

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

**“Estudio del Fenómeno de Sedimentación en el
Tratamiento del Agua en Tres Casos de Estudio”**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

Presentada por:

Juan Carlos Vega Guzmán

José Alfredo Villacreses Zambrano



GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2006

AGRADECIMIENTO

Antes que todo queremos agradecer la ayuda de ese ser supremo que es Dios.

Nuestros sinceros agradecimientos, a los profesores, ya que de ellos recibimos las mejores enseñanzas, las cuales nos dieron impulso en nuestra carrera. A todos nuestros compañeros, ya que con ellos compartimos nuestra vida estudiantil.

Agradecemos de todo corazón a nuestro director de tesis Dr. David Matamoros, ya que con paciencia y dedicación supo guiarnos a lo largo de la realización de nuestra tesis, para conseguir nuestros objetivos deseados.

También agradecemos a la planta de hormigones Holcim por permitimos tomar las muestras necesarias para el objetivo de nuestra investigación.

DEDICATORIA

Con todo mi amor para mis queridos padres, **LEÓN MANUEL VEGA BORJA Y DOLORES PIEDAD GUZMÁN CAMACHO**. Ya que ellos siempre estuvieron apoyándome en los momentos mas duros de mi vida, para poder seguir adelante en mis propósitos.

A todos mis hermanos ya que con ellos compartí muchos momentos inolvidables, y que llevare siempre presente. A una persona muy especial dentro de mi vida personal Cinthia Esther Camacho Sánchez.

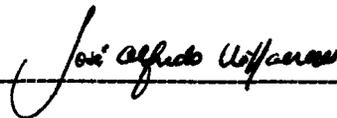
A todas las personas que colaboraron con la realización de la presente investigación.



Juan Carlos Vega Guzmán

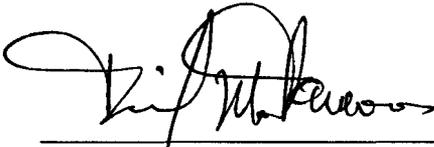
DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mi Madre, por su apoyo, por los consejos en los momentos más difíciles y por ser mi constante inspiración, a mi Padre por ser mi guía y ejemplo a seguir; a mi Hermano por creer en mi, a mi Hermana por su apoyo incondicional. A mis profesores, en especial al Dr. David Matamoros por permitir que esta tesis se haga realidad, gracias a sus conocimientos, ideas, y confianza depositada en nosotros. Finalmente a Dios, por haberme permitido tener cerca a tantas personas especiales que de alguna manera me han ayudado a creer en mis ideas y a cumplir las metas que me he trazado en este camino que he empezado a recorrer.



José Alfredo Villacreses Zambrano

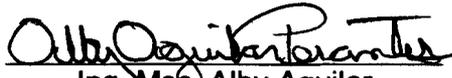
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Dr. David Matamoros
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Msc. Manuel Gómez de la Torre Gómez
VOCAL PRINCIPAL

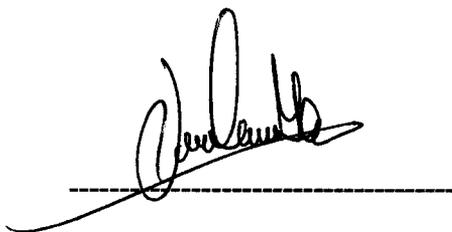


Ing. Msc. Alby Aguilar
VOCAL PRINCIPAL

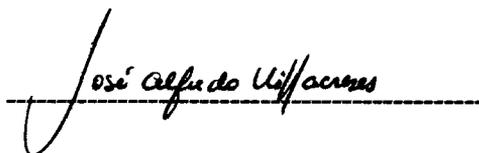
DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesis, corresponden exclusivamente a los autores, y el patrimonio intelectual de la tesis de Grado corresponderá a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL).



Juan Carlos Vega Guzmán



José Alfredo Vilacreses Zambrano

RESUMEN

Para el análisis de la sedimentación en el agua, se procede analizar tres diferentes tipos de muestras de agua "cruda" para tratamiento, una muestra de agua preparada con suelo, agua del lavado de camiones mezcladores de concreto, y una muestra de agua proveniente del río Daule cerca de la estación de tratamiento de agua potable " La Toma".

En el diseño de Sedimentadores, es necesario realizar análisis de sedimentabilidad del agua a tratar. Se tuvo que estudiar con detalle cada tipo de muestra, mediante la elaboración de curvas de sedimentación. A partir de dichas curvas se obtuvieron parámetros unitarios referenciales a ser utilizados en el futuro diseño de sedimentadores.

El agua residual "preparada" demostró tener un comportamiento similar a las otras muestras analizadas (agua del río Daule y el Agua de lavado de vehículos hormigoneros). Las curvas de sedimentación probaron ser útiles para determinar el área de sedimentación. Se determino que una concentración de sólidos alta resulta en una mayor área necesaria para la sedimentación.

Adicionalmente, hubo necesidad de usar Sulfato de aluminio como floculante en las muestras de agua del río como en la de agua residual preparada. La selección de la dosis optima se realizo usando también las columnas de sedimentación.

Este proyecto no hubiera sido posible realizarlo sin la ayuda de otras personas que colaboraron para el desarrollo de la tesis. En Ecuador se han realizado investigaciones de este tipo, pero no tan exhaustivamente. Adicionalmente, se decidió tomar este tema porque en la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra no se posee un esquema elaborado de cómo realizar este tipo de ensayos. Normalmente, la bibliografía recomienda hacer estos ensayos con equipos mas sofisticados como columnas de 2.5 m de altura en adelante. Sin embargo, se ha ajustado a columnas de sedimentación más pequeñas para su mejor manejo en el laboratorio. Otros factores que incidieron en la selección de columnas pequeñas fueron las condiciones de logística, espacio y financiamiento,

La presente investigación es solo el primer paso que se ha dado en el campo de la sedimentación en la FICT, ya que existen diversos temas que pueden ser derivados en estudio de este fenómeno. Este es un tema muy importante que incide en el diseño de plantas de tratamiento de agua y por ende en los costos relacionados con el tratamiento del agua.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	01
ÍNDICE GENERAL.....	03
NOTACION.....	07
NOMENCLATURA.....	09
ÍNDICE DE FIGURAS.....	10
INDICE DE TABLAS.....	14
INDICE DE FOTOS.....	15
 CAPITULO 1.	
1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 Antecedentes.....	17
1.2 Justificación.....	18
1.3 Objetivos.....	18
1.3.1 Generales.....	18
1.3.2 Específicos.....	18
1.4 Estructura de la tesis.....	19
 CAPITULO 2.	
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	21
2.1 Teoría de la Sedimentación.....	22

2.1.1	Conceptos Generales.....	22
2.1.2	Sedimentación de partículas discretas.....	23
2.1.3	Sedimentación de partículas floculentas.....	23
2.1.4	Sedimentación por caída libre e interferida.....	24
2.2	Expresiones de velocidad de sedimentación.....	24
2.2.1	Partículas discretas con caída libre.....	24
2.2.2	Sedimentación de partículas floculentas.....	33
2.3	Factores que influyen en el proceso de sedimentación.....	38
2.3.1	Calidad del agua.....	38
2.3.2	Condiciones hidráulicas.....	40
2.3.3	Factores externos.....	43
2.4	Clasificación de Sedimentadores.....	44
2.4.1	Sedimentadores y decantadores estáticos.....	44
2.4.2	Decantadores dinámicos.....	55
2.4.3	Componentes de una unidad.....	55
2.4.4	Tipos de Unidades Dinámicas.....	56
2.4.5	Decantadores laminares.....	66
2.4.6	Tipos de Sedimentadores Laminares.....	69
2.5	Teoría Columnas de Sedimentación.....	74
2.5.1	Etapas de las Columnas de Sedimentación.....	74
2.5.2	Criterios Generales.....	80
2.5.3	Columnas de Sedimentación.....	81

2.5.4 Selección del Método de Análisis de esta Investigación....84

CAPITULO 3.

3. CASOS DE ESTUDIOS.....	89
3.1 Generalidades.....	90
3.2 Caso de Estudio 1: Agua Proveniente del Río Guayas.....	94
3.2.1 Preparación de la Muestra y Propósito.....	94
3.2.2 Ensayos Realizados sin Utilizar Floculante.....	96
3.2.3 Ensayos Realizados Usando Floculante.....	97
3.2.4 Resultados.....	98
3.3 Caso de Estudio 2: Agua Proveniente del Lavado de camiones Mezcladores de Hormigón.....	108
3.3.1 Sitio Escogido para la toma de la Muestra.....	108
3.3.2 Implementación del Ensayo.....	110
3.3.3 Ensayos Realizados.....	110
3.3.4 Resultados.....	112
3.4 Caso de Estudio 3: Agua Río Daule cerca de la Estación la Toma.....	113
3.4.1 Selección del sitio del muestreo.....	113
3.4.2 Preparación de la Muestra.....	113
3.4.3 Ensayos de Concentración Original sin Floculante.....	114
3.4.4 Ensayos de Concentración Original con Floculante.....	115
3.4.5 Ensayos a diferentes concentraciones con dosis óptima de floculante.....	117
3.4.6 Resultados.....	118

CAPITULO 4.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	121
4.1 Determinación del Área de Sedimentación Mínima respecto a un caudal unitario.....	122
4.2 Análisis de Curvas de Sedimentación Zonal.....	131
4.2.1 Discusión sobre la Dosis de Flocculante.....	136
4.3 Determinación de la Superficie necesaria de Sedimentación a partir del Análisis del Flujo de Sólidos.....	138

CAPITULO 5.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	159
5.1 Conclusiones.....	160
5.1.1 Metodología Utilizada.....	160
5.1.2 Limitaciones Encontradas.....	160
5.1.3 Aplicabilidad de la Investigación.....	161
5.1.4 Uso de la Flocculación Química.....	162
5.2 Recomendaciones.....	163
ANEXOS.....	165
BIBLIOGRAFIA.....	181

NOTACION

g	Aceleración de la Gravedad	m/s^2
h_o	Altura de la Columna de Sedimentación	cm
H	Altura de Sedimentador	m
H_u	Altura a la cual todos los sólidos se encuentran a la concentración deseada en el fondo del tanque	cm
H_0	Altura inicial de la interfase en la columna	m
CL	Concentración de Lodos Limitante	mg/l
C_o	Concentración inicial de sólidos en el caudal de entrada	mg/l
C_o/SFL	Concentración Inicial sobre flujo de sólidos limitante	$m^2 h/m^3$
Q	Caudal ingreso al sedimentador	m^3/h
Q_r o Q_u	Caudal de recirculación en el sedimentador	m^3/h
C_i	Concentración de sólidos en el punto de estudio	mg/l
cm	Centímetros	
C_D	Coefficiente de Arrastre de Newton	Kg/m^3
K_1, K_2	Constantes de sedimentación de la ecuación de Faiz, Geyer y Okun	-
C_u	Concentración deseada en el fondo del tanque	m
C_2	Concertación critica que controla la capacidad de manipulación del fango en un tanque	mg/l
K	Constante de conversión en flujo de sólidos	-
ρ	Densidad del liquido	Kg/m^3
ρ_s	Densidad del sólido	Kg/m^3
S_S	Densidad Relativa	
d	Diámetro de Partículas	mm
SFL	Flujo de Sólido Limitante	$Kg/m^2.h$
SF_u	Flujo de sólidos debido a la extracción de fangos	$Kg/m^2.h$
SF_g	Flujo de sólidos debido a la gravedad	$Kg/m^2.h$
F_F	Fuerza de Flotación	N
F_G	Fuerza gravitacional	N
F_i	Fuerza Resultante o Fuerza de Impulsión	N
F_R	Fuerza Resultante	N
L	Longitud de Sedimentador	m
Re	Numero de Reynolds	$(Kg/m^3)^{-1}$

A_{\min}	Superficie mínima para espesado de fangos	m^2
A	Superficie necesaria para el espesado de fangos	m^2
t_0	Tiempo inicial	min
t_u	Tiempo necesario para alcanzar la concentración de fangos deseados en el fondo del tanque	s
T_o	Tiempo de Retención	s
U_b	Velocidad de la masa por bombeo	m/h
V_i	Velocidad de sedimentación de los sólidos a la concentración C_i	m/h
$K =$	1/1000	
V_s	Velocidad de Sedimentación	m/h
u	Viscosidad cinemática (Stokes)	s/m^2
V_H	Velocidad Horizontal del liquido	m/s
V	Volumen del sólido	m^3
V	Volumen de la Unidad	m^3

NOMENCLATURA

CERGRENE	Center Enseignement Recherche pour Gestion Ressources Naturelles Environnement
CRADA	Cooperative Research and Development Agreement
EPA	Environmental Protection Agency
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
SS	Sólidos Suspendidos
UWMB	Urban Watershed Management Branch.
NTU	Unidad Nefelometricas de Turbiedad
WWF	Wet Weather Flows

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 01.	Fuerzas Actuantes en una Partícula.....	25
Figura 02.	Velocidad de Asentamiento y Flotación de Esferas Discretas en un Fluido Estático Valores K_1 . $V_s = K_2 X_2$	31
Figura 03.	Velocidad de Asentamiento y Flotación de Esferas Discretas en un Fluido Estático Valores K_2 . $V_s = K_2 X_2$	32
Figura 04.	Velocidad de Asentamiento y Flotación de Esferas Discretas en un Fluido Estático $V_s = K_2 X_2$	33
Figura 05.	Índices de Willcomb para Determinar el Tamaño del Flóculo.....	35
Figura 06.	Decantación por Caída Interferida.....	36
Figura 07.	Análisis de la Curva de Sedimentación Interferida.....	37
Figura 08.	Influencia de las Corrientes Térmicas en los Procesos de Sedimentación.....	39
Figura 09.	Corrientes Cinéticas.....	42
Figura 10.	Efecto de la Zona de Salida en las Líneas de Flujo.....	43
Figura 11.	Partículas Discretas.....	45
Figura 12.	Zonificación de un Sedimentador.....	47
Figura 13.	Desarenador Rectangular.....	48
Figura 14.	Sedimentadores o Decantadores Estáticos Rectangulares.....	50
Figura 15.	Sedimentadores o Decantadores Estáticos Circulares.....	51
Figura 16.	Sedimentador Estático de Flujo Vertical.....	53
Figura 17.	Sedimentador Estático de Flujo Helicoidal.....	54
Figura 18.	Componentes de un Clarificados de Manto de Lodos.....	56
Figura 19.	Decantadores de Manto de Lodos.....	58
Figura 20.	Unidad de Manto de Lodos con Agitación Simple.....	60
Figura 21.	Unidades de Separación Dinámica Accelator Infilco.....	61
Figura 22.	Unidades de Separación Dinámica Decantador de Brno (Checoslovaquia).....	62
Figura 23.	Unidades de Separación Dinámica Decantador Aquazur- B.....	63
Figura 24.	Decantador de Manto de Lodos Tipo Pulsante.....	65
Figura 25.	Efecto de Introducción de superficies intermedias de Sedimentación en los Decantadores Convencionales.....	66
Figura 26.	Efecto de Introducción de superficies intermedias de sedimentación en los decantadores convencionales.....	68
Figura 27.	Sedimentador Laminar de Flujo Horizontal.....	70
Figura 28.	Decantador de Placas con Canaletas Laterales de Recolección de Agua Decantada, Tolvas Continuas para Lodos y Extracción Mediante Sifones.....	71
Figura 29.	Decantador de Placas Adecuado para Plantas Grandes: Canal Central de Distribución, Sistemas de Recolección	

	Mediante Tuberías y Tolvas de Lodos con Colectores de Extracción Uniforme.....	72
Figura 30.	Decantador de placas adecuado para plantas pequeñas: tuberías de distribución uniforme, vertederos de recolección y canal de extracción uniforme de lodos.....	73
Figura 31.	Columna de Sedimentación, Esquema de las Regiones de Sedimentación.....	75
Figura 32.	Análisis de Sedimentación Retardada.....	79
Figura 33.	Representación esquemática de un tanque de sedimentación operando en estado estacionario.....	85
Figura 34.	Esquema del Análisis flujo de sólidos.....	87
Figura 35.	Variación de la Interfase para una $C_0 = 4 \text{ g/l}$; $v = 0,099 \text{ m/h}$	98
Figura 36.	Variación de la Interfase para una $C_0 = 6 \text{ g/l}$; $v = 0,078 \text{ m/h}$	99
Figura 37.	Variación de la Interfase para una $C_0 = 8 \text{ g/l}$; $v = 0,30 \text{ m/h}$..	99
Figura 38.	Variación de la Interfase para una $C_0 = 10 \text{ g/l}$; $v = 0,28 \text{ m/h}$	100
Figura 39.	Variación de la Interfase para una $C_0 = 15 \text{ g/l}$; $v = 0,246 \text{ m/h}$	100
Figura 40.	Variación de la Interfase para una $C_0 = 20 \text{ g/l}$; $v = 0,21 \text{ m/h}$	101
Figura 41.	Variación de la Interfase para una $C_0 = 40 \text{ g/l}$; $v = 0,08 \text{ m/h}$	101
Figura 42.	Variación de la velocidad de sedimentación inicial en función de la dosis de floculante y la concentración inicial del ensayo (Mezcla preparada con Suelo A).....	102
Figura 43.	Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = $0,4\text{g/l}$	103
Figura 44.	Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = $0,6 \text{ g/l}$	104
Figura 45.	Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = $0,80\text{g/l}$	104
Figura 46.	Variación de la velocidad de sedimentación inicial en función de la dosis de floculante y la concentración inicial del ensayo (Mezcla preparada con Suelo B).....	105
Figura 47.	Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = $0,60\text{g/l}$	106
Figura 48.	Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = $0,6 \text{ g/l}$	106
Figura 49.	Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = $0,8 \text{ g/l}$	107
Figura 50.	Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = $1,0 \text{ g/l}$	107
Figura 51.	Comportamiento de las Curvas de Sedimentación en función de las diferentes concentraciones.....	112
Figura 52.	Comportamiento de la Curva de Sedimentación en función del floculante añadido ($C_0 \text{ suelo} = 8,85 \text{ g/l}$).....	119
Figura 53.	Variación de la velocidad de sedimentación inicial en función de la dosis de floculante y la concentración inicial del ensayo (Mezcla preparada con <u>Agua rio Daule</u>).....	119
Figura 54.	Análisis gráfico de la curva de sedimentación de la interfase.....	122
Figura 55.	Relación A/Q vs. C para agua residual preparada sin floculante.....	127

Figura 56.	Relación A/Q vs. C para agua del lavado de camiones mezcladores.....	128
Figura 57.	Relación A/Q vs. C para agua artificial con floculante para Suelo A.....	129
Figura 58.	Grafico A/Q vs C para agua artificial con floculante para Suelo B.....	130
Figura 59.	Relación A/Q vs. C para agua río Daule con floculante.....	130
Figura 60.	Variación de la velocidad para las diferentes concentraciones de suelo sin la utilización de floculante (Suelo B).....	132
Figura 61.	Gráfica V vs C para agua de lavado de camiones mixer.....	133
Figura 62.	Grafico V vs C para agua residual "preparada" con Floculante optimo.....	135
Figura 63.	Graficó V vs C_o para agua del río Daule con floculante optimo.....	135
Figura 64.	Representación esquemática de un tanque de sedimentación funcionando en condiciones estacionarias..	139
Figura 65.	Procedimiento para obtener curva de flujo de sólidos debido a la gravedad.....	141
Figura 66.	Esquema de definición para el análisis de los datos de sedimentación utilizando el método de análisis de flujo de sólidos.....	142
Figura 67.	Esquema análisis de flujo limitante por el método flujo de sólidos.....	143
Figura 68.	Esquema para determinar la velocidad de sedimentación a partir de datos de sedimentación tipo batch.....	144
Figura 69.	Esquema de análisis para determinar diferentes valores de concentración de lodos SFL con su respectiva concentración máxima C	145
Figura 70.	Esquema de análisis para determinar SFL con su respectiva concentración máxima para cada valor de SFL o CL.....	146
Figura 71.	Esquema para determinar el área de un sedimentador en función de la concentración de lodos y la concentración final que queremos en el sedimentador.....	147
Figura 72.	Análisis de Flujo de Sólidos para el agua residual "preparada" con la muestra del suelo B sin uso de floculante.....	148
Figura 73.	Variación del área de un sedimentador para el agua residual Artificial sin Floculante.....	149
Figura 74.	Análisis de flujo de sólidos para el agua residual "preparada" con la muestra de <u>Suelo A</u> con uso de floculante.....	150

Figura 75.	Variación del área de un sedimentador para el agua Artificial del Suelo A.....	151
Figura 76.	Análisis de flujo de sólidos para el agua "residual" preparada con la muestra de <u>Suelo B</u> con uso de floculante.....	152
Figura 77.	Variación del área de un sedimentador para el agua Artificial del Suelo B.....	153
Figura 78.	Análisis de flujo de sólidos para el agua muestra del lavado de camiones mezcladores de concreto.....	154
Figura 79.	Variación del área de un sedimentador para el agua del lavado de camiones mezcladores de concreto.....	155
Figura 80.	Análisis de flujo de sólidos para el agua "residual" preparada con la muestra del río Daule.....	156
Figura 81.	Variación del área de un sedimentador para el agua del río Daule con utilización de floculante.....	157

ÍNDICE DE TABLAS

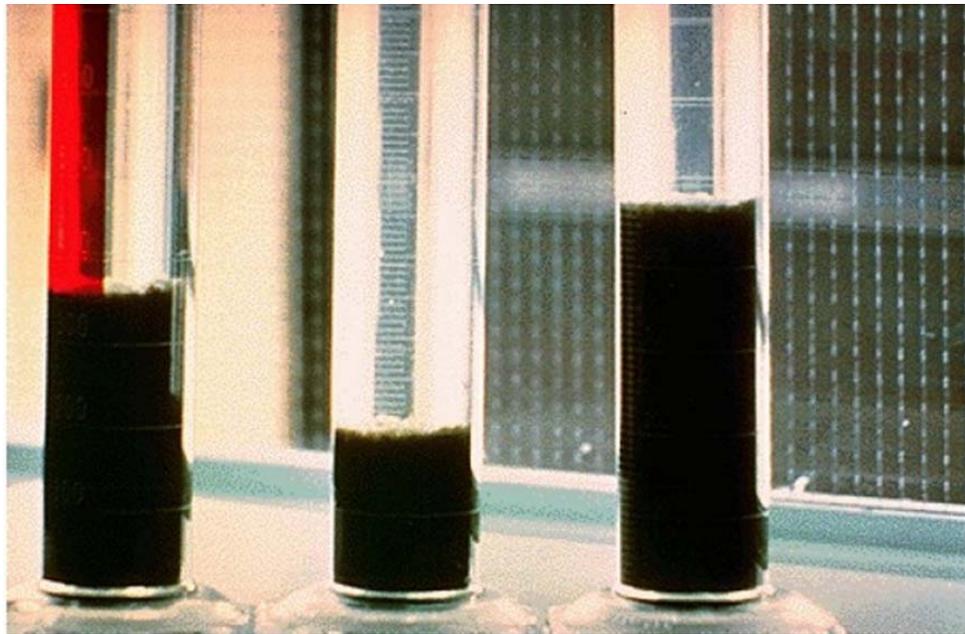
		Pág.
Tabla 1.	Valores de Coeficiente de Arrastre Newton.....	29
Tabla 2.	Características de Decantadores de Manto de Lodos.....	57
Tabla 3.	Dimensiones de cilindros utilizados en los ensayos de sedimentación.....	90
Tabla 4.	Concentraciones utilizadas en los ensayos de sedimentación.....	93
Tabla 5.	Floculante Optimo obtenido en las diferentes concentraciones de suelo del caso 1.....	136
Tabla 6.	Esquema para la fabulación de datos para graficas Co/SFL vs Co.....	147
Tabla 7.	Valores de flujo limitante para agua preparada artificialmente sin floculante.....	148
Tabla 8.	Valores de Co/SFL para los diferentes valores de SFL obtenidos agua artificialmente preparada sin floculante.....	149
Tabla 9.	Valores de flujo limitante para agua preparada artificialmente con floculante Suelo A.....	150
Tabla 10.	Valores de Co/SFL para los diferentes valores de SFL obtenidos agua artificialmente preparada con floculante Suelo A.....	152
Tabla 11.	Valores de Co/SFL para los diferentes valores de SFL obtenidos agua artificialmente preparada con floculante Suelo B.....	153
Tabla 12.	Valores de flujo limitante para agua del lavado de camiones mixer.....	155
Tabla 13.	Valores de Co/SFL para los diferentes valores de SFL obtenidos para agua del lavado de camiones mezcladores mixer.....	155
Tabla 14.	Valores de flujo limitante o concentración de lodos.....	156
Tabla 15.	Valores de Co/SFL para agua de río Daule con floculante..	157
Tabla 16.	Variación de la Interfase para una C= 4 g/l.....	166
Tabla 17.	Variación de la Interfase para una C= 6 g/l.....	166
Tabla 18.	Variación de la Interfase para una C= 8 g/l.....	166
Tabla 19.	Variación de la Interfase para una C= 10 g/l.....	167
Tabla 20.	Variación de la Interfase para una C= 15 g/l.....	167
Tabla 21.	Variación de la Interfase para una C= 20 g/l.....	167
Tabla 22.	Variación de la Interfase para una C= 40 g/l.....	168
Tabla 23.	Variación de la Interfase para una C= 4 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.....	168
Tabla 24.	Variación de la Interfase para una C= 6 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.....	169
Tabla 25.	Variación de la Interfase para una C= 8 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.....	169

Tabla 26.	Variación de la Interfase para una C= 10 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.....	170
Tabla 27.	Variación de la Interfase para una C= 15 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.....	170
Tabla 28.	Variación de la Interfase para una C= 20 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.....	171
Tabla 29.	Variación de la Interfase para una C= 40 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.....	172
Tabla 30.	Variación de la Interfase para las concentraciones Co, C1 y C2.....	173
Tabla 31.	Variación de la Interfase para una Co= 8,85 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.....	175
Tabla 32.	Variación de la Interfase para una C1= 22,81 g/l, C2= 30,45 g/l, C3= 42,19 g/l, C4=48,80 g/l con concentración óptima de Sulfato de Aluminio = 0,5 g/l.....	175
Tabla 33.	Valores de A/Q para agua artificial sin floculante.....	176
Tabla 34.	Valores de A/Q para agua del lavado de camiones mezcladores.....	176
Tabla 35.	Valores A/Q para agua artificial con floculante.....	176
Tabla 36.	Valores de A/Q para agua del Río Daule con floculante.....	177
Tabla 37.	Valor de flujo de sólidos para agua artificial sin floculante...	177
Tabla 38.	Valor de flujo de sólidos para agua artificial con floculante Suelo A.....	177
Tabla 39.	Valor de flujo de sólidos para agua artificial con floculante Suelo B.....	178
Tabla 40.	Valor de flujo de sólidos para agua del lavado de camiones mezcladores de hormigón.....	178
Tabla 41.	Valores de flujo de sólidos para agua del río Daule con floculante.....	178
Tabla 42.	Valores de A/Q para agua artificial sin floculante.....	179
Tabla 43.	Valores de A/Q para agua del lavado de camiones mezcladores.....	179
Tabla 44.	Valores A/Q para agua artificial con floculante.....	179
Tabla 45.	Valores de A/Q para agua del Río Daule con floculante.....	179

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1.	Esquema de Zonas de sedimentación.....	Pág. 75
Foto 2.	Columnas de sedimentación.....	81
Foto 3.	Balanza Digital.....	94
Foto 4.	Sedimentador típico planta mirador Holcim.....	109

CAPITULO 1.- INTRODUCCIÓN.



Columnas Típicas para Ensayos Sedimentación

1.1 Antecedentes.

El presente trabajo trata sobre los procesos de sedimentación en el Tratamiento del Agua, enfocándose en la obtención de una mejor calidad del agua. Este estudio contribuye al mejoramiento del agua de consumo diario de la población. Adicionalmente, se pueden usar los mismos principios en el tratamiento de aguas residuales.

La sedimentación es un proceso que también afecta el comportamiento hidráulico de los sistemas hídricos. Lamentablemente, en el Ecuador no se han realizado estudios detallados sobre este fenómeno.

En el estudio se analizará el diseño de sedimentadores de acuerdo a diversos tipos de agua estudiada.

1. Agua residual artificialmente preparada (añadiendo suelo fino a agua de la llave).
2. Agua de lavado de camiones mezcladores de hormigón.
3. Agua del río Daule cerca de la estación la Toma.

1.2 Justificación.

El Laboratorio de Ingeniería Civil de la FICT (ESPOL), no posee una metodología de laboratorio apropiada para el estudio de la sedimentación del agua. Se decidió tomar este tema de tesis, con el objetivo de establecer una metodología de ensayos en laboratorio y poder determinar la cantidad de floculante necesaria para una óptima sedimentación. De esta manera estamos contribuyendo con información que servirá para las siguientes generaciones de estudiantes, que se interesen por esta rama de la Ingeniería Civil.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Generales.

El objetivo general de esta tesis es Conocer el comportamiento del fenómeno de sedimentación. Para esto, es necesario tener una idea clara de los tipos de sedimentos que se encuentran en nuestro medio. La tesis evaluaría una metodología de ensayo de sedimentación apropiada que puede ser aplicada en laboratorio de la FICT.

1.3.2 Específicos.

- Determinar la concentración óptima de floculante, para acelerar el proceso de sedimentación.

- Realizar la curva de flujo de sólidos correspondiente a cada tipo de muestra estudiada.
- Determinar los parámetros necesarios, para poder diseñar los sedimentadores de acuerdo a cada tipo de sedimento analizado.
- Determinar la variación de la velocidad de sedimentación de los sólidos para cada tipo de muestra analizada y su incidencia en los parámetros de diseño.

1.4 Estructura de la Tesis.

La presente tesis, se encuentra estructurada en cinco capítulos, explicando tanto el fenómeno de sedimentación como sus proceso, y los diferentes casos que se estudio, de una manera didáctica para facilidad del lector.

El primer capitulo, trata de la introducción y justificación del porque de esta tesis, objetivos tantos generales como específicos. El capitulo dos abarca la teoría de sedimentación, desde que es la sedimentación y sus diferentes etapas en el proceso. También se habla de los tipos de sedimentadores y teoría sobre las columnas de sedimentación que es el principal estudio de esta tesis .

El capitulo tres, tiene que ver con los ensayos que se realizaron, y las diferentes metodologías que se utilizaron para cada tipo de muestra.

Adicionalmente, se muestra los gráficos de cada una de las concentraciones con sus respectivos flujos de sólidos y la dosis optima de floculante necesario, con sus respectivas velocidades y otros parámetros que hemos considerado importantes de citar.

El cuarto capítulo establece una comparación, con los diferentes tipos de muestras ya sea con o sin floculante. Se discute el aumento o disminución de la velocidad de sedimentación con la adición de floculante. También, se determina los parámetros de diseño para un sedimentador de acuerdo a los resultados de los ensayos. Finalmente el quinto capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones con el objetivo de mejorar el proceso de sedimentación en el agua.

CAPITULO 2.- REVISIÓN DE LA LITERATURA.



Foto de un Sedimentador típico de aguas residuales.

2.1 Teoría de la Sedimentación.

2.1.1 Conceptos Generales.

Se entiende por sedimentación la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido. La remoción de partículas en suspensión en el agua puede conseguirse por sedimentación o filtración. De allí que ambos procesos se consideren como complementarios. La sedimentación remueve las partículas más densas, mientras que la filtración remueve aquellas partículas que tienen una densidad muy cercana a la del agua o que han sido resuspendidas y, por lo tanto, no pudieron ser removidas en el proceso anterior.

La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye una de las operaciones unitarias utilizadas en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo se utilizan los términos de clarificación y espesamiento para designar, la sedimentación. Se habla de clarificación cuando hay un especial interés en el fluido clarificado, y de espesamiento cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada de fondo.

Las partículas en suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. Es así que podemos referirnos a la sedimentación de partículas discretas, sedimentación de partículas floculentas y sedimentación de partículas por caída libre e interferida.

2.1.2 Sedimentación de partículas discretas.

Se llama partículas discretas a aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída. Se denomina sedimentación o sedimentación simple al proceso de depósito de partículas discretas. Este tipo de partículas y esta forma de sedimentación se presentan en los desarenadores, en los sedimentadores y en los presedimentadores como paso previo a la coagulación en las plantas de filtración rápida y también en sedimentadores como paso previo a la filtración lenta.

2.1.3 Sedimentación de partículas floculentas.

Partículas floculentas son aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas forma, tamaño, densidad sí cambian durante la caída.

2.1.4 Sedimentación por caída libre e interferida.

Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir. Se denomina a este fenómeno *caída libre*. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en lugar de individual. A este proceso de sedimentación se le denomina *depósito* o *caída interferida* o *sedimentación zonal*.

Cuando las partículas ya en contacto forman una masa compacta que inhibe una mayor consolidación, se produce una *compresión* o *zona de compresión*. Este tipo de sedimentación se presenta en los concentradores de lodos de las unidades de decantación con manto de lodos.

2.2 Expresiones de velocidad de sedimentación

2.2.1 Partículas discretas con caída libre.

El fenómeno de sedimentación de partículas discretas por caída libre, también denominado *en soluciones diluidas*, puede describirse por medio de la mecánica clásica. En este caso, la sedimentación es solamente una función de las propiedades del fluido y las características de las partículas según se demuestra a continuación.

Imaginemos el caso de una partícula que se deja caer en el agua. Esta partícula estará sometida a dos fuerzas (figura 1): fuerza de flotación (F_F), que es igual al peso del volumen del líquido desplazado por la partícula (Principio de Arquímedes), y fuerza gravitacional (F_G).

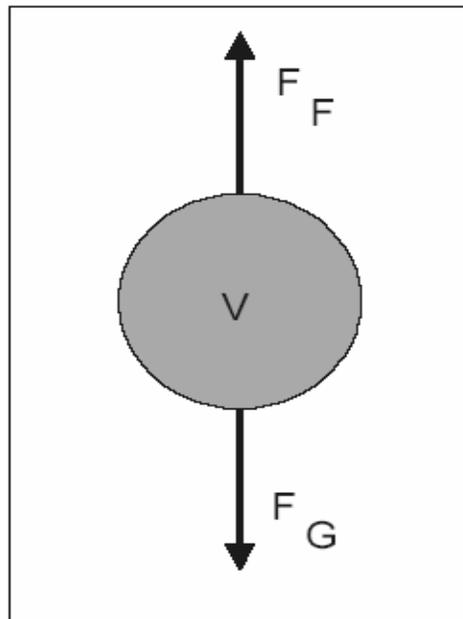


Figura 1. Fuerzas actuantes en una partícula.
FUENTE: Manual DTIAPA C-5, 1981.

$$\text{Si } F_F = \rho \cdot g \cdot V \quad (1)$$

$$\text{y } F_G = \rho_s \cdot g \cdot V \quad (2)$$

donde:

ρ = densidad del líquido.

ρ_s = densidad del sólido.

V = volumen de la partícula.

De la acción de ambas fuerzas tenemos la fuerza resultante, que será igual a la diferencia de estos dos valores y estará dada por:

$$F_i = g.V.(\rho_s - \rho) \quad (3)$$

donde:

F_i = Fuerza resultante o fuerza de impulsión.

Arrastrada por esta fuerza (F_i), la partícula desciende con velocidad creciente, pero a medida que baja, la fricción que el líquido genera en ella crea una fuerza de roce definida por la ley de Newton, cuyo valor es:

$$F_R = C_D.A.\rho.\frac{V_s^2}{2} \quad (4)$$

donde:

F_R = fuerza de rozamiento

$\frac{V_s^2}{2}$ = energía cinética

C_D = coeficiente de arrastre

A = área transversal al escurrimiento

V_s = velocidad de sedimentación

Después de un corto periodo, la aceleración pasa a ser nula y el valor de la fuerza de fricción (F_R) iguala a la de impulsión (F_i), momento en el cual la partícula adquiere una velocidad constante, conocida como *velocidad de asentamiento* o *sedimentación*. En ese momento se cumple que (3) y (4) son iguales; por lo tanto:

$$g \cdot V(\rho_s - \rho) = C_D \cdot A \cdot \frac{V_s^2}{2} \quad (5)$$

Despejando el valor de V_s se obtiene

$$V_s = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot V}{C_D \cdot \rho \cdot A}} \quad (6)$$

Para el caso de partículas esféricas:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad \text{y} \quad V = \frac{\pi \cdot d^3}{6}$$

Siendo d = diámetro de la partícula:

$$\frac{V}{A} = \frac{\pi/6 \cdot d^3}{\pi/4 \cdot d^2} = \frac{2}{3} \cdot d$$

$$V_s = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{g}{C_D} \cdot \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} \cdot d} \quad (7)$$

En la cual:

V_s = velocidad de sedimentación.

d = diámetro de la partícula

g = aceleración de la gravedad

ρ_s = densidad de la partícula

ρ = densidad del fluido.

El coeficiente de arrastre de Newton es una función del Numero de Reynolds

y de la forma de las partículas:

$$C_D = a \cdot R_e^{-n} \quad (8)$$

$$\text{Siendo : } R_e = \frac{V_s \cdot d}{u} \quad (9)$$

a = constante específica

R_e = número de Reynolds

u = viscosidad cinemática (Stokes)

Si $d < 0,085$ mm, $Re < 1$, entonces prevalece flujo laminar, siendo:

$$C_D = \frac{24}{R_e} \quad \text{y} \quad \frac{\rho_s}{\rho} = S_s$$

al reemplazar en la ecuación (7), se origina la ecuación de Stokes:

$$V_s = \frac{g}{18} \cdot (S_s - 1) \cdot \frac{d^2}{u} \quad (10)$$

Cuando $d > 1,0$ mm, $Re > 1.000$, presenta flujo turbulento, para lo cual:

$$C_D = 0.4$$

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación (7), se obtiene una velocidad terminal de:

$$V_s = \sqrt{(3,3 \cdot g \cdot (S_s - 1) \cdot d)} \quad (11)$$

conocida como la ecuación de Newton, para la sedimentación de partículas discretas. Para los casos de diámetro de partículas comprendidas entre 0,85 y 1,0 mm y especialmente números de Reynolds de 1 a 1.000, se presenta flujo de transición para el cual los valores de C_D son variables y su determinación puede realizarse a través de cualquiera de las ecuaciones indicadas en la tabla 1.

TABLA 1.- Valores de coeficiente de arrastre

Autor	Expresión
Rich (1971)	$C_D = \frac{18,5}{Re^{0,80}}$
Hatch (1974)	$C_D = \frac{14}{Re^{0,50}}$
Allen (1976)	$C_D = \frac{12,65}{Re^{0,50}}$
Fair-Geyer-Okun (1979)	$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0,34$
Schiller Newman (1980)	$C_D = \frac{12}{Re} (1 + 0,14 Re^{0,687})$
Goldstein (1981)	$C_D = \frac{12}{Re} + \frac{3}{16} Re - \frac{19}{1.280} Re^2 + \frac{71}{20.480} Re^3$

FUENTE: *Journal of the Environmental Engineering Division*, (1978).

Si se desconoce cómo se comporta la sedimentación de una determinada partícula (zona laminar, turbulenta o en transición), el cálculo de la velocidad de sedimentación debe hacerse por tanteos.

Fair, Geyer y Okun determinan la velocidad de sedimentación utilizando los ábacos de la figura 2 y figura 3, que tienen la ventaja de que permiten visualizar directamente y en forma simultánea distintas soluciones. Este método, que permite el cálculo directo, se aplica resolviendo las siguientes ecuaciones:

Término del diámetro (X_1):

$$\left[\frac{g \cdot (S_s - 1)}{\nu^2} \right]^{1/3} \cdot d = K_1 \cdot d = X_1 \quad (12)$$

Término de velocidad (X_2):

$$\frac{V_s}{[g \cdot (S_s - 1) \cdot \nu]^{1/3}} = \frac{V_s}{K_2} = X_2 \quad (13)$$

Se puede, entonces, representar K_1 y K_2 en función de la densidad relativa S_s y la temperatura, tal como se muestra en el gráfico de la figura 2. y figura 3. También se puede representar X_2 en función de X_1 , tal como se muestra en el gráfico de la figura 4.

El cálculo se realiza de la siguiente manera: Conociendo las características de las partículas y del agua, se obtiene K_1 y K_2 de la figura 2. y figura 3. Conociendo, por otra parte, $X_1 = K_1 \cdot d$, se entra al gráfico de la figura 4 y se obtiene X_2 , con lo cual se calcula $V_s = K_2 \cdot X_1$.

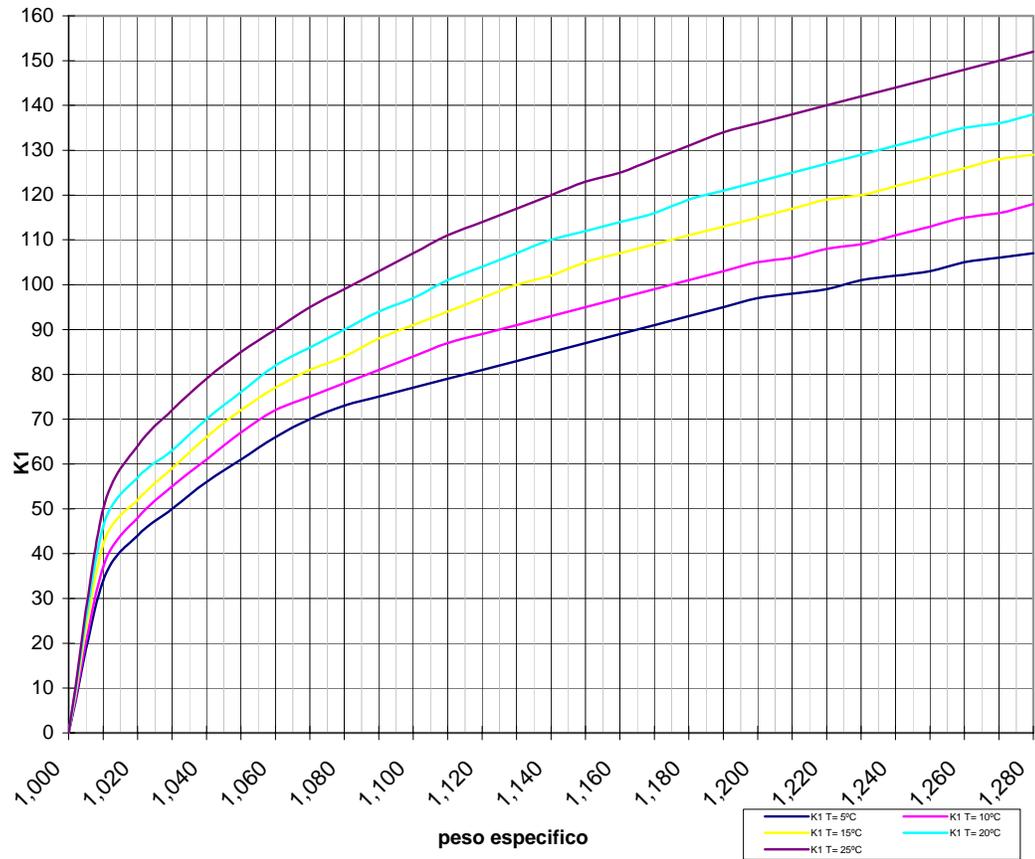


Figura 2 Velocidad de Asentamiento y flotación de esferas discretas en un fluido estático valores K_1 .

