



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA

**MANEJO DE LOS DESECHOS DEL LAVADO DE AGREGADOS
MINERALES**

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

OSCAR RAFAEL PÉREZ RAMÍREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 1,997

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
VOCAL 1o.	Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
VOCAL 2o.	Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano
VOCAL 3o.	Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez
VOCAL 4o.	Br. Víctor Rafael Lobos Aldana
VOCAL 5o.	Br. Wagner Gustavo López Cáceres
SECRETARIO	Ing. Gilda Marina Castellanos de Illescas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Julio Ismael González Podszueck
EXAMINADOR	Ing. Julio Chávez Montúfar
EXAMINADOR	Ing. Oscar Rosal Higueros
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
SECRETARIO	Ing. Francisco Javier González López

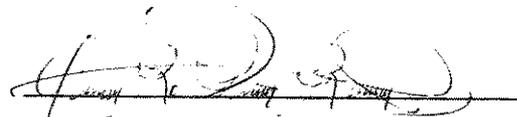
08
7 (4042)
C.4

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

MANEJO DE LOS DESECHOS DEL LAVADO DE AGREGADOS MINERALES

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Química, con fecha 22 de enero de 1,997.



Oscar Rafael Pérez Ramírez



CEMENTOS PROGRESO, S.A.

Guatemala, 13 de mayo de 1997

Ingeniero
Julio Chávez
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad San Carlos de Guatemala
Guatemala

Estimado Ingeniero Chávez:

Por medio de la presente comunico a usted que he asesorado el trabajo de tesis "MANEJO DE LOS DESECHOS DEL LAVADO DE AGREGADOS MINERALES" desarrollado por el estudiante Oscar Rafael Pérez Ramírez, para optar el título de Ingeniero Químico.

En mi calidad de asesor, procedí a supervisar el trabajo de protocolo, la realización práctica y el informe final de tesis que me parece satisfactoriamente desarrollado, por lo que atentamente solicito que el presente informe sea aprobado, impreso y divulgado.

Atentamente,

Dr. Ing. Adolfo Gramajo
Superintendente de Optimización



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 13
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 21 de mayo de 1,997.

Ingeniero
Julio Chávez Montúfar
Director Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

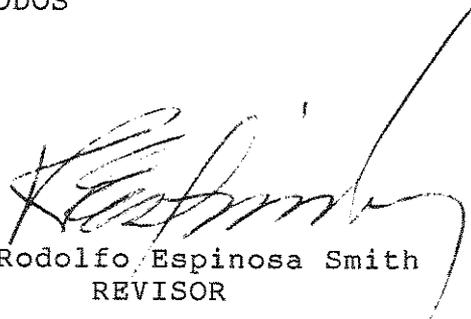
Estimado Ingeniero Chávez.

Por medio de la presente hago de su conocimiento, que he revisado el Informe Final de Tesis titulado: **MANEJO DE LOS DESECHOS DEL LAVADO DE AGREGADOS MINERALES** del estudiante **Oscar Rafael Pérez Ramírez**, de la cual dejo constancia de mi aprobación, para proceder a la autorización del respectivo trabajo.

Sin otro particular y agradeciéndole la atención que se sirva dar a la presente, le saluda.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Rodolfo Espinosa Smith
REVISOR

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



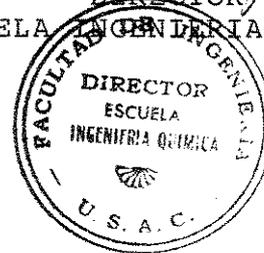
FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Química, Ing. Julio Chávez Montúfar, después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de Tesis del estudiante Oscar Rafael Pérez Ramírez titulado: **MANEJO DE LOS DESECHOS DEL LAVADO DE AGREGADOS MINERALES**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Julio Chávez Montúfar
DIRECTOR
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA



Guatemala, 7 de agosto de 1,997.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

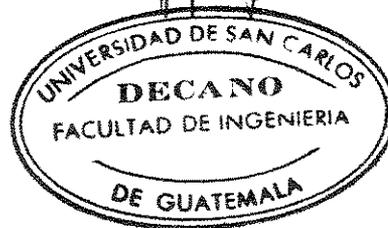
Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de tesis del estudiante Oscar Rafael Pérez Ramírez titulado: **MANEJO DE LOS DESECHOS DEL LAVADO DE AGREGADOS MINERALES**, procede a la autorización del mismo.

IMPRIMASE:


Ing. Herbert Miranda Barrios
DECANO



Guatemala, 7 de agosto de 1,997.

DEDICATORIA

A DIOS

A MIS PADRES:

Rafael y Eulalia, con amor y respeto.

A MI FAMILIA:

En especial a mis primos, primas, y a Jeannete.

A MIS AMIGOS:

Con cariño para todos. A Gisela, con amor.

AGRADECIMIENTO

“ALABADO SEA NUESTRO CREADOR, QUE, COMO DICE AGUSTÍN, HA ESTABLECIDO EL NÚMERO, EL PESO Y LA MEDIDA DE TODAS LAS COSAS.”

Adso de Melk

A MIS PADRES:

Por su amor, confianza y apoyo.

A las personas que de una o otra manera colaboraron con la realización del presente trabajo, especialmente a:

- Dr. Adolfo Gramajo
- Dr. Rodolfo Espinosa
- Ing. Byron Motta
- Ing. Sergio Figueroa
- Ing. Jorge Díaz

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE ILUSTRACIONES	IV
LISTA DE TABLAS	V
GLOSARIO	VI
INTRODUCCIÓN	VIII

PRIMERA PARTE: PROCESOS DE SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO

GENERALIDADES	1
1. OPERACIONES DE SEDIMENTACIÓN POR GRAVEDAD	4
1.1. DIMENSIONAMIENTO PRELIMINAR DE EQUIPOS DE SEDIMENTACIÓN	6
1.1.1. PULPAS CONCENTRADAS	6
1.1.2. PULPAS DILUIDAS	11
1.2. USO DE AGENTES QUÍMICOS	12
1.3. APLICACIONES EN LA INDUSTRIA DE AGREGADOS: SEDIMENTADORES DE ALTA VELOCIDAD	13
2. OPERACIONES DE FILTRACIÓN	17
2.1. CLASIFICACIÓN DEL EQUIPO DE FILTRACIÓN	18
2.2. DIMENSIONAMIENTO PRELIMINAR DE EQUIPOS DE FILTRACIÓN	19
2.2.1. PRUEBAS DE FILTRACIÓN AL VACÍO	19
2.3. MEDIOS FILTRANTES	21
2.4. AYUDAS PARA LA FILTRACIÓN	21
2.5. APLICACIONES EN LA INDUSTRIA DE AGREGADOS: FILTROS PRENSA DE BANDAS	23

SEGUNDA PARTE: PROBLEMA PRESENTADO POR UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE AGREGADOS MINERALES

3. CONCEPCIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROYECTO	26
3.1. COMPRENSIÓN DEL PROCESO	26
3.1.1. DESARENADORES	26
3.1.2. MEZCLA RÁPIDA Y FLOCULADORES	27
3.1.3. SEDIMENTADORES	27
3.1.4. TRATAMIENTO DE LODOS	27
3.2. DEFICIENCIAS DEL SISTEMA	29
3.2.1. OPERACIÓN DE LOS DESARENADORES	29
3.2.2. OPERACIÓN DE LOS FLOCULADORES	29
3.2.3. OPERACIÓN DE LOS SEDIMENTADORES	29
3.2.4. OPERACIÓN DEL FILTRO DE BANDAS	30
3.3. ENUNCIADO DEL PROBLEMA	31
3.3.1. MANEJO DE SÓLIDOS	31
3.3.2. SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO	31
3.4. ANÁLISIS DEL PROBLEMA	32
3.5. ACCIONES CORRECTIVAS	33
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
4.1. REMOCIÓN MECÁNICA DE ARENA	34
4.2. MANEJO DE LODOS	36
4.2.1. TANQUE DE RESERVA Y CONCENTRACIÓN	37
4.2.2. SISTEMA DE INYECCIÓN DE POLÍMERO	38
CONCLUSIONES	XI
RECOMENDACIONES	XII
REFERENCIAS	XIII
BIBLIOGRAFÍA	XV

APÉNDICES

APÉNDICE A. GUÍA DE SELECCIÓN DE SISTEMAS MECÁNICOS DE ELEVACIÓN	XVI
APÉNDICE B. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA ALIMENTACIÓN Y FLUJO INFERIOR DE LOS SEDIMENTADORES	XVII
APÉNDICE C. PRUEBAS EN EL FILTRO PRENSA DE BANDAS	XIX
C.1. PRUEBAS DE FILTRACIÓN "BATCH"	XIX
C.2. PRUEBA DE FILTRACIÓN CONTINUA	XX
C.3. CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DEL FILTRO DE BANDAS	XXI
APÉNDICE D. CÁLCULO DE MUESTRA	XXII
D.1. FLUJO DE FLUIDOS EN CANALES ABIERTOS	XXII
D.2. CANTIDAD DE SÓLIDOS A REMOVER DE LOS TANQUES DESARENADORES	XXIII
D.3. RÉGIMEN DE OPERACIÓN DE LOS TRANSPORTADORES DE FLUJO CONTINUO	XXV
D.4. BALANCE DE SÓLIDOS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA	XXVI
D.5. CAPACIDAD DEL FILTRO DE BANDAS	XXVIII
D.6. COSTO DE RECUPERACIÓN DEL MATERIAL FINO AL UTILIZAR EL FILTRO DE BANDAS	XXX
APÉNDICE E. DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA DEL MATERIAL A RECUPERAR	XXXI
APÉNDICE F. ANÁLISIS QUÍMICO DEL MATERIAL A RECUPERAR	XXXII
APÉNDICE G. DIAGRAMAS	
G.1. DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE TRITURACIÓN	XXXIII
G.2. DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA	XXXIV
G.3. PLANTA GENERAL DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA	XXXV
APÉNDICE H. OTROS DATOS DE UTILIDAD	XXXVI

LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura No. 1: Métodos comunes de separación de sólidos, por tamaños. _____	VIII
Figura No. 2: Clasificador de flujo cruzado. _____	IX
Figura No. 3: Diagrama simplificado de un separador sólido-líquido. _____	1
Figura No. 4: Clasificación de los procesos de separación sólido-líquido. _____	2
Figura No. 5: Secuencia de una prueba de sedimentación discontinua en probetas. _____	6
Figura No. 6: Construcción de curva de sedimentación. _____	7
Figura No. 7: Aparato utilizado para obtener datos de sedimentación de pulpas diluidas. _____	11
Figura No. 8: Variación de la composición en un espesador continuo. _____	14
Figura No. 9: Equipo de sedimentación de alta velocidad. _____	14
Figura No. 10: Dispositivo utilizado para incrementar la velocidad de sedimentación. _____	16
Figura No. 11: Elementos principales de un equipo de filtración. _____	17
Figura No. 12: Aparato para llevar a cabo pruebas de filtración al vacío. _____	20
Figura No. 13: Esquema de un filtro prensa de bandas. _____	23
Figura No. 14: Transportador de flujo continuo. _____	34
Figura B.1: Flujo de fluidos en canales abiertos. _____	XIX
Figura D.1: Dimensiones principales de los tanques desarenadores. _____	XXIV
GRÁFICA No. 1: Distribución de tamaño de partícula del material depositado al fondo de los desarenadores. _____	35
GRÁFICA No. 2: Análisis químico del material contenido en el flujo inferior de los sedimentadores. _____	38
GRÁFICA No. 3: Distribución de tamaño de partícula del material contenido en el flujo inferior de los sedimentadores. _____	39
GRÁFICA No. 4: Calibración de la velocidad de las bandas (filtro de bandas). _____	XXI

LISTA DE TABLAS

Tabla No. 1: Análisis del problema de manejo de desechos. _____	32
Tabla No. 2: Resultados obtenidos en las pruebas efectuadas con el filtro de bandas. _____	36
Tabla No. 3: Criterios tomados en cuenta en la selección del sistema de transporte mecánico. ____	XVI
Tabla No. 4: Determinación del caudal de agua de alimentación proveniente del circuito de lavado. _____	XVII
Tabla No. 5: Determinación de la densidad y concentración del agua de alimentación. _____	XVIII
Tabla No. 6: Determinación de la densidad y concentración del flujo inferior de los sedimentadores. _____	XVIII
Tabla No. 7: Primera prueba de filtración "batch". _____	XIX
Tabla No. 8: Segunda prueba de filtración "batch". _____	XIX
Tabla No. 9: Tercera prueba de filtración "batch". _____	XX
Tabla No. 10: Contenido de sólidos del material recuperado mediante la filtración continua del flujo inferior de los sedimentadores. _____	XX
Tabla No. 11: Valores máximos para el cálculo de la capacidad del filtro de bandas. _____	XXI
Tabla No. 12: variación de la velocidad de las bandas con respecto al variador de velocidad del motor principal. _____	XXI
Tabla No. 13: Ejemplo de granulometría del material depositado en los desarenadores. _____	XXXI
Tabla No. 14: Ejemplo de la distribución de tamaño de partícula del material depositado al fondo de los sedimentadores. _____	XXXI
Tabla No. 16: Análisis químico del material recuperado con el uso del filtro de bandas. _____	XXXII
Tabla No. 17: Capacidad de transportadores de flujo continuo disponibles comercialmente. ____	XXXVI
Tabla No. 18: Listado de la potencia instalada de los motores principales que intervienen en la operación del filtro de bandas. _____	XXXVI

GLOSARIO

Agregado: material obtenido por fragmentación natural o artificial de piedra, utilizado como aditivo en la elaboración de concreto, cuyo tamaño es menor a 10 mm y mayor o igual a 0.075 mm.

Agregado fino: piedra triturada o arena, con un tamaño nominal menor a 4.8 mm y menor a 0.075 mm.

Agregado grueso: piedra triturada con un tamaño nominal menor a 10 mm y menor a 4.8 mm.

Arcillas: silicatos hidratados de aluminio, de color variado que depende de los óxidos presentes. Según la terminología utilizada en el estudio del suelo, la palabra arcilla no indica una unidad química, sino una unidad de tamaño coloidal menor a 0.002 mm.

Arena: material natural, utilizado como aditivo en la elaboración de concreto, con un tamaño nominal menor a 2.0 mm y mayor o igual a 0.075 mm.

Caliza: roca sedimentaria, compuesta principalmente de carbonato de calcio, CaCO_3 .

Centrifugación: proceso de sedimentación que tiene lugar bajo el efecto de una fuerza centrífuga.

Curva granulométrica: expresión gráfica de la distribución de tamaño de partícula, con el tamaño considerado en el eje de abscisas y el porcentaje de partículas menores (o mayores) a cada tamaño considerado en el eje de ordenadas.

Distribución de tamaño: expresión, en porcentajes, de la cantidad de partículas más pequeñas que una serie de tamaños considerados.

Exprimido: liberación del líquido contenido en un cuerpo mediante la aplicación de presión sobre el mismo.

Filtración: retención de las partículas sólidas suspendidas en un medio fluido al hacer pasar la suspensión a través de un cuerpo poroso, con el objeto de recuperar por separado el fluido y las partículas sólidas.

Filtro prensa: aparato en el que una suspensión de sólidos en un medio líquido se comprime entre dos paredes que sostienen un medio poroso, con el objeto de separar los sólidos suspendidos del líquido portador

Grava: material inerte, de bordes redondeados, con un tamaño menor a 10 mm y mayor a 2.0 mm.

Medio filtrante: cuerpo poroso utilizado en los equipos de filtración para retener en sus poros únicamente las partículas sólidas suspendidas en un fluido.

Mineral: sustancia inorgánica de origen natural que puede ser definido por sus propiedades físicas y químicas.

Piedra: una roca que, debido a su alta resistencia mecánica y estabilidad en el agua, puede ser utilizada en obras civiles.

Piedrín: material resultante de la fractura artificial de piedra, con un tamaño menor a 4.8 mm y mayor a 0.075 mm.

Sedimentación: eliminación de sólidos suspendidos en una corriente de fluido por el asentamiento de éstos. El asentamiento tiene lugar debido a la diferencia de densidades entre el sólido suspendido y el fluido portador. La fuerza impulsora de la separación puede ser la gravedad o una fuerza centrífuga creada artificialmente.

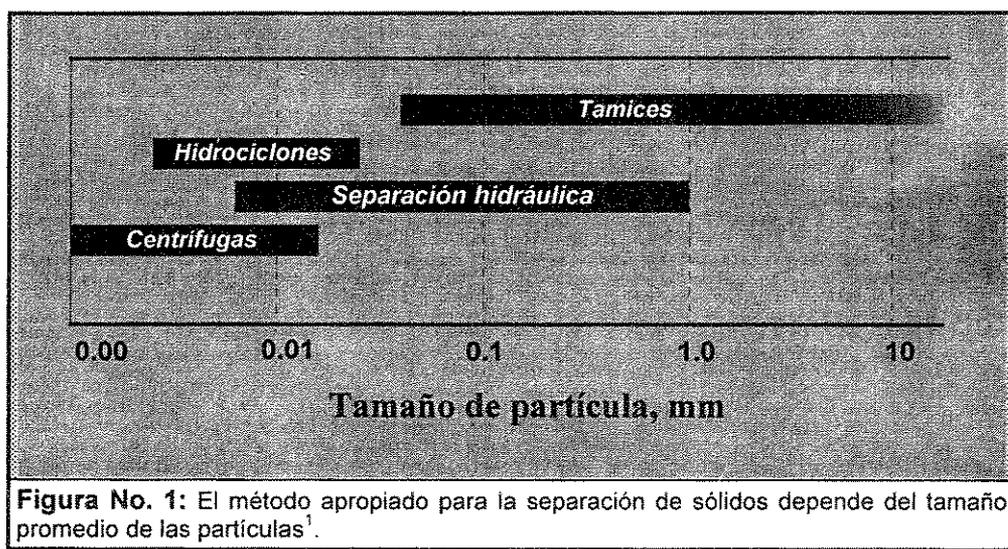
Tamiz: cedazo de hilos, regularmente metálicos, de grosor y apertura dados, utilizado para separar sólidos de distintos tamaños.

INTRODUCCIÓN

En el proceso de manufactura de agregados minerales se producen principalmente dos tipos de desechos:

1. Arcillas, basura, etc. que se encuentran mezcladas con la piedra o que se mezclan con ésta al momento de extraer la roca de la cantera.
2. El material fino (diámetro de partícula menor a 0.074 mm), que debe separarse del producto para cumplir con las especificaciones locales, que en Guatemala establecen un contenido máximo de 1.5% para agregado grueso (piedrín), y de 7% para agregado fino (arena).

Las arcillas, basura, etc. se separan en seco de la piedra por medio de clasificadores de sólidos (usualmente tamices vibratorios), y se colectan formando un montículo. De allí el material es transportado y depositado en grandes terrenos destinados para tal fin.



Debido al tamaño de partículas involucradas, el método más utilizado para llevar a cabo la separación es la clasificación hidráulica por medio de equipos tales como clasificadores de espiral, lavadores de tornillo, lavadores de tambor, tanques de clasificación, hidrociclones y otros (ver figura 1). De éstos, el clasificador de sedimentación húmeda de flujo cruzado (ver figura 2) es uno de los que se utilizan con mayor frecuencia en la industria de agregados.

