



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

**“Validación experimental del modelo propuesto por
Brauer y Thiele de reducción de velocidad de
sedimentación terminal para sistemas trimodales de
partículas suspendidas en agua desionizada.”**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

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

PEDRO FERNANDO ORELLANA BRICEÑO

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 stamps and signatures. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' with a signature over it. The right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO' with a signature over it.

Curicó, 2022

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a todas las personas que fueron parte de este proceso tan importante, en particular a mi familia, la cual fue un pilar importante en esta etapa.

También me gustaría agradecer al profesor Dr.-Ing. Gonzalo Salinas Salas, por su orientación, apoyo y por su gran vocación como docente.

Por último, quiero agradecer a mis amigos quienes estuvieron en toda mi etapa universitaria y mi pareja quien fue un apoyo importante en este proceso.

Pedro Fernando Orellana Briceño

DEDICATORIA

*Dedicado a mis padres
Marta Briceño y Rolando Orellana
Gracias a su incontable apoyo pude
lograr terminar esta etapa.*

RESUMEN

Existen diferentes procesos de medición de partículas de los cuales destaca el basado en el uso de centrifugas analíticas, este método se destaca por someter las muestras de partículas a un campo centrifugo midiendo así los tamaños de partícula con la sombra que proyecta una laser a través de la muestra, la cual es captada por un sensor óptico. Este proceso se basa en la sedimentación de las partículas, lo que permite relacionar la velocidad a la cual sedimenta estas con sus diámetros respectivos, siendo de una importancia considerable en el proceso de medición.

En los sistemas de partículas, no se presentan un mismo tamaño de partícula para todo el conjunto, Estos es debido a que existe una variabilidad de tamaño dentro del sistema. Sin embargo, para solucionar este problema existe un tamaño representativo de partícula, el cual representa el tamaño de partícula que más se repite dentro de este. Ahora bien, dentro de un sistema puede existir más de un tamaño representativo de partículas, los cuales se denomina sistemas polimodales estos se pueden categorizar en bimodales y trimodales o simplemente polimodal, siendo para el primer caso con dos tamaños de diámetros representativo y para el segundo con tres diámetros representativos.

Para las mediciones de un sistema trimodal a través de la centrifuga analítica, esta se vuelven de una mayor complejidad, ya que existen fenómenos hidrodinámicos que son producto de la diferencia de tamaños de las partículas que están presentes en el sistema, estos fenómenos afectan de forma considerable la velocidad de sedimentación de las partículas dentro del sistema, ya que al existir tres diámetros representativos se presentan tres velocidades diferentes, las cuales están condicionadas por los comportamientos e interacciones de las partículas en el sistema. Estos fenómenos se pueden analizar a través de la teoría propuesta por Brauer & Thiele, que propone dos factores de reducción de velocidad de sedimentación para cada uno de los tres diámetros representativos del sistema trimodal.

El principal objetivo de esta memoria es determinar la validez de los factores de corrección de velocidad de sedimentación de Brauer & Thiele un sistema trimodal de partículas.

Tras concluir el estudio se llegó a determinar que no era posible de validar el factor de corrección de velocidad propuesto por Brauer & Thiele para los datos analizados, debido a que el error

presente en las partículas de mayor diámetro dentro del sistema trimodal es muy elevado alcanzando este un valor del 35%, esto es debido a que en la toma de datos para el sistema trimodal se registran una cantidad mínima de datos para el diámetro mayor.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
RESUMEN.....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
CAPÍTULO 1:INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA.....	4
1.4. OBJETIVOS.....	5
1.4.1. Objetivo general.....	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
1.5. RESULTADOS ESPERADOS.....	6
1.6. METODOLOGÍA.....	7
CAPÍTULO 2:MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. DESCRIPCIÓN CLÁSICA DEL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS EN UN FLUIDO NEWTONIANO.....	9
2.1.1. Fuerza de aceleración o peso o centrifuga.....	11
2.1.2. Fuerza de flotación o empuje.....	11
2.1.3. Fuerza de arrastre.....	12
2.1.4. Factor dinámico de forma.....	13
2.1.5. Factor de corrección de velocidad de sedimentación sistema monomodal.....	15

2.1.6.	Velocidad de sedimentación corregida.....	16
2.2.	MÉTODOS DE MEDICIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA POR MÉTODOS ÓPTICOS.....	16
2.2.1.	Método Fotométrico	16
2.3.	REPRESENTACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS.....	18
2.4.	SISTEMAS POLIMODALES DE PARTÍCULAS.....	21
2.5.	MODELO TRIMODAL DE MICROPARTÍCULAS PLANTEADO POR BRAUER Y THIELE	22
2.5.1.	Factor de contraflujo.....	22
2.5.2.	Factor de turbulencia	23
2.6.	TEORÍA DLVO	24
2.7.	ERROR RELATIVO PORCENTUAL	25
CAPITULO 3: METODOLOGÍA DE LA OBTENCIÓN DE DATOS		26
3.1.	DESCRIPCIÓN DE LA CENTRIFUGA DE SEDIMENTACIÓN SHIMADZU SA-CP3.....	27
3.2.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PARTÍCULAS	30
3.3.	PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.....	34
3.3.1.	Sistemas monomodales	34
3.3.2.	Sistema trimodal.....	35
3.4.	INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN LA PREPARACIÓN DE LA MUESTRA. 35	
3.4.1.	Balanza de laboratorio	35
3.4.2.	Agitador magnético	35
3.4.3.	Dispersador de partículas UltraTurrax	35
3.4.4.	Ultrahomogenizador Vibracell VCX500.....	36
3.4.5.	Espectrómetro de difracción láser HELOS	36

3.4.6.	Microscopio electrónico Zeiss GeminiSEM 300	36
3.4.7.	Medidor de pH WTW multilab 540	36
CAPITULO 4: DESARROLLO.....		37
4.1.	MODELACIÓN de los SISTEMAS de PARTÍCULAS	38
4.1.1.	Sistema Geltech 201	38
4.1.2.	Sistema Geltech 501	41
4.1.3.	Sistema geltech 1501	43
4.1.4.	Sistema trimodal.....	46
4.2.	CALCULO DE VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN PARA LOS SISTEMAS DE PARTÍCULAS	49
4.2.1.	Velocidad del sistema monomodal Geltech 201	49
4.2.2.	Velocidad del sistema monomodal Geltech 501	50
4.2.3.	Velocidad del sistema monomodal Geltech 1501	51
4.2.4.	Velocidad del sistema trimodal	52
4.3.	FACTOR DE REDUCCIÓN DE VELOCIDAD DE BRAUER & THIELE	54
4.4.	FACTOR DE REDUCCIÓN DE VELOCIDAD EXPERIMENTAL	55
CAPITULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS		56
5.1.	ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS MONOMODALES GELTECH 201, 501 Y 1501.....	57
5.2.	SISTEMA TRIMODAL DE PARTÍCULA	57
5.3.	VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN	58
5.4.	VALIDEZ DE LOS FACTORES DE REDUCCIÓN DE BRAUER & THIELE	61
CONCLUSIONES.....		63
REFERENCIAS		67
ANEXOS		69

A.- DATOS SUMINISTRADOS POR LA CENTRIFUGA SHIMADZU SA-CP3	70
A1 Datos sistema monomodal Geltech 201	70
A2 Datos sistema monomodal Geltech 501	72
A3 Datos sistema monomodal Geltech 1501	74
A4 Datos del sistema trimodal	74
B.- MEMORIA DE CÁLCULO.....	82
B1 Cálculo de velocidad de sedimentación del sistema monomodal Geltech 201	82
B2 Cálculo de velocidad de sedimentación del sistema monomodal Geltech 501	83
B3 Cálculo de velocidad de sedimentación del sistema monomodal Geltech 1501	85
B4 Cálculo de velocidad de sedimentación del sistema trimodal	86
C.- FACTORES DE CORRECCIÓN DE VELOCIDAD	89
C1 Factor de corrección de velocidad de Bauer & Thiele.....	89
C2 Factor de corrección de velocidad experimental	92
D.- ERROR RELATIVO PORCENTUAL	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de cuerpo libre de una partícula esférica sumergida en un fluido viscoso. Fuente: elaboración propia	10
Figura 2.2 Grafico de distribución acumulativa, Fuente: DIN ISO 9276-1	19
Figura 2.3 Grafico de distribución incremental de partícula, Fuente: Dr.-Ing. Matthias Stieß, Mechanische Verfahrenstechnik- Partikeltechnologie 1	20
Figura 2.4 sistema polimodal. Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007)	21
Figura 3.1 Shimadzu SA-CP3. Fuente: Laboratorios del Arbeitsgruppe Mechanische Verfahrenstechnik an der Technische Universtät Dresden.....	27
Figura 3.2 Esquema de la centrifuga Shimadzu SA-CP3. Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007).....	28
Figura 3.3 Fotografía del microscopio electrónico del sistema de partículas Geltech 201. Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007).....	32
Figura 3.4 Fotografía del microscopio electrónico del sistema de partículas Geltech 501. Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007).....	33
Figura 3.5 Fotografía del microscopio electrónico del sistema de partículas Geltech 1501. Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007).....	33
Figura 5.1 Fotografía de un sistema bimodal Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007).	58

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 distribución acumulativa e incremental de partículas Geltech 201 Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007).....	31
Gráfico 3.2 distribución acumulativa e incremental de partículas Geltech 501 Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007).....	31
Gráfico 3.3 distribución acumulativa e incremental de partículas Geltech 1501 Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007).....	32
Gráfico 4.1 Diagrama de extinción relativa para ensayo con partículas Geltech 201. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.	39
Gráfico 4.2 Diagrama incremental de partículas para sistemas de partículas Geltech 201. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.	40
Gráfico 4.3 Diagrama acumulativo para sistemas de partículas Geltech 201. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.	40
Gráfico 4.4 Diagrama de extinción relativa para ensayo con partículas Geltech 501. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-P3. MVT-TU Dresden.	42
Gráfico 4.5 Diagrama incremental para sistemas de partículas Geltech 501. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.	42
Gráfico 4.6 Diagrama acumulativo para sistemas de partículas Geltech 501. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.	43

Gráfico 4.7 Diagrama de extinción relativa para ensayo con partículas Geltech 1501. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.	44
Gráfico 4.8 Diagrama incremental para sistemas de partículas Geltech 1501. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3.	45
Gráfico 4.9 Diagrama acumulativo para sistemas de partículas Geltech 1501. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.	45
Gráfico 4.10 Diagrama de extinción relativa para ensayo trimodal. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.	47
Gráfico 4.11 Diagrama incremental de partículas para el sistema trimodal de partículas. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.	48
Gráfico 4.12 Diagrama acumulativo de partículas del sistema trimodal. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.	48
Gráfico 5.1 Diagrama incremental de los sistemas monomodales, superpuestos a diagrama incremental del sistema trimodal. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Exponente n del factor de Richardson & Zaki. Fuente: Bernhardt, 1994 “Particle Size Analysis, Classification and sedimentation method”	15
Tabla 3.1 Datos técnicos de la centrifuga Shimadzu SA-CP3 Fuente: Elaboración propia a partir del manual de la centrifuga Shimadzu SA-CP3.....	29
Tabla 3.2 Tamaño de los sistemas de partículas utilizados Fuente:Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007).....	30
Tabla 4.1 Parámetros iniciales para el ensayo Geltech 501. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.....	38
Tabla 4.2 Representación de datos extraídos de la centrifuga Shimadzu SA-CP3 Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden	39
Tabla 4.3 Parámetros iniciales para el ensayo Geltech 501. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.....	41
Tabla 4.4 Parámetros iniciales para el ensayo Geltech 1501. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.	43
Tabla 4.5 Diámetros representativos sistemas monomodales. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3.	46
Tabla 4.6 Parámetros iniciales para el ensayo trimodal. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.....	46
Tabla 4.7 Diámetro representativos sistema trimodal. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.	49
Tabla 4.8 Factores de reducción de velocidad experimental Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.....	55
Tabla 5.1 Valores del error asociado para los diferentes tamaños de diámetros representativos. Fuente: elaboración propia.	61
Tabla 0.1 Datos del ensayo monomodal Geltech 201. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de MVT-TU Dresden	70

Tabla 0.2 Datos del ensayo monomodal Geltech 501. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de MVT-TU Dresden.	72
Tabla 0.3 Datos del ensayo monomodal Geltech 1501. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de MVT-TU Dresden.	74
Tabla 0.4 Datos del ensayo trimodal. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de MVT-TU Dresden.	74

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

La determinación en la distribución de tamaño de partículas de una muestra, es un trabajo de suma importancia en las industrias de procesos, de descontaminación y tecnológica, ya que esta se ocupa para diseñar o fabricar diferentes elementos dentro de dicha industria.

En la actualidad se han presentado diferentes procesos y productos que están conformados por una serie de pasos donde se requieren la utilización de micropartículas de diferentes tamaños. Siendo así de mucha relevancia, la distribución de tamaño de micropartículas que se presenta en un sistema para la aplicación en las diferentes tecnologías donde estas están presentes, a la vez la distribución de tamaño puede ser un problema complejo, debido a que el orden de la magnitud del tamaño de las partículas a medir y la diferencia de estas, que se presentan es un mismo sistema, habiendo casos, en los cuales se visualice más de un diámetro representativos. Estos casos se denominan bimodales o polimodales.

Para realizar mediciones de tamaño de sistemas de micropartículas, se emplean diferentes tipos de equipos, y por ende, diversos tipos de principios de funcionamiento, definidas por los métodos físicos en los cuales se basan.

Para llevar a cabo el presente trabajo, se analizará los datos obtenidos en un equipo de medición basado en la centrifugación analítica con sensor óptico (Shimadzu SA-CP3), donde la separación del sistema de partículas es por medio de fuerza centrífuga, que conlleva la aceleración de las partículas en el área de medida, para posteriormente ser censadas mediante la extinción fotométrica.

El Dr.-Ing. Gonzalo Salinas-Salas del Departamento de Tecnologías Industriales de la Universidad de Talca, cuenta con datos del proceso de sedimentación de un sistema trimodal de partículas calibradas de Dióxido de Silicio (SiO_2), en agua. Así como de los sistemas monomodales que los componen, donde se midió la velocidad de sedimentación terminal de estos cuatro sistemas de partículas. Lo que permite inferir la validez del modelo de comportamiento de la reducción de velocidad terminal de sedimentación propuesto por Brauer & Thieler (1973)

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El Dr.-Ing. Gonzalo Salinas-Salas del Departamento de Tecnologías Industriales de la Universidad de Talca, cuenta con mediciones de sistemas de partículas, empleadas como calibres industriales comerciales, de Dióxido de Silicio (SiO_2), que se realizaron, en condiciones controladas en los laboratorios del Arbeitsgruppe Mechanische Verfahrenstechnik de la Technische Universität Dresden. Los que alojan desde el año 2001, al presidente del Comité de elaboración de Normas DIN, para la medición de tamaño de partículas. Para el desarrollo de este estudio se utilizarán parte de dichos datos, los cuales corresponden a un sistema trimodal de partículas y los sistemas monomodales de las partículas que lo componen. La utilización de estos datos permite realizar estudios en base a mediciones confiables y realizadas bajo estándares.

El problema es determinar la validez de los factores de reducción de velocidad propuesto por Brauer & Thielner (1973), aplicado a un sistema trimodal de partículas de Dióxido de Silicio mencionado, lo que no se ha realizado a la fecha en el Departamento de Tecnologías Industriales de la Universidad de Talca. Este tipo de tema no es nuevo, ya que se cuenta, entre otros, con la determinación de la precisión del equipo de medición realizado por el Sr. Iván Luna en su memoria: “Determinación de la precisión a partir de estándares industriales de una centrífuga analítica Shimadzu SA-CP3”. (Luna Vásquez, 2016)

1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA

En el presente trabajo, se analizarán los datos brindados por el Dr.-Ing. Gonzalo Salinas-Salas, los cuales corresponden a la medición de tamaño de partículas de dióxido de silicio (SiO_2), las que fueron construidas por la empresa Geltech Inc. y sus tamaños nominales son: 1,5 [μm], 0,5 [μm] y 0,2 [μm]. A partir de dichos datos, se construirán las distribuciones de tamaño incremental y acumulativo de partículas. Además, se determinarán los diámetros representativos de los sistemas de partículas, que se denominarán como: Geltech 1,5 [μm], Geltech 0,5 [μm] y Geltech 0,2 [μm].

A partir de lo anterior, se analizará el comportamiento hidrodinámico de las suspensiones preparadas a partir de los sistemas de partículas de: Geltech 1,5 [μm], Geltech 0,5 [μm] y Geltech 0,2 [μm], por separado, calculando la velocidad media de sedimentación en cada uno de los casos. Por otra parte, también se analizará el comportamiento hidrodinámico para una suspensión preparada a partir de los tres sistemas de micropartículas considerados. A fin de que actúen en conjunto, formando un sistema trimodal de partículas, al cual se le evaluarán experimentalmente las velocidades medias de sedimentación de cada sistema de partículas.

Para luego comparar y analizar el comportamiento del sistema trimodal de partículas, mediante el modelo de reducción de velocidad de Brauer & Thieler (1973) para sistemas trimodales de partículas, el cual establece factores de corrección para las velocidades medias de sedimentación, para cada sistema de partículas según su tamaño y la concentración volumétrica presente en la suspensión trimodal. El análisis y la comparación, se realizará mediante la comparación de las distribuciones de tamaño, velocidades medias de sedimentación y comportamiento hidrodinámico entre los sistemas monomodales Geltech 1,5 [μm], Geltech 0,5 [μm] y Geltech 0,2 [μm], por separado, y la suspensión trimodal.

Finalmente, se validaría o invalidaría a partir de lo indicado en el párrafo anterior, sumado a antecedentes teóricos, la modelación de Brauer & Thieler (1973) de factores de reducción de velocidad de sedimentación aplicados a la suspensión específica que se mencionó, cuya forma corresponde a un sistema trimodal de partículas.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Realizar la validación experimental del modelo propuesto por Brauer y Thiele sobre la reducción de velocidad de sedimentación terminal para un sistema trimodal de micropartículas suspendidas en agua desionizada.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar sistemas ópticos de medición de la velocidad de sedimentación de sistemas de partículas empleando campo centrífugo de fuerzas.
- Analizar y discutir el comportamiento de la velocidad de sedimentación del sistema trimodal de partículas suspendidas en agua desionizada.
- Analizar la modelación del comportamiento de la sedimentación de sistemas partículas multimodales en campo centrífugo, por efecto de la interacción entre las partículas de distinto tamaño.
- Analizar y discutir la metodología empleada para obtención de los valores experimentales a utilizarse.
- Analizar la modelación propuesta por Brauer y Thiele (1973), para evaluar el comportamiento de la velocidad de sedimentación para una suspensión trimodal de partículas en agua.

1.5. RESULTADOS ESPERADOS

Tras la conclusión del estudio se espera determinar el grado de validez de los factores de reducción de velocidad de Brauer & Thiele (1973) para sistemas trimodales para los datos obtenidos por el Dr.-Ing. Gonzalo Salinas-Salas en los laboratorios del Arbeitsgruppe Mechanische Verfahrenstechnik an der Technische Universität Dresden, (MVT-TU.Dresden).

Además, se espera realizar la comparación en el comportamiento de un sistema de partículas trimodal, respecto de los sistemas monomodales que lo componen, los que son elaborados a partir de partículas, empleadas como calibres comerciales, provistas por la empresa Geltech Inc. de tamaños nominales: 1,5 [μm], 0,5 [μm] y 0,2 [μm].

1.6. METODOLOGÍA

La metodología a utilizar para esta memoria considera la modelación general del principio de funcionamiento de la centrífuga Shimadzu SA-CP3, junto a la modelación del comportamiento de sistemas de partículas monomodales y trimodales. Posteriormente, se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo de los datos experimentales, con el análisis de su procesamiento mediante la construcción de los diagramas incrementales y acumulativos de los sistemas de partículas. En tercer lugar, se procederá a realizar los cálculos correspondientes de las velocidades de sedimentación de cada sistema tanto trimodal como monomodal. Donde las velocidades de sedimentación del sistema trimodal se diferenciarán para cada diámetro representativo, calculando los factores de incremento o reducción de velocidad experimentales y comparándolos con los factores de reducción de velocidad de Brauer & Thiele (1973). Tras haber concluido el proceso descrito con anterioridad, se procederá a realizar una discusión respecto de las distribuciones y velocidades calculadas en los sistemas monomodales y el sistema trimodal, estableciendo las principales similitudes y diferencias entre estos. Todo esto para realizar una descripción de los comportamientos de los sistemas monomodales y trimodal de partículas.

Cabe destacar que para la confección del análisis cuantitativo se utilizarán los softwares Microsoft Excel® y Mathcad®.

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se presentan los elementos teóricos y tecnológicos que sustentan la presente memoria de título, los que están dirigidos al comportamiento de las suspensiones de partículas de orden micrométrico en agua y el subsecuente proceso de sedimentación y de la tecnología empleada para determinar los parámetros que la gobiernan.