FUENTE: *Journal of the Environmental Engineering Division*, (1978)

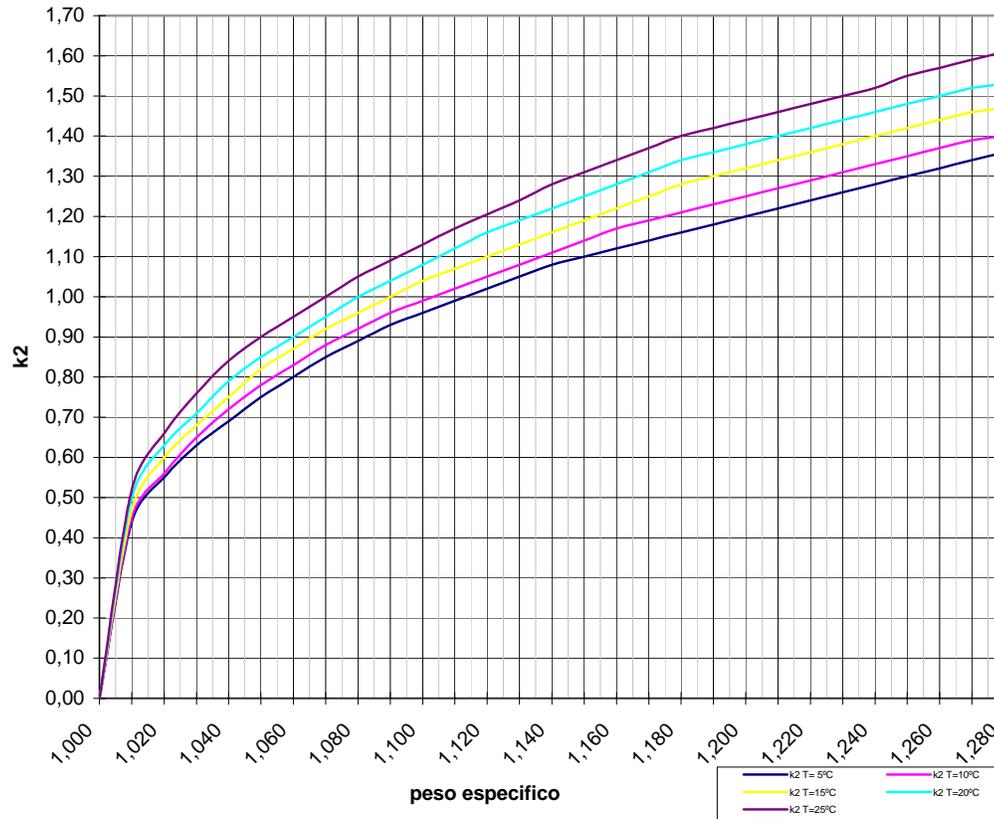


Figura 3 Velocidad de Asentamiento y flotación de esferas discretas en un fluido estático valores K_2 .

FUENTE: *Journal of the Environmental Engineering Division*, (1978)

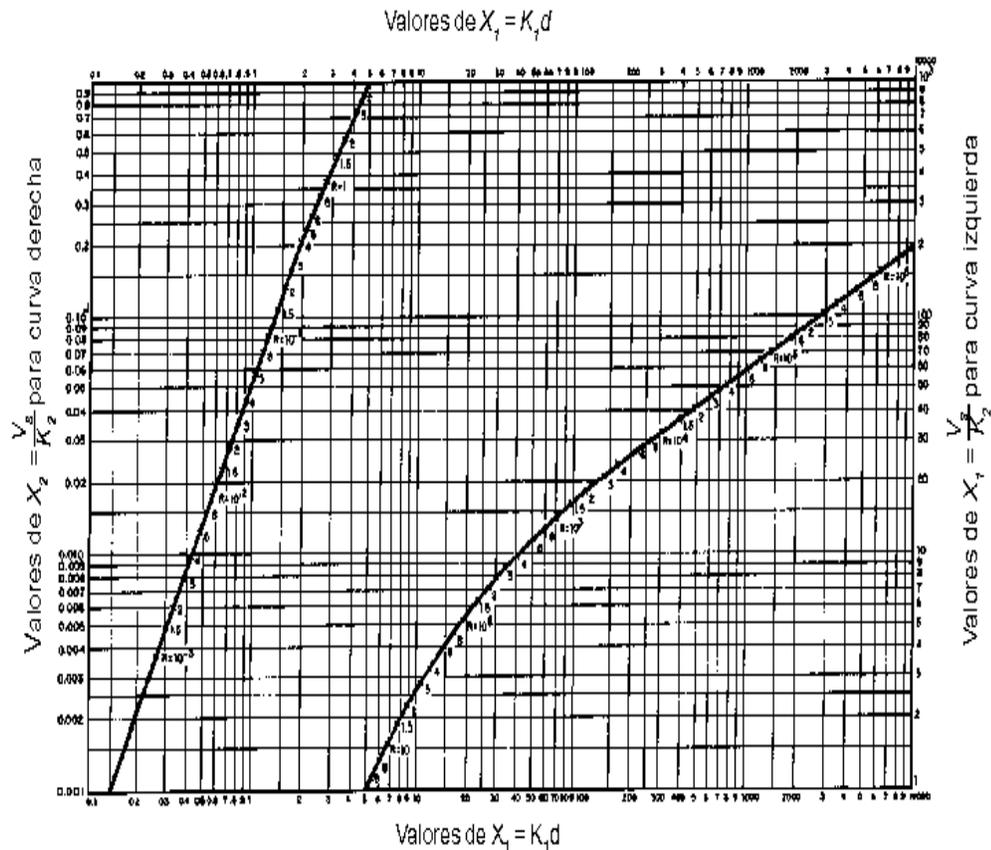


Figura 4 Velocidad de asentamiento y flotación de esferas discretas en un fluido estático $V_s = K_2 X_2$.

FUENTE: *Journal of the Environmental Engineering Division*, (1978)

2.2.2 Sedimentación de partículas floculentas.

Las partículas que se remueven en una planta de tratamiento de agua son sólidos inorgánicos y orgánicos. Los factores primordiales que influyen en la velocidad de sedimentación son su tamaño, forma y densidad.

La materia en suspensión que origina la turbiedad consiste principalmente en sílice finamente dividida, arcilla y limo. La densidad original de las partículas es cercana a 2,60. El color, en cambio, es producido principalmente por ácidos orgánicos (fúlvicos, húmicos, etc.) de origen

vegetal con densidades variables de 1 a 1,5 dependiendo de su concentración. Las partículas se presentan principalmente en estado coloidal y es necesario añadirles coagulantes químicos y someterlas a procesos de coagulación y floculación para incrementar su tamaño o densidad antes del proceso de sedimentación.

Las partículas en suspensión de aguas tratadas con coagulantes, consisten en flóculos formados por óxidos metálicos (Al_2O_3 o Fe_2O_3), agua en 85 a 95% y turbiedad y/o color con densidades variables entre 1,002 cuando predomina el color y 1,03 cuando predomina la turbiedad. En procesos de ablandamiento los flóculos tienen densidades cercanas a 1,20. El diámetro de los flóculos es variable desde menos de 0,001 mm hasta más de 5 mm, dependiendo de las condiciones de mezcla y floculación (gradientes de velocidad y tiempo de retención). Willcomb clasifica los flóculos por su tamaño, tal como se indica en la figura 5.

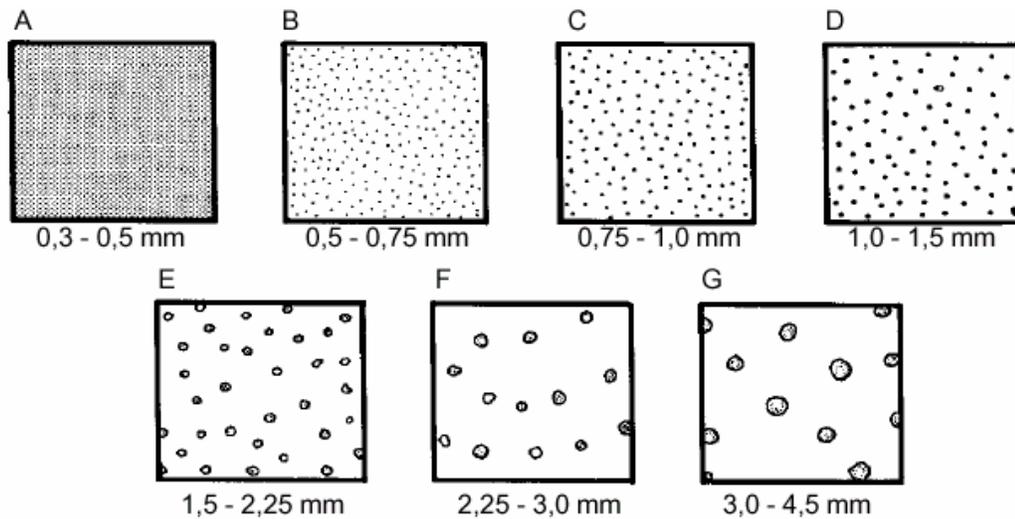


Figura 5 Índices de Willcomb para determinar el tamaño del flóculo.
FUENTE: Degremont. *Manual técnico del agua*. Degremont, (1973).

Sedimentación de partículas floculentas con caída interferida. En bajas concentraciones de partículas, estas sedimentan o decantan libremente; en cambio, con alta concentración de partículas floculentas (superiores a 500 mg/L), las partículas se encuentran a distancias tan reducidas que se adhieren entre sí y sedimentan masivamente. Así, se crea una clara superficie de separación entre los flóculos y el líquido que sobrenada y esto da origen al fenómeno de sedimentación conocido con los nombres de decantación interferida o zonal. Klinch establece las hipótesis fundamentales para la decantación interferida, en la cual la velocidad de caída de una partícula depende principalmente de la concentración de las partículas.

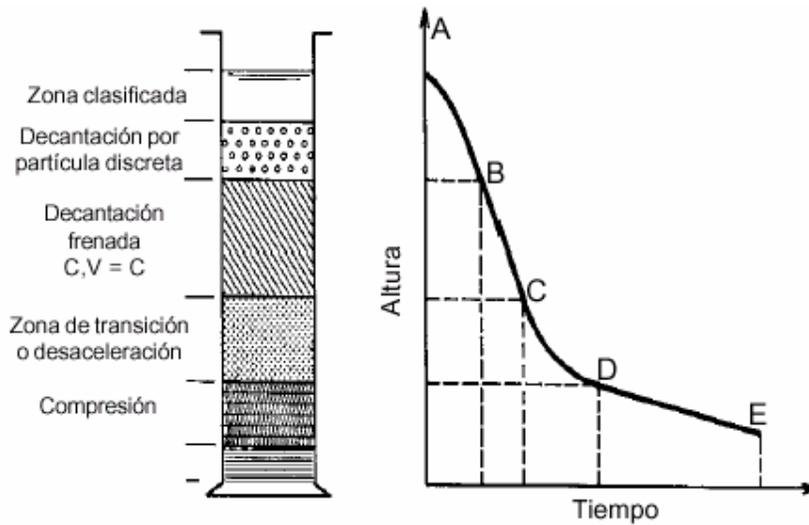


Figura 6. Decantación por caída interferida.

FUENTE: Water and wastewater engineering. Nueva York, John Wiley, 2 vols, 1968..

Al llenar una columna de sedimentación de altura y diámetro adecuados con una suspensión floculenta de elevada concentración, se tiene inicialmente una concentración uniforme en toda la altura de la columna (h₀). En diferentes tiempos se mide la altura de la capa superior de los lodos y se obtiene una curva tal como la que aparece en la figura 6, que tiene los siguientes rasgos:

- *Zona A-B.* La superficie de separación es muy definida. Esta es una fase de coalescencia de los flóculos seguida de una zona muy pequeña de decantación libre (en la mayoría de casos, esta primera zona no se produce).

- *Zona B-C.* Tiene una pendiente rectilínea. Corresponde a una velocidad de caída constante definida únicamente por el tipo de floculación y la concentración de las partículas.

Al incrementarse la concentración inicial de las partículas disminuye la velocidad. A esta zona se la denomina *decantación frenada*.

- *Zona C-D.* En esta zona se produce la disminución progresiva de la velocidad de caída. Se denomina *zona de desaceleración o transición*.

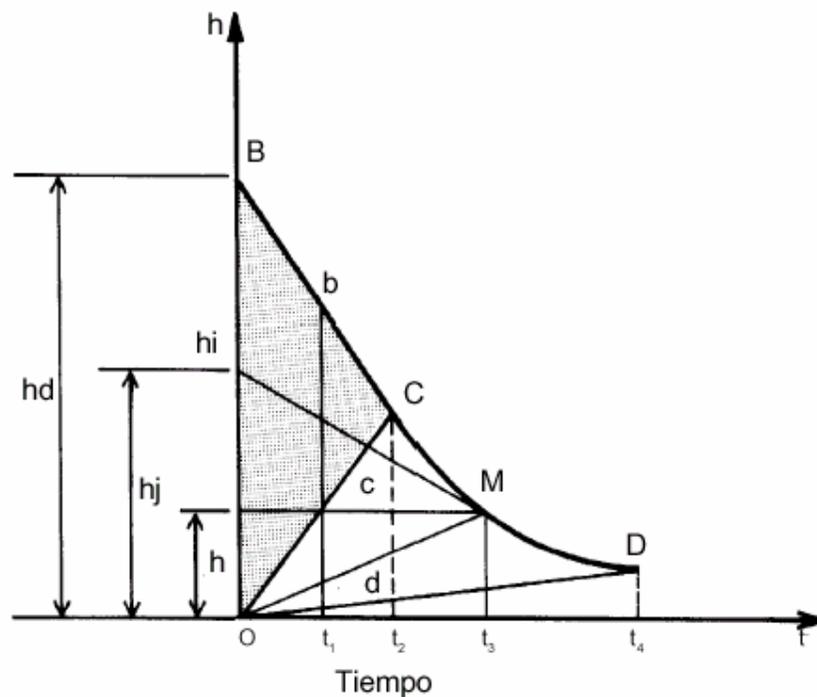


Figura 7.- Análisis de la curva de sedimentación interferida.

FUENTE: Water and wastewater engineering. Nueva York, John Wiley, 2 vols, 1968..

- *Zona D-E.* En esta zona los flóculos se tocan y ejercen presión sobre las capas inferiores, puesto que están soportados por estas. Se le llama *zona de compresión*.

Si consideramos, por simplicidad, que al sedimentarse una suspensión concentrada no se produce la primera zona, se obtienen las alturas de separación de interfase como se indica en la figura 7.

En el triángulo BOC, la concentración y la velocidad de caída son constantes e iguales, respectivamente, a los valores iniciales en B.

En el triángulo COD, las curvas de equiconcentración son rectas que pasan por el origen, lo que significa que, desde los primeros momentos de la sedimentación, las capas más próximas al fondo se tocan y pasan por todas las concentraciones comprendidas entre la concentración inicial y la concentración al punto D, principio de la compresión.

2.3 Factores que influyen en el proceso de sedimentación.

2.4.1 Calidad del Agua.

Las variaciones de concentración de materias en suspensión modifican, en primer lugar, la forma de sedimentación de las partículas (con caída libre o interferida), así como las propiedades de las partículas modifican la forma de depósito (sedimentación para partículas discretas y decantación para

partículas floculentas). Adicionalmente, variaciones de concentración de partículas o de temperatura producen variaciones de densidad del agua y originan corrientes cinéticas o térmicas que, a su vez, generan cortocircuitos hidráulicos en las unidades de tratamiento.

Al entrar agua más fría al sedimentador, la masa de agua se desplaza por el fondo de este y produce el tipo de corriente indicada en la figura 8 (a).. En cambio, con agua más caliente, se produce el fenómeno inverso, que aparece indicado en la figura 8 (b).

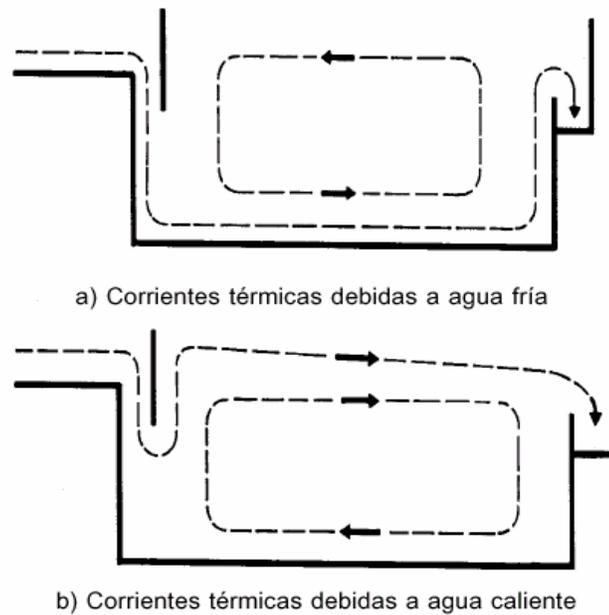


Figura 8. Influencia de las corrientes térmicas en los procesos de sedimentación.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

Afortunadamente, la mayor concentración de partículas suele estar en el fondo, pero cualquier perturbación en el flujo, ya sea por temperatura, obstrucciones, alta velocidad de las paletas del floculador, etcétera, puede alterar el equilibrio y producir un flujo sinuoso o envolvente sobre sí mismo, muy diferente del teórico calculado, que es el que con frecuencia aparece en los sedimentadores horizontales, incluso en los bien diseñados

2.4.1 Condiciones hidráulicas.

Los criterios y parámetros hidráulicos de diseño tienen gran influencia en la eficiencia de los sedimentadores o decantadores. A continuación se detallan los principales:

a) En la zona de sedimentación

En esta zona se debe tener un número de Reynolds lo más bajo posible y el número de Froude más elevado para tender a un flujo laminar y estabilizar el flujo. En esta zona las líneas de flujo no deben encontrarse con ningún tipo de obstrucciones que alteren su trayectoria. Adicionalmente, la presencia de flujo de pistón mejora el proceso y el flujo mezclado no lo favorece.

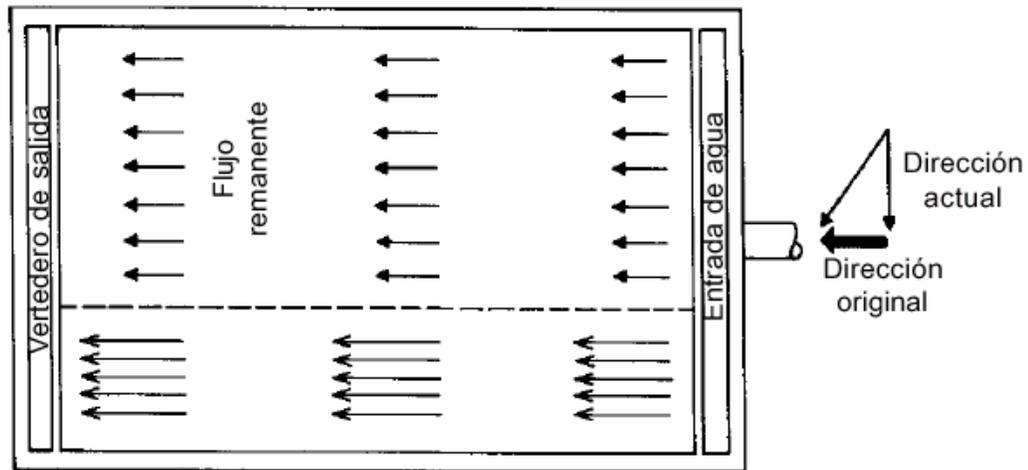
b) En la zona de entrada

La zona de entrada en un sedimentador es un conjunto de estructuras que debe permitir una distribución uniforme del flujo de agua hacia la zona de sedimentación. En una unidad de sedimentación convencional de flujo

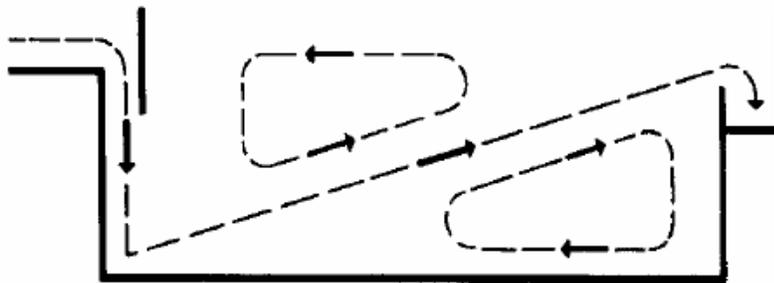
horizontal, esta distribución uniforme debe darse a todo lo ancho de la unidad y en profundidad.

Las alteraciones del flujo en la zona de entrada deben evitarse y su presencia puede deberse a una velocidad excesiva del flujo en la entrada del sedimentador, o a que los orificios de ingreso sean muy grandes y el movimiento de las paletas del floculador sea tal que comunica demasiada energía al flujo. Al no haber disipación de esta energía en el tabique divisorio (caso de unidades convencionales de flujo horizontal), las masas de agua entran con diferente gradiente de velocidad, creando turbulencias que pueden extenderse dentro de la zona de sedimentación.

Similarmente, puede mencionarse como causa de corrientes cinéticas la distribución desigual del flujo en la entrada del sedimentador (orificios de distintos diámetros o algunos parcialmente obstruidos), la existencia de tabiques que dejan pasar el agua solamente por el fondo, vertederos, etcétera, lo que produce corrientes como las indicadas en la figura 9 y que adicionalmente modifican el tiempo de retención.



a) Planta - Cortocircuito



b) Corte longitudinal - Cortocircuito y espacios muertos

Figura 9. Corrientes Cinéticas.

FUENTE: Water and wastewater engineering.(1968).

c) En la zona de salida

Esta zona se caracteriza por permitir una recolección uniforme de agua sedimentada a una velocidad tal que evite arrastrar flóculos en el efluente. Canaletas de pequeña longitud, mal ubicadas, mal niveladas o impropriadamente diseñadas producen cortocircuitos hidráulicos y zonas muertas que pueden inutilizar grandes áreas de los sedimentadores.

En la figura 10 se esquematizan las modificaciones normales de las líneas de flujo debido a las estructuras de la zona de salida.

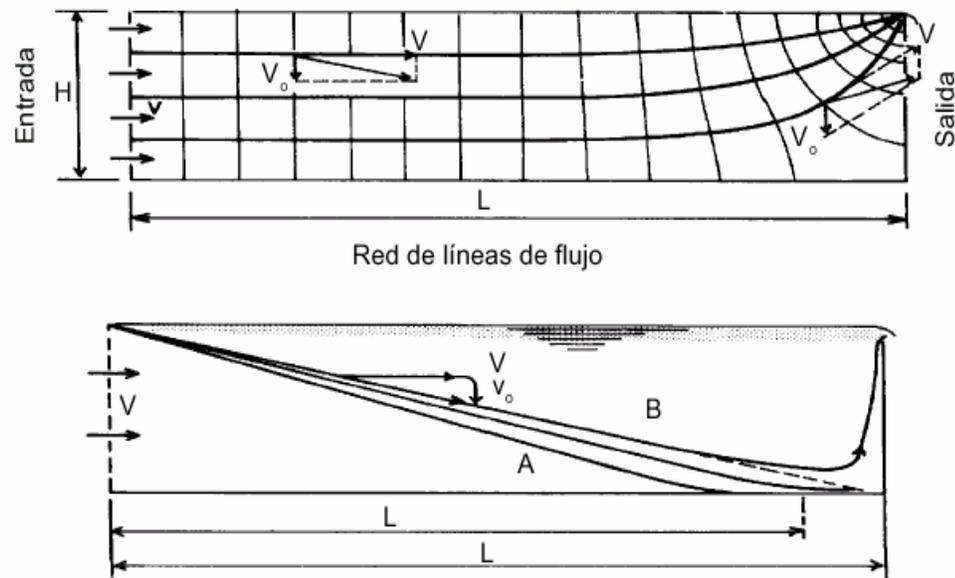


Figura 10. Efecto de la zona de salida en las líneas de flujo.
FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

2.4.1 Factores externos.

Paradójicamente, los factores externos al proceso de sedimentación, acondicionamiento previo (procesos previos a la sedimentación), prácticas operacionales y factores ambientales, son los que tienen más influencia en la eficiencia de un sedimentador o decantador. Buena o inadecuada coagulación y floculación ocasionan, respectivamente, altas o bajas eficiencias en los decantadores. Idéntico comentario cabe realizar acerca de la operación y el estado de la unidad, así como sobre los programas de mantenimiento existentes. A la vez, el viento, al soplar sobre la superficie

de los sedimentadores, puede producir corrientes de suficiente intensidad como para inducir cambios en la dirección del flujo y alterar el precario equilibrio de las masas de agua.

2.4 Clasificación de Sedimentadores.

La sedimentación o la decantación se realizan en reactores denominados *sedimentadores* o *decantadores*, de acuerdo con el tipo de partícula que se remueva en cada unidad. La clasificación más recomendable es la siguiente:

- Sedimentadores o decantadores estáticos
- Decantadores dinámicos
- Decantadores laminares.

2.4.1 Sedimentadores y decantadores estáticos.

Criterios generales.

En este tipo de unidades puede producirse sedimentación o decantación, normalmente con caída libre, en régimen laminar turbulento o de transición.

En estas unidades la masa líquida se traslada de un punto a otro con movimiento uniforme y velocidad V_H constante. Cualquier partícula que se encuentre en suspensión en el líquido en movimiento, se moverá según la resultante de dos velocidades componentes: la velocidad horizontal del líquido (V_H) y su propia velocidad de sedimentación (V_S). Véase la figura 11.

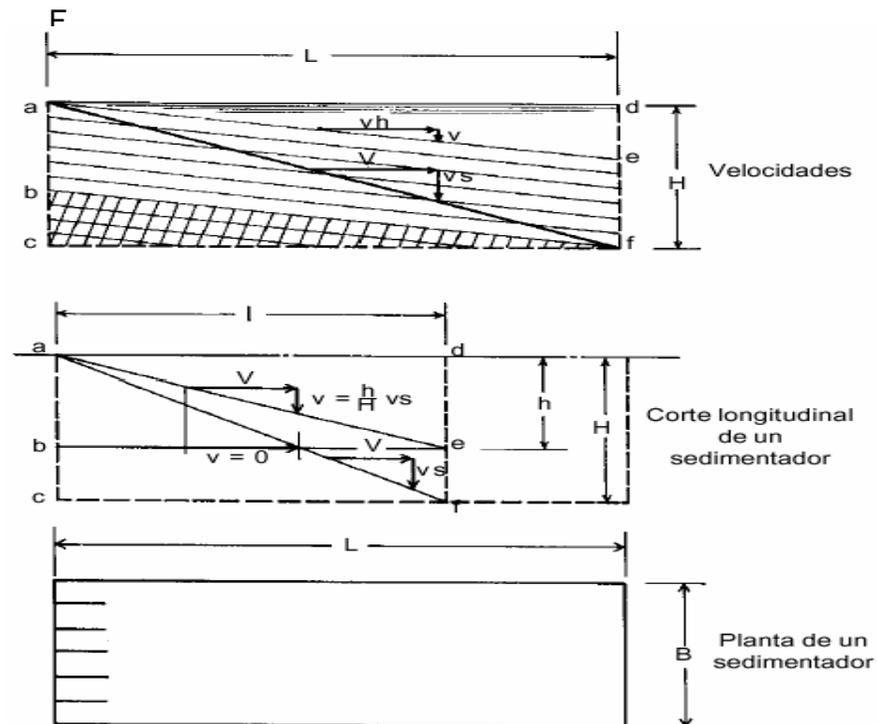


Figura 11. Partículas discretas.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

En un sedimentador ideal de forma rectangular y con flujo horizontal, la resultante será una línea recta. Asimismo, otras partículas discretas se moverán en lugares geométricos paralelos. Estableciendo semejanzas entre los triángulos formados por las velocidades y las dimensiones del decantador, donde (L) es la longitud y (H) la altura, se obtiene:

$$\frac{V_H}{V_S} = \frac{L}{H} \quad (14)$$

Como la partícula tiene movimiento uniforme:

$$V_S = \frac{H}{T_o} \quad (15)$$

Si T_o es el tiempo de retención:

$$T_o = \frac{V}{Q} \quad (16)$$

Donde V = volumen de la unidad

Se obtendrá:

$$V_s = \frac{H}{V/Q} = \frac{Q}{V/H} \quad (17)$$

Pero como $\frac{V}{H} = A_s$, por lo tanto:

$$V_s = \frac{Q}{A_s} \quad (18)$$

Este criterio sirve exclusivamente para explicar la teoría básica de la clarificación y es útil para diseñar ciertos tipos de sedimentadores y desarenadores.

Componentes de un sedimentador.

Una unidad de sedimentación consta de las siguientes zonas, con diferentes funciones específicas:

- Zona de entrada y distribución de agua
- Zona de sedimentación propiamente dicha
- Zona de salida o recolección de agua
- Zona de depósito de lodos.

En la figura 12 se esquematizan las diferentes zonas de un sedimentador o decantador.

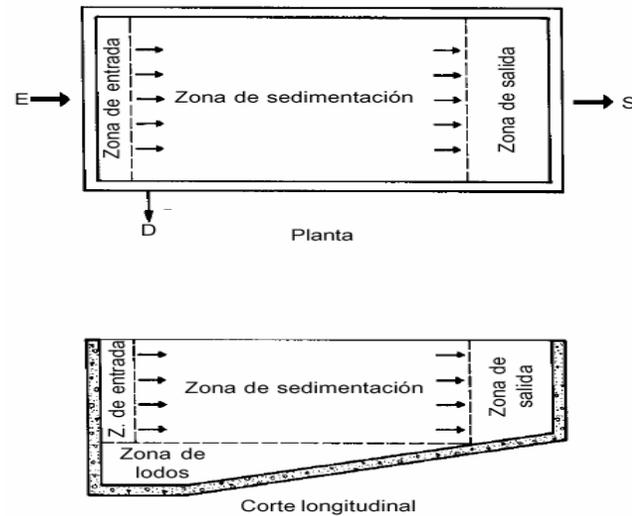


Figura 12. Zonificación de un sedimentador.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

Tipo de Unidades.

Desarenadores. Los desarenadores tienen por objeto remover del agua cruda la arena y las partículas minerales más o menos finas, con el fin de evitar que se produzcan sedimentos en los canales y conducciones, para proteger las bombas y otros aparatos contra la abrasión y para evitar sobrecargas en las fases de tratamiento siguiente y la interferencia en los procesos de coagulación floculación. El desarenado se refiere normalmente a la remoción de las partículas superiores a 0,2 milímetros. Una granulometría inferior corresponde a los procesos de presedimentación o sedimentación. El estudio teórico del desarenado está relacionado con el de los fenómenos de sedimentación en caída libre. Al estudiar la ubicación de una captación, debe evitarse al máximo el arrastre de arena, diseñando

este tipo de unidades cuando la calidad de agua así lo exige. En el caso particular de que se incluya en la instalación un presedimentador, se podrán eliminar en el desarenador solamente partículas de dimensiones superiores a 0,3 milímetros de diámetro. Si la instalación incluye tamizado o microcernido (con mallas de 1 a 2 milímetros, por ejemplo), deberá efectuarse un desarenado previo para evitar problemas en los tamices. Generalmente, los desarenadores tienen forma rectangular, como se muestra en la figura 13.

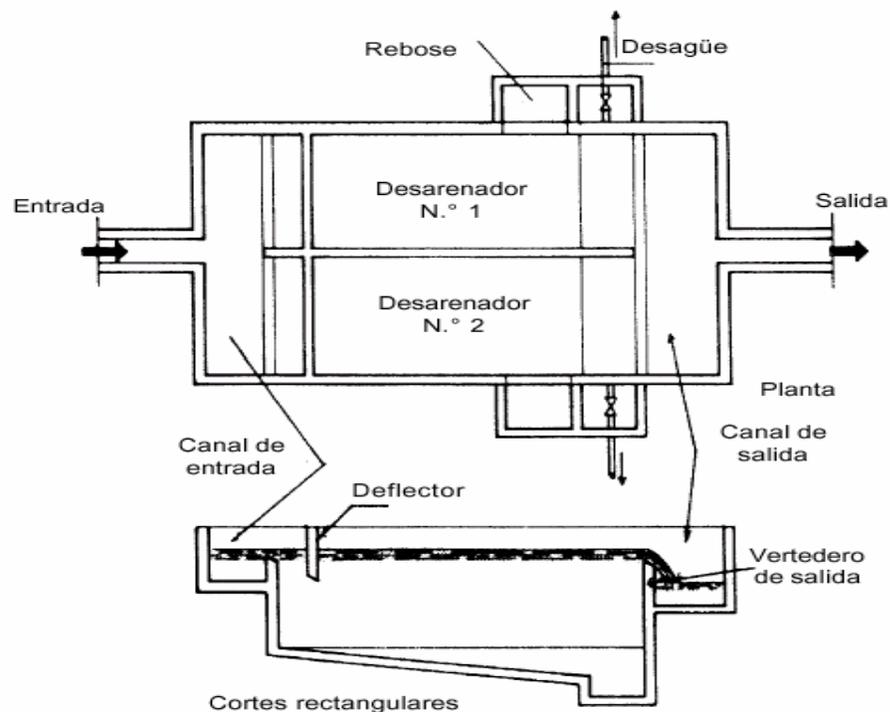


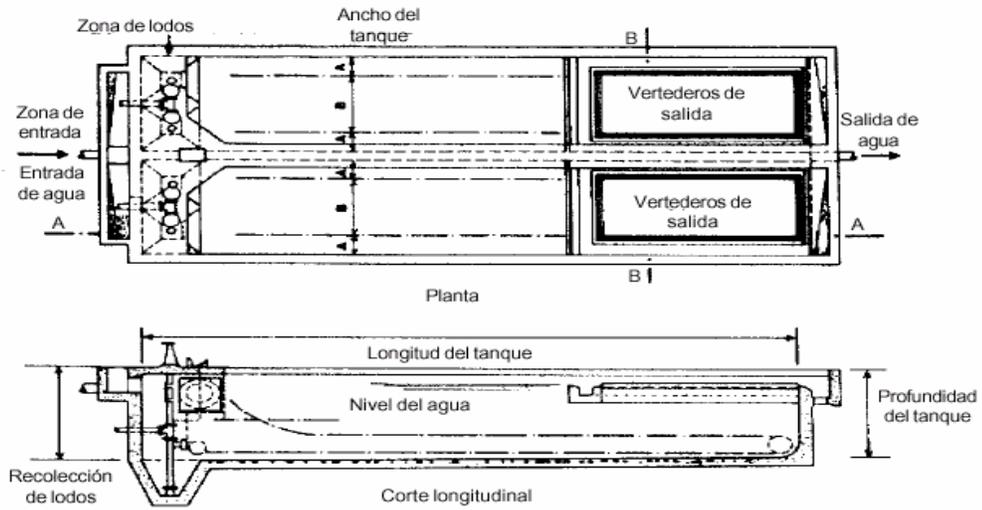
Figura 13. Desarenador Rectangular.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

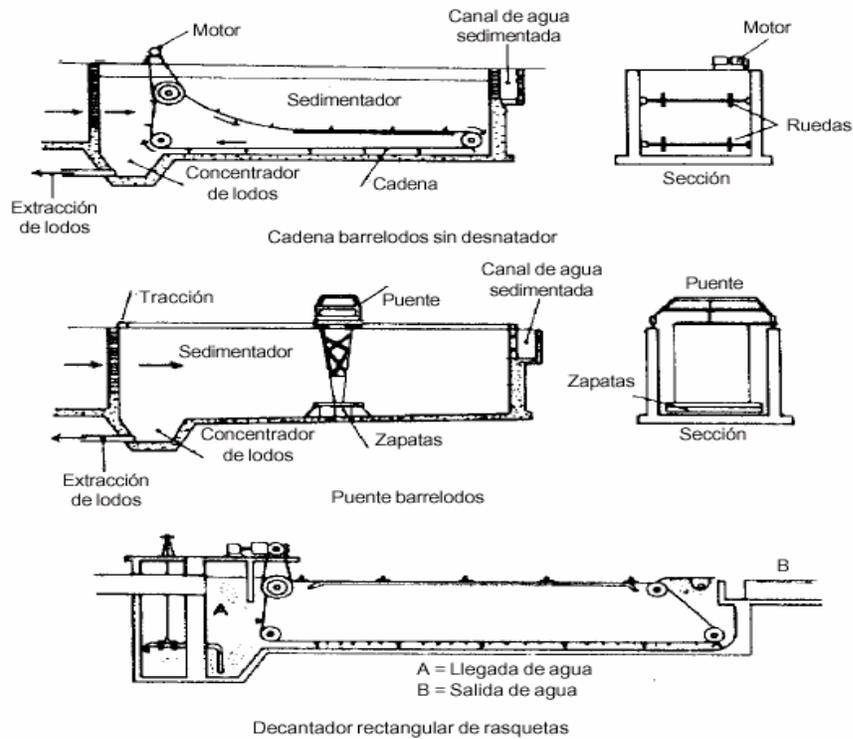
Unidades de flujo horizontal. Estos sedimentadores se clasifican, de acuerdo con la forma de su planta, en rectangulares, circulares y

cuadrados. Los decantadores o sedimentadores rectangulares tienen la forma y características detalladas en la figura 14, con la ventaja de que permiten una implantación más compacta, aunque su costo es más elevado. Normalmente, tienen una relación longitud/ancho comprendida entre 3 y 6 y una profundidad de 2,50 a 4,00 metros.

Los sedimentadores o decantadores de forma circular o cuadrada (figura 15) disponen normalmente de una zona de entrada ubicada en el centro de la unidad. Están provistos generalmente de una pantalla deflectora que desvía el agua hacia el fondo de la unidad. El flujo en la zona de sedimentación es horizontal.



a) Sedimentadores horizontales de forma rectangular



b) Sistemas de remoción de lodos en sedimentadores rectangulares

Figura 14. Sedimentadores o decantadores estáticos rectangulares

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

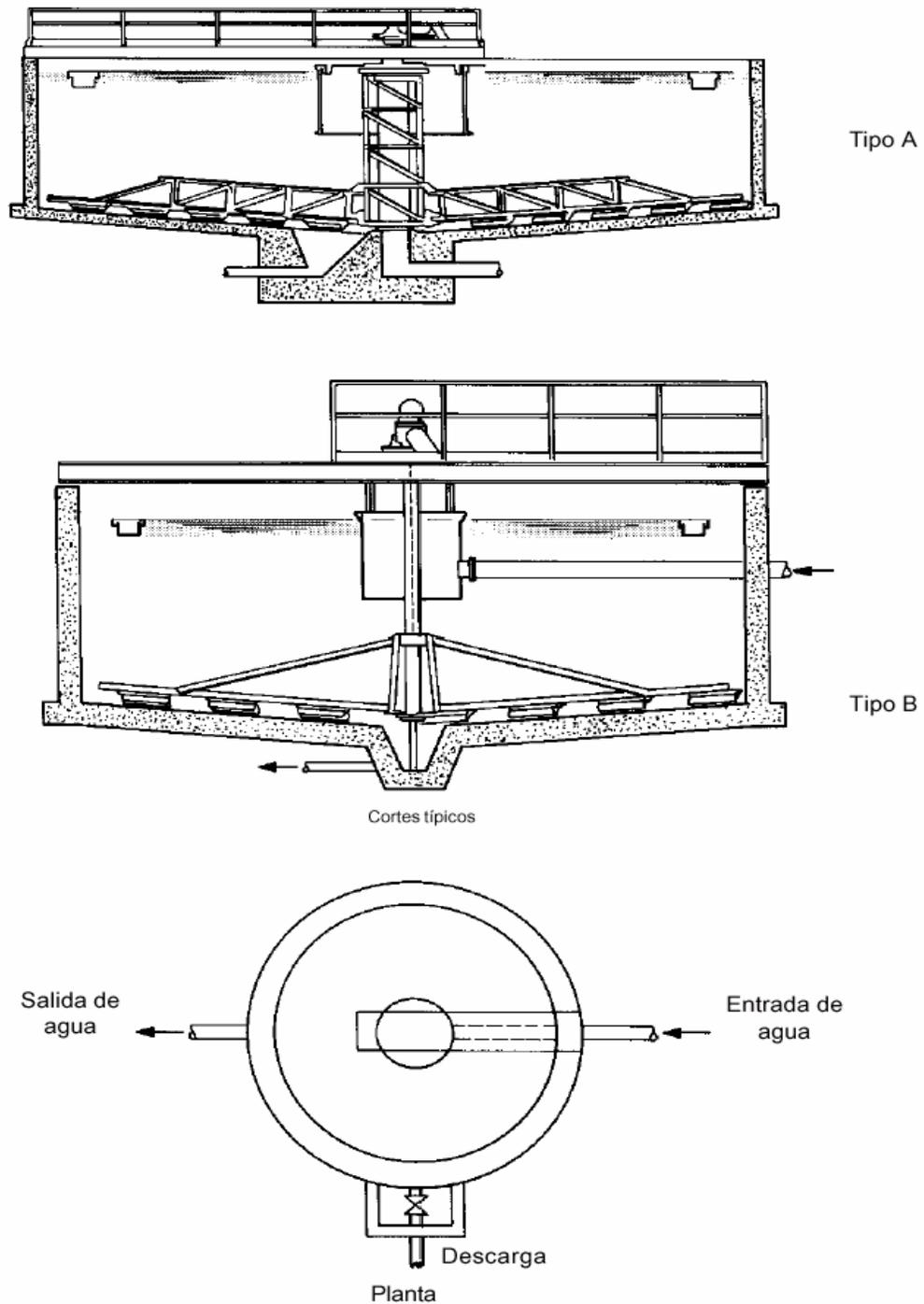


Figura 15. Sedimentadores o decantadores estáticos circulares.
 FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

Están provistos de canaletas (periféricas y/o radiales) para la recolección de agua sedimentada. El fondo es inclinado hacia el centro de la unidad, donde se ubica un sumidero para la recolección de lodos. La profundidad normal de estas unidades está comprendida entre 2,00 y 3,50 metros.