¹ Ref. No. 8, pág. 209.

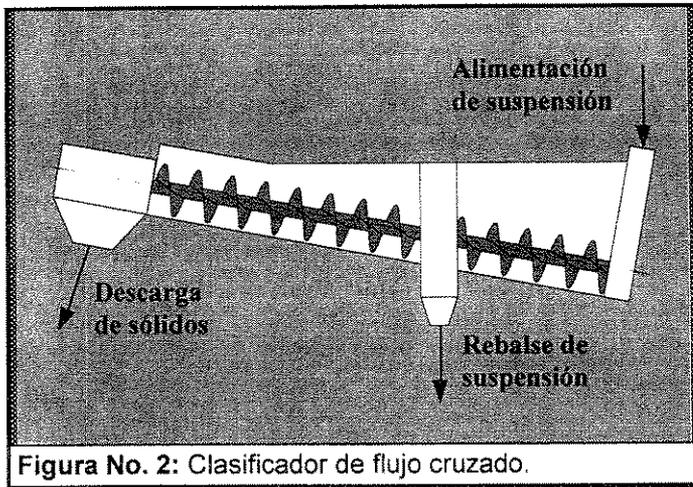


Figura No. 2: Clasificador de flujo cruzado.

En los clasificadores hidráulicos la separación se basa en el hecho de que las partículas de tamaños diferentes presentan también diferentes velocidades de sedimentación en un medio fluido. En el aparato mostrado en la figura 2 el recipiente de sedimentación es un canal inclinado con un rebosadero de líquido en el extremo inferior. La velocidad de flujo y la concentración de la suspensión se deben ajustar de modo que los finos no tengan tiempo de

sedimentar, sino que sean arrastrados con el líquido que sale del clasificador. Las partículas más grandes sedimentan hasta el fondo del canal, de donde deben retirarse mecánica o hidráulicamente (en este caso mecánicamente, con la ayuda del transportador helicoidal que se muestra en la figura 2). Los distintos tipos de clasificadores hidráulicos difieren principalmente en la forma en que se lleva a cabo la extracción de las partículas gruesas.

La concentración de sólidos en la suspensión que abandona el equipo de clasificación hidráulica varía, normalmente, entre un 8% y un 10% en peso². La cantidad de agua hidráulica (agua de lavado) que se utiliza y la concentración de la suspensión que se desecha dependen principalmente del tipo de material procesado, del tamaño del material que se desea separar, así como del tipo de equipo que se utiliza.

La suspensión de material fino se transporta hacia un sistema de tratamiento en el que los sólidos se separan del agua, cumpliendo así con dos objetivos básicos:

1. Recircular al circuito de lavado la mayor cantidad de agua posible, libre de material en suspensión.
2. Desechar el material sólido en una forma manejable.

Actualmente, el problema principal de manejo de desechos en los sistemas de tratamiento de agua de lavado de agregados minerales consiste en concentrar de manera adecuada la suspensión de finos proveniente del aparato de clasificación hidráulica, hasta convertirla en un material manejable. Se sabe que en diferentes países existen organizaciones que

² Ref. No. 3, pág. 40.

continuamente desarrollan investigaciones tanto para recuperar de manera adecuada los desechos del proceso como para encontrar posibles formas de comercializar este material ³.

El tratamiento que se le da a la suspensión de desecho normalmente incluye operaciones de sedimentación y de filtración. Usualmente, se utilizan agentes químicos para acelerar los procesos de sedimentación y así utilizar un menor espacio de planta para la construcción o instalación de tanques de sedimentación. En ocasiones el uso de agentes químicos es tan eficaz que es posible obtener un sólido manejable en una sola etapa de sedimentación⁴.

La naturaleza de los sólidos desechados en un proceso de manufactura de agregados dificulta el manejo de los mismos mediante las técnicas y estudios generales de tratamiento de aguas residuales, de modo que se requiere de un estudio específico de las operaciones individuales que se llevan a cabo en este proceso.

El objetivo del presente trabajo es describir las técnicas y principios utilizados típicamente en el tratamiento de desechos de lavado de agregados minerales y aplicar dichas técnicas y principios a un problema real, presentado por la planta "La Pedrera", la cual se dedica a la manufactura de agregados minerales a partir de piedra caliza (y otros materiales para la construcción). Como se podrá concluir al finalizar la lectura del presente reporte ambos objetivos se cumplieron satisfactoriamente.

Así pues, el trabajo se divide en dos partes: la primera parte presenta en forma general los principios básicos que se requiere conocer para un mejor entendimiento de los procesos que se llevan a cabo en la práctica, con respecto al tratamiento de desechos de lavado de agregados minerales. En la segunda parte se expone el problema de manejo de desechos en la planta "La Pedrera", el análisis de dicho problema, así como la formulación de recomendaciones prácticas dirigidas a la recuperación de los desechos de lavado como nuevos subproductos del proceso de producción de agregados minerales.

³ Ref. No. 6, pág. 15.

⁴ Ref. No. 3, pág. 42.



**PRIMERA PARTE: PROCESOS DE
SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO**

Generalidades

Las operaciones de separación sólido-líquido, se utilizan en diversos procesos en los que intervienen suspensiones de sólidos en un medio líquido, siempre que se requiera:

1. recuperar sólidos valiosos (desechando el líquido portador)
2. recuperar el líquido (desechando los sólidos suspendidos)
3. recuperar tanto los sólidos como el líquido portador.

En la figura 3 se muestra un diagrama simplificado de un separador sólido-líquido. En la práctica el flujo superior consiste en un líquido que contiene aún pequeñas cantidades de sólidos, mientras que en el flujo inferior se recuperan las partículas sólidas acompañadas de cierta cantidad de líquido.

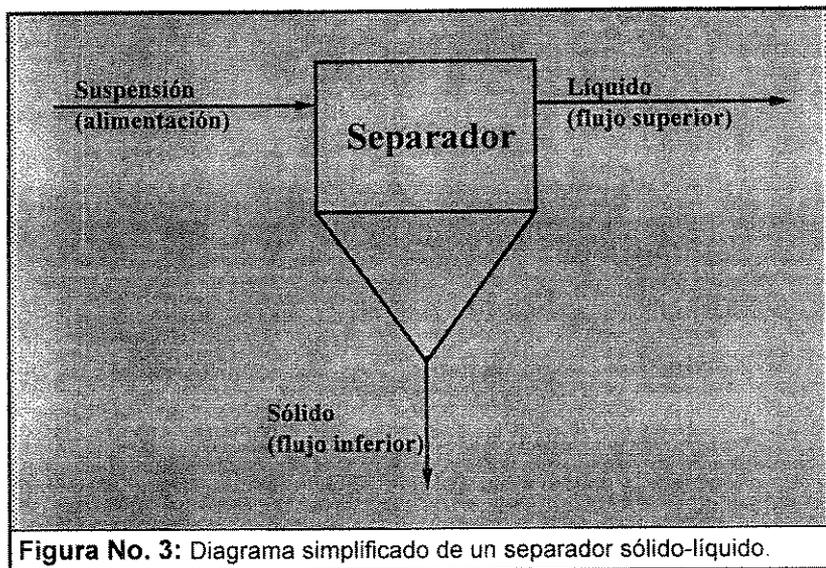


Figura No. 3: Diagrama simplificado de un separador sólido-líquido.

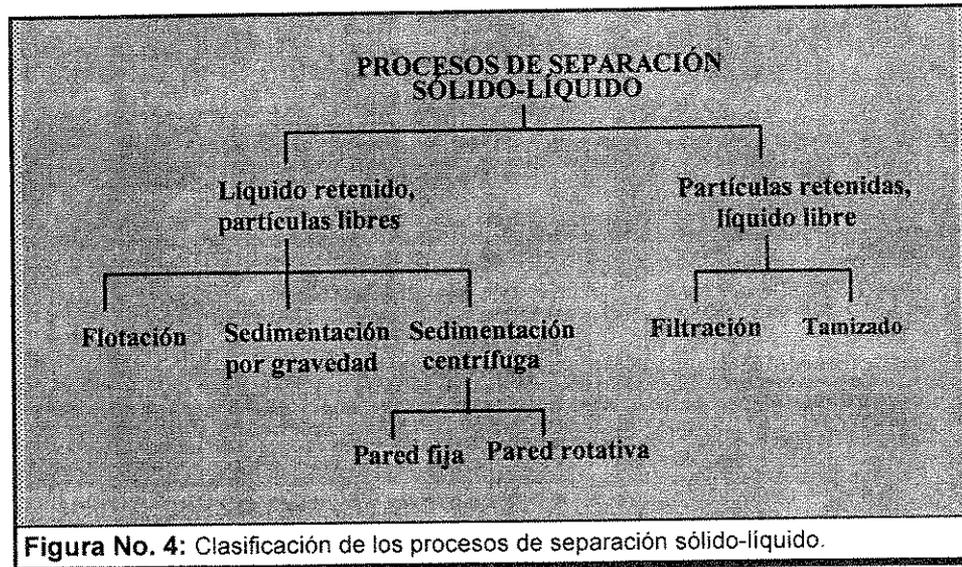
Los procesos de separación sólido-líquido pueden clasificarse de acuerdo a los principios envueltos en cada operación (ver figura 4). En las operaciones de sedimentación y flotación las partículas se mueven libremente en el líquido retenido en el aparato. Por el contrario, en las operaciones de filtración y tamizado las partículas son retenidas en el aparato y el líquido fluye a través de ellas y el medio en que son retenidas.

A continuación, se presenta una breve descripción de cada una de las operaciones de separación sólido-líquido, de acuerdo a la clasificación mostrada en la figura 4:

Flotación:

Este proceso se basa en la liberación de suficiente aire presurizado en el seno de la suspensión. El gas se libera en forma de burbujas y éstas se adhieren o se adsorben sobre los sólidos y los transportan hacia la superficie, donde pueden ser removidos. La flotación ha sido utilizada en la separación de minerales y también ha resultado un medio efectivo de

separación en otras aplicaciones como manufactura de papel, refinерías o tratamiento de desechos¹.



Sedimentación por gravedad:

La sedimentación por gravedad se utiliza para llevar a cabo las operaciones de clarificación y espesamiento. Los espesadores son diseñados para producir un lodo o pulpa, generalmente de la mayor densidad posible, mientras que los clarificadores se utilizan para producir un flujo superior que contenga un mínimo de sólidos suspendidos. Regularmente, se utilizan agentes floculantes para mejorar el asentamiento de las partículas².

Centrifugación:

La centrifugación consiste en el asentamiento de los sólidos sobre las paredes de un recipiente al ser sometidos a un campo de fuerza centrífugo. En los hidrociclones se produce la rotación de la suspensión al introducirla a gran velocidad por una entrada tangencial a las paredes de un recipiente cilíndrico. En la centrifugación las paredes del aparato giran a gran velocidad junto con la suspensión, para producir el campo centrífugo³.

¹ Ref. No. 8, pág. 222.

² Ref. No. 14, pág. 2.

³ Ref. No. 14, pág. 2.

Filtración:

En las operaciones de filtración se hace pasar la suspensión a través de un medio poroso, el cual retiene las partículas sólidas, pero permite el flujo del líquido portador. Los equipos para la filtración se dividen comúnmente de acuerdo a la fuerza impulsora del flujo de líquido a través del medio: vacío, presión y fuerza centrífuga⁴.

Tamizado:

En estos casos la gravedad es la fuerza impulsora que hace pasar el líquido a través del medio. Los tamices vibratorios se utilizan para eliminar el exceso de agua, utilizando vibración u otro tipo de movimiento para ayudar a las partículas sólidas a avanzar sobre el medio⁵.

En la industria de agregados, las principales operaciones utilizadas en el tratamiento de la suspensión efluente del equipo de separación hidráulica son la sedimentación por gravedad y la filtración⁶. Estas dos operaciones se estudian con mayor detalle en los capítulos 1 y 2.

⁴ Op. cit.

⁵ Op. cit.

⁶ Ref. No. 3, pág. 40; Ref. No. 4, pág. 31.

1. Operaciones de sedimentación por gravedad

Sedimentación es la remoción de partículas sólidas suspendidas en una corriente líquida mediante asentamiento y bajo la influencia de un campo de fuerza centrífugo o gravitacional. La separación es debida a la diferencia de densidad existente entre sólido suspendido y el líquido portador. Las operaciones en las que interviene un campo de fuerza centrífugo se clasifican dentro de la sedimentación centrífuga (comúnmente llamada centrifugación). Cuando interviene el campo gravitacional la operación se denomina sedimentación por gravedad (o únicamente sedimentación, como en el resto del presente informe).

Los procesos de sedimentación se pueden dividir en dos operaciones principales, las cuales difieren únicamente en los resultados que se espera obtener de cada una¹:

1. clarificación, y
2. espesamiento.

El objetivo básico de la clarificación es devolver un líquido claro mientras que en el espesamiento se requiere incrementar la concentración de la suspensión. También se puede decir que en la clarificación la substancia valiosa es el líquido, mientras que en el espesamiento lo es el sólido².

Aunque la sedimentación no ha sido estudiada tan a fondo como muchas otras operaciones unitarias, es posible explicarla de acuerdo a la mecánica de partículas sólidas que se mueven en el seno de un fluido por la acción de la gravedad. A medida que se incrementa la concentración de la suspensión inicial, existe una interferencia de la trayectoria de las partículas, por lo que los fenómenos de sedimentación se examinan tomando en cuenta la naturaleza de la suspensión inicial, la cual puede ser³:

1. diluida, o
2. concentrada.

¹ Ref. No. 11, pág. 19-44

² Op. cit.

³ Ref. No. 1, pág. 75.

En una pulpa diluida, cada partícula sedimenta sin una interferencia notable por parte del resto de las partículas. En una prueba de sedimentación, los sólidos se depositan en el fondo del recipiente y se acumulan unos sobre otros.

En las pulpas concentradas, debido a la alta cantidad de sólidos presentes, el movimiento de cada partícula individual es afectada por el movimiento de las demás. En pruebas de sedimentación discontinua una pulpa concentrada forma una interfase perfectamente definida entre el líquido claro en la parte superior y los sólidos que sedimentan (figura 5).

El cambio de pulpa diluida a concentrada ocurre gradualmente a concentraciones de 1 a 2% en peso.

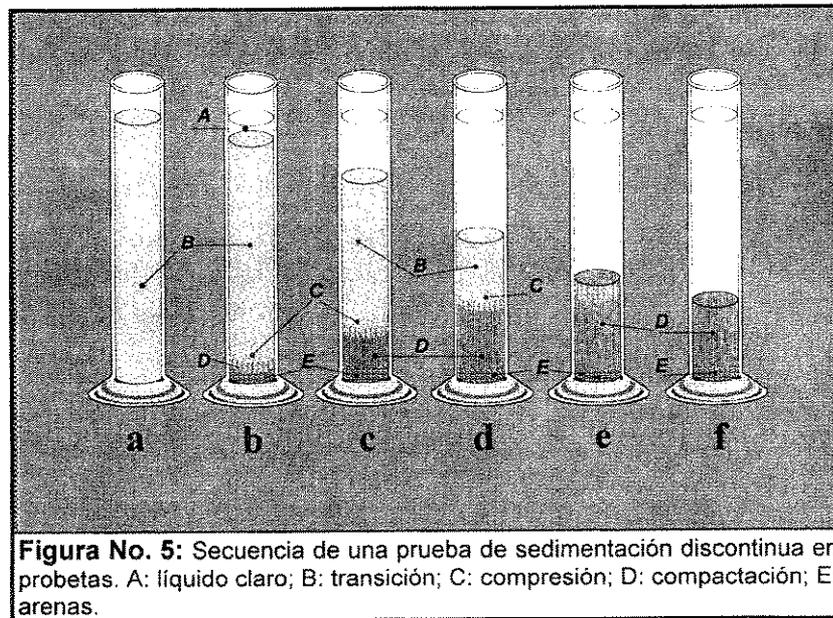
1.1. Dimensionamiento preliminar de equipos de sedimentación

El diseño de equipos de sedimentación requiere el conocimiento previo del comportamiento de la suspensión al sedimentar. Para un cálculo preliminar, resultan de utilidad los datos obtenidos a partir de pruebas a nivel laboratorio, descritas a continuación.

1.1.1. Pulpas concentradas

Pruebas de sedimentación discontinua

La mejor forma de describir los procesos de sedimentación de pulpas concentradas es por medio de *pruebas de sedimentación discontinua en probetas de vidrio*. La figura 5 muestra una secuencia de tales pruebas, las cuales se llevan a cabo introduciendo una muestra representativa de la pulpa que se desea concentrar en una probeta de 1000 ml, y se observan los diferentes fenómenos que ocurren al sedimentar los sólidos en suspensión.



La figura 5.a muestra el inicio de la prueba con una probeta que contiene un lodo completamente mezclado. Luego de dejar reposar el lodo durante cierto tiempo (figura 5.b) es posible observar, primero, que todo el material grueso cae al fondo de la probeta, como se representa por la capa E. La capa siguiente, D, está formada por una capa de sólido sedimentado, seguida de una capa de transición de material parcialmente espesado C situada sobre la capa D.

La separación entre las fases C y D normalmente no es clara, y está marcada con canales verticales a través de los que se escapa el agua de las capas inferiores que se comprimen. Inmediatamente hacia arriba hay una zona B de lodo cuya concentración es idéntica a la concentración global de la suspensión al inicio de la prueba y, finalmente, una capa A de agua clara. La separación entre A y B se marca perfectamente en una pulpa concentrada. A medida que progresa el espesamiento, la capas B y C desaparecen, mientras aumenta la capa D. El momento en que desaparece la capa B se conoce como punto crítico de la prueba. La capa D puede disminuir de espesor debido a la compresión. Finalmente, los lodos en la capa D alcanzan una concentración máxima, y no puede separarse una cantidad de líquido claro mayor a la que se indica en la figura 5.f. Estas pruebas de sedimentación a nivel de laboratorio son la base del proyecto de diseño de espesadores continuos⁴.

Correlación de datos

A partir de pruebas de sedimentación discontinua en probetas de vidrio es posible construir una curva similar a la que se representa por la línea continua en la figura 6, donde es posible observar la diferencia entre el comportamiento de cada zona de la figura 5, diferencia debida a que en cada zona existe un diferente mecanismo de movimiento de las partículas⁵:

- En la zona A, las partículas se mueven libremente sin interferencia de las demás y no es de gran importancia en el estudio de los fenómenos de sedimentación de pulpas concentradas.
- La zona B se caracteriza por una razón de asentamiento constante, de modo que el movimiento en esta zona se puede describir mediante el modelo:

$$-\frac{dH}{d\theta} = \text{constante}$$

(Ecuación No. 1)

Donde: "H" es la altura de la interfase, y "θ" es el tiempo.

