración iónica presente en el electrolito a la que se denomina fuerza iónica.

Analizando detalladamente estas fuerzas, se plantean por separado de la forma siguiente:

2.7.2. Interacciones electrostáticas

Estas interacciones, de carácter electrostático, se generan en la superficie de la partícula, cuya carga inherente es negativa, pero al encontrarse sumergidas en un electrolito esta carga comienza a conformar una atmosfera iónica de distinta carga sobre su superficie, la que se puede incrementar en espesor, de acuerdo a la concentración iónica existente en el electrolito, lo que incrementaría la fuerza que se engendraría entre dos partículas cuyas atmosferas tuvieran distinta carga, engendrándose un dipolo eléctrico. Esta fenomenología se le conoce como potencial Zeta o estrella, lo que se presenta en la Ilustración 3.

Capítulo 2. Marco teórico

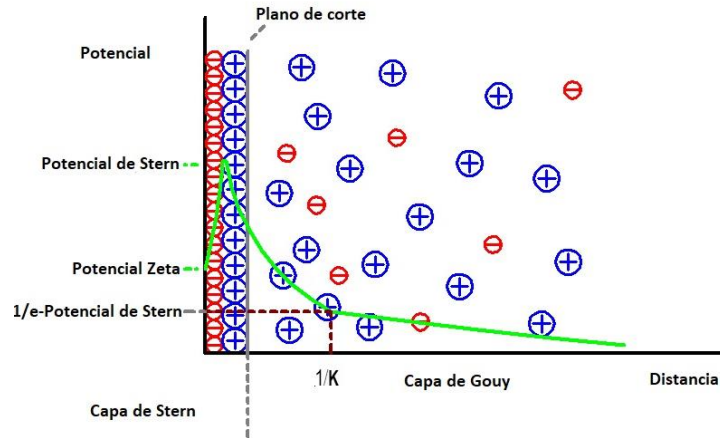


Ilustración 3: La idea modelo para la estructura y el curso potencial de la doble capa eléctrica. Fuente: (Salinas Salas, 2007)

Los términos presentados en la Ilustración anterior corresponden a el espesor de la atmosfera iónica de la partícula o espesor del potencial estrella, a su vez, el potencial Zeta, representa el comportamiento de la magnitud de la carga eléctrica en la atmosfera iónica de la partícula y su proyección hacia el electrolito.

Como se aprecia, la carga superficial base de toda partícula es descarga negativa, lo que atrae a iones positivos de la suspensión. La suma de ambos engendra el espesor de esta atmosfera. Esta atmosfera tiene un valor elevado de potencial Zeta en la zona inmediatamente adyacente a la superficie de la partícula, donde alcanza un valor máximo, denominado potencial estrella, el que puede adoptar distintos tipos de carga eléctrica de acuerdo al espesor de esta capa. La energía de esta capa se proyecta hacia el electrolito decayendo a medida que se aleja de la partícula. A esta proyección se le denomina capa difusa.

La forma de medir los parámetros de esta atmósfera iónica es el denominado potencial Zeta, a través del parámetro de Debye-Hückel, que describe el decaimiento de la capa difusa, cuando las partículas son esféricas, este decaimiento del potencial solo se puede calcular de forma aproximada mediante la ecuación 2.7.

$$\kappa = \sqrt{\frac{e^2}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot k_B \cdot T_{abs}} \sum n_j \cdot z_j^2} \quad \text{con} \quad n_j = C_{M,j} \cdot A_{AV} \quad \text{ecuación 2.7}$$

Donde:

k_B : Constante de Boltzman

n_j : Concentración de tipo de ion j

z_j : Valor del tipo de ion j

A_v : Sección transversal de extinción específica del volumen

Este espesor y su consecuente decaimiento en el electrolito se ve afectado por la concentración de iones de hidrogeno, como se indica en la Ilustración 4; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

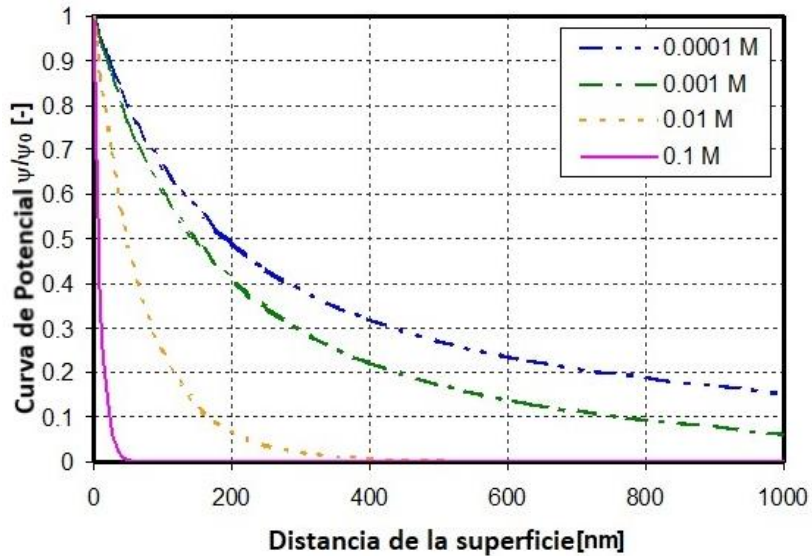


Ilustración 4: Comportamiento del potencial Z en la capa difusa de acuerdo con la fuerza iónica en el electrolito. Fuente: (Salinas Salas, 2007)

De la Ilustración 4, se desprende que el espesor de la atmosfera iónica se vuelve más pequeña a medida que se incrementa la concentración ionica y a altos valores iónicos en el electrolito. A

Capítulo 2. Marco teórico

su vez, se muestra la influencia de la fuerza iónica (concentración de electrolitos de sales de un valor) en la caída del potencial de una partícula del tamaño de 250 nm. Además, deja claro la importancia de las interacciones inter-partículas para el comportamiento macroscópico de una suspensión ya que define la estabilidad o inestabilidad de esta, entendiéndose como estabilidad la no formación de flóculos. Y a inestabilidad como la formación de flóculos. (Salinas Salas, 2007, Pág. 32).

Cuando ocurre una interacción entre dos capas de potencial difusas dos partículas distintas, comienzan a actuar las fuerzas electroestáticas entre los iones y las superficies efectivamente.

Generándose una fuerza de repulsión entre partículas de igual carga, como se puede apreciar en Ilustración 5 .

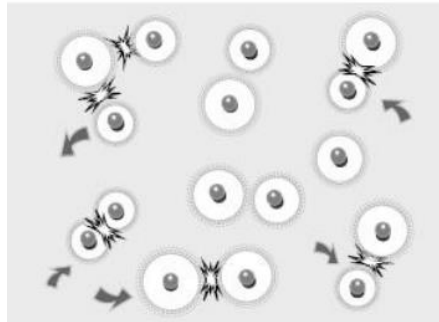


Ilustración 5: Partículas cargadas se repelan unas a otras. Fuente: <http://www.zeta-meter.com/>

La energía que da a lugar a esta fuerza de repulsión se puede calcular basándose en la ecuación 2.5 de Meadow and Healy:

$$J_{el}(a) = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \chi_p}{8} \cdot \zeta^2 \cdot \ln \left\{ \frac{1 + e^{-\kappa \cdot a}}{1 - e^{-\kappa \cdot a}} - \ln(1 - e^{-2 \cdot \kappa \cdot a}) \right\} \quad \text{ecuación 2.8}$$

Donde:

J_{el} : Energía de repulsión electrostática

Capítulo 2. Marco teórico

El valor de la energía de repulsión dependerá del potencial Zeta, la concentración de iones y el tipo de iones contenidos en la suspensión (electrolito). A su vez, el potencial Zeta depende del pH (corresponde la exponente de la concentración de ion hidrógeno presente en una sustancia, comúnmente, se le denomina acidez), por lo que las interacciones electrostáticas pueden variar dependiendo de su medición.