En los diferentes tipos de unidades de flujo horizontal, la remoción de los lodos o sedimentos puede hacerse en forma intermitente o continua. Se usa el sistema de remoción intermitente de lodos en pequeñas instalaciones o cuando se trata un agua relativamente clara. Es necesario vaciar el tanque cada cierto tiempo y extraer los lodos manualmente, con la ayuda de mangueras de agua a presión. Usualmente, los sedimentos se compactan y transforman en una masa pastosa que resbala muy difícilmente; se requieren pendientes de 45° a 60° en el fondo de los tanques. El tamaño de la zona de lodos dependerá del periodo de funcionamiento del sedimentador y de la cantidad de lodos producidos. Para la remoción continua de lodos, se utilizan sistemas mecánicos denominados *barrelodos*. En la figura 14 se detallan los tipos más usuales de sistemas de barrido de lodos de sedimentadores rectangulares: cadenas con paletas (con y sin desnatador) y puente con sistema de palas o de succión. En la figura 15 se indican los sistemas de barrido de lodos utilizados en sedimentadores o decantadores circulares o cuadrados.

Unidades de flujo vertical. Estas unidades tienen forma cilíndrica (figura 16). La entrada del agua cruda se realiza por el centro de la unidad en forma descendente. En la parte inferior está ubicada la zona de lodos, que tiene forma cónica con pendiente de 45° a 60° , según la naturaleza del agua y el tratamiento aplicado. La recolección del agua sedimentada se realiza en la parte periférica superior de la unidad.

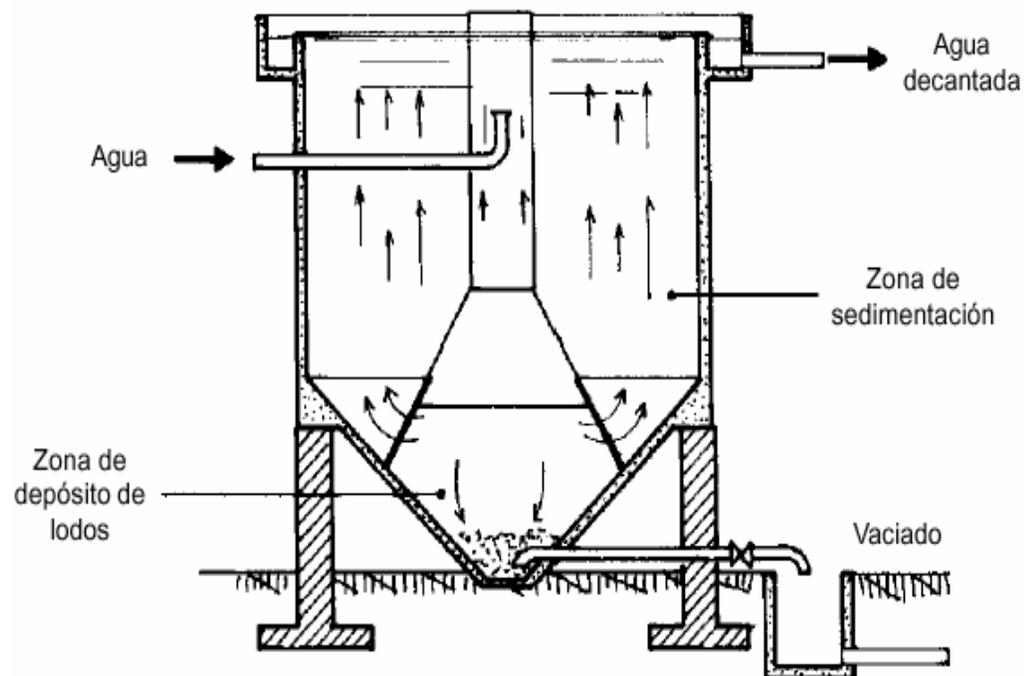


Figura 16. Sedimentador estático de flujo vertical.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

Unidades de flujo helicoidal. Para tratar aguas con alto contenido de materiales en suspensión o flóculos con alta velocidad de sedimentación,

se recurre al uso de sedimentadores de flujo helicoidal. Estas unidades tienen forma circular (figura 17). El flujo tangencial se logra mediante la combinación de una tubería y canales periféricos con orificios de entrada de agua. Los orificios son dimensionales y se disponen espaciados para permitir una distribución uniforme del agua en el sedimentador. El canal recolector de agua sedimentada está ubicado en el centro del sedimentador o en la periferia. Generalmente, una pantalla vertical contribuye a lograr una mejor distribución y a evitar cortocircuitos. Es muy importante tener en cuenta que se trata de unidades poco conocidas y, por ende, existe una carencia de datos operacionales fidedignos.

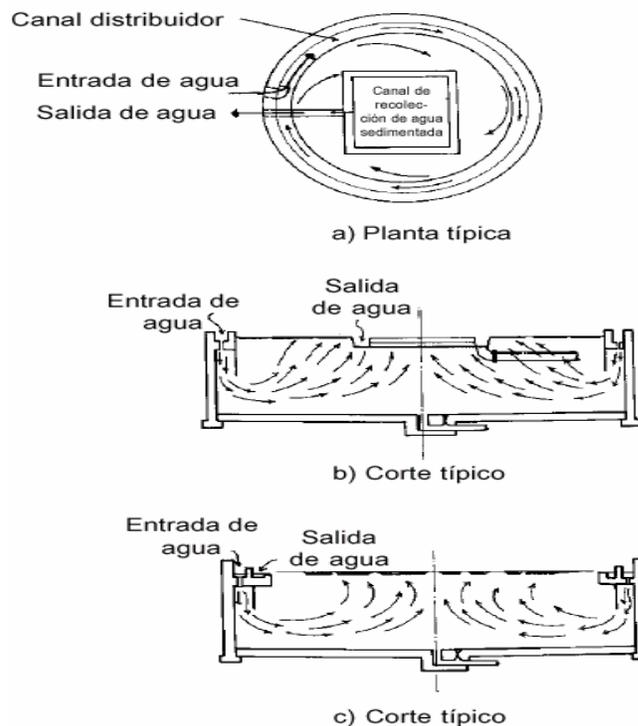


Figura 17. Sedimentador Estático de Flujo Helicoidal.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

2.4.2 Decantadores dinámicos.

Criterios Generales.

La teoría de la decantación interferida se aplica a este tipo de unidades. Se requiere una alta concentración de partículas para incrementar las posibilidades de contacto en un manto de lodos que tiene una concentración de partículas de 10 a 20% en volumen. En el proceso, el flóculo no conserva su peso específico, su tamaño ni su forma constante. Las partículas pequeñas que entran por el fondo son arrastradas por el flujo. Al chocar estas con otras, incrementan su tamaño de acuerdo con la ecuación de Von Smoluchowski. Se entiende que en la zona del manto de lodos se promueve la floculación y en la parte superior a ella ocurre la decantación.

La eficiencia de los decantadores de manto de lodos depende del tipo y la dosis de coagulante, del uso de polímeros, de la calidad del agua cruda, del tamaño de las unidades (la eficiencia es inversamente proporcional al tamaño), de la profundidad y concentración del manto de lodos y, principalmente, de la carga superficial.

2.4.3 Componentes de una unidad.

Una unidad de manto de lodos consta básicamente de los siguientes componentes (figura 18):

- 1) Sistema de entrada de agua
- 2) Zona de formación del manto de lodos
- 3) Zona de clarificación
- 4) Sistema de recolección de agua clarificada.
- 5) Zona de concentración de lodos.

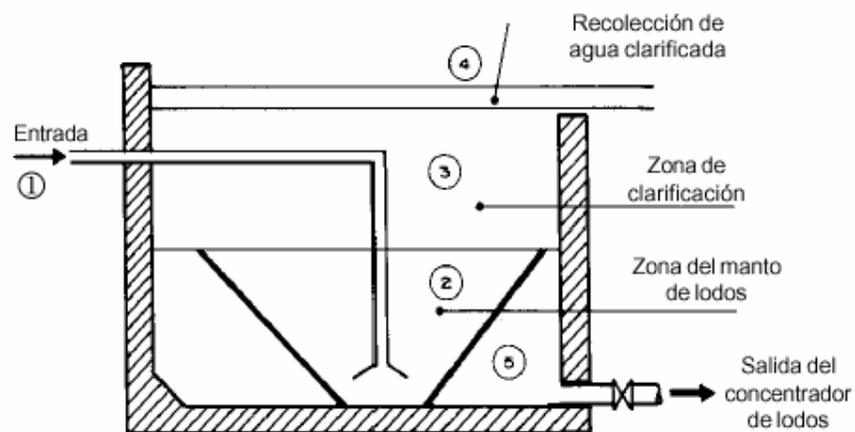


Figura 18. Componentes de un Clarificadores de Manto de Lodos.
FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

2.4.4 Tipos de Unidades Dinámicas.

Los decantadores de manto de lodos se pueden clasificar de acuerdo con las condiciones y características de la zona de formación de lodos, que se resumen en la siguiente tabla.

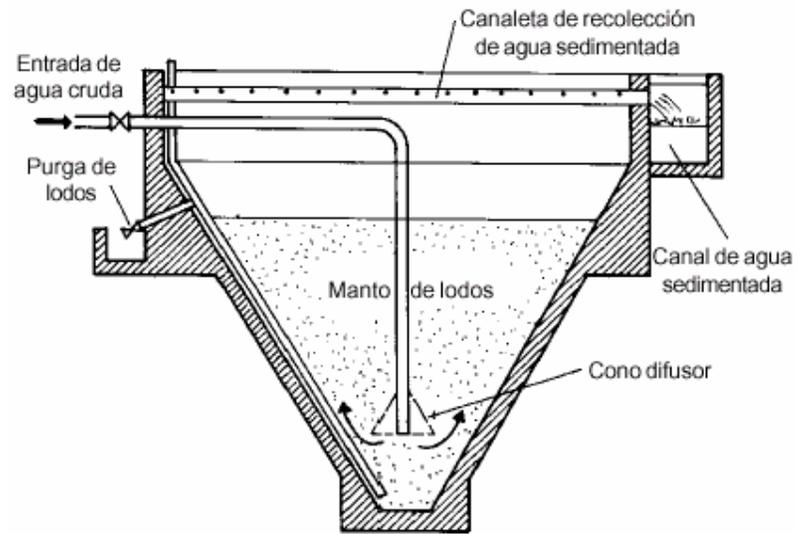
TABLA 2. Características de decantadores de manto de lodos

Tipo de suspensión	Mezcla de lodos	Control de la altura del manto de lodos	Tipo de flujo
Hidráulica	Sin recirculación	Con vertedero Sin vertedero	Constante Pulsante
Mecánicos	Sin recirculación	Con vertedero	Constante con Separación dinámica
	Con recirculación	Sin vertedero	Constante con agitación

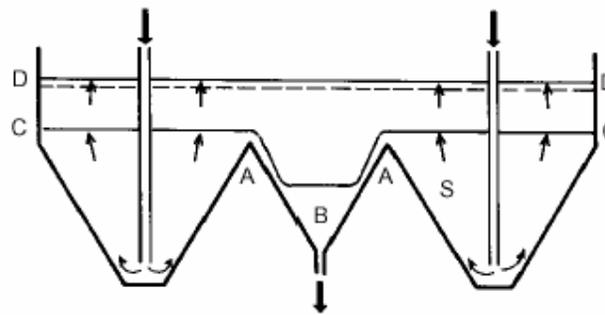
FUENTE: Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua. Manual III Teoría, tomo 11, *Sedimentación*. Serie Filtración Rápida, 1992.

A continuación se describen algunos de los tipos principales de unidades.

Unidades de manto de lodos con suspensión hidráulica. Estas unidades fueron las primeras que se construyeron. Consisten esencialmente en un tanque de fondo cónico o tronco piramidal, en cuya parte inferior se inyecta el agua cruda que asciende disminuyendo la velocidad a medida que el área aumenta y manteniendo así un manto de lodos hidráulicamente suspendido .Figura 19..



Clarificador con fondo cónico



Sedimentador de Bacchus Marsh

Figura 19. Decantadores de manto de lodos.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

Los lodos se extraen periódicamente por un tubo que baja hasta el fondo. Esta extracción puede ser hecha en forma manual o automática. La entrada del agua puede hacerse inyectando el flujo directamente en el fondo para que se produzca turbulencia al chocar contra las paredes del fondo. Para obtener un buen rendimiento, debe prestarse especial atención a la forma de entrada del agua. Excesiva turbulencia puede producir perturbaciones que afectan todo el manto de lodos. La ventaja de estas unidades es que no son patentadas; no tienen, por lo general, ninguna pieza movable dentro del tanque ni requieren energía eléctrica para su funcionamiento.

Algunos proyectistas prefieren utilizar vertederos en la parte superior para el control de la altura del manto de lodos, de modo que se viertan en un concentrador lateral. Unidades de manto de lodos con suspensión mecánica. Las unidades que usan sistemas mecánicos para mantener el manto de lodos en suspensión pueden ser, en general, de tres clases:

a) Unidades de manto de lodos con agitación simple

Las unidades de agitación simple consisten en tanques por lo general circulares, en los cuales al agua es inyectada por abajo, de tal forma que se distribuya en el fondo. Un agitador mecánico que gira lentamente en el fondo, movido por un motor o por agua a presión, mantiene las partículas

en suspensión y recolecta los lodos en un concentrador, de donde son removidos periódicamente (figura 20).

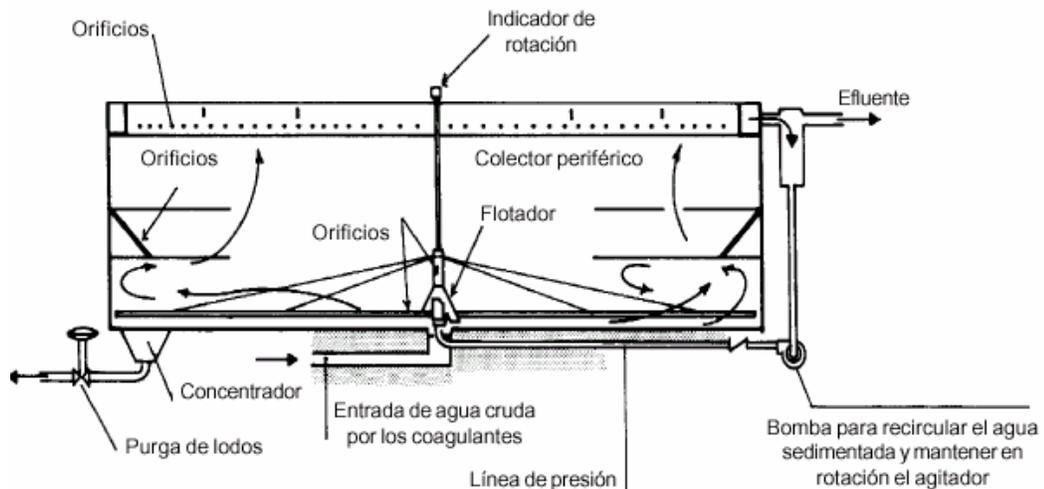


Figura 20. Unidad de Manto de Lodos con Agitación Simple.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

El agua tiene que ascender hasta las canaletas periféricas superiores y se filtra a través del manto de lodos. En estas unidades no existe recirculación de lodos.

b) Unidades de manto de lodos con separación dinámica

Las unidades que emplean separación dinámica utilizan una turbina que gira a alta velocidad, colocada en el centro del tanque, la cual impulsa el flujo hacia abajo a través del orificio periférico, de forma tal que las partículas que descienden empujadas por la energía mecánica de la turbina choquen con las que ascienden con el flujo del tanque.

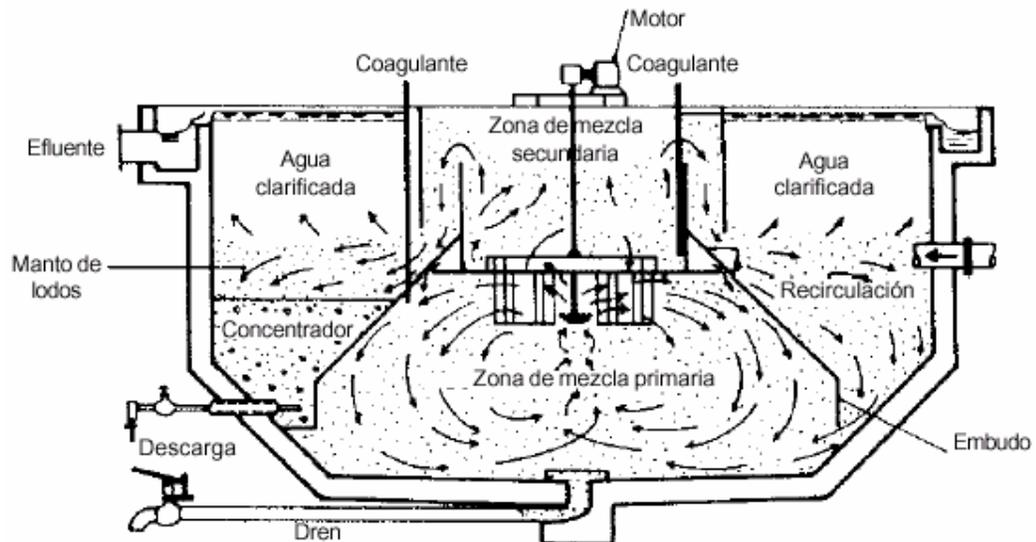


Figura 21. Unidades de separación dinámica Acclator Infilco.
FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

En estos tanques se pueden considerar cuatro zonas: una primera zona de mezcla y reacción en la parte interior, donde se inyectan los coagulantes; una segunda zona de mezcla lenta o floculación; una tercera zona donde se establece el manto de lodos y, por último, una cuarta zona en la que se produce la decantación y el agua clarificada sube hasta las canaletas de salida. Los lodos son recogidos en el concentrador en un sector del tanque y extraídos automáticamente cada cierto tiempo según la turbiedad del agua cruda (figuras 22 a 23).

En el decantador de Brno (Checoslovaquia) el manto de lodos queda suspendido hidráulicamente en las secciones tronco-piramidales laterales, si bien dicho decantador tiene un sistema de floculación separado del de

sedimentación; además, tiene una serie de vertederos sumergidos para controlar la altura del manto. El lodo que cae es recogido en los concentradores inferiores y extraído periódicamente.

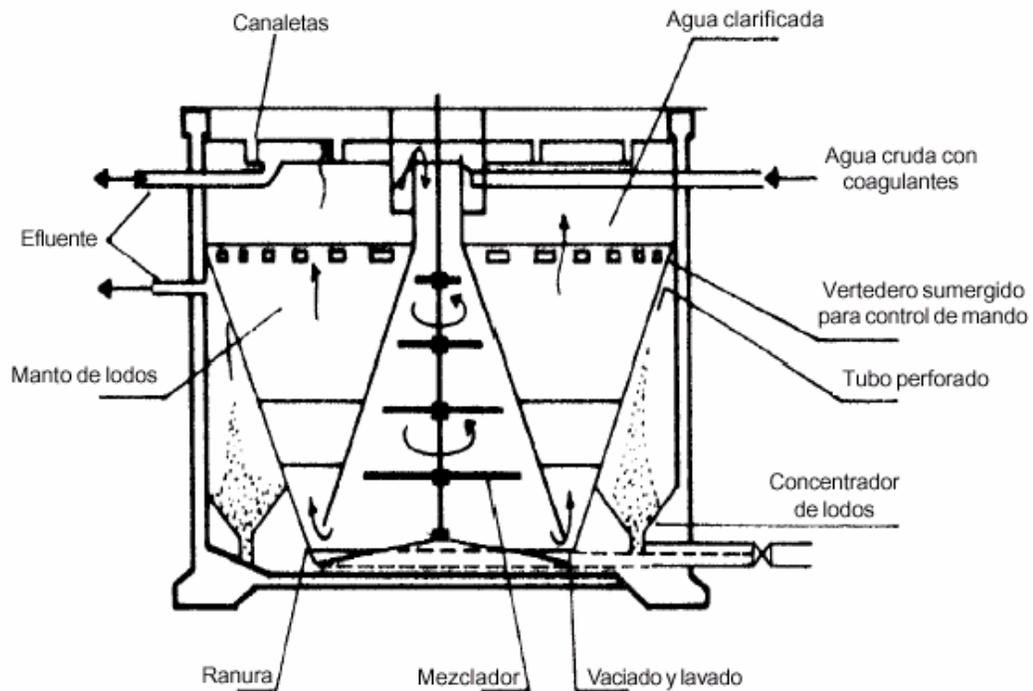


Figura 22. Unidades de separación dinámica Decantador de Brno (Checoslovaquia).

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

Similar solución se utiliza en el decantador con circulación de lodos Aquazur B de Degremont, que dispone de una zona central de floculación rodeada por una zona de decantación. Ambas zonas se comunican por arriba y por abajo. El agua cruda llega por un canal circular situado alrededor de la columna central de mezcla. Una turbina situada en la parte

superior de la zona de floculación hace que el agua floculada pase a la zona de decantación.

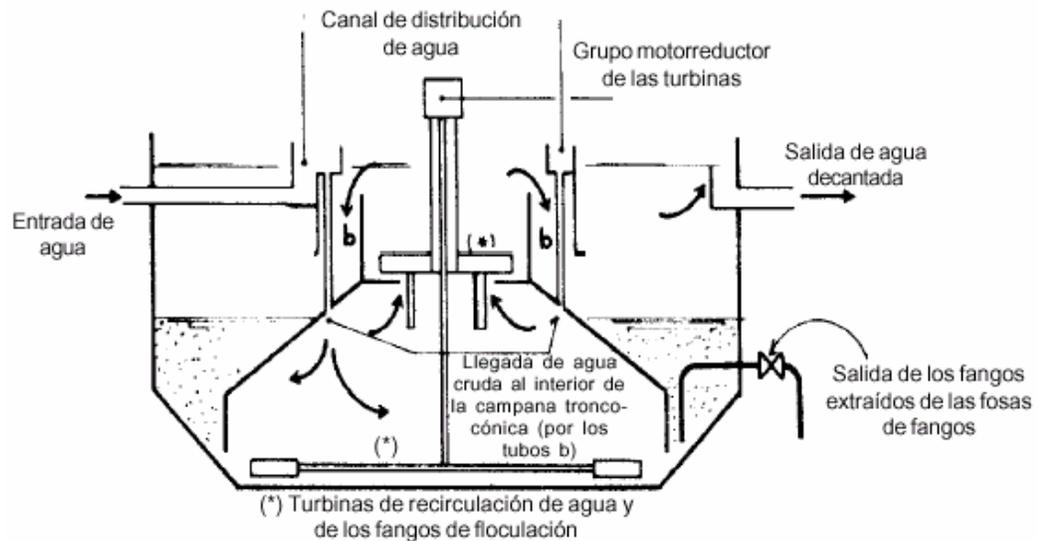


Figura 23. Unidades de separación dinámica Decantador Aquazur-B.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

Los lodos que sedimentan en esta última vuelven, por gravedad, a la zona central. Se produce así un enriquecimiento del lodo, con el que se consigue una floculación rápida y la formación de un precipitado denso. Eventualmente, un agitador de fondo evita la acumulación de sedimentos pesados, que podrían atascar el aparato. Por medio de una o varias tolvas, puede extraerse el exceso de lodos en la forma más concentrada posible.

c) Unidad de manto de lodos pulsante o de vacío

Este tipo de unidades consiste esencialmente en un tanque cuadrado o circular, en cuyo centro se coloca una campana o cápsula de vacío, en la cual periódicamente se disminuye la presión interna con una bomba especial, de modo que el agua ascienda por la campana hasta un cierto nivel y luego se descargue en el tanque y se produzca la expansión de los lodos y se bote el exceso de estos a los concentradores. Esta periódica expansión y contracción del manto se usa para homogeneizarlo. Se evitan las grietas o canales que permiten el paso directo de la turbiedad y la sedimentación de las partículas más pesadas en el fondo de la unidad.

El sistema requiere, por lo tanto, dos tiempos (figura 24). En el primero, la válvula de aire V se encuentra cerrada. El flujo asciende por la campana A, mientras que el agua en el decantador D permanece en reposo, de manera que puede decantar. En el segundo tiempo, al alcanzar el agua el nivel Sen la campana , la válvula de aire V se abre y el agua de la campana penetra en el decantador D. Entonces, los lodos se elevan con el flujo y el exceso penetra en el concentrador C.

El agua decantada se recoge en E. Cuando el flujo alcanza el nivel I en la campana A, se cierra la válvula V. Los fangos depositados en el concentrador se extraen automáticamente por medio de válvulas F.

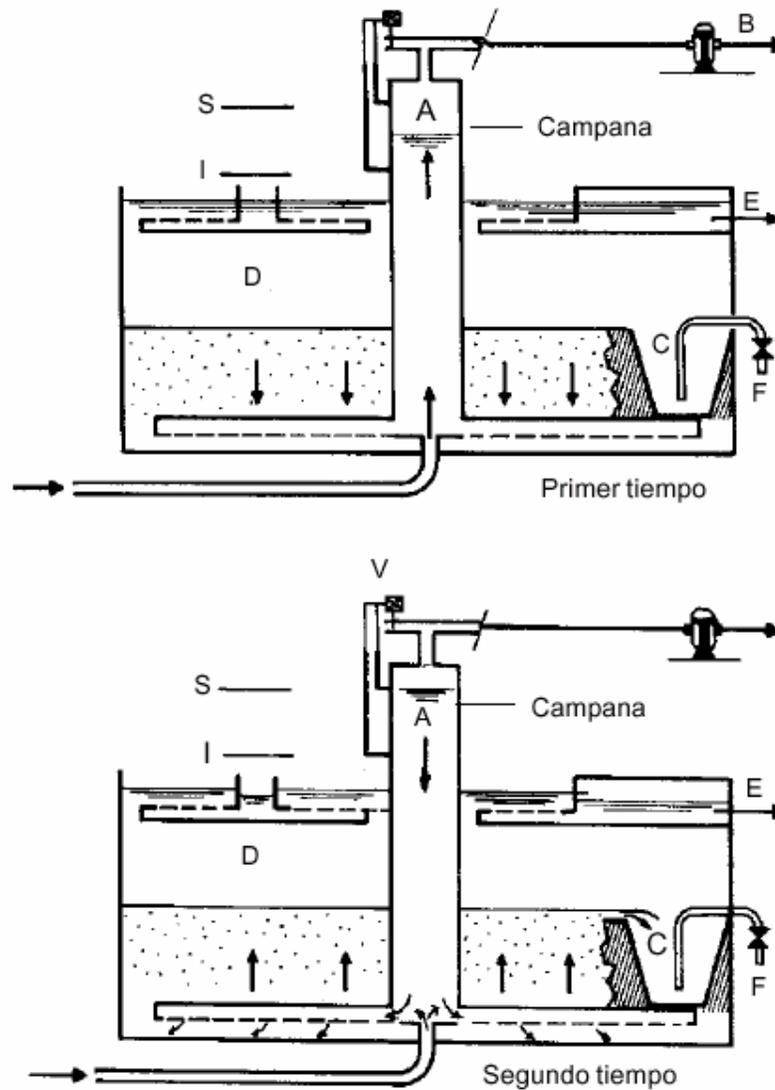


Figura 24. Decantador de Manto de lodos Tipo Pulsante.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

2.4.5 Decantadores laminares.

Teoría de la Sedimentación Laminar.

Como se analizó anteriormente, la eficiencia de los decantadores clásicos de flujo horizontal depende, principalmente, del área. De este modo, si se introduce un piso intermedio a una altura (h) a partir de la superficie, las partículas con una velocidad de sedimentación $V_{sb} < V_{sc}$ serían removidas, como lo demuestra la figura 25, cosa que antes no ocurría.

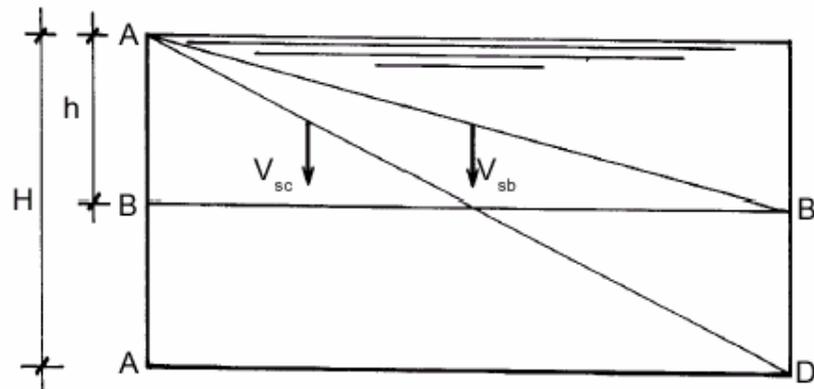


Figura 25. Efecto de Introducción de superficies intermedias de sedimentación en los decantadores convencionales.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

Se podría admitir que la capacidad de clarificación del decantador aumentaría con la duplicación del área horizontal (figura 26). Hace más de 45 años se propuso inclusive un decantador con varios pisos horizontales, con un espaciamiento de 15 cm entre ellos y con remoción mecanizada de lodo.

Se considera que tres son los efectos que favorecen la remoción de las partículas en este tipo de unidades: (i) aumento del área de sedimentación, (ii) disminución de la altura de caída de la partícula y (iii) régimen de flujo laminar.

Debido a las dificultades de mantenimiento, este tipo de unidades permaneció olvidado por mucho tiempo hasta que, a mediados de la década de 1960, se empezó a investigar la sedimentación en tubos inclinados, donde el lodo depositado escurre hacia la parte inferior, sin interferir con las características de la instalación.

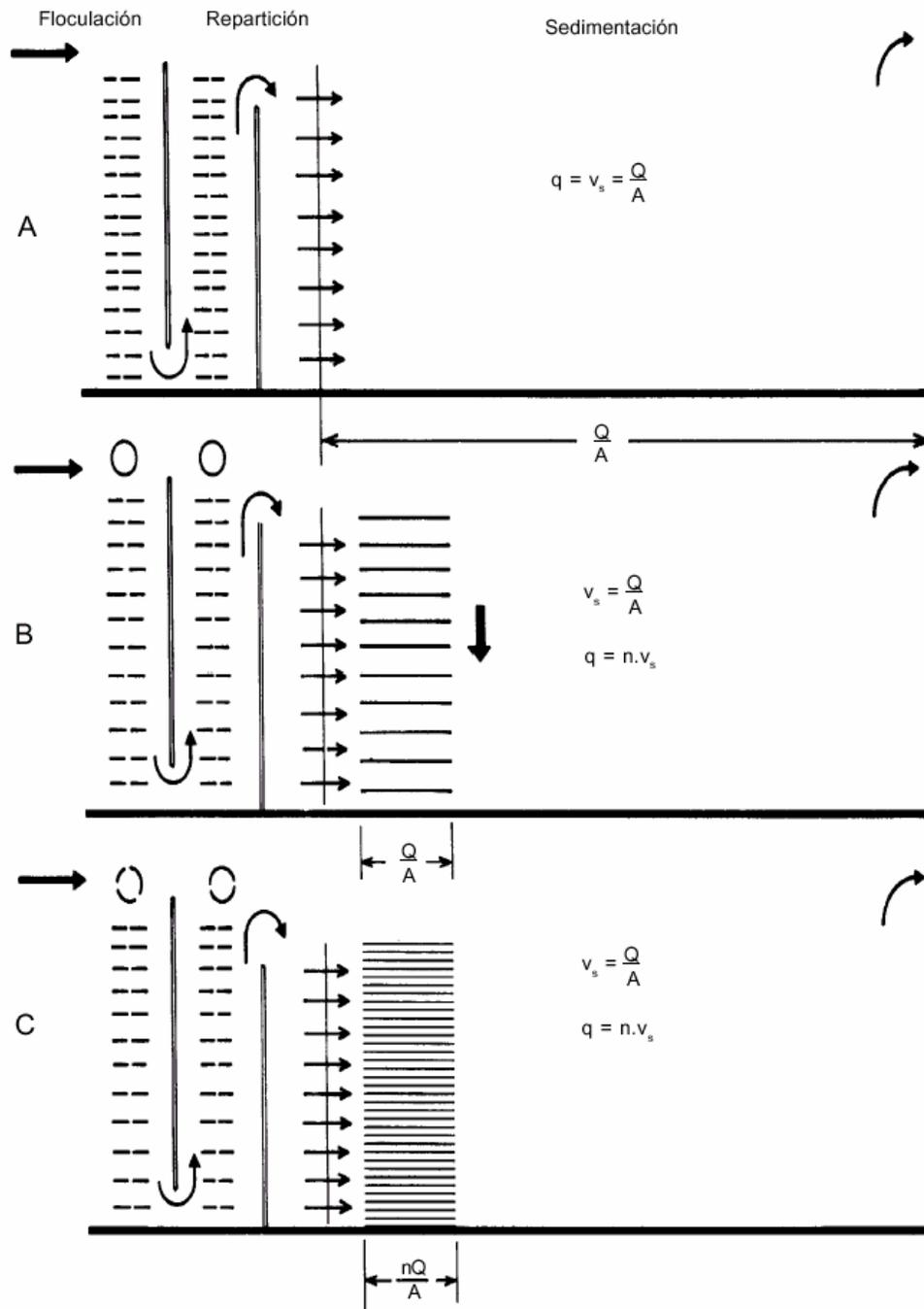


Figura 26. Efecto de Introducción de superficies intermedias de sedimentación en los decantadores convencionales.
FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

2.4.6 Tipos de Sedimentadores laminares.

De acuerdo con la dirección del flujo, los decantadores laminares pueden clasificarse así:

a) De flujo horizontal

En estos el flujo del agua es o tiende a ser horizontal. La figura 27(a) representa un sedimentador laminar con láminas ligeramente inclinadas con un ángulo de 5° (ángulo de máxima eficiencia remocional). En esta solución, se requiere invertir el flujo para realizar la limpieza del sedimentador. Esta solución es muy utilizada en plantas comerciales o plantas de pequeña capacidad (inferior a 50 L/s). Su uso se limita únicamente por razones económicas.

Para evitar el lavado y obtener al mismo tiempo máxima eficiencia y escurrimiento de lodos depositados en las láminas, se puede recurrir a las soluciones indicadas en la figura 27(b). Estos son Sedimentadores laminares de flujo horizontal (máxima eficiencia), pero con láminas planas paralelas inclinadas para obtener la pendiente necesaria de escurrimiento de flóculos.

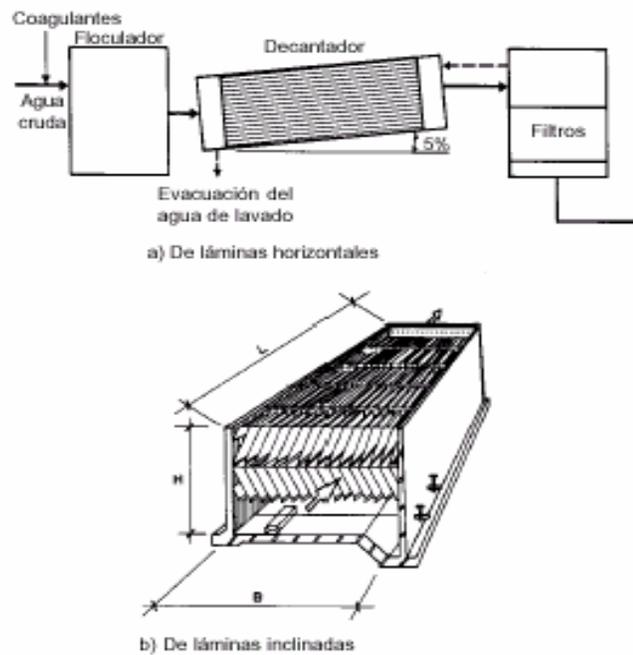


Figura 27. Sedimentador laminar de flujo horizontal.
FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

b) De flujo inclinado.

Este tipo de decantadores es el más usado. Generalmente, en la parte inferior del decantador se presenta una zona de distribución de agua. En la parte media existen módulos inclinados con un ángulo de 60° . El agua decantada se recolecta lateralmente en la parte superior (figuras 28 y 29).

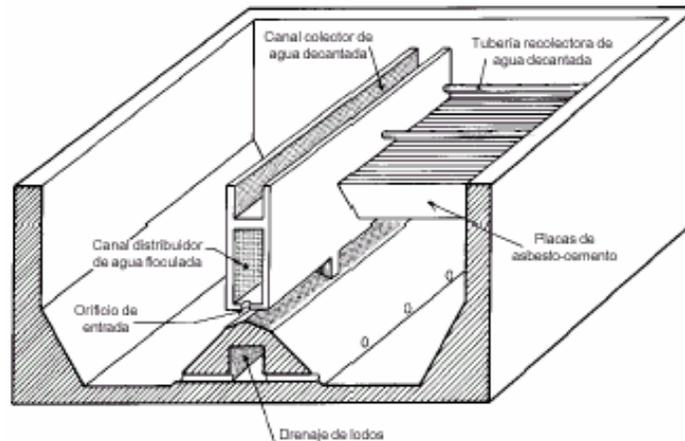
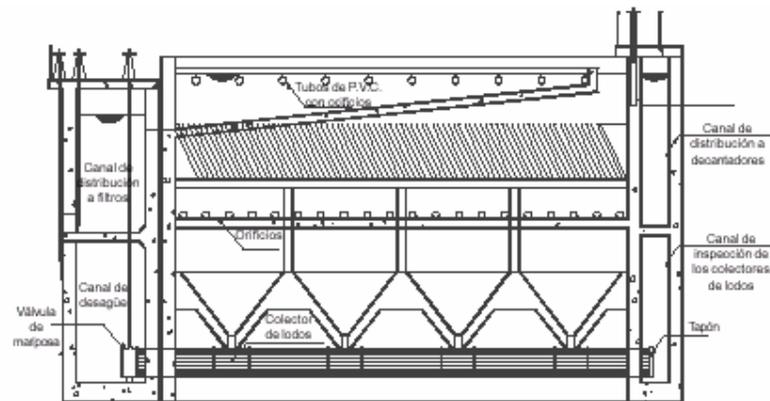


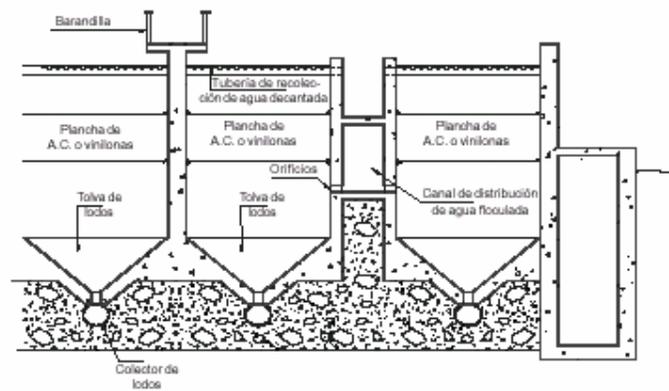
Figura 28. Decantador de placas con canaletas laterales de recolección de agua decantada, tolvos continuos para lodos y extracción mediante sifones.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

Se puede aplicar con éxito decantación laminar con ciertas condiciones de calidad de agua y material transportado, en nuevos diseños o en modificación de desarenadores o sedimentadores convencionales de flujo horizontal, ya sea para incrementar su eficiencia o su capacidad, o ambas cosas simultáneamente.



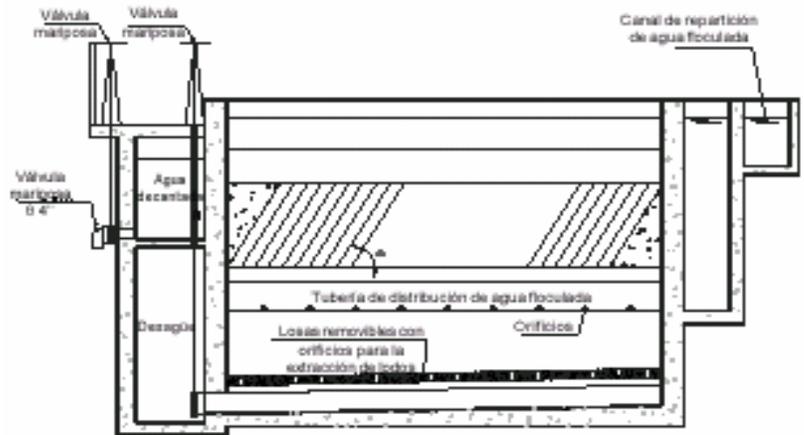
Decantador laminar



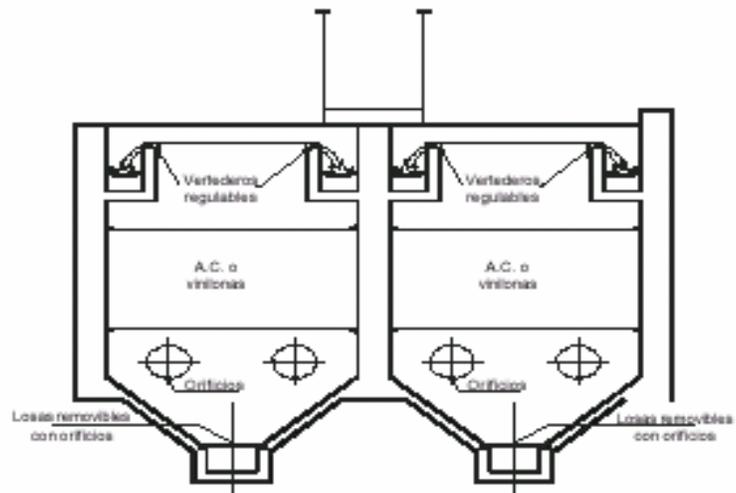
Decantador laminar

Figura 29. Decantador de placas adecuado para plantas grandes: canal central de distribución, sistemas de recolección mediante tuberías y tolvas de lodos con colectores de extracción uniforme.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).



Decantador laminar



Decantador laminar

Figura 30. Decantador de placas adecuado para plantas pequeñas: tuberías de distribución uniforme, vertederos de recolección y canal de extracción uniforme de lodos.

FUENTE: Water and wastewater engineering. (1968).

2.5 Teoría Columnas de Sedimentación.

2.5.1 Etapas de las Columnas de Sedimentación.

En base a la concentración y a la tendencia a la interacción de las partículas pueden efectuarse cuatro clasificaciones generales sobre la forma de dichas partículas que se depositan. Es frecuente que se produzca más de un tipo de sedimentación en un momento dado durante la sedimentación y también es posible que los cuatro tipos se tengan en forma simultánea.

