

# INTRODUCCIÓN

**Antecedentes.**

Un sedimentador es un equipo utilizado para separar partículas sólidas presentes en un medio líquido, por medio de fuerzas gravitatorias. El término sedimentador a lamelas hace referencia a un equipo sedimentador, formado por una serie de placas, láminas o lamelas, por entre las cuales circula el agua a tratar.

Los antecedentes más antiguos de los sedimentadores a lamelas datan de 1904, año en que Hazen enunció el principio teórico de emplear láminas paralelas en equipos sedimentadores, sin embargo, no fue sino hasta 1946, cuando Camp propuso un diseño de un sedimentador, con láminas espaciadas 15 cm entre sí y un sistema recolector de lodos. (Perez, 2008)

Los primeros sedimentadores a lamelas se construyeron durante los últimos años de la década de los setenta, demostrándose, de esta forma, sus aplicaciones prácticas. En la actualidad, los sedimentadores a lamelas son utilizados principalmente en Europa (Estocolmo, París) y Asia (Tokio).

Tanto en Norteamérica como en Sudamérica no existe gran difusión de estos equipos, no obstante, se tienen antecedentes de una empresa de Estados Unidos “Microfloc Inc.”, la cual desarrolló para uso comercial dos tipos de sedimentadores a lamelas, destinados al tratamiento de aguas potables y residuales.

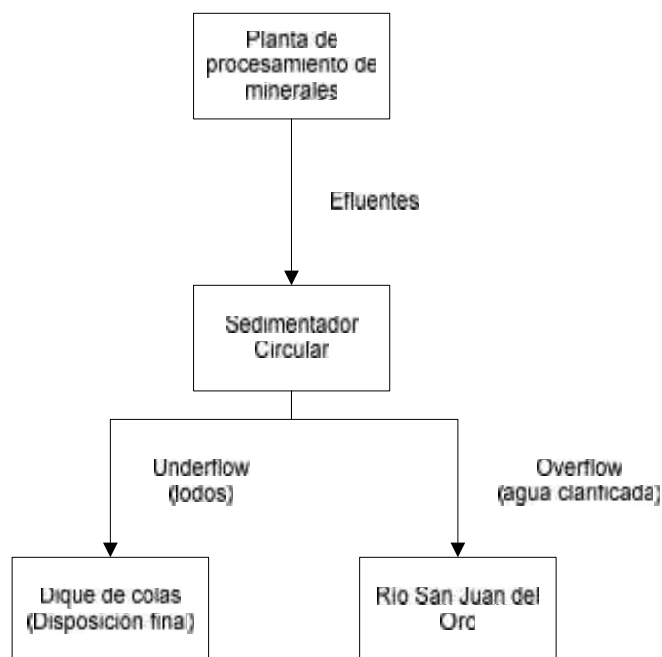
El presente estudio se centra en el Ingenio Minero “Noques”, el cual se encuentra ubicado en la Provincia Sud Chichas del Departamento de Potosí, en las inmediaciones de la población de Noques, distando aproximadamente 35 km de la ciudad de Tupiza en dirección a la ciudad de Villazón. Actualmente el Ingenio es administrado por la Compañía de Minerales Especializados S.A. (COMINESA).

La planta tiene una capacidad de tratamiento de 180 toneladas por día de mineral. El Ingenio mencionado realiza el proceso de concentrado de plomo y zinc, mediante flotación diferencial, junto a otros minerales tales como cuarzo, pirita, arsenopirita, caliza y arcillas, que para el presente caso constituye la ganga. El plomo y zinc

procesados son encontrados principalmente como galena (PbS) y esfalerita (ZnS), las cuales proceden de las minas aledañas.

El proceso llevado a cabo por el Ingenio incluye la trituración, molienda y flotación. Posteriormente y dentro del tratamiento de los efluentes, el Ingenio realiza un tratamiento físico, el cual comprende el uso de un sedimentador-clarificador de tanque circular. A partir de éste se hace uso de un dique de colas, para llevar a cabo la disposición final. Las colas finales son vertidas al Río San Juan del Oro.

Figura 1. Diagrama de bloques del actual proceso de tratamiento de efluentes.



Fuente: COMINESA, 2012.

### **Justificación.**

En el desarrollo de la industria minera, de manera muy particular en el área de procesamiento de minerales, se presentan diferentes problemas, que comprenden aspectos ambientales, técnicos, económicos y sociales. Uno de estos problemas y de gran importancia, es la alta concentración de partículas en suspensión (sólidos en suspensión), las cuales son arrastradas en las colas provenientes de las plantas de procesamiento de minerales.

**Justificación ambiental.**

En el caso particular de Bolivia y en la Provincia Sud Chichas del Departamento de Potosí, existen varios ingenios mineros que producen colas con un alto arrastre de sólidos en suspensión (arcillas, metales pesados, etc.), los cuales, posteriormente llegan a contaminar los cauces de los ríos, como el Río Chilco - Río San Juan del Oro, en el Sur de Bolivia. (Villarroel F. L. et al, 2007)

Las descargas directas al curso de los ríos, particularmente de las plantas de procesamiento de minerales, causan impactos ambientales de consideración; un estudio efectuado por especialistas provenientes de la Western Carolina University, University of Nevada, Lafayette College y la Universidad Autónoma Tomás Frías, reveló una peligrosa situación ambiental en el sistema de drenaje Río Chilco – Río San Juan del Oro, en donde la contaminación de suelos agrícolas y de los productos cultivados en ellos constituye la principal preocupación ambiental. Adicionalmente, en este estudio ha sido sugerido que los residuos de estas operaciones mineras son transportados a distancias significativas aguas abajo, hasta el cauce del río Pilcomayo, donde podrían causar un impacto negativo sobre diversos factores ambientales, bióticos y abióticos.

Como se ha señalado anteriormente, la actividad minera, incluyendo al ingenio Noques, genera impactos que afectan al medio ambiente, los mismos que ya no deben ser ignorados, sino por el contrario, deben ser atendidos, considerando el marco legal, proporcionado por la Ley del Medio Ambiente (Ley N° 1333 del 27 de abril de 1992) y su respectivo reglamento (DS N° 24176 del 8 de diciembre de 1995), a los cuales deben ajustarse rigurosamente los involucrados en la actividad minera.

Desde una perspectiva ambiental, es necesario realizar el tratamiento de las aguas residuales. El proyecto justifica su aplicación por los beneficios al ecosistema local y al medio ambiente en general. Bajo esta consideración y preservando el medio ambiente mediante un enfoque sostenible, conduce a la reflexión y a tomar en cuenta los efectos negativos de los efluentes mineros, tanto a los productores de minerales, autoridades y sociedad en general.

**Justificación tecnológica.**

Una de las formas de tratamiento de aguas residuales es la sedimentación, la cual realiza la separación de sólidos por medio de fuerzas gravitacionales, empleando un equipo conocido como sedimentador.

Tradicionalmente, los sedimentadores convencionales se caracterizan por sus altas necesidades de área y espacio, particularidades que con frecuencia restringen su aplicación. Por tanto, es justificable la investigación, desarrollo, aplicación y difusión de nuevas tecnologías, como la expuesta en la presente investigación, la cual estudia y analiza un equipo alternativo para la sedimentación de aguas residuales, provenientes de operaciones mineras.

**Justificación social.**

En la actualidad se tienen conocimientos de los efectos nocivos causados por los contaminantes mineros sobre la salud humana, empero, en Bolivia aún no se han realizado estudios completos que determinen la incidencia cuantitativa de los mismos.

Indudablemente, preservar la salud de la sociedad constituye uno de los justificativos para la implementación de sistemas de tratamiento de agua residual, a pesar de la momentánea inexistencia de datos

**Justificación económica.**

Existe una tendencia en la acumulación de residuos mineros en ríos y terrenos cultivables. Esta acumulación, a corto y mediano plazo, llegaría a afectar negativamente el desarrollo de actividades económicas como la pesca y la agricultura. (Villarreal F. L. et al, 2007). Evidentemente, una baja productividad agrícola y pesquera conllevaría un impacto económico de consideración.

La aplicación de un sedimentador para mitigar los efectos causados por el vertido de efluentes tendría un efecto económico positivo para la sociedad.

**Justificación personal.**

La justificación personal que motivó la presente investigación es el interés del autor por conocer y aportar a la solución de la problemática ambiental. Bolivia es un país que basa su economía en un modelo extractivista, en donde no se consideran seriamente los impactos ambientales. A pesar de la Legislación Ambiental existente, los monitoreos y controles son escasos; ante esta situación, la responsabilidad por el cuidado ambiental debe estar arraigada en la gestión industrial.

**Objetivos del proyecto.****Objetivo general.**

Diseñar un sedimentador a lamelas para el tratamiento de aguas residuales del Ingenio Minero “Noques”

**Objetivos específicos.**

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Obtener información sobre el proceso de sedimentación.
- Determinar las características físicas de los efluentes que alimentarán al sedimentador a lamelas.
- Determinar la cinética de sedimentación de los efluentes que alimentarán al sedimentador a lamelas.
- Diseñar y construir un prototipo de sedimentador a lamelas.
- Realizar el escalamiento y el diseño definitivo del sedimentador a lamelas.

CAPÍTULO I  
MARCO TEÓRICO

## **CAPÍTULO I**

### **MARCO TEÓRICO**

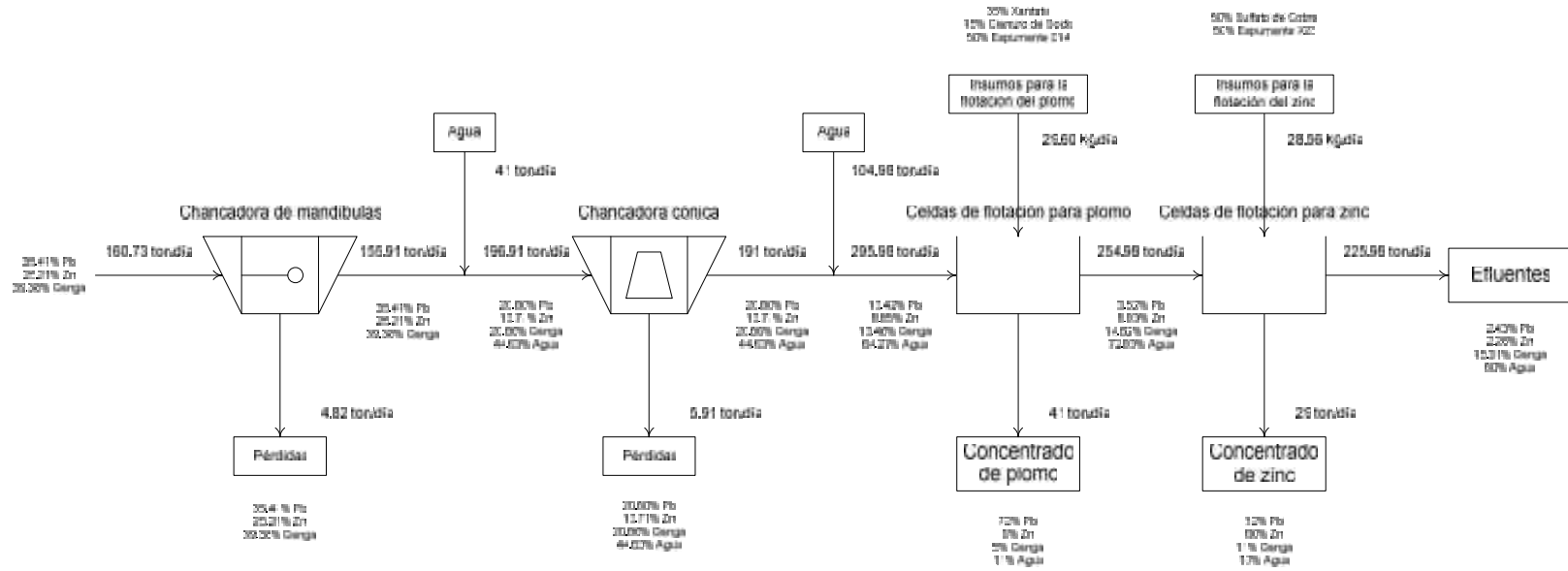
#### **1.1 Descripción del Ingenio Noques.**

Como se indicó anteriormente, geográficamente el Ingenio se encuentra ubicado en las inmediaciones de la comunidad de Noques, Provincia Sud Chichas del Departamento de Potosí.

La materia prima utilizada en el proceso proviene de los yacimientos de plomo y zinc cercanos: Mina Sombras, Mina Noques, Mina San Silvestre, Mina Morados y Mina Quismal. Cabe mencionar que todas las minas mencionadas son explotadas por COMINESA.

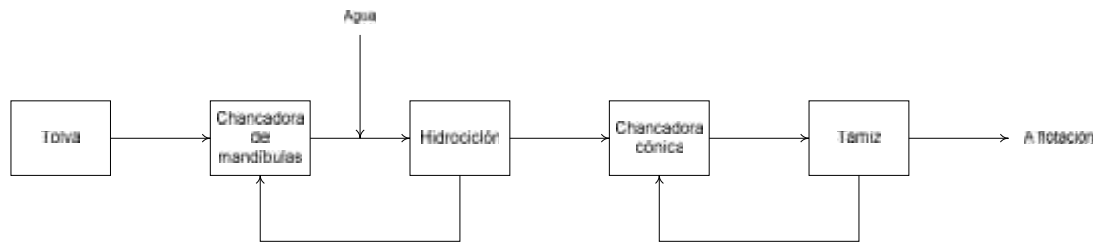
En la industria de los metales base, como el procesamiento de minerales, se manifiesta la necesidad de moler el mismo hasta tamaños muy finos, produciendo partículas discretas de minerales ricos en metal, así como otros materiales sin valor económico, los cuales constituyen la ganga. En particular, en el Ingenio Noques, se utilizan dos chancadoras (tritadoras): una chancadora de mandíbulas y una chancadora cónica, debiendo el mineral pasar primero por la chancadora de mandíbulas.

Figura 1-1. Diagrama de flujo del proceso.



Fuente: COMINESA, 2012.

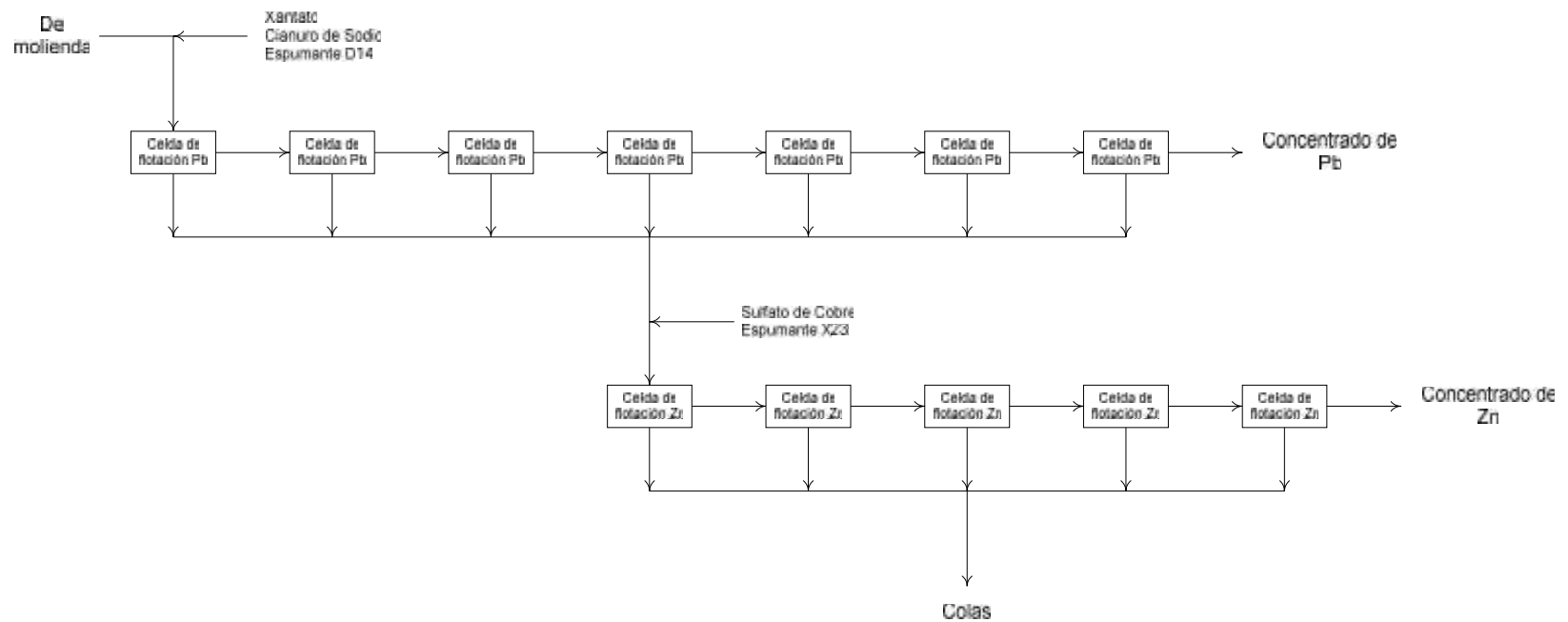
Figura 1-2. Diagrama de bloques del proceso de molienda.



Fuente: COMINESA, 2012.

El proceso de molienda (figura 1-2), produce partículas discretas, las cuales contienen plomo y zinc, junto a cuarzo, pirita, arsenopirita, caliza y arcillas (ganga). Las partículas liberadas, ricas en metales de plomo y zinc, principalmente en forma de mineral sulfuroso, son recuperadas por medio de un proceso de flotación diferencial (figura 1-3), en el que se utilizan los siguientes insumos: xantato, cianuro de sodio, espumante D14, sulfato de cobre y espumante X23. Los productos finales son: un mineral de plomo con una concentración superior al 75% y un mineral de zinc, con un concentración de 60%. (COMINESA, 2012).

Figura 1-3. Diagrama de bloques del proceso de flotación.

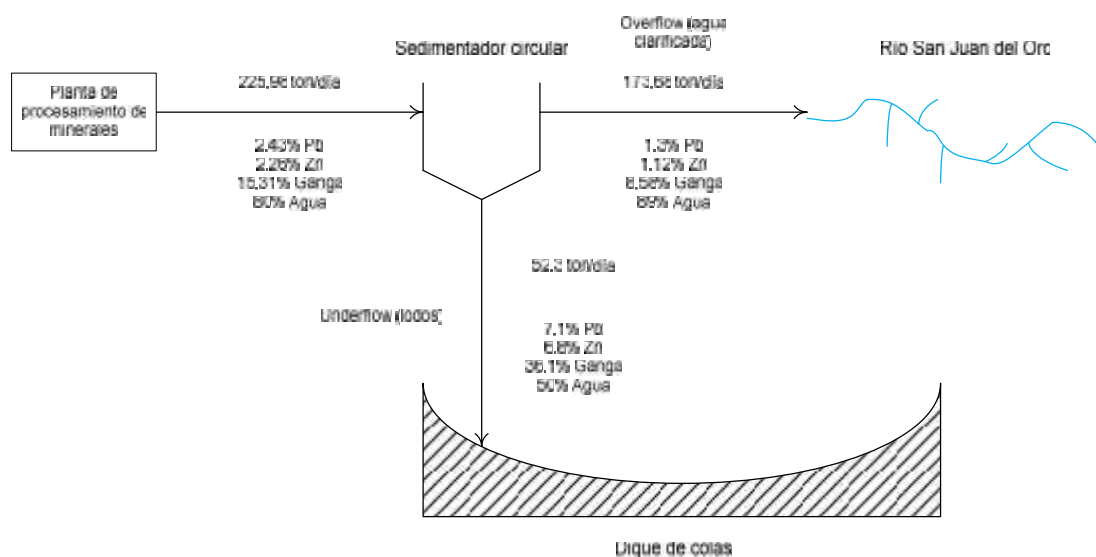


Fuente: COMINESA, 2012.