2.7.3. Energía de Van der Waals

El modelo de Fuerzas atractivas propuesta por Van der Waals para explicar el comportamiento de los gases no-ideales, resulta aplicable al comportamiento de partículas submicrométricas suspendidas en un electrolito sobre la base de un dipolo, esto es dos partículas adyacentes al electrolito. La ecuación 2.6, permite evaluar la energía de atracción entre las partículas que conforman el dipolo respecto de la distancia que las separa. (Salager, 2007, Pag.2)

$$J_{VW}(a) = -\frac{A_H}{12} \cdot \left[\frac{x_p^2}{(a+x_p)^2 - x_p^2} + \frac{x_p^2}{(a+x_p)^2} + 2 \cdot \ln \left\{ 1 - \left(\frac{x_p}{a+x_p} \right)^2 \right\} \right] \quad \text{ecuación 2.9}$$

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, siendo su valor del orden de 10^{-20} J.

2.7.4. Repulsión de Born

La energía de repulsión de Born no puede ser un valor despreciable, ya que, cuando las distancias de adhesión de las partículas son muy pequeñas (menores a 0,2 nm) aumentan su valor, debido a que es indirectamente proporcional a la 7ª potencia de la distancia.

$$J_B(a) = \frac{1,55 \cdot A^6}{2} \cdot \frac{x_p}{a^7} \cdot A_H \quad \text{ecuación 2.10}$$

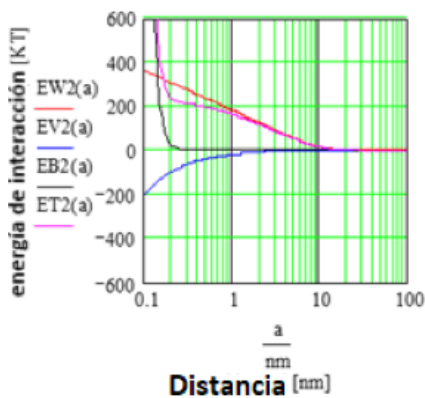
Donde, A corresponde a 10^{-10} m.

2.7.5. Teoría DLVO

La teoría DLVO plantea que las fuerzas y energías entre partículas tienen características aditivas, por lo que la fuerza y energía total de interacción sería la suma de la fuerza electrostática más la fuerza de Van der Waals más la fuerza de Born, respetando sus sentidos y signos de polaridad. Lo que matemáticamente se plantea mediante la ecuación 2.8. (Salager, 2007, Pag.8).

$$J_T(a) = \sum J_i(a) \quad \text{ecuación 2.11}$$

La Ilustración 6, muestra el comportamiento de las energías de interacción electroquímicas entre partículas de un tamaño del orden de 200 nm.



- EW(a) : Energía de repulsión electrostática
- EV(a) : Energía de interacción Van der Waals
- EB(a) : Energía de repulsión del Born
- ET(a) : Energía de interacción electroquímica total

Ilustración 6: Energías de interacción electroquímicas entre dos partículas de tamaño del orden 200 nm según la teoría DLVO. Fuente (Salinas Salas, 2007, Pag 34)

2.8. FUNDAMENTOS PARA LA MEDICIÓN FOTOMÉTRICA DE LOS PROCESOS DE SEDIMENTACIÓN

Para determinar el tamaño de partículas, se debe tener en cuenta el proceso físico que se produce cuando ocurre una reducción en la intensidad luminosa de un haz de luz que atraviesa por un

Capítulo 2. Marco teórico

espesor determinado de una suspensión que se encuentra en reposo relativo. Lo que se modela matemáticamente a través de la ley de Lambert-Beer. Donde, físicamente relaciona la disminución de la intensidad luminosa que atraviesa una suspensión que contiene partículas de un determinado tamaño proyectando su sombra, la que genera un área, que depende de la concentración volumétrica de partículas y del espesor de la suspensión que atraviesa. Matemáticamente, se plantea mediante la ecuación 2.9. (Schubert, 2003).

$$E = -\ln T = -\ln \frac{I}{I_0} = Ap * Cv * L \quad \text{ecuación 2.12}$$

Dónde:

E : Extinción

T : Transmisión

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

I_0 : Intensidad de la luz que atraviesa la cubeta con el fluido puro, corresponde a la máxima intensidad lumínica que atraviesa la cubeta.

Ap : Área específica de extinción

c : Concentración volumétrica

L : Ancho de la cubeta del equipo de medición

Es necesario indicar, que el comportamiento de la transmisión es de tipo asintótico, respecto de la concentración volumétrica de partículas, por lo tanto, este sistema de medida se aplica para suspensiones diluidas, donde se presenta un comportamiento cuasi lineal, ya que no existen interferencias ópticas entre las partículas, proyectando ellas su sombra individual. (Salinas et al. 2005).

Cabe indicar que el área específica de extinción corresponde a la relación que existe entre el área de la sombra proyectada por la partícula, respecto del área transversal efectiva de ésta. Para lo cual se emplea la ecuación 2.

$$A_p = \frac{3}{2} \cdot \frac{K_{ext}(x)}{x}$$

ecuación 2.13

A su vez, el coeficiente de extinción $K_{ext}(x)$ se calcula empleando la ecuación 2.11

$$K_{ext}(x) = \frac{2}{3 \cdot L} \cdot \frac{x_p}{c} \cdot E(x)$$

ecuación 2.11

CAPÍTULO 3. OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

3.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PARTÍCULAS

En los ensayos realizados se utilizó un sistema de partículas Monospher® 250, 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. Estas son partículas esféricas, las cuales están formadas de dióxido de silicio (SiO_2).

Monospher® 250, posee una distribución de tamaño de orden submicrométrico. El tamaño medio de dichas partículas oscila entre 170 y 200 nm, la Ilustración 7 presenta una imagen microscópica de este tipo de partículas.

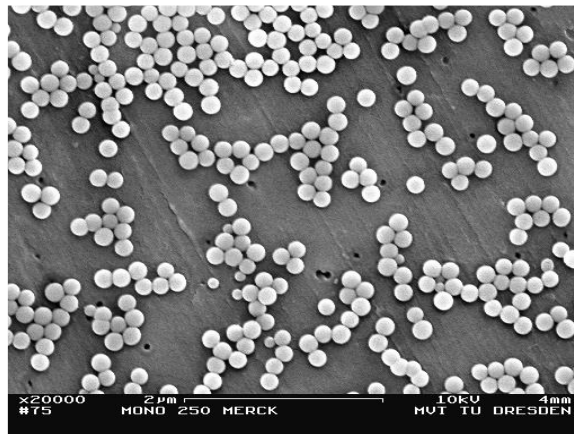


Ilustración 7: Imagen microscópica electrónica para monospher® 250. Fuente (Salinas Salas, 2007, Pag 61)

La densidad utilizada del dióxido de silicio es 2.170 kg/m^3 . Cabe señalar en este punto que hay dudas razonables de que este valor corresponde a la densidad de partículas. Se desprende de la literatura que las partículas de dióxido de silicio producidas químicamente en húmedo pueden construir una estructura porosa y llena de agua en su superficie. Como resultado:

- La densidad de partículas sería inferior a 2.170 kg/m^3 .
- El contenido de volumen sólido de las partículas sería mayor que calculado con la densidad sólida.