2.1. DESCRIPCIÓN CLÁSICA DEL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS EN UN FLUIDO NEWTONIANO

En términos de la mecánica clásica aplicada a un proceso de sedimentación de material disperso sólido, en un medio continuo viscoso, como es el proceso de sedimentación de un sistema de partículas. Es posible modelarlo aplicando la segunda ley de Newton y considerando un escurrimiento laminar. Al despreciar las fuerzas electroquímicas, las que se originan por la diferencia de potencial electrostático entre las superficies de las partículas, las fuerzas de Van der Waals y las fuerzas de Born. Dado que solo se emplearán suspensiones estabilizadas electroquímicamente, a fin de que las fuerzas dominantes sean solo de origen mecánico.

Por lo anterior, es posible plantear un modelo físico de carácter solo mecánico para describir el proceso de sedimentación, el que se basa en la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes aplicadas a un equilibrio de fuerzas entre una partícula única y el fluido. Bajo esta consideración Stokes en (1850, citado por Salinas-Salas, 2007) desarrolló un modelo simple para describir la velocidad de sedimentación de partículas esféricas, rígidas y lisas. En las que el fluido escurre sobre ellas en régimen laminar, que, en este caso, corresponde a un Numero de Reynolds menor a 0,25. Este modelo está restringido a una partícula única, la que se sumerge solo por la acción de las fuerzas mecánicas que actúan sobre ella. Las que están generadas por un campo de aceleración gravimétrico o centrifugo, lo que da lugar a una fuerza asociada a la inercia propia de la masa de la partícula (peso o fuerza centrífuga). La discontinuidad en el fluido, la que da lugar a la aparición a una fuerza de empuje y la viscosidad del fluido que permite la aparición de una fuerza de roce viscoso que se opone al movimiento de la partícula. Por lo anterior se desprecia toda fuerza hidrodinámica o turbulencia que pudiese generarse.

Capítulo 2: Marco teórico

La figura 2.1, muestra el diagrama de cuerpo libre de una partícula sumergiéndose en un fluido viscoso según el planteamiento de Stokes (1850) .

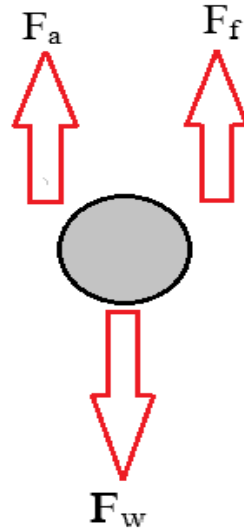


Figura 2.1 Diagrama de cuerpo libre de una partícula esférica sumergida en un fluido viscoso.

Fuente: elaboración propia

A partir del diagrama de cuerpo libre presentado en la figura 2.1, es posible plantear la segunda ley de Newton, reemplazando las fuerzas mecánicas que actúan sobre la partícula lo que permite plantear la ecuación 2.1.

$$\sum \vec{F}_{ext} = \frac{d(m_p \cdot \vec{v}(t))}{dt} = \vec{F}_w + \vec{F}_f + \vec{F}_a \quad 2.1$$

Dónde:

F_{ext} : Fuerzas externas

m_p : Masa de la partícula

$v(t)$: Velocidad de la partícula en función del tiempo

t : Tiempo

F_w : Fuerza de aceleración o peso o fuerza centrífuga de la partícula

Capítulo 2: Marco teórico

F_f : Fuerza de empuje

F_a : Fuerza viscosa o arrastre

2.1.1. Fuerza de aceleración o peso o centrifuga

La fuerza de aceleración corresponde a la fuerza que ejerce la masa de la partícula por efecto del campo de aceleración, en el caso que sea un campo de aceleración gravimétrico, esta fuerza corresponde al peso. En el caso de un campo de aceleración centrifugo, esta fuerza corresponde a la fuerza centrífuga. La cual se incrementa en un factor z respecto de la fuerza ejercida en el campo gravimétrico (Salinas-Salas, 2007). La ecuación 2.2 Permite evaluar esta fuerza.

$$\vec{F}_w = m_p \cdot \vec{g} \cdot z \quad 2.2$$

Dónde:

g : Aceleración de gravedad

z : Factor de amplificación de la aceleración de gravedad por efecto del campo centrifugo de fuerzas

El factor de amplificación de la aceleración de gravedad, es el resultado de la influencia del campo centrifugo que se ve interactuando con la partícula, este factor, es comparado entre la aceleración de gravedad y centrifuga. Esto queda definido en la ecuación 2.3

$$z = \frac{w^2 \cdot r}{g} \quad 2.3$$

Dónde:

w : *Velocidad angular*

r : *Radio de giro de la partícula*

2.1.2. Fuerza de flotación o empuje

La fuerza de flotación presente en la partícula, se relaciona con el volumen de esta y la densidad del fluido con el cual esta interactuando. Además, esta se ve afectada por un factor de

Capítulo 2: Marco teórico

amplificación de la aceleración de gravedad por efecto del campo centrifugo de fuerzas, este fenómeno se ve representado en la ecuación 2.4

$$\vec{F}_a = V_p \cdot \rho_f \cdot \vec{g} \cdot z \quad 2.4$$

V_p : Volumen de la partícula

ρ_f : Densidad del fluido

2.1.3. Fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre para el caso de una partícula esférica rígida y lisa, donde el escurrimiento del fluido por sobre ella es de carácter laminar, fue determinada, analíticamente, por Stokes y se le denomina Ley de Stokes, para el caso analizado, que es el mismo al descrito en el planteamiento de Stokes permite que se emplee la ecuación 2.5, para evaluar la fuerza de arrastre. (Bernhardt, 1994).

$$\vec{F}_a = 3 \cdot \pi \cdot \mu_f \cdot \vec{v}(t) \quad 2.5$$

Dónde:

μ_f : viscosidad dinámica del fluido

Considerando que el escurrimiento sobre la partícula es de carácter laminar, lo que es definido a través de un determinado valor que alcanza el Numero de Reynolds, para este caso debe ser menor al valor de 0.25, hace necesario definir a dicho número adimensional el que se evalúa empleando la ecuación 2.6

$$R_e = \frac{|\vec{v}(t)| \cdot x \cdot \rho_f}{\mu_f} \quad 2.6$$

Dónde:

R_e : Numero de Reynolds del escurrimiento

Capítulo 2: Marco teórico

x : Diámetro de la partícula

Reemplazando las ecuaciones 2.2, 2.4, 2.5 y 2.6 En la ecuación 2.1 y ordenando se obtiene la ecuación diferencial 2.7

$$\frac{d\vec{v}(t)}{dt} + \frac{18 \cdot \mu_f}{\rho_p \cdot x^2} \cdot \vec{v}(t) - \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} \cdot z \cdot \vec{g} = 0 \quad 2.7$$

Donde

ρ_p : Densidad de la partícula

Considerando que la velocidad terminal de una partícula sedimentada en un fluido viscoso se vuelve constante, lo que significa la existencia de un equilibrio dinámico de fuerzas, da lugar a que la inercia sea nula o sea no hay variación de la velocidad respecto del tiempo, con esta consideración es posible despejar de la ecuación 2.7, la velocidad para un tiempo cuasi-infinito, la que adopta la forma de la ecuación 2.8

$$\vec{v}(\infty) = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot x^2}{18 \cdot \mu_f} \cdot z \cdot \vec{g} \quad 2.8$$

Dónde:

$v(\infty)$: velocidad terminal o velocidad de Stokes

Matemáticamente, la velocidad terminal o velocidad de Stokes, se emplea para los fines siguiente para esta memoria como modulo del vector velocidad, por lo que la definición planteada en la ecuación 2.9 se aplica en lo sucesivo.

$$v(\infty) = |\vec{v}(\infty)|$$

2.1.4. Factor dinámico de forma

Debido a que las partículas no presentan en su totalidad formas esféricas, se debe considerar el factor dinámico de forma, el cual relaciona la velocidad estacionaria real de

Capítulo 2: Marco teórico

sedimentación y la velocidad estacionaria de sedimentación de una partícula esférica, el cual su volumen debe ser idéntico al de una partícula asimétrica (Bernhardt, 1994). Esto se ve representado en la ecuación 2.9.

$$k_{\psi} = \frac{v_r}{v_{st}} \quad 2.9$$

Dónde:

k_{ψ} : *Factor dinámico de forma*

v_{st} : *Velocidad de sedimentación de una partícula esférica*

v_r : *Velocidad de sedimentación de una partícula real de la partícula asimétrica*

En el caso del factor dinámico de forma, éste depende del régimen de escurrimiento del flujo a través de la partícula. Además del factor de esfericidad, el que relaciona la división entre el área de una esfera cuyo volumen sea idéntico a la partícula a medir y el área superficial de esta (Bernhardt, 1994). Este fenómeno se representa en la ecuación 2.10

$$\Psi = \frac{A_v}{A_{ef}} \quad 2.10$$

Dónde:

Ψ : *Factor de esfericidad*

A_v : *Área de una esfera con volumen idéntico a la partícula*

A_{ef} : *Área efectiva de la partícula*

Para los efectos prácticos de esta memoria, el factor de esfericidad se considerará de un valor unitario, ya que las partículas se consideran perfectamente esférica, lisas y rígidas para este estudio.

2.1.5. Factor de corrección de velocidad de sedimentación sistema monomodal

El factor de corrección de velocidad de sedimentación relaciona la interacción entre las partículas, debido a que estas influyen en la velocidad de sedimentación, ya que las partículas presentan choque unas con otras al momento de sedimentar, presentando interacciones hidrodinámicas entre ellas.

El factor de corrección depende netamente de la concentración volumétrica que presenta el material particulado y del régimen de escurrimiento del flujo en el que se encuentran presente. Uno de los factores más usados para sistemas monomodales es el factor propuesto por Richardson & Zaki que relaciona todas las variables mencionadas con anterioridad para sistemas monomodales (citado por Salinas-Salas, 2007). Este factor se ve representado en la ecuación 2.11

$$f(c) = (1 - c)^n \quad 2.11$$

Dónde:

$f(c)$: Factor de corrección

c : Concentración volumetrica

n : Exponente que depende del regimen de escurrimiento

Para el exponente n del factor de corrección de Richardson & Zaki, depende del régimen de escurrimiento. Los cuales son presentados en la tabla 2.1

Tabla 0.1 Exponente n del factor de Richardson & Zaki. Fuente: Bernhardt, 1994 "Particle Size Analysis, Classification and sedimentation method"

2.2	Exponente n
$Re \leq 0,2$	4,65
$0,2 < Re < 1$	$4,35 \cdot Re^{-0,03}$
$1 < Re < 500$	$4,45 \cdot Re^{-0,1}$
$500 < Re < 300.000$	2,39

2.1.6. Velocidad de sedimentación corregida

Para encontrar el valor de la velocidad de sedimentación corregida, se debe aplicar el factor de dinámico de forma y el factor de corrección de velocidad al resultado de la velocidad terminal de sedimentación. Esto se ve representado en la ecuación 2.12

$$v(\infty)_c = k_\psi \cdot f(c) \cdot v(\infty) \quad 2.12$$

Dónde:

$v(\infty)_c$: Velocidad de sedimentación corregida

2.2. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA POR MÉTODOS ÓPTICOS.

En la presente sección se describirán los métodos más utilizados para medir la velocidad de sedimentación con el método de campo centrifugo.

2.2.1. Método Fotométrico

El método fotométrico, se fundamenta a través de la medición de la intensidad de luz que atraviesa una suspensión. Ya que esta, atenúa el paso de la luz permitiendo con ello determinar la medición del tamaño de partícula a través de la sombra que las partículas proyectan (Bernhardt, 1994). Matemáticamente, este fenómeno se modela por la ley de Lamber-Beer. La cual se representa en la ecuación 2.13.

$$\ln T = \ln \frac{I_A}{I_E} = -A_v \cdot C_v \cdot L \quad 2.13$$

Donde:

T : Transmisión

I_A : Intensidad antes de la transmisión

Capítulo 2: Marco teórico

I_E : *Intensidad después de la transmisión*

A_v : *Sección de dispersión relacionada con el volumen de la partícula*

C_v : *Concentración de volumen sólido*

L : *Longitud transiluminada*

El comportamiento de la extinción respecto de la concentración volumétrica de partículas presentes en la suspensión, es de carácter asintótico, el que tiende rápidamente a un valor constante. Por lo que, a bajas concentraciones es posible asumir este comportamiento como lineal. Lo que obliga que los aparatos de medida operen dentro de esta zona de linealidad de la extinción respecto de la concentración volumétrica, donde es posible medir el tamaño de las partículas, ya que estas no se interfieren ópticamente entre sí. Permitiendo esto establecer la ecuación 2.14 que relaciona los parámetros ópticos con el diámetro de la partícula.

$$A_v = \frac{3}{2} \cdot \frac{K_{ext}}{x} \quad 2.14$$

Donde:

K_{ext} : *Coficiente de extinción*

Reemplazando la sección transversal de dispersión de la partícula en la ecuación 2.10, permite replantear la ley de Lambert-Beer en función, del tamaño de partícula. Como se plantea en la ecuación 2.15.

$$\ln \frac{I_A}{I_E} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{K(x)}{x} \cdot C_v \cdot L \quad 2.15$$

Para el comportamiento óptico de las partículas, estas se relacionan con el coeficiente de extinción, este coeficiente depende de una totalidad de cuatro variables (Bernhardt, 1994):

1. Tamaño de la partícula.
2. Longitud de la onda de luz utilizada λ .
3. Constantes ópticas del sólido y líquido.
4. Angulo de apertura θ del sistema óptico utilizado.

2.3. REPRESENTACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTICULAS

Estas distribuciones corresponden a histogramas, donde en el eje horizontal, se indica la fracción de tamaño de partícula (diámetro), mientras que el eje vertical, muestra la suma de fracciones de masa de partículas existentes respecto del tamaño de éstas en forma porcentual, o la fracción de la masa total dentro de un rango o delta de tamaño. (Stieß, 2009)

Para construir un diagrama acumulativo, se debe considerar la fracción de masa existente en la suspensión, donde el diámetro de las partículas que componen esta fracción tenga un tamaño menor al valor de (i). Matemáticamente, se establece en la ecuación 2.16.

$$\Delta Q_{r,i} = \frac{m_i}{\sum m_i} \quad 2.16$$

Donde:

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

m_i : Masa del sistema de partículas bajo el tamaño i

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

Dada esta última expresión se puede definir la concentración acumulativa como:

$$Q_r(x_j) = \sum_{i=1}^j \Delta Q_r \quad 2.17$$

Donde:

$Q_r(x_j)$: Concentración acumulativa

El comportamiento de estos histogramas, se ajustan matemáticamente a funciones establecidas por normas técnicas, como lo son: la ISO 9276, serie 1 a 4 y las DIN 66143, 66144 y 66145.

Capítulo 2: Marco teórico

Aplicando estos ajustes a los histogramas obtenidos, se obtiene, una función matemática como la que se presenta en la figura 2.2

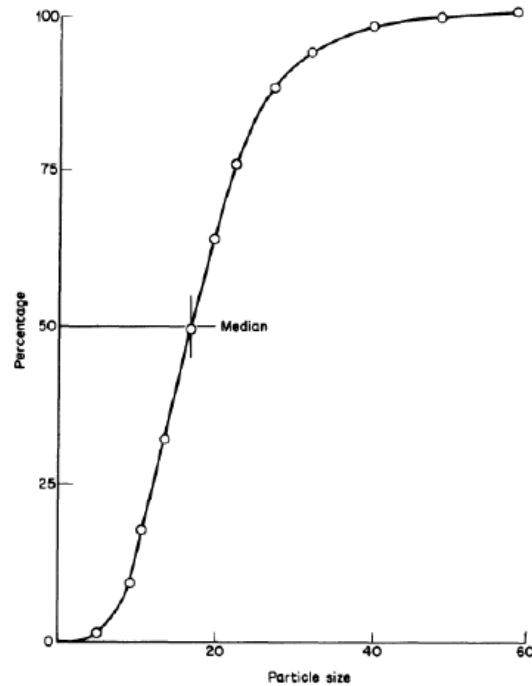


Figura 0.2 Grafico de distribución acumulativa, Fuente: DIN ISO 9276-1

A su vez, se puede definir la concentración incremental de partículas, como el conjunto de las fracciones de masa respecto a la masa total del sistema de partículas, de aquel grupo que poseen un diámetro, que se encuentra definido entre dos límites de tamaño. (Stieß, 2009). Matemáticamente, esto se ve representado en la ecuación 2.18.

$$q_{r,i} = \frac{\Delta Q_{r,i}}{\Delta x_i} \quad 2.18$$

Donde:

$q_{r,i}$: Concentración incremental de partículas

Δx_i : Diferencia entre los límites de tamaño definido.

Capítulo 2: Marco teórico

Estas expresiones, tanto como la concentración acumulativa como la incremental, se relacionan entre sí, a través de la ecuación 2.19.

$$Q_r(x) = \int_{x_{min}}^x q_r(x) \cdot dx \quad 2.19$$

Graficando, la concentración incremental respecto del tamaño, se obtiene un comportamiento como el mostrado en la figura 2.3

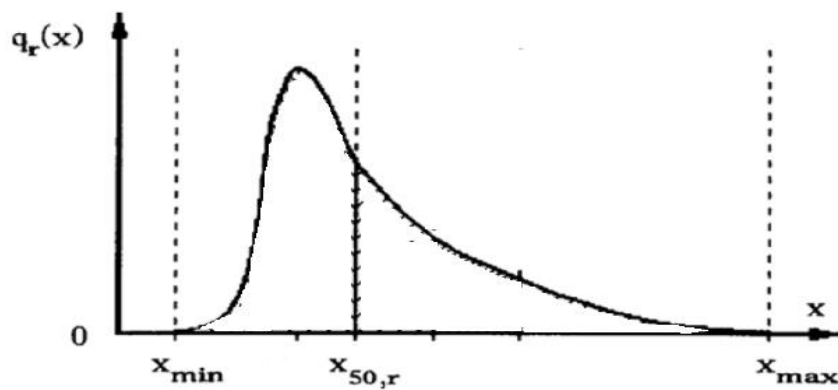


Figura 0.3 Grafico de distribución incremental de partícula, Fuente: Dr.-Ing. Matthias Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik- Partikeltechnologie 1*

2.4. SISTEMAS POLIMODALES DE PARTÍCULAS

En las descripciones anteriores se han considerado el comportamiento de una partícula única. Sin embargo, las partículas que están presentes en los procesos son de diferentes tamaños, esto da como resultado una variación de la velocidad terminal de sedimentación, por diversas causas, entre las cuales, destaca la interacción hidrodinámica entre las partículas (Detloff, 2003), durante el proceso de sedimentación. En este contexto el tamaño de las partículas juega un rol relevante, ya que la masa define parámetros inerciales de movimiento y dado que en la realidad o en la práctica no existen sistemas formados por partículas con un único diámetro, este comportamiento se puede apreciar en la figura 2.4, donde lo anterior permite evidenciar que todo sistema de partículas intrínsecamente es multimodal o polimodal.

Para simplificar el análisis, la representación de partículas tiende a agrupar en torno a un valor de tamaño en determinado sistema cuando existe más de un valor dominante de tamaño, se le denomina sistema bimodal. Por extensión cuando se presentan tres o más valores relevantes de tamaño se le denomina, genéricamente, sistemas multimodales o polimodales.

Para este caso se han planteado diversos modelos matemáticos cuasi-empíricos que representan la reducción de velocidad de sedimentación que sufren las distintas familias de valores de tamaños similares entre sí, cuando se produce la sedimentación por la interacción que se da entre ellas. Uno de estos modelos de carácter eminentemente mecánico corresponde al propuesto por Brauer y Thiele (1973).

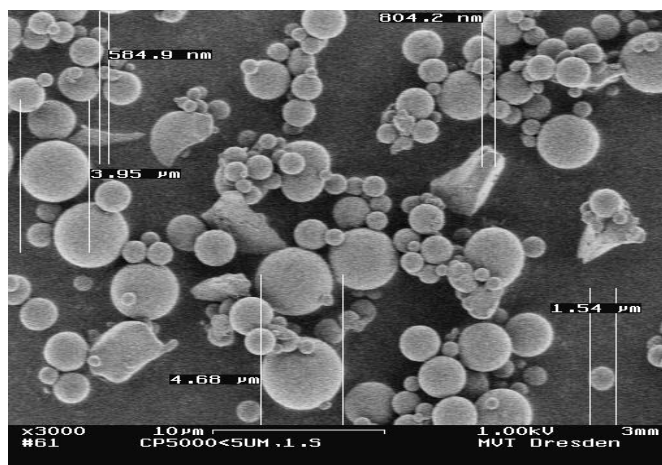


Figura 0.4 sistema polimodal. Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007)

2.5. MODELO TRIMODAL DE MICROPARTÍCULAS PLANTEADO POR BRAUER Y THIELE

El modelo planteado por Brauer y Thiele (1973, citado por Salinas-Salas, 2007), es un modelo que representa el comportamiento hidrodinámico de un sistema polidisperso de partículas, este modelo analiza la influencia del contraflujo y la turbulencia para las diferentes clases de tamaño de partículas que están interactuando. Cabe destacar que el modelo es válido cuando el valor del número de Reynolds es menor a 0.25.