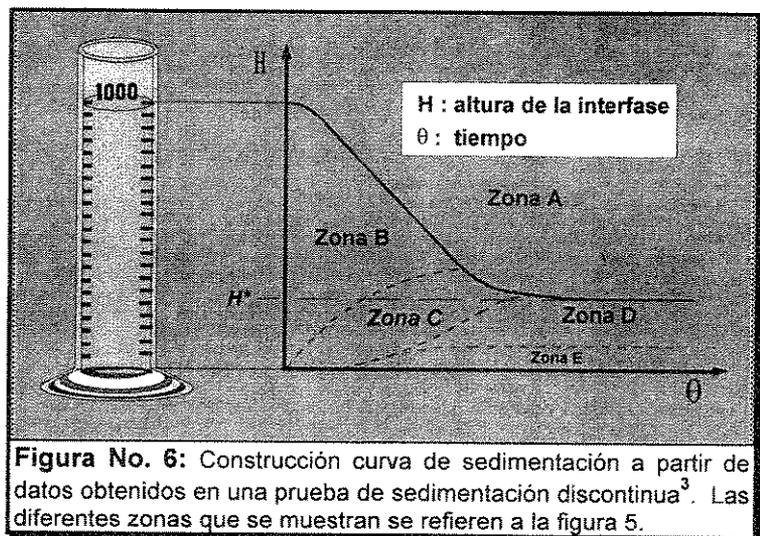


Figura No. 6: Construcción curva de sedimentación a partir de datos obtenidos en una prueba de sedimentación discontinua³. Las diferentes zonas que se muestran se refieren a la figura 5.

⁴ Ref. No. 2, pág. 674.

⁵ Ref. No. 1, pág. 78

- En la zona C, llamada con frecuencia zona de compresión, las partículas mantienen su posición horizontal relativa, pero gradualmente se acercan verticalmente unas a otras. Se ha encontrado que el movimiento en esta zona se describe satisfactoriamente mediante la ecuación 2:

$$-\frac{dH}{d\theta} = k(H - E) \quad (\text{Ecuación No. 2})$$

Donde: "H" es la altura de la interfase, "θ" es el tiempo, "k" es una constante característica de cada suspensión, y "E" es la altura de la fase a un tiempo infinito (ver figura 6).

- En la zona D, llamada zona de compactación, es el fluido el que se mueve a través del lecho de partículas sólidas, probablemente por difusión⁶. El movimiento es tan lento que generalmente esta zona no es de importancia industrial.

Para determinar el área de un tanque donde se ha de llevar a cabo un proceso de sedimentación específico, es necesario conocer el comportamiento de la velocidad de sedimentación de la suspensión ($dH/d\theta$) con respecto su concentración. Este comportamiento es característico de cada tipo de suspensión, sin importar (en teoría) el tipo de recipiente en el que se lleve a cabo la prueba.

Según el método de Coe y Clevenger, para determinar el comportamiento de la velocidad de sedimentación al variar la concentración de la suspensión, es necesario realizar varias pruebas de sedimentación discontinua en recipientes graduados de un litro de capacidad, como mínimo. En cada prueba se utiliza una suspensión de diferente concentración y se determina la pendiente de la porción recta de cada curva de sedimentación (ver figura 6), ésta representa la velocidad de sedimentación correspondiente a la concentración inicial de la suspensión.

El método de cálculo desarrollado por Talmage y Fitch permite construir la curva velocidad-concentración a partir de los datos obtenidos en una única prueba de sedimentación discontinua como la de la figura 5⁷. La velocidad de sedimentación en un instante dado se define como la pendiente de una recta tangente a la curva de sedimentación en el instante en cuestión, y según el método de Talmage-Fitch, a partir de la extrapolación de esta recta hasta el tiempo cero es posible encontrar la concentración de una suspensión que puede ser asociada a la velocidad instantánea de sedimentación, siempre que se conozca la altura y la concentración de la suspensión al inicio de la prueba⁸:

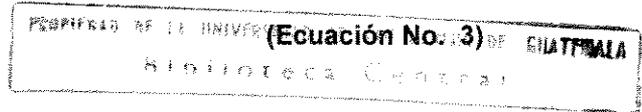
⁶ op. cit.

⁷ Ref. No. 2, pág. 676

⁸ Ref. No. 2, pág. 679; Ref. No. 1, pág. 77; Ref. No. 15, pág. 80; Ref. No. 14, pág. 91.

$$V_s := \frac{dH}{d\theta}$$

$$C_i := \frac{C_0 * Z_0}{Z_i}$$



(Ecuación No. 4)

en las ecuaciones 3 y 4, “ V_s ” es la velocidad de sedimentación, “ C_i ” es la concentración inicial de una suspensión que puede ser asociada con la velocidad de sedimentación en un instante dado (masa de sólidos/volumen de suspensión), cuando la interfase del líquido claro alcanza una altura “ Z_i ”; “ C_0 ” es la concentración de la suspensión al inicio de la prueba, y “ Z_0 ” es la altura de la suspensión al inicio de la prueba.

Una vez construida la curva velocidad-concentración, y a partir de un balance de materiales, se obtiene la siguiente fórmula para el cálculo del área del aparato⁹:

$$\frac{A}{LC_L} := \frac{\left(\frac{1}{C_i} - \frac{1}{C_F} \right)}{V_s}$$

(Ecuación No. 5)

donde “ A ” es el área necesaria para llevar a cabo la operación, “ L ” es el flujo inferior del aparato (volumen/tiempo), y “ C_F ” es la concentración que se desea alcanzar en el flujo inferior. Luego se determina el área necesaria para cada “ C_i ”, y el máximo valor encontrado se utiliza como valor de diseño del tanque de sedimentación. Para determinar las dimensiones de cada equipo se deben simular en el laboratorio las condiciones reales de operación, tales como agitadores, uso de agentes químicos, etc.

Para calcular la profundidad del tanque se requiere del uso de métodos empíricos. Uno de ellos consiste en llenar un cilindro de un litro de capacidad con una suspensión cuya concentración corresponda a la de la pulpa en el punto crítico. Cuando no es posible observar más asentamiento, se anota el tiempo y la concentración final (calculada mediante la ecuación 4). El tiempo observado se utiliza para la determinación del volumen mediante la fórmula¹⁰:

$$V_u := \frac{4t(G - Sp. Gr.)}{3G(S - Sp. Gr.)}$$

(Ecuación No. 6)

Donde “ V_u ” representa el volumen necesario para el espesamiento (pie³/tm-día), “ t ” es el tiempo observado, “ G ” es la gravedad específica de los sólidos suspendidos, “ S ” es la gravedad

⁹ Ref. No. 13, pág. 199; Ref. No. 1, pág. 78; Ref. No. 2, pág. 678.

¹⁰ Ref. No.1, pág. 79.

específica promedio de la suspensión, y "Sp. Gr." Es la gravedad específica del líquido portador de los sólidos.

Otra forma de calcular la profundidad del tanque consiste en escoger un valor para la altura y concentración del lodo espeso que se espera tener dentro de la unidad, y calcular la altura requerida en el tanque mediante una variación de la ecuación 4:

$$L_{\text{tot}} := \frac{L_{\text{esp}} C_F}{C_u} \quad (\text{Ecuación 4.a})$$

donde " L_{tot} " corresponde a la altura del tanque, " L_{esp} " representa la altura de lodo que se espera acumular en el fondo del tanque, con una concentración " C_u "; y " C_F " es la concentración real de la suspensión de la alimentación. El uso de las ecuaciones 3 y 4 para calcular la profundidad de un tanque de sedimentación requiere el uso de factores de cambio de escala del orden de 2.0 y mayores¹¹.

¹¹ op. cit.

1.1.2. Pulpas diluidas

Método del tubo largo

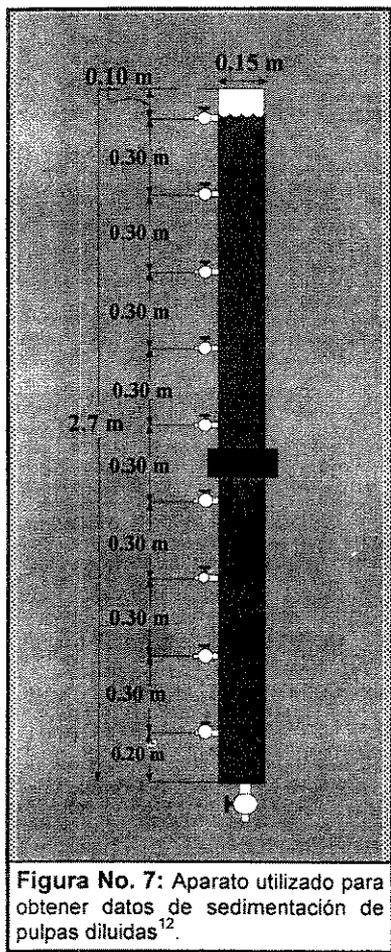


Figura No. 7: Aparato utilizado para obtener datos de sedimentación de pulpas diluidas¹².

Aunque algunos autores presentan métodos de cálculo a partir de datos obtenidos en pruebas de sedimentación discontinua en probetas de vidrio con pulpas diluidas, un método más confiable para obtener datos útiles en el diseño preliminar de equipos de sedimentación para pulpas diluidas lo constituye el realizar las pruebas en un *tubo largo* como el que se ilustra en la figura 7.

Primero, se acondiciona una cantidad suficiente de pulpa (0.05 m^3 aproximadamente) a la temperatura ambiente local, con el objeto de reducir posibles diferencias de temperatura que puedan originar corrientes de flujo en el interior del aparato.

Luego se llena el aparato con suficiente pulpa y se extrae una muestra de 100 a 200 ml de cada punto de muestreo (representados por las válvulas de la figura 7), para así definir el perfil de concentraciones al inicio de la prueba.

A intervalos regulares de tiempo se toma una muestra de 100 a 200 ml en cada toma, comenzando de la parte superior. El intervalo de tiempo para cada conjunto de muestras se escoge de modo que la solución clara sobrenadante tenga características similares a las que se desea obtener. Como una referencia se puede iniciar extrayendo cada conjunto de muestras cada media hora durante dos horas¹³.

Se deben tomar datos de posición, tiempo, volumen de la muestra y concentración de sólidos. El tiempo de detención es el tiempo total transcurrido desde que la solución se introduce al tubo hasta que se extrae la muestra. La profundidad de la toma se debe corregir debido al cambio de nivel de pulpa en el tubo al extraer las muestras. La velocidad de elevación es la profundidad corregida de una muestra dividida entre el tiempo de detención. Se

¹² Ref. No. 5, pp 167

¹³ Ref. No. 11, pág. 19-45

representa gráficamente el contenido de sólidos suspendidos en cada muestra contra la velocidad de elevación de la muestra, para diferentes tiempos de detención.

Para predecir la concentración real del flujo superior en un equipo real, a partir de datos de pruebas de tubo largo, se debe evaluar la integral¹⁴:

$$I = \frac{1}{U_{t_2}} \int_0^{C_2} U_t \, dc \quad (\text{Ecuación No. 7})$$

y restarse de la concentración encontrada para cada velocidad de elevación U_{t_2} , para un tiempo de detención dado. En la ecuación 7, " U_{t_2} " es la velocidad de elevación de la muestra en cuestión, " C_2 " es la concentración de sólidos de la misma muestra, y " U_t " es la expresión de la velocidad de elevación en función de la concentración " C ". La expresión gráfica que se construye de " U_t " en función de " C " se utiliza para evaluar la integral de la ecuación 7.

Una vez elegida la concentración real que se desea obtener, se encuentra la velocidad de elevación requerida, y se calcula el área necesaria para una aplicación real:

$$A = \frac{Q}{U_t} \quad (\text{Ecuación No. 8})$$

donde " A " es el área de sedimentación necesaria para lograr la clarificación de un flujo volumétrico de " Q " (volumen/tiempo), y " U_t " es la velocidad de elevación escogida a partir de los datos de las pruebas en un tubo largo.

1.2. Uso de agentes químicos

El objetivo principal del uso de agentes químicos es incrementar la velocidad de sedimentación de las partículas y disminuir el tamaño del equipo que se debe utilizar. Así pues, al realizar pruebas de sedimentación es necesario determinar el tipo y cantidad adecuada de sustancia a utilizar, los cuales dependen de cada aplicación específica.

¹⁴ Ref. No.11, pág. 19-45.

El uso de agentes químicos se justifica cuando se desea construir un nuevo sistema de tratamiento utilizando un espacio de planta limitado, o para incrementar la capacidad de un sistema ya existente.

Los principales productos químicos utilizados para incrementar la velocidad de sedimentación caen dentro de los dos siguientes grupos principales:

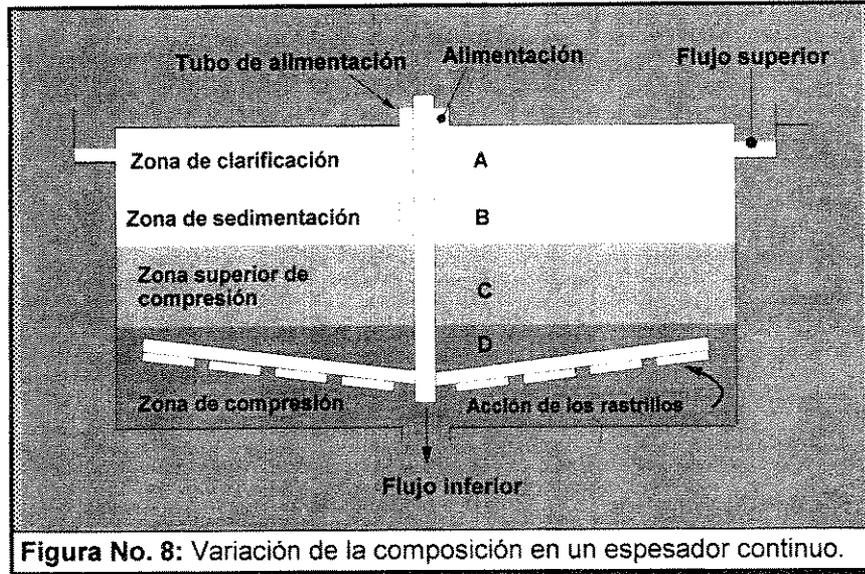
- Los coagulantes son sustancias electrolíticas que reducen la carga superficial (y la repulsión) de las partículas hasta un nivel que les permita aglomerarse formando coágulos cuya densidad es mayor a la de las partículas individuales¹⁵.
- Los floculantes son polímeros de alto peso molecular sobre cuya superficie se adhieren las partículas suspendidas, sin causar un cambio apreciable en la carga superficial de las partículas. El efecto es también la formación de flóculos o agregados de muchas partículas cuya densidad es mayor a la de las partículas individuales.

En todo caso de debe tomar en cuenta el posible efecto de la presencia de residuos de la sustancia utilizada en el agua que se recircula al circuito de lavado, corrosión, deposición o abrasión en las tuberías, equipos de bombeo, etc.

1.3 Aplicaciones en la industria de agregados: sedimentadores de alta velocidad

En la sedimentación discontinua, las condiciones y zonas de separación varían con el tiempo, mientras que en la sedimentación continua se establece un régimen permanente en que la posición de cada zona es constante con el tiempo. En un tanque de sedimentación continua la concentración del lodo varía desde aquella del líquido del rebalse (libre de sólidos) hasta la de la corriente inferior concentrada. Aunque la variación es continua, las concentraciones se pueden agrupar en las cuatro zonas que se muestran en la figura 8, en la que se muestra una unidad en la que la suspensión fresca entra por un tubo de alimentación central, el líquido claro rebalsa y se descarga por la periferia del tanque, y el lodo concentrado se descarga por la parte baja, hacia donde es conducido por la acción de los rastrillos.

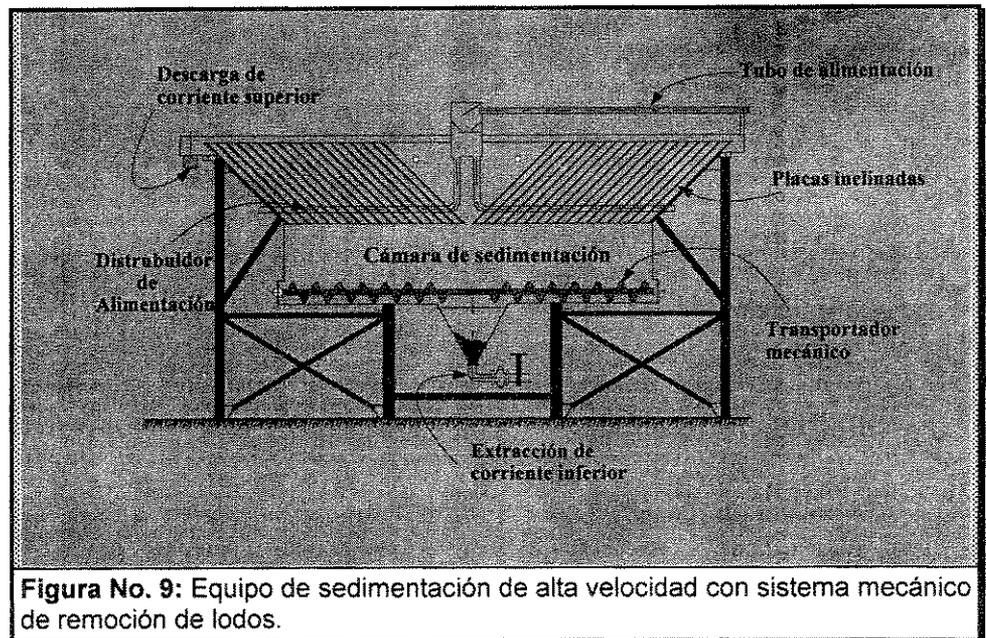
¹⁵ Ref. No. 3, pág. 45



El aparato de la figura 8 es una unidad sencilla, donde el área efectiva para la sedimentación es igual al área de planta del equipo. Actualmente se construyen unidades más complejas, que incluyen en su construcción ciertos dispositivos para incrementar el área efectiva de sedimentación utilizando la menor área de planta posible¹⁶.

Un dispositivo relativamente sencillo para incrementar el área de sedimentación consiste en colocar dentro del tanque de sedimentación una serie de placas paralelas con una inclinación de 30 a 60°.