CAPITULO 3. OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestran las distribuciones de tamaño determinadas por diferentes métodos de medición. Las dos imágenes difieren, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** los resultados del análisis de sedimentación y la espectroscopia de atenuación ultrasónica se calcularon con una densidad de partículas de 2.170 kg/m^3 ,

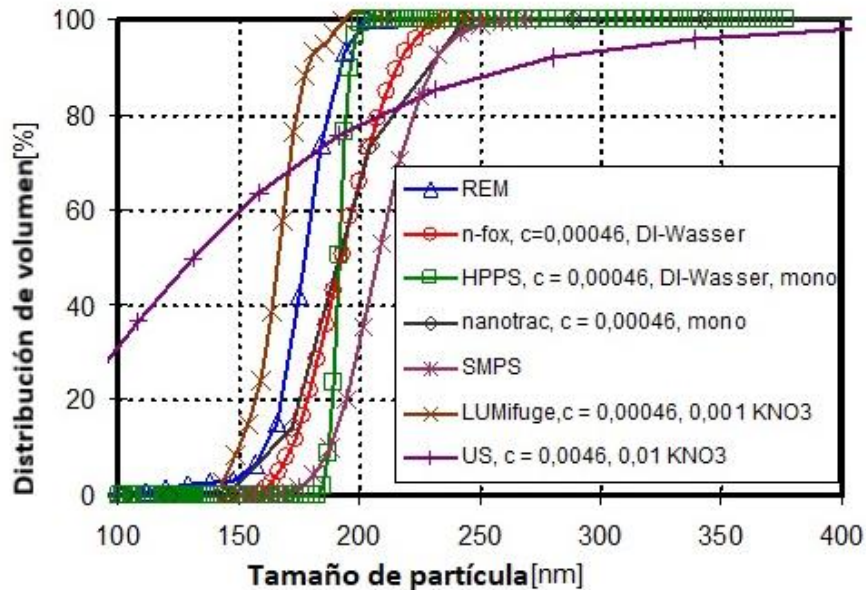


Gráfico 1, distribución del tamaño para monospher® 250 medido con un valor de 2.170 kg/m^3

Del Gráfico 1, se pueden obtener las siguientes declaraciones:

Las propiedades de interfase fueron determinadas midiendo el potencial Zeta para diferentes concentraciones de electrolitos (KNO_3) y valores de pH (Gráfico 2)

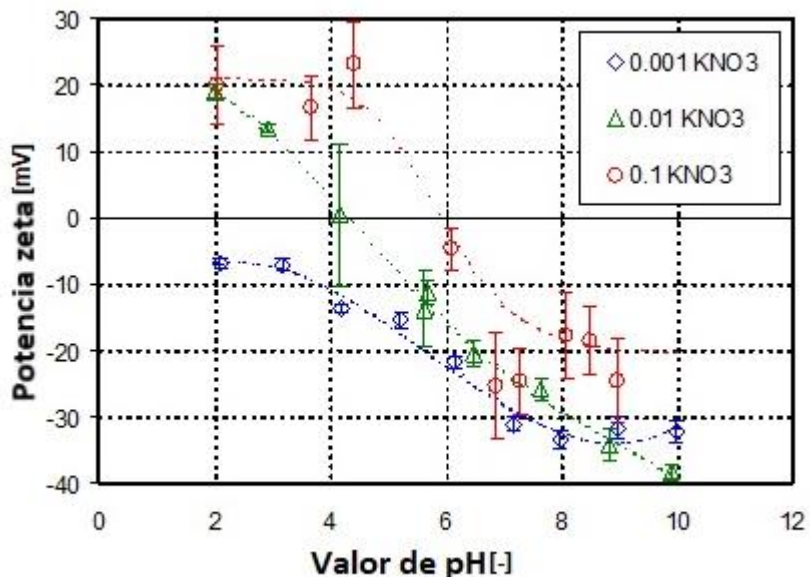


Gráfico 2: Visualización del potencial zeta para suspensiones de monospher® 250 en agua, dependiendo del valor de pH, C a 0,002 en solución de KNO₃ molar 0,001

3.2. CENTRÍFUGA ANALÍTICA LUMIFUGE 114

LUMiFuge 114, es una centrífuga analítica de partículas que posee un sistema de sensor optoelectrónico integrado que permite rastrear los cambios locales y temporales de la transmisión de luz durante la rotación. Esta centrífuga, se utiliza para determinar la velocidad de sedimentación de partículas. LUMiFuge mide instantáneamente la extinción de la luz transmitida a lo largo de toda la muestra utilizando la tecnología STEP.

Posee un sistema óptico el cual permite al usuario realizar un análisis de diferentes muestras, con distintas velocidades, intensidades de luz y temperaturas. Los bloques ópticos los conforman fuentes de luz especiales, que poseen alta potencia y diferentes longitudes de onda.

La luz paralela ilumina toda la celda de muestra de arriba abajo. Incluso los cambios más pequeños que ocurren en la muestra son detectados por el sensor óptico de alta resolución. La recopilación inmediata de datos garantiza la capacidad de medir todo lo que ocurre en la muestra, sin importar lo simple o complejo que sea.

CAPITULO 3. OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

A continuación, la Ilustración 8 muestra la disposición de medición de la centrífuga analítica LUMiFuge 114.

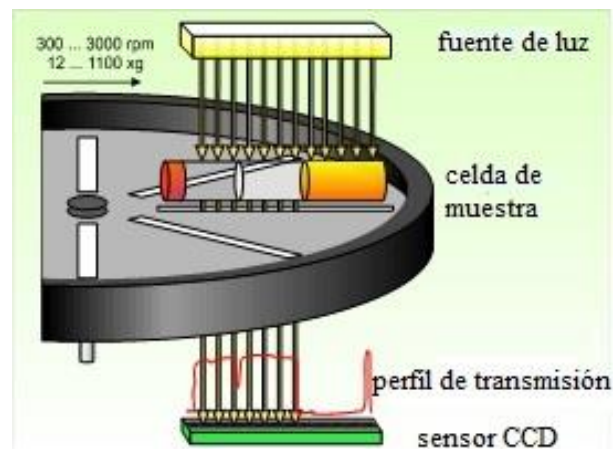


Ilustración 8: Disposición de medición centrífuga LUMiFuge 114. Fuente: L.U.M. GmbH

En la Ilustración 9 se observan los perfiles de transmisión de una medición real, a modo de ejemplo. Se aprecia de izquierda a derecha el perfil de luz, y de derecha a izquierda el sedimento.

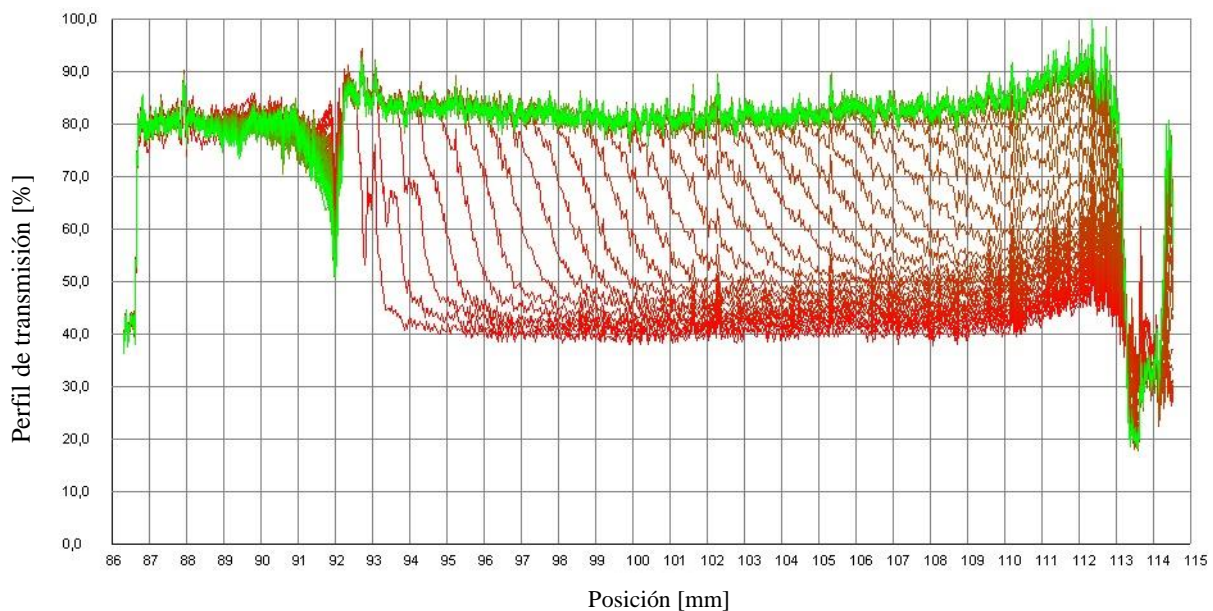


Ilustración 9: Perfiles de transmisión LUMiFuge 114. Fuente: Sedimentationsverhalten von Submikrometer Partikeln in wässrigen suspensionen, Salinas-Salas, 2007

CAPITULO 3. OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

A continuación, en la Ilustración 10 se observa la centrifuga LUMiFuge 114, se utilizó esta centrifuga para obtener los resultados experimentales.