Sedimentación del tipo 1

Esta se refiere a la sedimentación de partículas discretas en una suspensión de sólidos de concentración muy baja. Las partículas se depositan como entidades individuales y no existe interacción significativa con las partículas más próximas. Un ejemplo típico es una suspensión de partículas de arena. Este tipo de sedimentación también se le conoce como sedimentación libre.

Sedimentación del tipo 2

Se refiere a una suspensión diluida de partículas que se agregan, o flocculan durante la sedimentación

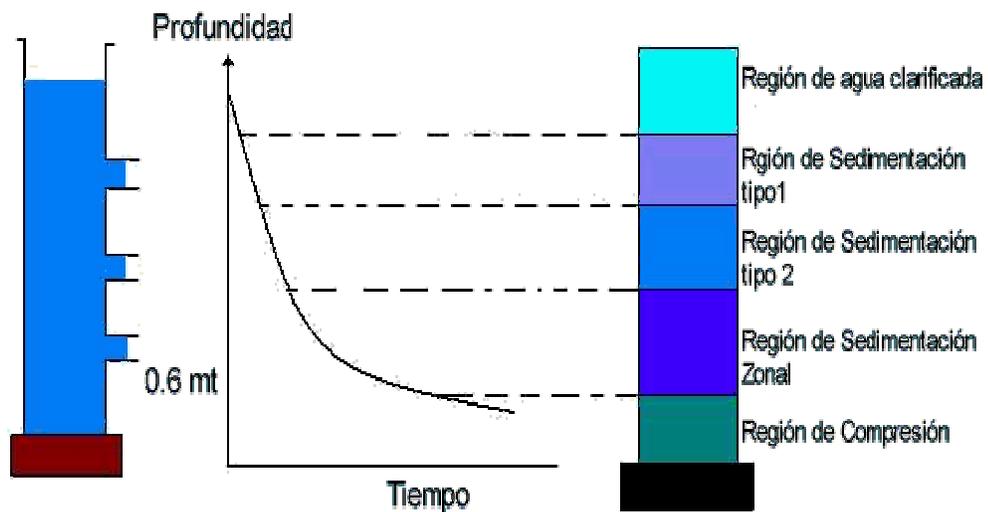


Figura 31. Columna de Sedimentación, Esquema de las Regiones de Sedimentación.

FUENTE Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile..



Foto 1. Esquema de Zonas de Sedimentación.

Sedimentación Zonal y por Compresión

En los sistemas que tienen gran cantidad de sólidos en suspensión, además de los otros tipos de sedimentación (tipo 1 y 2), suele producirse una sedimentación zonal y por compresión. Debido a las características hidráulicas del flujo alrededor de las partículas y de las fuerzas interparticulares, aquellas depositan como una zona o "en capa", manteniéndose la posición relativa entre ellas. Conforme esta zona va sedimentando se produce un volumen de agua relativamente clara por encima de la región de sedimentación zonal, consiste en un escalonamiento de concentración de sólidos a partir de la hallada en la región de sedimentación del tipo 2 hasta que se encuentren la región comprimida.

A medida que se prosigue la sedimentación, comienza a formarse en el fondo del cilindro una capa de partículas comprimidas. Las partículas de esta región forman aparentemente una estructura en la que existe un contacto físico entre las mismas. Cuando se forma la capa de compresión, las regiones que tienen las concentraciones de sólidos cada vez menores que las halladas en la región de compresión se van desplazando hacia la parte superior.

Análisis de la Sedimentación Retardada

La sedimentación retardada tipo BATCH, ha sido empleada por años como un método, para el diseño de sedimentadores secundarios. Aunque esta es una importante aplicación de esta técnica, otra importante aplicación de la sedimentación tipo batch es la generación de las curvas de flujo de sólidos, que pueden ser usadas en el diseño de sedimentadores secundarios y también para controlar información en una planta. Un lodo activado

Calculo del Área de un Sedimentador a partir de la grafica H_0 vs. t .

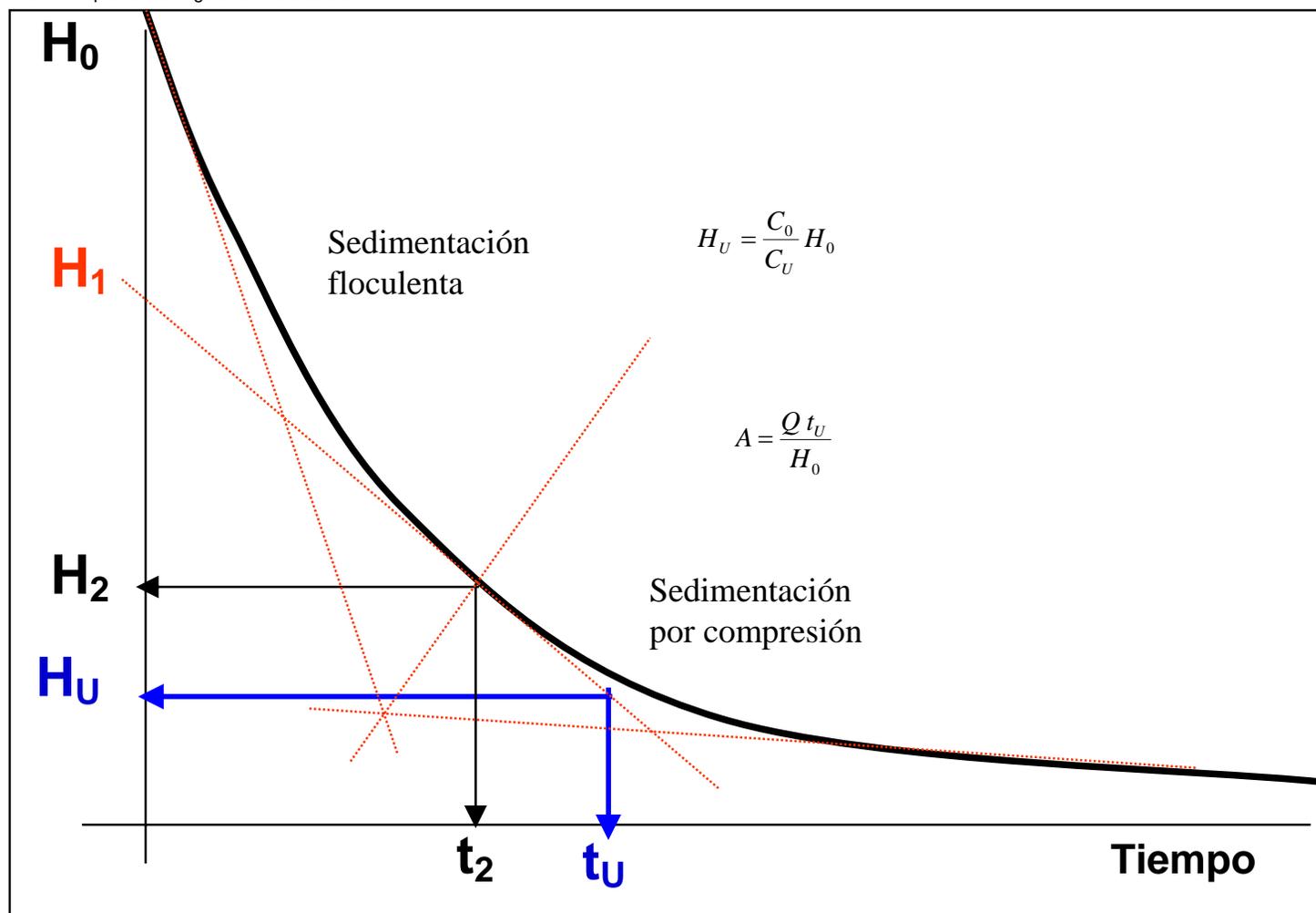
A continuación se detalla el calculo de Área de un sedimentador a partir de una curva H_0 vs. t . La grafica de análisis de sedimentación retardada consta de los siguientes pasos.

- Trazamos dos tangentes a la curva H_0 vs. t , donde H_0 es la altura de la columna de sedimentación y t es el tiempo que transcurre, durante el proceso de sedimentación.
- Luego de esto se traza una directriz, partiendo de la intersección de las tangentes, la cual divide nuestra grafica en dos zonas llamadas, sedimentación flocúlenla y sedimentación por comprensión.
- Del punto de intersección de la directriz con la curva, cortamos el eje de las Y , para obtener la altura H_u (grafica) , de igual manera

prolongamos al eje X, obtenemos el tiempo en el cual la sedimentación floculenta, cambia a sedimentación por compresión.

- Es importante citar que este valor calculado gráficamente no difiere mucho en cuanto al valor teórico. Con estos datos procedemos a calcular el área del sedimentador, teniendo el caudal (Q), tiempo (t_u), y la altura de la probeta (H_0). Ver figura 32

Figura 32. Análisis de Sedimentación Retardada.
Fuente: Apuntes de Ingeniería Sanitaria II.



2.5.2 Criterios Generales.

Los criterios presentados a continuación han sido obtenidos del centro de Investigación para la gestión de Recursos Ambientales (Centre de Enseignement de Recherche para la Gestión de Recursos Naturales y Medioambiente CERGERENE) de Francia. Este centro usa columnas pequeñas para medir partículas sedimentables y establecer velocidades de sedimentación. La variación del asentamiento y velocidad de distribución puede ser utilizado para mejorar el proceso de tratamiento, selección y diseño en condiciones de caudal extremo

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) junto con el laboratorio de manejo de Riesgos de Suministro de Agua, la División de Manejo de Aguas Urbanas, (New Jersey) y John Meunier Inc.(Canada) establecieron un acuerdo de investigación , que estableció columnas apropiadas para obtener datos de distribución de velocidad de las partículas.

El nuevo método de columnas, es pensado para ser usado fácilmente en campo.

2.5.3 Columnas de Sedimentación.



Foto 2.- Columnas de Sedimentación.

Las columnas tradicionales de sedimentación para determinar la relación asentamiento de interfase y la velocidad de sedimentación, se usan para analizar diferentes muestras. Camp (1945) publicó curvas de sedimentación usando la Ley de Stoke. La presente tesis se basó en esta ley para graficar las curvas de sedimentación. Cabe mencionar que Eckenfelder (1966) usó esto como ayuda para procesos de sedimentación y para análisis de floculación.

La típica columna larga es un aparato relativamente largo (Camp (1945)), Eckenfelder (1966), Dalrymple (1975), de 1.8 a 2.5 m de altura y con un diámetro de 20 a 30 cm a lo largo de su profundidad. La altura de la columna simula el efecto asentamiento como ocurre en un tanque de sedimentación, normalmente construidos con profundidades mayores a 2.5 m . Para estas columnas, se requiere un espacio extenso debido a su tamaño. Varios métodos han sido usados para premezclar la muestra antes de realizar el ensayo en la columna. Se usa platos de rotación dependiendo de las especificaciones. Alrededor de 40 a 80 l (10 y 20 gal) son necesarios para llenar las columnas. La altura de agua en la columna es medida. Las muestras, son retiradas a través de puertos colocados desde la parte superior a la inferior de la columnas. Son puertos equidistantes hasta llegar al fondo. La profundidad de agua en la columna es medida cada cierto intervalo de tiempo.

La mas notable dificultad con este método, es la inhabilidad para desarrollar una mezcla homogénea inicial de sólidos suspendidos, en el tiempo inicial t_0 debido al peso de las partículas. Esto es parcialmente causado por el tiempo que se toma en llenar la columna, y el tiempo requerido en retirar la muestra de todos los puertos. Pisano (1984) extendió y monto en las columnas largas un dispositivo que permitía rotación axial

en un intento de lograr una mejor homogenización de SS en la concentración t_0 .

Columnas CERGRENE

CERGRENE (Chadirat, 1997) desarrollo un nuevo diseño, que usa una secuencia de pequeñas columnas, analizando la velocidad de sedimentación de las partículas. En lugar de muestras de varias fracciones en una sola columna, la CERGRENE uso diferentes columnas de sedimentación. Estas columnas de sedimentación, diseñadas para muestras con SS de condiciones de alta turbiedad.

Las nuevas columnas son llenadas en un tiempo muy pequeño (aproximadamente 7 s), y puede lograrse una mezcla completa de la muestra en el tiempo inicial t_0 .

Otras Columnas

Otros métodos desarrollados en Europa son:

- Brombach o German (Michelbach y Wohrle, 1993 y Pisano y Brombach, 1996).
- Norwegian Intitute for Water Research (NIVA) (Lygren y Damhaug, 1986 y Walker, 1993).
- Universidad de Aston U.K. (Tyack, 1993).

Estos métodos fueron diseñados específicamente para concentraciones relativamente altas de partículas pesadas en flujos generados por una tormenta. Estas columnas requieren poco análisis ya que son mas

pequeñas. Estos dispositivos usan pequeños volúmenes de prueba, aproximadamente 4 a 12 l. Las German y columnas NIVA (menos de 1 m de profundidad y 5 cm de ancho) son más fáciles de usar en campo. Las columnas Antón miden menos de 2.2 m de alto y tienen dispositivos que giran alrededor del centro de las columnas. Estos métodos proporcionan una mejor representación de altura y velocidad de sedimentación de SS, porque la concentración de la muestra es situada sobre la columna de sedimentación y se deja caer dentro de esta en t_0 .

2.5.4 Selección del Método de Análisis de esta Investigación.

En este capítulo se trató acerca de los diferentes tipos de sedimentación, así como la sedimentación retardada (*ANÁLISIS TPO BATCH*), cuyo análisis está en función de la concentración de flujo de sólidos. Este método ya descrito en páginas anteriores es el método de análisis que más se ajusta para la investigación de la presente tesis. Se utilizaron probetas de 1 L que son apropiadas para el análisis seleccionado. Este análisis se utilizó en el capítulo 3 para calcular la velocidad de sedimentación y área del sedimentador unitario para las diferentes muestras analizadas. El área unitario del sedimentador se puede calcular con mejor precisión mediante el análisis de flujo de sólidos que calcula el flujo de sólidos limitante.

Método de Análisis de flujo de sólidos

Este método se basa en el análisis del flujo de masa de los sólidos en el tanque de sedimentación. En un tanque de sedimentación idealizado que funciona en estado estacionario (Figura 33), existe un flujo constante de sólidos que se mueve en sentido descendente. Dentro del tanque, el flujo descendente de sólidos se produce por sedimentación por gravedad (zonal) y por transporte de masa debido al caudal extraído por el fondo que es bombeado y recirculado.

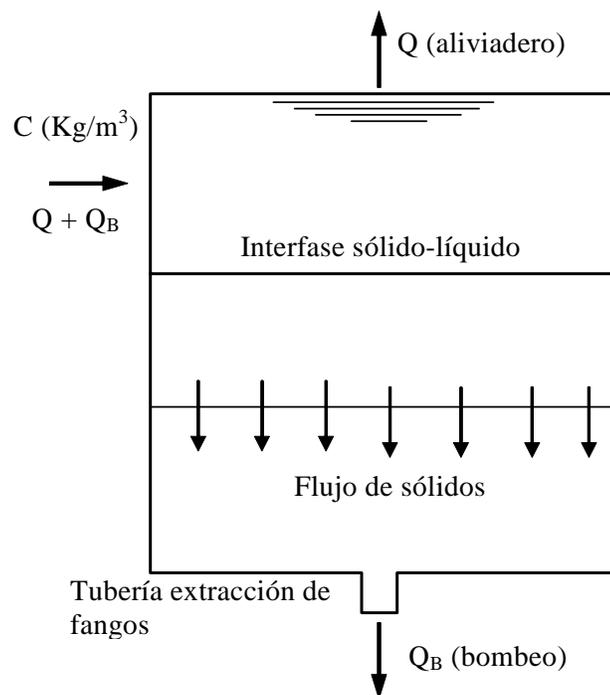


Figura 33. Representación esquemática de un tanque de sedimentación operando en estado estacionario.

FUENTE www.cienciabierta.com

En cualquier punto del tanque, el flujo de masa de sólidos debido a la sedimentación por gravedad es:

$$F_g = C * V_S \quad (19)$$

El flujo de sólidos debido a la extracción es:

$$F_B = C * V_B \quad v_B = \frac{Q_B}{A} \quad (20)$$

El flujo másico total F_S de sólidos es la suma de los componentes anteriores,

$$F_S = F_g + F_B = \frac{C (v_{sed} + v_B)}{1000} \quad (21)$$

La variación del flujo de sólidos con la concentración se representa en la Figura 34.

El flujo de sólidos debido a la sedimentación por gravedad (zonal) depende de la concentración de sólidos y de las características de la sedimentación de los mismos a esa concentración. Como se observa en la Figura 34 a bajas concentraciones (por debajo de 1000 mg/l aproximadamente), el movimiento de sólidos debido a la gravedad es pequeño y aumenta al crecer la concentración de sólidos. A muy altas concentraciones, la velocidad de sedimentación zonal se aproxima a cero, y el flujo total de sólidos debido a la gravedad vuelve a convertirse en un valor muy bajo.

El flujo de sólidos debido al transporte de masa es una función lineal de la concentración con una pendiente igual a la velocidad de extracción de fangos por la parte inferior.

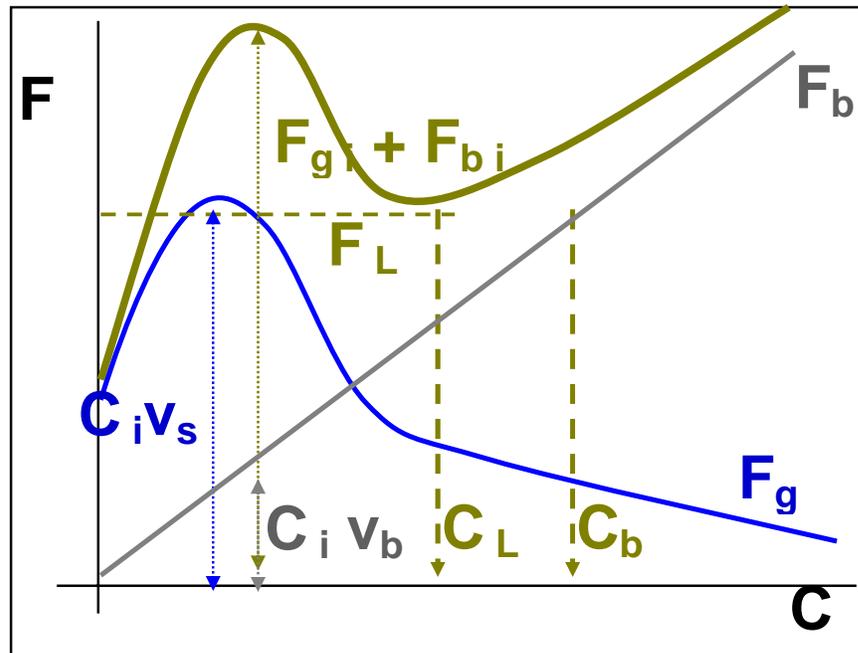


Figura 34. Esquema del Análisis de flujo de sólidos.
FUENTE WWW.CIENCIABIERTA.COM

Existe un flujo de sólidos limitante F_L de tal forma que si la cantidad de sólidos que alimentan el tanque de sedimentación es mayor que ese valor límite, los sólidos se acumularán en el tanque de sedimentación, pudiendo llegar a rebosar por la parte superior del tanque.

Por tanto, se tiene que cumplir que, Ecuación (22)

$$F_s \geq \frac{(Q + Q_B) \cdot C_b}{A}$$

siendo Q el caudal influyente de agua residual

Q_B , el caudal de recirculación del decantador secundario al reactor biológico

C_b , la concentración de sólidos en el reactor. A es el área superficial y de ahí se obtiene el área mínima.

CAPÍTULO 3.- CASOS DE ESTUDIO DE SEDIMENTACION



Instrumentos utilizados en ensayos.

3.1 Generalidades

Se realizará la investigación de tres casos de estudio sobre el fenómeno de sedimentación, los tres casos de estudio a analizar son los siguientes:

Caso de Estudio 1: Agua Residual Artificialmente Preparada.

Caso de Estudio 2: Agua de Lavado de Camiones Mezcladores de Hormigón.

Caso de Estudio 3: Agua del Río Daule cerca de la Estación la Toma.

La investigación consistió en la realización de ensayos de laboratorio (columnas de sedimentación) con aguas residuales de las fuentes anteriormente mencionadas, y el uso de sulfato de aluminio como coagulante. Se presentan los resultados y los análisis de ensayos de laboratorio para determinar los parámetros óptimos de diseño.

Materiales

En el ensayo de columnas de sedimentación se utilizaron cilindros graduados de vidrio de 1 litro de capacidad que normalmente se usan en los ensayos hidrométricos de determinación de granulometría de suelos. Los cilindros existentes en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la FICT tienen diversos diámetros y alturas, tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 3. Dimensiones de cilindros utilizados en los ensayos de sedimentación

Cilindro №	Diámetro (cm)	Altura a la capacidad de 1 litro (cm)
1	5.97	35.75
2	6.08	34.47
3	6.60	29.19

Adicionalmente se utilizaron los siguientes equipos:

- Balanza electrónica con una precisión de ± 0.1 g.
- Mezcladora para preparar el agua residual artificial.
- Cronómetro para registrar el tiempo de ensayo.
- Sulfato de Aluminio en polvo usado para ensayar el efecto de la floculación en las muestras.

Método

La metodología de ensayo aplicada es referida por Tchobanoglous y Burton (1995) para evaluar sedimentación a diversas concentraciones de sólidos suspendidos. En el ensayo se registra la variación de la altura de la interfase sedimento-agua con respecto al tiempo. La curva resultante y su posterior procesamiento ayudan a determinar los parámetros de diseño de un sedimentador apropiado para el tipo de agua analizada. El principio básico de esta curva es que la altura de la interfase decrece pseudo-exponencialmente con el tiempo y por ende, la velocidad de sedimentación.

Adicionalmente, los ensayos fueron realizados en dos fases:

1. Sedimentación de las muestras sin floculación y
2. Sedimentación de las muestras añadiendo una cantidad de sulfato de aluminio como floculante. En esta fase, solamente se ensayaron la muestra de “agua residual” preparada y la del agua del río Daule. El agua residual proveniente del lavado de vehículos mezcladores de

hormigón no necesitó de floculación. Las dosis de floculante ensayados fueron 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 y 2 g/l.

El ensayo de columna de sedimentación fue aplicado a dos suspensiones líquidas de características físico químicas diferentes que presentan una potencial remoción de sólidos por sedimentación.

- Agua “residual” artificialmente preparada mezclando agua potable con suelo pasante del tamiz #200 (partículas menores a 75 μm). Debido a su fácil obtención, la comparación del comportamiento de esta “agua residual” con las otras suspensiones ensayadas es importante para decidir si este tipo de material es o no usado en la enseñanza práctica de Ingeniería Sanitaria. Como parte de la hipótesis planteada, se consideró el uso del pasante #200 de dos muestras de suelo de la misma área disponibles en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la FICT. Se asumió que el comportamiento de ambos suelos sería el mismo debido a que provenían del mismo sitio (no se determinaron ni propiedades geomecánicas ni físico químicas de las muestras de suelo). Se analizaron 129 g del Suelo A distribuidos en concentraciones de 4, 6 y 8 g/l; y 610 g del Suelo B distribuidos en concentraciones de 10, 15, 20 y 40 g/l (ambos casos sin y con floculación). Las cantidades seleccionadas para cada tipo de suelo dependieron exclusivamente del material disponible en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la FICT al inicio de la investigación.

- Agua residual proveniente del lavado de vehículos mezcladores de hormigón cuya concentración inicial fue de 61.7 g/l. Para realizar el ensayo a concentraciones mayores, primero se sedimenta una muestra de líquido original. Luego, se separa el líquido decantado y se guarda el sedimento de fondo. El sedimento retirado es añadido a una muestra de líquido original. Este procedimiento se repite el número de veces necesarias para obtener una concentración mayor a la inicialmente ensayada. Debido a la limitación en la disponibilidad de muestra, solamente se logró dos muestras concentradas a 85.6 y 105.3 g/l, adicionales a la originalmente ensayada.
- Agua proveniente del Río Daule cuya concentración inicial fue de 8.85 g/l , para los siguientes concentraciones se procedió de la misma manera que con el agua del lavado de vehículos mezcladote de hormigón con esto se obtuvo muestras concentradas de 22.81 g/l, 30.45 g/l y 42.19 g/l. Se obtuvo la dosis de sulfato para la concentración original del río y esa concentración de sulfato de aluminio se añadió a las siguientes concentraciones.

3.2 Caso de Estudio 1: Agua Residual Artificialmente Preparada



Foto 3. Balanza Digital.

3.2.1 Preparación de la Muestra y Propósito

Concentraciones de Suelo

Para este caso de estudio se mezcló diferentes concentraciones de suelo en probetas de un litro de capacidad.

Las diferentes concentraciones de suelo utilizadas fueron las siguientes:

Tabla 4. Concentraciones utilizadas en los ensayos de sedimentación.

<u>Suelo A</u>	<u>Suelo B</u>
4 g/l	10 g/l
6 g/l	15 g/l
8 g/l	20 g/l
	40 g/l

En los diferentes ensayos para las diferentes concentraciones antes mencionadas, se tomaron mediciones de altura en cm.; a intervalos de tiempo variables dependiendo de la rapidez a la cual se observó el fenómeno de la sedimentación. Dichos intervalos de tiempo variaron entre un minuto y 30 minutos para cada observación. Las mediciones de altura de sedimentación en las probetas fueron realizadas hasta no observar una variación significativa en la altura de sedimentación del agua concentrada.

Utilización de Flocculante

Como segunda fase del análisis, para las diferentes concentraciones de suelo se usaron diferentes concentraciones de sulfato de aluminio, con la finalidad de acelerar el proceso de sedimentación. Adicionalmente se obtuvo una concentración óptima del flocculante para cada concentración de suelo analizada. Las siguientes concentraciones de sulfato de aluminio fueron usadas en los ensayos:

- 0,2 g/l
- 0,4 g/l
- 0,6 g/l
- 0,8 g/l
- 1,0 g/l
- 2,0 g/l

A continuación se expone la metodología seguida en la preparación de los ensayos en caso de que el lector desee replicarlos en el laboratorio.

3.2.2 Ensayos Realizados sin utilizar flocculante

Metodología para Ensayos sin Floculante

- 1.- Se colocó un litro de agua en probetas de un litro de capacidad.
- 2.- Se procedió a seleccionar el material arcilloso, pasante al tamiz número 200.
- 3.- Se pesó las diferentes cantidades del suelo seleccionado en la balanza electrónica.
- 4.- En la mezcladora de muestras de hidrometría se colocó parte del agua de la probeta, y el material arcilloso previamente pesado para proceder a su mezclado.
- 5.- Se mezcló durante un minuto y se procedió a verter la mezcla en la probeta completando de esta manera un litro con la concentración de suelo requerida.
- 6.- Se agitó manualmente la probeta con la mezcla para lograr el mezclado uniforme de toda la concentración de suelo.
- 7.- Una vez agitada la probeta, se procedió a colocarla en una superficie plana y nivelada. Es necesario tener luminosidad posterior apropiada de la probeta para poder observar claramente la interfase producida por el fenómeno de sedimentación en el agua.
- 8.- Se tomó mediciones en intervalos entre un minuto y treinta minutos, tal como se menciona anteriormente. Las mediciones se las realizaron hasta no observar un cambio significativo en la altura de sedimentación.

9.- Se procedió a realizar la misma metodología de ensayo para las diferentes concentraciones de suelo antes mencionadas.

3.2.3 Ensayos Realizados usando floculante

Metodología para Ensayos con Floculante

- 1.- Se procede a realizar los pasos 1, 2 y 3 de la metodología anterior.
- 2.- Se pesó la cantidad de sulfato de aluminio inicial igual a 0,2 g/l.
- 3.- En la mezcladora se colocó parte del agua de la probeta, el material arcilloso y el sulfato de aluminio previamente pesado; y se procedió a mezclar.
- 4.- Se mezcló durante un minuto y se procedió a verter la mezcla en la probeta completando de esta manera un litro con la concentración de suelo requerida.
- 5.- Se agitó manualmente la probeta con la mezcla para lograr el mezclado uniforme de toda la concentración de suelo y sulfato de aluminio.
- 6.- Una vez agitada la probeta, se procedió a colocarla en una superficie plana y nivelada con luminosidad apropiada en la parte posterior de la probeta para poder observar la interfase de sedimentación.
- 7.- Se realizaron mediciones de la altura de la interfase en función del tiempo. Las mediciones se realizaron hasta no observar un cambio significativo en la altura de sedimentación.

8.- Se aplicó la misma metodología de ensayo para las diferentes concentraciones de suelo. En cada concentración se varió la concentración de sulfato de aluminio para generar una curva diferente para cada concentración de sulfato de aluminio.

3.2.4 Resultados

A continuación se exponen los resultados para cada ensayo realizado en el agua residual preparada.

Suelo A sin floculante.

Algunos gráficos tuvieron que ser corregidos por un valor Δt para poder ajustar la curva en Excel.

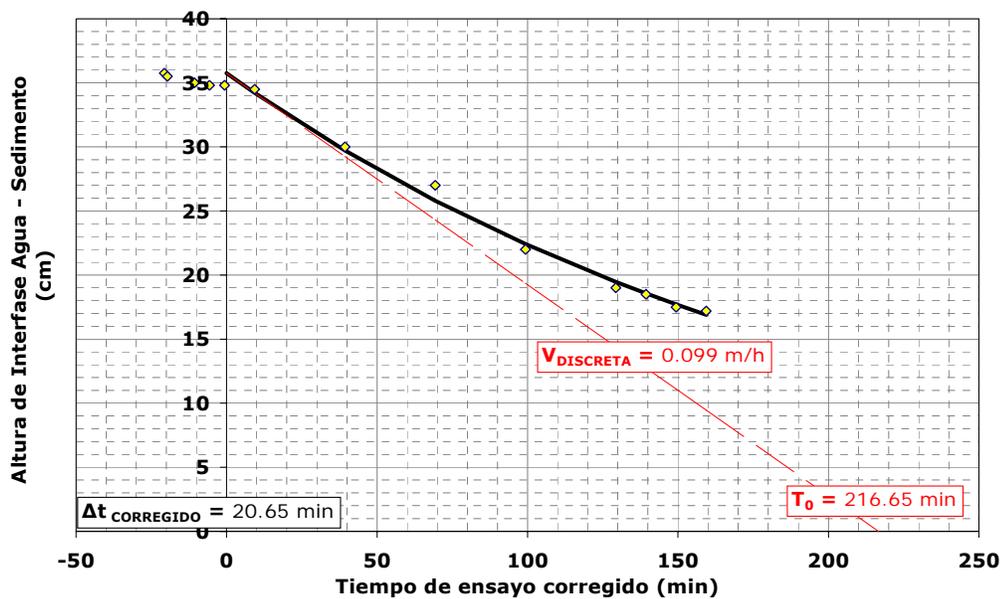


Figura 35. Variación de la Interfase para una $C_0 = 4 \text{ g/l}$; $v = 0,099 \text{ m/h}$ (suelo A).

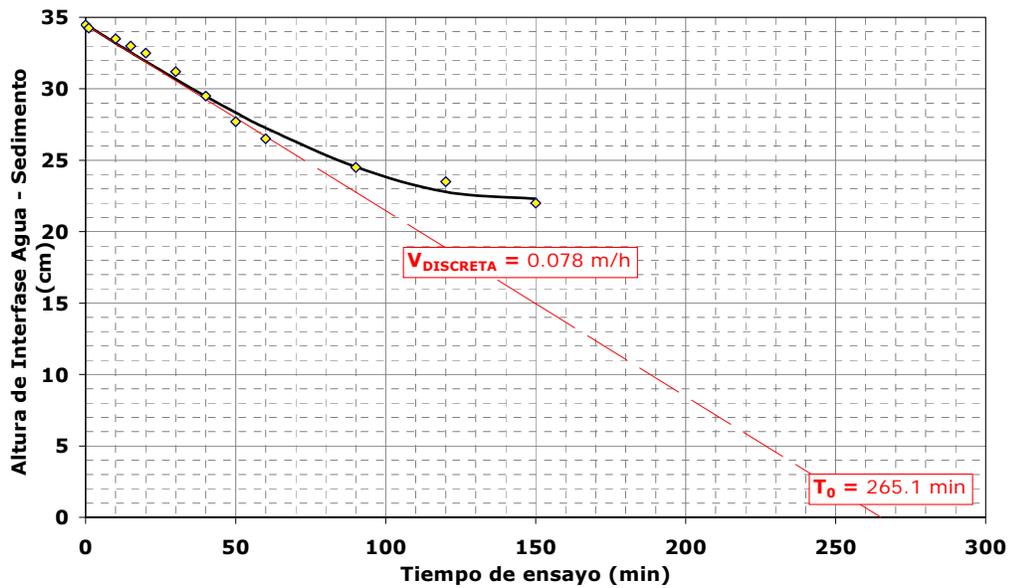


Figura 36. Variación de la Interfase para una $C_0 = 6 \text{ g/l}$; $v = 0,078 \text{ m/h}$ (Suelo A)

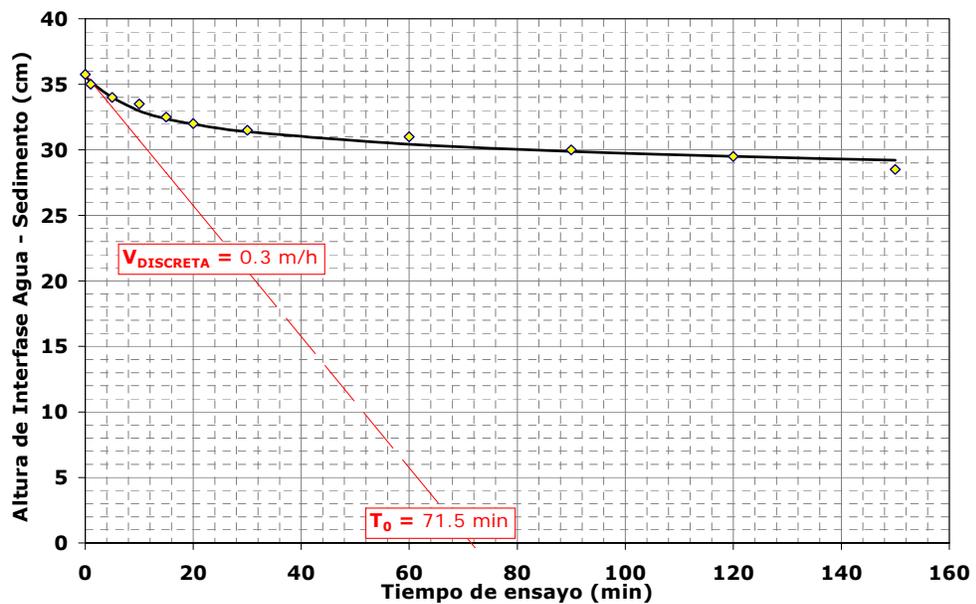


Figura 37. Variación de la Interfase para una $C_0 = 8 \text{ g/l}$; $v = 0,30 \text{ m/h}$ (Suelo A).

Suelo B sin floculante.

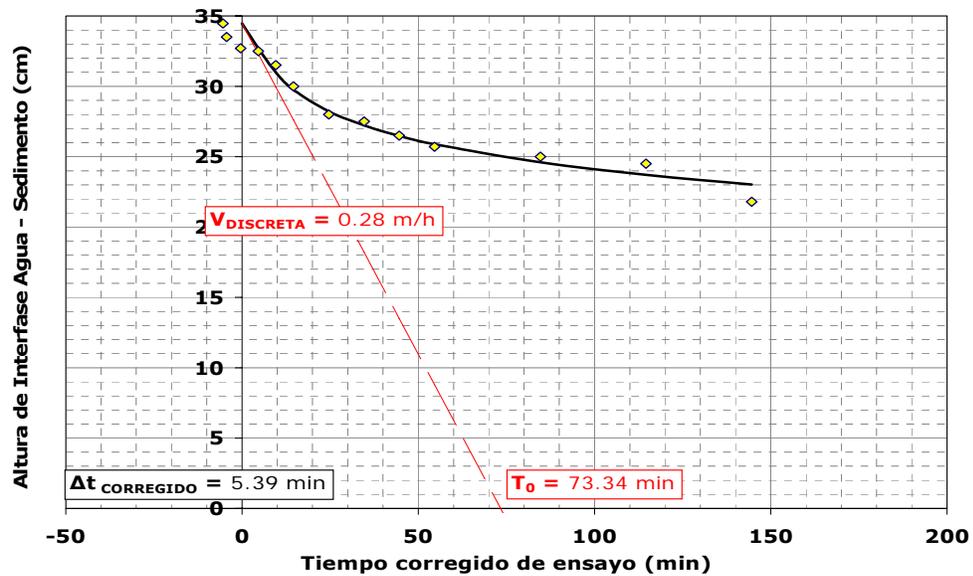


Figura 38. Variación de la Interfase para una $C_0 = 10 \text{ g/l}$; $v = 0,28 \text{ m/h}$ (Suelo B).

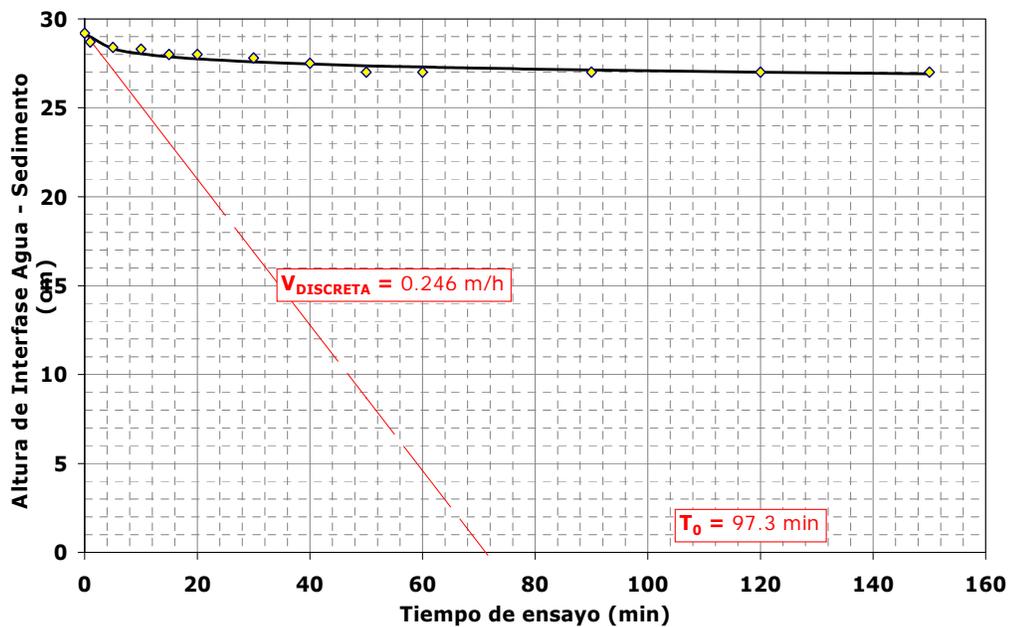


Figura 39. Variación de la Interfase para una $C_0 = 15 \text{ g/l}$; $v = 0,246 \text{ m/h}$ (Suelo B).

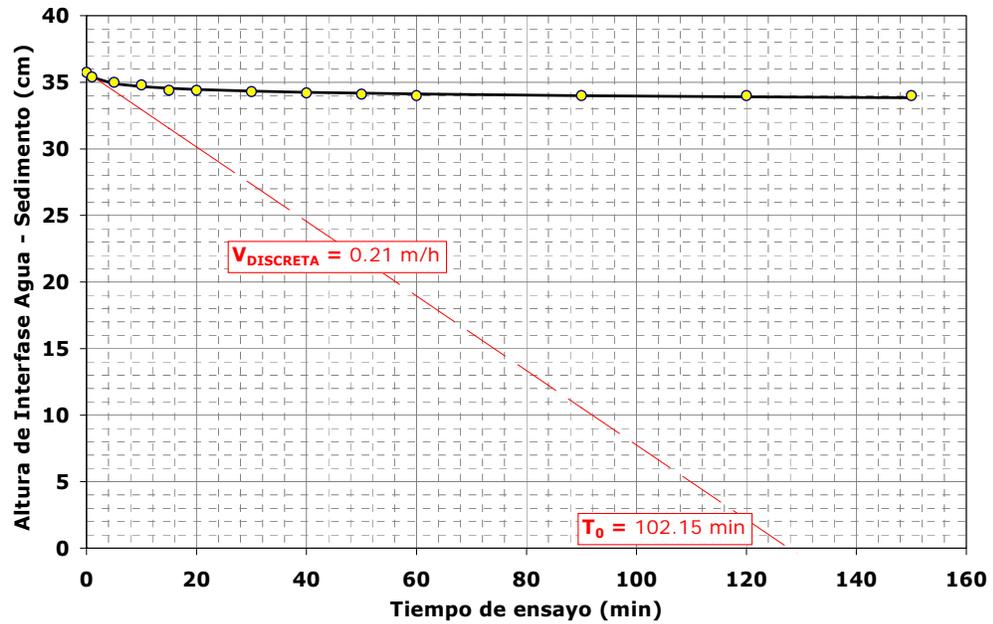


Figura 40. Variación de la Interfase para una $C_0 = 20$ g/l; $v = 0,21$ m/h (Suelo B).

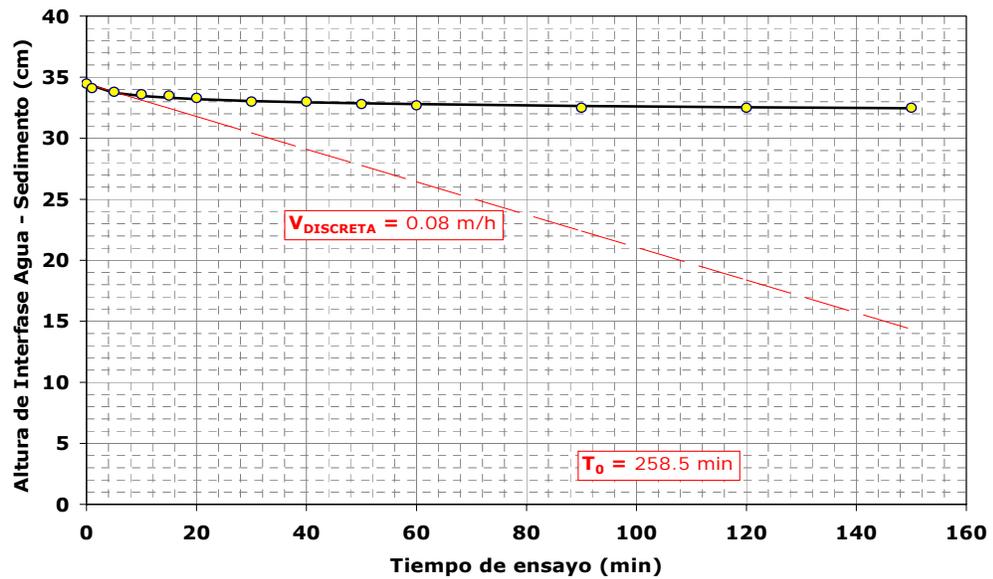


Figura 41. Variación de la Interfase para una $C_0 = 40$ g/l; $v = 0,08$ m/h (Suelo B).