El Ingenio Noques requiere 5 m<sup>3</sup> de agua por tonelada de mineral a procesar; por otra parte su capacidad máxima de procesamiento es de 180 toneladas de mineral por día. Evidentemente el Ingenio no trabaja siempre a su capacidad máxima, por ejemplo, para el mes de marzo de 2012 la producción de plomo y zinc fue de 2049 toneladas; mientras, como consecuencia del proceso, se produjeron 5209.89 toneladas de efluentes.

El tratamiento de dichos efluentes se realiza por medio de un proceso físico, más concretamente, por una separación sólido líquido conocida como sedimentación (figura 1-4). Dicha separación es realizada en un sedimentador de tanque circular. Los efluentes, al pasar por el sedimentador, se separan en dos: un efluente clarificado y un efluente espesado. Finalmente los efluentes clarificados son vertidos al Río San Juan del Oro, mientras que los efluentes espesados son vertidos a un dique de colas, para su disposición final.

Figura 1-4. Diagrama de flujo del actual proceso de tratamiento de efluentes.



Fuente: COMINESA, 2012.

## 1.2 Características de los efluentes.

Los efluentes que se vierten al Río San Juan del Oro (y por tanto los que se alimentarán al sedimentador a lamelas) tienen las siguientes características:

Tabla I-1. Características físicas de los efluentes vertidos al Río San Juan del Oro.

pH	7.60
Conductividad eléctrica	1148 $\mu$ S
Densidad relativa	1.0526
Sólidos totales	107.012 g/l
Sólidos disueltos	1.4925 g/l
Sólidos suspendidos	105.5195 g/l
% Sólidos suspendidos (másico)	10.0247 %
Caudal másico del efluente	aprox. 173.68 ton/día
Caudal volumétrico del efluente	aprox. 165 m <sup>3</sup> /día

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Conviene definir claramente las características más importantes de los efluentes.

### 1.2.1 Sólidos totales.

Es la expresión que se aplica a los residuos de material que quedan en un recipiente después de la evaporación de una muestra y su consecutivo secado en una estufa a temperatura definida (105 °C). Los sólidos totales incluyen los sólidos suspendidos, o porción de sólidos totales retenida por un filtro, y los sólidos disueltos o porción que atraviesa el filtro. (APHA et al, 1992)

### 1.2.2 Sólidos disueltos.

Es el producto resultante de la evaporación del agua filtrada, en las condiciones que fija el ensayo (180 °C). (APHA et al, 1992)

### 1.2.3 Sólidos suspendidos.

El término sólido suspendido se refiere a los sólidos no filtrables (APHA et al, 1992). En los ensayos analíticos, la concentración de los sólidos suspendidos puede determinarse por medio de la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos disueltos.

Dado que los sólidos disueltos no pueden separarse por sedimentación, los sólidos suspendidos constituyen un parámetro más adecuado para el diseño de un sedimentador.

Cabe mencionar también, que durante la realización de los ensayos previos, pudo verificarse la existencia de una interfase sólido-líquido en la muestra tomada.

### **1.3 Determinación de la capacidad del sedimentador a lamelas.**

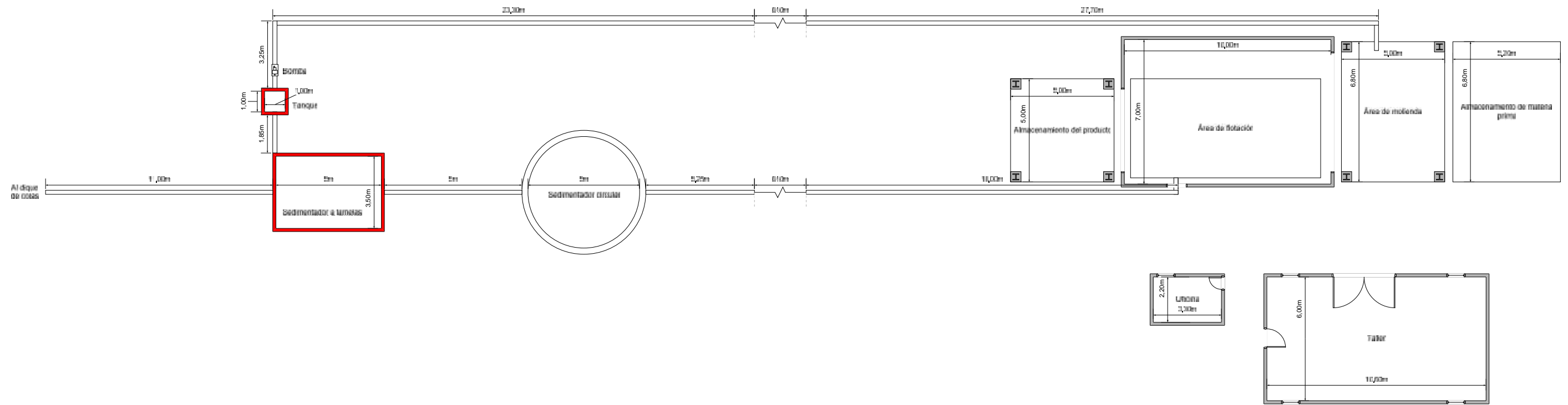
Basándose en la cantidad de efluentes vertidos al Río San Juan del Oro, la capacidad de tratamiento del sedimentador deberá ser mayor a  $165 \text{ m}^3/\text{día}$ . Según COMINESA, no se tiene previsto realizar ampliaciones de la planta, por lo menos dentro de los próximos 10 años.

Se considera un factor de seguridad igual al 15% (sobredimensionamiento) para la determinación de la capacidad definitiva.

### **1.4 Determinación de la localización del sedimentador a lamelas.**

El sedimentador se localizará en las inmediaciones de los predios del Ingenio Noques, entre el propio Ingenio y el dique de colas necesario para llevar a cabo la disposición final de los residuos, tal como se muestra en la figura 1-5.

Figura 1-5. Plano del Ingenio Noques, incluye la ubicación del sedimentador a lamelas.



Fuente: Elaboración propia, 2012.

### **1.5 Selección del proceso de sedimentación.**

La sedimentación es la eliminación de sólidos suspendidos en el agua por asentamiento gravitacional (Kemmer F. N. et al, 1995). Siendo además un fenómeno que puede observarse a gran escala, como sucede, por ejemplo, en la desembocadura de un río. Las suspensiones de partículas pequeñas en fluidos son muy frecuentes y su importancia es crucial en numerosos procesos industriales, ¿cómo se efectúa la sedimentación de éstas partículas?, la multiplicidad de factores que intervienen en el fenómeno explica que todavía no se los conozca totalmente. Los efectos hidrodinámicos confieren por sí solos, a los procesos de sedimentación, una gran riqueza de comportamientos posibles; iniciadas desde hace más de un siglo, las investigaciones sobre la caída de partículas en un fluido fueron progresando poco a poco, produciéndose muchos avances en los últimos años, especialmente a raíz de ciertos trabajos de mecánica de fluidos y física estadística (Blanc R. y Guyon E. 1991).

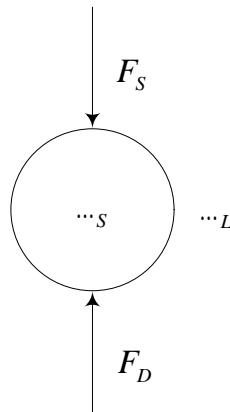
Por lo tanto, la sedimentación consiste en la separación por acción de la gravedad, de las partículas suspendidas, cuyo peso específico es mayor que el del agua, es una de las operaciones unitarias más utilizadas en el tratamiento de las aguas residuales. En la mayoría de los casos, el objetivo principal es la obtención de un efluente clarificado, pero también es necesario producir un underflow (lodo), cuya concentración de sólidos permita su fácil tratamiento y manejo. En los tanques de sedimentación, tiene mucha importancia la obtención de un efluente clarificado, así como la producción u obtención de lodos concentrados. En dependencia a la naturaleza de los sólidos presentes en suspensión, la concentración y la tendencia a la interacción de las partículas, pueden producirse cuatro tipos de sedimentación: discreta, floculenta, retardada (denominada también zonal) y por compresión.

Es frecuente que durante el proceso de sedimentación, ésta se produzca por diferentes mecanismos en cada fase, y también es posible que los cuatro mecanismos de sedimentación se lleven a cabo simultáneamente.

En consecuencia, por la importancia de la sedimentación en el tratamiento de las aguas residuales, a continuación se describen los cuatro tipos de sedimentación, indicando el procedimiento desarrollado en cada uno de ellos (Metcalf & Eddy, 1995).

### 1.5.1 Sedimentación de partículas discretas (Tipo 1).

Figura 1-6. Sedimentación de una partícula esférica.



Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

Las leyes clásicas formuladas por Newton y Stokes permiten analizar la sedimentación de partículas no floculantes, por tanto, es posible describir el equilibrio de fuerzas para una partícula esférica, esquematizada en la figura 1-6, donde la fuerza que provoca la sedimentación, es el peso efectivo de la partícula ( $F_S$ ), el cual es la diferencia entre su peso y el empuje hidrostático:

Es decir:

$$F_S = \rho_s g v - \rho_L g v$$

$$F_S = (\rho_s - \rho_L) g v \quad (1-1)$$

Donde:

- $F_S$       Peso efectivo de la partícula (fuerza gravitatoria)
- $\rho_s$       Densidad de la partícula sólida

- $\rho_L$  Densidad del líquido  
 $g$  Aceleración de la gravedad  
 $v$  Volumen de la partícula ( $1/6 f d_s^3$ )  
 $d_s$  Diámetro de la partícula

Por otro lado, de acuerdo al principio: “a toda acción se opone una reacción”, la fuerza de resistencia ( $F_D$ ) que trata de impedir la sedimentación es:

$$F_D = C_D A_{PP} \left( \frac{\rho_L V_S^2}{2} \right) \quad (1-2)$$

Donde:

- $C_D$  Coeficiente de fricción  
 $A_{PP}$  Área proyectada de la partícula ( $1/4 f d_s^2$ )  
 $V_S$  Velocidad relativa entre la partícula y el fluido

En consecuencia, por las acciones que definen la velocidad final de sedimentación ( $V_S$ ),  $F_S = F_D$ , igualando las ecuaciones (1) y (2), se tiene:

$$(\rho_S - \rho_L) g v = C_D A_{PP} \left( \frac{\rho_L V_S^2}{2} \right)$$

Sustituyendo  $v = 1/6 f d_s^3$ ,  $A_{PP} = 1/4 f d_s^2$  y resolviendo la ecuación para la velocidad final, se obtiene la ley de Newton:

$$V_S = \left[ \frac{4}{3} \left( \frac{g}{C_D} \right) \frac{\rho_S - \rho_L}{\rho_L} d_s \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-3)$$

Sustituyendo en la ecuación (1-3)  $C_D = \frac{24}{NR_e} = \frac{24 \rho_L}{d_s V_S \rho_L}$ , se tiene la ley de Stokes:

$$V_S = \frac{\rho_S - \rho_L}{18 \rho_L} g d_s^2 \quad (1-4)$$

Donde:

$NR_e$  Número de Reynolds

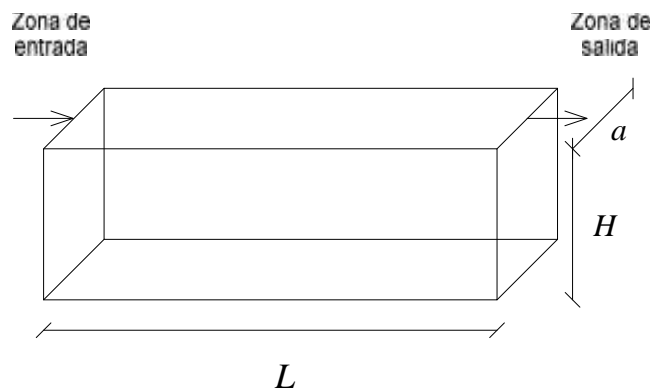
$\mu_L$  Viscosidad del líquido

Las ecuaciones establecidas toman en cuenta la forma y el tamaño de las partículas sedimentables, aspecto teórico importante. Una característica esencial en el diseño convencional de sedimentadores, es seleccionar una partícula con una velocidad vertical  $V_s$ .

La representación esquemática de la figura 1-7 considera un tanque de sección rectangular, de altura  $H$ , ancho  $a$ , y longitud  $L$ . El área transversal vertical  $A'$  es igual al producto del ancho por la altura ( $a \cdot H$ ), y el área de sedimentación o área superficial es igual al producto del ancho por la longitud ( $a \cdot L$ ).

A continuación se indicará, de forma general, el fundamento práctico de la sedimentación discreta, tomando en cuenta el siguiente perfil lateral, representativo de un tanque de sedimentación rectangular.

Figura 1-7. Modelo de un tanque de sedimentación con deposición discreta de las partículas.



Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

En consecuencia, y partiendo de la velocidad de paso del líquido turbio  $V_t$ , dada por la siguiente ecuación:

$$V_t = \frac{Q_0}{A'} \quad (1-5)$$

Donde:

- $V_t$  Velocidad de paso de la turbia en la zona de sedimentación  
(Sección vertical del tanque de sedimentación), en m/s
- $Q_0$  Caudal de alimentación (turbia) al tanque, en m<sup>3</sup>/s
- $A'$  Área de la sección vertical del sedimentador, en m<sup>2</sup>

Es decir:

$$A' = a \cdot H \quad (1-5.1)$$

Donde:

- $a$  Ancho del sedimentador, en m
- $H$  Altura del sedimentador, en m

El fundamento para la precipitación o sedimentación discreta, consiste en que la velocidad de sedimentación es constante para cualquier trayectoria específica, debido a que una partícula discreta no está sometida a ningún proceso de coalescencia, de tal forma que sedimenta con velocidad uniforme, en función solamente del diámetro de la misma. Entonces la producción de agua clarificada, es expresada por la siguiente ecuación:

$$Q_0 = A \cdot V_s \quad (1-6)$$

Donde

- $V_s$  Velocidad de sedimentación, en m/s
- $A$  Superficie horizontal del sedimentador, en m<sup>2</sup>

Es decir:

$$A = a \cdot L \quad (1-6.1)$$

Donde

- $L$  Longitud horizontal de la zona de sedimentación, en m

A partir de la ecuación (1-6) es posible deducir que la velocidad de sedimentación es igual a: (Ramalho R.S. 1996)

$$V_s = \frac{Q_0}{L \cdot a} = \frac{Q_0}{A} \quad (1-7)$$

De la ecuación (1-7), se concluye que el rendimiento de la sedimentación es dependencia o función del área de la sección horizontal, más que de la profundidad  $H$ , siendo lógica la interpretación de que es conveniente utilizar tanques de sedimentación de gran área superficial ( $A$ ) y pequeña profundidad ( $H$ ).

Sin embargo, a partir de la ecuación (1-5), en función de la ecuación (1-5.1), se deduce que el valor  $H$  no debe ser demasiado bajo, porque conllevaría a un aumento de  $V_t$  por encima de la velocidad de arrastre. El arrastre ocurre cuando la velocidad de paso es lo suficientemente alta como para hacer pasar a suspensión las partículas previamente depositadas.

De la ecuación (1-7), la expresión:

$$\frac{Q_0}{A} \left( \frac{m^3}{m^2 h} \right) = \left( \frac{m}{h} \right) \quad (1-7.1)$$

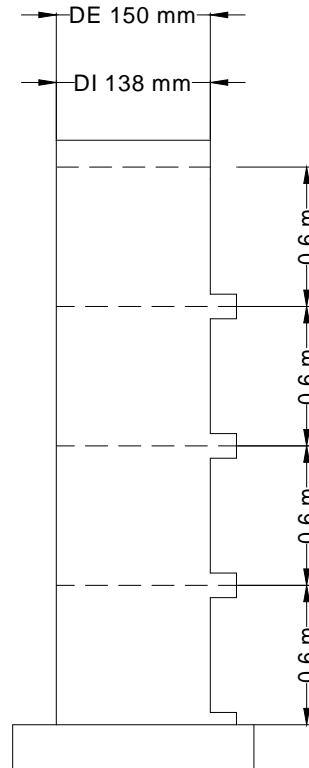
Es definida como el flujo específico o factor de carga, en las unidades primeramente indicadas, es decir, en el lado izquierdo de la ecuación. Asimismo, la expresión puede ser definida como la velocidad de sedimentación,  $V_s$  (en m/h), de una partícula que sedimenta siguiendo una distancia igual a la profundidad del tanque, durante el periodo teórico de retención ( $t$ ), del fluido turbio, en consecuencia, esta expresión es definida así:

$$t = \frac{H}{V_s} \quad (1-8)$$

La característica de este tipo de sedimentación, es que considera la deposición de partículas de forma uniforme, sin ninguna coalescencia que acelere su sedimentación; de igual forma, las dimensiones geométricas del tanque son factores empleados para las consideraciones y análisis del diseño final.

### 1.5.2 Sedimentación flocculenta (Tipo 2).

Figura 1-8. Columna de sedimentación de laboratorio.



Fuente: Ramalho R.S., 1996.

La sedimentación flocculenta es un proceso que se lleva a cabo en soluciones relativamente diluidas, donde las partículas no se comportan como partículas discretas, sino que tienden a agregarse unas a otras (coalescen) durante el proceso de sedimentación. A medida que se produce la coalescencia, el diámetro efectivo de la partícula se incrementa, al igual que su velocidad de sedimentación. (Ramalho R.S., 1996)

La medida en que se desarrolle el fenómeno de floculación depende de variables como: la posibilidad de contacto entre las diferentes partículas, que a su vez es función de la carga de superficie, de la profundidad del tanque, del gradiente de velocidad del sistema, de la concentración de partículas y de los tamaños de las

mismas. El efecto de estas variables sobre el proceso sólo se puede determinar mediante ensayos de sedimentación.

Para determinar las características de sedimentación de una suspensión de partículas floculentas, se puede emplear una columna de sedimentación, como la mostrada en la figura 1-8. Es recomendable disponer los orificios de muestreo cada 0.6 m. Las características de sedimentación de una suspensión compuesta por partículas floculantes, pueden ser determinadas en dos etapas sucesivas:

Etapa 1: Rellenar la columna con una muestra de agua residual, manteniendo una concentración uniforme de sólidos en suspensión a lo largo de la misma. Para mantener una concentración uniforme debe utilizarse un agitador portátil.

Etapa 2: Quitar el agitador del cilindro o columna. En cada una de las aberturas de muestreo, establecer la concentración de sólidos en suspensión en momentos determinados. Los datos obtenidos en dichos puntos son utilizados para determinar la velocidad de sedimentación y su relación con el tiempo de retención.