La evaluación de la velocidad terminal o velocidad de Stokes (v_{∞}) de la clase de tamaños de partículas x_j , está relacionada con dos factores, el factor de contraflujo $k_{g,j}$ y el factor de turbulencia $k_{T,j}$, los cuales permiten obtener la velocidad del sistema trimodal. Como se expresa en la ecuación 2.20.

$$v_{s,j} = k_{g,j} \cdot k_{T,j} \cdot v_{\infty} \quad 2.20$$

Donde

$v_{s,j}$: Velocidad de sedimentación corregida.

$k_{g,j}$: Factor de contraflujo.

$k_{T,j}$: Factor de turbulencia.

2.5.1. Factor de contraflujo

El factor de contraflujo que se analiza en el modelo planteado por Brauer y Thiele (1973), representa la estela que deja una partícula de mayor tamaño a causa de su volumen, afectando así la velocidad de sedimentación de las partículas más pequeñas, esto se ve representado en la ecuación 2.21.

$$k_{g,j} = \frac{1}{1 + \frac{1}{(1 - C_p) \cdot \left\{ \frac{x_j^{*2} \cdot \rho_j^*}{\sum_{j=1}^n C_{pj} \cdot x_j^{*2} \cdot \rho_j^*} - 1 \right\}}} \quad 2.21$$

Dónde:

k_{gj} : Factor de contraflujo

C_{pj} : Concentración volumétrica de la partícula a analizar.

C_p : Concentración volumétrica del sistema

x_j^* : Relación de diámetros.

ρ_j^* : Relación de densidades.

2.5.2. Factor de turbulencia

Las partículas al ser de diferentes tamaños generan una mayor turbulencia así afectando a la velocidad de sedimentación, este fenómeno se representa con la ecuación 2.22.

$$k_{Tj} = \frac{1 - C_p}{1,05 \cdot \frac{x_j^*}{x_1^*}} \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(1 + \frac{x_2^*}{x_1^*}\right)^2 + \left\{ \frac{\frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot n^2}}{C_p \cdot \left(1 + \frac{x_j^*}{x_1^*}\right)^2 \cdot \sin \frac{\pi}{n}} \right\}^2 + \frac{x_j^* - \sum_{j=1}^n x_j}{x_j^* \cdot 2 \cdot (n - 1)}} \quad 2.22$$

Dónde:

k_{ij} : Factor de turbulencia.

n : Cantidad de familia de tamaño de partícula.

La relación de diámetros y las densidades de las partículas relacionadas se muestran a continuación en la ecuación 2.23 y 2.24 respectivamente.

$$x_j^* = \frac{x_j}{x_n} \quad 2.23$$

$$\rho_j^* = \frac{\rho_{pj} - \rho_f}{\rho_{pn} - \rho_f} \quad 2.24$$

2.6. TEORÍA DLVO

La teoría DLVO es denominada así por las iniciales de los apellidos de los científicos que las postularon: Derjaguin, Landau, Verwey y Overbeek. Ella, tomando en cuenta el equilibrio de las fuerzas electrostáticas, de atracción de Van der Waals y de repulsión de Born, determina que algunas partículas se aglomeran mientras que otras no lo hacen. Como se indica en Salinas-Salas (2007).

Esta teoría presenta un modelo para el cálculo de las magnitudes de las fuerzas y de la energía de interacción entre las partículas presentes en una suspensión debido a sus cargas y polaridades. Las energías de interacción resultantes de las fuerzas ya indicadas, corresponden a un efecto aditivo como se indica en la ecuación 2.25, según Salinas-Salas (2007).

$$J_T(a) = \sum J_i(a) \quad 2.25$$

Donde:

J_T : *Energía de interacción de partículas.*

De igual modo, la teoría DVLO se puede utilizar en el caso de estabilizadores, dispersantes o floculantes con influencias adicionales a través de la diferencia de la energía de interacción de las partículas, según la distancia de adhesión, pudiendo así calcular las fuerzas de interacción de partículas como se indica en la ecuación 2.26.

$$F_T = \frac{\partial J_T(a)}{\partial a} = - \frac{\Delta J_T(a)}{a} \quad 2.26$$

F_T : *Fuerza de interacción entre partículas*

2.7. ERROR RELATIVO PORCENTUAL

Para determinar cuantitativamente el error asociado a alguna medición, se requerirá utilizar el error relativo, el cual permite obtener la diferencia entre las magnitudes reales con las magnitudes derivadas de una medición o calculo. Esto se indica en la ecuación 2.27.

$$\varepsilon = \frac{(X_r - X_{ob})}{X_r} \cdot 100 \quad 2.27$$

Dónde:

ε : *Error relativo porcentual*

X_r : *Valor real*

X_{ob} : *Valor de medición o calculado*

CAPITULO 3: METODOLOGÍA DE LA OBTENCIÓN DE DATOS

En el presente capítulo se describirá la forma de obtención de los datos que se emplean en la presente memoria. Así como los instrumentos de medición empleados y la metodología de la preparación de la muestra.

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA CENTRIFUGA DE SEDIMENTACIÓN SHIMADZU SA-CP3

La centrifuga Shimadzu SA-CP3 “Centrifugal Particle Size Analyzer SA-CP3”, funciona a través del principio de campo centrifugo, y las mediciones de tamaño se realizan con detección fotométrica, permitiendo realizar mediciones en disoluciones con fracciones de masa de 0,001. Además, este equipo se encuentra capacitado para realizar mediciones en campos de fuerza gravitacional con detección fotométrica. El equipo se puede apreciar en la figura 3.1.



Figura 3.1 Shimadzu SA-CP3. Fuente: Laboratorios del Arbeitsgruppe Mechanische Verfahrenstechnik an der Technische Universität Dresden

El principio de funcionamiento de la centrifuga analítica Shimadzu SA-CP3, se basa en el proceso de generar un campo centrifugo de fuerzas, que permite impulsar las partículas presentes en la suspensión hacia el fondo de la cubeta o recipiente que contiene a esta, separándolas así del líquido, lo que da lugar a un decaimiento constante de la concentración de partículas presente en un determinado volumen de la cubeta, que es iluminado por una ampollita alógena, de modo que las partículas proyectan su sombra sobre un sensor fotosensible, dado que la concentración de

partículas en esta zona está disminuyendo. La cantidad de luz que logra travesar la suspensión (transmisibilidad) se incrementa, reduciéndose con ello la sombra proyectada por las partículas. Lo anteriormente mencionado permite determinar la velocidad con que se están moviendo estas. Con estos valores de diámetro es posible construir los diagramas incrementales y acumulativos de partículas que describen el sistema de cálculo.

En resumen, la centrifugación entrega o proporciona un campo de fuerza que imprime movimiento en las partículas en función de su tamaño en un sistema óptico (fuente de luz-sensor) y determina la magnitud del movimiento, lo que permite establecer su tamaño (Salinas-Salas, 2007).

Los componentes principales de la centrifuga Shimadzu SA-CP3 y su disposición se muestran en la siguiente Figura 3.2.

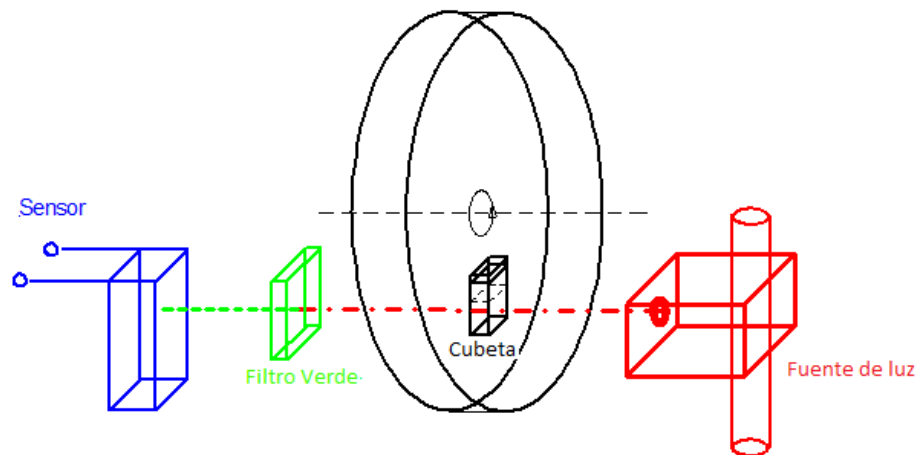


Figura 3.2 Esquema de la centrifuga Shimadzu SA-CP3. Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007).

Los datos técnicos más relevantes de la centrifuga Shimadzu SA-CP3 se muestran a continuación en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Datos técnicos de la centrifuga Shimadzu SA-CP3 Fuente: Elaboración propia a partir del manual de la centrifuga Shimadzu SA-CP3.

Designación de tipo	Sistema de análisis de tamaño de partícula centrífuga SA-CP3
Fabricante:	Shimadzu Corporation Kyoto Japón
Puntos de medición:	84 mm o 90 mm desde el punto giratorio
Rango de velocidad:	500 a 5.000 rpm ($20 \times g$ a $2.350 \times g$)
Lámpara:	halógena
Filtro:	protección térmica de filtro + 1 filtro de color (verde)
Sensor fotográfico:	Silicon Photocell
Lugares de muestra:	1
Rotor del sensor de distancia:	73 mm (sensor 1) y 84 mm (sensor 2)
Cubeta:	Rectangular en cristal de cuarzo, $8 \times 14 \text{ mm}^2$ (L \times b*)
Volumen de muestra:	3 ml
Masa de sólidos por:	0.001
Rango de tamaño de partícula:	20 nm a 150.000 nm

La geometría de la cubeta ocupada por la centrifuga Shimadzu SA-CP3 se muestra a continuación en la figura 3.3.

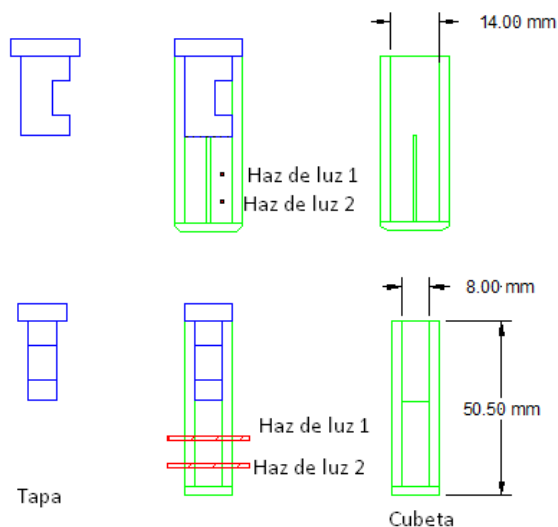


Figura 3.3 Planos dimensionales de cubeta utilizada por la centrifuga Shimadzu SA-CP3 Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007)

3.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PARTÍCULAS

Para el trabajo experimental realizado, cuyos datos secundarios se utilizan en esta memoria, se emplearon sistemas de partículas elaborados por la empresa Geltech Inc, los que se emplean como calibre de medición.

Estas partículas están constituidas por dióxido de silicio (SiO_2), y se caracterizan por ser rígidas, lisas y de forma esférica.

Los sistemas de partículas empleados corresponden a: Geltech 201, Geltech 501 y Geltech 1501, cuyos diámetros nominales son: 0.2 (μm), 0,5 (μm) y 1,5 (μm) respectivamente.

La tabla 3.1 presenta los tamaños nominales de los sistemas de partículas utilizados, medidos mediante un espectrómetro de difracción láser “HELOS” y con un microscopio electrónico marca Zeiss GeminiSEM 300.

Tabla 3.2 Tamaño de los sistemas de partículas utilizados Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007).

Muestra	Espectrómetro de difracción láser (HELOS)		Microscopio electrónico	
	$x_{50,3}, \mu\text{m}$	$x_{ST}, \mu\text{m}$	$x_{50,0}, \mu\text{m}$	$x_{\text{mod},0}, \mu\text{m}$
Geltech 201	0,320	0,270	0,239	0,238
Geltech 501	0,420	0,320	0,530	0,526
Geltech 1501	1,550	1,560	1,534	1,520

En los gráficos 3.1, 3.2 y 3.3, se presenta el diagrama tanto incremental de partículas como acumulativo de los sistemas de partículas utilizadas, los que se obtuvieron, empleando el espectrómetro laser HELOS.

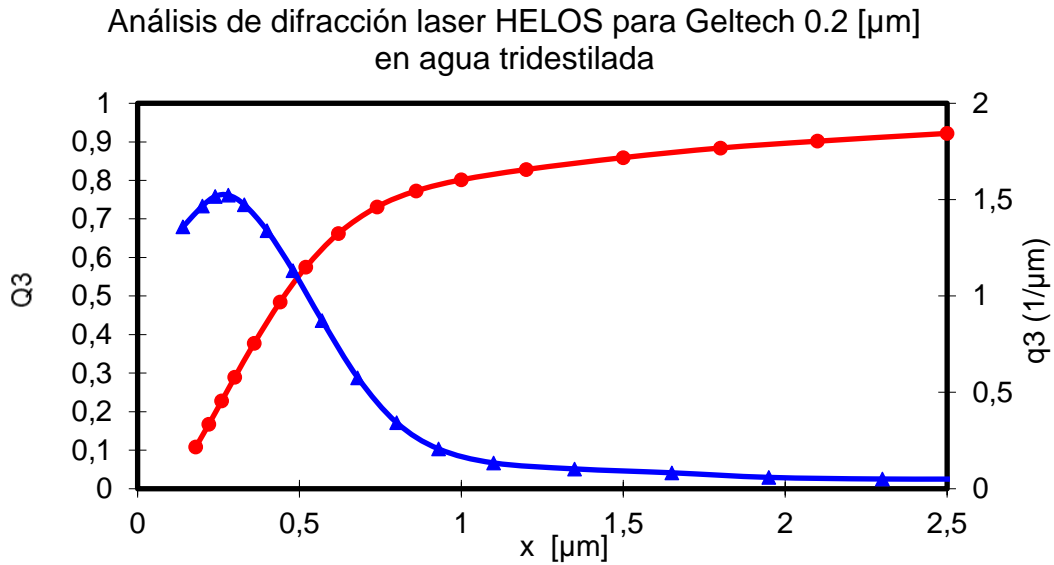


Gráfico 3.1 distribución acumulativa e incremental de partículas Geltech 201 Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007).

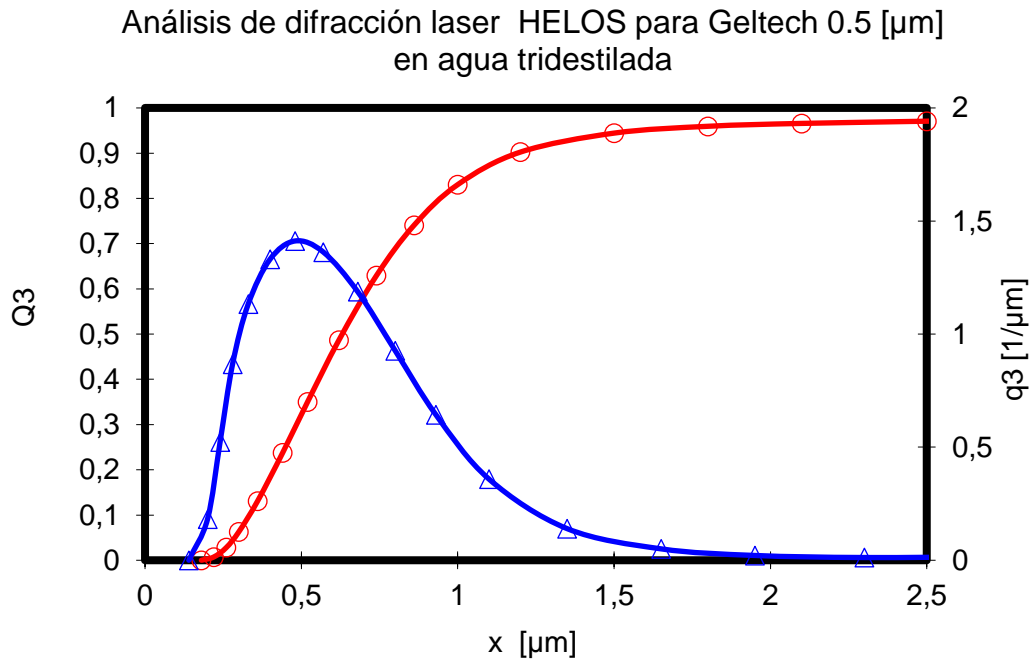


Gráfico 3.2 distribución acumulativa e incremental de partículas Geltech 501 Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007).

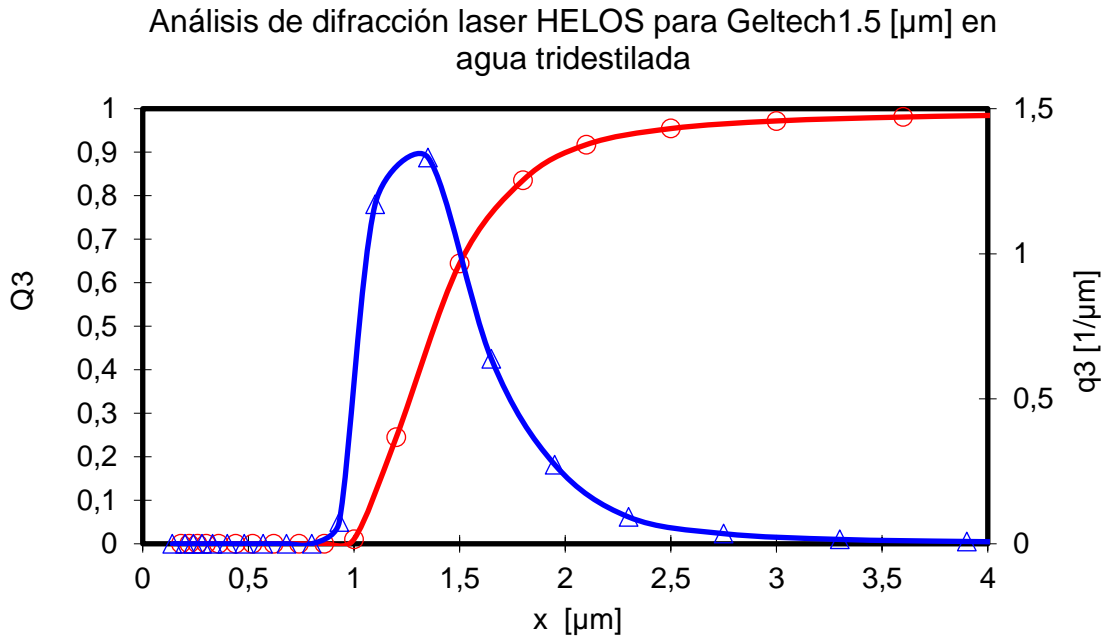


Gráfico 3.3 distribución acumulativa e incremental de partículas Geltech 1501 Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007).

Las fotografías adquiridas a través del microscopio electrónico Zeiss GeminiSEM 300 de los sistemas de partículas empleados se presentan en las figuras 3.3, 3.4 y 3.5.