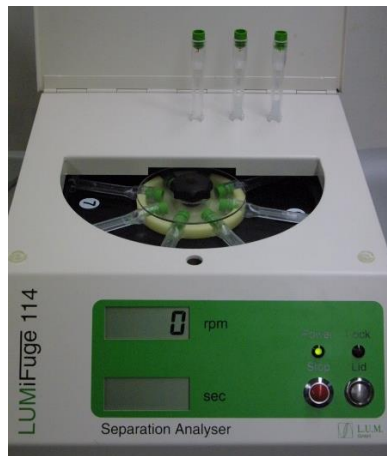


Ilustración 10: Centrifuga analítica LUMiFuge 114. Fuente: fotografía proporcionada por Dr. Ing. Gonzalo Salinas-Salas

Los datos técnicos más relevantes de la centrífuga analítica LUMiFuge 114 se muestran la Tabla 3.1

CAPITULO 3. OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

Tabla 3.1: 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 centrifuga analítica LUMiFuge 114, los que permiten visualizar gráficamente los perfiles de transmisión, como se observa en la Ilustración 11. 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 11

CAPITULO 3. OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

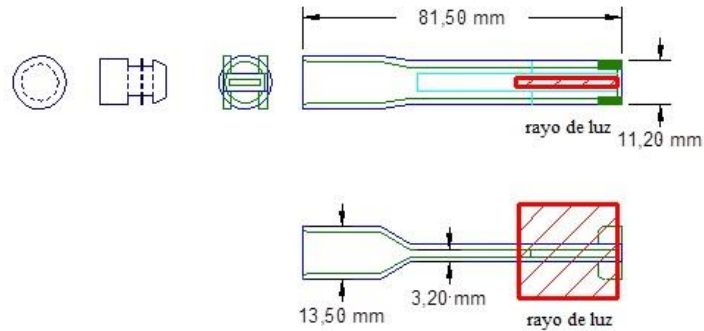


Ilustración 11: Geometría cubeta centrífuga LUMiFuge 114, espesor de capa 1 mm, material policarbonato. Fuente: Sedimentationsverhalten von Submikrometer Partikeln in wässrigen suspensionen, Salinas-Salas, 2007

Las centrífuga analítica LUMiFuge 114 mide el perfil de transmisión infrarrojo de una muestra que se mueve en el campo centrífugo en momentos discretos después del inicio de la centrifugación Ilustración 8; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** . 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.

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.

CAPITULO 3. OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

3.3.2. Ultra-turrax

Para preparar los sistemas, se utilizó un homogeneizador y dispersador de mezclas Ultraturrax 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

CAPITULO 3. OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

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

En este apartado, se describe cual fue la metodología utilizada para preparar las suspensiones y utilizando partículas Monospher 250 nm.

Las suspensiones sobre las cuales se llevaron a cabo los ensayos se realizaron con agua tridestilada, desionizada y filtrada, a esta se le agregó nitrato de potasio (KNO_3). Las mediciones se realizaron con la centrifuga analítica LUMiFuge 114.

El material se puede volver a dispersar utilizando un poco de energía. Utilizando esta experiencia como base, la preparación de las muestras se llevó a cabo de la siguiente manera:

1. Transferir el sedimento a un vaso precipitado de 250 ml.
2. Agitar el sedimento hasta que desaparezcan las aglomeraciones de partículas más gruesas (tamaño mm)
3. Someter la suspensión a 10 minutos en ultra-Turrax a 10.000 RPM
4. Pesar las muestras.
5. Repartir las submuestras en pequeños vasos de precipitados.

Para poder determinar el comportamiento, a partir del procedimiento experimental descrito anteriormente, se elaboraron distintas suspensiones. Estas suspensiones, poseen dos características:

1. Se elaboraron con distintas concentraciones volumétrica de partículas.
2. También, se prepararon con distintos valores de fuerza iónica, representadas por el pH.

Esto, se realizó a través de una suspensión madre, la cual se fue diluyendo, vale decir, se preparó una suspensión con un valor de concentración alto, luego de eso, se sacaban muestras de aquella

CAPITULO 3. OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

suspensión, las cuales, se diluían en agua con distintos valores de pH y se procedía a mezclar de nuevo. De esto, se obtenía el material para realizar el un nuevo tren de pruebas.

3.5. ADQUISICIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

Se elaboró una suspensión, para cada valor de potencial iónico, en las cuales, se varió la concentración para cada condición de potencial iónico. Para cada suspensión, se midió la velocidad de sedimentación. Este proceso, se realizó para cada uno de los seis valores de pH mostrados.

Las distintas muestras se cargan en las 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.

Se calculó el valor de la velocidad de Stokes, la cual hace referencia a la velocidad que tiene una partícula moviéndose a través de cierto fluido. El valor de la velocidad de Stokes es constante para cada una de las muestras tomadas, este valor corresponde a 32,35 ($\mu\text{m/s}$).

Una vez se finalizó con la toma de datos, las velocidades de sedimentación obtenidas para cada uno de los ensayos realizados son las siguientes:

1. Concentración con el sobrenadante original.

Tabla 3.2: valores de velocidad de sedimentación para probeta con sobrenadante original.

Fuente: elaboración propia en base a los datos proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.

concentración con el sobrenadante original.	
concentración volumétrica (% Vol)	velocidad de sedimentación ($\mu\text{m/s}$)
10,3	9,5
5,8	15,2
3,8	18,3
2,3	20,6
1,4	22,4
0,9	24,8
0,5	25,1
0,3	25,7

CAPITULO 3. OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

0,172	25,2
0,100	24,8
0,053	25
0,031	25
10,3	9,84
5,8	14,9
3,8	18,4
2,3	20,6
1,4	22,2
0,9	24,1
0,5	24,5
0,303	25,7

2. Concentración diluida en agua desionizada.

Tabla 3.3: valores de velocidad de sedimentación para probeta diluida en agua desionizada.

Fuente: elaboración propia en base a los datos proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo

Salinas Salas

concentración volumétrica (% Vol)	velocidad de sedimentación ($\mu\text{m/s}$)
9,2	10,0
5,9	13,8
3,7	17,5
2,3	19,7
1,3	21,7
0,8	23,2
0,5	23,9
0,3	24,6
0,170	24,975
0,096	24,975
0,051	24,975
0,030	24,75

3. Diferentes valores de concentración, con un agregado de 0,001 Mol de nitrato de potasio (KNO_3)

Tabla 3.4: valores de velocidad de sedimentación para probeta con diferentes valores de concentración con 0,001 Mol de nitrato de potasio (KNO_3). Fuente: elaboración propia en base a los datos proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas

concentración volumétrica (% Vol)	velocidad de sedimentación ($\mu\text{m/s}$)
9,2	11,4
5,9	15,1
3,7	18,8
2,3	21,0
1,3	22,4
0,8	23,6
0,5	24,9
0,3	24,9
0,168	24,975
0,096	24,75
0,051	25,425
0,031	25,2

4. Diferentes valores de concentración, con un agregado de 0,01 Mol de nitrato de potasio (KNO_3).

Tabla 3.5: valores de velocidad de sedimentación para probeta con diferentes valores de concentración con 0,01 Mol de nitrato de potasio (KNO_3). Fuente: elaboración propia en base a los datos proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas

concentración de 0,01 Mol de KNO_3	
concentración volumétrica (% Vol)	velocidad de sedimentación ($\mu\text{m/s}$)
9,2	12,8
5,9	16,5
3,7	19,7
2,3	21,5
1,3	23,3