En la figura 9 se muestra un *tanque de sedimentación de alta velocidad*, en el que es posible observar las siguientes partes, comunes a la mayoría de los



¹⁶ Ref. No. 3, pág. 42

equipos comerciales:

1. un tanque de clarificación,
2. dispositivos para aumentar el área de sedimentación (en este caso placas inclinadas),
3. un mecanismo para drenar o remover del fondo del tanque los sólidos sedimentados,
4. un sistema de rebalse para extraer el agua relativamente limpia y,
5. un mecanismo para dosificar agentes químicos que aceleren el proceso de sedimentación

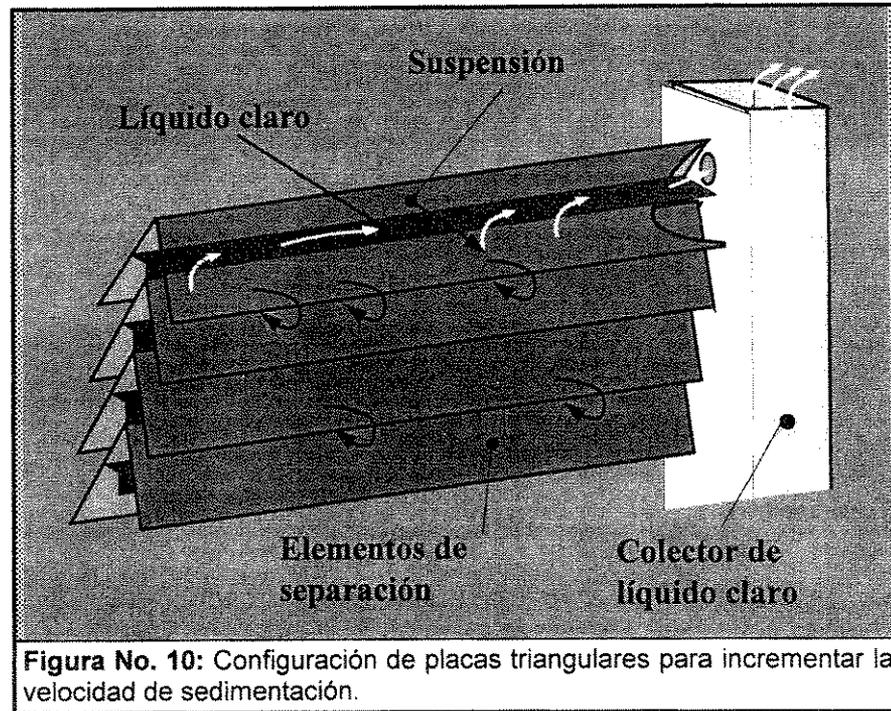
En un aparato como el que se muestra en la figura 12 la suspensión entra por un tubo de alimentación en la parte superior del tanque, donde ingresa a una caja que contiene un conjunto de deflectores, que realizan un efecto de mezcla en caso de que se utilicen agentes químicos para acelerar la sedimentación. Luego, el agua fluye hacia abajo por los canales de distribución, que atraviesan la parte baja de las placas inclinadas. La suspensión sube entre las placas mientras el material sólido sedimenta y resbala sobre las mismas, luego se deposita al fondo del aparato y es arrastrado por el transportador helicoidal hacia la tolva de lodos, de donde es bombeado hacia su disposición final.

Con un equipo como el de la figura 9 se espera obtener resultados similares a los que se obtendrían con un equipo de sedimentación convencional (figura 8) que tenga un área de 10 a 15 veces mayor¹⁷.

Otra configuración típica es la que utiliza placas en forma triangular, como el que se muestra en la figura 10, con los que se consigue un área de sedimentación 20 veces mayor al área de planta del aparato¹⁸. Otros equipos aprovechan al máximo los efectos de floculantes o coagulantes y eliminan cualquier disposición especial como planchas o placas para acelerar la sedimentación.

¹⁷ Ref. No. 3, pág. 42

¹⁸ Ref. No. 3, pág. 42



La alimentación típica de los aparatos de clarificación y espesamiento contiene de un 8% a un 12% de sólidos (200 a 600 ppm), de acuerdo al proceso que genera la suspensión de desecho. La descarga, normalmente, es un lodo de 45 a 50% de sólidos, pero mediante el uso adecuado de agentes químicos se alcanzan concentraciones hasta de 60% aproximadamente¹⁹.

¹⁹ Op. cit.

2. Operaciones de filtración

La filtración sólido-líquido cubre aquellos procesos donde un líquido que contiene sólidos suspendidos es separado de todo o parte del sólido cuando la suspensión se hace pasar a través de un medio poroso. El aparato en que se sostiene este medio se conoce como filtro¹.

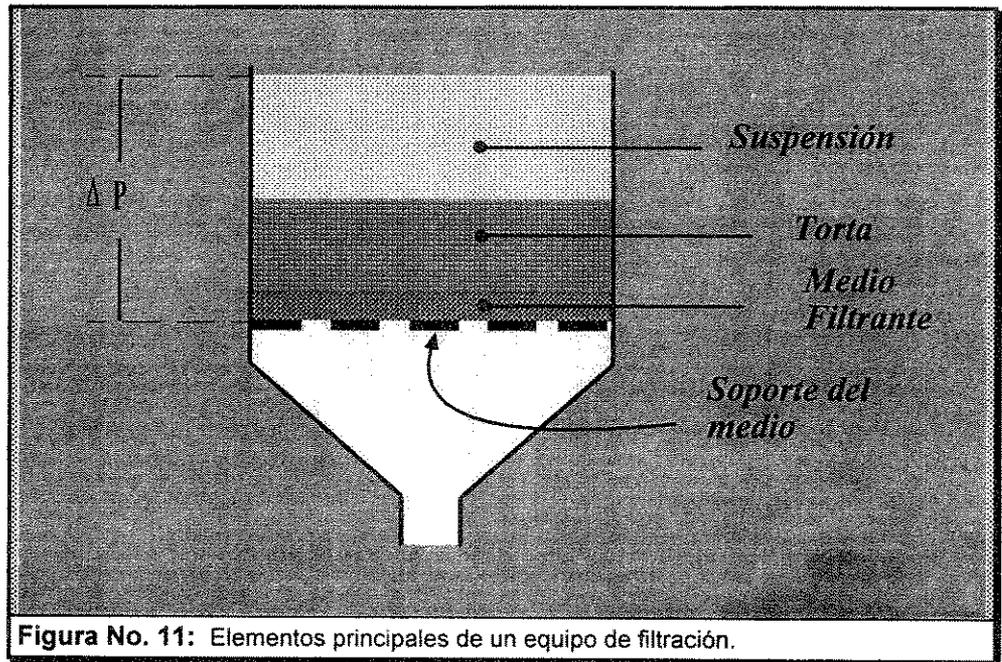


Figura No. 11: Elementos principales de un equipo de filtración.

En la figura 13 se muestra un diagrama simplificado de un equipo de filtración. El líquido libre de sólidos recibe el nombre de filtrado, mientras que el sólido recuperado se denomina torta. Durante la filtración los sólidos de la suspensión permanecen en el aparato y forman un lecho de partículas a través del cual tiene que fluir el filtrado impulsado por una diferencia de presión ΔP , la cual se provoca ya sea aplicando presión del lado de la suspensión o succión del lado del soporte del medio, para vencer las siguientes resistencias al flujo:

1. la resistencia de los canales o conducciones que llevan la suspensión hasta la torta ya formada y las que conducen el filtrado fuera del aparato, las cuales dependen del tipo de equipo utilizado;
2. la resistencia de la torta, y
3. la resistencia del medio filtrante.

En un filtro bien diseñado las resistencias de entrada y salida son pequeñas y pueden despreciarse en comparación con las resistencias de la torta y del medio filtrante.

¹ Ref. No. 7, pp 911.

Para una operación de filtración dada, el operador controla la caída global de presión debida a éstas tres resistencias. Cuando la caída de presión total (presión de entrada de la suspensión - presión de salida del filtrado) se mantiene constante, el flujo de filtrado es máximo al iniciar la filtración y disminuye continuamente hasta el final de la operación; este método se llama filtración a presión constante. El método de filtración a velocidad constante consiste en aumentar progresivamente la caída de presión para mantener constante el flujo de filtrado.

2.1. Clasificación del equipo de filtración

Existen diversas formas de clasificar el equipo y las operaciones de filtración, siendo las principales las siguientes²:

- 1. por la fuerza impulsora del flujo, la suspensión se hace pasar por el medio con la ayuda de:**
 - a) gravedad: cuando el flujo es impulsado por la carga hidrostática (peso) de la suspensión,
 - b) presión: cuando se aplica una presión mayor a la atmosférica sobre la corriente de alimentación para impulsar el flujo de filtrado;
 - c) vacío: aplicando una presión subatmosférica (vacío) a la corriente de descarga, para succionar el filtrado y hacerlo pasar a través del medio;

- 2. por el mecanismo de filtración**
 - a) filtración de torta: cuando se forma un lecho de partículas apreciable (torta), el cual presenta la mayor resistencia al flujo del filtrado,
 - b) filtración de medio filtrante: cuando la formación de torta no es apreciable, y la principal resistencia al flujo de filtrado lo representa el medio filtrante;

- 3. por la función que desempeñan, cuando el objetivo de la operación es recuperar:**
 - a) sólidos libres de líquido,
 - b) líquido libre de sólidos;

- 4. por el ciclo de operación**

² Ref. No. 11, pp19-57

- a) filtros continuos,
- b) filtros discontinuos;

5. por la naturaleza de los sólidos suspendidos

- a) formación de tortas compresibles,
- b) formación de tortas incompresibles,
- c) filtración de partículas rígidas,
- d) filtración de partículas deformables.

Los equipos de filtración pueden clasificarse entré más de un grupo de los mencionados. Así, los equipos se clasifican regularmente de acuerdo al orden expuesto: primero por la fuerza impulsora, luego por el mecanismo de filtración, etc.

2.2. Dimensionamiento preliminar de equipos de filtración

En el caso de filtros hidrostáticos y a presión, no existe un método general que pueda utilizarse para calcular las dimensiones del equipo a partir de pruebas de pequeña escala, de modo que resulta necesario realizar pruebas directamente en prototipos de cada aplicación específica³. Para la filtración al vacío, sin embargo, es posible realizar diferentes pruebas cuyos resultados pueden ser extrapolados para encontrar una aproximación de los requerimientos de filtración a presión⁴.

2.2.1. Pruebas de filtración al vacío

El aparato en el que se lleva a cabo las pruebas de filtración se denomina filtro de hojas y consiste en un disco circular de aproximadamente 10 cm. de diámetro, sobre el que se coloca el medio filtrante. El disco se conecta a una fuente de vacío, a través de un cilindro graduado en el que se colecta el filtrado.

³ Ref. No. 15, pág. 124

⁴ Ref. No. 11, pág.19-60

Las pruebas de hojas, se utilizan para predecir el rendimiento de filtros de disco o tambor giratorio, y se realizan tomando en cuenta el funcionamiento de esos equipos. El ciclo continuo más simple se divide en tres períodos: formación de torta, desecación y descarga⁵. El aparato se coloca dentro de un "beaker"

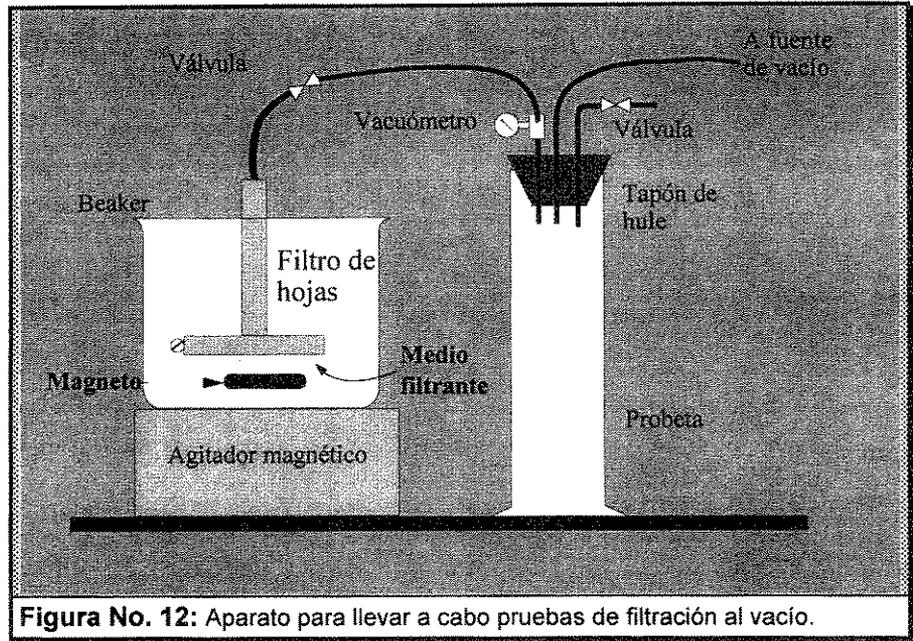


Figura No. 12: Aparato para llevar a cabo pruebas de filtración al vacío.

que contenga la suspensión a tratar y se mantiene sumergido durante un período igual al tiempo de formación de torta en el aparato real. Luego se retira del "beaker" y se mantiene fuera de la suspensión durante un tiempo igual al período de desecación en el aparato, finalmente se interrumpe la aplicación de vacío. La torta formada se retira del medio filtrante y se determina el contenido de sólidos y se calcula la cantidad de sólidos secos producidos. Se realiza un análisis de sólidos suspendidos en el filtrado para verificar los resultados mediante un balance de materiales. Se determina el área de la hoja utilizada como medio filtrante y se usa este valor para el cálculo del rendimiento, mediante la fórmula⁶:

$$R := \frac{P}{\theta_T \cdot A} \quad (\text{Ecuación No. 9})$$

donde "R" es el rendimiento de la filtración, "P" es la masa total de la torta producida, "A" es el área de la hoja, y " θ_T " es el tiempo del ciclo total de filtración (igual a la suma de los períodos de formación de torta, desecación y descarga).

El porcentaje de recuperación de sólidos es un indicador importante del desarrollo de las operaciones de filtración. Si "P" representa la masa total de torta producida con una concentración de sólidos " C_P ", y "F" representa la masa total de suspensión alimentada con una concentración de sólidos " C_F ", el porcentaje de recuperación se calcula como:

⁵ Op. cit; Ref. No. 15, pág. 105-108

⁶ Ref. No. 15, pág. 111

$$\%r := \frac{P \cdot CP}{F \cdot CF} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación No. 10})$$

Una gran ventaja de las pruebas de hoja es que se puede utilizar el mismo tipo de medio filtrante que se piensa utilizar en el equipo real⁷, proporcionando así una aproximación mayor a la operación en el campo.

2.3. Medios filtrantes

Una vez se ha escogido el tipo de filtro que se ha de utilizar, se debe elegir el medio de filtración más adecuado para llevar a cabo la operación. La selección adecuada del medio filtrante puede determinar el éxito o fracaso de una operación de filtración dada⁸.

Los medios filtrantes se fabrican de algodón, polímeros sintéticos, vidrio, asbesto, celulosa, metales, retazos, arenas y otras partículas capaces de formar un lecho poroso. Las fibras sintéticas son las más utilizadas en la fabricación de medios filtrantes, debido a su mayor resistencia mecánica y térmica.

Las principales características que debe cumplir un medio filtrante se resumen a continuación, y se deben tomar en cuenta al momento de seleccionar el medio más adecuado para llevar a cabo una operación específica⁹:

1. habilidad para retener los sólidos a través de sus poros,
2. no debe obstruirse fácilmente,
3. baja resistencia al flujo del filtrado,
4. alta resistencia química,
5. suficiente resistencia mecánica para soportar la presión de operación y el desgaste,
6. facilidad de descargar la torta,
7. facilidad de adecuarse al tipo de filtro a utilizar,
8. costo mínimo.

⁷ Op. cit.

⁸ Ref. No. 9, pág. 252

⁹ Ref. No. 11, pág. 19-71; Ref. No. 9, pág. 255 a257

2.4. Ayudas para la filtración

Las ayudas de filtración, o coadyuvantes de filtración, son materiales que sirven para mejorar la clarificación del filtrado o para incrementar la velocidad de filtración mediante medios físicos. Idealmente los coadyuvantes de filtración forman una superficie extremadamente fina que retiene los sólidos de la suspensión¹⁰. Las partículas de una buena ayuda para la filtración deben ser de baja densidad para minimizar su tendencia al asentamiento, deben ser porosas y capaces de formar una torta, y deben ser químicamente inertes e insolubles en el filtrado¹¹. Los principales coadyuvantes de filtración que se utilizan con frecuencia son la diatomita (mineral de alto contenido de sílice) y partículas de celulosa y asbesto¹².

Las ayudas para la filtración se utilizan de dos formas. La primera es como prerecubrimiento para proteger el medio filtrante y evitar el escape de partículas pequeñas al interior del filtrado. En este caso se aplica una capa delgada, aproximadamente 0.1 lb de coadyuvante por pie cuadrado de área filtrante. La segunda aplicación consiste en mezclar el coadyuvante con la suspensión aún no filtrada, en cuyo caso es necesario determinar por prueba y error la cantidad adecuada de coadyuvante por unidad de volumen de suspensión. Como punto inicial de las pruebas, resulta conveniente doblar o triplicar la concentración de sólidos en la suspensión de alimentación¹³.

¹⁰ Ref. No. 14, pág. 193.

¹¹ Ref. No. 11, pág. 19-73.

¹² Op. cit.

¹³ Op. cit.

2.5. Aplicaciones en la industria de agregados: filtros prensa de bandas

Aunque mediante el uso adecuado de agentes químicos es posible obtener, en ocasiones, un producto manejable en el flujo inferior del sistema de sedimentación, en la industria de agregados la mayor parte de sistemas de tratamiento de agua de lavado incluyen equipos de filtración para el tratamiento final de la suspensión concentrada¹, sobre todo a medida que aumenta la capacidad del sistema de tratamiento.

El equipo más utilizado actualmente en la industria de agregados para el tratamiento final de los desechos es el filtro prensa de bandas², el cual se representa esquemáticamente en la figura 13.

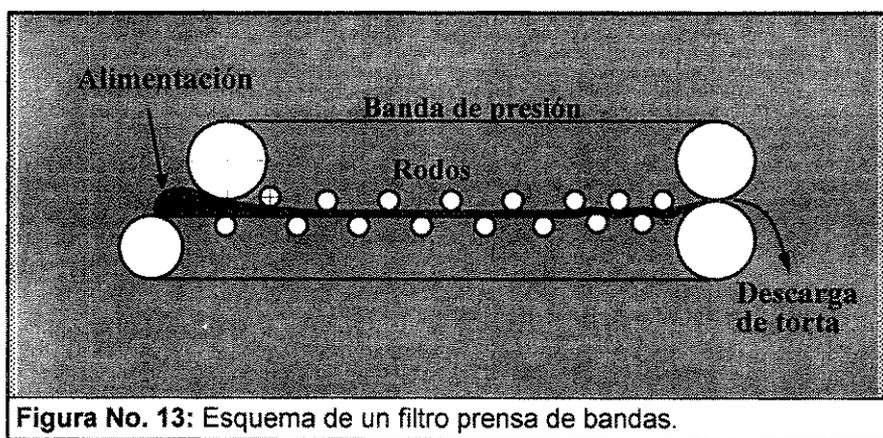


Figura No. 13: Esquema de un filtro prensa de bandas.

En un filtro de bandas la eliminación de agua se realiza por una combinación de exprimido³ y filtración. La diferencia en estas dos operaciones consiste en que en el exprimido se aplica presión mediante el movimiento de las paredes del aparato, lo

que provoca que el líquido abandone el sólido (algunas veces sin utilizar medios porosos); por otra parte, en la filtración el material se hace pasar a través de una pared fija. En algunas aplicaciones, el exprimido compite con el secado, ya que por lo común la extracción mecánica del agua resulta más barata que cualquier método térmico⁴.

Aunque algunos autores estudian las operaciones de filtración y exprimido por separado, es posible considerar esta última como una simple variación de la filtración⁵

Un filtro prensa de bandas consiste básicamente en dos bandas porosas que se mueven una sobre otra entre rodillos dispuestos de forma tal que se aplique cierta presión entre las

¹ Ref. No. 3, pág. 42.