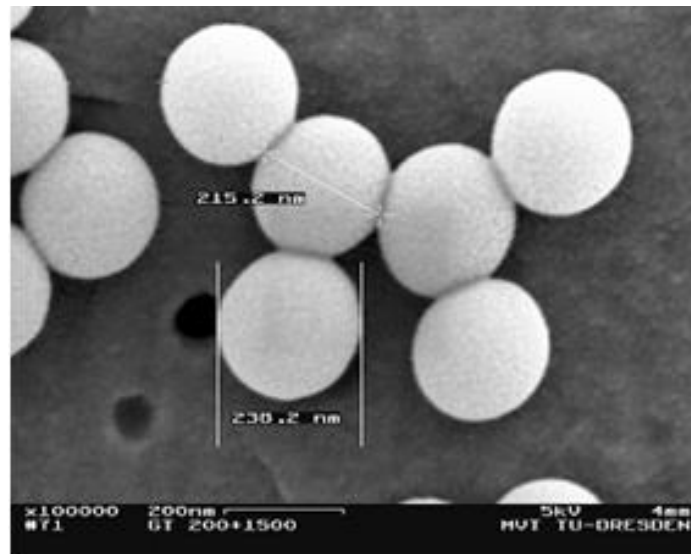
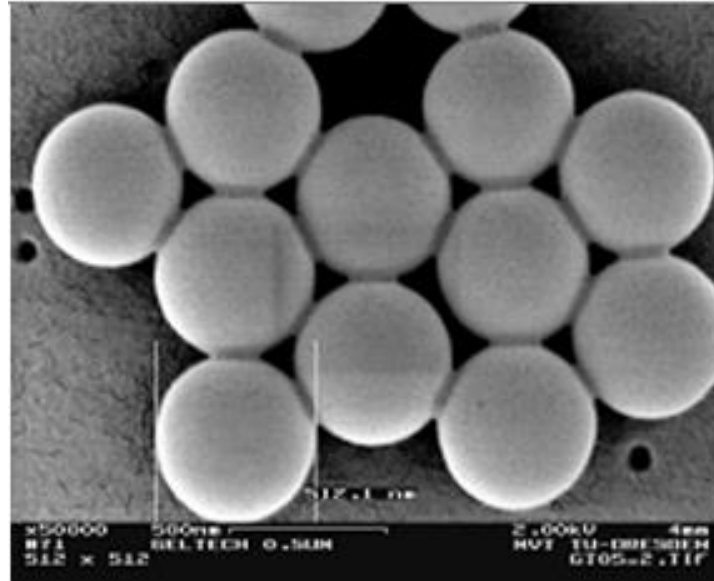
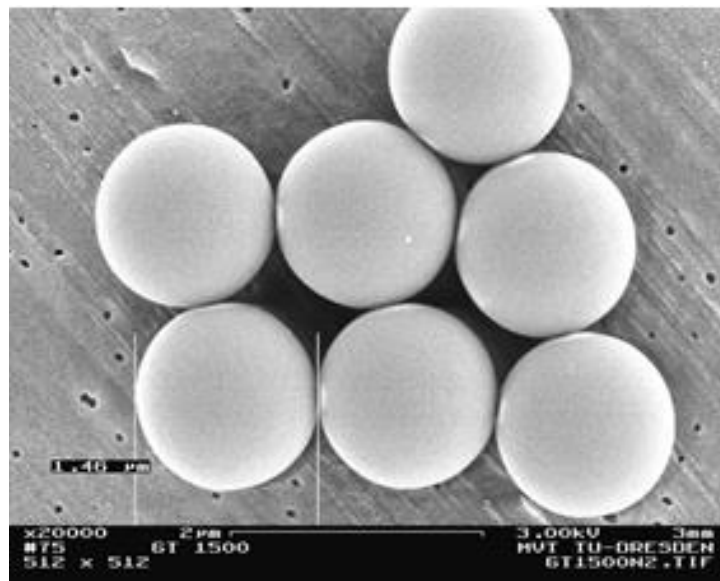


Figura 3.3 Fotografía del microscopio electrónico del sistema de partículas Geltech 201. Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007).



*Figura 3.4 Fotografía del microscopio electrónico del sistema de partículas Geltech 501.
Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007).*



*Figura 3.5 Fotografía del microscopio electrónico del sistema de partículas Geltech 1501.
Fuente: Salinas-Salas G. Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007).*

3.3. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

3.3.1. Sistemas monomodales

Para la preparación de las muestras, se utilizó agua tridestilada, desionizada y filtrada por una membrana con tamaño de poro 0.2 μm . Se masó una cantidad determinada de partículas, a fin de suspenderlas y dispersarlas en el agua para alcanzar un determinado valor de concentración volumétrica. A esta suspensión se le agregó hidróxido de potasio (KOH_3), a fin de asegurar un índice de acidez (pH) del orden de 9,2. Lo anterior mencionado se realizó con el objetivo de estabilizar la suspensión, ya que se modifica el potencial Zeta de esta y se reduce significativamente la posibilidad de aglomeración de partículas, lo que permite que el análisis de la sedimentación se reduzca solo a la acción de las fuerzas de origen mecánico, descartando la acción de fuerza de carácter electroquímico.

Una preparación más detallada de la muestra se observa a continuación (Salinas-Salas 2007).

❖ Preparación de la suspensión.

- Masar el polvo Geltech con respecto a la fracción de volumen sólido de la suspensión por medio de una balanza electrónica.
- Medición de la cantidad de líquido necesaria con ayuda de una pipeta.
- Ajustar el nivel de pH de la solución a aproximadamente 9.
- Mezclar el polvo y líquido en un vaso.

❖ Dispersión de la suspensión

- Medidas en la centrifuga
- 3 minutos en un baño ultrasónico.
- 10 minutos en el Ultra-Turrax a 10.000 rpm.
- 2,5 minutos en vibracell, con ajuste 9-1 segundo y una intensidad del 80%.
- Otros 10 minutos en el Ultra-Turrax a 10.000 rpm.
- 30 minutos en el agitador magnético .
- Control del comportamiento de la densidad de distribución de tamaño mediales difracción laser y/o microscopio electrónico.

- ❖ Control del valor de pH y conductividad eléctrica.
- ❖ Equilibrio de la supección a través de un agitador magnético.

3.3.2. Sistema trimodal

Tomando muestras de los sistemas preparados ya descritos, se procede a verterlas en un mismo vaso en las proporciones indicadas en el modelo propuesto por Brauer y Thiele (1973). Luego de mezclarlos y homogenizarlos, se trasladan a la centrifuga Shimadzu SA-CP3 para el ensayo.

3.4. INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN LA PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.

A continuación, se presentarán los instrumentos utilizados para preparar la muestra y los artefactos utilizados en la medición de datos.

3.4.1. Balanza de laboratorio

En la preparación de la muestra, se utilizó una balanza de laboratorio SARTORIUS Analytic AC 210S, la cual tiene una precisión de +/- 0,0001 gr.

3.4.2. Agitador magnético

Los agitadores de laboratorio se emplearon para mezclar y dispersar inicialmente las partículas en el agua. Además, se emplearon para sostener la suspensión ya preparada y dispersada mientras se desarrollaban los ensayos.

3.4.3. Dispersador de partículas UltraTurrax

Para el proceso de dispersión de las partículas, se utilizó un equipo ad-hoc de marca UltraTurrax modelo T-50, el cual consiste en un vaso en el cual ingresa una propela que es accionada por un motor que alcanza una velocidad de 12.000 rpm, lo que da lugar a grandes turbulencias que permiten separar y dispersar mecánicamente las partículas conformándose una suspensión.

3.4.4. Ultrahomogenizador Vibracell VCX500

Este equipo se basa en la emisión de microondas de ultrasonido a través de una espiga que se sumerge en la suspensión, permitiendo transmitir pulsos ultrasónicos cortos a través de esta, generándose así pequeñas ondas de choque que permiten dispersar las partículas de menor tamaño relativo presentes en la suspensión. Cabe indicar, que la adición de energía que conlleva la aplicación de estas ondas sónicas da lugar a un incremento de la temperatura, por lo que después de su uso la suspensión debe pasar a un agitador magnético durante el tiempo que se requiera para reducir su temperatura y recuperar sus propiedades mecánicas.

3.4.5. Espectrómetro de difracción láser HELOS

El espectrómetro HELOS se utiliza para controlar el estado de la dispersión de la suspensión posteriormente a la preparación de la muestra y para determinar las distribuciones de tamaño de los sistemas de partículas utilizados.

3.4.6. Microscopio electrónico Zeiss GeminiSEM 300

El microscopio electrónico Zeiss GeminiSEM 300 se empleó para determinar las distribuciones de tamaño de los sistemas de partículas utilizados y obtener imágenes de partículas que componen estos sistemas para verificar su geometría.

3.4.7. Medidor de pH WTW multilab 540

El medidor WTW multilab 540 se utiliza para determinar los valores del exponente de la concentración del ion hidrogeno en la suspensión (pH) y conductividad eléctrica de la suspensión.

CAPITULO 4: DESARROLLO

Capítulo 4: Desarrollo

En el presente capítulo se desarrolla el análisis y la discusión de los resultados alcanzados de la aplicación del modelo de Brauer y Thiele a los datos experimentales obtenidos.

El procedimiento metodológico consiste en colocar en el mismo eje de tamaño las tres distribuciones de tamaño de las suspensiones preparadas a partir de Geltech 201, 501 y 1501. A continuación, se sobreponen a estas distribuciones la distribución incremental del sistema trimodal obtenida a partir de los datos experimentales y se verifican las diferencias de tamaño que presentan. Luego, a partir de las suspensiones iniciales se aplica el modelo de Brauer y Thiele, se determinan las velocidades de sedimentación para el sistema trimodal las que se comparan con las velocidades de sedimentación de cada sistema de partículas por separado y las obtenidas en los datos experimentales para proceder al análisis y la discusión de estos valores.

4.1. MODELACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PARTÍCULAS

En la presente sección se darán a conocer los datos y gráficos suministrados por el equipo centrífugo Shimadzu SA-CP3 para los siguientes sistemas de partículas: Geltech 201, Geltech 501 y Geltech 1501.

4.1.1. Sistema Geltech 201

En la tabla 4.1, se dan a conocer los parámetros iniciales con los cuales la muestra ingresa a la centrífuga Shimadzu SA-CP3 para un sistema de partículas Geltech 201.

Tabla 4.1 Parámetros iniciales para el ensayo Geltech 501. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrífuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.

Características Sistema de partículas Geltech 201		
Densidad	2.135	kg/m ³
Diámetro nominal	0,2	µm
Fluido (Agua)		
Temperatura	25	°C
Densidad	997,08	kg/m ³
Viscosidad	0,894	mPa·s
Ensayo		
Velocidad de la maquina	3.000	Rpm
Velocidad Angular	314,16	1/s
Radio de medición	84	Mm
Radio exterior	90	Mm
Radio interno	65	Mm
Masa de las partículas	1,2	gr

Capítulo 4: Desarrollo

Volumen de liquido	200	mL
Concentración inicial de masa	0,00598158	%
Concentración inicial de volumen	0,00280243	%

Los datos obtenidos del ensayo realizado por la Centrifuga Shimadzu SA-CP3 son presentados en el siguiente formato, el cual se muestra a continuación en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Representación de datos extraídos de la centrifuga Shimadzu SA-CP3 Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden

Tiempo (s)	Diámetro (μm)	Extinción	q3	Q3
10	3,030	98,5	0,48	100,00
20	2,143	97,6	0,23	99,96
30	1,750	97,0	0,44	99,91
40	1,515	96,8	0,53	99,89
50	1,355	96,5	0,42	99,85

Debido al registro de los datos otorgados por el ensayo, se pueden realizar los diagramas de extinción relativa, distribución incremental de tamaño y distribución acumulativa de tamaño. Los cuales están representados en los gráficos 4.1, 4.2 y 4.3, respectivamente.

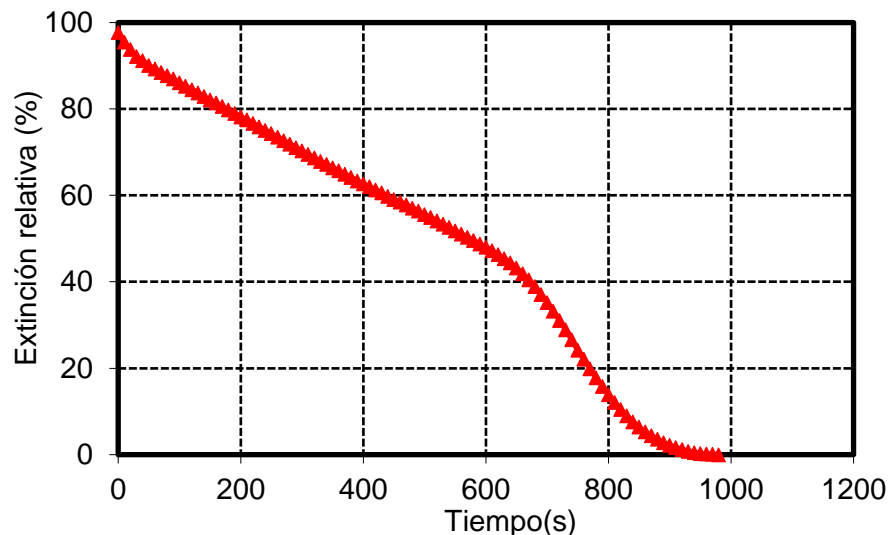


Gráfico 4.1 Diagrama de extinción relativa para ensayo con partículas Geltech 201. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.

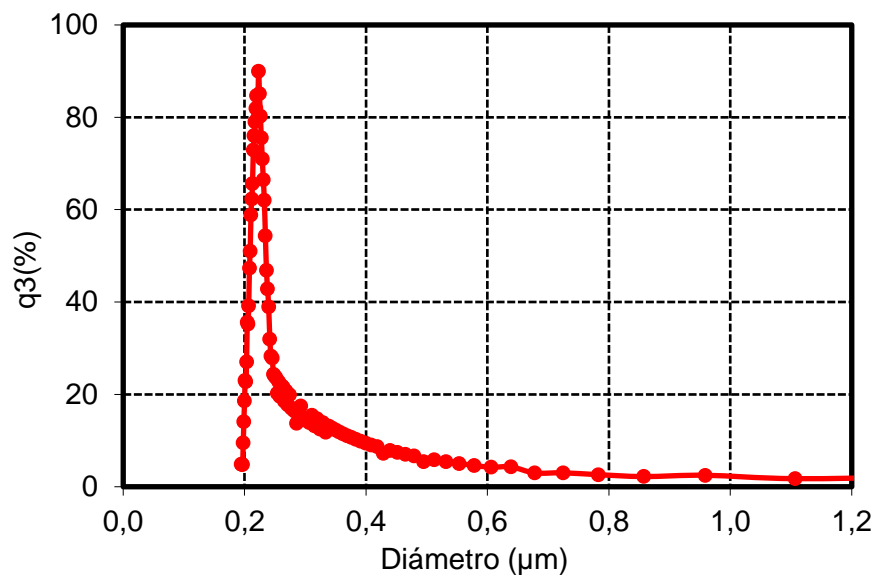


Gráfico 4.2 Diagrama incremental de partículas para sistemas de partículas Geltech 201. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.

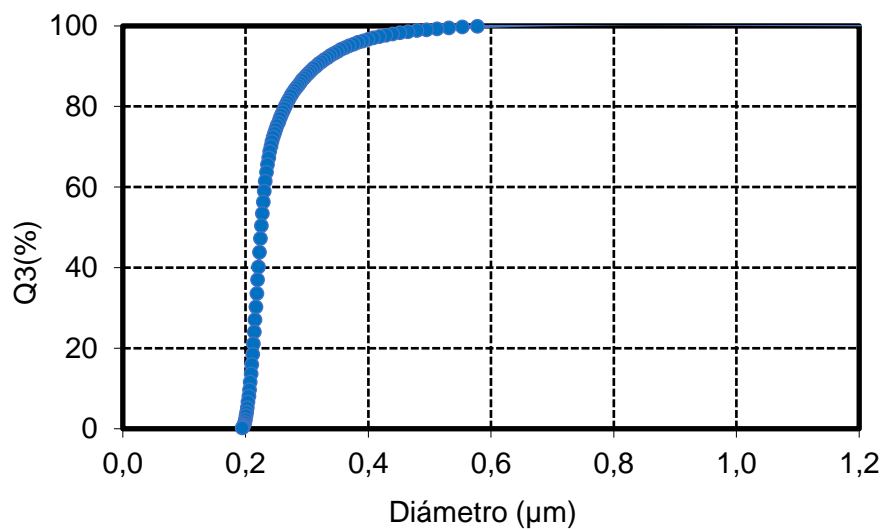


Gráfico 4.3 Diagrama acumulativo para sistemas de partículas Geltech 201. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.

4.1.2. Sistema Geltech 501

Para el caso del ensayo monomodal de Geltech 501 se preparó la muestra a ensayar. Los parámetros iniciales se aprecian en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Parámetros iniciales para el ensayo Geltech 501. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.

Características Sistema de partículas Geltech 501		
Densidad	2.135	kg/m ³
Diámetro nominal	0,5	µm
Fluido (Agua)		
Temperatura	25	°C
Densidad	997,08	kg/m ³
Viscosidad	0,916	mPa·s
Ensayo		
Velocidad de la maquina	2.000	rpm
Velocidad Angular	209,44	1/s
Radio de medición	84	mm
Radio exterior	90	mm
Radio interno	65	mm
Masa de las partículas	0,15	gr
Volumen de liquido	200	ml
Concentración inicial de masa	0,07514428	%
Concentración inicial de volumen	0,03511647	%

La centrifuga Shimadzu SA-CP3 trabajo a 2.000 rpm entregando mediciones que permitieron construir diagramas de extinción relativa, distribución incremental y acumulativa de partículas, los cuales se representan en los gráficos 4.4, 4.5 y 4.6.

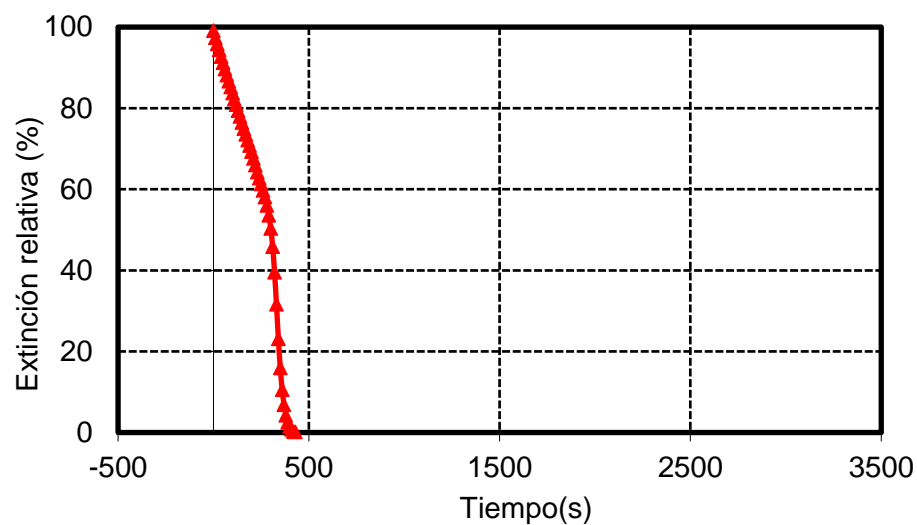


Gráfico 4.4 Diagrama de extinción relativa para ensayo con partículas Geltech 501. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-P3, MVT-TU Dresden.

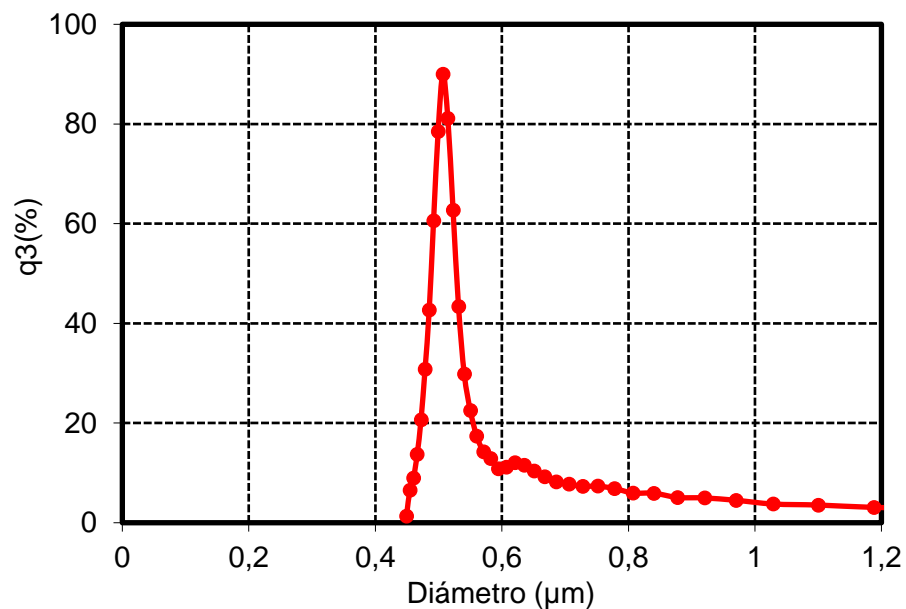


Gráfico 4.5 Diagrama incremental para sistemas de partículas Geltech 501. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.

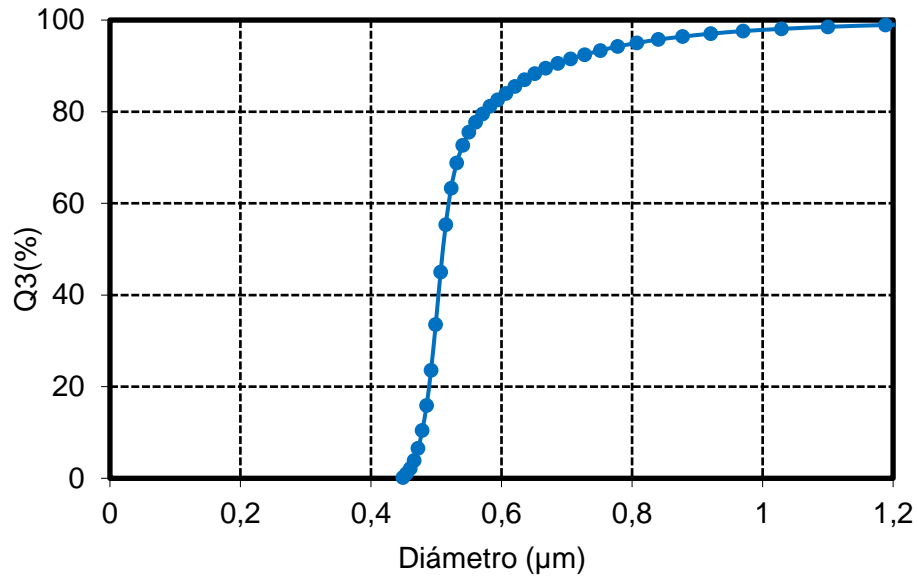


Gráfico 4.6 Diagrama acumulativo para sistemas de partículas Geltech 501. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.