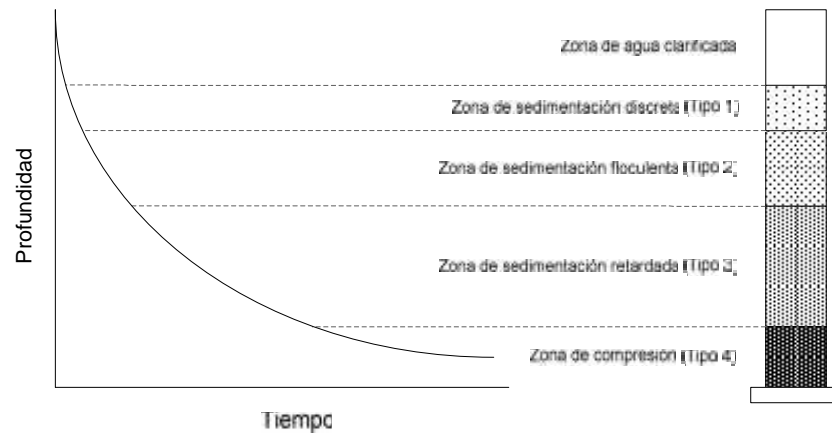
A diferencia del primer tipo de sedimentación, las partículas coalescen, es decir que tienden a formar agregados en dependencia de la posibilidad de contacto entre ellas, de la profundidad del tanque, como también del tamaño del mismo, tomando en cuenta que este proceso se efectúa en soluciones regularmente diluidas.

El procedimiento respectivo para el cálculo de área  $A$  y la altura efectiva  $H$  del sedimentador, se fundamenta en la realización de pruebas de sedimentación, en cilindros como el de la figura 1-8, procediendo cuidadosamente con la obtención de datos, ya que de los mismos depende la construcción y el trazado de gráficas necesarias para el diseño.

### **1.5.3 Sedimentación zonal o retardada (tipo 3).**

El fenómeno de sedimentación que se lleva a cabo cuando se introduce en un cilindro graduado una suspensión concentrada, inicialmente con concentración uniforme, se puede esquematizar como se muestra en la figura 1-9 (Metcalf & Eddy, 1995).

Figura 1-9. Esquema de las zonas de sedimentación.



Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

Debido a la alta concentración de partículas, el líquido tiende a ascender por los intersticios existentes entre éstas. Como consecuencia, las partículas que entran en contacto tienden a sedimentar en zonas o capas, manteniendo entre sí las mismas posiciones relativas. Este fenómeno se conoce como sedimentación retardada. Conforme van sedimentando las partículas, se produce una zona de agua relativamente clara por encima de la región de sedimentación.

Las partículas dispersas, relativamente ligeras, que permanecen en esta región, sedimentarán como partículas discretas o flocculadas, tal como se describió anteriormente. En la mayoría de los casos se presenta una interfase bien diferenciada entre la zona de sedimentación discreta y la región de sedimentación retardada, como se aprecia en la figura esquematizada. La velocidad de sedimentación de la zona de sedimentación retardada es función de la concentración de sólidos y de las características de los mismos.

Según avanza el proceso de sedimentación, comienza a formarse en el fondo del cilindro una capa de partículas comprimidas, en la zona de sedimentación por compresión. Aparentemente las partículas de esta región forman una estructura en la que existe contacto entre sí. Al formarse la región o capa de compresión, las capas en las que las concentraciones de sólidos son, sucesivamente, menores que en la zona de

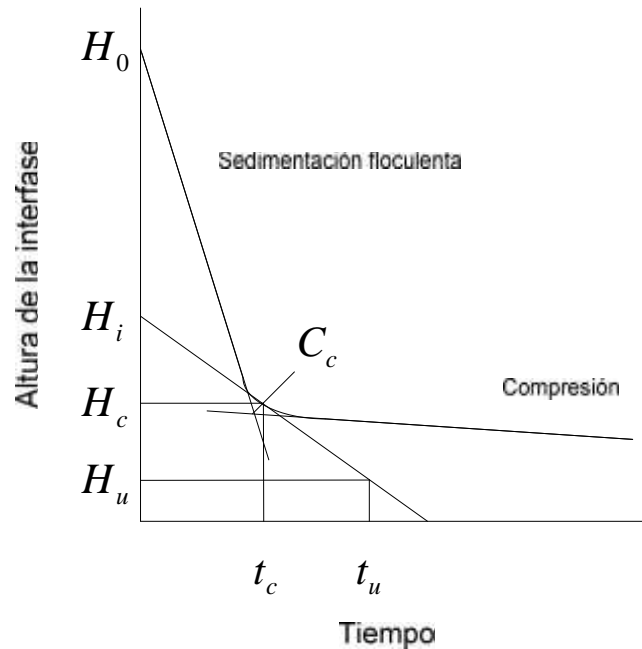
compresión, tienden a ascender por el tubo. Por tanto, la zona de sedimentación zonal o retardada presenta una graduación de concentraciones de sólidos comprendidos entre la zona de compresión y la zona de sedimentación floculenta.

Generalmente, debido a la variabilidad de los resultados obtenidos, la determinación de las características de sedimentabilidad de las suspensiones, en las que la sedimentación zonal y la sedimentación por compresión desempeñan un papel importante, suele realizarse mediante ensayos de sedimentación. Basándose en los datos obtenidos a partir de ensayos en columnas de sedimentación, el área necesaria para el sedimentador puede determinarse empleando dos técnicas diferentes:

- Empleando datos obtenidos a partir de un ensayo de sedimentación simple.
- El método conocido como flujo de sólidos, donde se emplean datos procedentes de una serie de ensayos de sedimentación realizados con diferentes concentraciones de sólidos.

En el primer caso, la superficie necesaria para el espesado de lodos se determina por un método desarrollado por Talmadge y Fitch, cuyo procedimiento consiste en llenar una probeta graduada a una altura  $H_0$ , con una suspensión de sólidos de concentración uniforme  $C_0$ , a medida que transcurre el tiempo la interfase se va desplazando hacia abajo, siguiendo la curva de la figura 1-10.

Figura 1-10. Análisis gráfico de la curva de sedimentación de la interfase.



Fuente: Metcalf &amp; Eddy, 1995.

Según el método, el área crítica para el espesado es:

$$A_{ESP} = \frac{Q_0 \cdot t_u}{H_0} \quad (1-9)$$

Donde:

- $A_{ESP}$  Superficie necesaria para el espesado de lodos, en  $m^2$
- $Q_0$  Caudal de alimentación que entra al tanque, en  $m^3/s$
- $H_0$  Altura inicial de la interfase en la probeta, en m
- $t_u$  Tiempo útil necesario para alcanzar la concentración deseada de lodos ( $C_{UF}$ ) en el fondo del tanque, en s

De la figura 1-10, la concentración crítica que controla la capacidad de manipulación de lodo en un tanque, se presenta a la concentración  $C_C$ , cuando la interfase posee una altura  $H_C$ . El  $t_u$  se determina a partir de la línea respectiva y a partir del valor de  $H_u$ , el

cual representa a la altura de la interfase a la que se quiere concentrar el lodo. El valor de  $H_u$  se obtiene a partir de la siguiente ecuación: (McCabe W. et al, 1991)

$$H_u = \frac{C_0 \cdot H_0}{C_{UF}} \quad (1-10)$$

Donde:

$H_u$       Altura de la interfase necesaria para alcanzar la concentración deseada de lodos, en m

Posteriormente se determina la velocidad de sedimentación no zonal del lodo, la cual es igual a la pendiente de la recta tangente a la curva.

$$V_S = \frac{H_i - H_u}{t_u} \quad (1-11)$$

Donde:

$V_S$       Velocidad de sedimentación, en m/h

$H_i$       Intersección de la recta tangente a la curva, con el eje vertical, en m

Dado que el caudal de líquido sobrenadante es proporcional al volumen de líquido existente por encima de la zona crítica de lodos (Metcalf & Eddy, 1995), el caudal del overflow se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_{OF} = Q_0 \left( \frac{H_0 - H_u}{H_0} \right) \quad (1-12)$$

Donde:

$Q_{OF}$       Caudal del overflow, en m<sup>3</sup>/día

Entonces, la determinación de la superficie necesaria para la clarificación se obtiene dividiendo el caudal sobrenadante por la velocidad de sedimentación:

$$A_{CL} = \frac{Q_{OF}}{V_S} \quad (1-13)$$

Donde:

$A_{CL}$  Superficie necesaria para la clarificación, en  $m^2$

Por tanto, un elemento de control en la determinación del área requerida es el que reporte mayor área, con este procedimiento la carga de sólidos se determina:

$$\text{Flujo de sólidos} = Q_0 \cdot C_0 \quad (1-14)$$

Donde el flujo de sólidos se expresa en kg/día

Para tener en cuenta el hecho de que las condiciones en las que se desarrolla la sedimentación real no son las óptimas, se considera un factor de seguridad, el cual oscila entre 1.25 y 1.5. Por tanto:

$$\text{Carga de sólidos} = \frac{\text{Flujo de sólidos}}{A_{CL} \cdot f_s} \quad (1-15)$$

Donde:

$\text{Flujo de sólidos}$  en kg/día

$f_s$  Factor de seguridad

La segunda técnica requiere de un análisis más detallado y de mayor cuidado.

#### 1.5.4 Sedimentación por compresión (Tipo 4).

El volumen necesario para el lodo (underflow) de la región de compresión también puede determinarse mediante ensayos de sedimentación. Se ha comprobado que la velocidad de sedimentación en esta región, es proporcional a la diferencia entre la altura de la capa de lodo en el tiempo  $t$  y la altura del lodo transcurrido un periodo de tiempo prolongado. Este fenómeno puede expresarse mediante la siguiente ecuación: (Metcalf & Eddy, 1995)

$$H_t - H_\infty = (H_2 - H_\infty)e^{-i(t-t_2)} \quad (1-16)$$

Donde:

$H_t$  Altura del lodo en el tiempo  $t$ , en m

$H$	Altura del lodo tras un prolongado periodo de tiempo, por ejemplo 24 horas, en m
$H_2$	Altura del lodo en el tiempo $t_2$ , en m
$t$	Tiempo, en s
$t_2$	Tiempo, en s
$i$	Constante para una suspensión dada, en $s^{-1}$

En este tipo de sedimentación, una agitación puede servir para compactar el lodo en la región de compresión, al promover la rotura de los flóculos y la circulación del agua. Por todo ello puede ser conveniente incluir el estudio de la influencia de la agitación como parte esencial de las operaciones de sedimentación, especialmente si sus resultados van a ser empleados para determinar superficies y volúmenes de equipos de sedimentación.

Como un último paso, previo a la selección del tipo de sedimentación, se presenta a continuación un resumen de los tipos de sedimentación y sus situaciones de aplicación.

Tabla I-2. Tipos de sedimentación que intervienen en el tratamiento de aguas residuales.

Tipo de fenómeno de sedimentación	Descripción	Aplicación/Situaciones en que se presenta
De partículas discretas (Tipo 1)	Se refiere a la sedimentación de partículas en una suspensión con baja concentración de sólidos. Las partículas sedimentan como entidades individuales y no existen interacción sustancial con las partículas vecinas.	Eliminación de las arenas del agua residual.
Floculenta (Tipo 2)	Se refiere a una suspensión bastante diluida de partículas que	Eliminación de una fracción de los sólidos en suspensión del agua residual bruta en los

	se agregan, o flocculan, durante el proceso de sedimentación. Al unirse, las partículas aumentan de masa y sedimentan a mayor velocidad.	tanques de sedimentación primaria, y en la zona superior de los decantadores secundarios. También elimina los flóculos químicos de los tanques de sedimentación.
Retardada, también llamada zonal (Tipo 3)	Se refiere a suspensiones de concentración intermedia, en que las fuerzas entre partículas son suficientes para entorpecer la sedimentación de las partículas vecinas. Las partículas tienden a permanecer en posiciones relativas fijas, y la masa de partículas sedimenta como una unidad. Se desarrolla una interfase sólido-líquido en la parte superior de la masa que sedimenta.	Se presenta en los tanques de sedimentación secundarios.
Compresión (Tipo 4)	Se refiere a la sedimentación en que las partículas están concentradas de tal manera que se forma una estructura, y la sedimentación sólo puede tener lugar como consecuencia de la compresión de la misma. La compresión se produce por el peso de las partículas, que se van añadiendo constantemente a la estructura por sedimentación desde el líquido sobrenadante.	Generalmente se produce en las capas inferiores de una masa de fango de gran espesor, tal como ocurre en el fondo de los decantadores secundarios profundos y en las instalaciones de espesamiento de fangos.

Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

Finalmente, basándose en las descripciones y en la tabla I-2, se procedió a la adopción de un modelo de sedimentación, seleccionando el tipo de sedimentación conocido como retardada, también llamada zonal, debido que es predominante en los sedimentadores secundarios, y porque en los ensayos previos con la turbia se constató la existencia de una interfase sólido-líquido, característica perfectamente reconocible de este tipo de sedimentación.

### **1.5.5 Clasificación de los sedimentadores.**

Conviene clasificar a los sedimentadores en dos, los mismos son: (Ramalho R.S., 1996)

- Sedimentadores convencionales (circulares y rectangulares).
- Sedimentadores no convencionales (sedimentadores a lamelas).

En esencia, un sedimentador debe desarrollar eficazmente dos funciones, y en el mejor de los casos una tercera. Dichas funciones son:

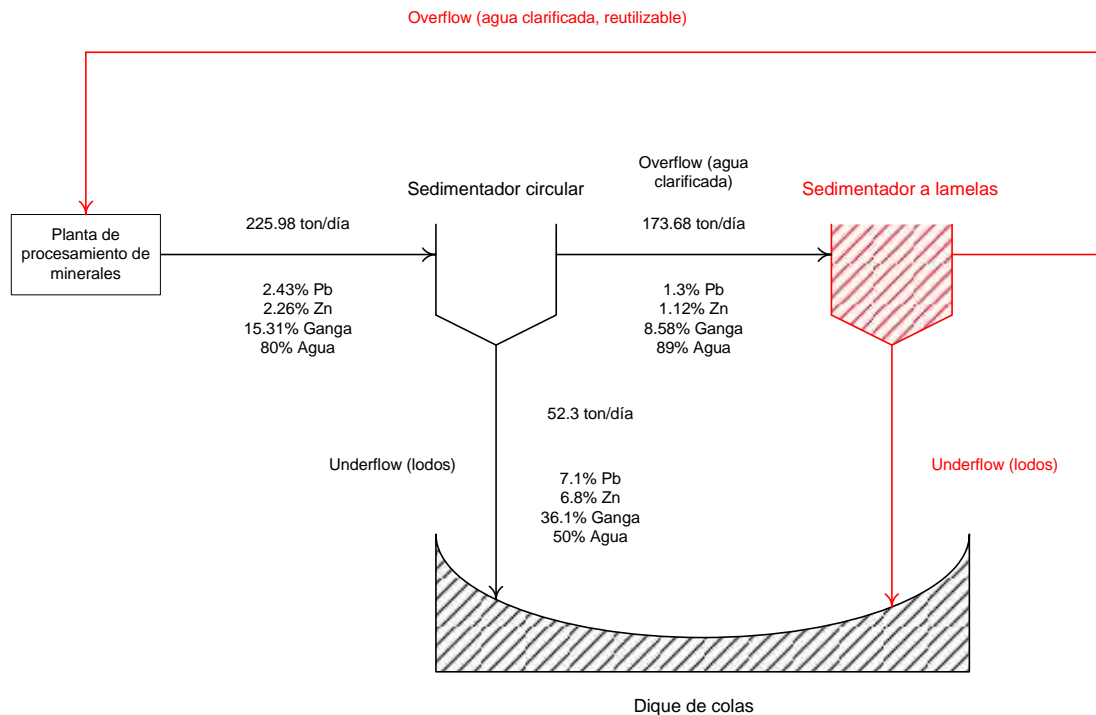
- Eliminar los sólidos en suspensión.
- Espesar el lodo formado.
- Eliminar o evacuar de manera conveniente el lodo acumulado.

Todos los sedimentadores responden al mismo principio de diseño: un recipiente donde se reduce la velocidad del líquido y se le da un tiempo de residencia suficiente para permitir la sedimentación de las partículas. La geometría puede ser variable, pero su naturaleza es la misma.

### **1.6 Diagrama de flujo del tratamiento de efluentes.**

El diagrama de bloques del actual de tratamiento de efluentes se presentó en la figura 1-4. A lo largo de la introducción se hizo hincapié en la necesidad de mejorar el mismo. Por tanto, a continuación se plantea un modelo de sistema de tratamiento de efluentes, el mismo que contempla la implementación del sedimentador a lamelas.

Figura 1-11. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento planteado.



Fuente: Elaboración propia, 2012.

Dicho sedimentador será del tipo secundario, pues recibirá la alimentación de un sedimentador previo. Por otra parte las funciones del sedimentador a lamelas serán dos:

- Realizar la disposición final de lodos en el dique de colas.
- Posibilitar la reutilización de agua, recirculando la misma.

### 1.7 Balance de materia para el sedimentador a lamelas.

El sistema al que se aplicó el balance de materia está constituido por el sedimentador a lamelas, con sus respectivas corrientes de materia, tanto de entrada como de salida, como se aprecia en la figura 1-11.

Sin embargo, en la figura 1-11, las corrientes de materia tienen expresadas las concentraciones de sólidos como sólidos totales, siendo necesario expresar éstas como sólidos suspendidos, debido a que son éstos los que sedimentan.

Para el balance de materia del sedimentador a lamelas, se aplicaron los valores determinados en la caracterización de los efluentes vertidos al Río San Juan del Oro, a los cuales, por su importancia, conviene reiterar:

$C_0$  Concentración inicial de los sólidos suspendidos en la turbia =  
105.5195 g/l

$Q_0'$  Caudal del efluente vertido al Río San Juan del Oro = 165 m<sup>3</sup>/día

La totalidad de los efluentes constituye la alimentación al sedimentador, sin embargo, por consideraciones de seguridad, se empleará un factor igual al 15%, el cual asegura que el sedimentador cuente con una capacidad de tratamiento superior al caudal de los efluentes.

$Q_0$  Caudal de alimentación al sedimentador = 1.15  $Q_0'$  = 189.75 m<sup>3</sup>/día

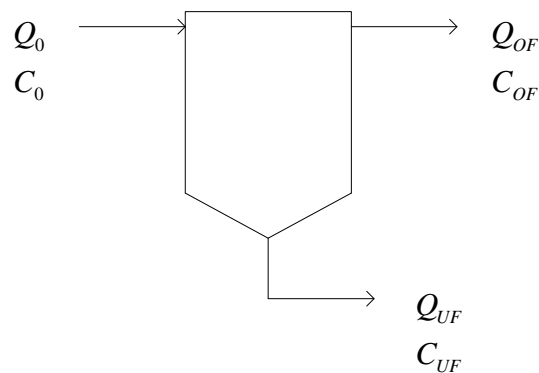
De acuerdo a las directrices de COMINESA, es deseable que los efluentes espesados (los cuales serán vertidos al dique de colas) tengan una concentración de sólidos igual al 50%.

Luego, si  $C_0$  representa una concentración de 10.0247% de sólidos en suspensión, para obtener un espesado (underflow) de concentración 50%, éste debe tener:

$C_{UF}$  Concentración del efluente espesado = 526.2975 g/l

Por tanto, el balance de materia para el sedimentador (figura 1-12) es:

Figura 1-12. Balance de materia para un sedimentador-clarificador.



Fuente: Ramalho R.S., 1996.