Concentraciones de Suelo con Floculante Suelo A

A continuación se exponen los resultados para cada ensayo realizado con la muestra de agua residual preparada con el Suelo A añadiendo floculante.

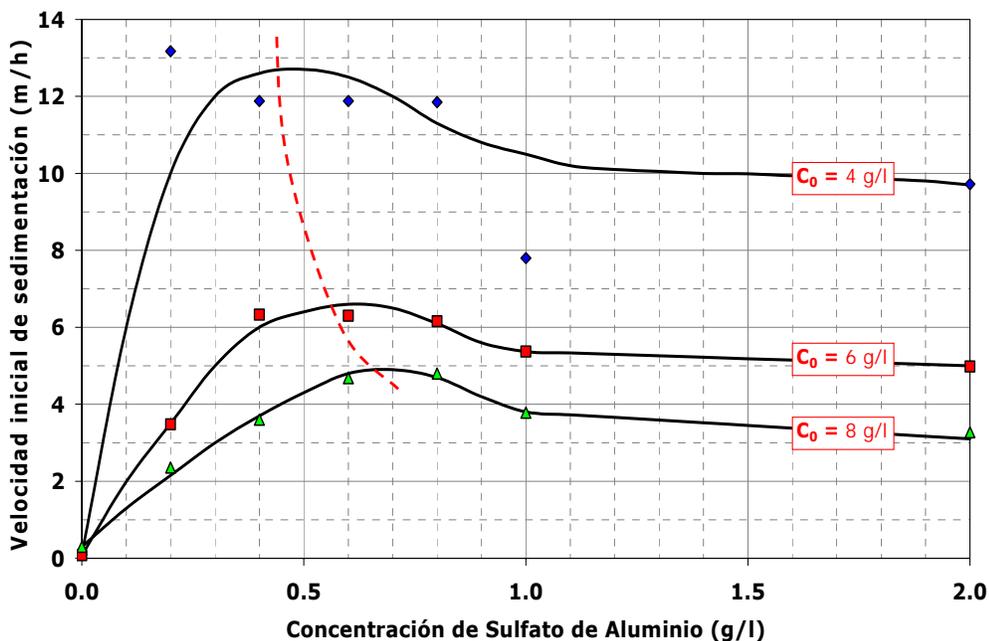


Figura 42. Variación de la velocidad de sedimentación inicial en función de la dosis de floculante y la concentración inicial del ensayo (Mezcla preparada con Suelo A)

Previo a los análisis se determinó la dosis óptima de floculante (Figura 42). En la figura, se muestra gráfica de la cual se puede observar la concentración de sulfato de Aluminio vs. La velocidad inicial de sedimentación. Esta gráfica muestra que cantidad de floculante produce una mayor velocidad inicial de concentración para cada muestra ensayada. Se observa la variación del comportamiento de la velocidad inicial de sedimentación en función de la dosis de floculante añadido y la concentración inicial de sedimentos evaluada. Se puede decir que a cada

concentración inicial de sólidos le corresponde una dosis que produce la máxima velocidad de sedimentación posible para esos sedimentos.

Adicionalmente, se puede observar en la grafica que los puntos de dosis optima de floculante (velocidad máxima) presentan una tendencia a decrecer pseudo-exponencialmente a medida que la concentración de sedimentos también disminuye. A continuación se muestra las graficas para 4 g/l, 6 g/l y 8 g/l respectivamente.

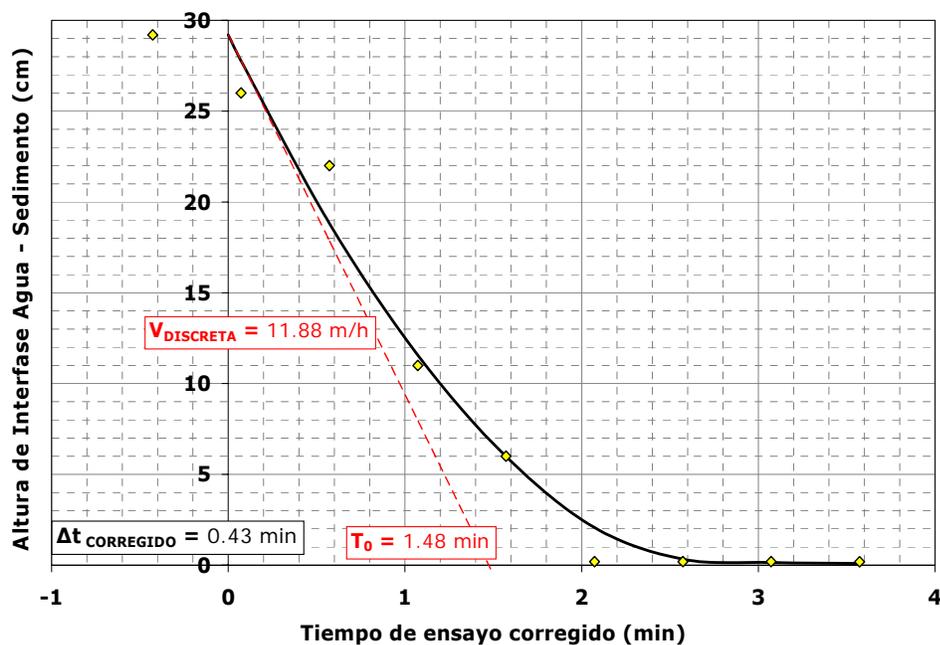


Figura 43. Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = 0,4g/l para $C_0=4\text{g/l}$ (Suelo A).

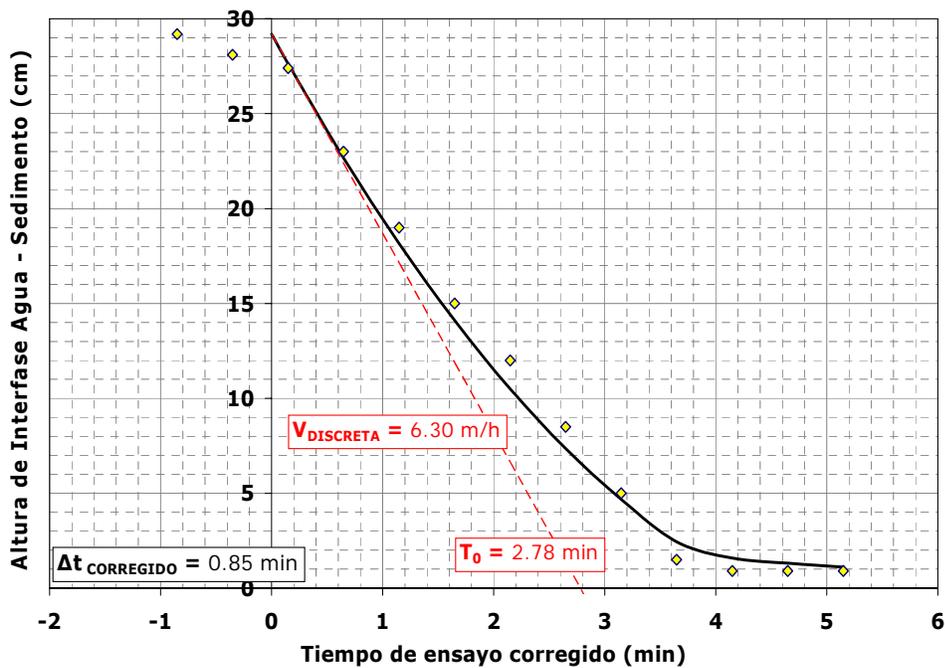


Figura 44. Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = 0,6 g/l para $C_0=6\text{g/l}$ (Suelo A).

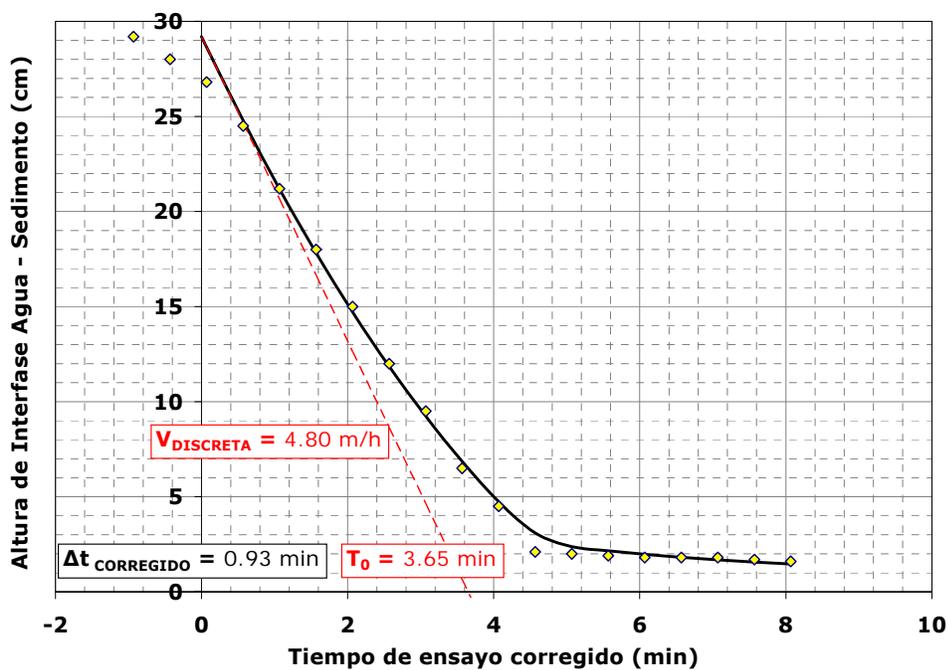


Figura 45. Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = 0,80g/l para $C_0=8\text{g/l}$ (Suelo A).

Concentraciones de Suelo con Floculante Suelo B

En el caso de la muestra preparada con el Suelo B, se procedió de manera similar a la aplicada con las muestras preparada con el suelo A. La Figura 46 muestra la variación de la velocidad inicial de sedimentación en función del floculante añadido y la concentración de sólidos a ser sedimentada. La tendencia de las dosis óptimas es similar a la mostrada en el agua residual preparada con el suelo A.

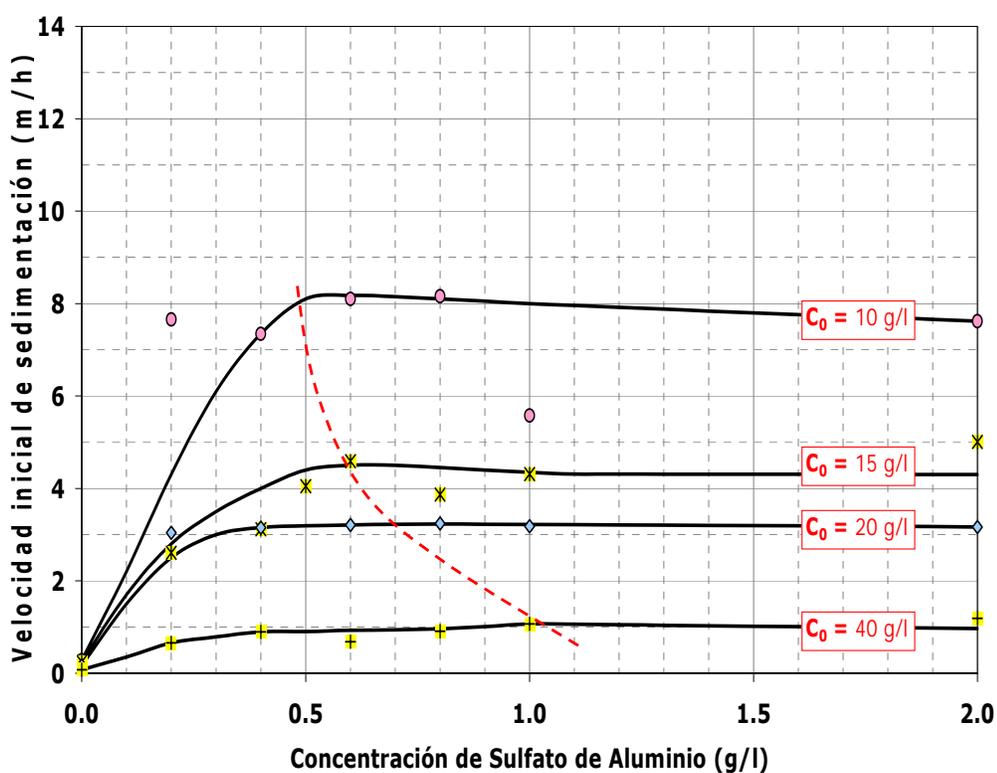


Figura 46. Variación de la velocidad de sedimentación inicial en función de la dosis de floculante y la concentración inicial del ensayo (Mezcla preparada con Suelo B).

A continuación se muestra la variación de sedimentación añadiendo floculante para concentraciones de 10 g/l, 15 g/l, 20 g/l y 40 g/l respectivamente.

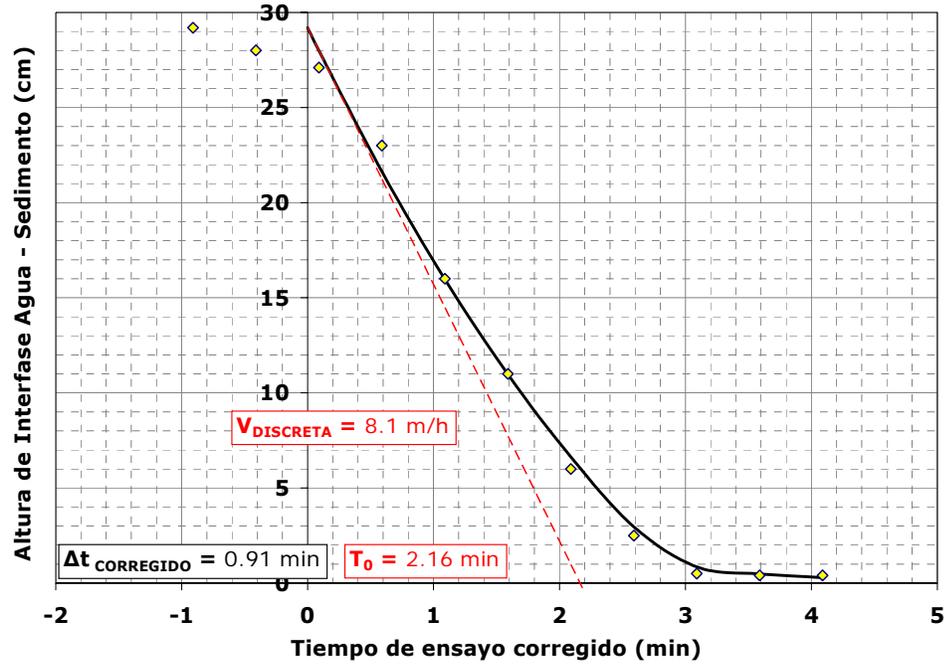


Figura 47. Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = 0,60g/l para $C_0 = 10 \text{ g/l}$ (Suelo B).

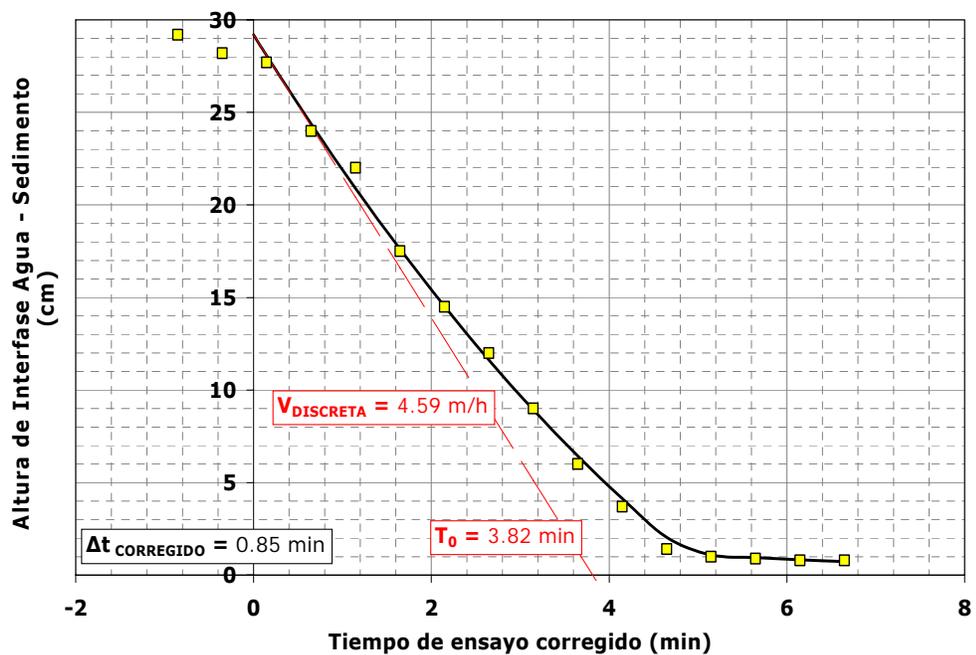


Figura 48. Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = 0,6 g/l para $C_0 = 15 \text{ g/l}$ (Suelo B).

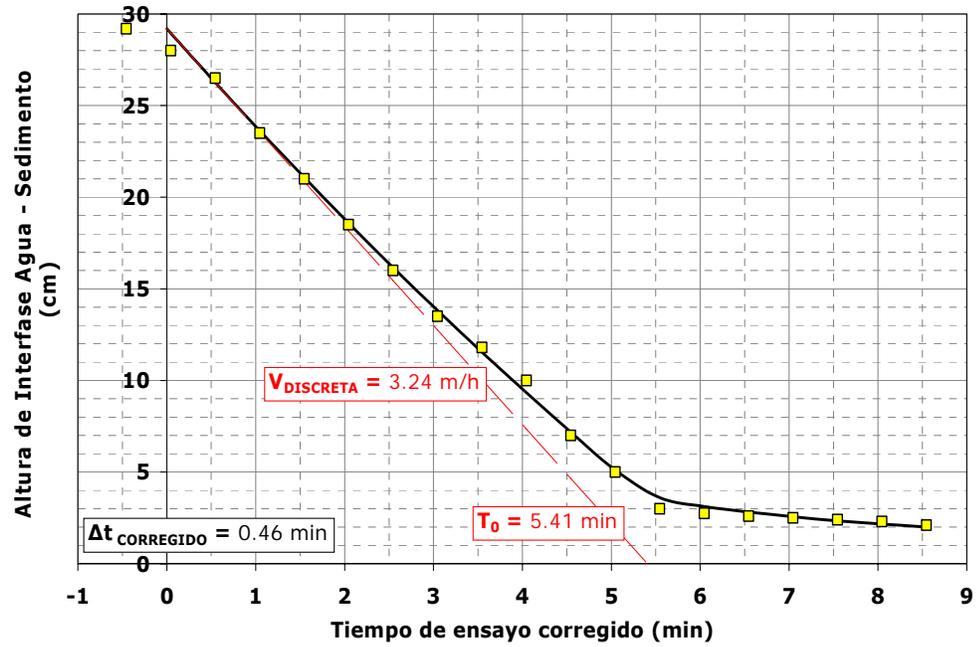


Figura 49. Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = 0,8 g/l para $C_0 = 20 \text{ g/l}$ (Suelo B).

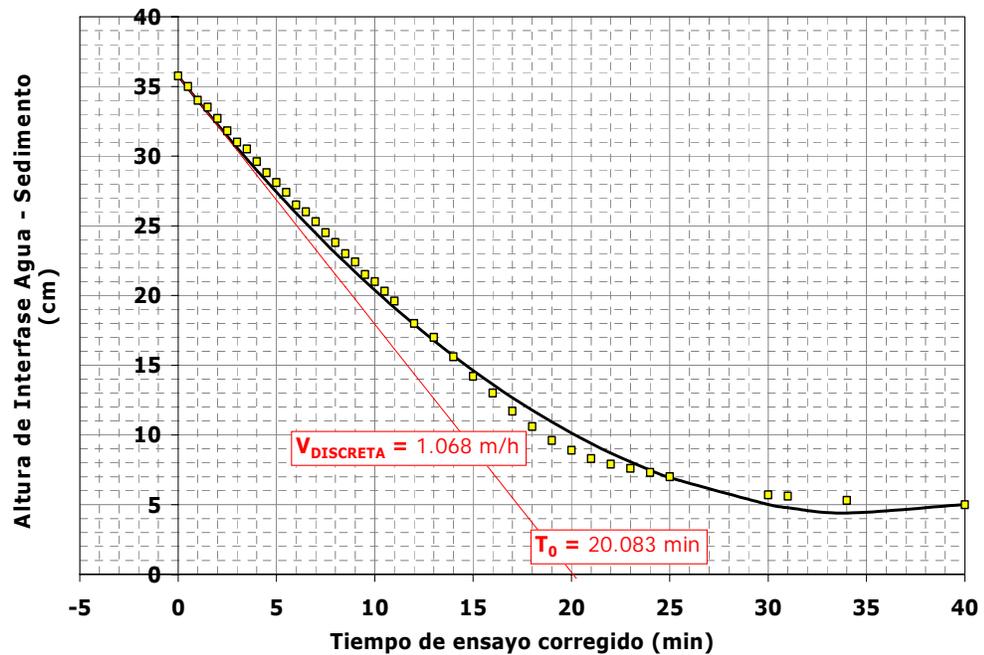


Figura 50. Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio = 1,0 g/l para $C_0 = 40 \text{ g/l}$ (Suelo B).

3.3 Caso de Estudio 2: Agua Proveniente del Lavado de Camiones Mezcladores de Hormigón

3.3.1 Sitio escogido para la toma de la muestra



Planta Holcim Mirador Norte

Las muestras de agua fueron tomadas del lavado de camiones mezcladores de hormigón en la planta " Mirador Norte " de Holcim, esta agua residual que contiene cemento pasa inmediatamente a piscinas de tratamiento. En las piscinas anteriormente mencionadas se produce el fenómeno de

sedimentación quedando en el fondo las partículas de cemento para luego ser removidas.

Como podemos observar en la siguiente foto tomada en la Planta Mirador Holcim, el tamaño del sedimentador utilizado para el agua proveniente del lavado de camiones mezcladores de hormigón son pequeños en comparación con los utilizados para tratamiento de Aguas Residuales como la figura de la portada del capítulo 2.



Foto 4. Sedimentador típico planta mirador Holcim.

Tomado como punto de partida esta referencia nos hace pensar que la sedimentación de partículas de características como las del cemento tienen una velocidad de sedimentación rápida y uniforme, como se demuestra en

nuestra tesis, ya que para el ensayo con el agua del lavado de los camiones mezcladores de hormigón (mixer) no fue necesario utilizar floculante.

3.3.2 Implementación del Ensayo

Para este caso de estudio primeramente se analizó la concentración original de la muestra obtenida en Holcim, como primera prueba sin usar floculante. En un segundo análisis, se procedió a concentrar dos veces la muestra original. Las concentraciones analizadas fueron.

- $C_0 = 61,7 \text{ g/l}$
- $C_1 = 85,5 \text{ g/l}$
- $C_2 = 105,3 \text{ g/l}$

3.3.3 Ensayos Realizados

Metodología para Ensayos de Concentración Original.

- 1.- Se colocó un litro de agua de la muestra original en probetas de un litro de capacidad.
- 2.- Estas probetas fueron dejadas un día para que se produzca su sedimentación total, para luego obtener la concentración de cemento existente de la muestra.
- 3.- Luego de verificar la completa sedimentación de las partículas de cemento, se procedió a sacar el agua de la probeta dejando solo el cemento dentro de ella.

4.- Se colocó el cemento en un recipiente previamente pesado y se lo dejó por un día en el horno para su secado.

5.- Luego de ser secado, se pesó el recipiente con el cemento, de esta manera se obtuvo la concentración original C_0 de cemento en la muestra de agua de un litro.

6.- Se colocó un litro de agua de la muestra original en probetas de un litro de capacidad.

7.- Se agitó manualmente la probeta para lograr una distribución uniforme del cemento en el litro de agua.

8.- Se observó el fenómeno de sedimentación, se realizó mediciones hasta no presenciar un cambio significativo en la altura de sedimentación.

Metodología para Ensayos de Concentraciones Obtenidas.

1.- Se procede a realizar los pasos 1, 2, y 3 de la metodología anterior.

2.- Para realizar la concentración C_1 se procedió a mezclar dos probetas.

3.- Para realizar la concentración C_2 se procedió a mezclar tres probetas.

4.- Para cada concentración se procede a realizar los pasos del 6, 7 y 8 de la metodología anterior.

5.- Luego de la finalización de cada análisis se procede a realizar los pasos 4 y 5 de la metodología anterior para obtener las concentraciones de suelo C_1 y C_2 en un litro de agua.

3.3.4 Resultados

Para facilidad de observación, se expone en un solo grafico las 3 curvas de sedimentación respectiva. Se puede observar que el comportamiento de las partículas se ajusta muy bien a la curva típica de sedimentación.

Adicionalmente, la concentración original del lavado de mixers presenta una velocidad de sedimentación alta (0.56 m/h) lo que se traduciría en sedimentadores pequeños.

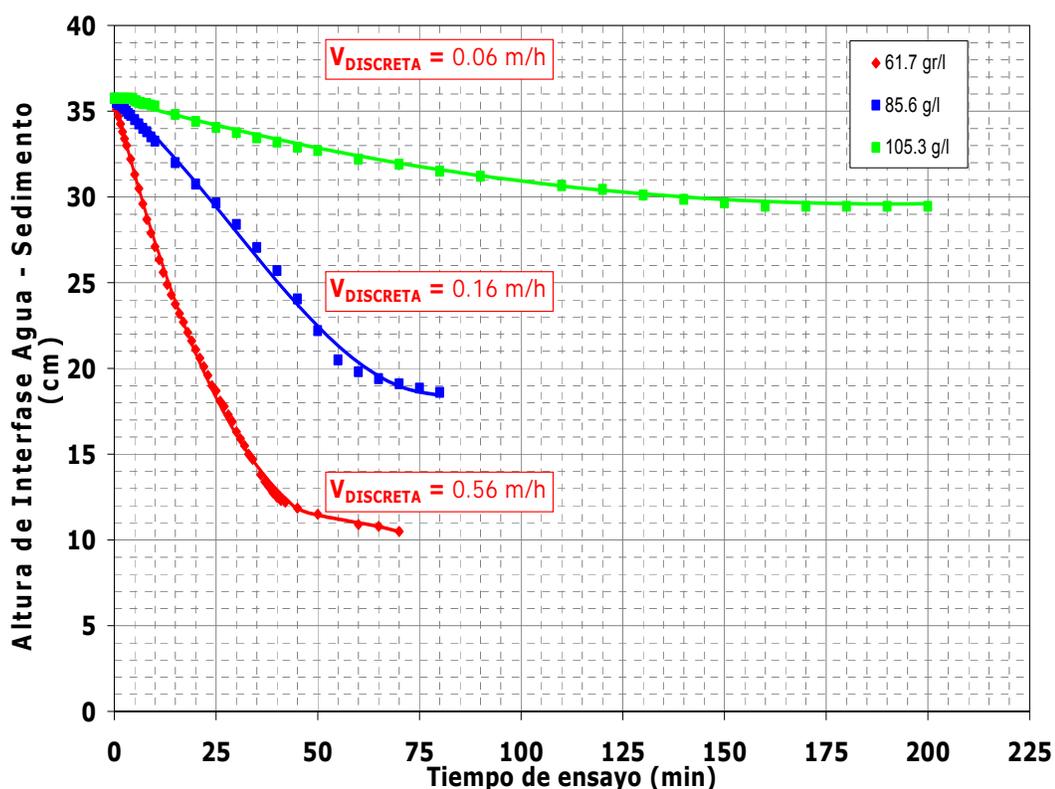


Figura 51. Comportamiento de las Curvas de Sedimentación en función de las diferentes concentraciones.

3.4 Caso de Estudio 3: Agua Río Daule cerca de la Estación la Toma

3.4.1 Selección del sitio del muestreo



Sitio de toma de la Muestra.

Las muestras de agua se tomaron del Río Daule aproximadamente a 300 metros de la entrada a la Planta de Tratamiento de Agua "La Toma". Se recolectó 20 litros de agua para su posterior análisis.

3.4.2 Preparación de la Muestra

Para este caso de estudio primeramente se analizó la muestra original obteniendo una concentración real de suelo en el agua del Río Daule, de la cual se procedió a observar el fenómeno de sedimentación con la utilización de floculante. Se utilizó las mismas concentraciones de sulfato de aluminio que en el caso de estudio 1.

Como segunda fase del análisis, se procedió a realizar diferentes concentraciones de la muestra original, se obtuvo las siguientes concentraciones de suelo:

- $C_0 = 8,85 \text{ g/l}$
- $C_1 = 22,81 \text{ g/l}$
- $C_2 = 30,45 \text{ g/l}$
- $C_3 = 42,19 \text{ g/l}$
- $C_4 = 48,80 \text{ g/l}$

Cada una de estas concentraciones se analizó con la concentración óptima de floculante obtenida del análisis de la muestra original C_0 . El procedimiento de determinación de la dosis óptima fue el mismo utilizado que en la muestra de agua residual preparada.

3.4.3 Ensayos de Concentración Original sin Floculante

Metodología para Ensayos de Concentración Original sin Floculante.

- 1.- Se colocó un litro de agua de la muestra original en probetas de un litro de capacidad.
- 2.- Estas probetas fueron dejadas un día para que se produzca su sedimentación total, para luego obtener la concentración de suelo existente de la muestra.
- 3.- Luego de verificar la completa sedimentación del suelo, se procedió a sacar el agua de la probeta dejando solo el suelo dentro de ella.

4.- Se colocó el suelo en un recipiente previamente pesado y se lo dejó por un día en el horno para su secado.

5.- Luego de ser secado, se pesó el recipiente con el suelo, de esta manera se obtuvo la concentración original C_o de suelo en la muestra de agua de un litro.

6.- Se utilizó otra probeta de un litro de capacidad conteniendo la muestra original tomada del río, manualmente se agitó la probeta con la muestra de agua hasta obtener una mezcla uniforme de la misma.

7.- Finalmente luego de dejar la probeta en reposo sobre una superficie plana, se procedió a observar el fenómeno de sedimentación.

3.4.4 Ensayos de Concentración Original con Floculante

Metodología para Ensayos de Concentración Original con Floculante.

1.- Se colocó un litro de agua de la muestra original en probetas de un litro de capacidad.

2.- Estas probetas fueron dejadas un día para que se produzca su sedimentación total, para luego obtener la concentración de suelo existente de la muestra.

3.- Luego de verificar la completa sedimentación del suelo, se procedió a sacar el agua de la probeta dejando solo el suelo dentro de ella.

4.- Se colocó el suelo en un recipiente previamente pesado y se lo dejó por un día en el horno para su secado.

5.- Luego de ser secado, se pesó el recipiente con el suelo, de esta manera se obtuvo la concentración original Co. de suelo en la muestra de agua de un litro.

6.- Se colocó un litro de agua de la muestra original en probetas de un litro de capacidad.

7.- Se procedió a pesar la primera concentración de Sulfato de Aluminio en la balanza electrónica.

8.- Manualmente se agitó la probeta con la muestra de agua hasta obtener una mezcla uniforme de la misma.

9.- En la mezcladora de muestras para hidrometría se colocó parte del agua de la probeta y la concentración de Sulfato de Aluminio previamente pesado, para proceder a su mezclado.

10.- Se mezcló durante un minuto y se procedió a verter la mezcla en la probeta completando de esta manera un litro de la concentración original de suelo.

11.- Se agitó manualmente la probeta con la mezcla para lograr el mezclado uniforme de toda la concentración de suelo.

12.- Una vez agitada la probeta, se procedió a colocarla en una superficie plana y nivelada. Es necesario tener luminosidad posterior apropiada de la

probeta para poder observar claramente la interfase producida por el fenómeno de sedimentación del agua.

13.- Se tomó mediciones en intervalos entre medio minuto y tres minutos, las mediciones fueron realizadas hasta no observar un cambio significativo en la altura de sedimentación.

14.- Se procedió a realizar la misma metodología de ensayo a partir del punto 6 para las diferentes concentraciones de sulfato de aluminio mencionadas anteriormente en el caso de estudio 1.

15.- Finalmente se procedió a encontrar la concentración de floculante óptimo.

3.4.5 Ensayos a diferentes concentraciones con dosis óptima de floculante

Metodología para Ensayos de diferentes Concentraciones obtenidas.

1.- Se procede a realizar los pasos 1, 2, y 3 de la metodología anterior.

2.- Para realizar la concentración C1 se procedió a mezclar agua con el sedimento resultante de la sedimentación de dos probetas, para realizar la concentración C2 se procedió a mezclar agua con el sedimento resultante de la sedimentación de tres probetas, para realizar la concentración C3 se procedió a mezclar agua con el sedimento resultante de la sedimentación de cuatro probetas, para realizar la concentración C4 se procedió a mezclar agua con el sedimento resultante de la sedimentación de cinco probetas.

3.- Para cada concentración se procede a realizar los pasos del 7 al 13 de la metodología anterior de la sección 3.4.4, con la diferencia de que solo se realizará el análisis con la concentración óptima de sulfato de aluminio obtenida para la concentración C_0 .

4.- Luego de la finalización de cada análisis se procede a realizar los pasos 3, 4 y 5 de la metodología anterior para obtener las concentraciones de suelo C_1 , C_2 , C_3 y C_4 en un litro de agua.

3.4.6 Resultados

No se muestra la curva de concentración inicial sin la utilización de floculante para el río Daule, debido a que al momento de realizar el ensayo no se observó claramente la interfase de sedimentación, se procedió a obtener la concentración óptima de floculante para la concentración inicial. Con esta concentración se analizaron las siguientes concentraciones que se obtienen con la metodología 3.4.5. La concentración óptima de floculante para C_0 es de 0.5 g/l, se utilizó 0.8 g/l porque las siguientes muestras tienen una mayor concentración, se utilizó solo esta concentración de floculante por falta de tiempo y para poder observar el comportamiento de estas curvas a medida que se concentra la muestra.

Concentración Original C_0 de Suelo (con floculante)

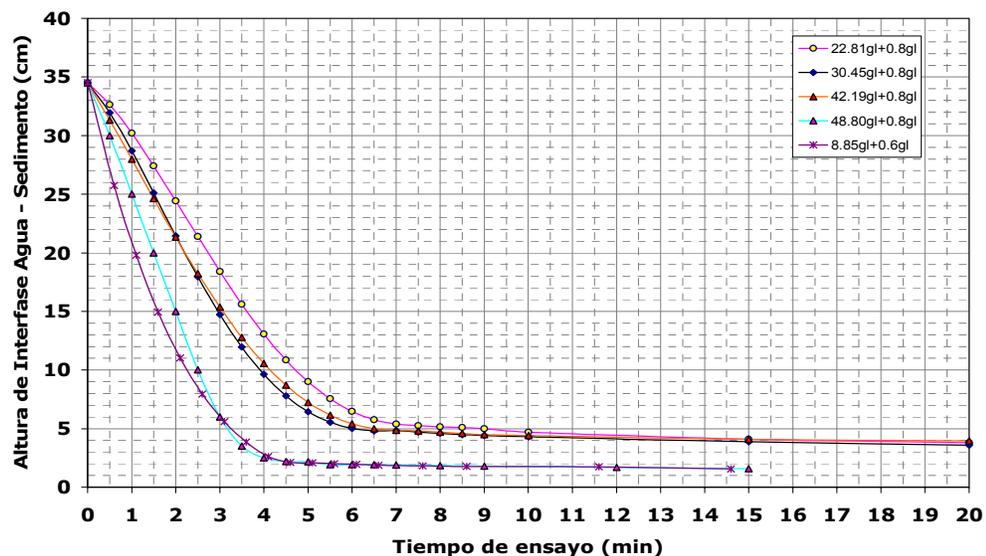


Figura 52. Comportamiento de la Curva de Sedimentación en función del floculante añadido (C_0 suelo= 8,85 g/l).

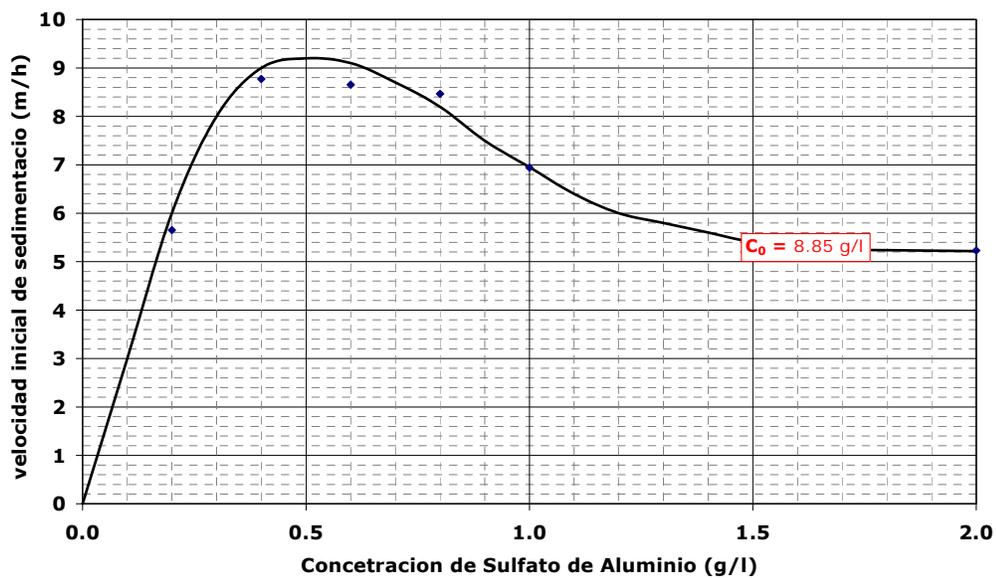


Figura 53. Variación de la velocidad de sedimentación inicial en función de la dosis de floculante y la concentración inicial del ensayo (Mezcla preparada con Agua rio Daule)

hormigón no necesitó de floculación. Las dosis de floculante ensayados fueron 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 y 2 g/l.

El ensayo de columna de sedimentación fue aplicado a dos suspensiones líquidas de características físico químicas diferentes que presentan una potencial remoción de sólidos por sedimentación.

- Agua “residual” artificialmente preparada mezclando agua potable con suelo pasante del tamiz #200 (partículas menores a 75 μm). Debido a su fácil obtención, la comparación del comportamiento de esta “agua residual” con las otras suspensiones ensayadas es importante para decidir si este tipo de material es o no usado en la enseñanza práctica de Ingeniería Sanitaria. Como parte de la hipótesis planteada, se consideró el uso del pasante #200 de dos muestras de suelo de la misma área disponibles en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la FICT. Se asumió que el comportamiento de ambos suelos sería el mismo debido a que provenían del mismo sitio (no se determinaron ni propiedades geomecánicas ni físico químicas de las muestras de suelo). Se analizaron 129 g del Suelo A distribuidos en concentraciones de 4, 6 y 8 g/l; y 610 g del Suelo B distribuidos en concentraciones de 10, 15, 20 y 40 g/l (ambos casos sin y con floculación). Las cantidades seleccionadas para cada tipo de suelo dependieron exclusivamente del material disponible en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la FICT al inicio de la investigación.

3.3 Caso de Estudio 2: Agua Proveniente del Lavado de Camiones Mezcladores de Hormigón

3.3.1 Sitio escogido para la toma de la muestra



Planta Holcim Mirador Norte

Las muestras de agua fueron tomadas del lavado de camiones mezcladores de hormigón en la planta " Mirador Norte " de Holcim, esta agua residual que contiene cemento pasa inmediatamente a piscinas de tratamiento. En las piscinas anteriormente mencionadas se produce el fenómeno de

sedimentación quedando en el fondo las partículas de cemento para luego ser removidas.

Como podemos observar en la siguiente foto tomada en la Planta Mirador Holcim, el tamaño del sedimentador utilizado para el agua proveniente del lavado de camiones mezcladores de hormigón son pequeños en comparación con los utilizados para tratamiento de Aguas Residuales como la figura de la portada del capítulo 2.



Foto 4. Sedimentador típico planta mirador Holcim.

Tomado como punto de partida esta referencia nos hace pensar que la sedimentación de partículas de características como las del cemento tienen una velocidad de sedimentación rápida y uniforme, como se demuestra en

nuestra tesis, ya que para el ensayo con el agua del lavado de los camiones mezcladores de hormigón (mixer) no fue necesario utilizar floculante.

3.3.2 Implementación del Ensayo

Para este caso de estudio primeramente se analizó la concentración original de la muestra obtenida en Holcim, como primera prueba sin usar floculante. En un segundo análisis, se procedió a concentrar dos veces la muestra original. Las concentraciones analizadas fueron.

- $C_0 = 61,7 \text{ g/l}$
- $C_1 = 85,5 \text{ g/l}$
- $C_2 = 105,3 \text{ g/l}$

3.3.3 Ensayos Realizados

Metodología para Ensayos de Concentración Original.

- 1.- Se colocó un litro de agua de la muestra original en probetas de un litro de capacidad.
- 2.- Estas probetas fueron dejadas un día para que se produzca su sedimentación total, para luego obtener la concentración de cemento existente de la muestra.
- 3.- Luego de verificar la completa sedimentación de las partículas de cemento, se procedió a sacar el agua de la probeta dejando solo el cemento dentro de ella.

4.- Se colocó el cemento en un recipiente previamente pesado y se lo dejó por un día en el horno para su secado.

5.- Luego de ser secado, se pesó el recipiente con el cemento, de esta manera se obtuvo la concentración original C_0 de cemento en la muestra de agua de un litro.

6.- Se colocó un litro de agua de la muestra original en probetas de un litro de capacidad.

7.- Se agitó manualmente la probeta para lograr una distribución uniforme del cemento en el litro de agua.

8.- Se observó el fenómeno de sedimentación, se realizó mediciones hasta no presenciar un cambio significativo en la altura de sedimentación.

Metodología para Ensayos de Concentraciones Obtenidas.

1.- Se procede a realizar los pasos 1, 2, y 3 de la metodología anterior.

2.- Para realizar la concentración C_1 se procedió a mezclar dos probetas.

3.- Para realizar la concentración C_2 se procedió a mezclar tres probetas.

4.- Para cada concentración se procede a realizar los pasos del 6, 7 y 8 de la metodología anterior.