4.1.3. Sistema geltech 1501

El ensayo monomodal del sistema Geltech 1501 se realizó a una velocidad de 1200 rpm. Los parámetros iniciales de este ensayo se presentan a continuación en la tabla 6.

Tabla 4.4 Parámetros iniciales para el ensayo Geltech 1501. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.

Características Sistema de partículas Geltech 501		
Densidad	2.135	kg/m ³
Diámetro nominal	1,5	μm
Fluido (Agua)		
Temperatura	25	°C
Densidad	997,08	kg/m ³
Viscosidad	0,916	mPa·s
Ensayo		

Capítulo 4: Desarrollo

Velocidad de la maquina	1.200	rpm
Velocidad Angular	125,66	1/s
Radio de medición	84	mm
Radio exterior	90	mm
Radio interno	65	mm
Masa de las partículas	0,1	gr
Volumen de liquido	150	ml
Concentración inicial de masa	0,06680049	%
Concentración inicial de volumen	0,03121586	%

Con los datos obtenidos en el ensayo se pueden determinar el grafico de extinción relativa el cual se ve representado en el grafico 4.7.

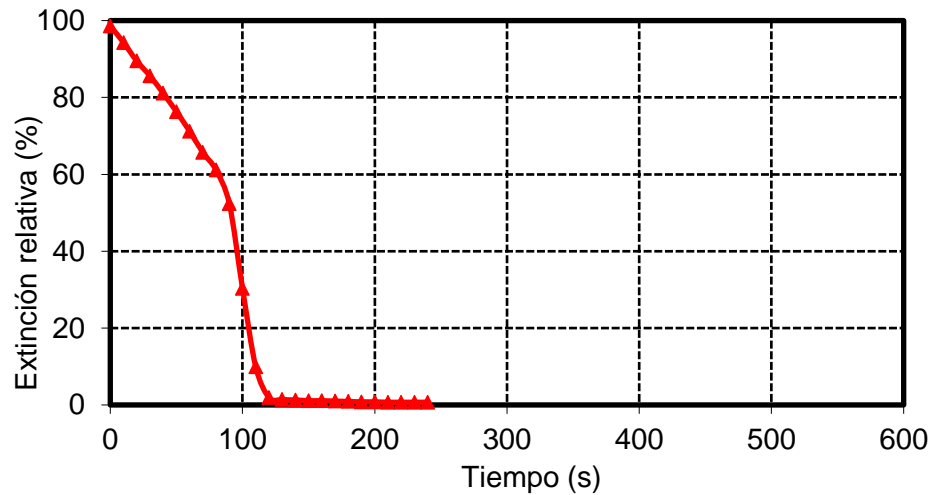


Gráfico 4.7 Diagrama de extinción relativa para ensayo con partículas Geltech 1501. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.

Ademas, se puede obtener la representacion grafica de las ditribuciones incremental de particulas y acumulativa. Estas se aprecian en el grafico 4.8 y 4.9.

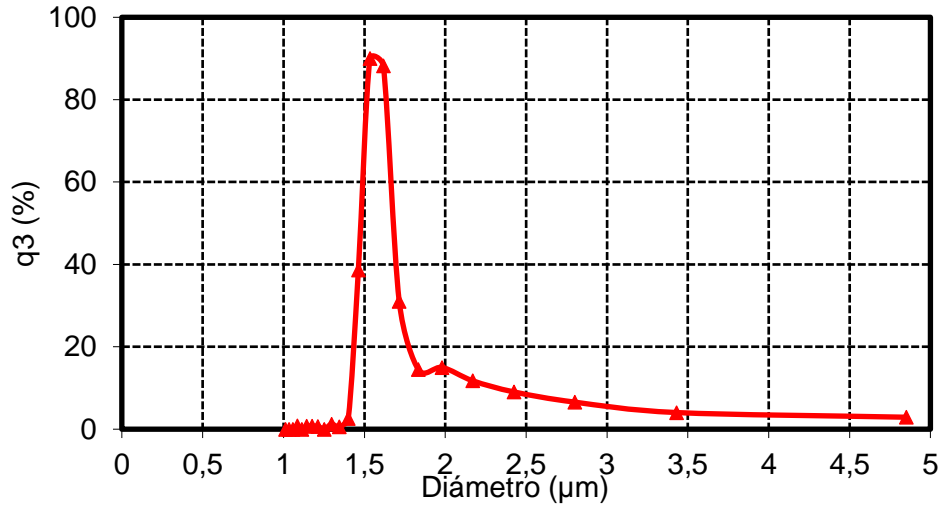


Gráfico 4.8 Diagrama incremental para sistemas de partículas Geltech 1501. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3.

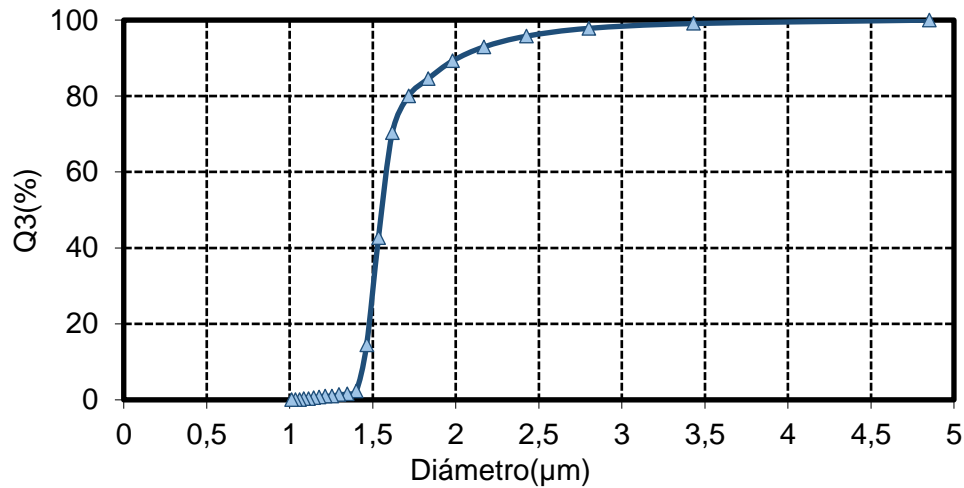


Gráfico 4.9 Diagrama acumulativo para sistemas de partículas Geltech 1501. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.

Para determinar los diámetros representativos de cada muestra se extrajeron los valores que se encontraban en la zona más alta de los gráficos incrementales de cada sistema de partículas ya que ahí se encuentra la mayor cantidad de datos acumulados en la medición. Estos diámetros se ven representados en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Diámetros representativos sistemas monomodales. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3.

Sistemas monomodales	Diámetro
Geltech 201	0,223 μm
Geltech 501	0,507 μm
Geltech 1501	1,617 μm

4.1.4. Sistema trimodal

El sistema trimodal está compuesto por tres familias de partículas con diámetros de 0,2 μm , 0,5 μm y 1,5 μm . La mezcla de las anteriores familias se utiliza como muestra, la cual se ingresa a la centrifuga Shimadzu SA-CP3 para realizar el ensayo. Los datos iniciales del proceso se muestran a continuación en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Parámetros iniciales para el ensayo trimodal. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.

Características Sistema trimodal		
Densidad	2.135	kg/m^3
Diámetro nominal	1,5, 0,5 y 0,2	μm
Fluido (Agua)		
Temperatura	25	$^{\circ}\text{C}$
Densidad	997,08	kg/m^3
Viscosidad	0,916	$\text{mPa}\cdot\text{s}$
Ensayo		
Velocidad de la maquina	1.200	rpm
Velocidad Angular	125,66	1/s
Radio de medición	84	mm
Radio exterior	90	mm
Radio interno	65	mm
Masa de las partículas	0,1	gr
Volumen de liquido	150	ml
Concentración inicial de masa Geltech 1501	0,10019237	%

Capítulo 4: Desarrollo

Concentración inicial de masa Geltech 501	0,20018417	%
Concentración inicial de masa Geltech 201	0,39956847	%
Concentración inicial de volumen Geltech 1501	0,04681648	%
Concentración inicial de volumen Geltech 501	0,09358914	%
Concentración inicial de volumen Geltech 201	0,18700327	%
Proporción	0,33% GT 1501, 0,33% GT 501 y 0,33% GT 201	

A continuación, se presentan los gráficos 4.10, 4.11 y 4.12, en los cuales se aprecian los valores de extinción relativa, distribución incremental y acumulativa de las partículas del sistema trimodal, siendo estos datos obtenidos por la centrifuga Shimadzu SA-CP3.

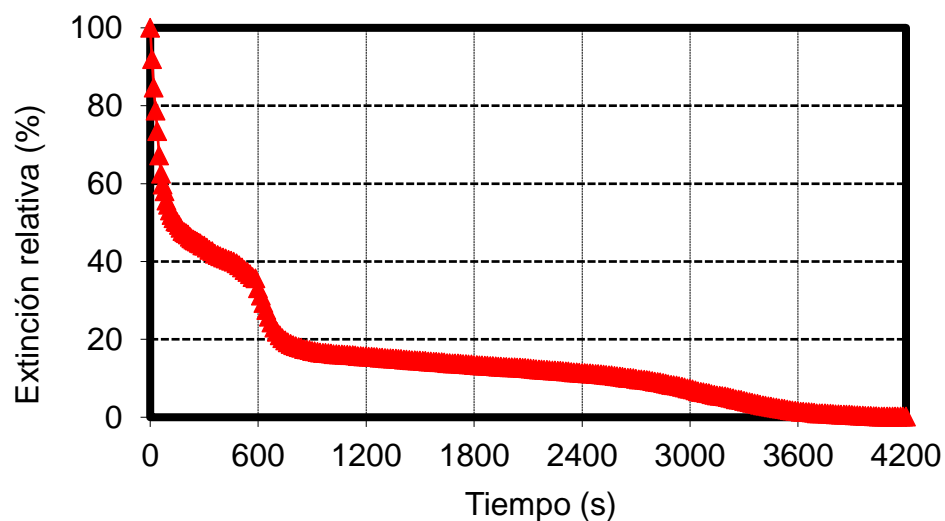


Gráfico 4.10 Diagrama de extinción relativa para ensayo trimodal. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.

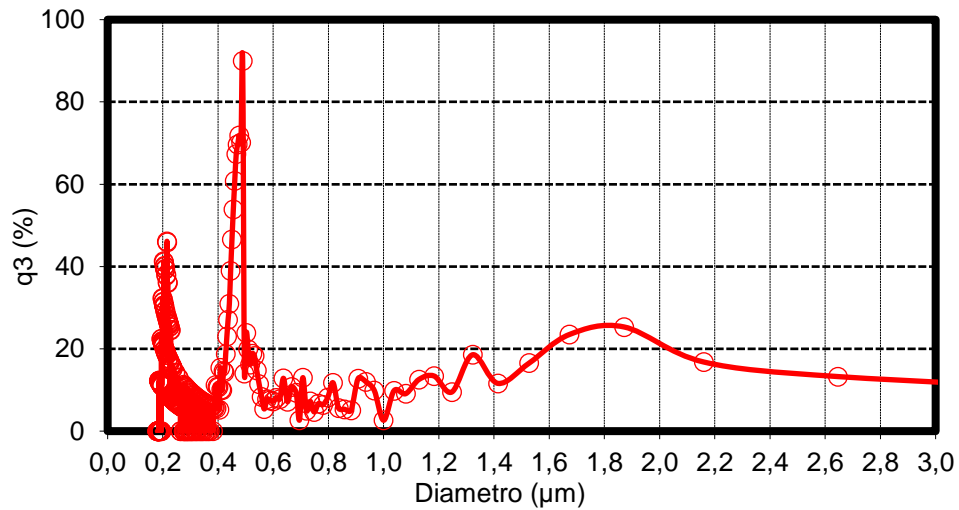


Gráfico 4.11 Diagrama incremental de partículas para el sistema trimodal de partículas. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.

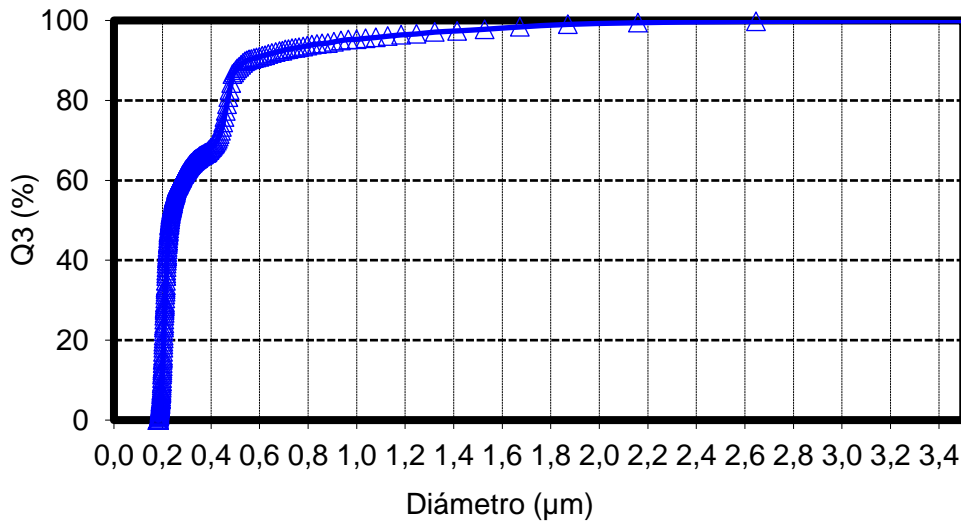


Gráfico 4.12 Diagrama acumulativo de partículas del sistema trimodal. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.

Los diámetros representativos para el sistema trimodal, se obtuvieron de igual forma que para los sistemas monomodales. Estos se extrajeron desde el grafico incremental de partículas, siendo los valores más altos de cada pick que se muestra en el gráfico. Los valores se representan en la tabla 4.7.

Tabla 4.7 Diámetro representativos sistema trimodal. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.

Sistema Trimodal	
Sistema	Diámetro
Geltech 201	0,215 μm
Geltech 501	0,489 μm
Geltech 1501	1,871 μm

4.2. CALCULO DE VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN PARA LOS SISTEMAS DE PARTÍCULAS

Para comenzar el procedimiento se calcula el factor de amplificación de la aceleración, el cual esta expresado en la ecuación 2.3. Este factor se ocupa para el cálculo de todas las velocidades de sedimentación, ya que, se determinó que este factor debe ser igual para cada caso. Siendo este necesario para que exista una coherencia en los cálculos de velocidades para los distintos sistemas de partículas.

$$z = 135,209$$

4.2.1. Velocidad del sistema monomodal Geltech 201

Se determina la velocidad terminal de las partículas empleando la ecuación 2.8, y los datos obtenidos mediante la centrifuga Shimadzu SA-CP3. Este valor alcanza a:

$$v(\infty) = 4,664 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s}$$

Considerando esta velocidad se procede a calcular el número de Reynolds empleando la ecuación 2.6, lo que permite determinar el tipo de escurrimiento sobre la partícula. Para esto se requiere emplear las propiedades del fluido y de las partículas. Lo anterior dio lugar al siguiente valor:

$$R_e = 1,16 \cdot 10^{-6}$$

Capítulo 4: Desarrollo

Se asume un factor de esfericidad unitario para el sistema de partículas ya que estas son esféricas y lisas.

$$k_{\psi} = 1$$

Como se determinó el número de Reynolds se puede conocer el exponente n para el factor de corrección de velocidad planteado por Richardson & Zaki (1954). Este valor del exponente n se extrae de la tabla 1 y se aplica en la ecuación 2.11 permitiendo determinar el factor de corrección de velocidad para la situación analizada. Estos valores son:

$$n = 4,65$$
$$f_c = 0,99987$$

Obtenidos el factor de corrección de velocidad de sedimentación y el factor de forma, se puede calcular la velocidad terminal corregida empleándose la ecuación 2.12.

$$v(\infty)_c = 4,664 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s}$$

4.2.2. Velocidad del sistema monomodal Geltech 501

Como en la sección anterior este procedimiento comienza determinando la velocidad terminal de las partículas empleando la ecuación 2.8 y los datos obtenidos mediante la centrifuga Shimadzu SA-CP3. Este valor alcanza a:

$$v(\infty) = 2,411 \cdot 10^{-5} \frac{m}{s}$$

Ya determinada esta velocidad, se procede a calcular el número de Reynolds empleando la ecuación 2.6, lo que permite determinar el tipo de escurrimiento sobre la partícula. Para esto se requiere emplear las propiedades del fluido y de las partículas. Lo anterior dio lugar al siguiente valor:

$$R_e = 1,363 \cdot 10^{-5}$$

Capítulo 4: Desarrollo

Se asume un factor de esfericidad unitario para el sistema de partículas ya que estas son esféricas y lisas.

$$k_{\psi} = 1$$

Como se determinó el valor del número de Reynolds se puede conocer el exponente n para el factor de corrección de velocidad planteado por Richardson & Zaki (1954). Este valor de exponente n se extrae de la tabla 1 y se aplica en la ecuación 2.11 permitiendo determinar el factor de corrección de velocidad para la situación analizada. Estos valores son:

$$n = 4,65$$

$$f_c = 0,9983$$

Obtenidos el factor de corrección de velocidad de sedimentación y el factor de forma, se puede calcular la velocidad terminal corregida, empleándose la ecuación 2.12.

$$v(\infty)_c = 2,407 \cdot 10^{-5} \frac{m}{s}$$

4.2.3. Velocidad del sistema monomodal Geltech 1501

Se establece la velocidad terminal de las partículas empleando la ecuación 2.8 y los datos obtenidos mediante la centrifuga Shimadzu SA-CP3. Este valor alcanza a:

$$v(\infty) = 2,452 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s}$$

Ya establecida esta velocidad se procede a calcular el número de Reynolds empleando la ecuación 2.6, lo que permite determinar el tipo de escurrimiento sobre la partícula. Para esto se requiere emplear las propiedades del fluido y de las partículas. Lo anterior dio lugar al siguiente valor.

$$R_e = 4,423 \cdot 10^{-4}$$

Capítulo 4: Desarrollo

Se asume un factor de esfericidad unitario para el sistema de partículas ya que estas son esféricas y lisas.

$$k_{\psi} = 1$$

Como se determinó el valor del número de Reynolds se puede conocer el exponente n para el factor de corrección de velocidad planteado por Richardson & Zaki (1954). Este valor del exponente n se extrae de la tabla 1, y se aplica en la ecuación 2.11, permitiendo determinar el factor de corrección de velocidad para la situación analizada. Estos valores son:

$$n = 4,65$$

$$f_c = 0,999$$

Obtenidos el factor de corrección de velocidad de sedimentación y el factor de forma se puede calcular la velocidad terminal corregida empleándose la ecuación 2.12.

$$v(\infty)_c = 2,452 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s}$$

4.2.4. Velocidad del sistema trimodal

Se establece la velocidad terminal de las partículas para cada diámetro representativo dentro del sistema trimodal. Para esto se emplea la ecuación 2.8 y los datos obtenidos mediante la centrifuga Shimadzu SA-CP3. Este valor alcanza a:

$$v(\infty)_{0,2} = 4,336 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s}$$

$$v(\infty)_{0,5} = 2,243 \cdot 10^{-5} \frac{m}{s}$$

$$v(\infty)_{1,5} = 3,283 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s}$$

Determinada las velocidades terminales se procede a calcular los números de Reynolds para cada diámetro representativo presente en el sistema trimodal empleando la ecuación 2.6, lo que

Capítulo 4: Desarrollo

permite determinar el tipo de escurrimiento sobre la partícula. Para esto se requiere emplear las propiedades del fluido y de las partículas. Lo anterior dio lugar al siguiente valor.

$$R_{e0.2} = 1,04 \cdot 10^{-6}$$

$$R_{e0.5} = 1,223 \cdot 10^{-5}$$

$$R_{e1.5} = 6,852 \cdot 10^{-4}$$

Se asume un factor de esfericidad unitario para el sistema de partículas ya que estas son esféricas y lisas.

$$k_{\psi} = 1$$

Como se determinó el valor del número de Reynolds se puede conocer el exponente n para los factores de corrección de velocidad planteado por Richardson & Zaki (1954). Este valor del exponente n se extrae de la tabla 1 y se aplica en la ecuación 2.11, permitiendo determinar el factor de corrección de velocidad para la situación analizada. Estos valores son:

$$n = 4,65$$

$$f_{c0.2} = f_{c0.5} = f_{c1.5} = 0,984852$$

Obtenidos el factor de corrección de velocidad de sedimentación y el factor de forma, se puede calcular la velocidad terminal corregida, empleándose la ecuación 2.12.

$$v(\infty)_{ct0.2} = 4,27 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s}$$

$$v(\infty)_{ct0.5} = 2,209 \cdot 10^{-5} \frac{m}{s}$$

$$v(\infty)_{ct1.5} = 3,234 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s}$$

4.3. FACTOR DE REDUCCIÓN DE VELOCIDAD DE BRAUER & THIELE

Se procedió a calcular los factores de corrección de Brauer & Thiele, los cuales corresponden al factor de contraflujo y al factor de turbulencia. Estos factores se calcularon para cada tamaño representativo de partículas.