² Op. cit.; Ref. No. 4, pág. 33.

³ Ref. No. 11, pág. 9-101 a 19-104; Ref. No. 4, pág. 33.

⁴ Ref. No. 11, pp 19-101

⁵ Op. cit.; Ref. No. 19, pág. 427; Ref. No. 15, pág. 155, 156.

mismas. La eliminación de agua se lleva a cabo a medida que las bandas y el material son exprimidos sobre los rodos debido a la tensión que se mantiene en las bandas. El líquido sale a través de las bandas, que representan el medio filtrante, y se colecta en la parte inferior del aparato.

La eliminación de agua en un filtro de bandas toma lugar en dos etapas⁶:

1. la zona de drenaje por gravedad
2. la zona de presión.

La zona de drenaje por gravedad comienza al momento de alimentar el material sobre la banda inferior y finaliza al momento en que la banda superior hace contacto con el material. En esta etapa se espera que el exceso de agua (si existe) pase a través de la banda y se inicie la formación de torta. Frecuentemente es necesario contar con un mecanismo que disperse el lodo a lo ancho de la banda inferior. Para prevenir derrames en la zona de presión, el material se distribuye por el 80% del ancho de la banda, dejando un 10% libre a cada lado de la misma⁷.

La zona de presión se divide en dos partes:

1. la zona de presión ascendente y
2. la zona de presión constante.

En la zona de aumento de presión las bandas superior e inferior convergen gradualmente, para luego pasar por una serie de rodos que le dan un patrón de movimiento en forma de "S". Cada rodo en la zona de presión ascendente tiene el diámetro menor al del rodo anterior, de modo que la presión a que es sometido el material aumenta sin aumentar la tensión en las bandas⁸.

Finalmente, las bandas pasan por un grupo de rodos de igual diámetro, los cuales forman parte de la zona de presión constante, que finaliza cuando las bandas se separan una de la otra. ⁹Una vez separadas las bandas, unas paletas se encargan de separar la torta, dejándola caer fuera del filtro, dentro de un recipiente o transportador adecuado.

Comúnmente un filtro de bandas incluye un sistema de rociado de agua para lavar las bandas después de cada ciclo de operación.

⁶ Ref. No. 17.

⁷ Ref. No. 20.

⁸ Ref. No. 17.

⁹ Ref. No. 17.

En todo caso, se requiere de un sistema de acondicionamiento químico del lodo antes de ser alimentado al filtro de bandas, donde se pueda asegurar una mezcla rápida y efectiva del material con un agente químico adecuado, para proporcionar un mayor espesamiento en la zona de drenaje por gravedad¹⁰.

Las bandas filtrantes para los filtros prensa de bandas se fabrican de poliéster monofilamento, de materiales resistentes a la abrasión o de una combinación de poliéster y acero inoxidable. La porosidad del medio se debe seleccionar para cada aplicación específica¹¹.

La alimentación al filtro de bandas en la industria de agregados contiene típicamente un contenido de sólidos mayor a 40% en peso, dependiendo del comportamiento del material en la etapa de clarificación/espesamiento¹². De cualquier forma, se espera que el uso adecuado de agentes químicos en un filtro de bandas dé como resultado la obtención de un material completamente manejable, que pueda transportarse fuera de la planta.

¹⁰ Ref. No. 20.

¹¹ Ref. No. 17.

¹² Ref. No. 3, pág. 32.

**SEGUNDA PARTE: PROBLEMA PRESENTADO POR
UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE AGREGADOS
MINERALES**

3. Concepción y definición del proyecto

3.1. Comprensión del proceso

Se estudia el caso de una planta de manufactura de agregados minerales, donde se utiliza cerca de 140 m³ de agua por hora para la remoción hidráulica de los finos del pedrín y la arena que se produce. Se pretende recuperar el material sólido que se pierde debido a la operación deficiente del sistema de tratamiento de agua. Actualmente se desarrollan diversos proyectos encaminados a la búsqueda de aplicaciones comerciales para dicho material; sin embargo, no ha sido posible recuperar un material sólido manejable, por lo que no se ha desarrollado pruebas a escala comercial para respaldar dichos proyectos.

En el apéndice G.1 se muestra un diagrama de flujo del sistema de trituración, el cual utiliza agua para ayudar a la separación por tamaños en los tamices vibratorios y luego en un clasificador hidráulico. El lodo efluente del equipo de clasificación hidráulica se conduce hacia un sistema de tratamiento de agua, del cual retornan aproximadamente 115 m³/h (500 gpm) de agua al circuito de lavado. El sistema de tratamiento se construyó para manejar un caudal normal de 340 m³/h (1500 gpm). En el apéndice G.3 se muestra la planta de las instalaciones del sistema de tratamiento de agua.

El tratamiento se lleva a cabo de acuerdo a las siguientes etapas¹ (ver apéndice G.3):

3.1.1. Desarenadores

El agua sucia proveniente del separador hidráulico ingresa a la planta a través de canales abiertos. Debido a que el material arenoso podría obstruir las tuberías de descarga de los equipos de sedimentación, se construyeron 4 tanques de separación para eliminar las arenillas de la suspensión (partículas relativamente mayores, que sedimentan con una velocidad mayor que el resto del material en suspensión) antes de que ésta pase a su tratamiento. Los desarenadores se diseñaron para que tres de ellos tengan capacidad para tratar el caudal

¹ Ref. No. 10.

normal mientras uno de ellos se limpia manualmente extrayendo la arena del fondo con la ayuda de palas².

Los desarenadores consisten en tanques de sedimentación de alta velocidad que utilizan un banco de placas inclinadas como mecanismo para incrementar el área efectiva de sedimentación; una válvula de drenaje permite la remoción hidráulica del material depositado al fondo de los tanques.

3.1.2. Mezcla rápida y floculadores

Al salir de los desarenadores, el agua pasa por un canal de mezcla rápida donde se dosifica los agentes químicos que se desee utilizar para aumentar la velocidad de sedimentación. De esta unidad el agua pasa a cualquiera de dos floculadores hidráulicos, donde la floculación de las partículas se lleva a cabo al pasar el agua entre un grupo de pantallas que describen una ruta en vaivén.

3.1.3. Sedimentadores

Después de lograr la floculación de las partículas sólidas, el agua pasa a cualquiera de cuatro sedimentadores de alta velocidad, entra por la parte superior, se dirige hacia el fondo, asciende nuevamente por los espacios entre las placas inclinadas y se recolecta en canaletas en su parte superior. El material en suspensión se desliza por las placas hasta tres tolvas de recolección en la parte inferior, de donde se extrae hidráulicamente por medio de válvulas de descarga.

A diferencia de los desarenadores, los tanques sedimentadores se diseñaron para eliminar el material fino suspendido en el agua, el cual presenta una velocidad de sedimentación menor a las arenillas, por lo que tanto el área y el tiempo de residencia en los sedimentadores es mayor que en los desarenadores.

Todas las unidades se conectan por medio de canales abiertos que permiten el paso de una unidad a otra, además de un canal lateral que permite conectar directamente los desarenadores y los sedimentadores, para así dejar a los floculadores fuera de operación.

² Ref. No. 10.

3.1.4. Tratamiento de lodos

Como parte del sistema de tratamiento se cuenta con un filtro prensa de bandas de 2.0 m de ancho, el cual se adquirió para eliminar el exceso de agua del flujo inferior de los sedimentadores. Se cuenta también con un tanque de floculación de 0.45 m^3 (120 gal) donde el agente floculante debe actuar sobre el lodo que se desea tratar, antes de que éste sea alimentado al filtro de bandas.

Existe también un tanque agitado de 2.27 m^3 (600 gal) para la preparación de la solución de floculante. Por medio de un sistema de tuberías es posible dosificar la solución preparada sobre la corriente de lodo que se dirige hacia el filtro prensa de bandas.

3.2. Deficiencias del sistema

Se considera aceptable la calidad del agua que se retorna del sistema de tratamiento hacia la planta trituradora; sin embargo, no ha sido posible recuperar el material sólido en forma manejable, sino aún como un lodo concentrado. Se realizaron diversas visitas al sistema de tratamiento de agua, y se verificó la forma en que se lleva a cabo la operación del mismo. Se determinó que el proceso presenta las siguientes deficiencias:

3.2.1. Operación de los desarenadores

Al analizar la forma en que los sedimentos se extraen del tanque se pudo notar que el material arenoso sedimenta hasta el fondo y se compacta, por lo que no es posible la extracción hidráulica controlada mediante la válvula de drenaje inferior. Para realizar la limpieza de los tanques se hace necesario utilizar agua a presión para remover el material que se compacta firmemente sobre el fondo. Esta forma de remoción de los sólidos depositados provoca una pérdida aproximada de 70 m³ de material sólido al día (ver cálculo en apéndice D.2).

La elevada densidad del material que permanece en suspensión (limos) provoca que el mismo tenga una alta velocidad de sedimentación. Ésto es aprovechado por los operadores, de modo que al realizar la limpieza de los tanques una vez al día, la mayor parte del material suspendido (no solamente la arena) se remueve en los desarenadores.

3.2.2. Operación de los floculadores

Debido a la alta velocidad de sedimentación del material y relativamente bajo caudal de agua a tratar, el uso de floculantes no resulta necesario, y los floculadores hidráulicos permanecen fuera de operación. El flujo superior de los desarenadores pasa directamente a los sedimentadores.

3.2.3. Operación de los sedimentadores

Puesto que la mayor parte del material suspendido se elimina en los desarenadores, los sedimentadores operan con un mínimo de control. La limpieza de los mismos se realiza cada tres semanas y, normalmente, el flujo superior no presenta inconveniente para ser recirculada al circuito de lavado de la planta trituradora.

3.2.4. Operación del filtro de bandas

En el pasado se han llevado a cabo diferentes tipos de pruebas con el objeto de poner en funcionamiento el equipo de filtración con que se cuenta. Según estas pruebas, las bandas filtrantes no son capaces de retener el material más fino, dando un filtrado aún turbio. De hecho, se ha observado que el material correspondiente al flujo inferior de los sedimentadores atraviesa las bandas (medio filtrante) sin que sea retenido el material sólido, de modo que la calidad del filtrado prácticamente es igual a la calidad de la alimentación y no es posible recuperar el sólido como una torta manejable. No se ha utilizado ningún agente floculante en el desarrollo de las pruebas mencionadas. El filtro nunca ha entrado formalmente en operación.

3.3. Enunciado del problema

Luego de analizar la información disponible, se determinó que es necesario resolver los problemas siguientes:

3.3.1. Manejo de sólidos

El material depositado al fondo de los desarenadores se separa eficientemente del agua, formando un lecho de sólidos húmedos cubierto por una capa de líquido turbio. El problema es entonces extraer los sólidos del interior de los desarenadores sin utilizar agua a presión para remover el material.

3.3.2. Separación sólido-líquido

Por otra parte, el material fino (limoso) se deposita en los sedimentadores en forma de un lodo concentrado (aproximadamente 50% en peso; ver apéndice B, tabla No. 6), el cual es posible remover hidráulicamente mediante las válvulas de descarga de los sedimentadores. En este caso es necesario aplicar los principios de las separaciones sólido líquido, para recuperar el material sólido en forma manejable, y recircular el agua separada al circuito de lavado.

3.4. Análisis del problema

En la tabla 1 se muestran los principales aspectos que se tomaron en cuenta al analizar el problema de recuperación del material suspendido en el agua de lavado de agregados minerales en la planta "La Pedrera".

Tabla No. 1	
Variables que se deben tomar en cuenta para la recuperación del material sólido del agua de lavado de agregados minerales en la planta "La Pedrera".	
PROYECTO Recuperación de subproductos de la producción de agregados minerales. :	
VARIABLES DE ENTRADA	LÍMITES DE LAS VARIABLES DE ENTRADA
1. Tamaño de partícula	<ul style="list-style-type: none"> • Desarenadores (ver apéndice E, tabla 13): 80% < 1.18 mm • Sedimentadores (ver apéndice E, tabla 14) 80% < 15 µm
2. Composición química	<ul style="list-style-type: none"> • Desarenadores: de acuerdo a la composición química de la piedra triturada. • Sedimentadores: ver apéndice F, tabla 15)
3. Comportamiento al sedimentar (cualitativo)	<ul style="list-style-type: none"> • Desarenadores: sólido húmedo, compacto • Sedimentadores: suspensión líquida
VARIABLES DE SALIDA	LÍMITES DE LAS VARIABLES DE SALIDA
1. Condiciones del material desechado:	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere un material suficientemente libre de agua para ser trasladado al lugar que se disponga para ello.
VARIABLES DE SOLUCIÓN	RESTRICCIONES
<ol style="list-style-type: none"> 1. Se cuenta con un filtro prensa de bandas. 2. Se cuenta con un sistema de preparación y dosificación de agentes floculantes. 	
CRITERIOS DE DISEÑO	VOLUMEN DE PRODUCCIÓN
1. Debido a la diferencia marcada entre los desechos de los sedimentadores y los desarenadores, éstos deben recuperarse por separado.	<ul style="list-style-type: none"> • Aproximadamente 70 m³/día de material removido de los desarenadores. • Aproximadamente 150 m³/día de material removido de los sedimentadores (ver apéndice D.2 y D.4)
NIVEL DE USO	
1. Como punto inicial se considera que es posible disponer de 5 horas/turno para el tratamiento del flujo inferior de los desarenadores y sedimentadores.	

3.5. Acciones correctivas

Para solucionar cada uno de los problemas definidos en la sección 3.3 fue necesario desarrollar las siguientes actividades:

1. Seleccionar el sistema de transporte de sólidos que resulte más adecuado para la extracción del material depositado al fondo de los desarenadores.
2. Determinar las condiciones que se requieren para que el filtro prensa de bandas pueda ser utilizado en la recuperación del material sólido contenido en el flujo inferior de los sedimentadores.

4. Resultados y discusión

4.1. Remoción mecánica de arena

Al analizar las condiciones a las que deberá operar el sistema de transporte de sólidos al extraer el material del fondo de los desarenadores, se determinó que el transportador de flujo continuo es el que resulta más adecuado para este tipo de aplicación (ver apéndice A). En la figura 14 se muestra un esquema de la forma de operación de los transportadores de flujo continuo¹.

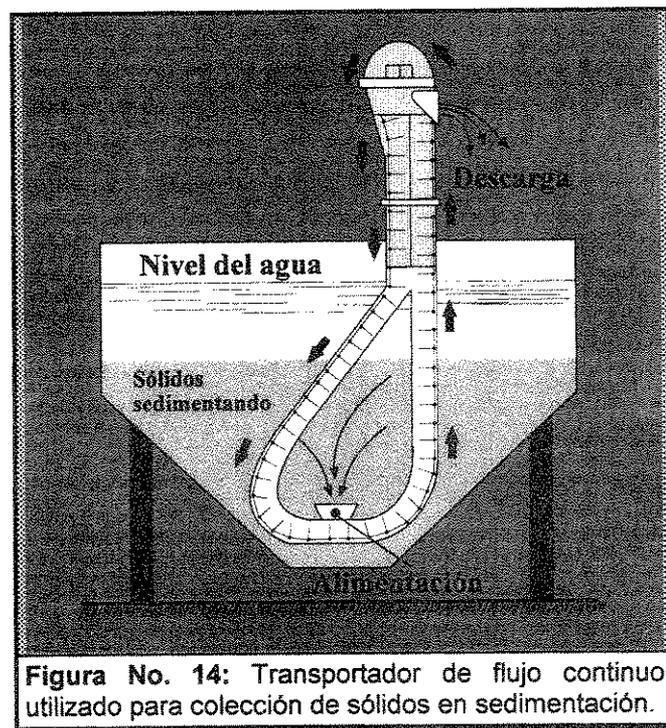


Figura No. 14: Transportador de flujo continuo utilizado para colección de sólidos en sedimentación.

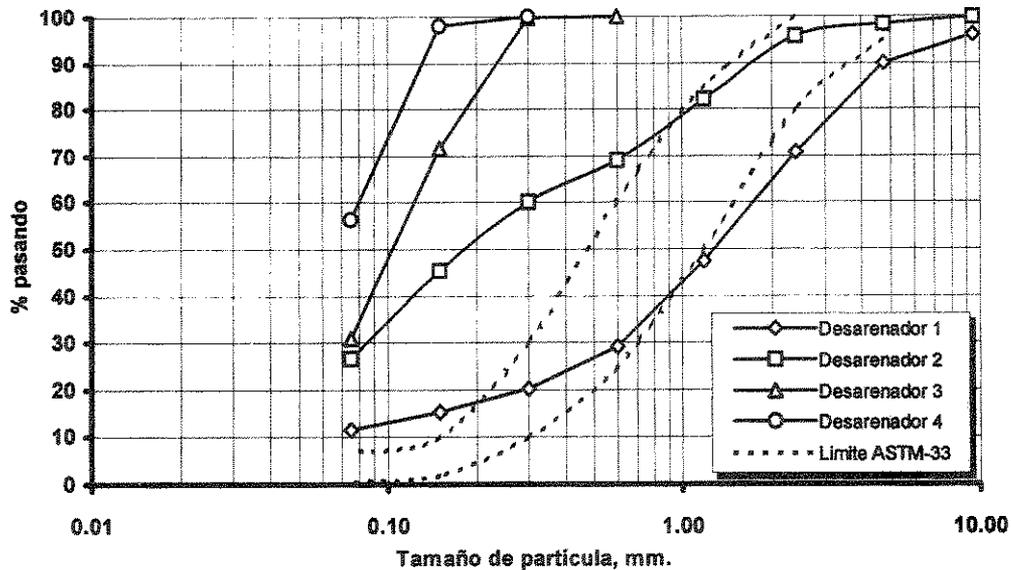
Se estima que actualmente se debe extraer de los desarenadores un volumen de arenillas de $70 \text{ m}^3/\text{día}$ (ver cálculo en apéndice D.2), aproximadamente, para lo cual será necesario instalar dos transportadores de flujo continuo de un tamaño nominal de $3" \times 5"$ (ver apéndice H). Éstos deberán operar, normalmente, cerca de 3 h al día, a una velocidad lineal de $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$ ($70 \text{ pie}/\text{min}$, ver cálculo en apéndice D.3).

En la gráfica 1 se muestra un ejemplo de la granulometría del material que normalmente se deposita al fondo de cada uno de los tanques desarenadores, así como los límites

¹ Ref. No. 11, pág. 7-16.

granulométricos que establece la norma ASTM-33 para agregados finos (arena) utilizados en la industria de la construcción².

GRÁFICA No. 1
Distribución de tamaño de partícula del material depositado
al fondo de los desarenadores



Al tomar en cuenta el aumento de capacidad de la planta trituradora (tres veces mayor a capacidad actual), se estima que el material a remover del fondo de los desarenadores será aproximadamente de 200 m³/día, para lo cual será necesario que cada uno de los transportadores operen cerca de 9 horas al día, a una velocidad lineal de 35 m³/s (70 pie/min). Una vez recuperado, este material representa un subproducto del proceso que consistirá básicamente en polvo fino de piedra caliza, con una distribución de tamaño de partícula del mismo orden de magnitud a las distribuciones que se muestran en la gráfica 1.