5.- Luego de la finalización de cada análisis se procede a realizar los pasos 4 y 5 de la metodología anterior para obtener las concentraciones de suelo C_1 y C_2 en un litro de agua.

3.3.4 Resultados

Para facilidad de observación, se expone en un solo grafico las 3 curvas de sedimentación respectiva. Se puede observar que el comportamiento de las partículas se ajusta muy bien a la curva típica de sedimentación.

Adicionalmente, la concentración original del lavado de mixers presenta una velocidad de sedimentación alta (0.56 m/h) lo que se traduciría en sedimentadores pequeños.

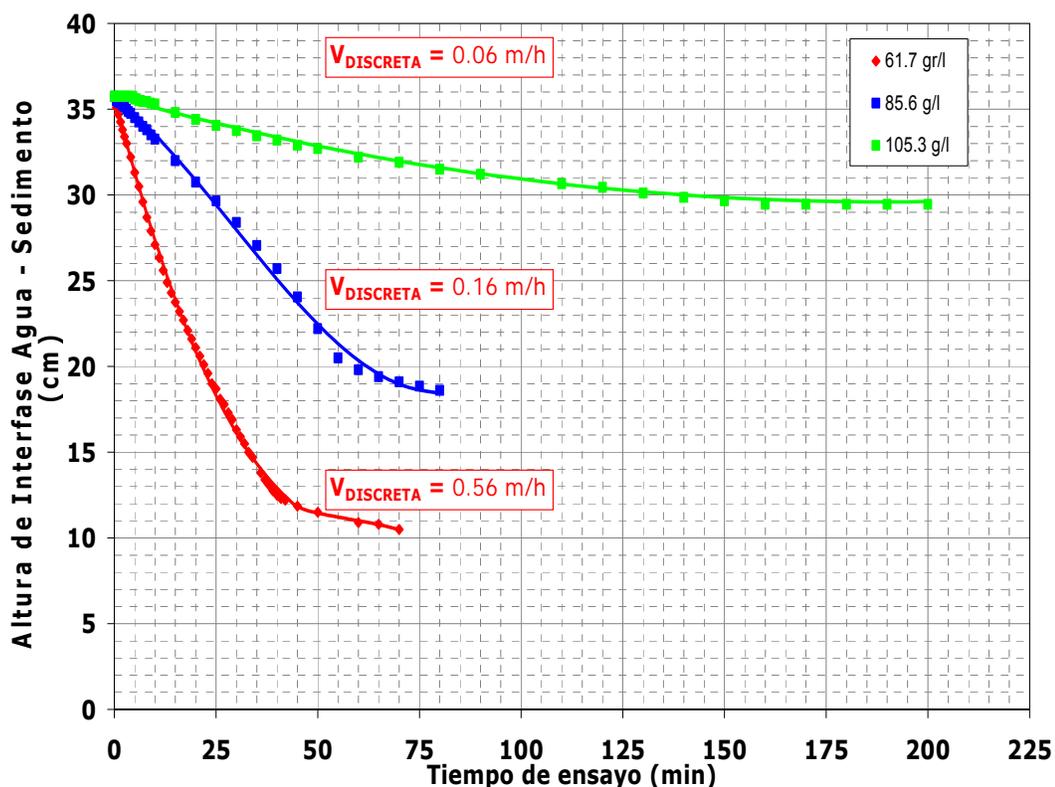


Figura 51. Comportamiento de las Curvas de Sedimentación en función de las diferentes concentraciones.

3.4 Caso de Estudio 3: Agua Río Daule cerca de la Estación la Toma

3.4.1 Selección del sitio del muestreo



Sitio de toma de la Muestra.

Las muestras de agua se tomaron del Río Daule aproximadamente a 300 metros de la entrada a la Planta de Tratamiento de Agua "La Toma". Se recolectó 20 litros de agua para su posterior análisis.

3.4.2 Preparación de la Muestra

Para este caso de estudio primeramente se analizó la muestra original obteniendo una concentración real de suelo en el agua del Río Daule, de la cual se procedió a observar el fenómeno de sedimentación con la utilización de floculante. Se utilizó las mismas concentraciones de sulfato de aluminio que en el caso de estudio 1.

Como segunda fase del análisis, se procedió a realizar diferentes concentraciones de la muestra original, se obtuvo las siguientes concentraciones de suelo:

- $C_0 = 8,85 \text{ g/l}$
- $C_1 = 22,81 \text{ g/l}$
- $C_2 = 30,45 \text{ g/l}$
- $C_3 = 42,19 \text{ g/l}$
- $C_4 = 48,80 \text{ g/l}$

Cada una de estas concentraciones se analizó con la concentración óptima de floculante obtenida del análisis de la muestra original C_0 . El procedimiento de determinación de la dosis óptima fue el mismo utilizado que en la muestra de agua residual preparada.

3.4.3 Ensayos de Concentración Original sin Floculante

Metodología para Ensayos de Concentración Original sin Floculante.

- 1.- Se colocó un litro de agua de la muestra original en probetas de un litro de capacidad.
- 2.- Estas probetas fueron dejadas un día para que se produzca su sedimentación total, para luego obtener la concentración de suelo existente de la muestra.
- 3.- Luego de verificar la completa sedimentación del suelo, se procedió a sacar el agua de la probeta dejando solo el suelo dentro de ella.

4.- Se colocó el suelo en un recipiente previamente pesado y se lo dejó por un día en el horno para su secado.

5.- Luego de ser secado, se pesó el recipiente con el suelo, de esta manera se obtuvo la concentración original C_o de suelo en la muestra de agua de un litro.

6.- Se utilizó otra probeta de un litro de capacidad conteniendo la muestra original tomada del río, manualmente se agitó la probeta con la muestra de agua hasta obtener una mezcla uniforme de la misma.

7.- Finalmente luego de dejar la probeta en reposo sobre una superficie plana, se procedió a observar el fenómeno de sedimentación.

3.4.4 Ensayos de Concentración Original con Floculante

Metodología para Ensayos de Concentración Original con Floculante.

1.- Se colocó un litro de agua de la muestra original en probetas de un litro de capacidad.

2.- Estas probetas fueron dejadas un día para que se produzca su sedimentación total, para luego obtener la concentración de suelo existente de la muestra.

3.- Luego de verificar la completa sedimentación del suelo, se procedió a sacar el agua de la probeta dejando solo el suelo dentro de ella.

4.- Se colocó el suelo en un recipiente previamente pesado y se lo dejó por un día en el horno para su secado.

5.- Luego de ser secado, se pesó el recipiente con el suelo, de esta manera se obtuvo la concentración original Co. de suelo en la muestra de agua de un litro.

6.- Se colocó un litro de agua de la muestra original en probetas de un litro de capacidad.

7.- Se procedió a pesar la primera concentración de Sulfato de Aluminio en la balanza electrónica.

8.- Manualmente se agitó la probeta con la muestra de agua hasta obtener una mezcla uniforme de la misma.

9.- En la mezcladora de muestras para hidrometría se colocó parte del agua de la probeta y la concentración de Sulfato de Aluminio previamente pesado, para proceder a su mezclado.

10.- Se mezcló durante un minuto y se procedió a verter la mezcla en la probeta completando de esta manera un litro de la concentración original de suelo.

11.- Se agitó manualmente la probeta con la mezcla para lograr el mezclado uniforme de toda la concentración de suelo.

12.- Una vez agitada la probeta, se procedió a colocarla en una superficie plana y nivelada. Es necesario tener luminosidad posterior apropiada de la

probeta para poder observar claramente la interfase producida por el fenómeno de sedimentación del agua.

13.- Se tomó mediciones en intervalos entre medio minuto y tres minutos, las mediciones fueron realizadas hasta no observar un cambio significativo en la altura de sedimentación.

14.- Se procedió a realizar la misma metodología de ensayo a partir del punto 6 para las diferentes concentraciones de sulfato de aluminio mencionadas anteriormente en el caso de estudio 1.

15.- Finalmente se procedió a encontrar la concentración de floculante óptimo.

3.4.5 Ensayos a diferentes concentraciones con dosis óptima de floculante

Metodología para Ensayos de diferentes Concentraciones obtenidas.

1.- Se procede a realizar los pasos 1, 2, y 3 de la metodología anterior.

2.- Para realizar la concentración C1 se procedió a mezclar agua con el sedimento resultante de la sedimentación de dos probetas, para realizar la concentración C2 se procedió a mezclar agua con el sedimento resultante de la sedimentación de tres probetas, para realizar la concentración C3 se procedió a mezclar agua con el sedimento resultante de la sedimentación de cuatro probetas, para realizar la concentración C4 se procedió a mezclar agua con el sedimento resultante de la sedimentación de cinco probetas.

3.- Para cada concentración se procede a realizar los pasos del 7 al 13 de la metodología anterior de la sección 3.4.4, con la diferencia de que solo se realizará el análisis con la concentración óptima de sulfato de aluminio obtenida para la concentración C_0 .

4.- Luego de la finalización de cada análisis se procede a realizar los pasos 3, 4 y 5 de la metodología anterior para obtener las concentraciones de suelo C_1 , C_2 , C_3 y C_4 en un litro de agua.

3.4.6 Resultados

No se muestra la curva de concentración inicial sin la utilización de floculante para el río Daule, debido a que al momento de realizar el ensayo no se observó claramente la interfase de sedimentación, se procedió a obtener la concentración óptima de floculante para la concentración inicial. Con esta concentración se analizaron las siguientes concentraciones que se obtienen con la metodología 3.4.5. La concentración óptima de floculante para C_0 es de 0.5 g/l, se utilizó 0.8 g/l porque las siguientes muestras tienen una mayor concentración, se utilizó solo esta concentración de floculante por falta de tiempo y para poder observar el comportamiento de estas curvas a medida que se concentra la muestra.

Concentración Original C_0 de Suelo (con floculante)

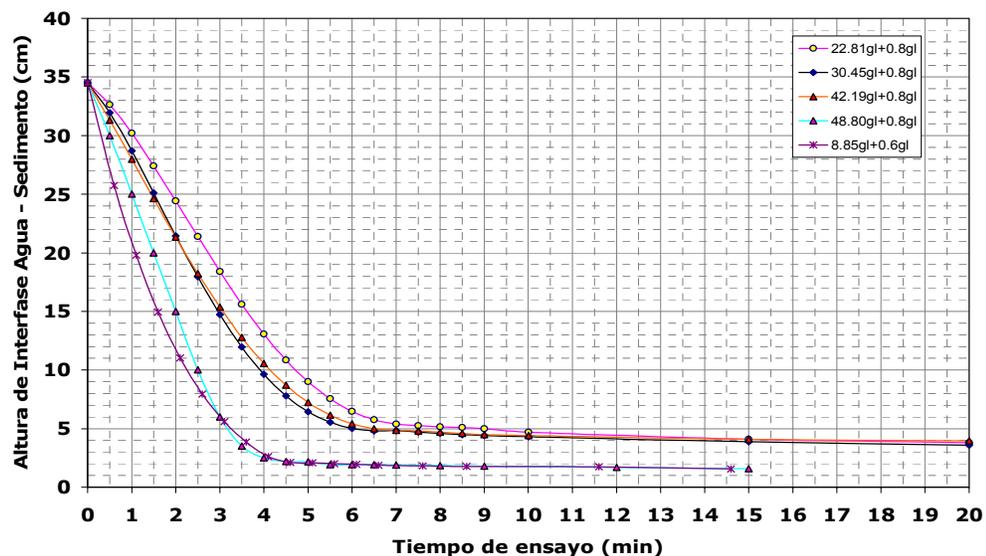


Figura 52. Comportamiento de la Curva de Sedimentación en función del floculante añadido (C_0 suelo= 8,85 g/l).

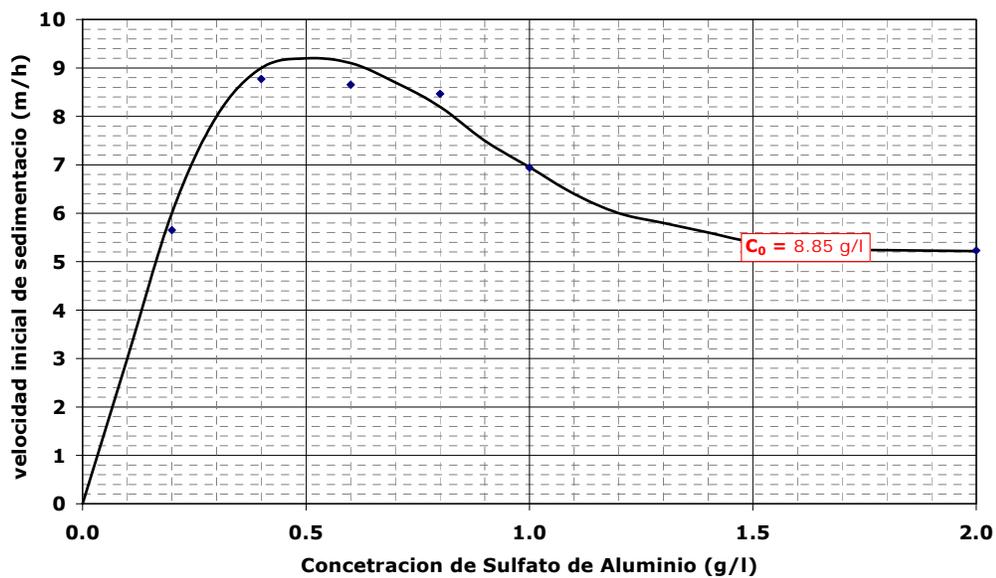


Figura 53. Variación de la velocidad de sedimentación inicial en función de la dosis de floculante y la concentración inicial del ensayo (Mezcla preparada con Agua rio Daule)

Luego de realizar los ensayos de sedimentación (TIPO BATCH), se determino las velocidades de sedimentación inicial para las diferentes muestras analizadas. En el siguiente capitulo se muestra los gráficos de variación de área para las muestras analizadas, mediante dos metodologías diferentes, como análisis tipo BATCH y análisis de flujo de sólidos, con lo cual se cumple uno de los objetivos principales de esta investigación, mostrar parámetros de diseño para sedimentadotes.

CAPÍTULO 4.- ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS



Balanza Electrónica

Para determinar el tiempo t_u se siguió el siguiente procedimiento:

Se traza una línea horizontal a la profundidad H_u , altura en la cual todos los sólidos se encuentran a la concentración deseada para el fango del fondo del tanque, C_u . El valor de H_u se encuentra por medio de la siguiente expresión:

$$H_u = \frac{C_o H_o}{C_u} \quad (23)$$

FUENTE: LIBRO METCALF Y EDDY

Para nuestros casos de estudio al no tener una concentración deseada (C_u) para el fango del fondo del tanque se procedió a encontrar un área mínima para la sedimentación, de acuerdo a la siguiente metodología:

- La concentración de lodos (C_u) deseada producirá en el ensayo una altura de lodos (H_u) que siempre es menor que (H_2), determinada anteriormente.
- El tiempo (t_u) correspondiente a (C_u) siempre va a ser mayor o igual que (t_2), determinado anteriormente.

Por lo tanto el área mínima se producirá cuando: $H_u = H_2$ y $t_u = t_2$. El valor de t_2 es directamente proporcional a la velocidad de sedimentación original.

Esta velocidad fue calculada en cada una de las pruebas realizadas (Ver Capítulo 3).

Luego del análisis de las curvas de sedimentación para los distintos casos de estudio, se procede a realizar el cálculo del área de sedimentación mínima mediante la siguiente expresión:

$$A = \frac{Q}{H_o} t_u \quad (24)$$

ó

$$A_{\min} = \frac{Q}{H_o} t_2 \quad (25)$$

FUENTE: LIBRO METCALF Y EDDY

Donde A= Superficie necesaria para el espesado de los fangos.

Q = Caudal que entra en el tanque, m³ / s.

H_o = Altura inicial de la interfase de la columna, m.

t_u = tiempo necesario para alcanzar la concentración de fangos deseados en el fondo del tanque, en segundos.

Esta ecuación es válida para cualquier sistema de unidades coherentes.

Debido a que en la presente tesis, no se cuenta con la información de caudales producidos. Se procede a estimar un área mínima unitaria

(relacionando el caudal), modificando la ecuación anterior a partir de esta ecuación:

$$\frac{A \text{ min}}{Q} = \frac{t^2}{H_o} \quad (26)$$

A partir de esta ecuación, se generan curvas que relacionan las diferentes concentraciones con los valores de $\frac{A}{Q}$.

Curvas sin utilización de floculante.

Tal como se mencionó en el Capítulo 3, solamente se pudo analizar sin floculante a las muestras de agua residual "preparada", y el agua del lavado

de los camiones mezcladores de hormigón. No se hizo el análisis para el caso del agua del Río Daule debido a que en el ensayo de sedimentación no se pudo observar con claridad la interfase en el proceso de sedimentación sin la utilización de floculante.

En la figura 55, se muestra la curva obtenida para el agua residual preparada tanto para la muestra de suelo A como la de suelo B, sin floculante. Aparentemente, ambas muestras de suelo producen una tendencia similar de la variación del área con respecto a la concentración de sólidos a ser sedimentada. Más adelante, se demuestra que esta similitud no se aplica cuando se usa floculante.

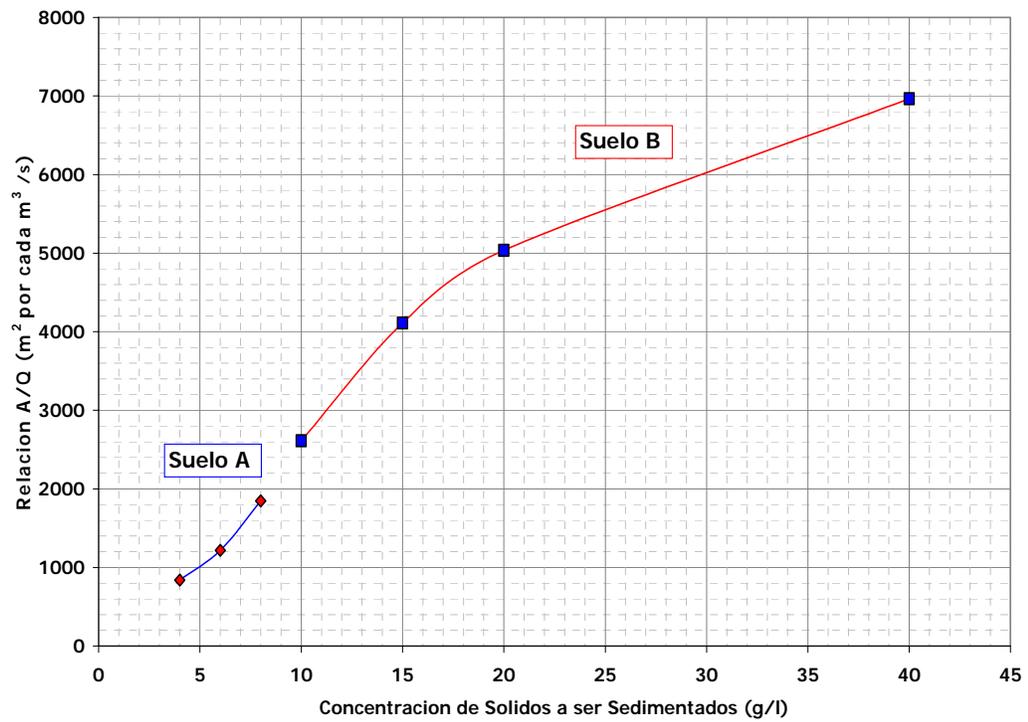


Figura 55. Relación A/Q vs. C para agua residual "preparada" sin floculante

El comportamiento del agua de lavado de mixers se refleja en el gráfico 56, en donde se ve que a mayor concentración, mayor es el área de sedimentación requerida.

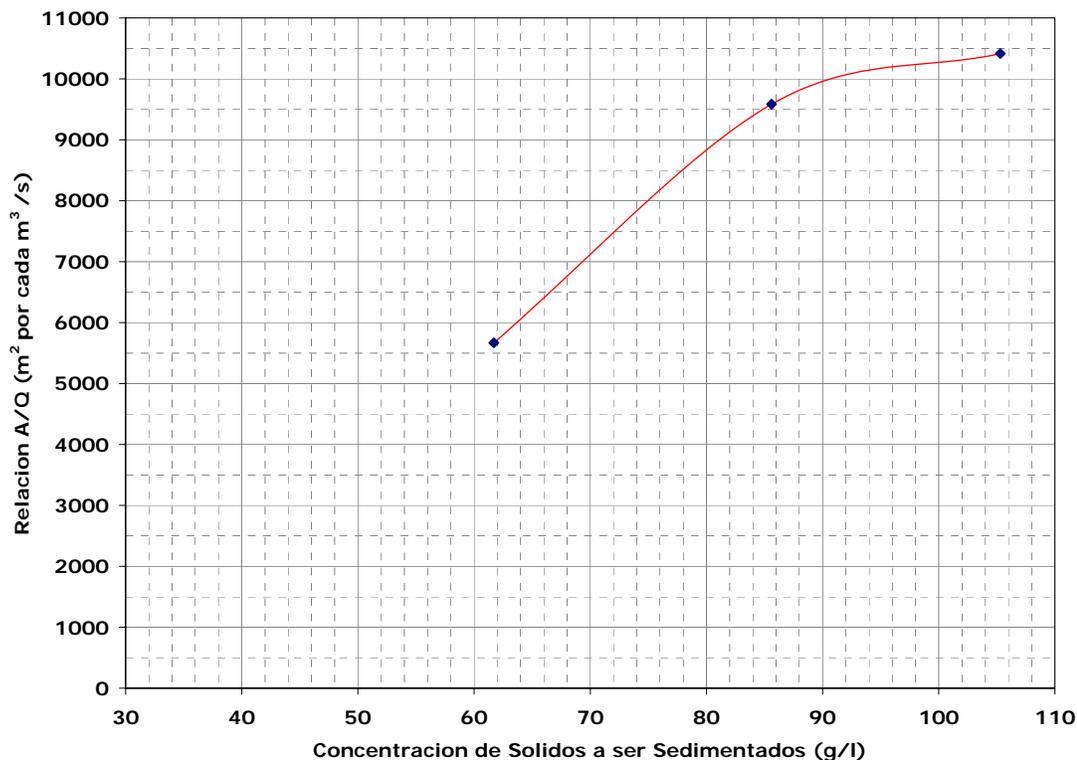


Figura 56. Relación A/Q vs. C para agua del lavado de camiones mezcladores.

Curvas con la utilización de floculante.

Se realizó el estudio para el agua residual artificial y el agua del Río Daule, se generó las curvas a partir del análisis de las curvas de sedimentación de las diferentes concentraciones de sedimento, con la utilización de una concentración óptima de floculante. No se analizó el agua del lavado de los camiones mezcladores de hormigón ya que en el momento de los ensayos no fue necesaria la utilización de floculante debido a la claridad de la interfase observada en el proceso de sedimentación. El análisis de la determinación óptima de floculante se menciona más adelante.

Las figuras 57 y 58 muestran el comportamiento obtenido del área de sedimentación en el agua residual preparada (Suelo A y Suelo B).

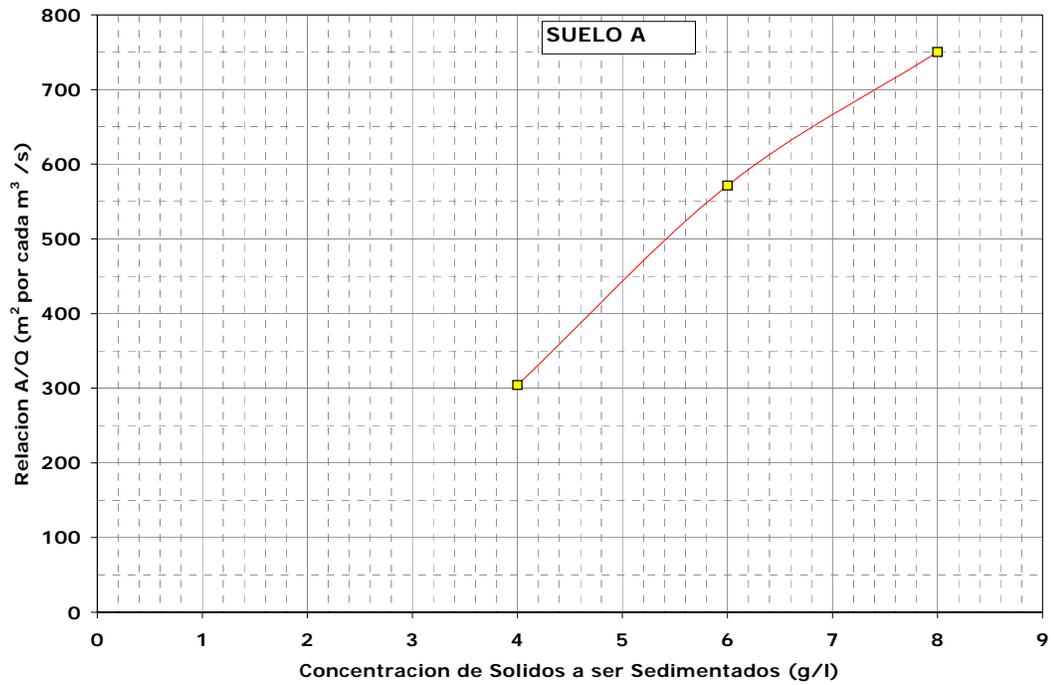


Figura 57. Relación A/Q vs. C para agua artificial con floculante para Suelo A.

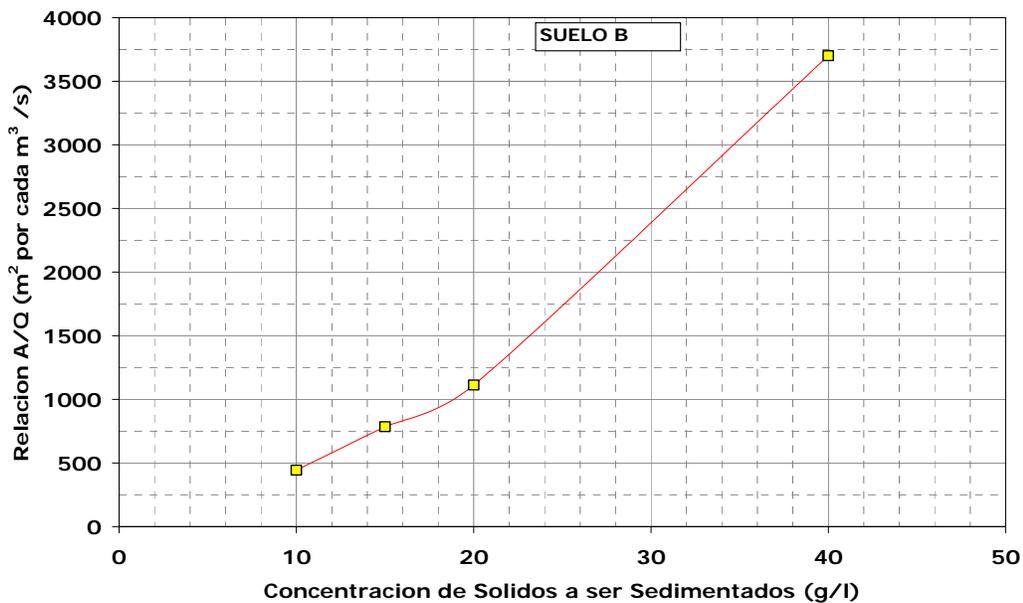


Figura 58. Relación A/Q vs. C para agua artificial con floclante para Suelo B.

La figura 59 muestra el comportamiento del área necesaria para la muestra obtenida en el Río Daule (con floclante).

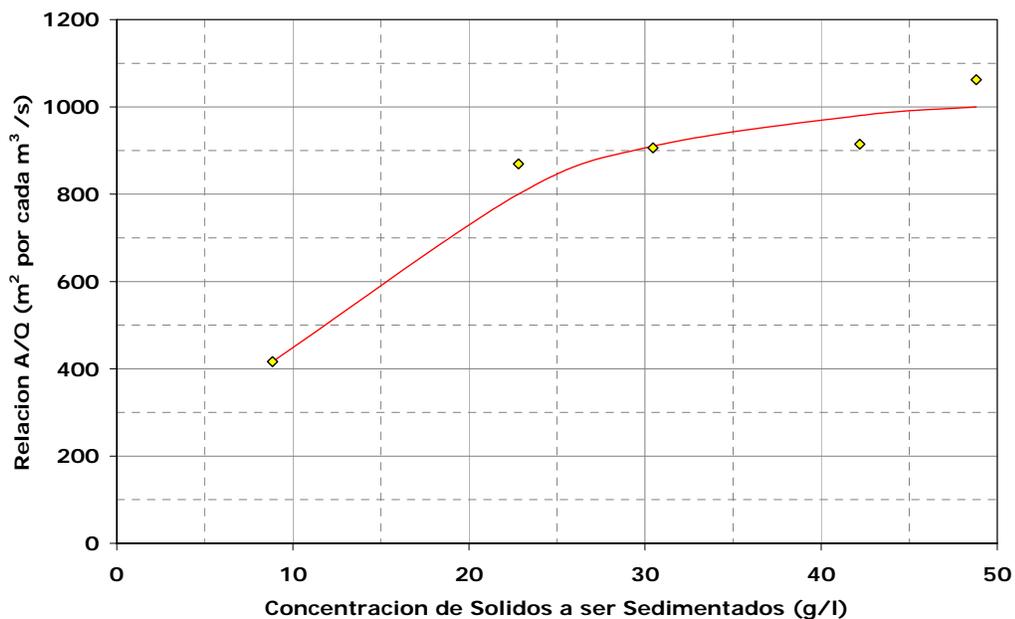


Figura 59. Relación A/Q vs. C para agua río Daule con floclante.

4.2 Análisis de Curvas de Sedimentación Zonal

Después de obtener las curvas de sedimentación a partir de ensayos simples (tipo batch) para cada muestra evaluada, se procede a graficar la relación que existe entre la velocidad de sedimentación zonal para la respectiva concentración de sedimento.

Sin utilización de Floculante

A continuación se analiza gráficamente la variación de la velocidad de sedimentación en función de la concentración de cada ensayo realizado. Debido a que en la muestra de agua residual "preparada" se usó dos tipos diferentes de suelo, el comportamiento obtenido en la velocidad también es diferente.

La muestra preparada con el suelo A fue hecha a concentraciones de 4, 6 y 8 g/l. La de suelo B fue hecha a 10, 15, 20 y 40 g/l. Desafortunadamente, los datos obtenidos para la muestra de suelo A fueron insuficientes para generar una curva (tendencia) confiable. Por tal motivo, solamente se presenta la curva correspondiente a la muestra preparada con el suelo B (figura 60).

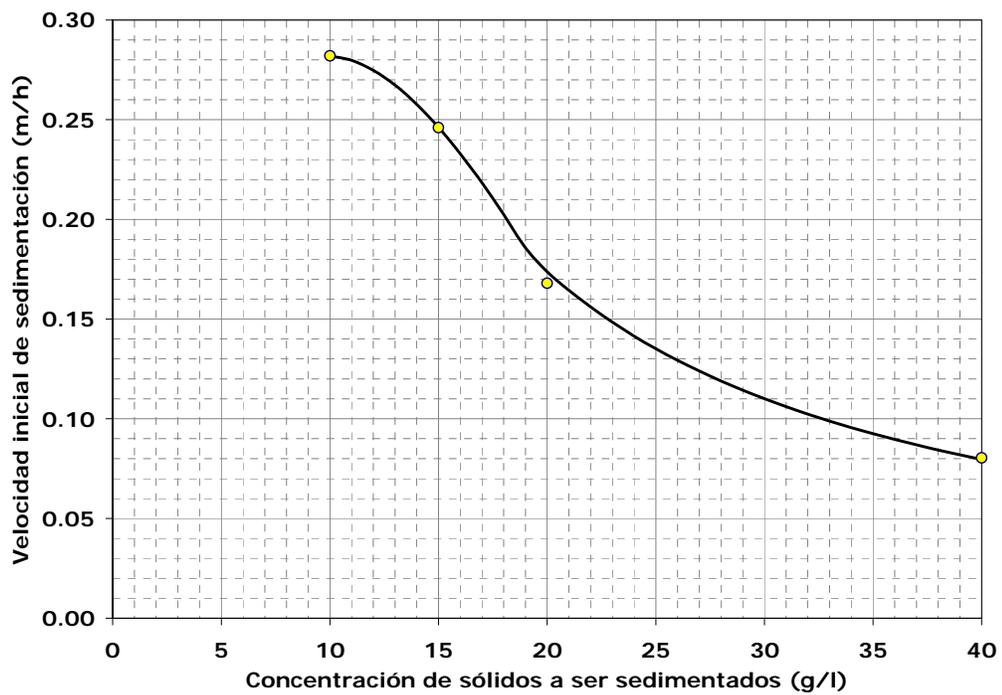


Figura 60. Variación de la velocidad para las diferentes concentraciones de suelo sin la utilización de floculante (Suelo B).

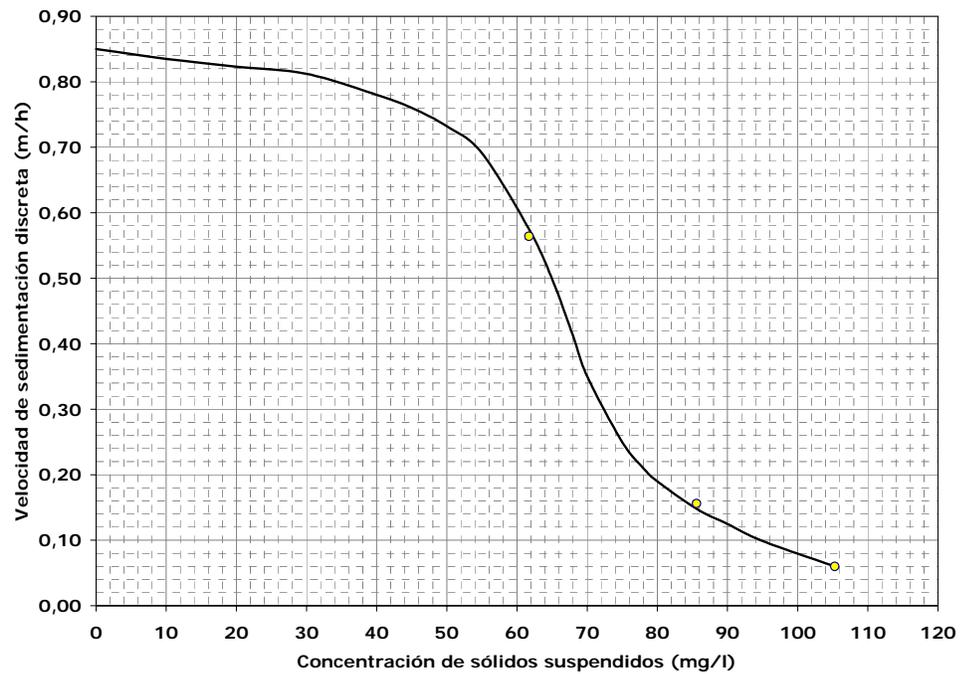


Figura 61. Gráfica V vs. C para agua de lavado de camiones mixer.

Al no contar con suficiente tiempo y recursos solo se pudo realizar los ensayos con las tres concentraciones diferentes, al solo tener estos tres puntos, al momento de graficar no se presencié un claro comportamiento de la curva mostrada en la Figura 61, por lo cual se la ajustó de la mejor manera mediante una metodología de prueba y error.

Para el caso de Estudio III (agua del Río Daule), al momento de realizarse el ensayo de la concentración inicial sin floculante, fue casi imposible observar la interfase de sedimentación. Por lo que se decidió descartar el ensayo y realizar posteriormente los ensayos a diferentes dosis de floculante.

Con utilización de Flocculante

Para poder producir una mayor efectividad en la sedimentación de las muestras de suelo evaluadas, se usó sulfato de aluminio como flocculante que resulta en un incremento de la velocidad de sedimentación y una mayor remoción de sólidos de la columna de agua. Una variación en la cantidad de flocculante añadido producirá una mayor o menor velocidad de sedimentación inicial. Sin embargo, sólo hay una cantidad óptima de flocculante que produce la mayor velocidad de sedimentación para una concentración específica de sólidos en la columna de agua.

En la figuras 62 y 63 se muestra la velocidad de sedimentación para cada concentración de suelo con su respectiva concentración de flocculante óptimo encontrado.

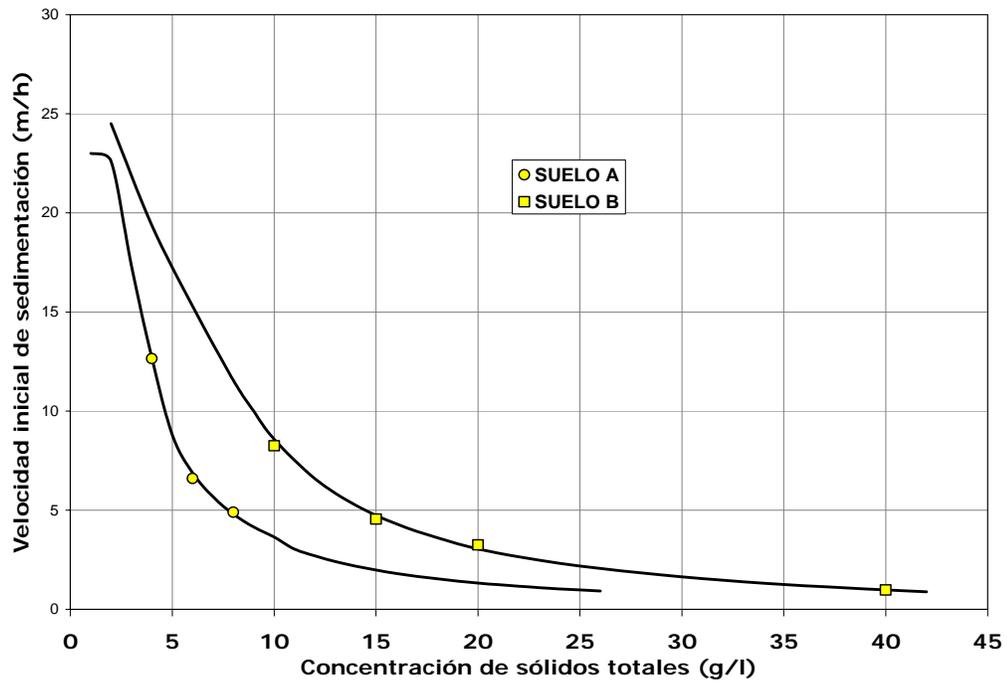


Figura 62. Gráfico V vs. C para agua residual "preparada" con flocculante óptimo.

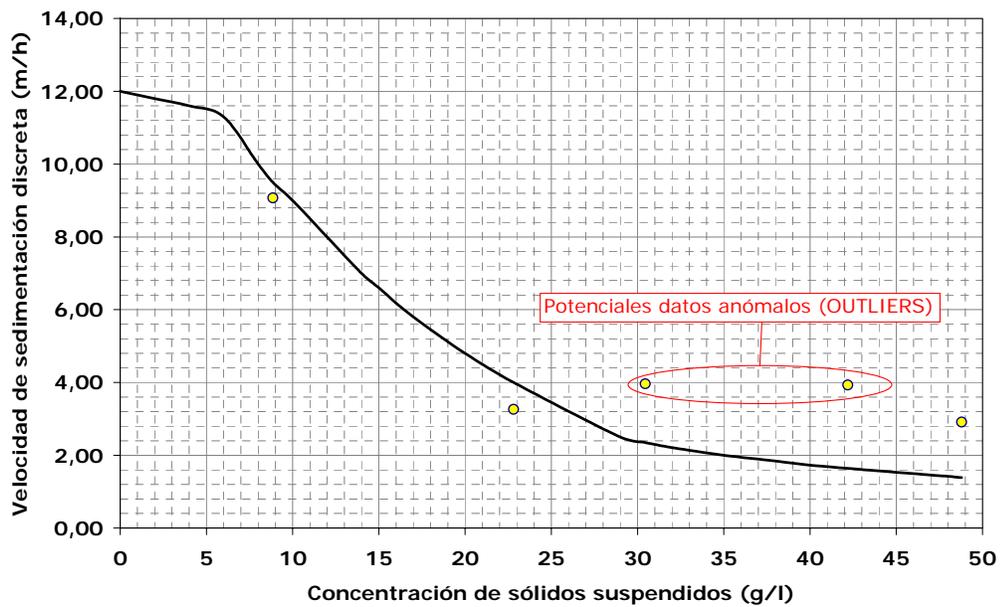


Figura 63. Gráfico V vs. Co para agua del río Daule con flocculante óptimo.

El caso de estudio II, en el cual se estudió el agua proveniente del lavado de camiones mezcladores de hormigón, no se necesitó el análisis con floculante, debido a que el fenómeno de sedimentación se presentó de forma clara y rápida. Se observó una clara aglomeración de partículas, probablemente debido a que el cemento, esté actuando como floculante.

4.2.1 Discusión sobre la Dosis de Floculante

Caso de Estudio 1

Para este caso de estudio se encontró una concentración óptima de floculante para las diferentes concentraciones utilizadas. Las dosis de floculante óptima se muestran en la tabla 5, se puede observar que la dosis óptima de varía pseudo - exponencialmente entre 0,4 a 1 g/l (ver Capítulo 3).

Tabla 5. Floculante Optimo obtenido en las diferentes concentraciones de Agua Residual "preparada" (caso I).

Floculante Optimo (g/l)	Concentración Suelo (g/l) Suelo A.
0,40	4
0,60	6
0,80	8
Floculante Optimo (g/l)	Concentración Suelo (g/l) Suelo B
0,60	10
0,60	15
0,80	20
1,00	40

Caso de Estudio 3

En el caso de estudio tres se ensayo la concentración inicial a diferentes concentraciones de floculante. Se obtuvo que para la concentración inicial (Co) del río Daule, la concentración óptima de floculante es de 0.50 g/l. Para el resto de concentraciones analizadas, se utilizó en los ensayos una concentración de floculante de 0.8 g/l. Sólo se realizó los ensayos con esta concentración de floculante debido a la falta de tiempo, y para observar el comportamiento de la muestra a medida que fue concentrada.

4.3 Determinación de la Superficie necesaria de Sedimentación a partir del Análisis del Flujo de Sólidos.

Un método alternativo para determinar la superficie necesaria para la sedimentación zonal es el análisis del flujo de sólidos. Este método se basa en el flujo de los sólidos a través del tanque de sedimentación en función de los datos obtenidos de los ensayos de columnas de sedimentación.