El primer factor que se procedió a calcular fue el factor de contraflujo para todos los tamaños representativos de partículas presentes en el sistema trimodal, los cuales se determinaron empleando la ecuación 2.21. Lo anterior dio lugar a los siguientes valores:

$$k_{g0.2} = 0.958$$

$$k_{g0.5} = 0.992$$

$$k_{g1.5} = 0.999$$

El factor de turbulencia para todos los tamaños representativos de partículas presentes en el sistema trimodal se determinó mediante la ecuación 2.22. Lo anterior permitió obtener los siguientes valores:

$$k_{T0.2} = 0.994$$

$$k_{T0.5} = 0.991$$

$$k_{T1.5} = 0.9767$$

4.4. FACTOR DE REDUCCIÓN DE VELOCIDAD EXPERIMENTAL

Los factores de reducción de velocidad de sedimentación experimentales se determinaron para cada diámetro de partícula representativo mediante la ecuación 2.28, donde se reemplaza los valores de velocidad medidos experimentalmente y sus valores análogos de velocidad teórica o de Stokes.

$$K_{(i)} = \frac{v(\infty)_{c(i)}}{v(\infty)_{st(i)}} \quad 2.28$$

Estos factores se utilizan para comparar las velocidades que alcanzan las partículas de un tamaño determinado presentes en el sistema, interactuando todas entre sí, con la velocidad que alcanzarían si estuvieran sedimentando en forma monomodal.

Los siguientes factores de reducción se determinaron para los sistemas de partículas; Geltech 201, Geltech 501 y Geltech 1501. La tabla 4.8 presenta los valores de estos factores de reducción de velocidad experimental.

Tabla 4.8 Factores de reducción de velocidad experimental Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.

Factor de reducción de velocidad experimental	Valor
$K_{0.2}$	0,916
$K_{0.5}$	0,918
$K_{1.5}$	1.32

CAPITULO 5: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS MONOMODALES GELTECH 201, 501 Y 1501.

En el caso de los sistemas monomodales, estos se encuentran lo suficientemente verificados en términos de diámetros representativos y distribución de tamaño en la literatura técnica, en particular (Salinas-Salas, 2007). Cabe indicar que estos valores fueron determinados para todos los tipos de partículas utilizadas mediante: microscopía electrónica, espectrometría laser y mediante centrifugas analíticas (Shimadzu SA-CP3 y LumiFuge 114 y 116), por lo que se consideran válidos para este análisis.

5.2. SISTEMA TRIMODAL DE PARTÍCULA

Dado que el sistema trimodal fue preparado a partir de muestras individuales para los distintos tamaños de partículas, los cuales fueron medidos y verificados como sistemas monomodales representativos de sus tamaños de partículas, no existe duda de la composición del sistema. La preparación del sistema trimodal se realizó siguiendo las mismas pautas y metodologías de preparación para los sistemas monomodales, por lo que es muy poco probable que la muestra se contaminara de alguna manera. El sistema de partículas se dispersó de una forma análoga a la preparación de sus componentes y se realizó una verificación mediante espectrometría laser, la que por características del equipo no censo la fracción de tamaño correspondiente a los 500 nm. Esto es normal si se considera la relevancia de los espectros ópticos de las partículas de tamaño 200 y 1500 nm. No obstante, al emplearse centrifugación analítica para la determinación de tamaño, se pudo determinar claramente la presencia de las tres distribuciones de tamaño. El cruce de los datos entregados por ambas metodologías de medición demuestra que el sistema está correctamente dispersado. Por lo anterior se desprende que las mediciones que se realizan a esta muestra son representativas de su comportamiento cuando se le somete a un proceso de sedimentación, en este caso en campo centrifugo. El único aspecto que presenta algún tipo de posible reparo radica en el hecho de que la cantidad de muestra era pequeña y solo permitió realizar un ensayo de sedimentación. La razón de esta situación se basa en el hecho que fue una medición de oportunidad, ya que, en ese momento, se contaban con las suspensiones ya

preparadas de cada sistema monomodal de partículas, y la obtención de estos datos, no obedecía a un programa *ad hoc*.

5.3. VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN

Al analizar los sistemas de partículas monomodales y sus respectivas velocidades se aprecia una diferencia notable entre el comportamiento de cada sistema de partículas. Lo que se encuentra desarrollado en la sección 4.2 en el presente trabajo de título. Uno de los aspectos que diferencia notoriamente la velocidad de sedimentación entre los distintos sistemas monomodales es debido al cambio sustancial de tamaño de las partículas que conforman cada sistema. A modo de ejemplo de la relevancia de las diferencias de tamaño entre los distintos sistemas de partículas se presenta en la figura 5.1, la cual corresponde a una fotografía electrónica de un sistema bimodal formado por partículas de Geltech 1501 y Geltech 201. Esta diferencia de tamaño obviamente se ve reflejado en su velocidad de sedimentación.

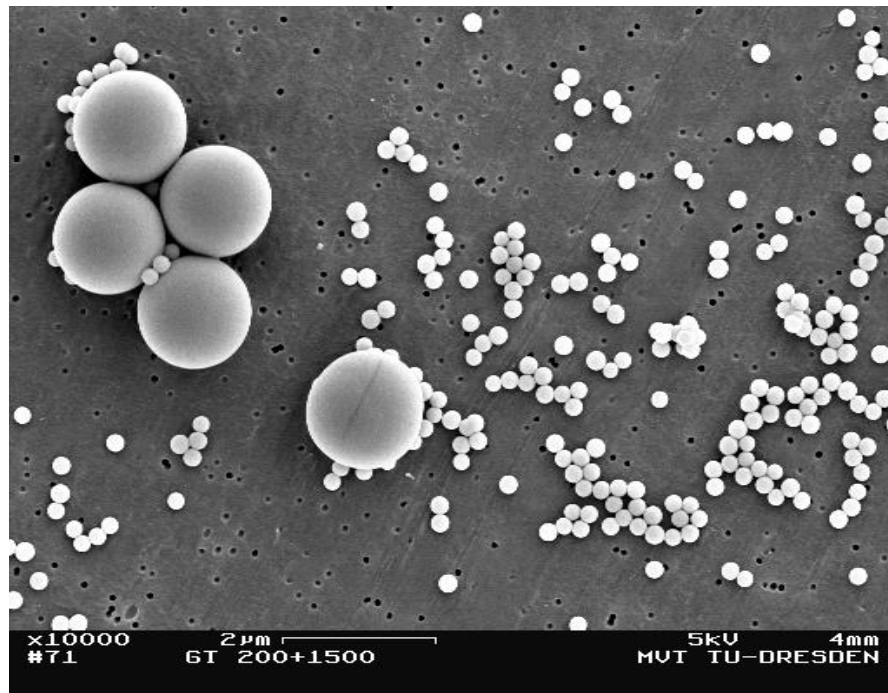


Figura 5.1 Fotografía de un sistema bimodal Fuente: Salinas-Salas G. *Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen Dissertation; Technische Universität Dresden (2007).*

Capítulo 5: Análisis y discusión de los resultados

Cabe señalar que dentro de los sistemas monomodales existen choques y fuerzas de interacción hidráulica entre las partículas que lo conforman, lo cual afecta la velocidad de sedimentación del sistema. Estos fenómenos han sido analizados por distintos autores, siendo Einstein (1905) uno de los primeros en plantear la existencia implícita de un factor de corrección de velocidad. Posteriormente, se han planteado numerosos modelos físicos, semi-empíricos y empíricos. De ellos, el más popularmente utilizado es el propuesto por Richardson & Zaki que tiene un carácter semi-empírico, donde relaciona el régimen de escurrimiento del fluido sobre las partículas y la concentración volumétrica de estas en la suspensión a fin de representar el principio de continuidad de la masa del fluido.

De los resultados alcanzados se puede apreciar que los factores de velocidad calculados para los diferentes sistemas monomodales son muy cercanos a uno. Esto se debe, entre otras razones, a que las concentraciones volumétricas de partículas de las muestras preparadas son bajas, debido a que el método de medición empleado es de carácter óptico. Esto conlleva a que existan considerables distancias relativas entre las partículas, lo que reduce tanto los choques entre ellas, así como las fuerzas de interacción hidrodinámicas y electroquímicas que pudieran presentarse.

Respecto al sistema trimodal, la medición muestra el comportamiento de sus fracciones de tamaño, respecto del comportamiento que tendría si se encontraran en un sistema monomodal. Se observó que el comportamiento monomodal de las fracciones de tamaño correspondientes a Geltech 201 y Geltech 501 presentan velocidades de sedimentaciones mayores a las existentes en condiciones del sistema trimodal, lo que es coherente y consistente con el hecho de la existencia de distintas velocidades relativas entre partículas de distintos tamaño y con los consecuentes efectos hidrodinámicos generados por la capa laminar que cada partícula engendra, su estela y los choques que se generan. Esto se hace muy relevante en el caso de las partículas de Geltech 1501, las que presentaron un comportamiento inverso, ya que estas partículas incrementaron su velocidad. Este efecto ha sido registrado en sistemas monomodales, denominándose sobre velocidad en la literatura técnica, pudiéndose citar a: Berhart(1994).

Físicamente se genera un cluster hidrodinámico de partículas, en el cual las partículas de mayor tamaño al moverse con velocidades del orden 50 veces mayor y con volúmenes 420 veces mayores a la de menor tamaño, tienden a capturarlas dentro de su capa límite incrementando con ello la fuerza centrífuga sobre el cluster y con esto su velocidad de sedimentación. Esta situación

Capítulo 5: Análisis y discusión de los resultados

no se da en el caso de los dos sistemas de partículas anteriores (Geltech 201 y Geltech 501), ya que la velocidad del sistema de mayor tamaño es solo 6 veces al del menor diámetro. Lo que equivale en termino volumétrico a que el volumen sea 15 veces al de la partícula menor.

Ahora bien, si comparamos las distribuciones incrementales de partículas obtenidas por la centrifuga Shimadzu SA-CP3 para el caso trimodal y monomodal, representadas en el grafico 5.1, ratificamos lo mencionado con anterioridad, demostrando que existe una disminución de velocidad presente en el sistema trimodal, para los sistemas de partículas Geltech 201 y Geltech 501 al compararlos con los gráficos de distribución incremental respectivos de los sistemas monomodales, ya que estos últimos, se encuentran desplazados hacia la derecha del grafico pudiéndose interpretar como una velocidad de mayor magnitud. Esto se puede inferir gracias a que los diámetros representativos de los sistemas presentan una relación con la velocidad terminal de estos. Esta relación se establece a través de un despeje aplicado a la ecuación 2.8. Sin embargo, ocurre lo contrario en el caso del sistema Geltech 1501 para el sistema trimodal, ya que como se mencionó anteriormente, se ve un aumento en la velocidad, esto queda constatado en el grafico 5.1, debido a que se encuentra desplazado a la derecha del sistema monomodal Geltech 1501.

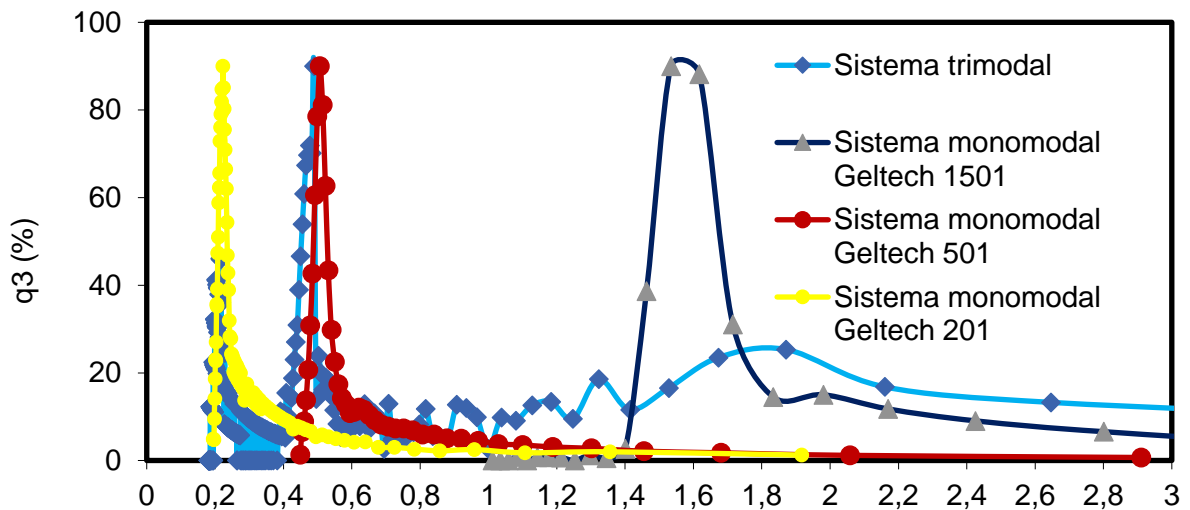


Gráfico 5.1 Diagrama incremental de los sistemas monomodales, superpuestos a diagrama incremental del sistema trimodal. Fuente: elaboración propia a partir de los datos otorgados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.

5.4. VALIDEZ DE LOS FACTORES DE REDUCCIÓN DE BRAUER & THIELE

Para establecer la validez de los factores de reducción de velocidad de sedimentación para el sistema trimodal propuesto por Brauer & Thiele, se determinó el error asociado para cada familia de partículas, a través de la ecuación 2.27, que compara los factores de reducción de velocidad calculados a través de la teoría de Brauer & Thiele, con los factores de reducción experimental obtenidos mediante la comparación de los sistemas monomodales. Estos valores se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Valores del error asociado para los diferentes tamaños de diámetros representativos. Fuente: elaboración propia.

Error asociado		
Geltech 201	Geltech 501	Geltech 1501
3,852%	6,667%	35,253%

Al observar los resultados obtenidos se puede deducir que el comportamiento de los sistemas de partículas Geltech 201 y Geltech 501, bajo las condiciones específicas por las cuales se desarrolló el estudio son razonables. Ya que los valores alcanzados por el factor de corrección de velocidad presentan un grado de error relativamente bajo. Lo que es coherente con los antecedentes presentados con la información existente en la literatura técnica consultada y los antecedentes presentados durante el desarrollo de esta memoria de título. Sin embargo, para el caso del sistema de partículas Geltech 1501, a diferencia de los dos casos anteriores, se presenta la existencia de un error asociado al factor de corrección de velocidad medido, respecto del presentado en la literatura, significativo. Esta situación obliga a replantear la validez del modelo planteado por Brauer & Thiele respecto del sistema trimodal. A no ser que se tenga en cuenta el hecho que el modelo planteado por Brauer & Kriegel, según lo indica (Oviedo, 2019) formulado para sistemas bimodales, plantea una restricción de los tamaños relativos entre partícula, el que queda restringido a que la partícula de mayor tamaño no exceda cuatro veces el de menor tamaño. En el caso trimodal la partícula de mayor diámetro equivale a 11,5 veces la de menor diámetro, esta situación, si bien no está descrita en detalle en el modelo de Brauer & Thiele, puede ser la causa

Capítulo 5: Análisis y discusión de los resultados

de esta divergencia entre los valores medidos y los valores proyectados. De modo, que hay un elemento que no fue controlado en la medición, que es la relación de tamaño. Ahora a esto se suma, una segunda posibilidad de explicación, que se basa también en el tamaño, ya que por el principio de funcionamiento de la centrifuga Shimadzu SA-CP3, dio lugar a que el número de mediciones obtenidas para el sistema Geltech 1501 como parte del sistema trimodal fueron significativamente más bajo que para las otras partículas que lo componían, ya que solo se contó con 10 mediciones debido a que el tamaño de la partícula era tan grande en términos relativos respecto de las de menor diámetro, lo que dio lugar a que su velocidad fuera muy alta, pudiéndose solo detectar la presencia de esta partícula durante los primeros 70 s, mientras que la que le seguía en tamaño se le detectó por 420 s aproximadamente. Esta situación, conlleva a que el número de mediciones sería poco representativa y físicamente es imposible eliminar este efecto, a no ser, que se emplearan partículas cuyos tamaños fueran mucho más cercanos entre sí. Estas dos situaciones se confabulan en contra del comportamiento del modelo impidiendo emitir un juicio taxativo respecto del comportamiento de la partícula de mayor tamaño, ya que al aplicar el modelo de Brauer & Thiele al caso particular de la suspensión bimodal que resulta tras la sedimentación de las partículas mayores (Geltech 1501), el modelo se comporta adecuadamente. Considerando lo indicado, este modelo resulta válido para relaciones entre tamaños de partículas dentro de ciertos rangos, por lo que sería aplicable.

CONCLUSIONES

Conclusiones

Se realizó un análisis de los sistemas ópticos de medición de la velocidad de sedimentación de sistemas de micropartículas, que emplean campo centrífugo para la detección de estas partículas, a partir de una revisión de una literatura técnica respectiva y del planteamiento de los elementos científicos-tecnológicos que sustentan sus principios de funcionamiento.

Se desarrollo un análisis del comportamiento del proceso de sedimentación de partículas a partir de la descripción clásica mecánica del fenómeno, que corresponde al sumergimiento de una partícula esférica en un medio viscoso. Este análisis se extendió al comportamiento de sistemas de partículas de igual diámetro teórico, despreciando los efectos de las fuerzas de interacción de carácter electroquímico, por lo que se considera a las suspensiones como estabilizadas. A partir de esta base se discutieron los efectos hidrodinámicos y de interacción de los sistemas de partículas durante el proceso de sedimentación apoyándose en la literatura técnica existente, de lo que se desprendió la existencia de una reducción de velocidad del sistema de partículas respecto de la velocidad de la partícula única, lo que se explica en los párrafos siguientes, donde se analiza y discute el comportamiento de suspensiones compuestas por grupos de partículas cuyos diámetros representativos son distintos entre sí, deteniéndose en el caso de suspensiones conformadas por sistemas de partículas de tres diámetros diferentes o trimodal.

De esta discusión se desprende la importancia de los distintos fenómenos mecánicos que tienen lugar durante la sedimentación de sistemas de partículas, cuyas velocidades son distintas entre sí, ya que durante este proceso existen choques entre ellas desviándolas de sus trayectorias de flujos, a lo que se suma, el contraflujo de fluido respecto al movimiento del sentido de las partículas generado por el principio de conservación de la masa. Además, se deben considerar los efectos de capa límite de fluido asociado a las partículas y su ruptura, la que da lugar a la formación de estelas de arrastre y la aparición de fuerzas de interacción hidrodinámicas. Todo lo anteriormente indicado, conduce a que las velocidades representativas de los sistemas de las partículas presentes en dicha suspensión trimodal sean menores a las velocidades que alcanzaría cada sistema de partículas en forma separada sin interacción con los otros. Esto se extiende a los sistemas monomodales, ya que físicamente no existe un sistema de partículas de diámetro único.

Se desarrollo una revisión de la literatura técnica relativa al tema, deteniéndose en el concepto de factor de corrección de velocidad de sedimentación de sistemas de partículas multimodales y

Conclusiones

los distintos modelos de carácter físico, semi-empírico y empírico, así como su fundamentación científica. Cabe indicar que el hecho de considerar un campo centrífugo, no influye en los efectos descritos, ya que es una herramienta tecnológica que permite incrementar la fuerza que impulsa el movimiento de las partículas. Lo anteriormente mencionado es en extremo relevante en el caso que el sistema de partículas sea del orden micrométrico respecto de sus diámetros, el único elemento a tener en cuenta es que este campo de lugar a distintos regímenes de escurrimiento para el sistema de partículas. Lo que debe ser evitado a toda costa en beneficio de la medición.

Se realizó un exhaustivo análisis del procedimiento de la preparación de las suspensiones por separado y de su mezcla que permitió la obtención de la suspensión trimodal, así como de sus propiedades. A esto se sumó la descripción de los distintos equipos utilizados en la preparación de la suspensión, incluyendo los equipos y la metodología de dispersión de las partículas en la suspensión. A esto siguió una discusión de los mecanismos de control empleados para determinar la eficacia de la dispersión y la detección de la velocidad de los sistemas de partículas empleados para conformar la suspensión trimodal durante la medición.

Se desarrolló un análisis de la modelación propuesta por Brauer & Thiele respecto de la evaluación del comportamiento de la velocidad de sedimentación para una suspensión trimodal de partículas, para lo cual se utilizaron los datos experimentales obtenidos, a los que se le aplicó un análisis estadístico. Este análisis entregó resultados contrapuestos, los que para dos sistemas de partículas presentes en la celda de sedimentación entregan resultados satisfactorios que apoyan al modelo de Brauer & Thiele. Sin embargo, para el tercer sistema de partículas, el de mayor diámetro relativo, las mediciones divergen del modelo analizado. Estos aspectos fueron discutidos en detalle en el capítulo de análisis y discusión de los resultados.