Donde:

$Q_0$  Caudal de la alimentación (afluente), en  $m^3/día$

$C_0$  Concentración de sólidos suspendidos en la alimentación (afluente), en  $mg/l$

$Q_{OF}$  Caudal del efluente clarificado (overflow), en  $m^3/día$

$C_{OF}$  Concentración de sólidos suspendidos en el efluente clarificado (overflow), en  $m^3/día$

$Q_{UF}$  Caudal de efluente espesado (underflow), en  $m^3/día$

$C_{UF}$  Concentración sólidos suspendidos en el efluente espesado (underflow), en  $mg/l$

Balance total de los líquidos en circulación:

$$Q_0 = Q_{OF} + Q_{UF} \quad (1-17)$$

Balance para sólidos en suspensión:

$$Q_0 C_0 = Q_{OF} C_{OF} + Q_{UF} C_{UF} \quad (1-18)$$

Combinando estas dos últimas ecuaciones se tiene:

$$Q_{OF} = \frac{Q_0 (C_{UF} - C_0)}{C_{UF} - C_{OF}} \quad (1-19)$$

Y por diferencia,  $Q_{UF}$  es:

$$Q_{UF} = Q_0 - Q_{OF} \quad (1-20)$$

De acuerdo a la ecuación (1-19), suponiendo que la concentración de sólidos suspendidos en el agua clarificada es cero o un valor próximo a cero, se tiene que  $C_{OF} \approx 0$ . Efectuando el cálculo respectivo:

$$Q_{OF} = \frac{189.75 \frac{m^3}{día} (526.2975 - 105.5195) \frac{g}{l}}{526.2975 \frac{g}{l} - 0} = 151.7063 \frac{m^3}{día}$$

Luego, aplicando la ecuación (1-20), se determina el  $Q_{UF}$ :

$$Q_{UF} = 189.75 \frac{m^3}{día} - 151.7063 \frac{m^3}{día} = 38.0437 \frac{m^3}{día}$$

### **1.8 Diseño de un sedimentador a lamelas.**

Para realizar el diseño de este tipo de sedimentador, es necesario desarrollar determinados conceptos y análisis. A continuación se analizan en detalle los fenómenos físicos fundamentales para el diseño del sedimentador a lamelas.

#### **1.8.1 Análisis del sedimentador de láminas.**

El principio teórico de emplear láminas paralelas en equipos sedimentadores fue enunciado primeramente por Hazen, en 1904, bajo la siguiente forma: “La acción de un tanque sedimentador depende de su área y no de su profundidad; una subdivisión horizontal produciría una superficie doble para recibir sedimentos, en lugar de una sencilla, y duplicaría la cantidad de trabajo. Tres de aquellas subdivisiones la triplicarían y así sucesivamente. Si el tanque pudiera ser cortado por una serie de bandejas horizontales, en un gran número de celdas de poca profundidad, el incremento de eficiencia sería muy grande”; y luego continuaba: “El problema práctico más difícil de resolver es el método de limpieza. Todo el aparato debe poderse limpiar en forma fácil y barata. Esta operación deberá hacerse con más frecuencia, por cuanto con la profundidad reducida a un pequeño valor, la cantidad de agua que pasa por un espacio dado en un tiempo dado, será proporcionalmente mayor, y con ella la cantidad de lodos depositados” (Perez, 2008).

Dentro de la clase de sedimentadores no convencionales, y desarrollando la idea de disminuir los requerimientos de área de los sedimentadores convencionales, por medio de la sobreposición de varios pisos, se llega al concepto de los sedimentadores a lamelas. (Ramalho R.S., 1996)

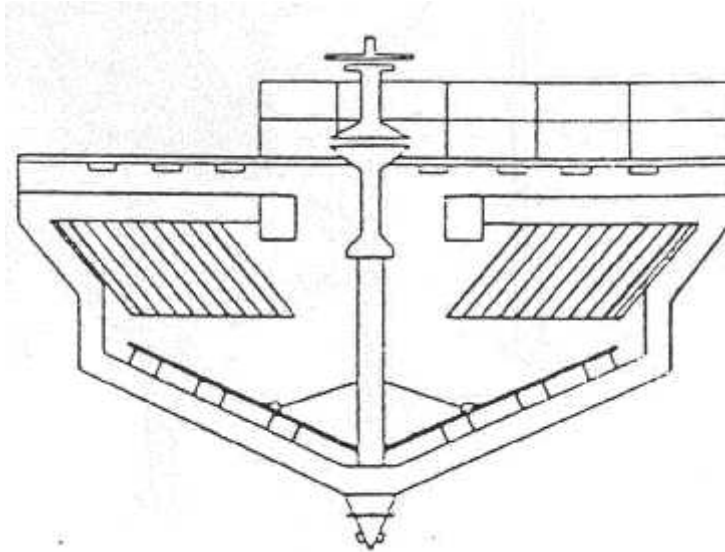
Éstos se caracterizan por el uso de láminas inclinadas y paralelas, donde la altura de sedimentación para las partículas es considerablemente más reducida, es decir, tan pronto como una partícula alcanza la placa que delimita la capa inferior, ésta no es afectada por la corriente del líquido, siempre que la construcción sea idónea, entonces empezará a deslizarse por la placa hacia el recipiente colector de lodos, cuya evacuación se puede planificar ya sea para un tratamiento ulterior o el almacenamiento definitivo.

El sedimentador-clarificador de láminas (donde se eliminan las partes móviles, rasquetas y accionamiento), puede ser considerado por su inversión, bajo costo de mantenimiento y sencillez en su manejo. La forma y construcción de una unidad de este tipo consta principalmente de un tanque, construido en plancha y dispuesta en una estructura de pilares (soportes) de apoyo en el suelo, que mantiene el conjunto a media altura, para facilitar las posibilidades de evacuación del espesado resultante.

En el interior del tanque se sitúa un sistema de placas en disposición paralela, destinado al aumento de superficie útil de sedimentación, en un volumen reducido respecto a tanques convencionales. Las unidades de placas fueron desarrolladas como alternativa a los tanques de sedimentación poco profundos y se utilizan tanto en tanques ya existentes (convencionales), como en tanques especialmente diseñados para este propósito. (Metcalf & Eddy, 1995)

En las figuras siguientes se ilustran dos ejemplos del uso de unidades de láminas.

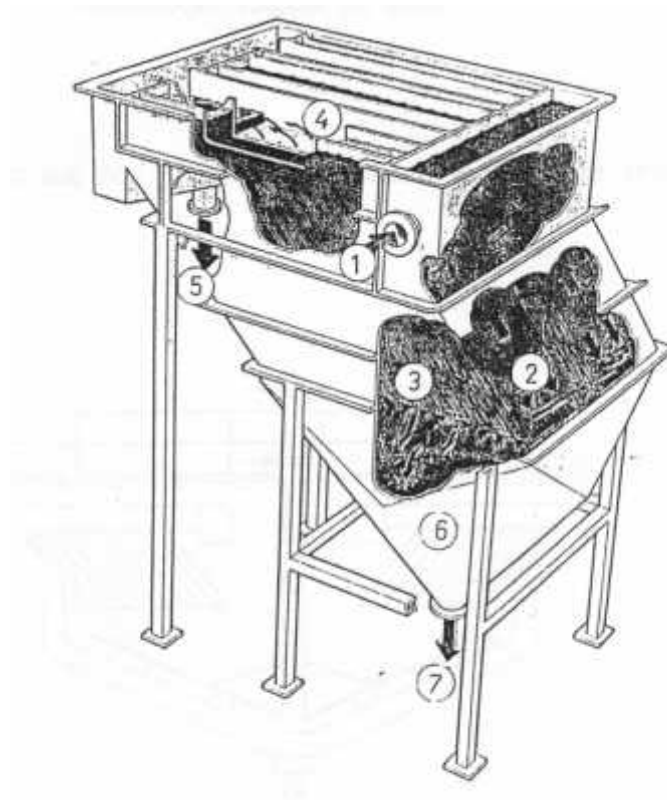
Figura 1-13. Corte esquemático de un sedimentador convencional provisto de láminas.



Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

La siguiente figura es una de las más representativas de estas unidades, las variables más comunes son la forma geométrica de la disposición de las láminas, el tamaño del tanque y la forma de alimentación.

Figura 1-14. Sedimentador no convencional provisto de láminas.



PARTES PRINCIPALES: 1.- Entrada de la turbia, 2.- Cámara de distribución de la turbia  
3.- Paquete de láminas, 4.- Canaleta para el rebalse, 5.- Evacuación del rebalse  
6.- Recipiente de lodos, 7.- Evacuación de lodos por la parte inferior .

Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

En la siguiente tabla se resumen las ventajas y desventajas de los sedimentadores a lamelas, con respecto a los sedimentadores convencionales:

Tabla I-3. Ventajas y desventajas de los sedimentadores a lamelas.

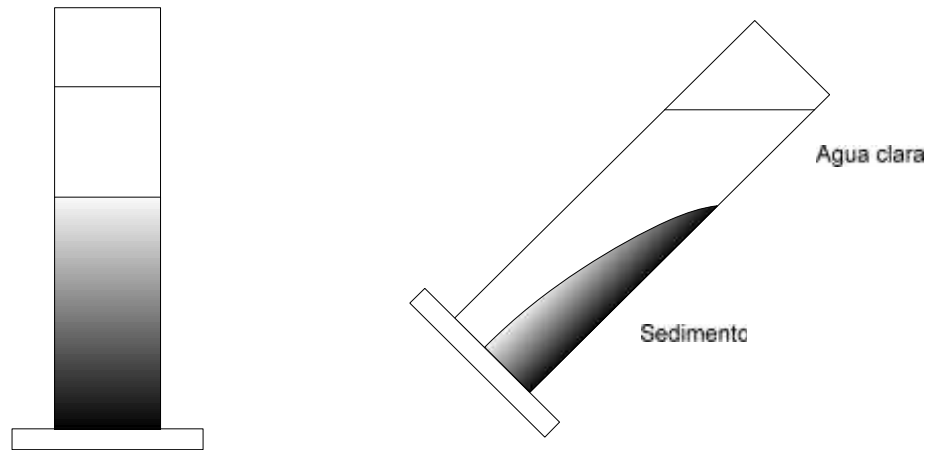
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presentan menores requerimientos de espacio, cualidad que resulta muy útil para sistemas de tratamiento compacto.</li> <li>- Permiten conseguir una buena concentración de lodos decantados.</li> <li>- Presentan menor evaporación de efluentes clarificados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requieren una limpieza más profunda y frecuente.</li> <li>- Son poco flexibles con respecto a su operación, pudiendo dificultarse mucho en caso de que las características de la alimentación varíen constantemente</li> <li>- Los sólidos tienden a acumularse en el interior de las láminas, lo que puede ocasionar un taponamiento.</li> <li>- Pueden promover la aparición de olores desagradables, en caso de tratarse de efluentes orgánicos.</li> </ul>

Fuente: Rigola M., 1989.

### 1.8.2 Principio del efecto Boycott.

El conocimiento del efecto de láminas inclinadas en la sedimentación de lodos, que aumentan la capacidad de sedimentación en una unidad de tratamiento de aguas residuales, data de hace mucho tiempo atrás. (Taggart A.F., 1948)

Figura 1-15. La sedimentación de partículas en suspensión es más acelerada en una probeta inclinada que en otra vertical.



Fuente: Taggart A.F., 1948.

La acción de las paredes y de los flujos inducidos puede provocar también efectos interesantes, uno de ellos es el efecto Boycott (Blanc R. y Etienne G. 1991), el cual se obtiene provocando la sedimentación de una suspensión en una probeta ligeramente inclinada respecto a un eje vertical, tal como se representa en la figura 1-15.

En 1920, Boycott, médico de profesión, fue el primero en investigar este fenómeno, al estudiar la sedimentación de soluciones sanguíneas. La observación efectuada demuestra que el tiempo de sedimentación en una probeta inclinada disminuye considerablemente respecto a una probeta vertical.

El incremento está ligado a un efecto geométrico, ya que las partículas alcanzan con mayor rapidez la pared lateral inclinada que el fondo, en el caso de un recipiente vertical. Además al inclinar el tubo se provoca un flujo de retorno que no interfiere en la caída de las partículas. El fluido claro asciende por el lado opuesto a la pared inferior, no obstante, la ganancia de velocidad en esta operación tiene sus límites.

Si se inclina demasiado el tubo, la velocidad de ascenso del fluido claro aumenta demasiado, produciendo inestabilidad en la interfase existente entre el mismo y la suspensión sedimentada. La interfase empieza a ondularse y en sus cercanías se

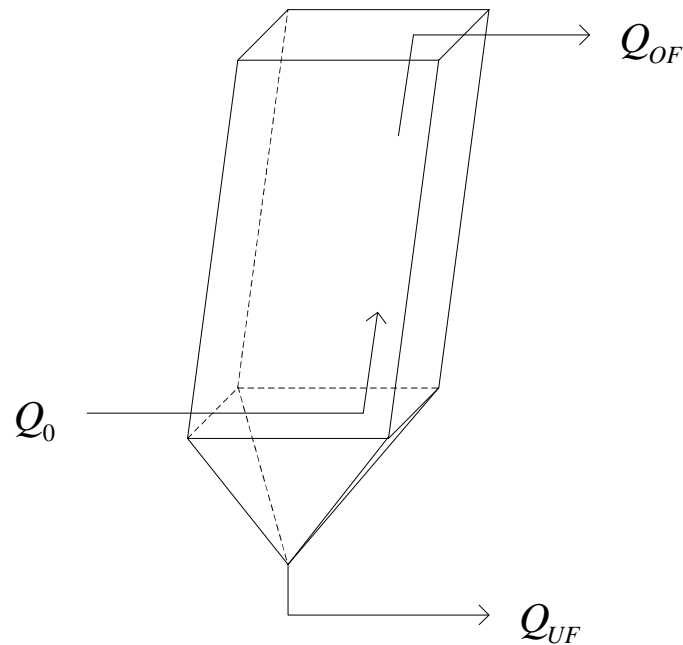
originan unos torbellinos que favorecen la resuspensión de las partículas frenando la sedimentación; sin embargo, en suspensiones que contienen mezclas de partículas diferentes pueden producirse otras inestabilidades. Evidentemente, la forma geométrica de una probeta incide de manera directa a una sedimentación acelerada por características, sobre todo, de la sección del tubo, es decir que la máxima altura de sedimentación que tendrá que recorrer una partícula, es precisamente la trayectoria normal, ubicada en la parte central del tubo, la cual no es igual al diámetro respectivo, sino que es una longitud que varía de acuerdo al ángulo de inclinación de la probeta.

El efecto Boycott forma parte de los principios de la sedimentación inclinada, además, permite comprender mejor el funcionamiento de un sedimentador a lamelas; sin embargo, su aplicación no debe combinarse o confundirse con el método de Talmadge y Fitch para el diseño de sedimentadores. Debe tenerse presente que la velocidad de sedimentación de una partícula es independiente de la profundidad del recipiente que la contiene.

### **1.8.3 Estudio de la sedimentación en flujo inclinado.**

El esquema representado en la figura 1-15 indica claramente el proceder en la sedimentación de partículas suspendidas, en posición vertical e inclinada. Si se aplica este último concepto a una unidad de un sedimentador a lamelas, compuesto de láminas inclinadas y paralelas, se obtiene la siguiente figura.

Figura 1-16. Unidad de un sedimentador a lamelas.

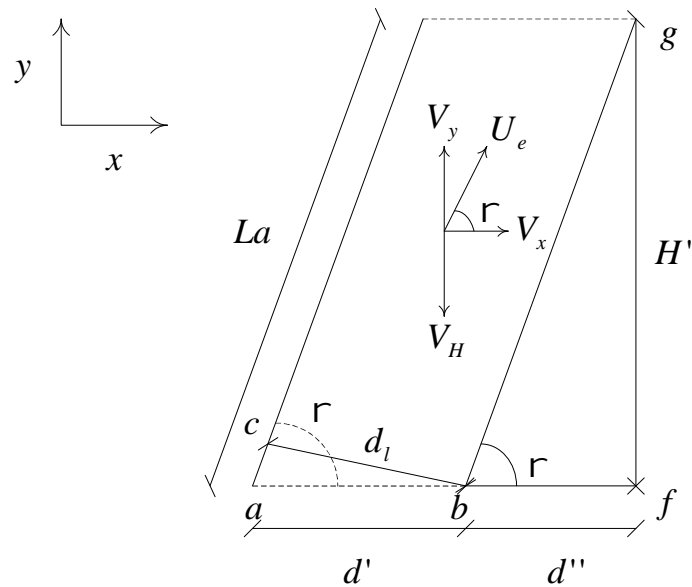


Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

La característica fundamental de la sedimentación en placas inclinadas es, sin lugar a dudas, la reducción de la altura (o profundidad,  $H$ ) que debe recorrer la partícula sedimentable más pequeña en una suspensión, en función del espacio (distancia) entre láminas. En el estudio del fenómeno de sedimentación en flujo inclinado, esta característica es importante, porque será la base para el diseño del equipo, motivo por el cual el análisis respectivo será efectuado con el mayor detalle posible.

Tomando en cuenta el plano de referencia  $x$  y, la trayectoria de una partícula en flujo inclinado, puede ser representada y analizada geoméricamente de la siguiente forma:

Figura 1-17. Esquema de la sedimentación en flujo inclinado, dentro del plano  $x y$



Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

Donde:

- $La$  Longitud de las láminas (placas)
- $d_l$  Distancia entre láminas
- $r$  Inclinación de las láminas
- $U_e$  Velocidad de entrada de la turbia
- $V_H$  Velocidad de sedimentación de las partículas críticas (Velocidad de Hazen)
- $H'$  Componente (profundidad) vertical de la unidad
- $d'$  Proyección horizontal del espaciamiento entre láminas, en el plano de referencia
- $d''$  Proyección horizontal de la lámina en el plano de referencia
- $V_y$  Componente de  $U_e$ , en el eje  $y$
- $V_x$  Componente de  $U_e$ , en el eje  $x$

Por tanto, el principio del análisis es proporcionado según la definición de caudal expresada por la ecuación (1-6); tomando en cuenta la sección (área) proyectada, se tiene:

$$Q_0 = V_H \cdot S_P \quad (1-21)$$

Donde:

$Q_0$  Caudal de alimentación

$S_P$  Superficie proyectada por una unidad de lámina

Para el conducto interlaminar, el caudal es igual a:

$$Q_0 = U_e \cdot A_{ul} \quad (1-22)$$

Donde:

$A_{ul}$  Área útil del espacio entre láminas

A partir de las dos últimas ecuaciones, es posible apreciar que el caudal es el mismo, por tanto se procede a igualarlas:

$$V_H \cdot S_P = U_e \cdot A_{ul} \quad (1-22.1)$$

Se obtiene:

$$\frac{U_e}{V_H} = \frac{S_P}{A_{ul}} \quad (1-23)$$

De acuerdo a la figura 1-17:

$$S_P = (d' + d'') \cdot l \quad (1-23.1)$$

Además:

$$A_{ul} = d_l \cdot l \quad (1-23.2)$$

Despejando  $V_H$  de la ecuación (1-23):

$$V_H = \frac{U_e \cdot A_{ul}}{S_P} \quad (1-23.3)$$

Sustituyendo  $A_{ul}$  y  $S_p$ ; simplificando  $l$ :

$$V_H = \frac{U_e \cdot d_l}{d' + d''} \quad (1-23.4)$$

A partir del triángulo abc:

$$\text{sen } \gamma = \frac{d_l}{d'} \rightarrow d' = \frac{d_l}{\text{sen } \gamma} \quad (1-23.5)$$

A partir del triángulo bfg:

$$\text{cos } \gamma = \frac{d''}{La} \rightarrow d'' = La \cdot \text{cos } \gamma \quad (1-23.6)$$

Sustituyendo las ecuaciones (1-23.5) y (1-23.6) en la ecuación (1-23.4):

$$V_H = \frac{U_e \cdot d_l}{\frac{d_l}{\text{sen } \gamma} + La \cdot \text{cos } \gamma} \quad (1-23.7)$$

Dividiendo la ecuación (1-23.7) entre  $d_l$ , se obtiene la expresión de la velocidad de Hazen (Pout M.F. 1990):

$$V_H = \frac{U_e}{\frac{1}{\text{sen } \gamma} + \frac{La}{d_l} \cdot \text{cos } \gamma} \quad (1-24)$$

El análisis efectuado para la sedimentación en flujo inclinado está relacionado con el esquema mostrado en la figura 1-17, el cual corresponde a un sedimentador de placas paralelas; equipos morfológicamente disímiles, requerirán un análisis diferente.