0,8	24,7
0,5	25,2
0,3	26,4
0,170	25,65
0,096	25,425
0,050	26,325
0,030	24,975

5. Diferentes valores de concentración, con un agregado de 0,1 Mol (pH 7,4) de nitrato de potasio (KNO_3).

Tabla 3.6: valores de velocidad de sedimentación para probeta con diferentes valores de concentración con 0,1 Mol de nitrato de potasio (KNO_3). Fuente: elaboración propia en base a los datos proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.

concentración volumétrica (% Vol)	velocidad de sedimentación ($\mu\text{m/s}$)
10,3	14,4
5,9	17,8
3,8	21,2
2,1	23,5
1,3	24,9
0,8	
0,5	29,1
0,3	28,2
10,3	14,5
5,9	18,3
3,8	20,8
2,1	23,3
1,3	24,9
0,8	145
0,5	26,6
0,305	26,5
0,171	26,6
0,097	26,6
0,052	26,3
0,031	27,3

6. Diferentes valores de concentración, con un agregado de 0,1 Mol (pH 7,3) de nitrato de potasio (KNO_3).

Tabla 3.7: valores de velocidad de sedimentación para probeta con diferentes valores de concentración con 0,1 Mol de nitrato de potasio (KNO_3). Fuente elaboración propia en base a los datos proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.

concentración volumétrica (% Vol)	velocidad de sedimentación ($\mu\text{m/s}$)
10,3	14,0
5,9	20,8
3,8	20,8
2,3	24,2
1,4	25,9
0,8	26,6
0,5	30,3
0,3	32,0
0,171	29,9
0,096	30,4
0,051	28,5
0,031	34,8
0,171	32,4
0,096	32,8
0,051	32
0,031	40,5
10,3	13,6
5,9	19,1
3,8	21,1
2,3	24,1
1,4	25,9
0,8	27,7
0,5	29,1
0,305	30,1

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. PREPARACIÓN DE LOS VALORES PARA EL ANÁLISIS

Cabe considerar, que Richardson & Zaki, realizaron sus ensayos con una fuerza iónica constante, en una suspensión absolutamente estable, la que corresponde a un pH del orden de 9,2. Por lo tanto, como no varía ni el pH ni la fuerza iónica, la relación entre la velocidad de Stokes y la velocidad efectiva de sumergimiento cuya división da lugar a la velocidad normalizada, solamente depende de la concentración volumétrica, como se presenta en ecuación 4.1.

$$\frac{v_s(c)}{v_{s,0}} = (1 - c)^n \quad \text{ecuación 4.1}$$

Dado que en este trabajo se considera una variable más a los ensayos realizados por Richardson & Zaki, no solamente se estudiará el efecto con la concentración, lo que significa medir la velocidad de sumergimiento y deducir, ya que es conocida la velocidad de Stokes, cuál sería la velocidad normalizada en función de la concentración, sino que, además, se está variando la fuerza iónica en cada suspensión.

El gráfico de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se realizó mediante un gráfico de doble logaritmo construido a partir de los valores experimentales de velocidad de sedimentación, mostrados en el CAPÍTULO 3, apartado 3.5, en el cual se procede a realizar un ajuste lineal por el método de mínimos cuadrados lo que permitirá determinar el exponente de la función de corrección experimental respecto de la porosidad. Donde la pendiente de la recta de ajuste, corresponde al valor del exponente que adopta, para los datos experimentales, la función de corrección empleando la ecuación 4.1.

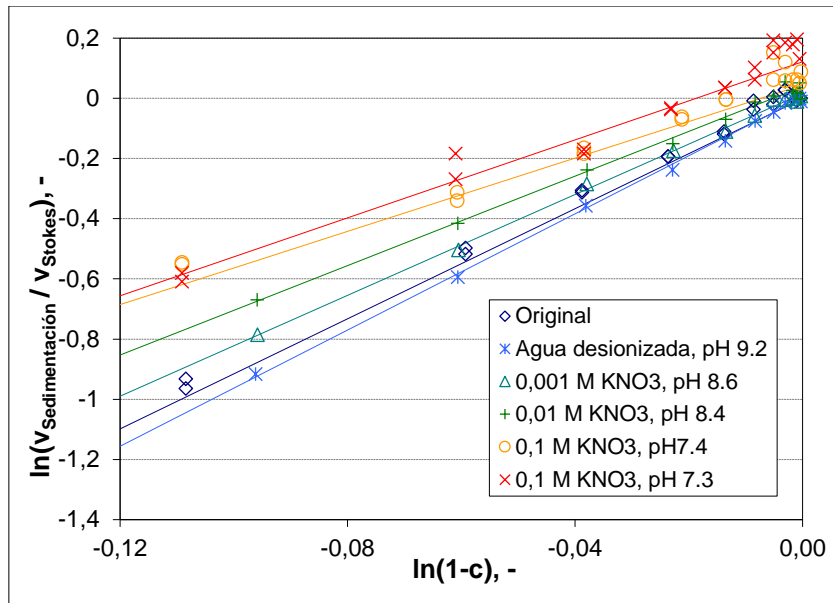


Gráfico 3, Gráfico de doble logarítmico, representado la velocidad de sedimentación vs la concentración de la suspensión. Fuente: (Salinas Salas, 2007)

Entonces, se está midiendo la velocidad de sumergimiento para una concentración uno con distintos valores de pH, luego lo mismo para una concentración dos y así hasta completar distintos ensayos. Así es posible dar cuenta que la velocidad de sumergimiento no se mantiene constante para distintos valores de fuerza iónica, lo que no fue reportado por Richardson & Zaki. A partir de este comportamiento, se deduce que existe una dependencia de la velocidad de sumergimiento respecto de la fuerza iónica. Desprendiéndose que mientras mayor sea la fuerza iónica, menor es el valor del exponente n y de la velocidad de sumergimiento respecto de la velocidad de Stokes.

Respecto a la regresión lineal que se realizó en el Gráfico 3, se puede indicar que estadísticamente se determinó el coeficiente de Pearson, para evaluar la representatividad de cada línea de tendencia y por ende su exponente para los valores experimentales, a partir de los cuales se construyeron. En la Tabla 4.1 se muestran los coeficientes de Pearson para cada línea de tendencia.

CAPITULO 4. ANALISIS DE DATOS

Tabla 4.1: Representación del valor de coeficiente de Person para las líneas de tendencias encontradas en el Gráfico 3. Fuente: Elaboración propia a base de los datos proporcionados por el Dr.Ing Gonzalo Salinas-Salas.

pH	R ²	R
9,4	0,9956	0,9977
9,2	0,9986	0,9993
8,6	0,9977	0,9988
8,4	0,9926	0,9962
7,4	0,3067	0,5538
7,3	0,9001	0,95

La Tabla 4.1, muestra los valores de R, los cuales hacen referencia al coeficiente de Pearson, dicho coeficiente indica la relación entre dos variables, al ser esta variable cercana a 1, se puede deducir que los datos se ajustan de buena manera.

A partir de estos valores, es posible la Tabla 4.2, donde se muestran los valores del exponente “n” respecto del valor de la fuerza iónica, medida en Mol/l.

Tabla 4.2: Datos experimentales, medición centrífuga analítica LUMiFuge 114 a diferentes valores de fuerza iónica. Fuente: elaboración propia en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.

exponente n	Fuerza iónica (mol/l)
9,65	4,0E-04
9,15	1,1E-03
8,38	2,1E-03
7,42	1,2E-02
6,08	1,2E-01
6,48	1,2E-01

La Tabla 4.2 permite elaborar el Gráfico mostrado en el Gráfico 4, el cual permite observar el comportamiento del valor del exponente n en función del valor de la fuerza iónica.