Según estudios realizados por LBEIN en España³ se ha llegado a encontrar como admisible hasta un 15% de finos (tamaño menor a 0.074 mm) en la arena caliza, siempre que se controle la cantidad de material arcilloso presente. El material que se deposita en los desarenadores es básicamente el polvo de la fractura de la piedra, prácticamente libre de arcillas, por lo que resulta conveniente evaluar la influencia que los mismos tienen sobre las propiedades de la arena producida.

² Ref. No. 16.

³ Ref. No. 12, pág. 5.

Si se demuestra que el material fino recuperado no produce efectos adversos sobre la calidad de la arena caliza que se produce, el mismo podrá venderse junto con la arena producida. De ésta manera se incrementaría la producción de arena en un 12% aproximadamente, cantidad que hasta la fecha se considera como una pérdida normal del proceso.

En caso de que el material recuperado con la ayuda de los transportadores de flujo continuo afecte de manera adversa la calidad de la arena producida, será necesario evaluar diferentes aplicaciones para dicho material.

4.2. Manejo de lodos

Se realizó una serie de pruebas utilizando el filtro prensa de bandas, y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla No. 2: Resultados obtenidos en las pruebas efectuadas con el filtro de bandas.

Capacidad actual de manejo de lodo:	14 m ³ /h.
Capacidad máxima de manejo de lodo:	40 m ³ /h.
Dosis requerida de floculante:	50 g/m ³ de lodo
Humedad del material producido:	30%

Como agente floculante se utilizó un polímero orgánico de alto peso molecular (distribuido comercialmente con el nombre de Alkemy 5600) , dosificado como solución de concentración 1 g/l.

De acuerdo a los datos de la tabla 2 y los cálculos efectuados en los apéndices D.5 y D.6 , para lograr la recuperación total del material fino suspendido en el flujo inferior de los sedimentadores el filtro de bandas debe operar durante 4 horas por turno, utilizando cerca de 16 libras de polímero al día (2.5 m³ de solución de concentración 3 g/l). Sin embargo, al incrementar la capacidad de la planta trituradora (y la cantidad de lodo a tratar), será necesario incrementar la concentración del flujo inferior de los sedimentadores con la ayuda de un tanque espesador y el uso adecuado de floculantes. Se recomienda que el tanque tenga la capacidad de manejar el volúmenes de lodos que se producirá en un turno, al incrementar la capacidad de la planta trituradora, es decir, 160 m³. El objetivo del espesamiento es tanto reducir el volumen

de lodo a tratar por el filtro de bandas, como incrementar la capacidad del mismo. Según datos proporcionados por el fabricante del equipo⁴ la cantidad máxima de material que es posible tratar con el filtro de bandas es aproximadamente 40 m³ de lodo por hora (ver apéndice E).

Durante el desarrollo de las pruebas se encontró que es necesario realizar una serie de ajustes menores al equipo de filtración con el objeto de eliminar fugas, derrames, etc. Asimismo, es conveniente contar con un medio adecuado para controlar el flujo de alimentación al filtro.

De cualquier forma, se considera que el filtro de bandas constituye un medio efectivo para la recuperación del material suspendido en el flujo inferior de los sedimentadores, aunque para su uso formal será necesario realizar las siguientes modificaciones al sistema de tratamiento:

4.2.1. Tanque de reserva y concentración

Será necesario conducir el lodo espesado por los sedimentadores hacia un tanque de 200 m³ (cantidad de lodo acumulado diariamente en los sedimentadores afectado por un factor de seguridad de 1.25), del cual se podrá descargar diariamente el material al filtro de bandas mediante una válvula que deberá situarse lo más cerca al filtro como sea posible. Al incrementar la capacidad de la planta trituradora será necesario descargar los sedimentadores una vez por turno. Se considera necesaria la construcción de este tanque ya que no es posible dosificar adecuadamente la alimentación al filtro de bandas debido a la distancia que existe entre las válvulas de descarga de los sedimentadores y el tanque floculador que forma parte del sistema de filtración⁵.

Es necesario que la válvula de descarga del tanque se encuentre lo más cerca posible a las instalaciones del filtro de banda, para así permitir que el operador tenga control sobre la alimentación al mismo.

⁴ Ref. No. 20.

⁵ Ver apéndice G.2.

4.2.2. Sistema de inyección de polímero

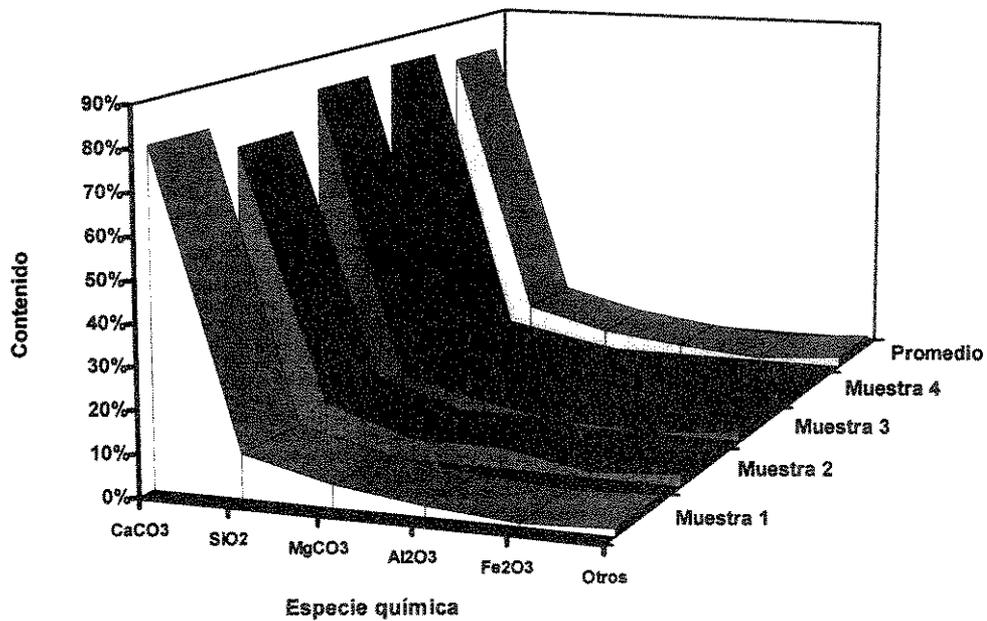
Debido a que el tanque floculador no ha sido diseñado como un tanque de mezcla de polímeros, la inyección del agente floculante debe realizarse a una distancia de 10 a 20 veces el diámetro de la tubería de alimentación aguas arriba del tanque floculador⁶.

El sistema de tratamiento cuenta actualmente con un tanque agitado de 2.5 m³ (600 gal), el cual puede descargar (por medio del sistema de tubería instalado) ya sea a 5 m aguas arriba del tanque floculador o directamente sobre la boca de alimentación de este último. Al realizar diversas pruebas con el filtro prensa de bandas se utilizó este tanque para la preparación y dosificación del polímero, y se considera que podrá utilizarse formalmente siempre que se adquiriera un sistema de medida de flujo que permita tener control sobre la cantidad de floculante que se inyecta a la corriente de lodo.

De acuerdo los cálculos efectuados según el apéndice D.4, con la cantidad actual de sólidos suspendidos en el agua de lavado, y una vez que se realicen los cambios pertinentes al sistema de tratamiento, será posible recuperar aproximadamente 175 tm/día de material con un contenido aproximado de 70% de sólidos (ver apéndices C y D.4), el cual se podrá transportar con la ayuda de un cargador frontal y un camión de volteo hacia el lugar que se disponga para su procesamiento final, dentro o fuera de la planta. En el apéndice G.3 se muestra un diagrama de flujo del proceso de recuperación de desechos. En todo caso, la disposición final del material recuperado se determinará a medida que progresen los proyectos que se llevan a cabo para encontrar una aplicación industrial del material en cuestión.

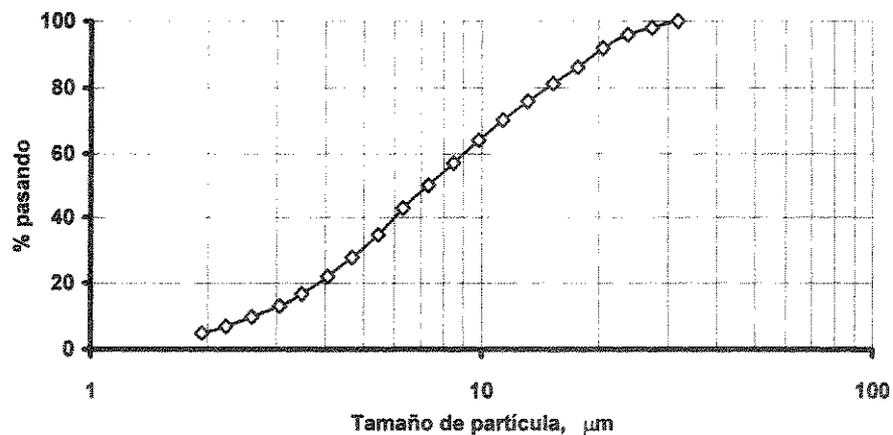
⁶ Ref. No. 20.

GRÁFICA No. 2:
Análisis químico del material recuperado por el filtro de bandas

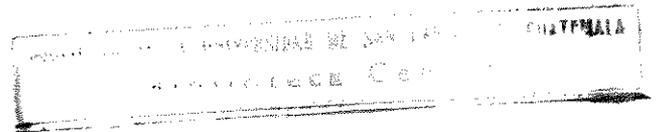


En la gráfica 2 se muestran los resultados del análisis químico del material sólido contenido en el flujo inferior de los sedimentadores, y en la gráfica 3 aparece un ejemplo de la distribución de tamaño de partícula del mismo material el cual corresponde al material que se recuperará con la ayuda del filtro prensa de bandas, que consistirá básicamente de polvo de piedra caliza de un tamaño menor a 40 µm.

GRÁFICA No. 3
Distribución de tamaño de partícula del material contenido en el flujo inferior de los sedimentadores



Los datos de las gráficas 2 y 3 (y apéndice H) pueden resultar de utilidad en el desarrollo de los diversos proyectos que se encaminen a comercializar este producto.



Conclusiones

1. Debido a la diferencia en las características de los materiales que se depositan al fondo de los tanques desarenadores y de los sedimentadores, es necesario recuperarlos por separado.
2. El material depositado al fondo de los desarenadores se debe recuperar mediante un sistema adecuado de transporte de sólidos, a razón de 70 m³/día.
3. Es posible recuperar el material depositado al fondo de los sedimentadores por medio del filtro prensa de bandas con que se cuenta actualmente, a razón de 176 m³/día y con un contenido de humedad de 30%, aproximadamente.

Recomendaciones

Para la recuperación del material depositado al fondo de los sedimentadores se recomienda:

1. Llevar a cabo la eliminación de arenillas del agua de lavado en los dos primeros desarenadores, permaneciendo los dos restantes fuera de operación.
2. Instalar dos transportadores de flujo continuo de 3" x 5" de tamaño nominal (cubierta), uno dentro de cada uno de los dos tanques que se utilicen según el inciso 1.
3. Será necesario habilitar espacio de planta para apilar dicho material, e instalar un sistema de transporte que conduzca el material desde los desarenadores hasta este espacio.

Para la recuperación del material fino (limo) se recomienda:

1. Llevar a cabo la eliminación del material fino del agua de lavado en los sedimentadores (no en los desarenadores).
2. El flujo inferior de los sedimentadores se debe tratar con la ayuda del filtro de bandas, utilizando para ello una cantidad adecuada de floculante. Si se continúa utilizando el polímero Alkemy 5600 la dosis adecuada es de 50 gramos de floculante por cada metro cúbico de alimentación al filtro.
3. La solución de polímero se podrá llevar a cabo en el tanque de 2.5 m³ (600 gal) con que se cuenta actualmente.
4. Para poder utilizar el filtro de bandas en la recuperación del material fino, es necesario realizar las siguientes modificaciones al sistema actual:
 - a) Construir un tanque de 200 m³ donde se descarguen la porción de lodo concentrada de los sedimentadores, previo a ser alimentada al filtro de bandas.
 - b) Será necesario que el flujo de alimentación al filtro sea controlado mediante una válvula situada lo más cerca posible al tanque floculador del filtro de bandas.
 - c) Para tener control sobre la cantidad de floculante que se inyecta a la corriente de alimentación del filtro de bandas será necesario adquirir un mecanismo de medida de flujo.

REFERENCIAS

1. ANDERSON, Arvid A., "Review sedimentation theory", **Chemical Engineering**, Vol. 66, No. 22. (1959), pág. 75 a 79.
2. BADGER, Walter L. **Introducción a la Ingeniería Química** (México: Libros McGraw-Hill de México, S.A. de C.V., 1964), pág. 674 a 676.
3. CARTER, Russell A., "Clarifiers can settle wash water problems", **Rock Products, an INTERTEC® publication**, Vol. 98 No. 6 (1995), pág. 40 a 45.
4. CARTER, Russell A., "Managing fines with automation", **Rock Products, an INTERTEC® publication**, Vol. 98, No. 9 (1995), pág. 31 a 35.
5. CONWAY, Richard A., "How to design sedimentation systems from laboratory data", **Chemical Engineering**, Vol. 68, No. 19 (1961), pág. 167 a 170.
6. DRAKE, Bob, "Finding answers to the fines problem", **Rock Products, an INTERTEC® publication**, Vol. 98, No. 9, (1995), pág. 15.
7. McCABE, Warren L. **Operaciones básicas de la Ingeniería Química** (España: Editorial Reverté, 1975), pág. 950 a 958.
8. McNAUGHTON, Kenneth et.al. **Solids handling** (Estados Unidos: McGraw-Hill Pub. Co., 1981), pág. 97 a 112, 208 a 224.
9. ORR, Clyde. **Filtration, principles and practices** (Estados Unidos. Editorial Marcel Dekker Inc., 1977), pág. 427 a 430, 251 a 257.
10. PASOS SOSA, Arturo. **Planta de tratamiento de agua, Cementos Progreso**. (Guatemala: s.p.i., 1992), 30 páginas.
11. PERRY, Robert H. et. al. **Chemical Engineer's handbook** (Quinta Edición; Japón: Editorial McGraw-Hill Kogakusha Ltd., 1973), pág. 5-24, 7-14 a 7-16, 19-44 a 19-106.
12. RAMÍREZ ORTÍZ, J.L. et. al. **Nuevo procedimiento de verificación de la calidad de las arenas calizas para hormigones** (s.p.i.; España: Laboratorios de Ensayos e Investigaciones Industriales, s.f.), 20 páginas.
13. RAYNOR, R.C., "Thickeners and clarifiers", **Chemical Engineering**, Vol. 73, No. 13, (1966), pág. 168 a 175.

14. SVAROVSKY, Ladislav. **Solid-liquid separation** (Estados Unidos: Butterworth Publishers Inc., 1977), pág.1 a 4, 87 a 99.
15. VESILIND, P. Aarne. **Treatment and disposal of wastewater sludges** (Estados Unidos. Ann Arbor Science Publishers Inc. 1974), pág. 74 a 85, 105 a 125, 152 a 157.
16. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING METHODS. **1996 annual book of ASTM standards** (Estados Unidos: s.p.i., 1996), Section 4: construction. Volume 04.02: concrete and aggregates, pág. 5-16.
17. ASHBROOK-SIMON-HARTLEY **Klaimpress® belt filter press technical information.** (Estados Unidos: s.p.i., s.f.), Boletín informativo, 37 páginas.
18. ELECTRICAL ENGINEERING AND EQUIPMENT CO. **Swift flow drag conveyors and master-flow II "en masse" conveyors** (Estados Unidos: s.p.i., 1997) Catálogo de especificaciones técnicas, 23 páginas.
19. FÁBRICA DE AÇO PAULISTA. **Crushing handbook** (Segunda edición en inglés, Brasil: s.p.i., 1986), pág. 13-13.
20. PARKSON CORPORTATION. **Magnum® Press model MPL-80 operation instructions** (Estados Unidos: s.p.i., 1981), 8 páginas.

BIBLIOGRAFÍA

1. APPLE, JAMES M. Material handling system design. Estados Unidos. The Ronald Press Co. 1,972. pp. 227 a 254.

APÉNDICES

Apéndice A. Guía de selección de sistemas mecánicos de transporte y elevación

Tipo de elevador	Transferencia de material				Perfil de elevación							
	Carga	Descarga			Ángulo de inclinación	Complejidad	Tramo horizontal	Tramo vertical	Tramo horizontal y vertical			
Elevador de cangilones	Alimentación controlada	Extremo superior	Extremo inferior	Intermedia, simple	Intermedia, variable	45° máximo	75° máximo	Vertical	Linea recta	hasta 100 pie	hasta 250 pie	Más de 80 pie
Elevador de descarga gravitacional	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Elevador de cangilones pivotados	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Elevador de tornillo sin fin	✓	✓	✓	✓	✓	1	✓	✓	✓	✓	1	✓
Transportador de flujo continuo	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Nota:

Los cheques indican que es recomendable el uso del equipo. Los espacios en blanco indican que no es recomendable el uso del equipo.

Un número (1) indica que es necesario considerar factores específicos de cada aplicación.

Los criterios sombreados son los que se aplican en el desarrollo del presente trabajo.

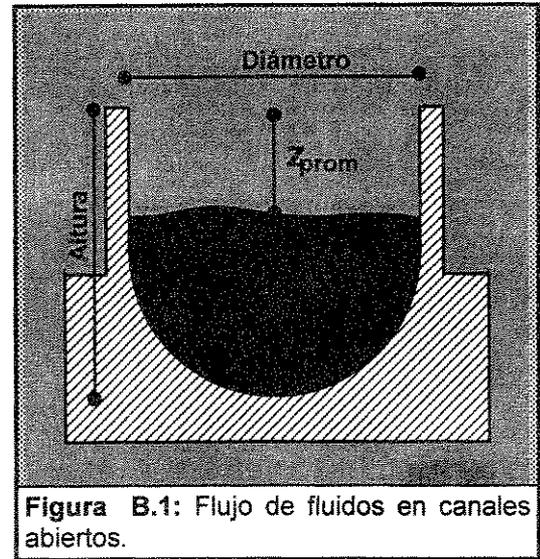
Tipo de elevador	Propiedades y condición del material									
	Tamaño de material	Ángulo de reposo	Friabilidad	Temperatura	Corrosividad	Abrasividad				
Menor de tamiz 250	De 1/4" a 2"	0 a 15°	No friable	Entre 32 y 150°F	Mediamente corrosivo	Mediamente abrasivo				
1	De 1/4" a 2"	0 a 15°	No friable	Entre 32 y 150°F	Mediamente corrosivo	Mediamente abrasivo				
Elevador de cangilones	De tamiz 250 a tamiz 100	15 a 60°	No friable	Entre 32 y 150°F	Mediamente corrosivo	Mediamente abrasivo				
Elevador de descarga gravitacional	De tamiz 100 a 1/2"	60 a 90°	Friable	Alta temperatura	No corrosivo	Muy abrasivo				
Elevador de cangilones pivotados	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
Elevador de tornillo sin fin	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
Transportador de flujo continuo	✓	✓	✓	✓	✓	✓				

Tabla No. 3: Criterios tomados en cuenta en la selección del sistema de transporte mecánico (tomado de Ref. No. 8, pág. 210).