Como conclusión general se puede indicar que el modelo propuesto por Brauer & Thiele no fue posible de validar, ya que, si bien presenta una aplicabilidad parcial para los sistemas de partícula de menor tamaño, no se cumple para el sistema de partículas de mayor tamaño relativo. Lo anterior se puede deber, como se indicó en el capítulo de análisis y discusión de los resultados, a restricciones del modelo mismo, como lo sería la relación de diámetro entre las partículas que conforman el sistema y a la pequeña cantidad de datos que existen de ese tamaño relativo durante

Conclusiones

la medición, ya que la velocidad de este sistema de partícula superaba nueve veces a la velocidad del sistema de diámetro intermedio y cincuenta y seis veces a la velocidad de menor diámetro. Lo anterior indica la existencia de fuertes interacciones hidrodinámicas. Confirma esta conclusión el hecho de que una vez que el sistema de partículas de mayor diámetro sedimentó completamente quedaron presentes las partículas de diámetros intermedio y menor, siendo la velocidad de las primeras mayores en 6 veces a la de menor diámetro. Lo que se reflejó en una adecuada representación del modelo para este caso. Lamentablemente no se contaba con otros datos experimentales que pudieran emplearse como respaldo de lo realizado. No obstante, la metodología empleada es satisfactoria y la razón por la cual no fue posible validar este modelo, se fundamenta de acuerdo al principio planteado por la Navaja de Ockham, en que la alta velocidad de giro de la maquina requerido para impulsar las partículas de menor diámetro, impuso una condición de velocidad tal a las partículas de mayor diámetro que dio lugar a un número exiguo de puntos de medición y la aparición de fuertes fenómenos hidrodinámico.

REFERENCIAS

- Bernhardt, C. (1994). *Particle Size Analysis, Classification and sedimentation methods*. Freiberg: springer-science+business media, b.v.
- Brauer, H., & Thiele, H. (1973). Bewegung von Partikelschwärmen. *Chem. Ing. Techn*, S.909-912.
- Detloff, T. (2003). „*Optische Konzentrationsmessung zur Partikelgrößenanalyse mittels ortsauflösender Fotozentrifuge*“. Dresden: Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik.
- G. Salinas-Salas, M. S. (2005). *Application of a Photometric Method to Detect Size Distribution of Micro Particles*. Obtenido de scielo.conicyt.cl: <https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642005000400010&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0718-0764. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642005000400010>.
- Karl Schwister, V. L. (2014). *Verfahrenstechnik für Ingenieure*. Leipzig: Carl Hanser.
- Luna Vàsquez, I. E. (2016). “*Determinación de la precisión a partir de estándares industriales de una centrífuga analítica shimadzu sa-cp3*”. Curicò.
- Martínez Oviedo, G. A. (2019). *Validación experimental del factor de reducción de velocidad de sedimentación de Brauer & Kriegel para un sistema bimodal de partículas de orden micrométrico con relación de tamaño 3:1*. Curicó.
- Salinas-Salas, G. E. (2007). *Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen*. Dresden.
- Schubert, H. (2003). *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik*. Hannover: WILEY-VCH.

Referencias

Stieß, M. (2009). *Mechanische Verfahrenstechnik-Partikeltechnologie 1*. Berlin: Springer.

Frömer D. (1998). Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten von Erythrozyten im Gravitations- und Zentrifugalfeld Dissertation; Humboldt Universität

Ripperger S., Salinas-Salas G., Stintz M., Wessely B. (2002). Untersuchung der Sedimentation von nanoskaligen Partikeln Zentrifugalfeld F & S (Filterieren und Separieren), S.230-236

Voigt T. (2001). Experimentelle Untersuchungen zum Verhalten stabiler und destabilisierter Siliziumdioxid Suspensionen im Gravitations- und Zentrifugalkraftfeld Großer Beleg; Technische Universität Dresden

Salinas-Salas G. (2007). Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen, Dissertation; Technische Universität Dresden

ANEXOS

A.- DATOS SUMINISTRADOS POR LA CENTRIFUGA SHIMADZU SA-CP3

A1 Datos sistema monomodal Geltech 201

Tabla 0.1 Datos del ensayo monomodal Geltech 201. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de MVT-TU Dresden

Tiempo (s)	Diámetro (μm)	Extinción relativa	q3 (%)	Q3(%)
0		97,7		
10	1,917	95,5	1,23	100,00
20	1,356	93,8	1,99	100,33
30	1,107	92,2	1,75	100,45
40	0,959	91,2	2,48	100,57
50	0,857	90,1	2,21	100,67
60	0,783	89,3	2,61	100,58
70	0,725	88,5	3,02	100,47
80	0,678	87,7	2,99	100,35
90	0,639	87,0	4,30	100,23
100	0,606	86,1	4,23	100,06
110	0,578	85,3	4,63	99,89
120	0,553	84,5	5,03	99,70
130	0,532	83,7	5,43	99,50
140	0,512	82,9	5,84	99,28
150	0,495	82,1	5,46	99,05
160	0,479	81,4	6,64	98,83
170	0,465	80,6	7,05	98,56
180	0,452	79,8	7,45	98,28
190	0,440	79,0	7,85	97,98
200	0,429	78,2	7,22	97,67
210	0,418	77,5	8,66	97,37
220	0,409	76,7	9,06	97,03
230	0,400	75,9	9,46	96,66
240	0,391	75,1	9,86	96,28
250	0,383	74,3	10,27	95,89
260	0,376	73,5	10,67	95,47
270	0,369	72,7	11,07	95,04
280	0,362	71,9	11,48	94,60
290	0,356	71,1	11,88	94,14
300	0,350	70,3	12,28	93,66
310	0,344	69,5	12,68	93,17
320	0,339	68,7	13,09	92,66

Anexos

330	0,334	67,9	11,80	92,13
340	0,329	67,2	13,89	91,66
350	0,324	66,4	12,51	91,10
360	0,320	65,7	14,70	90,60
370	0,315	64,9	13,21	90,01
380	0,311	64,2	15,50	89,47
390	0,307	63,4	13,92	88,85
400	0,303	62,7	14,27	88,29
410	0,299	62,0	14,62	87,72
420	0,296	61,3	14,97	87,13
430	0,292	60,6	17,52	86,53
440	0,289	59,8	15,68	85,83
450	0,286	59,1	13,74	85,20
460	0,283	58,5	16,38	84,64
470	0,280	57,8	16,74	83,98
480	0,277	57,1	17,09	83,31
490	0,274	56,4	19,93	82,63
500	0,271	55,6	17,79	81,82
510	0,268	54,9	20,74	81,11
520	0,266	54,1	18,50	80,28
530	0,263	53,4	21,54	79,53
540	0,261	52,6	21,95	78,67
550	0,258	51,8	19,56	77,78
560	0,256	51,1	22,75	77,00
570	0,254	50,3	20,26	76,08
580	0,252	49,6	23,56	75,27
590	0,250	48,8	23,96	74,32
600	0,247	48,0	24,36	73,36
610	0,245	47,2	27,86	72,38
620	0,243	46,3	28,31	71,26
630	0,242	45,4	31,96	70,12
640	0,240	44,4	38,96	68,84
650	0,238	43,2	42,86	67,27
660	0,236	41,9	46,86	65,55
670	0,234	40,5	54,36	63,67
680	0,232	38,9	62,06	61,48
690	0,231	37,1	66,47	58,99
700	0,229	35,2	70,97	56,32
710	0,228	33,2	75,58	53,46
720	0,226	31,1	80,29	50,43
730	0,224	28,9	85,09	47,20

Anexos

740	0,223	26,6	90,00	43,78
750	0,221	24,2	79,81	40,16
760	0,220	22,1	84,71	36,96
770	0,218	19,9	81,92	33,55
780	0,217	17,8	79,03	30,26
790	0,216	15,8	76,03	27,08
800	0,214	13,9	72,94	24,03
810	0,213	12,1	65,64	21,09
820	0,212	10,5	62,29	18,46
830	0,210	9,0	58,84	15,95
840	0,209	7,6	51,04	13,59
850	0,208	6,4	47,34	11,54
860	0,207	5,3	39,19	9,63
870	0,206	4,4	35,24	8,06
880	0,204	3,6	35,64	6,64
890	0,203	2,8	27,03	5,21
900	0,202	2,2	22,78	4,12
910	0,201	1,7	23,03	3,21
920	0,200	1,2	18,62	2,28
930	0,199	0,8	14,12	1,54
940	0,198	0,5	9,51	0,97
950	0,197	0,3	4,81	0,59
960	0,196	0,2	4,86	0,39
970	0,195	0,1	4,91	0,20
980	0,194	0,0	0,00	0,00

A2 Datos sistema monomodal Geltech 501

Tabla 0.2 Datos del ensayo monomodal Geltech 501. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de MVT-TU Dresden.

Tiempo (s)	Diámetro (μm)	Extinción relativa	q3 (%)	Q3(%)
0		99,2		
10	2,911	97,4	0,68	100,00
20	2,058	95,9	1,17	99,91
30	1,681	94,4	1,76	99,76
40	1,455	92,8	2,12	99,54
50	1,302	91,3	2,77	99,27
60	1,188	89,7	3,08	98,92
70	1,100	88,2	3,55	98,53
80	1,029	86,7	3,76	98,07
90	0,970	85,3	4,50	97,60

Anexos

100	0,920	83,8	4,97	97,02
110	0,878	82,3	5,09	96,39
120	0,840	80,9	5,92	95,74
130	0,807	79,4	5,97	94,99
140	0,778	78,0	6,87	94,23
150	0,752	76,5	7,35	93,36
160	0,728	75,0	7,30	92,42
170	0,706	73,6	7,74	91,49
180	0,686	72,2	8,18	90,51
190	0,668	70,8	9,24	89,47
200	0,651	69,3	10,37	88,29
210	0,635	67,7	11,55	86,97
220	0,621	66,0	12,09	85,50
230	0,607	64,3	11,14	83,96
240	0,594	62,8	10,84	82,55
250	0,582	61,4	12,89	81,17
260	0,571	59,8	14,24	79,53
270	0,560	58,1	17,38	77,72
280	0,550	56,1	22,52	75,50
290	0,541	53,6	29,84	72,64
300	0,531	50,4	43,38	68,84
310	0,523	45,9	62,72	63,33
320	0,515	39,6	81,15	55,35
330	0,507	31,7	90,00	45,02
340	0,499	23,2	78,51	33,57
350	0,492	16,0	60,59	23,58
360	0,485	10,6	42,69	15,88
370	0,479	6,9	30,82	10,44
380	0,472	4,3	20,69	6,52
390	0,466	2,6	13,73	3,89
400	0,460	1,5	8,96	2,15
410	0,455	0,8	6,56	1,01
420	0,449	0,3	1,34	0,17

A3 Datos sistema monomodal Geltech 1501*Tabla 0.3 Datos del ensayo monomodal Geltech 1501. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de MVT-TU Dresden.*

Tiempo (s)	Diámetro (μm)	Extinción relativa	q3 (%)	Q3(%)
0		98,6		
10	4,851	94,3	2,91	100,00
20	3,430	89,5	4,04	99,09
30	2,801	85,6	6,58	97,82
40	2,426	81,1	9,04	95,76
50	2,170	76,3	11,76	92,93
60	1,980	71,2	15,00	89,24
70	1,834	65,7	14,49	84,54
80	1,715	61,1	31,06	80,01
90	1,617	52,4	88,20	70,28
100	1,534	30,3	90,00	42,65
110	1,463	9,9	38,66	14,45
120	1,400	1,9	2,63	2,34
130	1,345	1,4	0,57	1,52
140	1,297	1,3	1,22	1,34
150	1,253	1,1	0,00	0,96
160	1,213	1,1	0,69	0,96
170	1,177	1,0	0,74	0,74
180	1,143	0,9	0,78	0,51
190	1,113	0,8	0,00	0,27
200	1,085	0,8	0,86	0,27
210	1,059	0,7	0,00	0,00
220	1,034	0,7	0,00	0,00
230	1,012	0,7	0,00	0,00
240	0,990	0,7	0,00	0,00

A4 Datos del sistema trimodal*Tabla 0.4 Datos del ensayo trimodal. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de MVT-TU Dresden.*

Tiempo (s)	Diámetro (μm)	Extinción relativa	q3 (%)	Q3 (%) ²
0		100		
10	3,741818929	91,9	9,60	100,00
20	2,645865539	84,6	13,26	99,76
30	2,160340166	78,7	16,79	99,43
40	1,870909465	73,4	25,32	99,01

Anexos

50	1,673392297	67,2	23,50	98,38
60	1,527591181	62,5	16,56	97,79
70	1,41427462	59,7	11,60	97,38
80	1,322932769	58	18,57	97,09
90	1,247272976	55,6	9,52	96,63
100	1,183267041	54,5	13,39	96,39
110	1,128200857	53,1	12,57	96,06
120	1,080170083	51,9	9,11	95,74
130	1,037793847	51,1	9,84	95,51
140	1,000043174	50,3	2,64	95,27
150	0,966133493	50,1	9,89	95,20
160	0,935454732	49,4	12,03	94,96
170	0,907524393	48,6	12,76	94,66
180	0,88195518	47,8	5,06	94,34
190	0,858432136	47,5	5,33	94,21
200	0,836696149	47,2	5,60	94,08
210	0,816531832	46,9	11,76	93,94
220	0,797758476	46,3	8,20	93,65
230	0,780223182	45,9	6,42	93,44
240	0,763795591	45,6	6,70	93,28
250	0,748363786	45,3	4,65	93,11
260	0,733831067	45,1	7,25	93,00
270	0,720113389	44,8	5,01	92,82
280	0,70713731	44,6	12,99	92,69
290	0,694838331	44,1	2,69	92,37
300	0,683159545	44	9,34	92,30
315	0,666695449	43,5	10,78	92,07
330	0,651367068	42,95	7,18	91,80
345	0,63704956	42,6	12,85	91,62
360	0,623636488	42	7,81	91,30
375	0,611036472	41,65	8,13	91,10
390	0,599170557	41,3	7,25	90,90
405	0,58797012	41	7,52	90,72
420	0,577375196	40,7	7,79	90,53
435	0,567333122	40,4	5,38	90,34
450	0,557797432	40,2	8,34	90,20
465	0,548726951	39,9	11,48	90,00
480	0,540085042	39,5	14,81	89,71
495	0,531838984	39	18,32	89,34
510	0,523959452	38,4	18,87	88,88
525	0,516420074	37,8	16,18	88,41

Anexos

540	0,50919706	37,3	19,96	88,01
555	0,502268886	36,7	23,92	87,51
570	0,495616025	36	14,04	86,91
585	0,489220711	35,6	90,00	86,56
600	0,483066747	33,1	70,13	84,32
615	0,477139323	31,2	71,86	82,57
630	0,471424873	29,3	69,72	80,78
645	0,465910942	27,5	67,40	79,04
660	0,460586071	25,8	60,84	77,36
675	0,455439696	24,3	53,91	75,84
690	0,450462064	23	46,62	74,49
705	0,445644149	21,9	38,96	73,33
720	0,44097759	21	30,94	72,36
735	0,436454623	20,3	27,07	71,59
750	0,432068033	19,7	23,01	70,91
765	0,427811101	19,2	18,78	70,34
780	0,423677564	18,8	14,35	69,87
795	0,419661572	18,5	14,63	69,51
810	0,415757659	18,2	9,93	69,14
825	0,411960706	18	10,12	68,90
840	0,408265916	17,8	15,45	68,64
855	0,40466879	17,5	5,24	68,26
870	0,401165098	17,4	10,66	68,13
885	0,397750865	17,2	10,85	67,86
900	0,394422347	17	5,51	67,59
915	0,391176017	16,9	11,21	67,45
930	0,388008548	16,7	5,70	67,17
945	0,384916797	16,6	5,79	67,03
960	0,381897795	16,5	0,00	66,89
975	0,378948733	16,5	5,97	66,89
990	0,376066952	16,4	6,06	66,74
1005	0,373249932	16,3	6,15	66,59
1020	0,370495282	16,2	0,00	66,43
1035	0,367800735	16,2	6,33	66,43
1050	0,365164137	16,1	0,00	66,28
1065	0,362583439	16,1	6,52	66,28
1080	0,360056694	16	0,00	66,11
1095	0,357582049	16	6,70	66,11
1110	0,355157736	15,9	0,00	65,95
1125	0,352782072	15,9	6,88	65,95
1140	0,350453452	15,8	6,97	65,77

Anexos

1155	0,348170343	15,7	0,00	65,60
1170	0,345931282	15,7	7,15	65,60
1185	0,343734871	15,6	0,00	65,42
1200	0,341579772	15,6	7,34	65,42
1215	0,339464707	15,5	0,00	65,24
1230	0,337388451	15,5	7,52	65,24
1245	0,335349831	15,4	0,00	65,05
1260	0,333347725	15,4	7,70	65,05
1275	0,331381054	15,3	0,00	64,86
1290	0,329448787	15,3	7,88	64,86
1305	0,327549931	15,2	7,98	64,66
1320	0,325683534	15,1	0,00	64,46
1335	0,323848683	15,1	8,16	64,46
1350	0,322044498	15	0,00	64,26
1365	0,320270134	15	8,34	64,26
1380	0,31852478	14,9	0,00	64,05
1395	0,316807653	14,9	8,52	64,05
1410	0,315118	14,8	0,00	63,84
1425	0,313455097	14,8	8,70	63,84
1440	0,311818244	14,7	8,80	63,62
1455	0,31020677	14,6	0,00	63,40
1470	0,308620024	14,6	8,98	63,40
1485	0,307057381	14,5	0,00	63,18
1500	0,305518236	14,5	9,16	63,18
1515	0,304002007	14,4	0,00	62,95
1530	0,302508131	14,4	9,34	62,95
1545	0,301036063	14,3	0,00	62,72
1560	0,299585279	14,3	9,52	62,72
1575	0,298155269	14,2	0,00	62,48
1590	0,296745544	14,2	9,71	62,48
1605	0,295355627	14,1	0,00	62,24
1620	0,29398506	14,1	9,89	62,24
1635	0,292633397	14	9,98	61,99
1650	0,291300209	13,9	0,00	61,74
1665	0,289985077	13,9	10,16	61,74
1680	0,288687598	13,8	0,00	61,49
1695	0,28740738	13,8	0,00	61,49
1710	0,286144045	13,8	10,44	61,49
1725	0,284897224	13,7	10,53	61,23
1740	0,283666561	13,6	0,00	60,96
1755	0,282451709	13,6	10,71	60,96

Anexos

1770	0,281252334	13,5	0,00	60,70
1785	0,280068108	13,5	10,89	60,70
1800	0,278898716	13,4	0,00	60,43
1815	0,277743851	13,4	11,07	60,43
1830	0,276603214	13,3	0,00	60,15
1845	0,275476516	13,3	11,26	60,15
1860	0,274363475	13,2	0,00	59,87
1875	0,273263818	13,2	5,72	59,87
1890	0,272177277	13,15	5,76	59,73
1905	0,271103596	13,1	5,81	59,58
1920	0,270042521	13,05	5,86	59,44
1935	0,268993808	13	5,90	59,29
1950	0,267957219	12,95	5,95	59,14
1965	0,266932522	12,9	5,99	59,00
1980	0,265919492	12,85	6,04	58,85
1995	0,264917908	12,8	0,00	58,70
2010	0,263927558	12,8	0,00	58,70
2025	0,262948231	12,8	6,17	58,70
2040	0,261979726	12,75	6,22	58,54
2055	0,261021845	12,7	6,27	58,39
2070	0,260074394	12,65	6,31	58,23
2085	0,259137186	12,6	6,36	58,07
2100	0,258210037	12,55	6,40	57,91
2115	0,25729277	12,5	12,90	57,75
2130	0,256385208	12,4	12,99	57,43
2145	0,255487184	12,3	6,54	57,11
2160	0,25459853	12,25	6,59	56,95
2175	0,253719085	12,2	6,63	56,78
2190	0,252848691	12,15	6,68	56,62
2205	0,251987194	12,1	6,72	56,45
2220	0,251134443	12,05	6,77	56,28
2235	0,250290291	12	6,81	56,11
2250	0,249454595	11,95	6,86	55,94
2265	0,248627215	11,9	6,90	55,77
2280	0,247808012	11,85	6,95	55,60
2295	0,246996855	11,8	7,00	55,43
2310	0,246193611	11,75	7,04	55,25
2325	0,245398153	11,7	14,17	55,08
2340	0,244610356	11,6	14,26	54,72
2355	0,243830097	11,5	7,18	54,37
2370	0,243057258	11,45	7,22	54,19