CAPITULO 4. ANALISIS DE DATOS

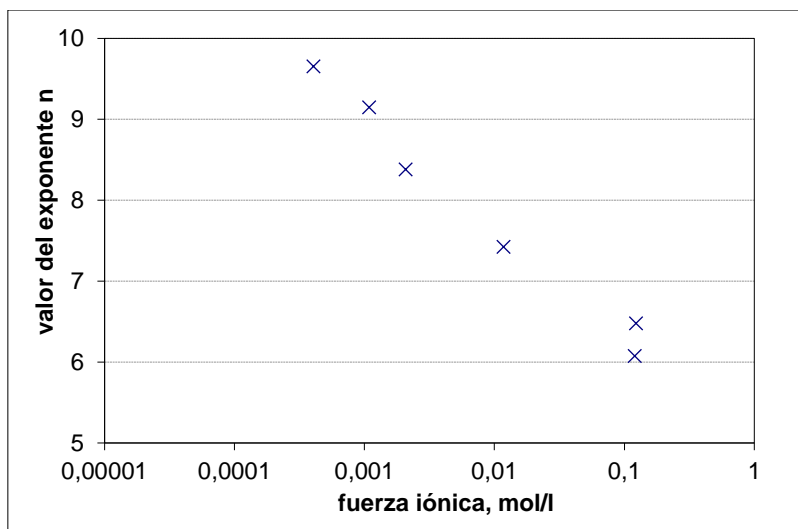


Gráfico 4, valor del exponente n variando el valor de la fuerza iónica del electrolito, para partículas Monospher 250. Fuente: Elaboración propia en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.

Al gráfico mostrado en el Gráfico 4, se le realiza un ajuste lineal mediante el método de los mínimos cuadrados. De tal modo que el Gráfico 5, muestra la línea de tendencia obtenida, la que permite determinar una expresión matemática para el exponente de la función de corrección experimental respecto de la porosidad, ya que, la pendiente de la recta obtenida señala la función de corrección obtenida a través de los valores experimentales.

CAPITULO 4. ANALISIS DE DATOS

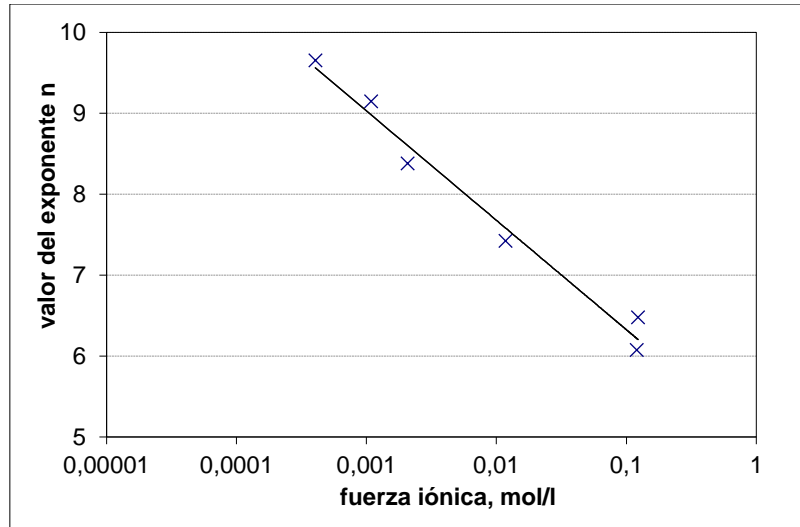


Gráfico 5, valor del exponente n variando el valor de la fuerza iónica del electrolito, para partículas Monospher 250, con línea de tendencia para poder encontrar una función a fin.

Fuente: Elaboración propia en base a datos secundarios, proporcionados por Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.

Además, de este gráfico, se obtiene expresión matemática para el valor del exponente n , indicado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Dicha función corresponde a una recta, la que relaciona el valor de la fuerza iónica expresada en Mol/l y el exponente n de la función de corrección de velocidad de sedimentación. Esta ecuación, permite evaluar el valor del exponente “ n ” para distintos valores de fuerza iónica e interpretar su comportamiento de la función de corrección de velocidad.

$$n = -0,587 \cdot \ln(i) + 4,9734 \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

n : factor de corrección de velocidad de las partículas, para la ecuación de Richardson & Zaki

i : Valor de fuerza iónica en Mol/l.

4.2. DISCUSIÓN

Los resultados ensayados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas-Salas, muestran claramente que el comportamiento de los datos madre de velocidad de sedimentación son lógicos y normales, ya que, siguen la forma definida por Richardson & Zaki mostrada en la ecuación 4.1, puesto que, a medida que aumenta la concentración disminuye la velocidad, por otro lado, este valor difiere respecto al exponente “n” de la función .

Al variar la fuerza iónica, se establece que necesariamente, se verá modificada la velocidad, ya que habrá una mayor fuerza de interacción electroquímica entre las partículas, por lo tanto, a medida que existe mayor fuerza iónica, las partículas tendrán mayor tendencia a interactuar con las que se encuentran adyacentes y sostener su posición, consecuentemente, la velocidad será más baja.

Si la fuerza iónica disminuye, las partículas dejarán de interactuar entre sí y si dejan de interactuar entre sí, la velocidad de sedimentación aumentará. Si aumenta la velocidad de sedimentación, la velocidad normalizada aumentará y obviamente, aumentará el coeficiente de corrección de la velocidad, que no lo consideró Richardson & Zaki. Es por esto, que se comprende que el coeficiente n, no solo depende de la concentración volumétrica, que corresponde a la ecuación de continuidad, tampoco Richardson & Zaki, donde el exponente n, es un valor constante para cierto número de Reynolds, sino que, además de la concentración el exponente n está dependiendo de la fuerza iónica que se encuentra en la suspensión.

Además, podemos observar un coeficiente $R^2 = 0,9803$ para el gráfico mostrado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, lo que nos señala un coeficiente de Pearson de $R=0,99$, esto nos indica que la línea de tendencia que existe entre las variables es lo suficientemente representativa de la función.

La curva presentada en el Gráfico 5, representa primero, que existe una relación directa entre la fuerza iónica y el exponente n del factor de corrección de velocidad de las partículas, por lo tanto, este factor no solo depende del tamaño de las partículas y por ende de su régimen de escurrimiento, está dependiendo, además, de la fuerza iónica que se establece con la suspensión.

CAPITULO 4. ANALISIS DE DATOS

Y, por lo tanto, cuando los valores de la fuerza iónica son menores, el valor del exponente n aumenta.

Tomando en cuenta la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, podemos deducir que la forma general de la función de obstrucción de velocidad de sedimentación propuesta por Richardson y Zaki, presentada en la Tabla 2.2, ecuación 2.5, nos indica que para partículas con un número de Reynolds menor a 0,2 el valor del exponente “ n ” será de 4,65. Pero si se analiza el gráfico presentado en la ecuación podemos darnos cuenta de que este exponente posee valores que oscilan entre 5 y 10, dependiendo de la fuerza iónica que se esté empleando.

Se dedujo, que el exponente n , no es solo dependiente del número de Reynolds, ya que esto no es representativo a una situación con potencial iónico dentro de la suspensión. Esto puede deberse a que Richardson & Zaki hayan trabajado con un potencial iónico constante y una fuerza iónica muy alta.

El experimento llevado a cabo por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas-Salas, evidenció que existe una fuerte correlación entre el exponente “ n ” y las fuerzas iónicas. Esto significa, que la sedimentación de partículas está fuertemente determinada por las interacciones electrostáticas.

En otras palabras, la función de velocidad está dependiendo no solo de la concentración de las partículas, sino, además de las fuerzas iónicas de actúan sobre ellas.

Una explicación más amplia del efecto del incremento de las fuerzas electroquímicas se obtiene del hecho que al existir una mayor cantidad de partículas en la suspensión por efecto de su disminución de tamaño conduce a que el área superficial de las partículas en contacto con el fluido viscoso, el que de hecho es un electrolito, aumente lo que implica que las fuerzas electrostáticas, las de van der Waals y las de atracción de Born, que se manifiestan a través del potencial Zeta, aumenten siguiendo lo indicado por la teoría DLVO lo que conduce a un relevante aumento de las fuerzas de repulsión entre las partículas adyacentes y con ello la formación de una suerte de red dinámica de partículas que impide tanto su sedimentación individual y como colectivo. (Gonzalo Salinas-Salas, 2009)

Considerando todo lo mencionado anteriormente, cabe señalar, que respecto a la ecuación de Richardson & Zaki, se puede establecer que debiese existir una reducción de la velocidad de

CAPITULO 4. ANALISIS DE DATOS

sedimentación, representada mediante el exponente de la función de reducción de velocidad, que la que determinaron en ese tiempo Richardson & Zaki.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

Para poder desarrollar esta memoria, fue necesario lograr cierto grado de conocimientos acerca de los elementos teóricos que se le aplican al proceso de sedimentación de sistemas de micropartículas sumergidas en un electrolito. Esto se pudo lograr gracias al estudio del estado del arte en sistemas de velocidad de sedimentación de partículas, así como también la modelación del sistema del comportamiento de las micropartículas que conforman una suspensión en agua.