Apéndice B. Determinación de las características del agua de alimentación y flujo inferior de los sedimentadores

Tabla No. 4: Determinación del caudal de agua de alimentación proveniente del circuito de lavado.

Corrida	Altura libre promedio z_{prom} (ver figura 8) ,m	Caudal q , m ³ /h
1	0.3103	125.46
2	0.3116	120.75
3	0.3006	161.29
4	0.3011	159.34
5	0.3048	145.24
6	0.3081	133.26
7	0.3042	147.52
8	0.3080	133.81
9	0.3060	143.46
10	0.3063	139.87
Promedio	0.306	141.00



Nota: El caudal de alimentación se calculó mediante la fórmula de Manning para flujo de fluidos en canales abiertos¹ (ver apéndice D.1).

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
 Biblioteca Central

¹ Ref. No. 11, pág. 5-24

Tabla No. 5: Determinación de la densidad y concentración del agua de alimentación.

Muestra	Densidad	Concentración	
	$tm_{suspension} / m^3_{suspension}$	$tm_{sólido} / m^3_{suspension}$	% _{peso}
1	1.062	0.098	9.23
2	1.055	0.092	8.69
3	1.079	0.129	11.98
4	1.081	0.130	12.01
5	1.079	0.128	11.89
6	1.074	0.139	12.90
7	1.089	0.128	11.72
8	1.056	0.138	13.06
9	1.071	0.136	12.68
10	1.067	0.130	12.21
Promedio	1.071	0.125	11.64

Tabla No. 6: Determinación de la densidad y concentración del lodo que deberá ser tratado por el filtro de bandas (flujo inferior de los sedimentadores).

Muestra	Densidad	Concentración	
	$tm_{suspension} / m^3_{suspension}$	$tm_{sólido} / m^3_{suspension}$	% _{peso}
1	1.578	0.836	52.98
2	1.586	0.890	56.12
3	1.591	0.940	59.07
4	1.574	0.812	51.59
5	1.582	0.856	54.14
Promedio	1.582	0.867	54.78

Apéndice C. Pruebas en el filtro prensa de bandas

C.1. Pruebas de filtración "batch"

Tabla No. 7: Primera prueba

Concentración de la solución de polímero: 2.0 g/l
Concentración de alimentación: 58.64%

Muestra	Volumen de lodo	Volumen de solución	Dosis de polímero	Concentración de la torta
No.	litro	litro	ppm	% sólidos
1	20	1	100	81.65
2	20	0.75	75	81.29
3	20	0.6	60	78.02
4	20	0.5	50	76.42
5	20	0.4	40	74.32

Tabla No. 8: Segunda prueba

Concentración de la solución de polímero: 2.0 g/l
Concentración de alimentación: 44.86%

Muestra	Volumen de lodo	Volumen de solución	Dosis de polímero	Concentración de la torta
No.	litro	litro	ppm	% sólidos
6	20	0.8	80	74.74%
7	20	0.5	50	71.74%
8	20	0.3	30	69.84%
9	20	0.15	15	69.06%

Tabla No. 9: Tercera prueba

Concentración de la solución de polímero:

2.0 g/l

Concentración de alimentación:

36.52%

Muestra	Volumen de lodo	Volumen de solución	Dosis de polímero	Concentración de la torta
No.	litro	ml	ppm	%
10	20	0.8	80	73.95%
11	20	0.6	60	72.41%
12	20	0.5	50	69.05%
13	20	0.3	30	67.54%

C.2. Prueba de filtración continua**Tabla No. 10:** Contenido de sólidos del material recuperado mediante la filtración continua del flujo inferior de los sedimentadores

Concentración inicial: 42 %

Duración de la prueba: 3 horas

Muestra	% sólidos
1	71.26
2	71.57
3	71.74
4	71.55
Promedio	71.53

Nota:

Polímero utilizado: Alkemy 5600

Precio: Q 38.38/lb

C.3. Características de operación del filtro de bandas

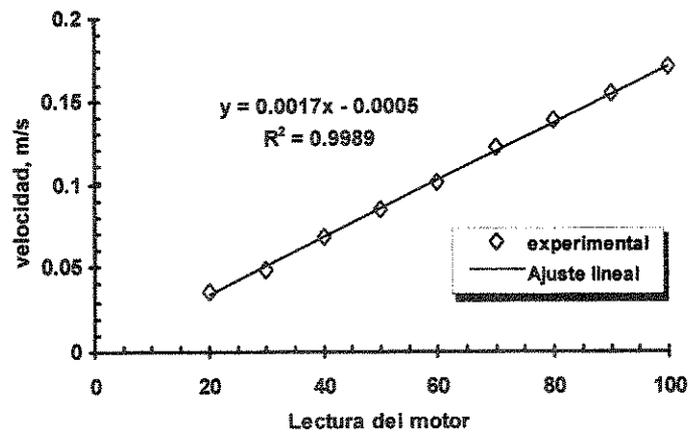
Tabla No. 11: Valores máximos para el cálculo de la capacidad del filtro de bandas.

Variable	Valor obtenido en la práctica	Máximo recomendado por el fabricante
Velocidad de la banda	0.14 m/s	0.17 m/s
Espesor de la torta	0.7 cm	1.9 cm

Tabla No. 12: variación de la velocidad de las bandas con respecto al variador de velocidad del motor principal.

Lectura del motor	velocidad m/s
20	0.0356
30	0.0487
40	0.0685
50	0.0843
60	0.1013
70	0.1220
80	0.1383
90	0.1537
100	0.1700

GRÁFICA No. 4
Velocidad lineal de la banda inferior vs.
Lectura del variador



Apéndice D. Cálculo de muestra

D.1. Flujo de fluidos en canales abiertos

Datos:

Diámetro: $D = 0.4064 \cdot m$

Altura libre: $z = 0.3048 \cdot m$ (ver figura B.1)

Pendiente: $S = 0.024$

Cálculos:

1. Área de flujo:

$$A_0 = \frac{\pi \cdot D^2}{8} + \frac{D^2}{2} \quad A_{flujo} = A_0 \cdot z \cdot D \quad A_{flujo} = 0.024 \cdot m^2$$

2. Perímetro húmedo:

$$P_0 = \frac{\pi \cdot D}{2} + D \quad P_h = P_0 - 2 \cdot z \quad P_h = 0.435 \cdot m$$

3. Radio hidráulico:

$$R_H = \frac{A_{flujo}}{P_h} \quad R_H = 0.054 \cdot m$$

4. Coeficiente de Chézy:

$$C = 1.00274 \cdot \left(m^{\frac{1}{6}} \right) \cdot \frac{R_H^{\frac{1}{6}}}{0.013} \quad C = 47.445$$

5. Velocidad lineal:

$$V = C \cdot \sqrt{R_H \cdot S} \cdot (m^{0.5} \cdot s^{-1}) \quad V = 1.711 \frac{m}{s}$$

6. Caudal:

$$q = V \cdot A_{flujo}$$

$$q = 145.131 \frac{m^3}{hr} \quad q = 638.993 \frac{gal}{min}$$

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

D.2. Cantidad de sólidos a remover de los tanques desarenadores

Datos:

A partir de los planos de construcción de los tanques desarenadores se obtuvieron las dimensiones siguientes (ver figura D.1):

$$\begin{aligned} a &:= 5.1 \cdot m & c &:= 1 \cdot m \\ b &:= 4.78 \cdot m & d &:= 0.6 \cdot m \\ \text{altura} &:= 3.6 \cdot m & e &:= 1.5 \cdot m \end{aligned}$$

Se ha encontrado que la altura libre sobre el material sedimentado es de 3.0 m en el desarenador No. 1, como mínimo. Se espera que en los otros tanques la cantidad de arena acumulada sea menor.

$$\text{Altura libre: } h_{\text{libre}} := 3.0 \cdot m$$

Cálculos:

1. Área de planta:

$$\begin{aligned} \text{Área} &= a \cdot b \\ \text{Área} &= 24.378 \cdot m^2 \end{aligned}$$

2. Volumen de la tolva de descarga:

$$\begin{aligned} V_{\text{tolva}} &= \frac{a+c}{2} \cdot d \cdot e \\ V_{\text{tolva}} &= 2.745 \cdot m^3 \end{aligned}$$

3. Volumen total del tanque:

$$\begin{aligned} V_{\text{tanque}} &= \text{Área} \cdot \text{altura} + V_{\text{tolva}} \\ V_{\text{tanque}} &= 90.506 \cdot m^3 \end{aligned}$$

4. Volumen libre de material sedimentado:

$$\begin{aligned} V_{\text{libre}} &= \text{Área} \cdot h_{\text{libre}} \\ V_{\text{libre}} &= 73.134 \cdot m^3 \end{aligned}$$

5. Volumen de material sedimentado:

$$\begin{aligned} V_{\text{arenas}} &= \frac{(V_{\text{tanque}} - V_{\text{libre}}) \cdot 4}{1 \cdot \text{día}} \\ V_{\text{arenas}} &= 69.487 \cdot \frac{m^3}{\text{día}} \end{aligned}$$

Para efectos de cálculo se supondrá la misma cantidad de material depositado al fondo de cada tanque desarenador.

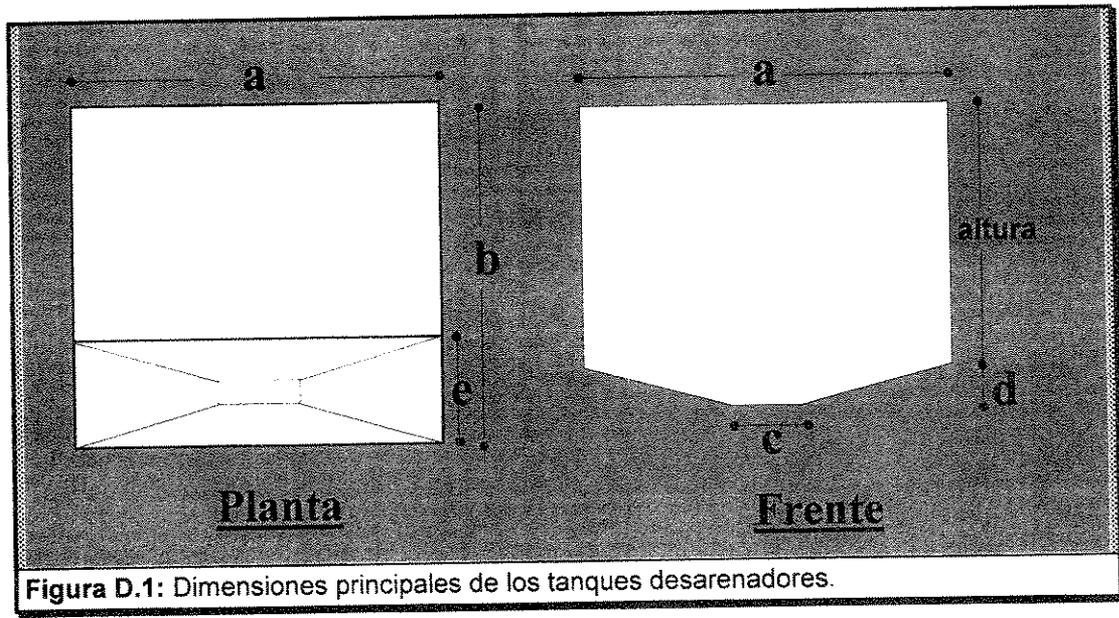


Figura D.1: Dimensiones principales de los tanques desarenadores.

D.3. Régimen de operación de los transportadores de flujo continuo

Datos:

Volumen a manejar: $V_{arenas} = 2.895 \cdot \frac{m^3}{h}$

Capacidad: $Cap_{transp} = 11.893 \cdot \frac{m^3}{h}$ (ver apéndice H)

Cálculos:

1. Régimen de operación de los transportadores (al utilizar un transportador):

$$\theta_{remoción} = \frac{V_{arenas}}{Cap_{transp}} \quad \theta_{remoción} = 1.948 \cdot \frac{h}{turno}$$

2. Régimen de operación de los transportadores (al utilizar dos transportadores)

$$\theta_{remoción} = \frac{V_{arenas}}{2 \cdot Cap_{transp}}$$

$$\theta_{remoción} = 1.948 \cdot \frac{h}{turno}$$

D.4. Balance de sólidos del sistema de tratamiento de agua

Datos:

Utilización:

El promedio de operación de la planta trituradora es de 15 horas al día:

$$\text{día} = 15 \cdot h$$

Alimentación:

Se calculó un valor aproximado del caudal de agua que debe ser tratada y la densidad y concentración de sólidos en el agua de alimentación a la planta (apéndice B, tabla No. 4). Los valores promedio son los siguientes:

Caudal: $V_{alim} = 141 \cdot \left(\frac{m^3}{h}\right)$

Densidad: $\rho_{alim} = 1.072 \cdot tm \cdot m^{-3}$ (tm de alimentación/m³ de alimentación)

Concentración: $C_{alim} = 0.125 \cdot (tm \cdot m^{-3})$ (tm de sólidos/m³ de alimentación)

Sólidos removidos en los desarenadores:

Según el cálculo efectuado en el apéndice D.2 y datos bibliográficos:

Volumen: $V_{arenas} = 69.487 \cdot \left(\frac{m^3}{día}\right)$

Densidad: $\rho_{arenas} = 2.1 \cdot (tm \cdot m^{-3})$ (Ref. No. 19, pp. 13-13)

Humedad: $H_{arenas} = 5\%$

Lodo del flujo inferior de los sedimentadores:

La determinación de la densidad y concentración de sólidos en el flujo inferior de los sedimentadores se muestra en el apéndice B, tabla No. 6. Los valores promedio son los siguientes:

Densidad: $\rho_{lodo} = 1.582 \cdot (tm \cdot m^{-3})$

Concentración: $C_{lodo} = 54.8\%$

Material recuperado por el filtro de bandas:

De acuerdo a las pruebas de filtración efectuadas en el filtro de bandas se considera que 71.53% de sólidos es un valor aceptable para la concentración de la torta producida (ver apéndice C):

Concentración: $C_{torta} = 71.53\%$

Cálculos:**Base de cálculo: 1 día de operación (15 h)**

1. Sólidos totales en la alimentación:

$$S_{alim} = V_{alim} \cdot C_{alim}$$

$$S_{alim} = 264.375 \cdot \frac{tm}{día}$$

2. Material recuperado como arenas en los desarenadores (incluyendo humedad):

$$Arenas = V_{arenas} \cdot \rho_{arenas}$$

$$Arenas = 145.923 \cdot \frac{tm}{día}$$

3. Sólidos en el material recuperado en los desarenadores:

$$S_{arenas} = Arenas \cdot (1 - H_{arenas})$$

$$S_{arenas} = 138.627 \cdot \left(\frac{tm}{día}\right)$$

4. Sólidos en material que pasa a los sedimentadores:

$$S_{sedim} = S_{alim} - S_{arenas}$$

$$S_{sedim} = 125.748 \cdot \frac{tm}{día}$$

5. Flujo inferior de los sedimentadores, material a ser procesado por el filtro de bandas como lodo:

Si se asume que la cantidad de sólidos en el agua de retorno es despreciable:

$$S_{lodo} = S_{sedim}$$

$$Lodo = \frac{S_{lodo}}{C_{lodo}}$$

$$Lodo = 229.468 \cdot \left(\frac{tm}{día}\right)$$

$$V_{lodo} = \frac{Lodo}{\rho_{lodo}}$$

$$V_{lodo} = 145.049 \cdot \left(\frac{m^3}{día}\right)$$

6. Material recuperado por el filtro de bandas como torta:

Si se asume despreciable la cantidad de sólidos en el filtrado:

$$S_{torta} = S_{lodo}$$

$$Torta = \frac{S_{lodo}}{C_{torta}}$$

$$Torta = 175.798 \cdot \frac{tm}{día}$$

D.5. Capacidad del filtro de bandas

Datos:

Alimentación al filtro:

El caudal de material alimentado al filtro de bandas se calculó en el apéndice D.5, mientras que la determinación de la densidad y concentración de dicho material se presenta en el apéndice B, tabla 5.

$$\begin{aligned} \text{Caudal:} \quad V_{\text{lodo}} &= 145.049 \cdot \left(\frac{m^3}{\text{día}} \right) \\ \text{Densidad:} \quad \rho_{\text{lodo}} &= 1.582 \cdot (tm \cdot m^{-3}) \\ \text{Concentración:} \quad C_{\text{lodo}} &= 54.8 \cdot \% \quad (\% \text{ en peso}) \end{aligned}$$

Torta producida:

$$\begin{aligned} \text{Espesor:} \quad \text{espesor} &= 0.7 \cdot cm \quad (\text{ver apéndice C.3}) \\ \text{Concentración:} \quad C_{\text{torta}} &= 71.53 \cdot \% \\ \text{Densidad:} \quad \rho_{\text{torta}} &= 2.01 \cdot \left(\frac{tm}{m^3} \right) \quad (\text{densidad de polvo de piedra caliza. Ref No. 19, pp. 13-13}) \end{aligned}$$

Operación del filtro:

De acuerdo al manual de operación del filtro de bandas y a mediciones hechas en el campo:

$$\begin{aligned} \text{Ancho efectivo de la banda:} \quad \text{ancho} &= 1.8 \cdot m \quad (\text{Ref. No. 20}) \\ \text{Velocidad de traslación de la banda:} \quad \text{velocidad} &= 0.133 \cdot \left(\frac{m}{\text{sec}} \right) \quad (\text{lectura del variador de velocidad}=80) \end{aligned}$$

Cálculos:

$$1. \text{ Capacidad de producción de torta:} \quad \text{Cap}_{\text{torta}} = \text{espesor} \cdot \text{ancho} \cdot \text{velocidad} \cdot \rho_{\text{torta}}$$

$$\text{Cap}_{\text{torta}} = 12.126 \cdot \frac{tm}{h} \quad \text{Cap}_{\text{torta}} = 12.126 \cdot \left(\frac{tm}{h} \right)$$

$$2. \text{ Capacidad de manejo de lodo:}$$

$$\text{Cap}_{\text{lodo}} = \frac{\text{Cap}_{\text{torta}}}{C_{\text{lodo}} \cdot \rho_{\text{lodo}}} \quad \text{Cap}_{\text{lodo}} = 13.987 \cdot \frac{m^3}{h}$$

3. Tiempo requerido para manejar el flujo inferior de los sedimentadores

$$\theta_{\text{filtración}} = \frac{V_{\text{lodo}}}{\text{Cap}_{\text{lodo}}}$$

$$\theta_{\text{filtración}} = 10.37 \cdot \frac{h}{\text{día}}$$

$$\theta_{\text{filtración}} = 3.457 \cdot \frac{h}{\text{turno}} \quad (3 \text{ turnos al día})$$

D.6. Costo de recuperación del material fino al utilizar el filtro prensa de bandas

Datos:

El volumen de lodo a tratar se calculó en el apéndice D.1. La dosis de polímero a utilizar se determinó mediante los resultados de las pruebas de filtración mostradas en el apéndice C.2.