De esta manera e introduciéndose específicamente al diseño del equipo, queda definida la velocidad de Hazen.

#### **1.8.4 Tipos de sedimentadores de láminas.**

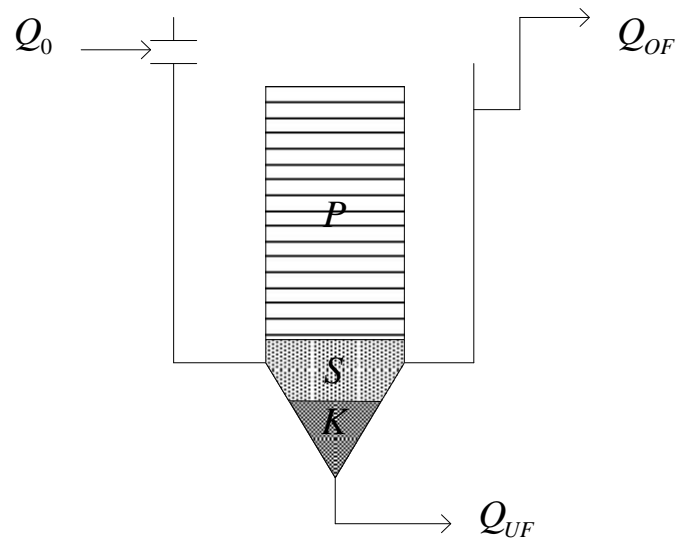
De acuerdo a la bibliografía consultada, los tipos de sedimentadores de láminas se diferencian de acuerdo a la dirección de la corriente o flujo de la turbia, en relación con el sentido de inclinación de las láminas, pudiendo distinguirse dos grupos de

sedimentadores de láminas: los que trabajan según el principio de corriente transversal y los que funcionan según el principio de contracorriente (Ramalho R.S., 1996).

#### 1.8.4.1 Sedimentadores de láminas de corriente transversal.

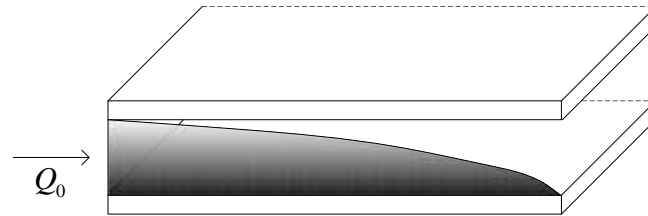
Las siguientes figuras representan esquemáticamente la forma del sedimentador de láminas Rheax, el cual es el único sedimentador de láminas que ha desarrollado el principio de corriente transversal. La figura 1-18 señala el punto de alimentación  $Q_0$ , el rebose superior de agua clarificada  $Q_{OF}$ , y la salida de lodos  $Q_{UF}$ , así como el área de sedimentación  $P$ , donde se ubican las láminas; el área de sedimentación sin láminas  $S$  y el área de compresión  $K$ .

Figura 1-18. Sedimentador de láminas Rheax.



Fuente: Ramalho R.S., 1996.

Figura 1-19. Funcionamiento de un sedimentador de láminas Rheax.

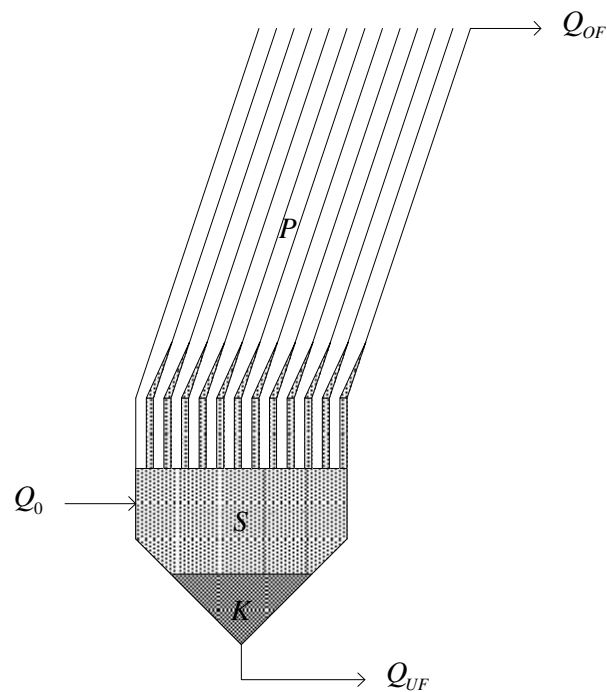


Fuente: Ramalho R.S., 1996.

Es fácil deducir que el sedimentador, según el principio de corriente transversal, puede admitir en la misma superficie un mayor número de láminas, donde el único factor que limita el incremento del número de las mismas es la distribución proporcional de la corriente, en el ancho y el alto del área de sedimentación dotada de láminas. El sentido del flujo que transcurre entre láminas es horizontal, siguiendo el largo las mismas.

#### 1.8.4.2 Sedimentadores de láminas en contracorriente.

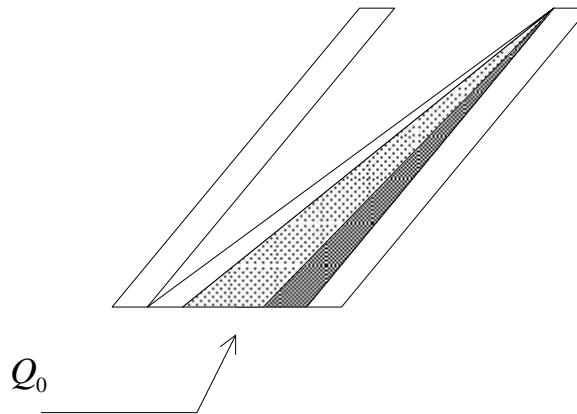
Figura 1-20. Esquema de un sedimentador en contracorriente.



Fuente: Ramalho R.S., 1996.

Según el principio de flujo en contracorriente, el líquido turbio asciende entre las láminas inclinadas. La nomenclatura es la misma que se usó para describir al sedimentador en corriente transversal.

Figura 1-21. Funcionamiento de un sedimentador en contracorriente.



Fuente: Ramalho R.S., 1996.

La figura 1-21 muestra esquemáticamente el funcionamiento de las láminas. Se ha diferenciado la zona de agua clara, de la zona de sedimentación, así como de la zona de compresión propiamente dicha, la cual se encuentra ubicada inferiormente, tal como es posible apreciar en la figura 1-20. La desventaja relativa de un lugar de compresión pequeño, es compensada en el sedimentador de láminas, al menos en parte, por una cualidad relacionada con la existencia de láminas. El agua separada del lodo, en el proceso de compresión, debe atravesar al mismo superponiéndose.

### 1.8.5 Parámetros de diseño.

#### 1.8.5.1 Ángulo de inclinación ( $\theta$ ) de las láminas.

Una particularidad de estas unidades, es que se constituyen en elementos autolimpiantes, por este motivo los módulos se inclinan en un ángulo variable, comprendido entre  $45^\circ$  y  $60^\circ$  con la horizontal (Metcalf & Eddy, 1995). Si el ángulo de inclinación es superior a los  $60^\circ$  se reduce la efectividad del proceso; del mismo modo, si el ángulo de inclinación es inferior a los  $45^\circ$ , el equipo tiende a producir acumulaciones de lodo en los espacios interlaminares. Para controlar el crecimiento

biológico y evitar la aparición de olores, es necesario limpiar periódicamente los mismos, eliminando los residuos acumulados.

#### **1.8.5.2 Distancia de separación ( $d_l$ ) entre láminas.**

La separación entre láminas es un factor muy importante, y de acuerdo a las investigaciones efectuadas por Ramalho R.S. (1996), esta separación debe estar comprendida entre 30 y 50 milímetros, con la finalidad de prevenir taponamientos e interferencias entre el líquido de sobreflujo y el movimiento de deslizamiento de los sólidos, el cual se realiza en la parte posterior de una lámina que hace de base para el asentamiento de los mismos.

El claro entre las placas debe ser suficientemente grande para alojar los flujos opuestos de líquido y sedimento, en tanto reduce la interferencia y evita el taponamiento, a la vez que proporciona un tiempo de residencia suficiente para la sedimentación de los sólidos, fluctuando su valor entre 1 y 2 pulgadas según Perry (1963).

#### **1.8.5.3 Flujo de sólidos.**

En un tanque de sedimentación funcionando en estado estacionario existe un flujo constante de sólidos en sentido descendente. Dentro del tanque, el flujo de sólidos descendente se produce por sedimentación gravitatoria (zonal) y por el transporte de masa debido al caudal extraído del fondo.

El flujo de sólidos es proporcional a la concentración de sólidos en la alimentación; por tanto, el flujo de sólidos máximo puede ser expresado mediante la siguiente ecuación: (Grau J. et al, 2000)

$$FSMAX = V_s \cdot C_0 \quad (1 - 25)$$

Donde:

$FSMAX$  Flujo de sólidos máximo

Sin embargo, debido a diversos factores, como cortocircuitos y turbulencias, la cantidad de lodos extraídos es menor a  $FSMAX$ , por tanto, Grau J. (2000) recomienda emplear la siguiente expresión para el cálculo del flujo de sólidos del diseño:

$$FSDIS = 0.45 \cdot FSMAX \quad (1-26)$$

Donde:

$FSDIS$  Flujo de sólidos del diseño

#### 1.8.5.4 Área total de sedimentación ( $A_{TS}$ ).

El dimensionamiento teórico de un sedimentador de láminas, puede ser efectuado asumiendo que el área efectiva ( $A_{ef}$ ) es el área total vertical proyectada de las láminas, es decir:

$$A_{ef} = N \cdot A_l \cdot \cos \gamma \quad (1-27)$$

Donde:

$A_l$  Área de una lámina

$\gamma$  Inclinación de la lámina con la horizontal

$N$  Número de láminas

Sin embargo, para fines prácticos de cálculo, el  $A_{TS}$  se determina mediante la siguiente ecuación:

$$A_{TS} = A_{CL} + A_{ESP} \quad (1-28)$$

Donde:

$A_{CL}$  Área de clarificación, en  $m^2$

$A_{ESP}$  Área de espesamiento, en  $m^2$

Siendo  $A_{CL}$  expresado por la ecuación (1-13):

$$A_{CL} = \frac{Q_{OF}}{V_s} \quad (1-13)$$

$A_{ESP}$  se determina mediante la siguiente ecuación:

$$A_{ESP} = \frac{Q_{UF} \cdot C_0}{FSDIS} \quad (1-28.1)$$

En la práctica, un factor de corrección  $K_{La}$  debe ser incluido, de este modo:

$$A_{TS} = K_{La} (A_{CL} + A_{ESP}) \quad (1-29)$$

Esta corrección incrementa el área, considerando dos efectos:

- Turbulencias originadas debido a la estrechez de las láminas.
- Acumulación de sólidos entre las superficies inclinadas.

Las experiencias efectuadas por Ramalho R.S. (1996) recomiendan un valor de  $K_{La}$  comprendido entre 1 y 1.7, sin embargo es posible asumir  $K_{La} = 1.4$  como un valor promedio adecuado.

#### 1.8.5.5 Número de láminas (N).

El número de láminas se determina considerando el  $A_{TS}$ , el tamaño de las mismas y su inclinación. No existen datos bibliográficos que sugieran dimensiones o formas geométricas de las láminas, sin embargo, la determinación de las dimensiones más idóneas forma parte de los objetivos de la presente investigación.

La ecuación que determina el número de placas es:

$$N = \frac{A_{TS}}{A_l \cdot \cos \Gamma} \quad (1-30)$$

Donde:

$A_l$  Área de una lámina, en  $m^2$ , dado por:

$$A_l = La \cdot l \quad (1-31)$$

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, el número de láminas es función de la longitud ( $La$ ) y del ancho ( $l$ ) de las mismas, en consecuencia, la ecuación definitiva para el cálculo es:

$$N = \frac{A_{TS}}{La \cdot l \cdot \cos \Gamma} \quad (1-32)$$

### 1.8.6 Escalamiento.

El escalamiento se define como el proceso mediante el cual se desarrollan criterios y reglas de asignación numérica, las cuales determinan las unidades de medida significativas para llevar un objeto o una operación, de un tamaño dado, a otro tamaño mayor o menor. (Anaya A. y Pedroza H., 2008)

El paso fundamental en el escalamiento consiste en trasladar los datos obtenidos mediante experimentación a un modelo, el cual puede ser:

- Fenomenológico: El modelo fenomenológico está fundamentado en algunos razonamientos teóricos, pero de tipo microscópico. No involucra consideraciones moleculares y permite realizar la predicción en rangos (o intervalos) de operación no estudiados experimentalmente.
- Empírico: El modelo empírico se postula sin bases teóricas y solamente se pretende que realice el ajuste de la interacción entre los datos, en el rango o intervalo de experimentación.
- De similitud: El modelo de similitud es obtenido a partir de un análisis de similitud, con respecto a analogías físicas de tipo térmico, mecánico, geométrico, químico, etc.

#### 1.8.6.1 Principios de similitud.

El principio de similitud es una referencia a la relación existente entre sistemas físicos y el tamaño de los mismos. Los sistemas físicos se caracterizan por tres cualidades: tamaño, forma y composición. Las tres variables son independientes; por ejemplo, dos objetos pueden ser de diferentes en tamaño, pero pueden tener la misma forma y composición. (Anaya A. y Pedroza H., 2008)

El principio de similitud está relacionado con el concepto de forma, considerando que ésta es independiente del tamaño y la composición. En términos precisos, este

principio establece que la configuración espacial y temporal de un sistema físico, está determinada por las relaciones existentes entre las magnitudes del propio sistema, las cuales no dependen de las unidades en las que se midan. El concepto de forma aplicado en estos sistemas, no incluye únicamente a las proporciones geométricas de sus miembros, sino que también incluye particularidades como: patrones de flujo, gradientes de temperatura, perfiles de concentración con respecto al tiempo, etc. Dentro de la ingeniería química, se consideran de interés cuatro tipos de similitudes:

- Similitud geométrica.
- Similitud mecánica.
- Similitud térmica.
- Similitud química.

#### **1.8.6.1.1 Similitud geométrica.**

La similitud geométrica se define en términos de correspondencia. Considerando dos cuerpos sólidos, cada uno provisto de tres ejes imaginarios que los intersectan; un punto en el primer cuerpo está dado por las coordenadas  $x, y, z$ , mientras que en el segundo cuerpo, un punto está dado por las coordenadas  $X, Y, Z$ . Ambos grupos de coordenadas están relacionados por la ecuación: (Anaya A. y Pedroza H., 2008)

$$\frac{X}{x} = \frac{Y}{y} = \frac{Z}{z} = R_L \quad (1-32)$$

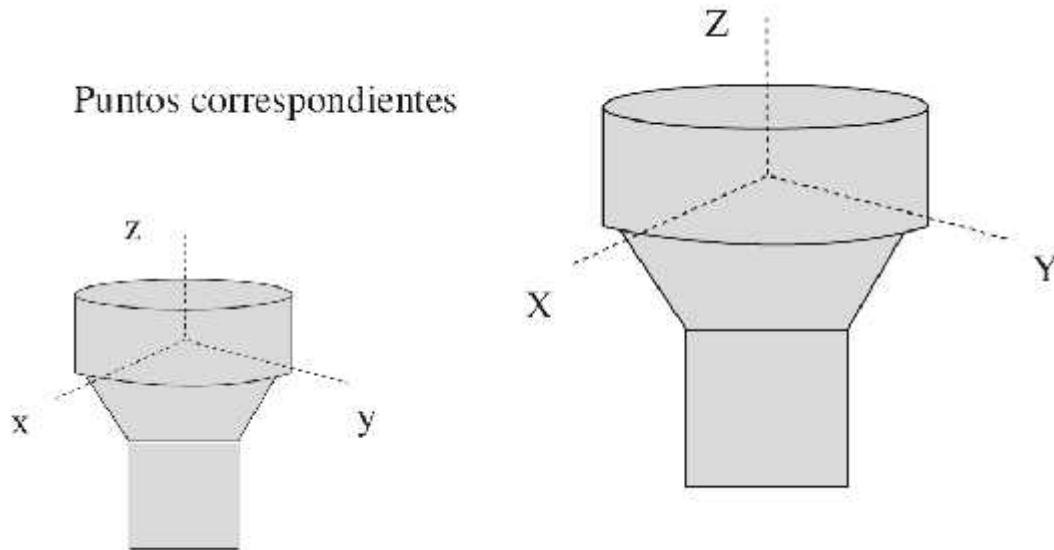
Donde:

$R_L$  Relación de escalamiento lineal, constante

Siendo la relación de escalamiento lineal ( $R_L$ ) una constante. Los dos puntos anteriormente considerados, además de todos los demás pares de coordenadas espaciales que están relacionados en términos de  $R_L$ , se conocen como puntos correspondientes. A partir de esto, se define que dos cuerpos son geoméricamente

similares cuando todos sus puntos son correspondientes; ilustrándose este concepto en la figura 1-22.

Figura 1-22. Similaridad geométrica.



Fuente: Anaya A. y Pedroza H., 2008

#### 1.8.6.1.2 Similaridad mecánica.

La similaridad mecánica comprende a las similaridades estática, cinemática y dinámica. Cada una de éstas puede considerarse como una extensión del concepto de similaridad geométrica en sistemas fijos o en movimiento, sujetos a fuerzas externas o internas.

- Similaridad estática: La similaridad estática se presenta en los cuerpos sólidos, sujetos a esfuerzos constantes. Dos cuerpos geoméricamente similares son estáticamente similares, si al estar sujetos a esfuerzos constantes presentan deformaciones relativas que les permitan conservar su similaridad geométrica.
- Similaridad cinemática: La similaridad cinemática se aplica a fluidos en movimiento. Al igual que la similaridad geométrica, son necesarias tres coordenadas espaciales, introduciéndose además, la dimensión tiempo. Los tiempos se miden basándose en un criterio arbitrario para cada sistema.

- Similaridad dinámica: La similaridad dinámica está relacionada con las fuerzas que aceleran o deceleran el movimiento de sistemas dinámicos. Se denominan fuerzas correspondientes a las fuerzas del mismo tipo (por ejemplo, gravitacionales) que se ejercen sobre determinadas partículas, en tiempos determinados. Dos sistemas similarmente geométricos que se encuentran en movimiento, son dinámicamente similares si las relaciones de todas las fuerzas correspondientes son iguales.