Se describió 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 detalló 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.

A partir de los datos obtenidos, se obtuvo un comportamiento de la velocidad normalizada o coeficiente de corrección de velocidad en función de los datos obtenidos y es posible deducir que existe una dependencia directa con la concentración, lo que responde a la ecuación de continuidad, sin embargo, existe una componente empírica que es el valor del exponente n .

Se dedujo también, que el exponente n varía dependiendo de la fuerza iónica, que es del tipo logarítmica lineal.

Además, se determinó del análisis la consistencia de los valores con la literatura, por lo tanto, los valores se consideran correctos y por lo tanto la metodología fue correctamente implementada.

Para este fue posible obtener un modelo matemático que describe el comportamiento del exponente que se describe en la función de reducción de velocidad en términos de cambios del electrolito. Que siguió el comportamiento de forma de una ecuación lineal en términos logarítmicos. De esto, se infiere entonces que el comportamiento de este exponente ha quedado en función de tres elementos dominantes, primero, el tamaño de la partícula, que, de acuerdo con el campo de fuerzas, establece un régimen de escurrimiento el fluido. Segundo, de la concentración del electrolito a través de la función de continuidad y tercero, de las fuerzas iónicas, la cual, si disminuye, aumenta la velocidad de sedimentación.

REFERENCIAS

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

GmbH, L. (n.d.). *Medical Expo*. Retrieved from <https://www.medicalexpo.es/prod/lum-gmbh/product-112723-866463.html>

Gonzalo Salinas-Salas, F. E.-F. (2009). <https://scielo.conicyt.cl/>. Retrieved from https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642009000200004&lng=es&nrm=iso

M, A. A. (2006). *Diseño, construcción y ensayo de una celda de sedimentación para la evaluación de concentraciones de tamaños de partículas a nivel micrométrico*.

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*.

Salinas, G., & Fernando, E. (2012). *Evaluación experimental del comportamiento de la velocidad de sedimentación de partículas*.

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

sinerfil. (n.d.). Retrieved from <https://sinerfil.com/lum-instrumentos-para-la-caracterizacion-de-dispersiones-y-medicion-de-la-adhesividad/caracterizacion-de-dispersiones/tecnologia-step/>

Zeta-Meter. (n.d.). *Zeta Potential: A complete course in 5 minutes*. Staunton. Retrieved 12 de diciembre de 2020

Richardson, J. & Zaki, W. (1954). Sedimentation and fluidisation: parte I. Trans. Int. Chem. Cerca. Vol.2.

ANEXOS

A. TABLAS DE DATOS CON CALCULOS DE VELOCIDAD

En este apartado, se presentarán las tablas con sus diferentes valores de velocidad de sedimentación, para así poder realizar el gráfico de doble logaritmo, presentado en la ilustración tanto.

A.1 VALORES ORIGINALES

Tabla 5.1, valores de velocidad de sedimentación para probeta con sobrenadante original, agregando cálculos de logaritmos para elaboración de gráfico. Fuente elaboración propia en base a los datos proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.

concentración con el sobrenadante original.				
concentración volumétrica (% Vol)	velocidad de sedimentación ($\mu\text{m/s}$)	$\ln(1-c)$	$\ln(v_s/v,0)$	velocidad teórica ($\mu\text{m/s}$)
10,3	9,5	-0,10844044	-0,964431107	25
5,8	15,2	-0,05923698	-0,497580397	25
3,8	18,3	-0,03877629	-0,311974765	25
2,3	20,6	-0,02364077	-0,193584749	25
1,4	22,4	-0,01377245	-0,109814866	25
0,9	24,8	-0,00861466	-0,008032172	25
0,5	25,1	-0,00514484	0,003992021	25
0,3	25,7	-0,00308216	0,027615167	25
0,172	25,2	-0,00172373	0,00796817	25
0,100	24,8	-0,00100268	-0,008032172	25
0,053	25	-0,0005317	0	25
0,031	25	-0,0003116	0	25
10,3	9,84	-0,10844044	-0,932420114	25
5,8	14,9	-0,05923698	-0,517514612	25
3,8	18,4	-0,03877629	-0,30652516	25
2,3	20,6	-0,02364077	-0,193584749	25
1,4	22,2	-0,01377245	-0,118783536	25
0,9	24,1	-0,00861466	-0,036663984	25
0,5	24,5	-0,00514484	-0,020202707	25
0,303	25,7	-0,003039	0,027615167	25

A.2 CONCENTRACIÓN DILUIDA EN AGUA DESIONIZADA

Tabla 5.2, valores de velocidad de sedimentación para probeta con agua desionizada, agregando cálculos de logaritmos para elaboración de gráfico. Fuente elaboración propia en base a los datos proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.

concentración diluida 3 veces con agua desionizada				
concentración volumétrica (% Vol)	velocidad de sedimentación ($\mu\text{m/s}$)	$\ln(1-c)$	$\ln(v_s/v,0)$	velocidad teórica ($\mu\text{m/s}$)
9,2	10,0	-0,09615025	-0,91629073	25
5,9	13,8	-0,06058658	-0,59420723	25
3,7	17,5	-0,03809841	-0,35667494	25
2,3	19,7	-0,02284315	-0,23825719	25
1,3	21,7	-0,01358897	-0,14156356	25
0,8	23,2	-0,00831495	-0,07472355	25
0,5	23,9	-0,00508143	-0,04499737	25
0,3	24,6	-0,00303696	-0,01612938	25
0,170	24,975	-0,00169683	-0,0010005	25
0,096	24,975	-0,00095682	-0,0010005	25
0,051	24,975	-0,0005111	-0,0010005	25
0,030	24,75	-0,00030475	-0,01005034	25

A.3 CONCENTRACIÓN CON 0,01 MOL DE KNO₃

Tabla 5.3, valores de velocidad de sedimentación para probeta con concentración de 0,001 Mol de KNO₃, agregando cálculos de logaritmos para elaboración de gráfico. Fuente elaboración propia en base a los datos proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.

Concentración con 0,001 Mol de KNO ₃				
concentración volumétrica (% Vol)	velocidad de sedimentación (μm/s)	ln(1-c)	ln(vs/v,0)	velocidad teórica (μm/s)
9,2	11,4	-0,09615025	-0,78526247	25
5,9	15,1	-0,06058658	-0,50418108	25
3,7	18,8	-0,03809841	-0,28501896	25
2,3	21,0	-0,02284315	-0,17435339	25
1,3	22,4	-0,01358897	-0,10981487	25
0,8	23,6	-0,00831495	-0,05762911	25
0,5	24,9	-0,00508143	-0,00400802	25
0,3	24,9	-0,00303696	-0,00400802	25
0,168	24,975	-0,00167842	-0,0010005	25
0,096	24,75	-0,0009567	-0,01005034	25
0,051	25,425	-0,00050834	0,01685712	25
0,031	25,2	-0,00030677	0,00796817	25