Cantidad de lodo a tratar:	$V_{\text{lodo}} = 145.05 \cdot \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right)$	
Material producido:	$Torta = 175.798 \cdot \frac{\text{tm}}{\text{día}}$	
Dosis de polímero a utilizar:	$Dosis = 50 \cdot \text{ppm}$	
Precio del floculante utilizado:	$Precio_{\text{floculante}} = 45 \cdot \left(\frac{\text{Q}}{\text{lb}} \right)$	(ver apéndice C)
Potencia de motores principales:	$Potencia = 20 \cdot \text{hp}$	(ver apéndice H)
Ciclo de operación del filtro de bandas:	$\theta_{\text{filtración}} = 10.37 \cdot \left(\frac{\text{h}}{\text{día}} \right)$	(calculado en apéndice D.5)
Precio de energía eléctrica:	$Precio_{EE} = 0.568 \cdot \left(\frac{\text{Q}}{\text{kW}\cdot\text{h}} \right)$	

Cálculos:

1. Cantidad de floculante a utilizar:

$$Floculante_{\text{usado}} = V_{\text{lodo}} \cdot Dosis \quad Floculante_{\text{usado}} = 15.989 \cdot \frac{\text{lb}}{\text{día}}$$

2. Costo del floculante utilizado:

$$Costo_{\text{floculante}} = Floculante_{\text{usado}} \cdot Precio_{\text{floculante}} \quad Costo_{\text{floculante}} = 719.51 \cdot \frac{\text{Q}}{\text{día}}$$

3. Costo de energía eléctrica:

$$Costo_{EE} = Potencia \cdot \theta_{\text{filtración}} \cdot Precio_{EE} \quad Costo_{EE} = 87.846 \cdot \frac{\text{Q}}{\text{día}}$$

4. Costo total:

$$Costo_{\text{total}} = Costo_{\text{floculante}} + Costo_{EE} \quad Costo_{\text{total}} = 807.352 \cdot \frac{\text{Q}}{\text{día}}$$

5. Costo unitario:

$$Costo_{\text{unitario}} = \frac{Costo_{\text{total}}}{Torta} \quad Costo_{\text{unitario}} = 4.592 \cdot \frac{\text{Q}}{\text{tm}}$$

Apéndice E. Distribución del tamaño de partícula del material a recuperar

Tabla No. 13: Ejemplo de granulometría del material depositado en los desarenadores (Análisis del 05/11/96, Laboratorio de Concreto LP; 4 muestras).

Tamaño, mm	% pasando				Promedio
	Desarenador 1	Desarenador 2	Desarenador 3	Desarenador 4	
13.33	100	100	100	100	100
9.5	95.9	99.7	100	100	98.9
4.75	89.9	98.2	100	100	97.025
2.396	70.7	95.6	100	100	91.575
1.18	47.3	82	100	100	82.325
0.6	29.1	69	99.9	100	74.5
0.3	20.2	60.1	99.7	100	70
0.15	15.2	45.3	71.8	98	57.575
0.075	11.5	26.5	31	56.4	31.35

Tabla No. 14: Ejemplo de la distribución de tamaño de partícula del material depositado al fondo de los sedimentadores (Análisis del 14/10/96, Control de Calidad SM; muestra 1, sedimentador 1).

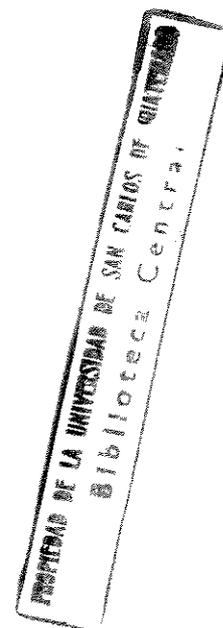
Tamaño	% pasando						
0.16217	100	0.04983	100	0.01528	81	0.00468	28
0.14	100	0.043	100	0.01318	76	0.00405	22
0.12067	100	0.037	100	0.01137	70	0.00348	17
0.10417	100	0.032	100	0.00982	64	0.00302	13
0.08983	100	0.0275	98	0.00847	57	0.0026	10
0.0775	100	0.02383	96	0.0073	50	0.00223	7
0.06683	100	0.0205	92	0.0063	43	0.00193	5
0.05767	100	0.01767	86	0.00543	35		

Apéndice F. Análisis químico del material a recuperar

Tabla No. 15: Análisis químico del material recuperado con el uso del filtro de bandas.

Especie química	Muestra 1 %	Muestra 2 %	Muestra 3 %	Muestra 4 %	Promedio %
CaO	44.75	41.04	45.88	46.45	44.53
SiO ₂	10.25	12.05	9.47	8.79	10.14
MgO	2.46	2.5	2.06	2.34	2.34
Al ₂ O ₃	2.36	5.15	1.30	0.71	2.38
Fe ₂ O ₃	0.73	1.47	0.54	0.28	0.76
P. Al F.	38.48	36.69	38.95	39.6	38.43
Otros	1.65	2.85	2.49	2.42	2.35
CaCO ₃	79.87	73.25	81.89	82.9	79.48
MgCO ₃	5.15	5.23	4.31	4.89	4.90

Nota: * Valores calculados a partir de los datos originales mostrados en la parte superior de la tabla.



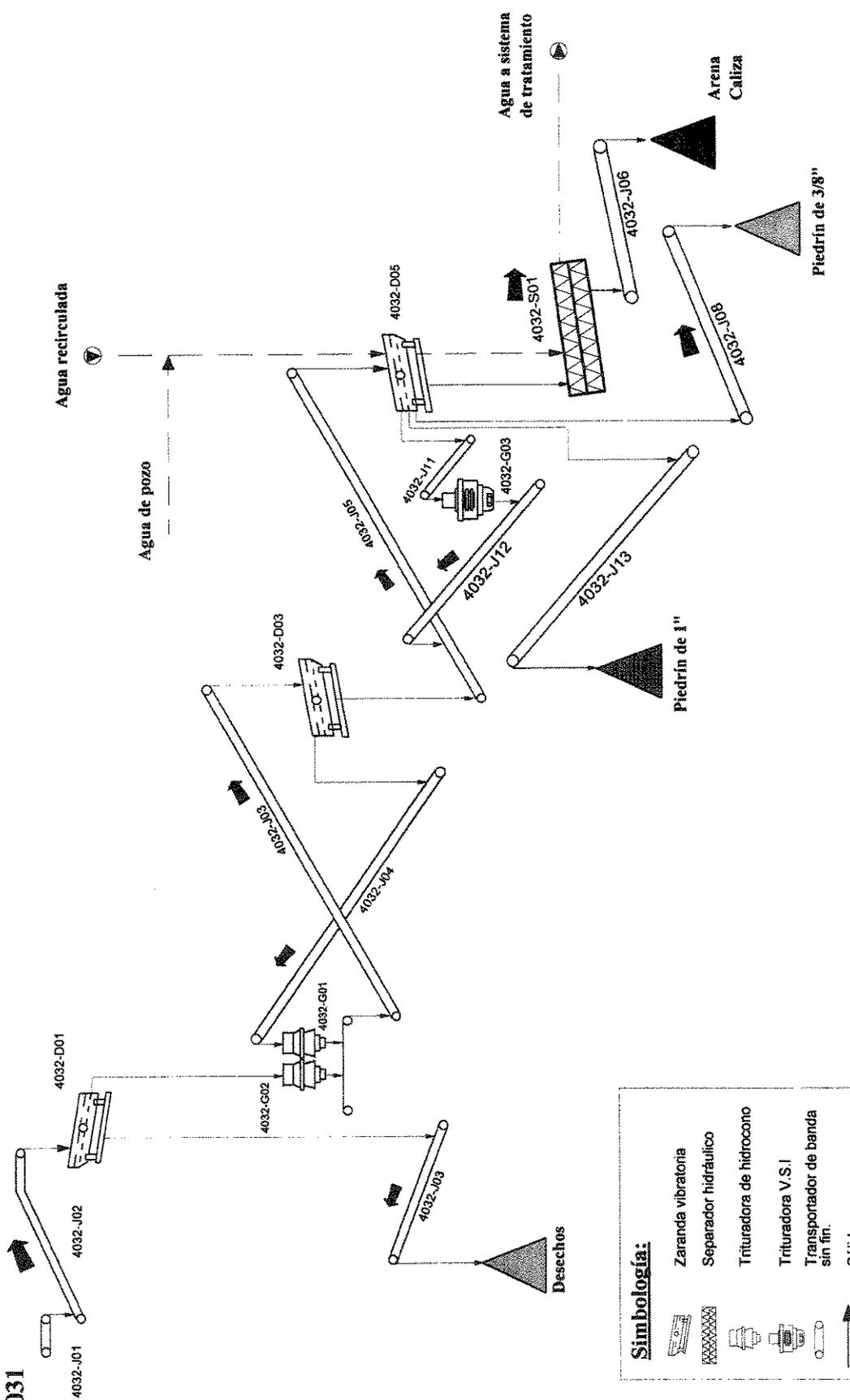
Apéndice G. Diagramas

G.1. Diagrama de flujo del sistema de trituración

G.2. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento de agua

G.3. Planta general del sistema de tratamiento de agua

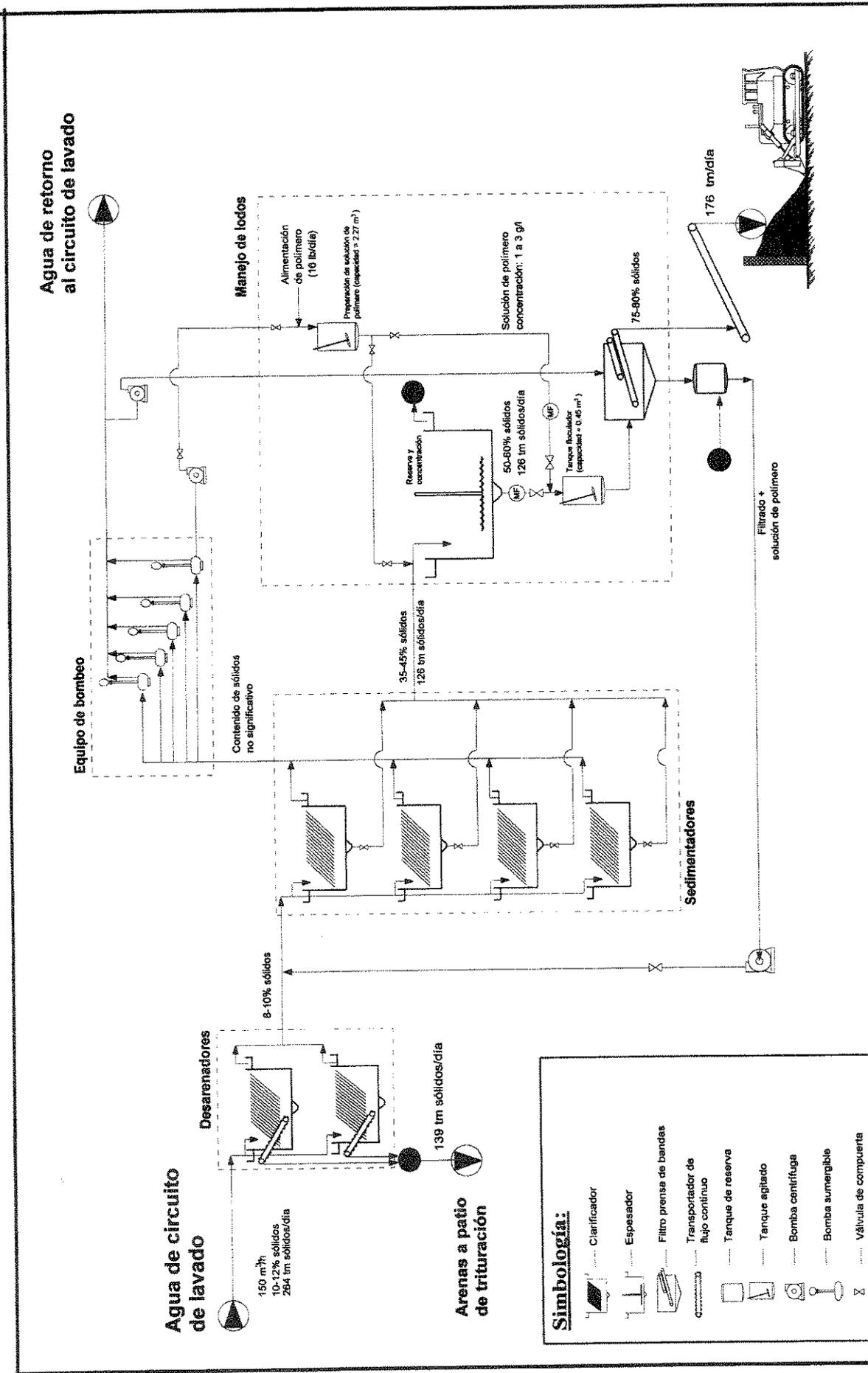
**De Sección
4031**



Simbología:

- Zaranda vibratoria
- Separador hidráulico
- Trituradora de hidrocono
- Trituradora V.S.I
- Transportador de banda sin fin.
- Sólido
- Agua

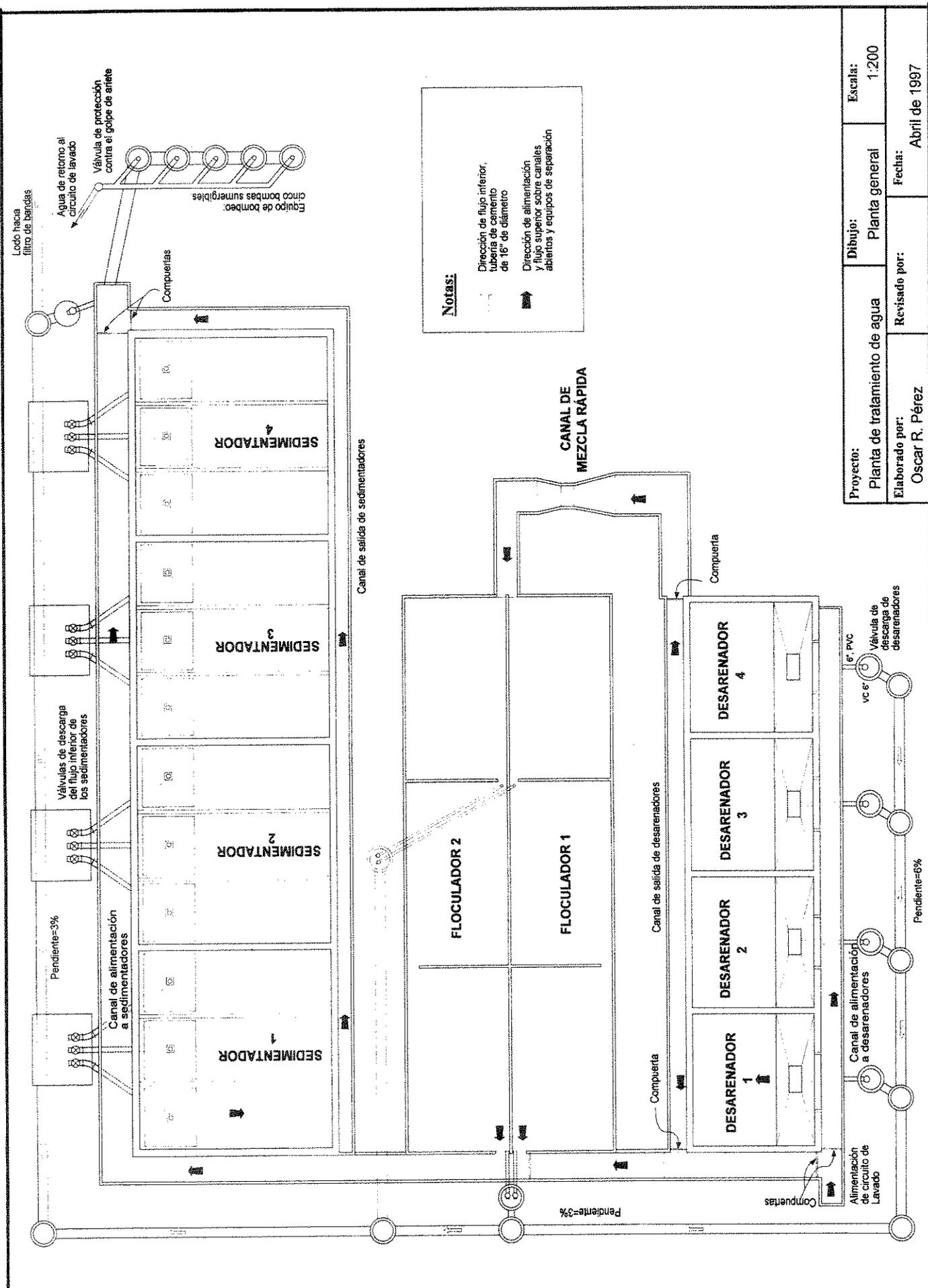
Proyecto:	Trituradora secundaria	Escala:	Ninguna
Dibujó:	Diagrama de flujo	Revisado por:	Oscar R. Pérez
Elaborado por:	Oscar R. Pérez	Fecha:	Abril de 1997



Simbología:

	Clarificador
	Espesador
	Filtro prensa de bandas
	Transportador de flujo continuo
	Tanque de reserva
	Tanque agitado
	Bomba centrífuga
	Bomba sumergible
	Válvula de compuerta
	Sistema de transporte de sólidos
	Cargador frontal
	Transportador de banda sin fin

Proyecto: Planta de tratamiento de agua	Dibujo: Diagrama de flujo	Escala: Ninguna
Elaborado por: Oscar R. Pérez	Revisado por:	Fecha: Abril de 1997



Notas:

→ Dirección de flujo inferior, tubería de cemento de 16" de diámetro

→ Dirección de alimentación y flujo superior sobre canales, abientos y equipos de separación

Proyecto:	Dibujo:	Escala:
Planta de tratamiento de agua	Planta general	1:200
Elaborado por:	Revisado por:	Fecha:
Oscar R. Pérez		Abril de 1997

Apéndice H. Otros datos de utilidad

Tabla No. 16: Capacidad de algunos transportadores de flujo continuo disponibles comercialmente.

Tamaño nominal	Capacidad, pie ³ /hr a 0.35 m/s ^a		Capacidad, m ³ /hr a 0.35 m/s ^a	
	75% de carga	90 % de carga	75% de carga	90 % de carga
3" x 5"	420	504	11.9	14.28
5" x 7"	931	1120	26.38	31.74
6" x 10"	1526	1834	43.24	51.97

^a 0.35 m/s = 70 pie/min

Tabla No. 17: Listado de la potencia instalada de los motores principales que intervienen en la operación del filtro de bandas.

Descripción	Identificación	Potencia, Kw	Potencia, HP
Bomba hidroneumática	5004-B01-M	0.746	1
Bomba de presión	5004-B03-M	1.865	2.5
Bomba de retorno	5004-B04-M	3.73	5.0
Compresor	5004-S01-CM	4.103	5.5
Filtro de bandas	5004-S01-M	1.119	1.5
Mezclador 1		0.373	0.5
Mezclador 2		0.249	0.33
Total		12.185	16.33