El flujo de sólidos se produce por la sedimentación causada por la gravedad y por el movimiento de masa debido a la extracción de caudal en el fondo del tanque de sedimentación, el cual se bombea y recircula. En cualquier punto del tanque, el flujo de masa de sólidos tiene el siguiente valor:

$$\mathbf{SF_g = k C_i V_i} \quad (27)$$

FUENTE: LIBRO METCALF Y EDDY

Donde Sf_g = flujo de sólidos por acción de la gravedad, $kg / m^2 \cdot h$.

$K = 1/1000$.

C_i = Concentración de sólidos en el punto de estudio, mg/l .

V_i = Velocidad de Sedimentación de los sólidos a la concentración C_i , m / h .

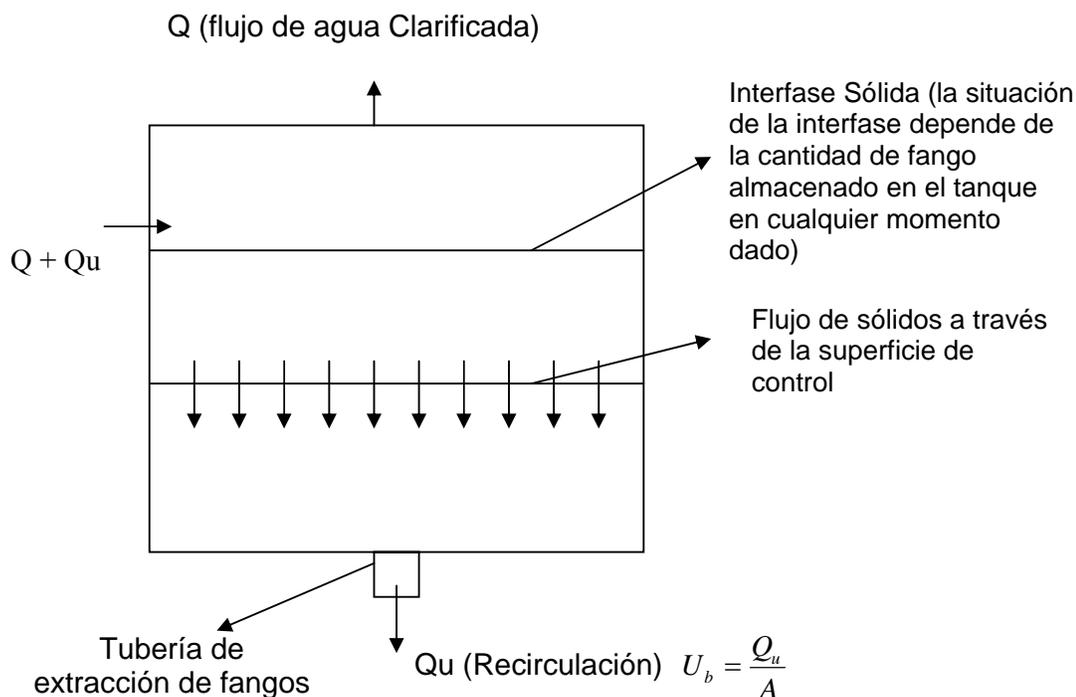


Figura 64. Representación esquemática de un tanque de sedimentación funcionando en condiciones estacionarias.

FUENTE: LIBRO METCALF Y EDDY

El flujo de Sólidos debido al transporte de masa de la suspensión vale:

$$SF_u = k C_i U_b \quad (28)$$

FUENTE: LIBRO METCALF Y HEDÍ

donde SF_u = flujo de sólidos debido a la extracción de fango del fondo del tanque, $Kg / m^2 \cdot h$.

$$k = 1 / 1000.$$

$$U_b = \text{velocidad descendente de la masa, } m / h.$$

El flujo total de masa SF_t de sólidos es la suma de las dos cantidades anteriores y viene dado por:

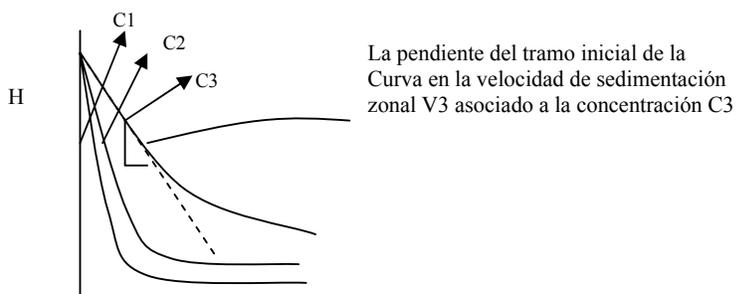
$$SF_t = SF_g + SF_u \quad (29)$$

FUENTE: LIBRO METCALF Y EDDY

$$SF_t = k (C_i V_i - C_i U_b) \quad (30)$$

FUENTE: LIBRO METCALF Y HEDÍ

Para esta ecuación, el flujo de sólidos dependerá de la concentración y de las características de sedimentación de los sólidos. En la siguiente figura se muestra el procedimiento para obtener la curva de flujos de sólidos a partir de un ensayo en una columna de sedimentación.



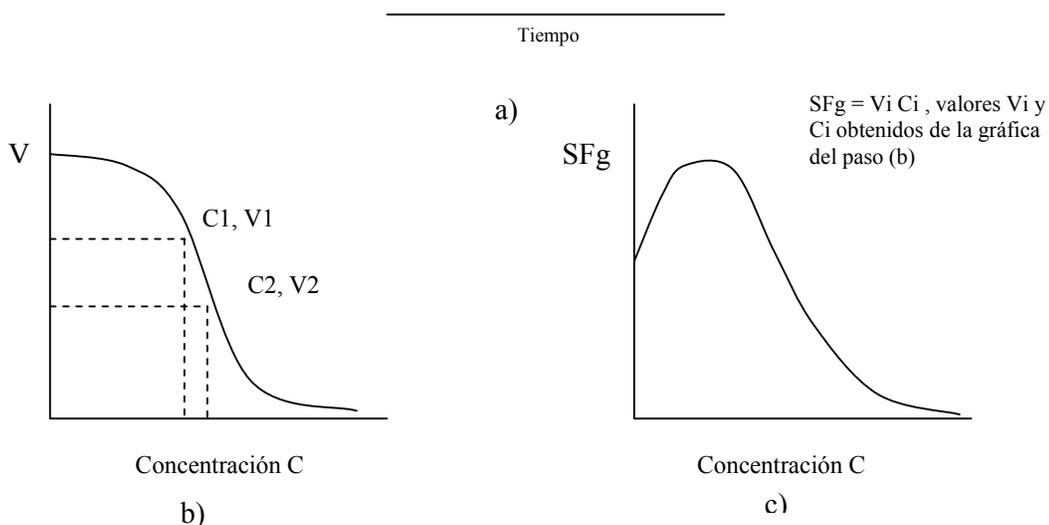


Figura 65. Procedimiento para obtener curva de flujo de sólidos debido a la gravedad.

FUENTE: LIBRO METCALF Y EDDY

En cantidades bajas de concentración, el movimiento de sólidos por acción de la gravedad es pequeño. Si la velocidad permanece constante a medida que la concentración de sólidos aumenta, el flujo de sólidos totales empieza a aumentar al crecer el valor de las concentraciones. Para concentraciones de sólidos muy elevadas, la velocidad zonal de sedimentación tiende a cero, y de igual manera el flujo total de sólidos es muy pequeño. El flujo de sólidos debido al transporte de masa es una función de la concentración cuya pendiente es U_b , velocidad de extracción de fangos por la parte inferior del tanque, como se muestra en la siguiente figura. El flujo total, el cual es la

$$A = \frac{(Q + Q_u)C_o(1/1000 \text{ g / mg})}{SFL} \quad (31)$$

FUENTE: LIBRO METCALF Y EDDY

Donde $A = \text{Area transversal, m}^2$.

$(Q + Q_u) = \text{caudal volumétrico total que entra en el tanque de sedimentación, m}^3 / \text{día}$.

$C_o = \text{concentración de sólidos en el caudal de entrada al tanque de sedimentación, g / m}^3$.

$SF_l = \text{flujo de sólidos límite, kg / m}^2 \cdot \text{día}$.

Donde SFL es el flujo de sólidos limitantes y C_o es la concentración de aguas residuales que entra al clarificador desde el tanque de lodos activados. El valor de SFL se lo obtiene de la curva mostrada a continuación. Dicha curva se genera graficando el valor de flujo de sólidos (SF) versus la concentración.

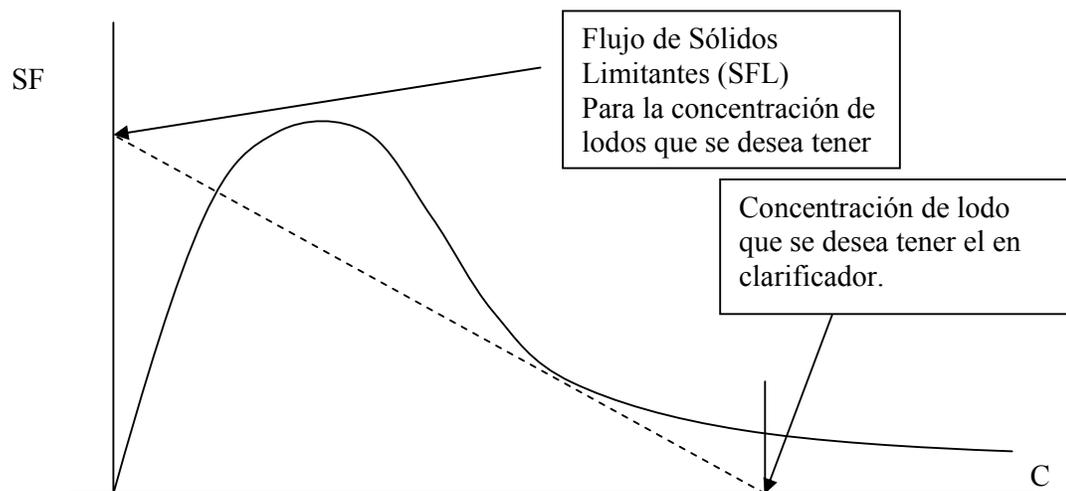


Figura 67. Esquema análisis de flujo limitante por el método flujo de sólidos.

El valor de Flujo de Sólidos es para cada concentración ensayada y se lo obtiene al multiplicar la Concentración analizada en el ensayo tipo batch por la velocidad obtenida de la pendiente de dicho ensayo, tal como se muestra en la siguiente curva.

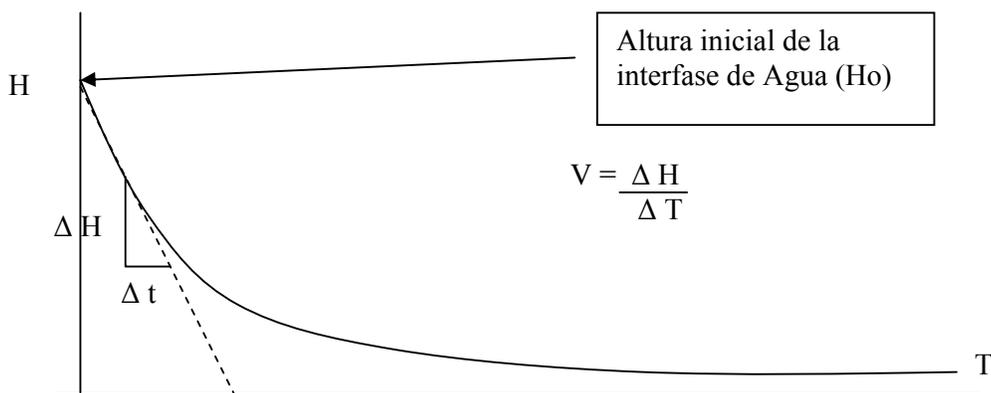


Figura 68. Esquema para determinar la velocidad de sedimentación a partir de datos de sedimentación tipo batch.

Para cada caso de estudio se ensayaron las muestras a diversas concentraciones y por lo tanto para cada concentración se obtiene un valor de Flujo de Sólidos. Adicionalmente cabe recordar que para cada caso de estudio se lo analizó para la situación sin floculante y con floculante.

Al no tener la concentración de lodos esperada del clarificador, se asumió al menos cuatro valores de concentración de lodos para estimar el flujo de sólidos limitantes de la primera curva. Tal como se muestra a continuación, se observa claramente que el flujo de sólidos limitante (SFL) es inversamente proporcional a la concentración de lodos esperada del fondo del clarificador.

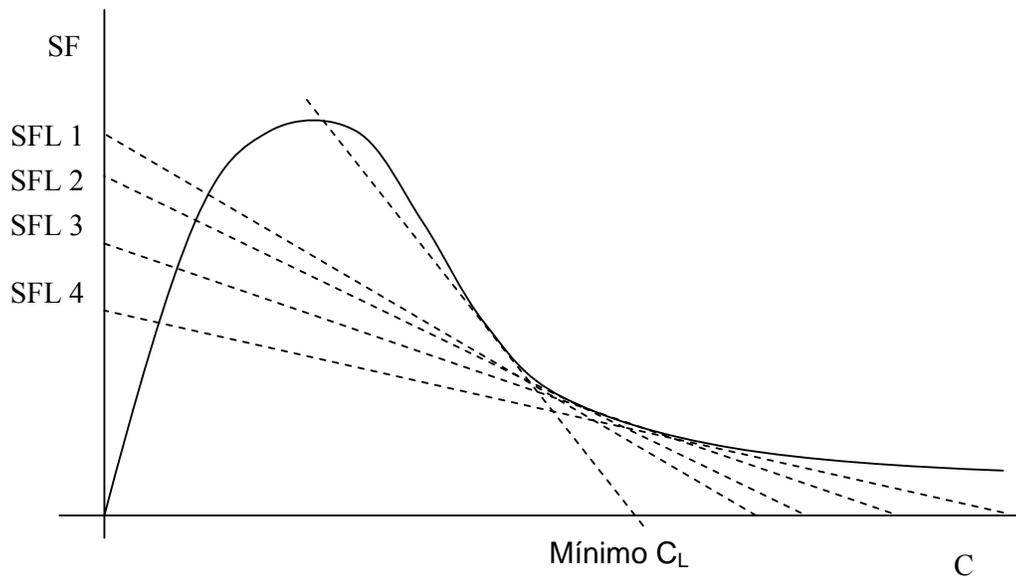


Figura 69. Esquema de análisis para determinar diferentes valores de concentración de lodos SFL con su respectiva concentración máxima C.

En la ecuación mostrada anteriormente C_0 , es la concentración que ingresa al tanque clarificador antes de producirse la sedimentación. La concentración que ingresa al clarificador no se la tiene, por lo que también puede ser estimada. Un buen punto de partida es de que la concentración que ingresa al tanque clarificador siempre debería ser menor que la concentración esperada de lodos en el fondo del clarificador.

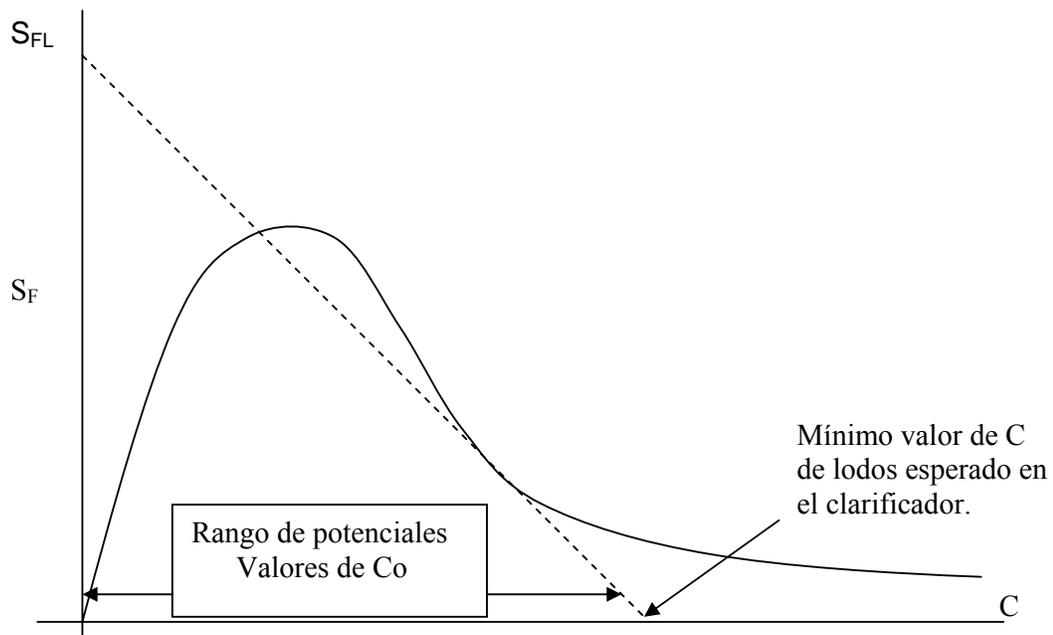


Figura 70. Esquema de análisis para determinar SFL con su respectiva concentración máxima para cada valor de SFL o CL.

En la mínima tangente producida se encuentra el valor mínimo de C de lodos esperado en el clarificador.

Si se analiza la ecuación mostrada al principio, y si se deja expresada en función de C_o y SFL (las dos variables independientes del problema) tenemos:

$$\frac{A}{(Q + Qu)} = \frac{C_o}{SFL} \quad (32)$$

Para graficar esta ecuación, se deben hacer combinaciones de C_o y SFL estimados en los pasos anteriores de este modo:

Tabla 6. Esquema para la fabulación de datos para graficas Co/SFL vs Co.

SF_i/C_{0i}	Co_1	Co_2	Co_3
SFL ₁	$\frac{Co1}{SFL1}$	$\frac{Co2}{SFL1}$	$\frac{Co3}{SFL1}$
SFL ₂	$\frac{Co1}{SFL2}$	$\frac{Co2}{SFL2}$	$\frac{Co3}{SFL2}$
SFL ₃	$\frac{Co1}{SFL3}$	$\frac{Co2}{SFL3}$	$\frac{Co3}{SFL3}$
SFL ₄	$\frac{Co1}{SFL4}$	$\frac{Co2}{SFL4}$	$\frac{Co3}{SFL4}$

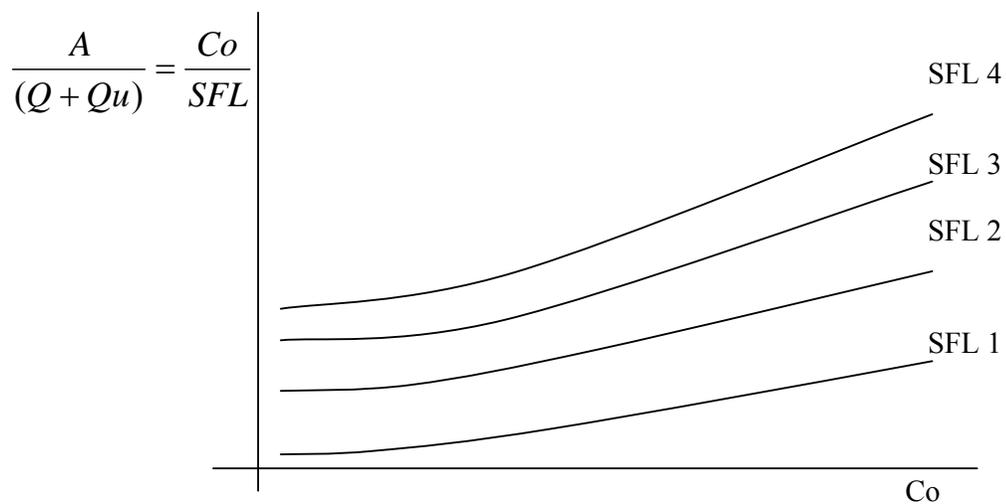


Figura 71. Esquema para determinar el área de un sedimentador en función de la concentración de lodos y la concentración final que queremos en el sedimentador.

Caso de Estudio 1 (sin floculante)

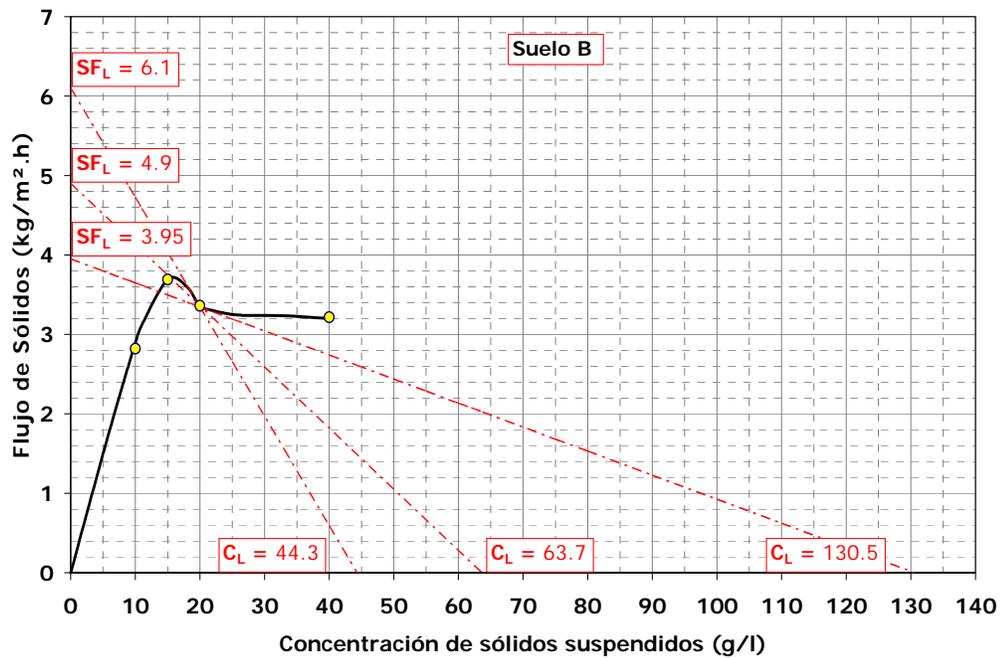


Figura 72. Análisis de flujo de sólidos para el agua residual "preparada" con la muestra de Suelo B sin uso de floculante.

A partir de este gráfico se obtuvo los diferentes valores de Flujo de Sólidos Limitante.

Tabla 7. Valores de flujo limitante para agua preparada artificialmente sin floculante.

SFL 1	6.10
SFL 2	4.90
SFL 3	3.95

Tabla 8. Valores de Co/SFL para los diferentes valores de SFL obtenidos agua artificialmente preparada sin floculante.

Co (mg/l)	Co/SFL1	Co/SFL2	Co/SFL3
5000	0,82	1,02	1,27
10000	1,64	2,04	2,53
15000	2,46	3,06	3,80
20000	3,28	4,08	5,06
40000	6,56	8,16	10,13

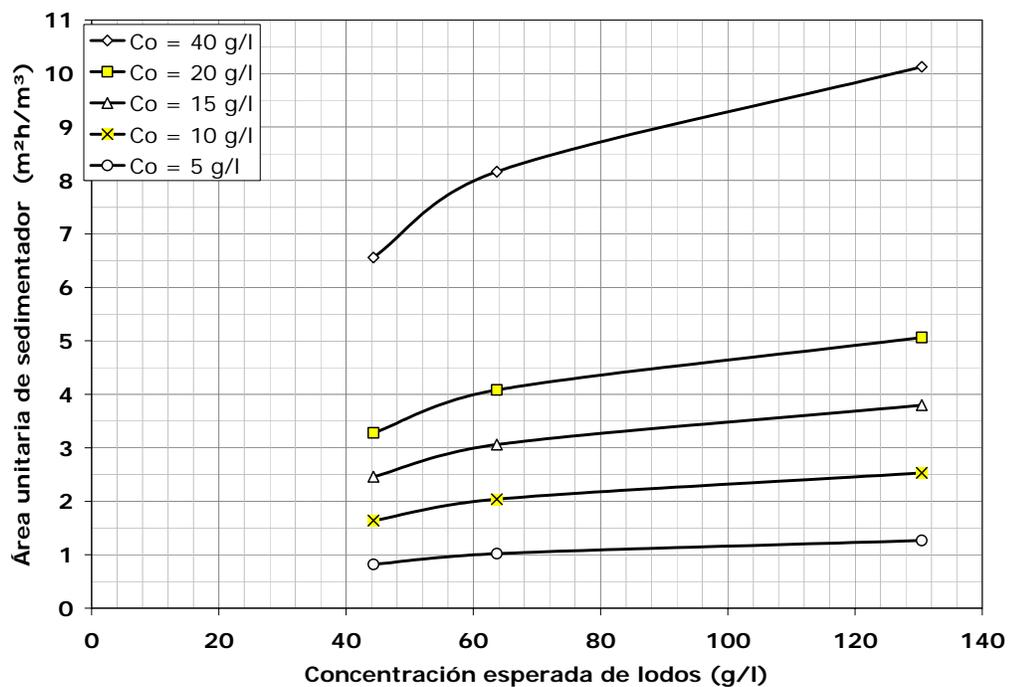


Figura 73. Variación del área de un sedimentador para el agua residual Artificial sin Floculante.

Caso de Estudio 1 con floculante

Tenemos lo que hemos denominado como suelo A y Suelo B.

En la figura siguiente se muestra los valores de sólidos de flujos para las diferentes concentraciones de suelo A, a partir de esta grafica se construye la grafica para el calculo de el área de un sedimentador que se deja expresada en concentración esperada de lodos en el fondo del sedimentador vs. Área unitaria. Se expresa de esta forma para una mayor comprensión para cualquier lector común y corriente que quiera sacar el área de un sedimentador en base ha los parámetros de la curva.

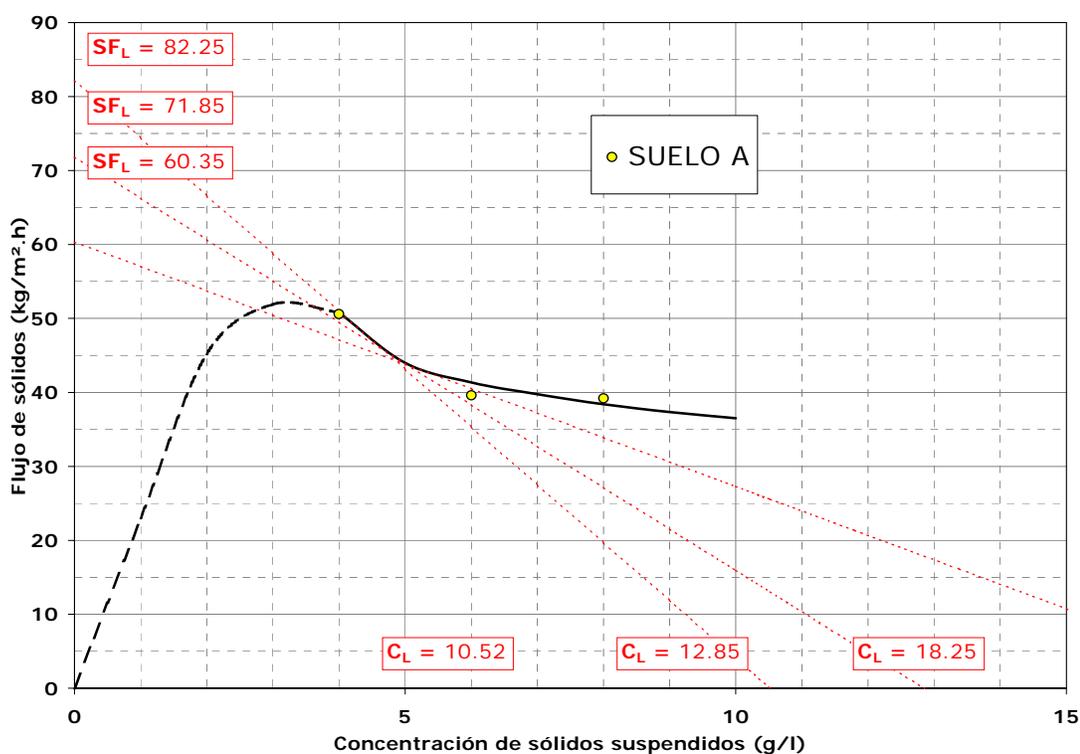


Figura 74. Análisis de flujo de sólidos para el agua residual "preparada" con la muestra de Suelo A con uso de floculante.

A partir de este gráfico se obtuvo los diferentes valores de Flujo de Sólidos Limitante.

Tabla 9. Valores de flujo limitante para agua preparada artificialmente con floculante Suelo A.

SFL 1	82.25
SFL 2	71.85
SFL 3	60.35

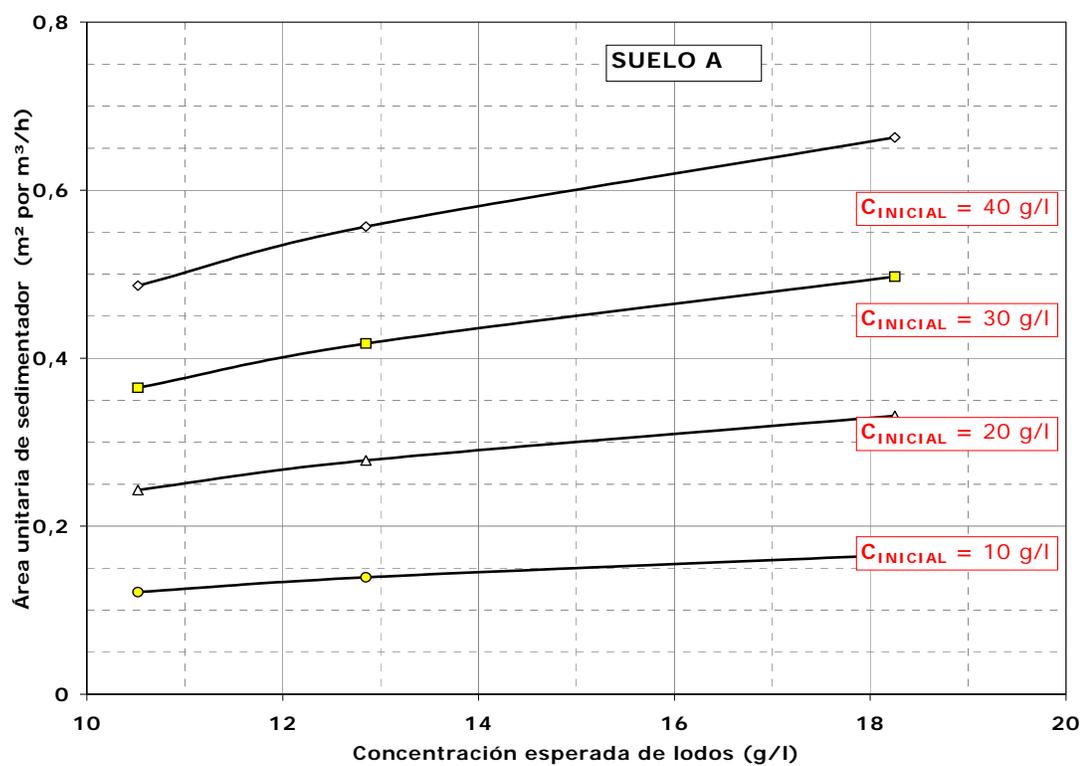


Figura 75. Variación del área de un sedimentador para el agua Artificial del Suelo A.

Tabla 10. Valores de Co/SFL para los diferentes valores de SFL obtenidos agua artificialmente preparada con floculante Suelo A.

Co (mg/l)	Co/SFL1	Co/SFL2	Co/SFL3
-----------	---------	---------	---------

10000	0,12	0,14	0,17
20000	0,24	0,28	0,33
30000	0,36	0,42	0,50
40000	0,49	0,56	0,66

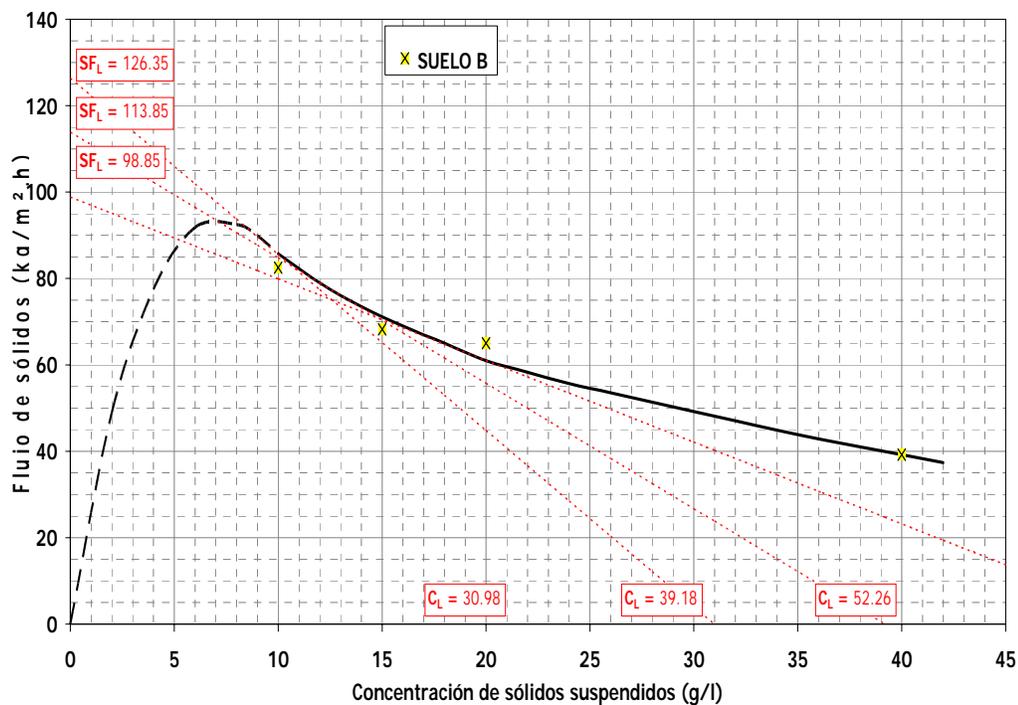


Figura 76. Análisis de flujo de sólidos para el agua residual "preparada" con la muestra de Suelo B con uso de floculante

Tabla 11. Valores de C_o/SFL para los diferentes valores de SFL obtenidos agua artificialmente preparada con floculante Suelo B.

C_o (mg/l)	$C_o/SFL1$	$C_o/SFL2$	$C_o/SFL3$
10000	0,08	0,09	0,10

20000	0,16	0,18	0,20
30000	0,24	0,26	0,30
40000	0,32	0,35	0,40

Como resultado de los ensayos se obtiene la grafica para calcular el área unitaria de un sedimentador en función de las concentraciones que se ensayaron con la adición de floculante.

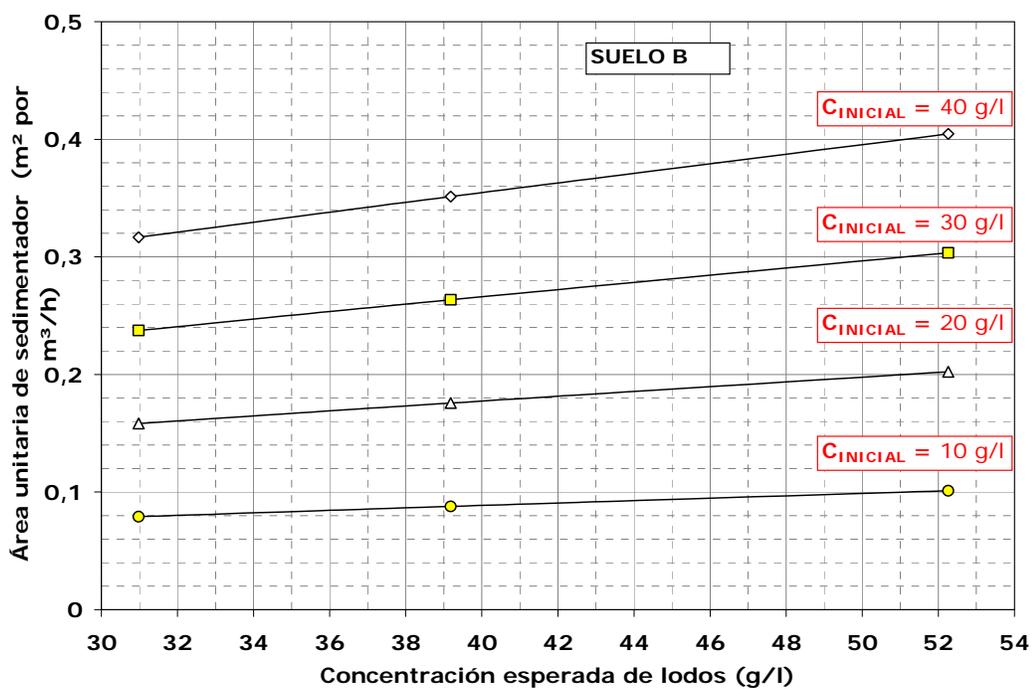


Figura 77. Variación del área de un sedimentador para el agua Artificial del Suelo B.

Como podemos observar en el grafico que para una mayor concentración inicial de sólidos se necesita una mayor área de sedimentación.

Caso de Estudio 2

Agua del lavado de camiones mezcladores de Hormigón.

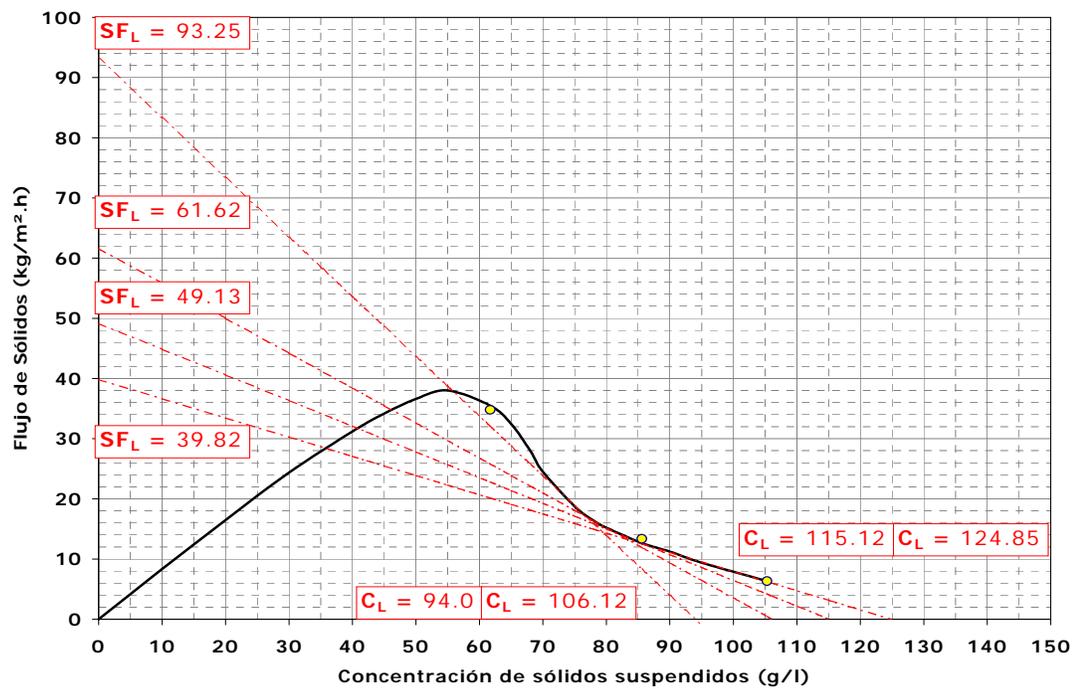


Figura 78. Análisis de flujo de sólidos para el agua del lavado de camiones mezcladores de concreto.

A partir de este gráfico se obtuvo los diferentes valores de Flujo de Sólidos Limitante.

Tabla 12. Valores de flujo limitante para agua del lavado de camiones mixer.

SFL 1	93.25
SFL 2	61.62

SFL 3	49.13
SFL 4	39.82

Tabla 13. Valores de Co/SFL para los diferentes valores de SFL obtenidos para agua del lavado de camiones mezcladores mixer.

Co (mg/l)	Co/SFL1	Co/SFL2	Co/SFL3	Co/SFL4
30000	0,32	0,49	0,61	0,75
60000	0,64	0,97	1,22	1,51
90000	0,97	1,46	1,83	2,26
120000	1,29	1,95	2,44	3,01

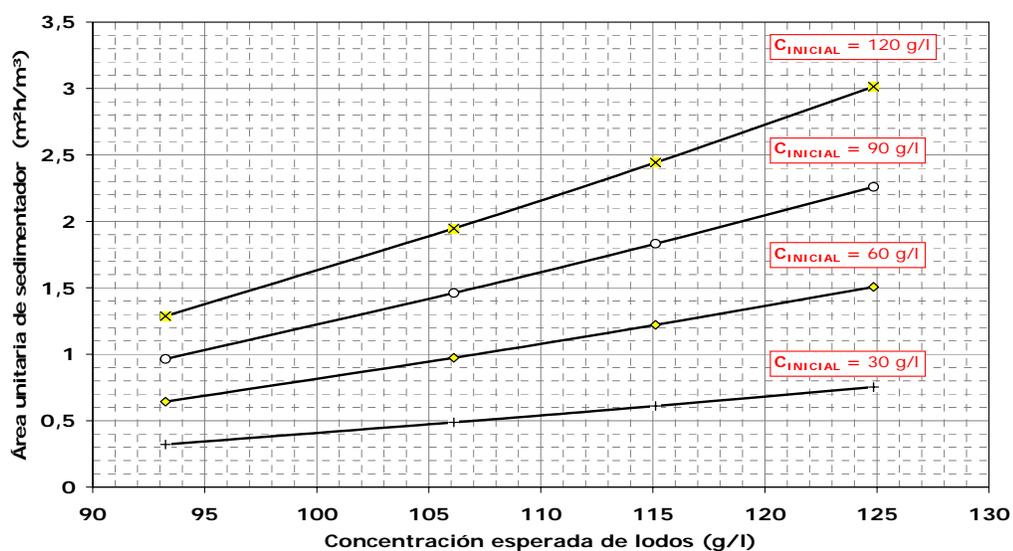


Figura 79. Variación del área de un sedimentador para el agua del lavado de camiones mezcladores de concreto.

Análisis de flujo de sólidos para el agua del lavado de camiones mezcladores de concreto.

Caso de Estudio 3 Río Daule con floculante.