A.4 CONCENTRACIÓN DE 0,01 MOL DE KNO₃

Tabla 5.4, valores de velocidad de sedimentación para probeta con concentración de 0,01 Mol de KNO₃, agregando cálculos de logaritmos para elaboración de gráfico. Fuente elaboración propia en base a los datos proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas

concentración de 0,01 Mol de KNO ₃				
concentración volumétrica (% Vol)	velocidad de sedimentación (μm/s)	ln(1-c)	ln(vs/v,0)	velocidad teórica (μm/s)
9,2	12,8	-0,09615025	-0,66943065	25
5,9	16,5	-0,06058658	-0,41551544	25
3,7	19,7	-0,03809841	-0,23825719	25
2,3	21,5	-0,02284315	-0,15082289	25
1,3	23,3	-0,01358897	-0,07042246	25
0,8	24,7	-0,00831495	-0,01207258	25
0,5	25,2	-0,00508143	0,00796817	25
0,3	26,4	-0,00303696	0,05448819	25
0,170	25,65	-0,00169683	0,02566775	25
0,096	25,425	-0,00095682	0,01685712	25
0,050	26,325	-0,00050013	0,05164323	25
0,030	24,975	-0,00030475	-0,0010005	25

A.5 CONCENTRACIÓN DE 0,1 MOL DE KNO₃ (PH 7,3)

Tabla 5.5, valores de velocidad de sedimentación para probeta con concentración de 0,01 Mol de KNO₃, agregando cálculos de logaritmos para elaboración de gráfico. Fuente elaboración propia en base a los datos proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas

concentración de 0,1 Mol de KNO ₃ (pH 7,3)				
concentración volumétrica (% Vol)	velocidad de sedimentación (μm/s)	ln(1-c)	ln(vs/v,0)	velocidad teórica (μm/s)
10,3	14,4	-0,10911401	-0,551647618	25
5,9	17,8	-0,06072483	-0,339677368	25
3,8	21,2	-0,03842125	-0,164874643	25
2,1	23,5	-0,02123901	-0,061875404	25
1,3	24,9	-0,01345014	-0,004008021	25
0,8	26,6	-0,00841669	0,062035391	25
0,5	29,1	-0,00511315	0,151862349	25
0,3	28,2	-0,00304465	0,120446153	25
10,3	14,5	-0,10911401	-0,544727175	25
5,9	18,3	-0,06072483	-0,311974765	25
3,8	20,8	-0,03842125	-0,183922838	25
2,1	23,3	-0,02123901	-0,070422464	25
1,3	24,9	-0,01345014	-0,004008021	25
0,8	145	-0,00841669	1,757857918	25
0,5	26,6	-0,00511315	0,062035391	25
0,305	26,5	-0,00305914	0,058268908	25
0,171	26,6	-0,00171439	0,062035391	25
0,097	26,6	-0,00097471	0,062035391	25
0,052	26,3	-0,00051724	0,050693114	25
0,031	27,3	-0,00031017	0,088010877	25

A.6 CONCENTRACIÓN DE 0,1 MOL DE KNO₃ (PH 7,4)

Tabla 5.6, valores de velocidad de sedimentación para probeta con concentración de 0,01 Mol de KNO₃, agregando cálculos de logaritmos para elaboración de gráfico. Fuente elaboración propia en base a los datos proporcionados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas

concentración de 0,1 Mol de KNO ₃ (pH 7,4)				
concentración volumétrica (% Vol)	velocidad de sedimentación (μm/s)	ln(1-c)	ln(vs/v ₀)	velocidad teórica (μm/s)
10,3	14,0	0,109114415	0,579818495	25
5,9	20,8	0,060968209	0,183922838	25
3,8	20,8	0,038429403	0,183922838	25
2,3	24,2	0,023147215	0,032523192	25
1,4	25,9	0,013611339	0,035367144	25
0,8	26,6	0,008392244	0,062035391	25
0,5	30,3	-0,00511471	0,192271888	25
0,3	32,0	0,003057199	0,246860078	25
0,171	29,9	0,001713184	0,178982656	25
0,096	30,4	0,000960603	0,195566784	25
0,051	28,5	0,000505683	0,131028262	25
0,031	34,8	0,000306038	0,330741562	25
0,171	32,4	0,001713184	0,259282598	25
0,096	32,8	0,000960603	0,271552691	25
0,051	32	0,000505683	0,246860078	25
0,031	40,5	0,000306038	0,482426149	25
10,3	13,6	0,109114415	0,608806032	25

Anexos

5,9	19,1	- 0,060968209	-0,26918749	25
3,8	21,1	- 0,038429403	- 0,169602784	25
2,3	24,1	- 0,023147215	- 0,036663984	25
1,4	25,9	- 0,013611339	0,035367144	25
0,8	27,7	- 0,008392244	0,102556588	25
0,5	29,1	-0,00511471	0,151862349	25
0,305	30,1	- 0,003059141	0,185649347	25

B. GRÁFICO DOBLE LOGARITMICO PARA ENCONTRAR VALOR EXPONENTE N

Presentación del gráfico de doble logaritmo, realizado para poder encontrar los valores de n. En él se graficó los valores logarítmicos de la velocidad de sedimentación sobre la velocidad teórica con relación al logaritmo de (1-c).

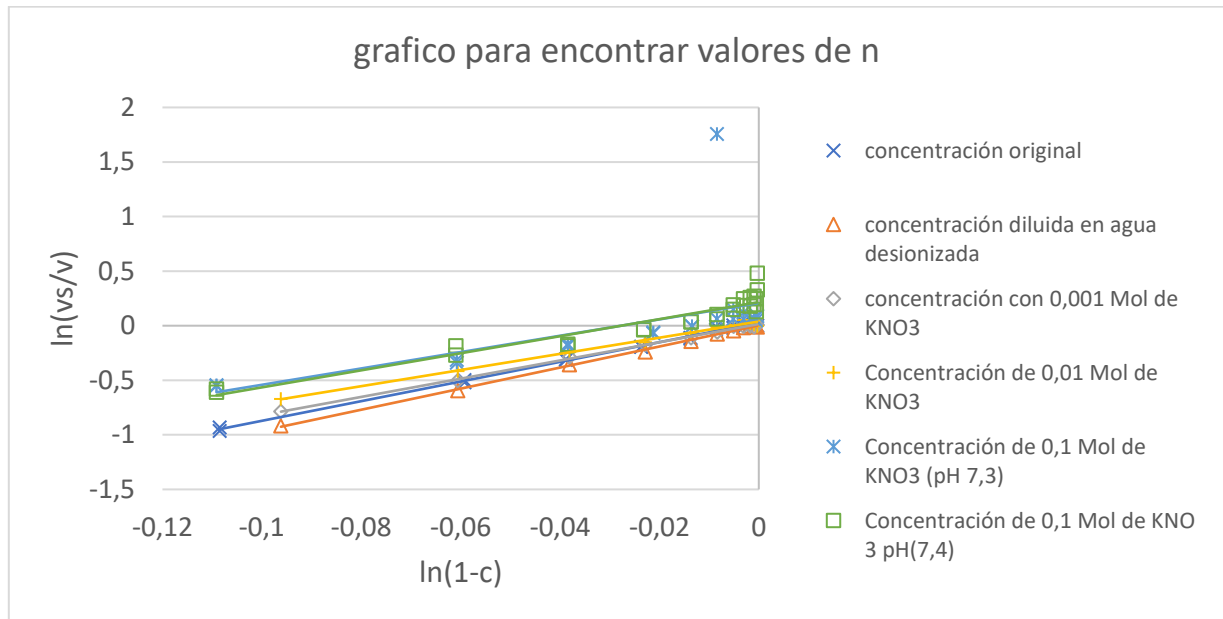


Gráfico 6, Gráfico de doble logarítmico, representado la velocidad de sedimentación vs la concentración de la suspensión. Fuente: Elaboración propia, en base a los datos facilitados por el Dr. Ing. Gonzalo Salinas Salas.

C. EQUIPOS UTILIZADOS

C.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 5.7 se presentan las especificaciones técnicas.

Tabla 5.7, 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

C.2 AGITADOR MAGNÉTICO RH DIGITAL

La función de los agitadores magnéticos es mezclar disoluciones mientras estas se enfrían, este equipo se utiliza posteriormente a usar el equipo vibra-cell VCX500.

Tabla 5.8, Especificaciones técnicas agitador magnético RH digital. Fuente: www.ika.com

Número de puestos de agitación	1
Max. cantidad a agitar (H2O)	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

C.3 . 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