#### **1.8.6.1.3 Similaridad térmica.**

Esta similaridad involucra a los sistemas que presentan flujo de calor, por lo que es necesario introducir la dimensión temperatura, además de la longitud, fuerza y tiempo. Se denominan temperaturas correspondientes a las diferencias de temperaturas, en tiempos correspondientes, existentes entre un par de puntos de un sistema y un par de puntos de otro. Los sistemas que presentan similaridad geométrica son térmicamente similares cuando sus diferencias de temperatura poseen una relación constante.

#### **1.8.6.1.4 Similaridad química.**

La similaridad química está relacionada con sistemas que presentan reacciones químicas, donde la composición varía de un punto a otro en diferentes instantes. No se introduce ninguna nueva dimensión, debido a que es innecesario que las composiciones químicas de ambos sistemas sean las mismas, sin embargo, sí es necesario que exista una relación fija entre las concentraciones puntuales de algunos componentes utilizados para realizar la comparación. Los sistemas con similaridad geométrica y térmica están en similaridad química cuando las diferencias de concentración correspondientes poseen una relación constante.

**CAPÍTULO II**  
**PARTE EXPERIMENTAL**

## CAPÍTULO II

### PARTE EXPERIMENTAL

#### 2.1 Descripción y análisis de los efluentes del Ingenio Noques.

Las características de los efluentes del Ingenio Noques se presentaron en la tabla I-1. Los datos correspondientes a la cinética de sedimentación de los mismos, así como el procedimiento para su obtención y la respectiva curva, se muestran en el anexo 1.

#### 2.2 Descripción del método de investigación.

Para la investigación se diseñó y construyó un prototipo, al mismo tiempo que se empleó el respectivo diseño factorial.

#### 2.3 Diseño del prototipo.

Para el diseño del prototipo se consideró las características de los efluentes del Ingenio Noques (tabla I-1) y el balance de materia efectuado. Por otra parte, al tratarse de un prototipo, el caudal de alimentación se limitó a  $0.5 \frac{l}{min} = 0.72 \frac{m^3}{día}$ .

Tabla II-1. Datos preliminares para el diseño del prototipo.

Parámetro	Símbolo	Valor
Caudal de alimentación al sedimentador	$Q_0$	0.72 m <sup>3</sup> /día
Concentración de sólidos suspendidos en la alimentación	$C_0$	105.5195 g/l
Concentración de sólidos suspendidos en el clarificado (overflow)	$C_{OF}$	0 g/l
Concentración de sólidos suspendidos en el espesado (underflow)	$C_{UF}$	526.2975 g/l

Fuente: Elaboración propia, 2012.

##### 2.3.1 Cálculos preliminares.

Aplicando la ecuación (1-19), es posible determinar el caudal del efluente clarificado:

$$Q_{OF} = \frac{Q_0(C_{UF} - C_0)}{C_{UF} - C_{OF}} \quad (1-19)$$

$$Q_{OF} = \frac{0.72 \frac{m^3}{día} (526.2975 - 105.5195) \frac{g}{l}}{526.2975 \frac{g}{l} - 0} = 0.5756 \frac{m^3}{día}$$

Aplicando la ecuación (1-20), se determinó el  $Q_{UF}$ :

$$Q_{UF} = Q_0 - Q_{OF} \quad (1-20)$$

$$Q_{UF} = 0.72 \frac{m^3}{día} - 0.5756 \frac{m^3}{día} = 0.1444 \frac{m^3}{día}$$

A partir de la curva de sedimentación (anexo 1) y aplicando la ecuación (1-10), se determinó la profundidad del lodo a la que se obtendrá la concentración deseada,  $C_{UF}$ , es decir:

$$H_u = \frac{C_0 \cdot H_0}{C_{UF}} \quad (1-10)$$

Sustituyendo valores:

$$H_u = \frac{105.5195 \frac{g}{l} \cdot 36.6 \text{ cm}}{526.2975 \frac{g}{l}} = 7.3381 \text{ cm}$$

A partir de la curva respectiva, se determinó el tiempo necesario para obtener la concentración en la evacuación del underflow:

$$t_u = 146.55 \text{ min} = 2.4425 \text{ h}$$

El valor de  $t_u$  permite calcular la velocidad de sedimentación, con la ecuación (1-11), definida y explicada oportunamente, la fórmula y el valor calculado son:

$$V_s = \frac{H_i - H_u}{t_u} \quad (1-11)$$

$$V_s = \frac{22 \text{ cm} - 7.3381 \text{ cm}}{2.4425 \text{ h}} = 6.0028 \frac{\text{cm}}{\text{h}} = 1440.672 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{día}}$$

### 2.3.2 Cálculo del área mínima necesaria para la clarificación ( $A_{CL}$ ).

Aplicando la ecuación (1-13), se determinó el área mínima para llevar a cabo la clarificación:

$$A_{CL} = \frac{Q_{OF}}{V_S} \quad (1-13)$$

$$A_{CL} = \frac{0.5756 \frac{m^3}{día}}{1440.672 \cdot 10^{-3} \frac{m}{día}} = 0.3996 m^2$$

### 2.3.3 Cálculo del área mínima para llevar a cabo el espesamiento ( $A_{ESP}$ ).

Para calcular el  $A_{ESP}$  es necesario conocer el flujo de sólidos máximo  $FSMAX$  y el flujo de sólidos del diseño  $FSDIS$ .

$$FSMAX = V_S \cdot C_0 \quad (1-25)$$

$$FSMAX = 1440.672 \cdot 10^{-3} \frac{m}{día} \cdot 105.5195 \frac{kg}{m^3} = 152.0190 \frac{kg}{m^2 día}$$

$$FSDIS = 0.45 \cdot FSMAX \quad (1-26)$$

$$FSDIS = 0.45 \cdot 152.0190 \frac{kg}{m^2 día} = 68.4086 \frac{kg}{m^2 día}$$

Por tanto, el área necesaria para el espesamiento es:

$$A_{ESP} = \frac{Q_{UF} \cdot C_0}{FSDIS} \quad (1-28.1)$$

$$A_{ESP} = \frac{0.1444 \frac{m^3}{día} \cdot 105.5195 \frac{kg}{m^3}}{68.4086 \frac{kg}{m^2 día}} = 0.2227 m^2$$

### 2.3.4 Cálculo del área total de sedimentación ( $A_{TS}$ ).

$$A_{TS} = K_{La} (A_{CL} + A_{ESP}) \quad (1-29)$$

$$A_{TS} = 1.4(0.3996 \text{ m}^2 + 0.2227 \text{ m}^2) = 0.8711 \text{ m}^2$$

### 2.3.5 Diseño de la cuba.

Para la experimentación con los diferentes paquetes de láminas, se diseñó una cuba genérica, compatible con las dimensiones de éstos.

Considerando los paquetes de láminas, se admitieron las siguientes dimensiones:

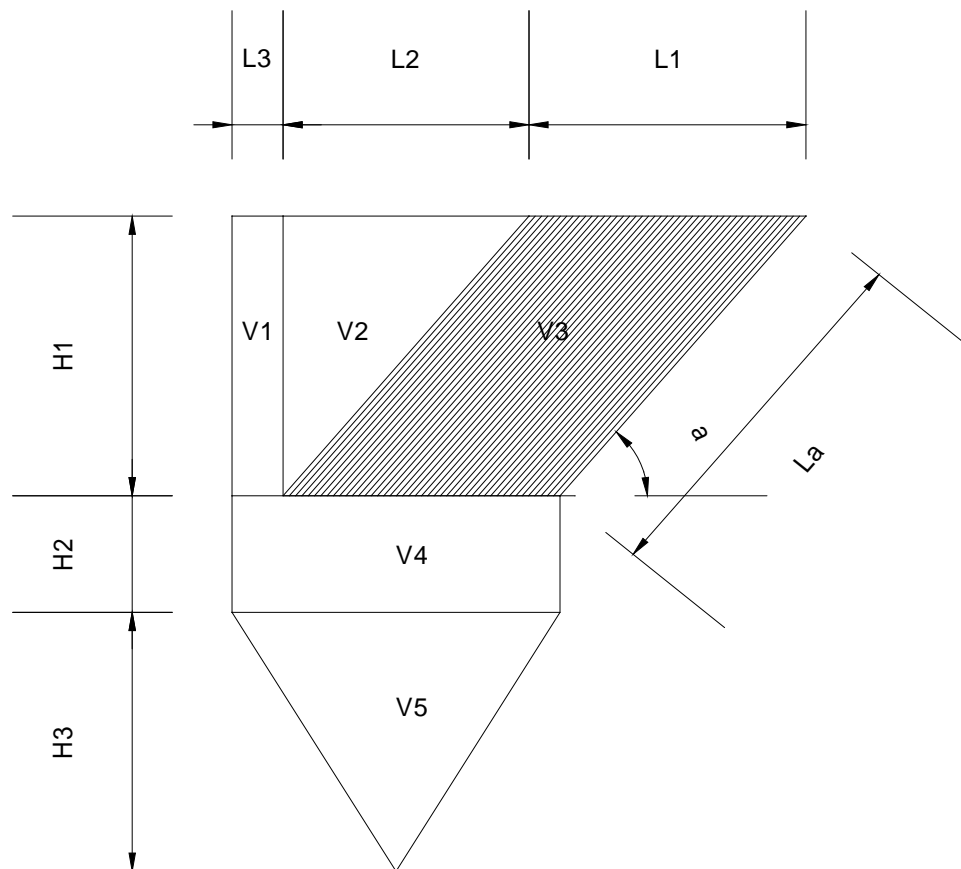
Tabla II-2. Dimensiones de la cuba.

Parámetro	Símbolo	Valor
Altura 1	$H_1$	0,56 m
Altura 2	$H_2$	0,23 m
Altura 3	$H_3$	0,52 m
Altura total	$H_T$	1,32 m
Longitud interna 1	$L_1$	0,50 m
Longitud interna 2	$L_2$	0,25 m
Longitud interna 3	$L_3$	0,09 m
Longitud interna total	$L_T$	0,84 m
Ancho interno	$W$	0,50 m

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Dichas dimensiones corresponden a:

Figura 2-1. Esquema de diseño del prototipo.



Fuente: Elaboración propia, 2012.

### 2.3.6 Cálculo volumétrico del prototipo de sedimentador.

El cálculo volumétrico del prototipo de sedimentador se llevó a cabo basándose en las medidas empleadas anteriormente. Es necesario resaltar que el cálculo corresponde a un modelo propio, en donde el volumen total es expresado por la sumatoria de cada una de las partes, simbolizada cada una como  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_4$  y  $V_5$  (ver figura 2-1).

Por tanto:

$$V_1 = H_1 \cdot L_3 \cdot W = 0.56 \text{ m} \cdot 0.09 \text{ m} \cdot 0.50 \text{ m}$$

$$V_1 = 0.0252 \text{ m}^3$$

$$V_2 = \frac{1}{2} H_1 \cdot L_2 \cdot W = \frac{1}{2} \cdot 0.56 \text{ m} \cdot 0.25 \text{ m} \cdot 0.50 \text{ m}$$

$$V_2 = 0.0350 \text{ m}^3$$

$$V_3 = L_1 \cdot H_1 \cdot W = 0.50 \text{ m} \cdot 0.56 \text{ m} \cdot 0.50 \text{ m}$$

$$V_3 = 0.1400 \text{ m}^3$$

$$V_4 = (L_1 + L_3) \cdot H_2 \cdot W = (0.50 \text{ m} + 0.09 \text{ m}) \cdot 0.23 \text{ m} \cdot 0.50 \text{ m}$$

$$V_4 = 0.0679 \text{ m}^3$$

$$V_5 = \frac{(L_1 + L_3) \cdot W \cdot H_3}{3} = \frac{(0.50 \text{ m} + 0.09 \text{ m}) \cdot 0.50 \text{ m} \cdot 0.52 \text{ m}}{3}$$

$$V_5 = 0.0511 \text{ m}^3$$

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5$$

$$V_T = 0.0252 \text{ m}^3 + 0.0350 \text{ m}^3 + 0.1400 \text{ m}^3 + 0.0679 \text{ m}^3 + 0.0511 \text{ m}^3$$

$$V_T = 0.3192 \text{ m}^3$$

## 2.4 Diseño factorial del experimento.

### 2.4.1 Factores en estudio.

Para comprobar la hipótesis “La longitud de las láminas, su inclinación y la respectiva distancia de separación entre las mismas influyen en la concentración de sólidos suspendidos presentes en el efluente clarificado”, se seleccionaron los siguientes factores: Longitud de las láminas, ángulo de inclinación de las láminas y la distancia entre láminas.

Tabla II-3. Factores en estudio.

Nivel	Longitud de las láminas ( $L_a$ )	Ángulo de inclinación de las láminas ( )	Distancia entre láminas ( $d_l$ )
Inferior	0.35 m	45°	3 cm
Superior	0.65 m	60°	5 cm

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Tomando estos factores como punto de partida se realizó un diseño factorial de  $2^3$  (2 niveles y 3 factores), con las siguientes combinaciones:

Tabla II-4. Combinaciones de los factores en estudio.

Prueba	Longitud de las láminas ( $La$ )	Ángulo de inclinación de las láminas ( $\gamma$ )	Distancia entre láminas ( $d_l$ )
1	0.35 m	45°	3 cm
2	0.65 m	45°	3 cm
3	0.35 m	60°	3 cm
4	0.65 m	60°	3 cm
5	0.35 m	45°	5 cm
6	0.65 m	45°	5 cm
7	0.35 m	60°	5 cm
8	0.65 m	60°	5 cm

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Cada prueba consta de dos repeticiones, por lo cual se tienen 16 unidades experimentales. Por otra parte, cada prueba utilizó un paquete de láminas específico, de un determinado número de láminas. Dicho número se calculó utilizando la ecuación (1-32).

$$N = \frac{A_{TS}}{La \cdot l \cdot \cos \gamma} \quad (1-32)$$

Para el prototipo se considera un ancho de láminas ( $l$ ) igual y constante a 0.5 m. Aplicando esta ecuación para cada prueba:

Tabla II-5. Número de láminas para cada prueba.

Prueba	Longitud de las láminas ( $L_a$ )	Ángulo de inclinación de las láminas ( $\alpha$ )	Distancia entre láminas ( $d_l$ )	Número de láminas ( $N$ )
1	0.35 m	45°	3 cm	8
2	0.65 m	45°	3 cm	4
3	0.35 m	60°	3 cm	10
4	0.65 m	60°	3 cm	6
5	0.35 m	45°	5 cm	8
6	0.65 m	45°	5 cm	4
7	0.35 m	60°	5 cm	10
8	0.65 m	60°	5 cm	6

Fuente: Elaboración propia, 2012.

### 2.5 Materiales utilizados para la construcción de los prototipos.

Habiendo concluido con el diseño del prototipo, se procedió con su construcción, seleccionando los siguientes materiales.

- Vidrio transparente de 4 mm de espesor (para la construcción total del equipo).
- Silicona para vidrio.
- Calamina plana N° 28 (para la construcción de los paquetes de láminas).
- Remaches pop 3.2 mm x 6mm, utilizados para la fijación de los paquetes de láminas.
- Cañería de PVC d = 1”.
- Válvula de bola (llave de paso) d = 1”.
- Fierro de sección cuadrada d = 1”.
- Pintura anticorrosiva blanca.

Desafortunadamente, dadas las características del vidrio, éste presentó una falla al ceder ante la presión hidrostática, siendo necesaria la construcción de un segundo prototipo, el cual empleó los siguientes materiales.

- Plancha metálica de 1 mm de espesor (para la construcción total del equipo).
- Electrodo delgado.
- Calamina plana N° 28 (para la construcción de los paquetes de láminas).
- Remaches pop 3.2 mm x 6 mm, utilizados para la fijación de los paquetes de láminas.
- Cañería metálica  $d = 2''$ .
- Válvula de bola (llave de paso)  $d = 2''$ .
- Cañería de PVC  $d = 1''$ .
- Fierro de sección cuadrada  $d = 1''$ .
- Pintura anticorrosiva blanca.
- Pintura anticorrosiva amarilla.

A continuación se muestran los prototipos concluidos.

Figura 2-2. Prototipos concluidos.



Fuente: Elaboración propia, 2012.

Figura 2-3. Paquetes de láminas empleados en las pruebas.



Fuente: Elaboración propia, 2012.

Figura 2-4. Prototipo empleado en las pruebas.



Fuente: Elaboración propia, 2012.

Figura 2-5. Recolección de muestras.



Fuente: Elaboración propia, 2012.

## **2.6 Análisis de las muestras obtenidas.**

Se emplearon métodos analíticos gravimétricos para la determinación de la concentración de sólidos en las muestras. Los análisis de las muestras se realizaron en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), detallándose los resultados en el anexo 5.

### **2.6.1 Determinación de sólidos totales.**

Los sólidos totales se determinaron por medio de un método gravimétrico, el cual consistió en el secado de una alícuota de la muestra, a una temperatura de 105°C. El procedimiento es mostrado en la figura 2-6. Para más detalles ver anexo 2.

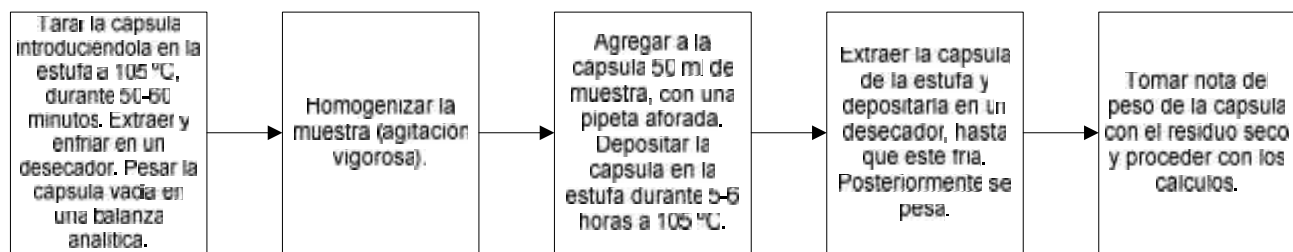
### **2.6.2 Determinación de sólidos disueltos.**

Los sólidos disueltos se determinaron por un método gravimétrico, el cual consistió en el secado de una alícuota filtrada de la muestra, a una temperatura de 180°C. El procedimiento es mostrado en la figura 2-7. Para más detalles ver anexo 2.

### **2.6.3 Determinación de sólidos suspendidos.**

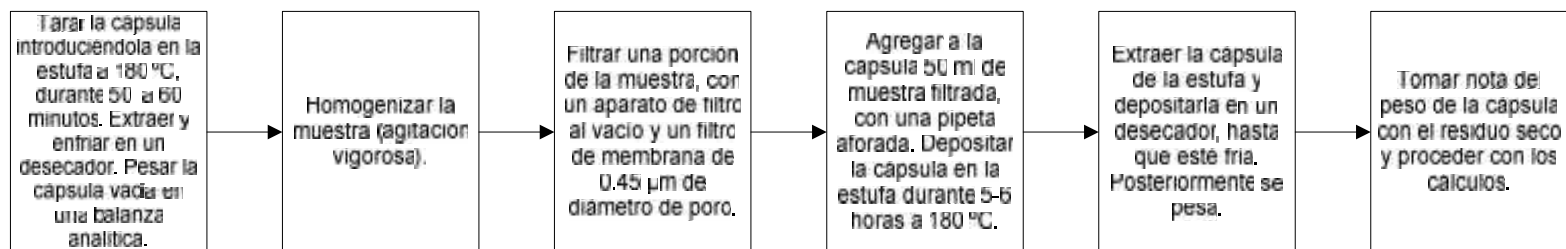
Los sólidos suspendidos se determinaron a partir de un cálculo efectuado a partir de los sólidos totales y los sólidos disueltos. La concentración de sólidos suspendidos corresponde a la diferencia existente entre la concentración de sólidos totales y la concentración de sólidos disueltos. Para más detalles ver anexo 2.

