

# ÍNDICE GENERAL

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

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

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

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

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

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

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

## ÍNDICE DE TABLAS

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

Tabla D.3 Especificaciones técnicas agitador magnético RH digital. Fuente: [www.ika.com](http://www.ika.com) ..60