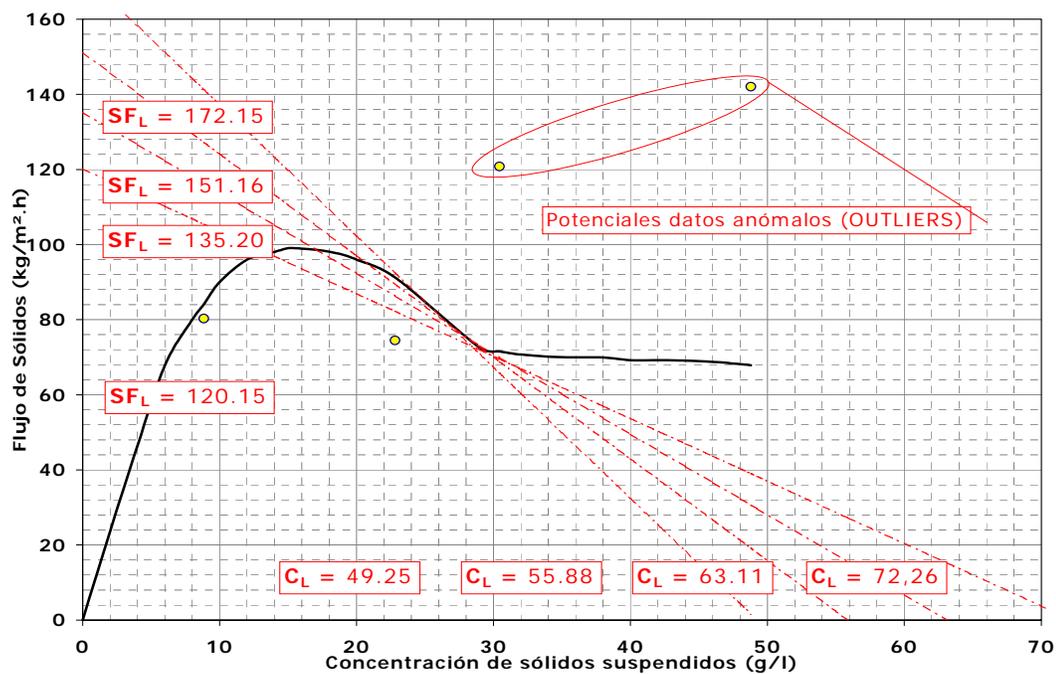


Figura 80. Análisis de Flujo de Sólidos para el agua "residual" preparada con la muestra del río Daule.

Tabla 14. Valores de flujo limitante o concentración de lodos.

SFL 1	172.15
SFL 2	151.16
SFL 3	135.20
SFL 4	120.15

Tabla 15. Valores de Co/SFL para agua de río Daule con floculante.

Co (mg/l)	Co/SFL1	Co/SFL2	Co/SFL3	Co/SFL4
10000	0,06	0,07	0,07	0,08
20000	0,12	0,13	0,15	0,17
30000	0,17	0,20	0,22	0,25
40000	0,23	0,26	0,30	0,33
50000	0,29	0,33	0,37	0,42

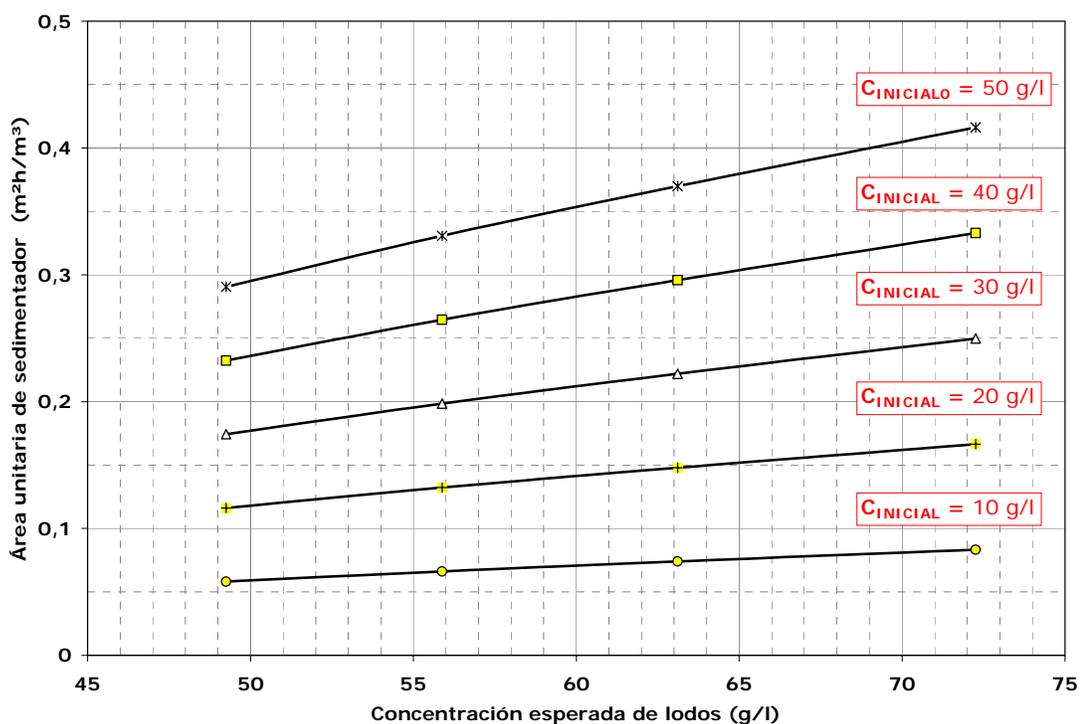


Figura 81. Variación del área de un sedimentador para el agua del río Daule con la utilización de floculante.

Los gráficos obtenidos son de gran importancia, ya que para las tres muestras analizadas, el usuario tendrá la facilidad de obtener el área de sedimentación mínima requerida partiendo del tipo de agua residual que se desee tratar.

Al obtener estas curvas mediante los ensayos tipo batch, se puede obtener áreas de sedimentación a partir de concentraciones iniciales de sólidos que se requiera sedimentar y del caudal que se encuentre ingresando en los sedimentadores. Mediante el análisis de flujo de sólidos, se tienen curvas para diferentes concentraciones, el usuario puede ingresar la concentración esperada de lodos y el caudal de bombeo que ingresará en los sedimentadores, de esta manera al ingresar estos parámetros se puede obtener un área de sedimentación mínima.

Se observa que al utilizar floculante, el área de sedimentación se reduce considerablemente, tal como se demuestra en las diferentes curvas obtenidas mediante los dos métodos mencionados.

CAPITULO 5.- CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES.



Río Daule, Ecuador

5.1 CONCLUSIONES

5.1.1 METODOLOGIA UTILIZADA

Como ya se mencionó, el objetivo principal de esta tesis es desarrollar un procedimiento y metodología apropiada para el estudio del fenómeno de Sedimentación, a nivel académico y también en el campo de la consultoría del Ecuador.

En esta tesis, se aplicó un modelo de metodología que optimice tiempo y recursos. Sin embargo, el diseño específico de un sedimentador requerirá mayor número de ensayos y tal vez equipos más sofisticados. En el análisis se usaron columnas de sedimentación de 1 L de capacidad, para producir curvas posteriormente analizadas con el método de sedimentación zonal o retardada (tipo 3) (ANÁLISIS TIPO BATCH). Los datos fueron tabulados y se calculó la velocidad de sedimentación para cada tipo de muestra. Luego de esto se realizó el análisis de Flujo de Sólidos para calcular la cantidad máxima de sólidos (lodos) en el sedimentador, y la concentración de lodos deseada a la salida de nuestro sedimentador.

5.1.2 LIMITACIONES ENCONTRADAS

La presente investigación pasó por diferentes desafíos junto con el ajuste de datos para su realización. Se requirió escoger un método apropiado para el estudio y modelación de las curvas de sedimentación y tabulación de datos.

Como limitaciones de la presente tesis podemos decir que estas se dividen en tres:

- Espacio suficiente para realizar los ensayos.
- Falta de equipos apropiados para hacer el análisis
- Financiamiento para la realización de más ensayos.

A pesar de estas limitaciones, la tesis pudo ser realizada con relativa facilidad aplicando criterio ingenieril. Otra limitación está relacionada a la determinación de la interfase agua – sedimento en la columna de agua. La falta de una iluminación apropiada (contraluz) incidió en errores de medición.

5.1.3 APLICABILIDAD DE LA INVESTIGACION

En esta investigación no se pudo contar con datos de caudal que entrarían al sedimentador. Por lo tanto, se dejó expresado el cálculo del Área de un Sedimentador en función de un caudal unitario. El análisis de flujo de sólidos probó ser un método efectivo de diseño de sedimentadores. Sin embargo, se necesitan más ensayos de los realizados para determinar una mejor curva de diseño.

Como se mencionó anteriormente, los procedimientos usados en esta tesis pueden ser aplicados en el diseño de sedimentadores.

5.1.4 USO DE LA FLOCULACION QUIMICA

Podemos mencionar que el estudio de la sedimentación ha sido discutido en muchas partes del mundo en lo referente a la cantidad de floculante que se debería añadir para este tipo de procesos. Es así que en muchos artículos relacionados con sedimentación se discute el hecho de añadir cantidades superiores a los 500 mg/L. Sin embargo, generalmente se añade menos cantidad de floculante por motivos económicos. Esto también depende de en que proceso se esta utilizando, rangos recomendados por la ley, entre otros. En los ensayos realizados, la concentración optima de floculante esta en el rango de 400mg/l a 800 mg/l. Estas dosis de floculante produjeron una sedimentación mayor que con las otras dosis de sulfato. Estos valores de dosis de sulfato podrían ser menores si tuviéramos partículas sólidas de tamaño uniforme. Como es el caso de estudio con el agua de camiones mezcladores de cementos (mixer) que no necesitó añadir sulfato de aluminio. Cabe señalar que, el cemento posee aproximadamente el 100% de partículas uniforme, por lo que la sedimentación también es uniforme. Adicionalmente, el principal componente del cemento es el carbonato de calcio, el cual pudiera estar actuando como un floculador natural del propio cemento.

5.2 RECOMENDACIONES

Para las futuras investigaciones de sedimentación se recomienda trabajar con unidades de concentración de sólidos en mg/l y NTU (turbidez. No es posible hacer conversiones entre estas dos unidades,

Como se mencionó anteriormente, el tamaño de las partículas es muy importante para el estudio de la sedimentación. Por lo tanto, se recomienda en estudios futuros, se utilice en lo posible materiales con un mismo tamaño de partículas (uniforme). Ejemplos típicos sería el uso de talco, cemento, etc. En el caso de suelos, se debe tratar que todos los ensayos sean con el mismo material del mismo tamaño de partículas. La composición química de dos suelos puede ser diferente y esto hace que se produzca resultados diferentes.

En lo posible, se recomienda trabajar con columnas de sedimentación de la misma altura para ensayos de una muestra en particular. Es necesario trabajar en lugares con mayor claridad, y si es posible, colocar lámparas fluorescentes a contraluz de las columnas.

Para concentrar muestras en las cuales no conocemos la concentración inicial, como se recomienda secar la muestra y así conocer la concentración inicial.

Las curvas obtenidas del agua del lavado de camiones mezcladores de hormigón tienen un comportamiento ideal para el análisis del fenómeno de sedimentación que podrían ser usados para fines académicos en el futuro.

ANEXOS

Tabla 16. Variación de la Interfase para una C= 4 g/l.

T(min)	H(cm)
0	35,75
1	35,50
10	35,00
15	34,80
20	34,80
30	34,50
60	30,00
90	27,00
120	22,00
150	19,00
160	18,50
170	17,50
180	17,20

Tabla 17. Variación de la Interfase para una C= 6 g/l.

T(min)	H (cm)
0	34,5
1	34,25
10	33,50
15	33,00
20	32,50
30	31,20
40	29,50
50	27,70
60	26,50
90	24,50
120	23,50
150	22,00

Tabla 18. Variación de la Interfase para una C= 8 g/l.

T(min)	H(cm)
0	35,75
1	35,00
5	34,00
10	33,50
15	32,50

20	32,00
30	31,50
60	31,00
90	30,00
120	29,50
150	28,50

Tabla 19. Variación de la Interfase para una C= 10 g/l.

T (min)	H(cm)
0	34,5
1	33,50
5	32,70
10	32,50
15	31,50
20	30,00
30	28,00
40	27,50
50	26,50
60	25,70
90	25,00
120	24,50
150	21,80

Tabla 20. Variación de la Interfase para una C= 15 g/l.

T(min)	H(cm)
0	29,1
1	28,7
5	28,40
10	28,30
15	28,00
20	27,80
30	27,80
40	27,50
50	27,00
60	27,00
90	27,00
120	27,00
150	27,00
150	27,00

Tabla 21. Variación de la Interfase para una C= 20 g/l.

T (min)	H(cm)
0	35,75
1	35,40
5	35,00
10	34,80
15	34,40
20	34,40
30	34,30
40	34,20
50	34,10
60	34,00
90	34,00
120	34,00
150	34,00

Tabla 22. Variación de la Interfase para una C= 40 g/l.

T (min)	H(cm)
0	34,5
1	34,10
5	33,80
10	33,60
15	33,50
20	33,30
30	33,00
40	33,00
50	32,80
60	32,70
90	32,50
120	32,50
150	32,50

Tabla 23. Variación de la Interfase para una C= 4 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.

Concentraciones de Sulfato de Aluminio para 4 g/l de Suelo						
	0,2 g/l	0,4 g/l	0,6 g/l	0,8 g/l	1,0 g/l	2,0 g/l
T(min)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)
0,0	29,10	29,10	29,10	29,10	29,10	29,10
0,5	28,00	26,00	25,50	25,00	27,00	28,00
1,0	26,00	22,00	19,00	19,00	23,00	27,00
1,5	19,00	11,00	10,00	10,00	17,00	23,00
2,0	11,00	6,00	4,50	5,00	9,50	20,00
2,5	4,50	0,20	0,20	0,20	6,00	14,50
3,0	0,30	0,20	0,20	0,20	0,80	9,50
3,5	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	4,50
4,0	0,20	0,19			0,20	1,00

4,5						0,30
5,0						0,30
5,5						0,30
6,0						

Tabla 24. Variación de la Interfase para una C= 6 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.

Concentraciones de Sulfato de Aluminio para 6 g/l de Suelo						
	0,2 g/l	0,4 g/l	0,6 g/l	0,8 g/l	1,0 g/l	2,0 g/l
T(min)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)
0,0	29,10	29,10	29,10	29,10	29,10	29,10
0,5	28,30	28,10	28,10	27,70	28,20	28,20
1,0	27,60	27,40	27,40	26,80	27,00	27,20
1,5	26,80	23,00	23,00	22,00	24,00	25,00
2,0	24,50	17,00	19,00	17,00	19,00	21,00
2,5	23,00	14,50	15,00	12,00	14,00	16,00
3,0	20,50	10,20	12,00	7,50	10,00	11,00
3,5	17,50	8,00	8,50	3,50	7,00	7,50
4,0	14,50	4,50	5,00	0,50	2,50	4,00
4,5	12,50	1,30	1,50	0,40	0,60	0,70
5,0	10,20	1,20	0,90	0,40	0,50	0,60
5,5	8,70	1,10	0,90		0,50	0,50
6,0	6,80	1,00	0,90			0,50
6,5	5,00	1,00				0,50
7,0	2,80	0,90				
7,5	1,00	0,90				
8,0	0,95					
8,5	0,90					
9,0	0,90					
10,0						

Tabla 25. Variación de la Interfase para una C= 8 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.

Concentraciones de Sulfato de Aluminio para 8 g/l de Suelo						
	0,2 g/l	0,4 g/l	0,6 g/l	0,8 g/l	1,0 g/l	2,0 g/l
T(min)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)
0,00	29,10	29,10	29,10	29,10	29,10	29,10
0,50	28,30	28,00	28,20	28,00	28,30	28,20
1,00	27,80	27,00	27,50	26,80	27,70	27,40
1,50	27,50	25,20	25,00	24,50	26,00	24,00
2,00	26,00	23,00	21,50	21,20	24,00	22,50
2,50	24,00	20,50	18,50	18,00	21,50	19,50
3,00	22,00	18,20	15,00	15,00	17,50	17,00
3,50	20,50	16,00	12,20	12,00	15,00	14,30
4,00	19,00	14,00	9,00	9,50	12,50	12,20

4,50	16,00	11,50	6,50	6,50	10,00	10,00
5,00	14,50	9,50	3,20	4,50	7,70	7,40
5,50	13,00	7,70	1,70	2,10	5,50	5,30
6,00	12,00	6,00	1,60	2,00	2,50	3,50
6,50	10,00	4,00	1,50	1,90	1,80	3,30
7,00	8,50	3,00	1,50	1,80	1,80	3,15
7,50	6,50	2,80	1,40	1,80	1,70	3,00
8,00	5,50	2,70	1,40	1,80	1,70	2,90
8,50	3,50	2,60	1,40	1,70	1,60	2,80
9,00	1,80	2,50	1,30	1,60		2,80
9,50	1,20		1,30			
10,00	1,10		1,20			
10,50	1,00		1,20			
11,00	1,00		1,10			
11,50						

Tabla 26. Variación de la Interfase para una C= 10 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio.

Concentraciones de Sulfato de Aluminio para 10 g/l de Suelo						
	0,2 g/l	0,4 g/l	0,6 g/l	0,8 g/l	1,0 g/l	2,0 g/l
T(min)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)
0,00	29,10	29,10	29,10	29,10	29,10	29,10
0,50	28,40	28,20	28,00	28,20	28,30	28,50
1,00	28,00	27,70	27,10	28,00	27,50	27,90
1,50	27,00	25,00	23,00	27,00	24,00	26,00
2,00	19,00	21,00	16,00	21,00	20,50	22,00
2,50	15,00	14,50	11,00	14,50	15,00	18,50
3,00	11,00	10,00	6,00	10,00	11,50	12,50
3,50	7,00	6,50	2,50	5,00	8,00	8,50
4,00	5,00	4,00	0,50	1,20	4,50	5,00
4,50	1,00	0,70	0,40	0,50	0,70	2,20
5,00	0,50	0,50	0,40	0,40	0,50	0,70
5,50	0,40	0,40		0,40	0,40	0,50
6,00	0,40	0,40			0,40	0,40
6,50						
7,00						

Tabla 27. Variación de la Interfase para una C= 15 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio

Concentraciones de Sulfato de Aluminio para 15 g/l de Suelo						
	0,2 g/l	0,4 g/l	0,6 g/l	0,8 g/l	1,0 g/l	2,0 g/l
T(min)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)
0,00	29,10	29,10	29,10	29,10	29,10	29,10
0,50	28,40	28,00	28,20	28,00	28,30	28,40
1,00	27,80	27,20	27,70	27,50	27,70	27,70

1,50	27,00	26,00	24,00	24,00	26,00	26,50
2,00	26,20	24,00	22,00	21,00	23,00	24,00
2,50	24,00	22,00	17,50	17,00	19,50	20,00
3,00	22,00	19,50	14,50	13,50	16,50	15,50
3,50	20,00	17,50	12,00	11,00	13,50	12,80
4,00	18,00	15,20	9,00	7,50	10,20	9,50
4,50	15,50	13,00	6,00	4,50	7,80	7,00
5,00	14,00	11,00	3,70	2,00	5,50	5,30
5,50	12,00	9,00	1,40	0,80	2,60	2,50
6,00	10,50	7,00	1,00	0,80	1,00	0,80
6,50	9,00	5,00	0,90	0,80	0,90	0,80
7,00	7,20	2,70	0,80		0,80	0,80
7,50	5,00	1,40	0,80		0,80	
8,00	3,20	1,30				
8,50	1,70	1,20				
9,00	1,20	1,10				
9,50	1,10					
10,00	1,10					
10,50						
11,00						

Tabla 28. Variación de la Interfase para una C= 20 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio

Concentraciones de Sulfato de Aluminio para 20 gr/lit de Suelo						
	0,2 gr/lit	0,4 gr/lit	0,6 gr/lit	0,8 gr/lit	1,0 gr/lit	2,0 gr/lit
T(min)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)
0	35,75	35,75	35,75	35,75	35,75	35,75
0,5	35,15	35,3	34,85	34,5	34,95	34,5
1	34,65	34	33,65	33	33,15	33,5
1,5	34,45	33	31,15	30	30,15	31
2	31,65	30	28,65	26,5	27,65	28
2,5	29,65	27,5	25,65	24	24,65	25,5
3	27,65	25,5	23,15	21	21,65	22,5
3,5	25,85	23,5	20,65	18,5	19,15	20
4	23,7	21,5	17,65	15,5	16,15	17
4,5	21,6	19,5	14,55	13	14,15	15
5	19,8	17,5	12,76	10	11,85	13
5,5	18,8	15,5	9,59	8	9,15	10
6	16,4	14	7,5	5	7,55	8
6,5	13,5	12	4,25	2,5	4,5	5
7	12,78	10	2,6	1,8	2,5	3
7,5	10,54	8	1,8	1,7	1,4	1,5
8	8,23	6	1,7	1,7	1,4	1,4
8,5	6,54	4	1,6			1,4
9	4,76	2,5				
9,5	2,3	1,8				

10	1,9	1,8				
10,5	1,9	1,7				
11	1,8					

Tabla 29. Variación de la Interfase para una C= 40 g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio

Concentraciones de Sulfato de Aluminio para 40 g/l de Suelo						
	0,2 g/l	0,4 g/l	0,6 g/l	0,8 g/l	1,0 g/l	2,0 g/l
T(min)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)
0,00	35,75	35,75	35,75	35,75	35,75	35,75
0,50	35,00			35,30	35,00	35,00
1,00		35,00	35,00	35,00	34,00	34,20
1,50		34,30	34,50	34,00	33,50	33,30
2,00		33,50	34,00	33,30	32,70	32,50
2,50		32,80	33,50	32,50	31,80	31,60
3,00	32,80	32,00	33,00	31,70	31,00	30,70
3,50		31,30	32,40	31,00	30,50	29,80
4,00		30,60	31,80	30,50	29,60	29,10
4,50		30,00	31,30	29,50	28,80	28,00
5,00	31,50	29,50	30,70	29,00	28,10	27,30
5,50		29,00	30,20	28,50	27,40	26,50
6,00		28,00	29,80	27,80	26,50	25,70
6,50		27,50	29,20	27,00	26,00	24,80
7,00		26,80	28,70	26,30	25,30	24,00
7,50		26,20	28,00	25,60	24,50	23,20
8,00	28,50	25,50	27,60	25,00	23,80	22,40
8,50		25,00	27,00	24,20	23,00	21,50
9,00		24,30	26,70	23,60	22,40	20,80
9,50		23,60	26,00	23,00	21,50	20,00
10,00	26,20	23,20	25,60	22,30	21,00	19,20
10,50		22,50	25,00	21,60	20,30	18,50
11,00		21,80	24,60	21,00	19,60	17,70
12,00		20,80	23,50	19,50	18,00	16,40
13,00		19,50	22,60	18,30	17,00	15,00
14,00		18,30	21,50	17,10	15,60	13,80
15,00	21,00	17,00	20,60	16,00	14,20	12,80
16,00	20,50	16,00	19,70	14,80	13,00	12,00
17,00		14,80	18,70	13,70	11,70	11,30
18,00	18,50	13,80	17,80	12,50	10,60	10,80
19,00		12,80		11,30	9,60	10,30
20,00	17,00	11,80		10,50	8,90	9,90
21,00	16,00	10,80	15,00	9,50	8,30	
22,00		10,00	14,30	8,80	7,90	
23,00	14,00	9,30	13,50	8,10	7,60	8,70
24,00		8,70	12,70		7,30	8,40
25,00	11,50	8,30	12,00	7,50	7,00	8,00

26,00	11,00					7,70
27,00			10,90			7,40
28,00	9,50	7,40				7,20
29,00						
30,00		6,90	9,70	6,10	5,70	6,70
31,00	8,40				5,60	
32,00						6,30
33,00						
34,00					5,30	
35,00	7,50	5,90				6,00
36,00						
37,00						
38,00						
39,00						
40,00	6,50	5,20	6,40	5,80	5,00	
41,00						
42,00						
43,00						
44,00						
45,00	5,90					
46,00						
47,00						
48,00			5,90			
49,00						
50,00	5,50	4,80				
51,00						
52,00						

Tabla 30. Variación de la Interfase para las concentraciones Co, C1 y C2.

Concentraciones de Cemento del Agua de Lavado de Mixers Holcim					
Co= 61,7g/l		C1= 85,6g/l		C2= 105,3g/l	
T(min)	H(cm)	T(min)	H(cm)	T(min)	H(cm)
0,00	35,75	0,00	35,75	0,00	35,75
0,50	35,10	0,50	35,50	0,50	35,75
1,00	34,70	1,00	35,40	1,00	35,75
1,50	34,25	1,50	35,35	1,50	35,75
2,00	33,80	2,00	35,25	2,00	35,75
2,50	33,40	2,50	35,15	2,50	35,75
3,00	33,00	3,00	35,00	3,00	35,75
4,00	32,20	3,50	34,85	3,50	35,75
5,00	31,30	4,00	34,75	4,00	35,75
6,00	30,50	5,00	34,50	4,50	35,75
7,00	29,60	6,00	34,25	5,00	35,60
8,00	28,70	7,00	34,00	5,50	35,60
9,00	27,90	8,00	33,80	6,00	35,50

10,00	27,10	9,00	33,50	6,50	35,50
11,00	26,35	10,00	33,25	7,00	35,45
12,00	25,60	15,00	32,00	8,00	35,40
13,00	24,90	20,00	30,75	9,00	35,35
14,00	24,30	25,00	29,65	10,00	35,30
15,00	23,75	30,00	28,40	15,00	34,80
16,00	23,20	35,00	27,05	20,00	34,40
17,00	22,70	40,00	25,70	25,00	34,05
18,00	22,10	45,00	24,05	30,00	33,75
19,00	21,60	50,00	22,20	35,00	33,45
20,00	21,10	55,00	20,50	40,00	33,20
21,00	20,60	60,00	19,80	45,00	32,90
22,00	20,10	65,00	19,40	50,00	32,70
23,00	19,60	70,00	19,10	60,00	32,20
24,00	19,00	75,00	18,85	70,00	31,90
25,00	18,70	80,00	18,60	80,00	31,50
26,00	18,10			90,00	31,20
27,00	17,80			110,00	30,65
28,00	17,30			120,00	30,45
29,00	16,90			130,00	30,10
30,00	16,30			140,00	29,85
31,00	15,90			150,00	29,65
32,00	15,50			160,00	29,45
33,00	15,00			170,00	29,45
34,00	14,70			180,00	29,45
36,00	13,80			190,00	29,45
37,00	13,40			200,00	29,45
38,00	13,10				
39,00	12,75				
40,00	12,50				
41,00	12,30				
42,00	12,20				
45,00	11,85				
50,00	11,50				
60,00	10,90				
65,00	10,80				
70,00	10,50				

Tabla 31. Variación de la Interfase para una $C_o = 8,85$ g/l. con diferentes concentraciones de Sulfato de Aluminio

Concentraciones de Sulfato de Aluminio para 8,85 g/l de Suelo						
	0,2 g/l	0,4 g/l	0,6 g/l	0,8 g/l	1,0 g/l	2,0 g/l
T(min)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)
0	34,5	34,5	34,5	34,5	34,5	34,5
0,5	31	29,0	32,0	29,0	32,5	33,0
1	25	23,0	26,5	24,0	29,0	28,0

1,5	20	17,5	20,5	18,5	22,5	22,5
2	17	12,0	16,0	13,5	17,0	18,0
2,5	12	7,5	10,8	8,0	12,0	13,5
3	7	3,0	6,2	4,0	8,0	9,0
3,5	2,5	2,5	2,6	2,5	3,5	5,0
4	2	2,3	2,5	2,4	2,9	3,0
4,5		2,2	2,4	2,3	2,7	2,8
5	1,9	2,1	2,3	2,2	2,6	2,7
5,5		2,0	2,2	2,1	2,6	2,6
6	1,7	1,9	2,1	2,0	2,5	2,5
6,5			2	1,95	2,4	2,5
7	1,65	1,8	1,9	1,9	2,3	2,45
7,5						
8		1,7	1,8	1,8	2,2	2,3
9	1,5	1,7	1,8	1,8	2,1	2,25
12	1,4	1,6	1,6	1,6	2	2,05
15	1,3	1,5	1,5	1,5	1,9	1,9

Tabla 32. Variación de la Interfase para una C1= 22,81 g/l, C2= 30,45 g/l, C3= 42,19 g/l, C4=48,80 g/l con concentración óptima de Sulfato de Aluminio = 0,5 g/l.

Concentración Óptima de Sulfato de Aluminio diferentes C de Suelo				
	C1	C2	C3	C4
T(min)	H(cm)	H(cm)	H(cm)	H(cm)
0,00	34,50	34,50	34,5	34,5
0,50	32,50	32,50	32,00	32,20
1,00	30,00	28,30	26,00	30,20
1,50	27,50	24,50	24,50	28,00
2,00	24,00	21,00	22,00	25,50
2,50	21,50	18,30	19,00	23,00
3,00	19,00	16,00	16,00	20,50
3,50	15,50	12,50	13,10	18,00
4,00	13,50	9,50	10,50	15,70
4,50	11,00	6,50	7,50	13,10
5,00	8,50	5,80	6,50	11,00
5,50	6,70	5,40	6,00	9,10
6,00	6,30	5,20	5,70	8,00
6,50	5,90	5,00	5,50	7,50
7,00	5,80	4,90	5,30	7,10
7,50	5,40	4,80	5,15	6,75
8,00	5,30	4,70	5,05	6,50
8,50	5,10	4,60	4,95	6,25
9,00	5,00	4,50	4,85	6,10
10,00	4,80	4,40	4,70	5,75
15,00	4,30	4,00	4,20	5,00
20,00	4,00	3,70	4,00	4,70

Tabla 33. Valores de A/Q para agua artificial sin floculante.

Agua Residual Artificial			
Concentración de Sedimento (g/l)	Ho (m)	T ₂ (seg)	A/Q (m ² s/ m ³)
4	0,36	300	839
6	0,34	420	1219
8	0,36	660	1846
10	0,34	900	2611
15	0,29	1200	4110
20	0,36	1800	5035
40	0,34	2400	6963

Tabla 34. Valores de A/Q para agua del lavado de camiones mezcladores.

Agua del Lavado de Camiones Mezcladores de Hormigón			
Concentración de Sedimento (g/l)	Ho (m)	T ₂ (seg)	A/Q (m ² s/ m ³)
61,70	0,36	2040,00	5706,29
85,60	0,36	3450,00	9650,35
105,30	0,36	3750,00	10489,51

Tabla 35. Valores A/Q para agua artificial con floculante.

Agua Residual Artificial Suelo A.					
Concentración de Sedimento (g/l)	Concentración de Floc. Optimo (g/l)	Ho	T ₂ (seg)	A/Q (m ² s/ m ³)	
4	0,4	0,29	88,80	304	
6	0,6	0,29	166,80	571	
8	0,8	0,29	219,00	750	

Agua Residual Artificial Suelo B.					
Concentración de Sedimento (g/l)	Concentración de Floc. Optimo (g/l)	Ho	T ₂ (seg)	A/Q (m ² s/ m ³)	
10	0,6	0,29	129,60	444	
15	0,6	0,29	229,20	785	
20	0,8	0,36	324,60	1112	
40	1	0,36	1080,00	3700	

Tabla 36. Valores de A/Q para agua del Río Daule con floculante.

Agua del Río Daule					
Concentración de Sedimento (g/l)	Concentración de Floc. Optimo (g/l)	Ho	T ₂ (seg)	A/Q (m ² s/	
8,85	0,6	0,35	143,55	416	
22,81	0,8	0,35	300,00	870	
30,45	0,8	0,35	312,60	906	
42,19	0,8	0,35	315,60	915	
48,80	0,8	0,35	366,60	1063	

Tabla 37. Valor de flujo de sólidos para agua artificial sin floculante

Flujo de Sólidos para caso de Estudio 1 sin la utilización de Floculante Optimo		
Concentración (mg/l)	Velocidad de Sedimentación Inicial (m/h)	Flujo de Sólidos (kg/m ² -h)
0	0,305	0,000
4000	0,300	1,200
6000	0,298	1,788
8000	0,294	2,352
9000	0,292	2,628
10000	0,289	2,890
11000	0,284	3,119
15000	0,246	3,690
18000	0,200	3,600
20000	0,168	3,360
22000	0,150	3,300
24000	0,136	3,264
25000	0,130	3,250
27000	0,120	3,240
33000	0,098	3,234
40000	0,080	3,200

Tabla 38. Valor de flujo de sólidos para agua artificial con floculante Suelo A.

Flujo de Sólidos para caso de Estudio 1 con la utilización de Floculante Suelo A.		
Concentración (mg/l)	Velocidad de Sedimentación Inicial (m/h)	Flujo de Sólidos (kg/m ² -h)
4000	12,65	50,6
6000	6,6	39,6
8000	4,9	39,2

Tabla 39. Valor de flujo de sólidos para agua artificial con floculante Suelo B.

Flujo de Sólidos para caso de Estudio 1 con la utilización de Floculante Suelo B.		
Concentración (mg/l)	Velocidad de Sedimentación Inicial (m/h)	Flujo de Sólidos (kg/m ² -h)
10000	8,25	82,5
15000	4,55	68,25
20000	3,25	65
40000	0,98	39,2

Tabla 40. Valor de flujo de sólidos para agua del lavado de camiones mezcladores de hormigón.

Flujo de Sólidos para caso de Estudio 2 utilizando diferentes concentraciones de sólidos.		
Concentración (mg/l)	Velocidad de Sedimentación Inicial (m/h)	Flujo de Sólidos (kg/m ² -h)
61700	0,564	34,799
85600	0,156	13,354
105300	0,060	6,318

Tabla 41. Valores de flujo de sólidos para agua del río Daule con floculante.

Flujo de Sólidos para caso de Estudio 3 con la utilización de Floculante Optimo		
Concentración	Velocidad de Sedimentación Inicial (m/h)	Flujo de Sólidos (kg/m ² ·h)
8850	9,072	80,287
22810	3,264	74,452
30450	3,966	120,765
42190	3,930	165,807
48800	2,910	142,008

Tabla 42. Valores de A/Q para agua artificial sin floculante.

Agua Residual Artificial			
Concentración de Sedimento (g/l)	Ho (m)	T ₂ (seg)	A/Q (m ² s/ m ³)
4	0,36	300	839
6	0,34	420	1219
8	0,36	660	1846
10	0,34	900	2611
15	0,29	1200	4110
20	0,36	1800	5035
40	0,34	2400	6963

Tabla 43. Valores de A/Q para agua del lavado de camiones mezcladores.

Agua del Lavado de Camiones Mezcladores de Hormigón			
Concentración de Sedimento (g/l)	Ho (m)	T ₂ (seg)	A/Q (m ² s/ m ³)
61,70	0,36	2040,00	5706,29
85,60	0,36	3450,00	9650,35
105,30	0,36	3750,00	10489,51

Tabla 44. Valores A/Q para agua artificial con floculante.

Agua Residual Artificial Suelo A.				
Concentración de Sedimento (g/l)	Concentración de Floc. Optimo (g/l)	Ho	T ₂ (seg)	A/Q (m ² s/)
4	0,4	0,29	88,80	304
6	0,6	0,29	166,80	571
8	0,8	0,29	219,00	750

Agua Residual Artificial Suelo B.				
Concentración de Sedimento (g/l)	Concentración de Floc. Optimo (g/l)	Ho	T ₂ (seg)	A/Q (m ² s/)
10	0,6	0,29	129,60	444
15	0,6	0,29	229,20	785
20	0,8	0,36	324,60	1112
40	1	0,36	1080,00	3700

Tabla 45. Valores de A/Q para agua del Río Daule con floculante.

Agua del Río Daule				
Concentración de Sedimento	Concentración de Floc. Optimo	Ho	T ₂	A/Q (m ² s/)
8,85	0,6	0,35	143,55	416
22,81	0,8	0,35	300,00	870
30,45	0,8	0,35	312,60	906
42,19	0,8	0,35	315,60	915
48,80	0,8	0,35	366,60	1063

Estimación de tiempo Δt y ajuste de graficas.

Para poder graficar algunas curvas H_0 vs. Tiempo se desplazo un valor Δt , esto se realizo primeramente graficamos los valores obtenidos en el ensayo, visualmente se verifica a partir de que tiempo la curva empieza a descender (usualmente entre 0.50 – 1.0 minuto) para los ensayos, luego restamos Δt del tiempo original medido en el ensayo, graficamos este nuevo tiempo con los respectivos valores de altura medidos en ensayo, generamos la ecuación de la curva en Excel y finalmente graficamos nuestra curva ajustada

Numero de Froude. (Merritt, Loftin, Ricketts, 1999)

El numero de Froude (F_r) es un factor adimensional que relaciona la fuerza de inercia y la fuerza peso, la fuerza de inercia (F) en base al segundo principio de dinámica, como es el producto entre la masa y la aceleración. El peso (P) resulta ser el producto entre la masa y la aceleración de la gravedad

$$F \approx ma \approx \frac{\rho L^4}{t^2}; \quad P \approx mg \approx \rho g L^3$$

La relación entre las dos fuerzas: $\frac{F}{P} \approx \frac{L}{gt^2}$; numero de Fraude: $F_r \approx \frac{v^2}{gL}$

$\rho \approx$ masa volumétrica o densidad [kg/m^3]

$v \approx$ velocidad del fluido, [m/s]

$L \approx$ dimensión lineal (característica, como profundidad o diámetro), [m]

$g \approx$ aceleración de la gravedad, [m/s^2]

$t \approx$ parámetro de tiempo [s].

Debe su nombre al ingeniero hidrodinámico y arquitecto naval inglés William Froude (1810 - 1879).

BIBLIOGRAFIA

- Arboleda, J. Teoría y práctica de la purificación del agua. Tercera Edición. Vol. 1. 2000.
- Arboleda, J. Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua. Lima, CEPIS/OPS, Serie Técnica 13, 1973.
- AWWA, ASCE y CSSE. Water treatment plant design. AWWA, 1971.
- Balhowski. Aplicação das técnicas modernas de tratamento de águas nas estações de tratamento de água existentes e nas novas instalações. Curitiba, SANEPAR, 1975.
- Bond, A. W. Behaviour of suspension. Journal ASCE, mayo, 1960, pp. 57-80.
- Brown, J. y La Motta, E. Physical behaviour of flocculent suspension in upflow. Journal ASCE, abril, 1971, pp. 209-224.
- Camp, T. Sedimentation and the design of the settling tanks. Journal ASCE, Paper 2285, pp. 895-959.
- Castillo Borges Elba R., Herrera Canché Gonzalo M., Méndez Novelo Roger I., "Determinación de Parámetros de Diseño de un Tratamiento Físicoquímico de Aguas Residuales" (Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería. Ingeniería Ambiental).
- CEPIS–Programa de Protección de la Salud Ambiental-HPE Evaluación de plantas de tratamiento de agua. Tomo I, Manual DTIAPA C-5, 1981.

Committee on Final Clarifiers. Final clarifiers for activated sludge plants. Journal of the Environmental Engineering Division, octubre, 1979, pp. 803-817.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental-CETESB. Técnica de abastecimiento y tratamiento de agua. Volumen 2. Tratamiento de agua. São Paulo, CETESB, 1977.

Cordova, Hudgins y Silveston. Settling in continuous sedimentation tanks. Journal of the Environmental Engineering Division, diciembre, 1978, pp. 1263-1275.

Culp, G. L. y Gulp, R. L. New concepts in water purification. Nueva York, Van Nostrand Reinhold, 1974.

Culp, G. L.; Hansen, S. y Richardson, G. High-rate sedimentation in water treatment works. Journal AWWA, 60 (6), junio, 1968, pp. 681-698.

Culp, G. L.; Hsiung, K. y Conley, W. R. Tube clarification process operating experiences. Journal of the Sanitary Engineering Division, 95(SA5), octubre, 1969, pp. 829-847.

Degremont. Manual técnico del agua. Degremont, 1973.

Di Bernardo, Luiz. Sedimentación convencional y laminar. Copias para el curso de Maestría de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la UNI. Lima, 1988.

- Fair, G. M.; Geyer, J. C. y Okun, D. A. Water and wastewater engineering. Nueva York, John Wiley, 2 vols, 1968.
- Fisherstrom. Sedimentation in rectangular basins. Proceedings. American Society of Civil Engineers, 1955.
- Forsell, B. y Hedstrom, B. Lamella sedimentation: a compact separation technique.
- Gomella, C. Clarification avant filtration; ses progres récents. Association Internationale des Distributions d'Éau. Dixième Congres, agosto, 1974.
- Hazen, A. On Sedimentation. Transactions ASCE, 5, 1904, pp. 45-71.
- Hudson, M. E. Sedimentation. AWWA Seminar on Upgrading Existing Water Treatment Plants. Boston, 15-16 de junio de 1974. Denver, AWWA, 1974, pp. 67-78.
- Journal of the Water Pollution Control Federation, 47(4), abril, 1975, pp. 834-845.
- Journal of the Water Pollution Control Federation, febrero, 1976, pp. 265-276.
- Matamoros David, "Apuntes del Curso de Ingeniería Sanitarias II" (Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del litoral, 2005).
- Miranda Jaime, "Tratamiento Analítico de las Aguas Servidas" (Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile).
- Maldonado Yactayo Víctor, Manual de Sedimentación Capitulo 7.
- Munch, W. Performance of circular final clarifiers at an activated sludge plant.

- Pérez, J. Evaluation of lower cost methods of water treatment in Latin America. Lima, CEPIS/OPS, 1977, pp. 290.
- Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua. Manual III Teoría, tomo 11, Sedimentación. Serie Filtración Rápida, 1992.
- Pérez, J. M. Submódulo 4.5.2. Sedimentadores laminares. Versión preliminar.
- Programa Regional OPS/HEP/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua, 1981.
- Pérez, J. M. Avances de sedimentación. Curso sobre tecnologías de tratamiento de agua para países en desarrollo. CEPIS-CIFCA, 1978.
- Ritcher, C. Estação de tratamento de água modulada para pequenas e medias comunidades. Curitiba, 1973.
- Ritcher, C. y Arboleda Valencia, J. Estações de tratamento de água modulada para pequenas e medias comunidades, SANEPAR-CEPIS. Curitiba, Brasil, SANEPAR, 1974.
- Rocha, M. V. Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água. Segunda edición. 1992.
- Sáez Carrizo, C. E. Ensaio de decantação acelerada na estação de tratamento de água de Rio Grande. DAE, año XXXV, 102, 1975, pp. 26-33.

Sanks, R. Water treatment plant design. Ann Arbor Science Pub., 1979.

Schaafman, N. Benzenking als Onderdeel van der Waterzuivering Ingenieur.

Vol. 62, 1950, pp. 61.

Tchobanoglous G. y Burton F., 1995. Operaciones Físicas Unitarias. *En:*

Metcalf & Eddy, Ingeniería de Aguas Residuales; tratamiento, vertido y

reutilización. España: McGraw-Hill. Volumen 1, tercera Edición, ISBN

84-481-1727-1

Yao, K. M. Theoretical study of high-rate sedimentation. Journal of the

Water Pollution Control Federation, 42 (2, parte I), febrero, 1970.

pp. 218-228.