Figura 2-6. Determinación de sólidos totales.



Fuente: Elaboración propia, 2012.

Figura 2-7. Determinación de sólidos disueltos.



Fuente: Elaboración propia, 2012.

**CAPÍTULO III**  
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## **CAPÍTULO III**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1 Realización de las pruebas.**

Las pruebas se realizaron in situ, es decir en los predios del Ingenio Minero Noques, instalando el prototipo de tal forma que su alimentación consistía en parte de los efluentes vertidos al río San Juan del Oro.

El aforo del caudal de alimentación se realizó cuidadosamente, sin embargo la sedimentación de partículas en la tubería de alimentación constituyó una seria dificultad que no pudo resolverse satisfactoriamente, llegándose a tener inevitables variaciones de caudal.

La unión entre las láminas y la pared soporte del paquete de láminas tampoco resultó ser del todo hermética. Debido a la naturaleza y a los elementos de la unión (remaches pop), se crearon infiltraciones interlaminares, las cuales constituyeron otro obstáculo.

Siguiendo el diseño factorial del experimento, se realizaron ocho pruebas, con dos repeticiones cada una, recolectándose dieciséis muestras. Para la determinación de la concentración de sólidos suspendidos presentes en las mismas, se utilizó un procedimiento analítico, del cual se brindan más detalles en el anexo 2.

#### **3.2 Resultados obtenidos.**

Mediante la realización de las pruebas, se lograron obtener resultados que confirman el funcionamiento de estos equipos, así como su aplicación. A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada prueba.

### 3.2.1 Prueba 1.

Las características del paquete de láminas empleado en esta prueba son las siguientes:

Tabla III-1. Características del primer paquete de láminas.

Longitud de las láminas ( $L_a$ )	Ángulo de inclinación de las láminas (°)	Distancia entre láminas ( $d_l$ )	Número de láminas ( $N$ )
0.35 m	45°	3 cm	8

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Los resultados obtenidos con este paquete de láminas son los siguientes:

Tabla III-2. Resultados obtenidos con el primer paquete de láminas.

Repetición	Sólidos totales en el clarificado	Sólidos disueltos en el clarificado	Sólidos suspendidos en el clarificado ( $C_{OF}$ )
1ra	1256 mg/l	962 mg/l	294 mg/l
2da	1236 mg/l	946 mg/l	290 mg/l

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Durante la realización de esta prueba pudo notarse algunas turbulencias ocasionales, las cuales afectaron levemente al proceso de sedimentación. Dichas turbulencias probablemente tengan origen en la geometría del paquete de láminas.

### 3.2.2 Prueba 2.

Las características del paquete de láminas empleado en esta prueba son las siguientes:

Tabla III-3. Características del segundo paquete de láminas.

Longitud de las láminas ( $L_a$ )	Ángulo de inclinación de las láminas (°)	Distancia entre láminas ( $d_l$ )	Número de láminas ( $N$ )
0.65 m	45°	3 cm	4

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Los resultados obtenidos con este paquete de láminas son los siguientes:

Tabla III-4. Resultados obtenidos con el segundo paquete de láminas.

Repetición	Sólidos totales en el clarificado	Sólidos disueltos en el clarificado	Sólidos suspendidos en el clarificado ( $C_{OF}$ )
1ra	1522 mg/l	986 mg/l	536 mg/l
2da	1478 mg/l	980 mg/l	498 mg/l

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Durante la realización de esta prueba pudieron notarse turbulencias con mayor frecuencia, la cuales tuvieron un efecto mayor sobre el proceso de sedimentación.

### 3.2.3 Prueba 3.

Las características del paquete de láminas empleado en esta prueba son las siguientes:

Tabla III-5. Características del tercer paquete de láminas.

Longitud de las láminas ( $L_a$ )	Ángulo de inclinación de las láminas (°)	Distancia entre láminas ( $d_i$ )	Número de láminas ( $N$ )
0.35 m	60°	3 cm	10

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Los resultados obtenidos con este paquete de láminas son los siguientes:

Tabla III-6. Resultados obtenidos con el tercer paquete de láminas.

Repetición	Sólidos totales en el clarificado	Sólidos disueltos en el clarificado	Sólidos suspendidos en el clarificado ( $C_{OF}$ )
1ra	1352 mg/l	1180 mg/l	172 mg/l
2da	1346 mg/l	1176 mg/l	170 mg/l

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Durante la realización de esta prueba pudo apreciarse que el fluido ascendía imperturbablemente por los espacios interlaminares. No se observaron turbulencias.

### 3.2.3 Prueba 4.

Las características del paquete de láminas empleado en esta prueba son las siguientes:

Tabla III-7. Características del cuarto paquete de láminas.

Longitud de las láminas ( $L_a$ )	Ángulo de inclinación de las láminas ( )	Distancia entre láminas ( $d_l$ )	Número de láminas ( $N$ )
0.65 m	60°	3 cm	6

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Los resultados obtenidos con este paquete de láminas son los siguientes:

Tabla III-8. Resultados obtenidos con el cuarto paquete de láminas.

Repetición	Sólidos totales en el clarificado	Sólidos disueltos en el clarificado	Sólidos suspendidos en el clarificado ( $C_{OF}$ )
1ra	1406 mg/l	1246 mg/l	160 mg/l
2da	1432 mg/l	1268 mg/l	164 mg/l

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Durante la realización de la prueba no pudo apreciarse turbulencias.

### 3.2.3 Prueba 5.

Las características del paquete de láminas empleado en esta prueba son las siguientes:

Tabla III-9. Características del quinto paquete de láminas.

Longitud de las láminas ( $L_a$ )	Ángulo de inclinación de las láminas ( )	Distancia entre láminas ( $d_l$ )	Número de láminas ( $N$ )
0.35 m	45°	5 cm	8

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Los resultados obtenidos con este paquete de láminas son los siguientes:

Tabla III-10. Resultados obtenidos con el quinto paquete de láminas.

Repetición	Sólidos totales en el clarificado	Sólidos disueltos en el clarificado	Sólidos suspendidos en el clarificado ( $C_{OF}$ )
1ra	1396 mg/l	1228 mg/l	168 mg/l
2da	1350 mg/l	1228 mg/l	122 mg/l

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Durante la realización de esta prueba no existieron turbulencias apreciables.

### 3.2.3 Prueba 6.

Las características del paquete de láminas empleado en esta prueba son las siguientes:

Tabla III-11. Características del sexto paquete de láminas.

Longitud de las láminas ( $L_a$ )	Ángulo de inclinación de las láminas ( $\theta$ )	Distancia entre láminas ( $d_l$ )	Número de láminas ( $N$ )
0.65 m	45°	5 cm	4

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Los resultados obtenidos con este paquete de láminas son los siguientes:

Tabla III-12. Resultados obtenidos con el sexto paquete de láminas.

Repetición	Sólidos totales en el clarificado	Sólidos disueltos en el clarificado	Sólidos suspendidos en el clarificado ( $C_{OF}$ )
1ra	1354 mg/l	1294 mg/l	60 mg/l
2da	1362 mg/l	1300 mg/l	62 mg/l

Fuente: Elaboración propia, 2012.

La prueba 6, al igual que las pruebas finales, demostró ser una de las más satisfactorias. No se apreciaron turbulencias, tampoco se percibieron, mediante observación directa, sólidos en el efluente clarificado.

### 3.2.3 Prueba 7.

Las características del paquete de láminas empleado en esta prueba son las siguientes:

Tabla III-13. Características del séptimo paquete de láminas.

Longitud de las láminas ( $L_a$ )	Ángulo de inclinación de las láminas ( )	Distancia entre láminas ( $d_l$ )	Número de láminas ( $N$ )
0.35 m	60°	5 cm	10

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Los resultados obtenidos con este paquete de láminas son los siguientes:

Tabla III-14. Resultados obtenidos con el séptimo paquete de láminas.

Repetición	Sólidos totales en el clarificado	Sólidos disueltos en el clarificado	Sólidos suspendidos en el clarificado ( $C_{OF}$ )
1ra	1370 mg/l	1310 mg/l	60 mg/l
2da	1366 mg/l	1308 mg/l	58 mg/l

Fuente: Elaboración propia, 2012.

La prueba 7 es la prueba más satisfactoria, debido a la baja cantidad de sólidos encontrados en el efluente.

### 3.2.3 Prueba 8.

Las características del paquete de láminas empleado en esta prueba son las siguientes:

Tabla III-15. Características del octavo paquete de láminas.

Longitud de las láminas ( $L_a$ )	Ángulo de inclinación de las láminas ( )	Distancia entre láminas ( $d_l$ )	Número de láminas ( $N$ )
0.65 m	60°	5 cm	6

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Los resultados obtenidos con este paquete de láminas son los siguientes:

Tabla III-16. Resultados obtenidos con el octavo paquete de láminas.

Repetición	Sólidos totales en el clarificado	Sólidos disueltos en el clarificado	Sólidos suspendidos en el clarificado ( $C_{OF}$ )
1ra	1394 mg/l	1320 mg/l	74 mg/l
2da	1396 mg/l	1326 mg/l	70 mg/l

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Al igual que las dos anteriores pruebas, la prueba 8 colmó la expectativa. La concentración de sólidos suspendidos en el fluyente clarificado fue una de las más bajas.

### 3.3 Análisis estadístico del diseño factorial.

El análisis estadístico se realizó en el paquete computacional SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), el mismo que permite un tratamiento integrado de todas las fases del análisis de datos, obteniendo de esta manera resultados más representativos y confiables

Los resultados obtenidos a partir de las combinaciones de las variables Longitud de las láminas ( $L_a$ )/Ángulo de inclinación de las láminas ( $\theta$ )/Distancia entre láminas ( $d_l$ ), permiten un fácil diseño experimental, obteniéndose de esta forma las variables más significativas para el diseño definitivo del sedimentador a lamelas.

La variable de respuesta de los datos experimentales es expresada a través de la concentración de sólidos suspendidos en el clarificado ( $C_{OF}$ ).

#### 3.3.1 Análisis de la varianza.

El análisis de la varianza señala las principales variables que repercuten en el proceso de sedimentación, más concretamente, en la variable de respuesta. Del mismo modo, proporciona información sobre las interacciones entre variables, así como su significancia.

Tabla III-17. Datos para el análisis de varianza.

Longitud de las láminas ( $L_a$ )	Ángulo de inclinación de las láminas ( )	Distancia entre láminas ( $d_i$ )	Sólidos ( $C_{OF}$ ), mg/l
-1	-1	-1	294
-1	-1	-1	290
1	-1	-1	536
1	-1	-1	498
-1	1	-1	172
-1	1	-1	170
1	1	-1	160
1	1	-1	164
-1	-1	1	168
-1	-1	1	122
1	-1	1	60
1	-1	1	62
-1	1	1	60
-1	1	1	58
1	1	1	74
1	1	1	70

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Los factores en estudio pueden apreciarse en la tabla III-18, los cuales representan a las variables que intervienen sobre la variable de respuesta. Cada factor posee un nivel superior (1) y un nivel inferior (-1).

Tabla III-18. Factores inter-sujetos.

		N
Longitud	-1.00	8
	1.00	8
Ángulo	-1.00	8
	1.00	8
Distancia	-1.00	8
	1.00	8

Fuente: Elaboración propia, 2012.

A continuación se puede apreciar el análisis de varianza para la variable dependiente Sólidos.

Tabla III-19. Análisis de varianza (ANOVA).

Pruebas de los efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Sólidos

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	308647.500 <sup>a</sup>	6	51441.250	15.855	.000
Intersección	546860.250	1	546860.250	168.551	.000
Longitud	5256.250	1	5256.250	1.620	.235
Ángulo	75900.250	1	75900.250	23.394	.001
Distancia	162006.250	1	162006.250	49.933	.000
Longitud * Ángulo	4692.250	1	4692.250	1.446	.260
Ángulo * Distancia	40200.250	1	40200.250	12.390	.007
Longitud * Distancia	20592.250	1	20592.250	6.347	.033
Error	29200.250	9	3244.472		
Total	884708.000	16			
Total corregida	337847.750	15			

a. R cuadrado = ,914 (R cuadrado corregida = ,856)

Fuente: Elaboración propia, 2012.

A partir de este análisis es posible señalar a las variables más significativas con una confianza del 95%, es decir, variables que poseen una significancia menor al 5% (0.05). Para el presente caso las variables más significativas están constituidas por el Ángulo, la Distancia y la relación de ambas; mientras que la variable Longitud no es significativa, debido a que su significancia es mayor al 5%.

### 3.3.2 Análisis de regresión.

El modelo de regresión establece el modelo matemático que relaciona las variables más significativas con la variable de respuesta. Para el análisis de regresión, se introdujo la variable que representa la relación Ángulo\*Distancia.

Tabla III-20. Variables introducidas para el análisis de regresión.

Variables introducidas/eliminadas			
Modelo	Variables introducidas	Variables eliminadas	Método
1	ÁnguloDistancia, Distancia, Ángulo <sup>a</sup>		. Introducir

a. Todas las variables solicitadas introducidas.

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Tabla III-21. Resumen del modelo.

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	.907 <sup>a</sup>	.823	.779	70.55790

a. Variables predictoras: (Constante), ÁnguloDistancia, Distancia, Ángulo

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Tabla III-22. ANOVA<sup>b</sup>.

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	278106.750	3	92702.250	18.621	.000 <sup>a</sup>
	Residual	59741.000	12	4978.417		
	Total	337847.750	15			

a. Variables predictoras: (Constante), ÁnguloDistancia, Distancia, Ángulo

b. Variable dependiente: Sólidos

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Tabla III-23. Coeficientes<sup>a</sup>.

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	184.875	17.639		10.481	.000
	Ángulo	-68.875	17.639	-.474	-3.905	.002
	Distancia	-100.625	17.639	-.692	-5.705	.000
	ÁnguloDistancia	50.125	17.639	.345	2.842	.015

a. Variable dependiente: Sólidos

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Por tanto, a partir de los coeficientes proporcionados en la tabla III-23, la ecuación matemática de la regresión es la siguiente:

$$\text{Sólidos} = 184.875 - 68.875 \cdot \text{Ángulo} - 100.623 \cdot \text{Distancia} + 50.125 \cdot \text{Ángulo} \cdot \text{Distancia}$$

A partir de esta ecuación es posible establecer que a mayor Ángulo de inclinación menor concentración de Sólidos y viceversa; a mayor Distancia entre láminas menor concentración de Sólidos y viceversa. Este último factor es el que posee la incidencia más grande.

### 3.4 Diseño definitivo del sedimentador.

Siguiendo los mismos pasos utilizados para el diseño del prototipo y considerando la mejor forma geométrica para el paquete de láminas, se procedió con el diseño definitivo del sedimentador.

A continuación se detallan los datos preliminares necesarios para el diseño definitivo, los cuales se obtuvieron mediante el balance de materia efectuado en el subtítulo 1.7 y mediante las características de los efluentes del Ingenio Noques.

Tabla III-24. Datos preliminares para el diseño definitivo.

Parámetro	Símbolo	Valor
Caudal de alimentación al sedimentador	$Q_0$	189.75 m <sup>3</sup> /día
Concentración de sólidos suspendidos en la alimentación	$C_0$	105.5195 g/l
Caudal del efluente clarificado (overflow)	$Q_{OF}$	151.7063 m <sup>3</sup> /día
Concentración de sólidos suspendidos en el clarificado (overflow)	$C_{OF}$	0 g/l
Caudal del efluente espesado (underflow)	$Q_{UF}$	38.0437 m <sup>3</sup> /día
Concentración de sólidos suspendidos en el espesado (underflow)	$C_{UF}$	526.2975 g/l

Fuente: Elaboración propia, 2012.

### 3.4.1 Cálculos preliminares.

A partir de la curva de sedimentación (anexo 1) y aplicando la ecuación (1-10), se determinó la profundidad del lodo a la que se obtendrá la concentración deseada,  $C_{UF}$ , es decir:

$$H_u = \frac{C_0 \cdot H_0}{C_{UF}} \quad (1-10)$$

$$H_u = \frac{105.5195 \frac{g}{l} \cdot 36.6 \text{ cm}}{526.2975 \frac{g}{l}} = 7.3381 \text{ cm}$$

A partir de la curva respectiva, se determinó el tiempo necesario para obtener la concentración en la evacuación del underflow:

$$t_u = 146.55 \text{ min} = 2.4425 \text{ h}$$

El valor de  $t_u$  permite calcular la velocidad de sedimentación, con la ecuación (1-11):

$$V_s = \frac{H_i - H_u}{t_u} \quad (1-11)$$

$$V_s = \frac{22 \text{ cm} - 7.3381 \text{ cm}}{2.4425 \text{ h}} = 6.0028 \frac{\text{cm}}{\text{h}} = 1440.672 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{dia}}$$

### 3.4.2 Cálculo del área mínima necesaria para la clarificación ( $A_{CL}$ ).

Aplicando la ecuación (1-13), se determina el área mínima para llevar a cabo la clarificación:

$$A_{CL} = \frac{Q_{OF}}{V_S} \quad (1-13)$$

$$A_{CL} = \frac{151.7063 \frac{m^3}{día}}{1440.672 \cdot 10^{-3} \frac{m}{día}} = 105.3025 m^2$$

### 3.4.3 Cálculo del área mínima para llevar a cabo el espesamiento ( $A_{ESP}$ ).

Para calcular el  $A_{ESP}$  es necesario conocer el flujo de sólidos máximo  $FSMAX$  y el flujo de sólidos del diseño  $FSDIS$ .

$$FSMAX = V_S \cdot C_0 \quad (1-25)$$

$$FSMAX = 1440.672 \cdot 10^{-3} \frac{m}{día} \cdot 105.5195 \frac{kg}{m^3} = 152.0190 \frac{kg}{m^2 día}$$

$$FSDIS = 0.45 \cdot FSMAX \quad (1-26)$$

$$FSDIS = 0.45 \cdot 152.0190 \frac{kg}{m^2 día} = 68.4086 \frac{kg}{m^2 día}$$

Por tanto, el área necesaria para el espesamiento es:

$$A_{ESP} = \frac{Q_{UF} \cdot C_0}{FSDIS} \quad (1-28.1)$$

$$A_{ESP} = \frac{38.0437 \frac{m^3}{día} \cdot 105.5195 \frac{kg}{m^3}}{68.4086 \frac{kg}{m^2 día}} = 58.6820 m^2$$

### 3.4.4 Cálculo del área total de sedimentación ( $A_{TS}$ ).

$$A_{TS} = K_{La} (A_{CL} + A_{ESP}) \quad (1-29)$$

$$A_{TS} = 1.4(105.3025 \text{ m}^2 + 58.6820 \text{ m}^2) = 229.5783 \text{ m}^2$$

### 3.4.5 Cálculo del número de láminas ( $N$ ).

#### 3.4.5.1 Escalamiento de las láminas.

Previamente al cálculo del número de láminas, es necesario proceder con el escalamiento de las mismas, basándose en los análisis efectuados y en los resultados obtenidos. A partir de estos últimos, se estableció como óptimo un ángulo de inclinación de las láminas ( ) igual a  $60^\circ$ ; mientras que la distancia más eficaz entre láminas es de 5 centímetros. Por otra parte, los mejores resultados se obtuvieron con láminas que poseían un ancho ( $l$ ) igual a 0.5 m y una longitud ( $La$ ) igual a 0.35 m.