Anexos

2385	0,242291722	11,4	7,27	54,01
2400	0,241533373	11,35	7,31	53,83
2415	0,240782101	11,3	7,36	53,64
2430	0,240037796	11,25	7,41	53,46
2445	0,239300351	11,2	7,45	53,27
2460	0,238569661	11,15	7,50	53,09
2475	0,237845624	11,1	7,54	52,90
2490	0,23712814	11,05	7,59	52,71
2505	0,236417109	11	15,27	52,52
2520	0,235712437	10,9	15,36	52,14
2535	0,235014028	10,8	7,72	51,76
2550	0,234321791	10,75	7,77	51,57
2565	0,233635635	10,7	15,63	51,37
2580	0,232955471	10,6	15,72	50,98
2595	0,232281214	10,5	15,81	50,59
2610	0,231612777	10,4	15,90	50,20
2625	0,230950078	10,3	16,00	49,80
2640	0,230293035	10,2	16,09	49,40
2655	0,229641569	10,1	8,09	49,00
2670	0,2289956	10,05	8,13	48,80
2685	0,228355051	10	24,54	48,59
2700	0,227719848	9,85	24,68	47,98
2715	0,227089917	9,7	8,27	47,37
2730	0,226465184	9,65	8,32	47,16
2745	0,225845579	9,6	16,72	46,95
2760	0,225231032	9,5	16,82	46,54
2775	0,224621475	9,4	25,36	46,12
2790	0,22401684	9,25	25,50	45,48
2805	0,223417061	9,1	17,09	44,85
2820	0,222822075	9	17,18	44,42
2835	0,222231816	8,9	25,91	43,99
2850	0,221646224	8,75	26,04	43,35
2865	0,221065237	8,6	26,18	42,70
2880	0,220488795	8,45	26,32	42,04
2895	0,219916839	8,3	17,64	41,39
2910	0,21934931	8,2	17,73	40,95
2925	0,218786153	8,1	26,73	40,50
2940	0,218227312	7,95	26,86	39,84
2955	0,21767273	7,8	36,00	39,17
2970	0,217122356	7,6	36,18	38,27
2985	0,216576135	7,4	27,27	37,37

Anexos

3000	0,216034017	7,25	27,41	36,69
3015	0,215495948	7,1	45,91	36,00
3030	0,214961881	6,85	46,14	34,86
3045	0,214431764	6,6	18,55	33,70
3060	0,213905551	6,5	18,64	33,24
3075	0,213383192	6,4	28,10	32,78
3090	0,212864642	6,25	28,23	32,08
3105	0,212349853	6,1	37,82	31,37
3120	0,211838782	5,9	38,01	30,43
3135	0,211331383	5,7	19,09	29,48
3150	0,210827613	5,6	19,19	29,00
3165	0,210327428	5,5	19,28	28,52
3180	0,209830786	5,4	19,37	28,04
3195	0,209337646	5,3	29,19	27,56
3210	0,208847967	5,15	29,33	26,83
3225	0,208361708	5	39,28	26,10
3240	0,207878829	4,8	39,47	25,12
3255	0,207399293	4,6	19,82	24,14
3270	0,20692306	4,5	19,91	23,64
3285	0,206450092	4,4	40,01	23,14
3300	0,205980353	4,2	40,19	22,15
3315	0,205513806	4	30,28	21,14
3330	0,205050414	3,85	30,42	20,39
3345	0,204590143	3,7	30,56	19,63
3360	0,204132958	3,55	30,69	18,87
3375	0,203678824	3,4	41,11	18,10
3390	0,203227708	3,2	41,29	17,08
3405	0,202779575	3	20,74	16,05
3420	0,202334395	2,9	20,83	15,53
3435	0,201892133	2,8	31,38	15,01
3450	0,201452759	2,65	31,51	14,23
3465	0,201016241	2,5	21,10	13,44
3480	0,200582549	2,4	21,19	12,91
3495	0,200151651	2,3	21,28	12,38
3510	0,199723519	2,2	21,37	11,85
3525	0,199298122	2,1	32,20	11,32
3540	0,198875432	1,95	32,33	10,52
3555	0,19845542	1,8	21,65	9,71
3570	0,198038058	1,7	21,74	9,17
3585	0,197623318	1,6	21,83	8,63
3600	0,197211173	1,5	21,92	8,08

Anexos

3615	0,196801596	1,4	11,01	7,54
3630	0,196394561	1,35	11,05	7,26
3645	0,19599004	1,3	11,10	6,99
3660	0,195588009	1,25	11,14	6,71
3675	0,195188441	1,2	22,38	6,43
3690	0,194791313	1,1	22,47	5,87
3705	0,194396599	1	0,00	5,31
3720	0,194004274	1	0,00	5,31
3735	0,193614315	1	11,37	5,31
3750	0,193226699	0,95	11,42	5,03
3765	0,192841401	0,9	11,46	4,74
3780	0,192458399	0,85	11,51	4,46
3795	0,192077669	0,8	11,55	4,17
3810	0,191699191	0,75	11,60	3,88
3825	0,191322941	0,7	11,64	3,59
3840	0,190948898	0,65	11,69	3,30
3855	0,19057704	0,6	0,00	3,01
3870	0,190207346	0,6	0,00	3,01
3885	0,189839795	0,6	11,83	3,01
3900	0,189474367	0,55	11,87	2,72
3915	0,189111041	0,5	11,92	2,42
3930	0,188749797	0,45	11,96	2,12
3945	0,188390615	0,4	12,01	1,82
3960	0,188033476	0,35	12,05	1,52
3975	0,187678361	0,3	0,00	1,22
3990	0,18732525	0,3	0,00	1,22
4005	0,186974124	0,3	12,19	1,22
4020	0,186624966	0,25	12,24	0,92
4035	0,186277756	0,2	12,28	0,61
4050	0,185932477	0,15	12,33	0,31
4065	0,185589112	0,1	0,00	0,00
4080	0,185247641	0,1	0,00	0,00
4095	0,184908048	0,1	0,00	0,00
4110	0,184570316	0,1	0,00	0,00
4125	0,184234428	0,1	0,00	0,00
4140	0,183900368	0,1	0,00	0,00
4155	0,183568117	0,1	0,00	0,00
4170	0,183237661	0,1	0,00	0,00
4185	0,182908984	0,1	0,00	0,00
4200	0,182582068	0,1	0,00	0,00
4215	0,1822569	0,1	0,00	0,00

4230	0,181933462	0,1	0,00	0,00
4245	0,18161174	0,1	0,00	0,00
4260	0,181291719	0,1	0,00	0,00
4275	0,180973384	0,1	0,00	0,00
4290	0,18065672	0,1	0,00	0,00
4305	0,180341713	0,1	0,00	0,00
4320	0,180028347	0,1	0,00	0,00
4335	0,17971661	0,1	0,00	0,00

B.- MEMORIA DE CÁLCULO

B1 Cálculo de velocidad de sedimentación del sistema monomodal Geltech 201

$$\rho_p = 2.135 \frac{kg}{m^3} \quad \text{Densidad de la partícula}$$

$$\rho_f = 997,08 \frac{kg}{m^3} \quad \text{Densidad del fluido}$$

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2} \quad \text{Aceleración de gravedad}$$

$$w = 125,66 \frac{1}{s} \quad \text{Velocidad angular}$$

$$r = 84 \text{ mm} \quad \text{Radio de giro}$$

$$c = 0,0000280243 \quad \text{Concentración volumétrica}$$

$$\mu_f = 0,894 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad \text{Viscosidad del fluido}$$

$$x = 0,223 \mu\text{m} \quad \text{Diámetro representativo}$$

$$k_\psi = 1 \quad \text{Factor de esfericidad}$$

Anexos

$$z = \frac{w^2 \cdot r}{g} = 135,209$$

Factor de amplificación de la aceleración

$$v(\infty) = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot x^2 \cdot z \cdot g}{18 \cdot \mu_f} = 4,664 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s}$$

Velocidad terminal

$$R_e = \frac{v(\infty) \cdot x \cdot \rho_f}{\mu_f} = 1,16 \cdot 10^{-6}$$

Numero de Reynolds

$$n = 4,65$$

Exponente de Richardson & Zaki

$$f_c = (1 - c)^n = 0,99987$$

Factor de corrección de velocidad de sedimentación de Richardson & Zaki

$$v(\infty)_{mc0,2} = k_\psi \cdot f_c \cdot v(\infty) = 4,664 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s}$$

Velocidad terminal corregida

B2 Cálculo de velocidad de sedimentación del sistema monomodal Geltech 501

$$\rho_p = 2.135 \frac{kg}{m^3}$$

Densidad de la partícula

$$\rho_f = 997,08 \frac{kg}{m^3}$$

Densidad del fluido

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

Aceleración de gravedad

$$w = 125,66 \frac{1}{s}$$

Velocidad angular

Anexos

$$r = 84 \text{ mm}$$

Radio de giro

$$c = 0,0003511647$$

Concentración volumétrica

$$\mu_f = 0,894 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Viscosidad del fluido

$$x = 0,507 \text{ } \mu\text{m}$$

Diámetro representativo

$$k_\psi = 1$$

Factor de esfericidad

$$z = \frac{w^2 \cdot r}{g} = 135,209$$

Factor de amplificación de la aceleración

$$v(\infty) = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot x^2 \cdot z \cdot g}{18 \cdot \mu_f} = 2,411 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad terminal

$$Re = \frac{v(\infty) \cdot x \cdot \rho_f}{\mu_f} = 1,363 \cdot 10^{-5}$$

Numero de Reynolds

$$n = 4,65$$

Exponente de Richardson & Zaki

$$f_c = (1 - c)^n = 0,998$$

Factor de corrección de velocidad de sedimentación de Richardson & Zaki

$$v(\infty)_{mc0,5} = k_\psi \cdot f_c \cdot v(\infty) = 2,407 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad terminal corregida

B3 Cálculo de velocidad de sedimentación del sistema monomodal Geltech 1501

$\rho_p = 2.135 \frac{kg}{m^3}$	Densidad de la partícula
$\rho_f = 997,08 \frac{kg}{m^3}$	Densidad del fluido
$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$	Aceleración de gravedad
$w = 125,66 \frac{1}{s}$	Velocidad angular
$r = 84 \text{ mm}$	Radio de giro
$c = 0,000312586$	Concentración volumétrica
$\mu_f = 0,894 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	Viscosidad del fluido
$x = 1,617 \mu\text{m}$	Diámetro representativo
$k_\psi = 1$	Factor de esfericidad
$z = \frac{w^2 \cdot r}{g} = 135,209$	Factor de amplificación de la aceleración
$v(\infty) = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot x^2 \cdot z \cdot g}{18 \cdot \mu_f} = 2,452 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s}$	Velocidad terminal
$Re = \frac{v(\infty) \cdot x \cdot \rho_f}{\mu_f} = 4,423 \cdot 10^{-4}$	Numero de Reynolds

Anexos

$$n = 4,65$$

Exponente de Richardson & Zaki

$$f_c = (1 - c)^n = 0,999$$

Factor de corrección de velocidad de sedimentación de Richardson & Zaki

$$v(\infty)_{mc1,5} = k_\psi \cdot f_c \cdot v(\infty) = 2,449 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s}$$

Velocidad terminal corregida

B4 Cálculo de velocidad de sedimentación del sistema trimodal

$$\rho_p = 2.135 \frac{kg}{m^3}$$

Densidad de la partícula

$$\rho_f = 997,08 \frac{kg}{m^3}$$

Densidad del fluido

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

Aceleración de gravedad

$$w = 125,66 \frac{1}{s}$$

Velocidad angular

$$r = 84 \text{ mm}$$

Radio de giro

$$c_{0,2} = 0,00187009$$

Concentración volumétrica para el sistema Geltech 201 presente en el sistema trimodal

$$c_{0,5} = 0.00093891$$

Concentración volumétrica para el sistema Geltech 501 presente en el sistema trimodal

Anexos

$$c_{1,5} = 0.000468165$$

Concentración volumétrica para el sistema Geltech 1501 presente en el sistema trimodal

$$c_t = 0.003$$

Concentración Volumétrica total del sistema trimodal

$$\mu_f = 0,894 \cdot 10^{-3} Pa \cdot s$$

Viscosidad del fluido

$$x_{0,2} = 0,215 \mu m$$

Diámetro representativo del sistema Geltech 201

$$x_{0,5} = 0,489 \mu m$$

Diámetro representativo del sistema Geltech 501

$$x_{1,5} = 1,871 \mu m$$

Diámetro representativo del sistema Geltech 1501

$$k_\psi = 1$$

Factor de esfericidad

$$z = \frac{w^2 \cdot r}{g} = 135,209$$

Factor de amplificación de la aceleración

$$v(\infty)_{0,2} = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot x_{0,2}^2 \cdot z \cdot g}{18 \cdot \mu_f} = 4,336 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s}$$

Velocidad terminal para el diámetro representativo de Geltech 201

$$v(\infty)_{0,5} = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot x_{0,5}^2 \cdot z \cdot g}{18 \cdot \mu_f} = 2,243 \cdot 10^{-5} \frac{m}{s}$$

Velocidad terminal para el diámetro representativo de Geltech 201

$$v(\infty)_{1,5} = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot x_{1,5}^2 \cdot z \cdot g}{18 \cdot \mu_f} = 3,283 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s}$$

Velocidad terminal para el diámetro representativo de Geltech 201

Anexos

$$R_{e0,2} = \frac{v(\infty)_{0,2} \cdot x_{0,2} \cdot \rho_f}{\mu_f} = 1,04 \cdot 10^{-6}$$

Numero de Reynolds para diámetro representativo del sistema Geltech 201 para el sistema trimodal

$$R_{e0,5} = \frac{v(\infty)_{0,5} \cdot x_{0,5} \cdot \rho_f}{\mu_f} = 1,223 \cdot 10^{-5}$$

Numero de Reynolds para diámetro representativo del sistema Geltech 501 para el sistema trimodal

$$R_{e1,5} = \frac{v(\infty)_{1,5} \cdot x_{1,5} \cdot \rho_f}{\mu_f} = 6,852 \cdot 10^{-4}$$

Numero de Reynolds para diámetro representativo del sistema Geltech 1501 para el sistema trimodal

$$n = 4,65$$

Exponente de Richardson & Zaki

$$f_c = (1 - c_t)^n = 0,984852$$

Factor de corrección de velocidad de sedimentación de Richardson & Zaki

$$v(\infty)_{tc0,2} = k_\psi \cdot f_c \cdot v(\infty)_{0,2} = 4,27 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s}$$

Velocidad terminal corregida para el diámetro representativo de Geltech 201

$$v(\infty)_{tc0,5} = k_\psi \cdot f_c \cdot v(\infty)_{0,5} = 2,209 \cdot 10^{-5} \frac{m}{s}$$

Velocidad terminal corregida para el diámetro representativo de Geltech 501

$$v(\infty)_{tc1,5} = k_\psi \cdot f_c \cdot v(\infty)_{1,5} = 3,234 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s}$$

Velocidad terminal corregida para el diámetro representativo de Geltech 1501

C.- FACTORES DE CORRECCIÓN DE VELOCIDAD

C1 Factor de corrección de velocidad de Bauer & Thiele

$c_{0,2} = 0,00187009$	Concentración volumétrica para el sistema Geltech 201 presente en el sistema trimodal
$c_{0,5} = 0.00093891$	Concentración volumétrica para el sistema Geltech 501 presente en el sistema trimodal
$c_{1,5} = 0.000468165$	Concentración volumétrica para el sistema Geltech 1501 presente en el sistema trimodal
$c_t = 0.003$	Concentración Volumétrica total del sistema trimodal
$\rho_j = 1$	Fracción de densidad
$n = 3$	Numero de diámetros representativos en el sistema
$x_{0,2} = 0,215 \mu m$	Diámetro representativo del sistema Geltech 201
$x_{0,5} = 0,489 \mu m$	Diámetro representativo del sistema Geltech 501
$x_{1,5} = 1,871 \mu m$	Diámetro representativo del sistema Geltech 1501

Anexos

$$x_n = x_{0,2} = 0,215 \mu m$$

Diámetro menor del sistema

$$x_{r0,2} = \frac{x_{0,2}}{x_n} = 1$$

Fracción de diámetro para Sistema Geltech 201

$$x_{r0,5} = x_2 = \frac{x_{0,5}}{x_n} = 2,274$$

Fracción de diámetro para Sistema Geltech 501

$$x_{r1,5} = x_1 = \frac{x_{1,5}}{x_n} = 8,702$$

Fracción de diámetro para Sistema Geltech 1501

Factor de contraflujo para el diámetro representativo Geltech 201

$$k_{g0,2} = \frac{1}{1 + \frac{1}{(1 - c_t) \cdot \left(\frac{x_{r0,2}^2 \cdot \rho_j}{(c_{0,2} \cdot x_{r0,2}^2 \cdot \rho_j) + (c_{0,5} \cdot x_{r0,5}^2 \cdot \rho_j) + (c_{1,5} \cdot x_{r1,5}^2 \cdot \rho_j)} - 1 \right)}} = 0,958$$

Factor de turbulencia para el diámetro representativo Geltech 201

$$k_{t0,2} = \frac{1 - c_t}{1 + \frac{1,05 \cdot \frac{x_{r0,2}}{x_1}}{\sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(1 + \frac{x_2}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot n^2}}{c_t \cdot \left(1 + \frac{x_2}{x_1}\right)^2 \cdot \sin \frac{\pi}{n}}\right)^2 + \frac{x_{r0,2} - (x_{r1,5} + x_{r0,5} + x_{r0,2})}{x_{r0,2} \cdot 2 \cdot (n - 1)}}}}$$

$$k_{t0,2} = 0.994264$$

Factor de contraflujo para el diámetro representativo Geltech 501

Anexos

$$k_{g0,5} = \frac{1}{1 + \frac{1}{(1 - c_t) \cdot \left(\frac{x_{r0,5}^2 \cdot \rho_j}{(c_{0,2} \cdot x_{r0,2}^2 \cdot \rho_j) + (c_{0,5} \cdot x_{r0,5}^2 \cdot \rho_j) + (c_{1,5} \cdot x_{r1,5}^2 \cdot \rho_j)} - 1 \right)}} = 0,992$$

Factor de turbulencia para el diámetro representativo Geltech 201

$$k_{t0,2} = \frac{1 - c_t}{1 + \frac{1,05 \cdot \frac{x_{r0,5}}{x_1}}{\sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(1 + \frac{x_2}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot n^2}}{c_t \cdot \left(1 + \frac{x_2}{x_1}\right)^2 \cdot \sin \frac{\pi}{n}}\right)^2 + \frac{x_{r0,5} - (x_{r1,5} + x_{r0,5} + x_{r0,2})}{x_{r0,5} \cdot 2 \cdot (n - 1)}}}}$$

$$k_{t0,2} = 0.9913329$$

Factor de contraflujo para el diámetro representativo Geltech 1501

$$k_{g1,5} = \frac{1}{1 + \frac{1}{(1 - c_t) \cdot \left(\frac{x_{r1,5}^2 \cdot \rho_j}{(c_{0,2} \cdot x_{r0,2}^2 \cdot \rho_j) + (c_{0,5} \cdot x_{r0,5}^2 \cdot \rho_j) + (c_{1,5} \cdot x_{r1,5}^2 \cdot \rho_j)} - 1 \right)}} = 0,999$$

Factor de turbulencia para el diámetro representativo Geltech 201

$$k_{t0,2} = \frac{1 - c_t}{1 + \frac{1,05 \cdot \frac{x_{r1,5}}{x_1}}{\sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(1 + \frac{x_2}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot n^2}}{c_t \cdot \left(1 + \frac{x_2}{x_1}\right)^2 \cdot \sin \frac{\pi}{n}}\right)^2 + \frac{x_{r1,5} - (x_{r1,5} + x_{r0,5} + x_{r0,2})}{x_{r1,5} \cdot 2 \cdot (n - 1)}}}}$$

$$k_{t0,2} = 0.9767868$$

C2 Factor de corrección de velocidad experimental

Factor de corrección para sistemas de partículas Geltech 201

$$K_{e0,2} = \frac{v^{(\infty)}_{tc0,2}}{v^{(\infty)}_{mc0,2}} = 0,916$$

Factor de corrección para sistemas de partículas Geltech 501

$$K_{e0,5} = \frac{v^{(\infty)}_{tc0,5}}{v^{(\infty)}_{mc0,5}} = 0,918$$

Factor de corrección para sistemas de partículas Geltech 1501

$$K_{e1,5} = \frac{v^{(\infty)}_{tc1,5}}{v^{(\infty)}_{mc1,5}} = 1,32$$

D.- ERROR RELATIVO PORCENTUAL

Error relativo porcentual para el sistema Geltech 201

$$\varepsilon_{0,2} = \frac{(k_{g0,2} \cdot k_{t0,2}) - k_{e0,2}}{(k_{g0,2} \cdot k_{t0,2})} \cdot 100 = 3,852$$

Error relativo porcentual para el sistema Geltech 201

$$\varepsilon_{0,5} = \frac{(k_{g0,5} \cdot k_{t0,5}) - k_{e0,5}}{(k_{g0,5} \cdot k_{t0,5})} \cdot 100 = 6,667$$

Error relativo porcentual para el sistema Geltech 201

$$\varepsilon_{1,5} = \frac{(k_{g1,5} \cdot k_{t1,5}) - k_{e1,5}}{(k_{g1,5} \cdot k_{t1,5})} \cdot 100 = 35,253$$