El escalamiento se realizó mediante un criterio de similaridad geométrica, considerando una relación lineal ( $R_L$ ) igual a 7. Este valor fue adoptado debido a que proporciona un diseño equilibrado y sólido; valores muy altos o muy bajos darían origen a equipos estáticamente inestables.

Tabla III-25. Escalamiento de las láminas.

Dimensiones de las láminas en el prototipo	Relación de escalamiento lineal ( $R_L$ )	Dimensiones de las láminas para el diseño final
Longitud, $La = 0.35$ m	7	Longitud, $La = 2.45$ m
Ancho, $l = 0.5$ m	7	Ancho, $l = 3.5$ m

Fuente: Elaboración propia, 2012.

El número de láminas se determinó con los resultados del escalamiento, aplicando la ecuación (1-32):

$$N = \frac{A_{TS}}{La \cdot l \cdot \cos \gamma} \quad (1-32)$$

$$N = \frac{229.5783 \text{ m}^2}{2.45 \text{ m} \cdot 3.5 \text{ m} \cdot \cos 60} = 53.5457 \approx 54$$

### 3.4.6 Cálculo de la velocidad de las partículas críticas ( $V_H$ ).

Denominada también velocidad de Hazen, fue minuciosamente desarrollada en el capítulo I. A partir de la velocidad de Hazen es posible definir el valor de la velocidad de entrada de la turbina ( $U_e$ ), en m/h y el valor del flujo específico o factor de carga ( $U_e$ ), en  $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$ .

Por consiguiente, el valor de  $U_e$ , para sus dos significados es:

$$U_e = \frac{Q_0}{A_{TS}} \quad (1-22)$$

Sustituyendo valores:

$$U_e = \frac{7.9063 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{229.5783 \text{ m}^2}$$

$$U_e = 0.0344 \frac{\text{m}^3}{\text{h m}^2} \quad \text{Es el flujo específico o factor de carga.}$$

$$U_e = 0.0344 \frac{\text{m}}{\text{h}} \quad \text{Es la velocidad de entrada de la turbina.}$$

Por tanto, la velocidad de Hazen es:

$$V_H = \frac{U_e}{\frac{1}{\text{sen } \gamma} + \frac{La}{d_1} \cdot \cos \gamma} \quad (1-24)$$

$$V_H = \frac{0.0344 \frac{\text{m}}{\text{h}}}{\frac{1}{\text{sen } 60} + \frac{2.45 \text{ m}}{0.05 \text{ m}} \cdot \cos 60} = 1.3424 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

### 3.4.7 Cálculo volumétrico del sedimentador.

De la misma forma que el prototipo, el cálculo volumétrico del sedimentador se llevó a cabo basándose en las medidas del mismo. El volumen total es igual a la sumatoria de cada una de las partes.

Las dimensiones señaladas en la figura 3-1 corresponden a:

$$La = 2.45 \text{ m}$$

$$l = 3.5 \text{ m}$$

$$H_1 = La \cdot \text{sen} \gamma = 2.45 \text{ m} \cdot \text{sen } 60$$

$$H_1 = 2.1218 \text{ m}$$

$$H_2 = \frac{H_1}{2.4} = \frac{2.1218 \text{ m}}{2.4}$$

$$H_2 = 0.8841 \text{ m}$$

$$H_3 = \frac{H_1}{1.08} = \frac{2.1218 \text{ m}}{1.08}$$

$$H_3 = 1.9646 \text{ m}$$

$$H_T = H_1 + H_2 + H_3 = 2.1218 \text{ m} + 0.8841 \text{ m} + 1.9646 \text{ m}$$

$$H_T = 4.9704 \text{ m}$$

Las láminas empleadas en el sedimentador tendrán un espesor

$$e_{lam} = 0.4 \text{ mm} = 0.0004 \text{ m}$$

$$L_1 = N \frac{e_{lam}}{\text{sen} \gamma} + (N - 1) \frac{d_l}{\text{sen} \gamma} = 54 \cdot \frac{0.0004 \text{ m}}{\text{sen } 60} + (54 - 1) \frac{0.05 \text{ m}}{\text{sen } 60}$$

$$L_1 = 3.0849 \text{ m}$$

$$L_2 = La \cdot \text{cos} \gamma = 2.45 \text{ m} \cdot \text{cos } 60$$

$$L_2 = 1.2250 \text{ m}$$

$$L_3 = \frac{L_1}{5.427} = \frac{3.0849 \text{ m}}{5.427}$$

$$L_3 = 0.5684 \text{ m}$$

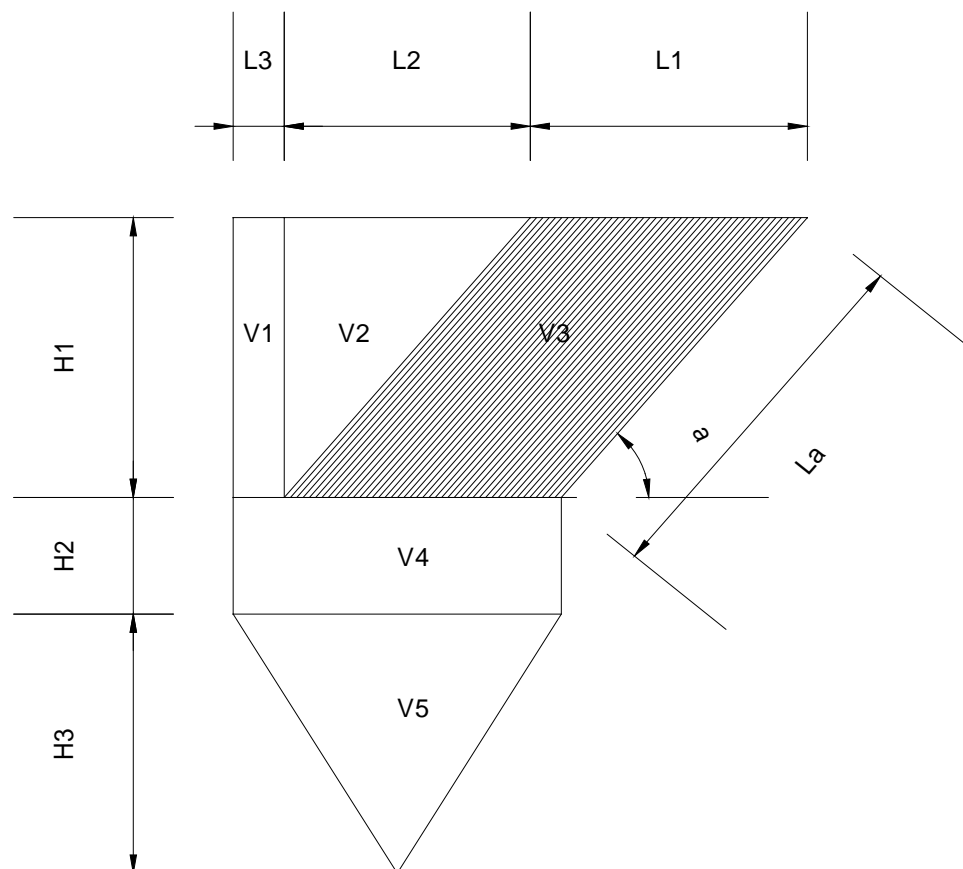
$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 = 3.0849 \text{ m} + 1.2250 \text{ m} + 0.5684 \text{ m}$$

$$L_T = 4.8783 \text{ m}$$

El ancho interior del sedimentador es igual al ancho de las láminas:

$$W = 3.5 \text{ m}$$

Figura 3-1. Esquema de diseño del sedimentador a lamelas.



Fuente: Elaboración propia, 2012.

$$V_1 = H_1 \cdot L_3 \cdot W = 2.1218 \text{ m} \cdot 0.5684 \text{ m} \cdot 3.5 \text{ m}$$

$$V_1 = 4.2213 \text{ m}^3$$

$$V_2 = \frac{1}{2} H_1 \cdot L_2 \cdot W = \frac{1}{2} \cdot 2.1218 \text{ m} \cdot 1.2250 \text{ m} \cdot 3.5 \text{ m}$$

$$V_2 = 4.5485 \text{ m}^3$$

$$V_3 = L_1 \cdot H_1 \cdot W = 3.0849 \text{ m} \cdot 2.1218 \text{ m} \cdot 3.5 \text{ m}$$

$$V_3 = 22.9090 \text{ m}^3$$

$$V_4 = (L_1 + L_3) \cdot H_2 \cdot W = (3.0849 \text{ m} + 0.5684 \text{ m}) \cdot 0.8841 \text{ m} \cdot 3.5 \text{ m}$$

$$V_4 = 11.3043 \text{ m}^3$$

$$V_5 = \frac{(L_1 + L_3) \cdot W \cdot H_3}{3} = \frac{(3.0849 \text{ m} + 0.5684 \text{ m}) \cdot 3.5 \text{ m} \cdot 1.9646 \text{ m}}{3}$$

$$V_5 = 8.3735 \text{ m}^3$$

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5$$

$$V_T = 4.2213 \text{ m}^3 + 4.5485 \text{ m}^3 + 22.9090 \text{ m}^3 + 11.3043 \text{ m}^3 + 8.3735 \text{ m}^3$$

$$V_T = 51.3566 \text{ m}^3$$

#### 3.4.8 Cálculo del tiempo de residencia (retención) ( $T_R$ ).

El tiempo de residencia dentro del sedimentador, es expresado por el cociente del volumen total y el caudal de alimentación. (Ramalho, R.S., 1996)

$$T_R = \frac{V_T}{Q_0} \quad (3-1)$$

Sustituyendo valores:

$$T_R = \frac{51.3566 \text{ m}^3}{7.9063 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 5.5820 \text{ h}$$

#### 3.4.9 Cálculo del espesor de las paredes del sedimentador.

Las paredes del sedimentador estarán fabricadas en acero al carbono. Para determinar el espesor necesario que éstas deban tener, se usó la ecuación para tanques recomendada por la ASME.

Cabe mencionar que, esta ecuación está diseñada para el cálculo de tanques, sin embargo, es capaz de proporcionar una buena aproximación para el presente caso.

$$e_{\text{pared}} = \frac{P W}{2 S E - 1.2 P} + ca \quad (3-2)$$

Donde:

- $e_{pared}$  Espesor de la pared, en m
- $P$  Presión de operación, en bar
- $W$  Ancho del sedimentador, en m
- $S$  Constante de máximo esfuerzo tensil, propia de cada material, en bar
- $E$  Eficiencia de la soldadura, depende de su calidad y tipo.
- $ca$  Sobre-espesor de 3 mm = 0.003 m

Para acero al carbono se tiene  $S = 951.7 \text{ bar}$  ; por otra parte se asumió una eficiencia de soldadura  $E = 1$  .

Sustituyendo valores se tiene:

$$e_{pared} = \frac{1.01325 \text{ bar} \cdot 3.5 \text{ m}}{2(951.7 \text{ bar})(1) - 1.2(1.01325 \text{ bar})} + 0.003 \text{ m}$$

$$e_{pared} = 4.0653 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 4.0653 \text{ mm} \approx 4 \text{ mm}$$

### 3.5 Especificaciones del sedimentador a lamelas.

Las especificaciones del sedimentador a lamelas se detallan a continuación:

Tabla III-26. Especificaciones del sedimentador a lamelas.

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal de alimentación	7.9063	m <sup>3</sup> /h
Volumen interno	51.3566	m <sup>3</sup>
Área total de sedimentación	229.5783	m <sup>2</sup>
Número de láminas	54	und
Espesor de las láminas	0.4	mm
Espesor de la pared	4	mm
Ancho	3.5	m
Largo	4.8783	m
Alto (no incluye soporte)	4.9704	m
Peso en vacío (no incluye soporte)	3259.948	kg

Fuente: Elaboración propia, 2012.

### 3.6 Costo del sedimentador a lamelas.

En la tabla III-27 se presenta un resumen de costos del sedimentador a lamelas. Los costos en detalle son desarrollados en el anexo 4.

Tabla III-27. Resumen de costos del sedimentador a lamelas.

1. Equipos.					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs.)	Valor Total (Bs.)
1	Sedimentador a lamelas de 3.5m x 4.88m x 4.97m con láminas de 3.5m x 2.45m	pza	1	53640.23	53640.23
2	Soporte metálico para el sedimentador de 3.5m x 3.65m x 3.35m fabricado con tubo de 6"	pza	1	2794.40	2794.40
<b>Total de Equipos:</b>					<b>56434.63</b>
2. Mano de Obra.					
1	Soldador	día	87	176	15296.16
2	Ayudante	día	65	96	6257.52
<b>Subtotal de Mano de Obra:</b>					<b>21553.68</b>
Beneficios Sociales (% del Subtotal de Mano de Obra)		-	55%	21553.68	11854.52
Impuestos IVA Mano de Obra (% de Mano de obra + Beneficios sociales)		-	14.94%	33408.20	4991.19
<b>Total de Mano de Obra:</b>					<b>38399.39</b>
3. Maquinaria y Herramientas.					
Maquinaria y Herramientas (% de Total de Mano de Obra)		-	5%	38399.39	1919.97
4. Gastos generales y administrativos.					
Gastos generales (% de Equipos + Mano de Obra + Maquinaria y Herramientas)		-	5%	96753.99	4837.70
<b>Costo Total:</b>					<b>101591.69</b>

Fuente: Elaboración propia, 2012.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 Conclusiones.

- Se realizó el diseño del sedimentador a lamelas, basándose en los mejores parámetros de diseño, los cuales fueron obtenidos a partir de pruebas efectuadas con un prototipo. El sedimentador posibilitará el tratamiento de  $189.75 \text{ m}^3$  diarios de efluentes, por otra parte, de acuerdo al diseño, el sedimentador poseerá un ancho igual a 3.5 m, un largo igual a 4.88 m y un alto igual a 4.97 m. Su costo total será de Bs. 101 591.69.

- Se recabaron los datos teóricos necesarios para el diseño del sedimentador a lamelas así como para el planteamiento de un sistema de tratamiento de efluentes. Por otra parte, los datos teóricos permitieron comprender diversos aspectos relacionados con los sedimentadores a lamelas, como la sedimentación en flujo inclinado y el efecto Boycott, entre otros.

- Se determinaron las características físicas de los efluentes que alimentarán al sedimentador a lamelas. De todas las características físicas, las más importantes para el proceso de sedimentación, son las que expresan el contenido de sólidos. Los efluentes a tratar tienen una concentración de sólidos totales igual a  $107.012 \text{ g/l}$ ; una concentración de sólidos disueltos igual a  $1.4925 \text{ g/l}$  y una concentración de sólidos suspendidos igual a  $105.5195 \text{ g/l}$ .

- Se determinó la cinética de sedimentación de los efluentes que alimentarán al sedimentador a lamelas, por medio del método conocido como de Talmadge y Fitch. Recabados los datos, se procedió con el trazado de la curva de sedimentación.

- Se diseñó y construyó un prototipo de sedimentador a lamelas, con la finalidad de establecer los mejores parámetros para el diseño definitivo. Por medio de pruebas y análisis, se demostró que existe una relación importante entre la concentración de sólidos en el efluente clarificado, el ángulo de inclinación de las láminas, y la distancia entre éstas. Mientras más grande sea el valor numérico del ángulo de

inclinación y de la distancia entre láminas, menor será el valor de la concentración de sólidos; sin embargo, según la bibliografía, no es aconsejable que el ángulo de inclinación de las láminas exceda los  $60^\circ$ , ni que la distancia entre láminas supere los 5 cm, ergo, el mejor ángulo de inclinación de las láminas es  $60^\circ$ , mientras que la mejor distancia interlaminar es 5 cm.

- Se realizó el escalamiento y el diseño definitivo del sedimentador a lamelas, considerando los mejores parámetros de diseño. Por medio del escalamiento, se establecieron las dimensiones de las láminas a emplear (2.45 m x 3.5 m) y por medio de las ecuaciones de diseño se fijaron las dimensiones del sedimentador.

#### **4.2 Recomendaciones.**

- Tanto el prototipo del sedimentador a lamelas como el diseño final del mismo, responden a un procedimiento de diseño estricto, el cual está realizado para las características de los efluentes estudiados. Por tanto, es recomendable que si se desea realizar el tratamiento de efluentes con características diferentes, éstas sean cuantificadas anteladamente.

- Se recomienda que para la construcción de otros prototipos de sedimentadores a lamelas, o bien, para la construcción de equipos definitivos, se reemplace las uniones remachadas por uniones soldadas, a fin de garantizar un funcionamiento libre de infiltraciones interlaminares.

- Es recomendable que, en el caso de futuras pruebas, se verifique cuidadosamente el sitio donde se emplace el prototipo, a fin de prevenir posibles hundimientos e inestabilidades.

## BIBLIOGRAFÍA

## BIBLIOGRAFÍA

**1. Anaya, A., Pedroza, H., (2008, enero).** *Escalamiento, el arte de la Ingeniería Química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina.* [Artículo en línea]. Fecha de consulta: 2 de febrero de 2013.

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48223105>

**2. APHA, AWWA, WPFC, (1992).** *Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales.* Editorial Díaz de Santos, 17ª ed. Madrid.

**3. Foust, A.S., Wenzel L.A., Clump C.W., Maus L., Andersen L.B., (1993).** *Principios de Operaciones Unitarias.* Editorial Continental, 2ª ed. México.

**4. Grau, J., Andarcia, E., (2002, junio).** *Diseño de sedimentadores de placas paralelas.* [Artículo en línea]. Fecha de consulta: 18 de abril de 2012.

Disponible en: <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r59537.PDF>

**5. Kemmer, F.N. y McCallion, J., (1995).** *Manual del Agua, su Naturaleza, Tratamiento y Aplicaciones.* Editorial McGraw Hill, 3ª ed. México.

**6. McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriott P., (1991).** *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.* Editorial McGraw Hill, 4ª ed. Madrid.

**7. Metcalf & Eddy Inc., (1995).** *Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento, Vertido y Reutilización.* Editorial McGraw Hill, 3ª ed. Madrid.

**8. Perry, R.H., (1963).** *Manual del Ingeniero Químico.* Editorial McGraw Hill, 6ª ed. México.

**9. Ramalho, R.S., (1996).** *Tratamiento de Aguas Residuales.* Editorial Reverté, 1ª ed. Barcelona.

**10. Rigola, M., (1989).** *Tratamiento de Aguas Industriales.* Editorial Maicombo, 1ª ed. Barcelona.

**11. Taggart, A.F., (1948).** *Elementos de Preparación de Minerales*. Editorial Interciencia, 1ª ed. Madrid.

**12. Villarroel, L.F., Miller, J.R., Lechler, P.J., Germanoski, D. & Puch, E., (2007, abril).** *Contaminación por metales pesados del sistema de drenaje río Chilco – río San Juan del Oro, sur de Bolivia*. [Artículo en línea]. Fecha de consulta: 18 de abril de 2012.

Disponible en: [http://ie-umsa.com/inicio/index.php/revistaie/doc\\_details/161-contaminacion-por-metales-pesados-del-sistema-de-drenaje-rio-chilco--rio-tupiza-sur-de-bolivia.html](http://ie-umsa.com/inicio/index.php/revistaie/doc_details/161-contaminacion-por-metales-pesados-del-sistema-de-drenaje-rio-chilco--rio-tupiza-sur-de-bolivia.html)