

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**ANÁLISIS DE LA PREFACTIBILIDAD TÉCNICA Y
ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE ESPESAMIENTO
DE RELAVES PARA SU POSTERIOR DISPOSICIÓN
UTILIZANDO EL MÉTODO TTD**

PROYECTO DE TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

PROFESOR GUÍA: JOSÉ TORRES TITUS

KAREN ESTELA VARGAS PONCE

2008

No tengo palabras para expresar la enorme gratitud que siento hacia mis padres quienes me apoyaron incondicionalmente y en cada momento desde lejos en este proceso de crecimiento y desarrollo tanto personal como profesional.

Te agradezco muchísimo hermana querida por todo tu cariño, comprensión y apoyo durante toda mi vida y en especial en aquellos momentos más difíciles y de mayor incertidumbre.

Te agradezco a ti mi amor ya que juntos nos hemos apoyado, nada de esto hubiese sido sin tu amor y comprensión, también le agradezco a tu familia por acogerme y brindarme ese calor de hogar tan añorado durante todos mis años de estudio.

*Dedicado a mis Padres:
Jerónimo y Soledad*

RESUMEN

Una de las tecnologías que presenta mayor solución a las problemáticas actuales existentes; problemáticas debido principalmente a los riesgos ambientales asociados a los tranques de relaves así como a un exponencial aumento en la cantidad de desechos mineros y una gran escasez del recurso hídrico, entre otros; son el espesamiento de relaves para su posterior depositación en forma de pasta.

En esta memoria se determinó la prefactibilidad Técnica-Económica de una Planta de Espesamiento de Relaves que permitirá la depositación en forma de pasta de residuos provenientes del proceso de flotación.

En la evaluación económica realizada se obtuvo un Capital Total de Inversión de 1,2 MUS\$, valor en el cual no se encuentra incluido los costos de preparación de suelos y otros aspectos necesarios para su posterior depositación; costos que elevarán evidentemente el capital total de inversión; haciendo no muy rentable económicamente la Planta de Espesamiento de Relaves.

Es por todo lo anteriormente señalado que se debió analizar desde otra perspectiva, haciendo una comparación de los beneficios y desventajas que presenta la depositación en pasta versus la tradicional y así de esta forma llegar a determinar la conveniencia de la Planta de Espesamiento de Relaves.

Cabe señalar que previo al análisis económico fue realizado el diseño de los equipos que formarán parte de la Planta de Espesado, el dimensionamiento de dichos equipos es fundamental para la determinación de sus costos ya que todo dependerá de sus dimensiones y cantidades a utilizar.

ÍNDICE GENERAL

1.- ANTECEDENTES GENERALES	1
1.1.- RESIDUOS MASIVOS PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA MINERA CHILENA.....	1
1.2.- TIPOS DE RESIDUOS MINEROS.....	3
1.2.1.- Residuos de Extracción	3
1.2.2.- Residuos de Fundición	4
1.2.3.- Residuos de Lixiviación	4
1.2.4.- Residuos de Flotación	5
2.- PROBLEMÁTICA ACTUAL	6
2.1.- OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS	7
3.- MÉTODOS ALTERNATIVOS A LA DEPOSITACIÓN TRADICIONAL DE RELAVES	8
3.1.- CARACTERÍSTICAS DE UN RELAVE ESPESADO O PASTA DE RELAVE.....	9
3.2.- MÉTODO DE DISPOSICIÓN DE RELAVES ESPESADOS	11
4.- CONCEPTOS REOLÓGICOS	14
4.1.- IMPORTANCIA DE LOS CONCEPTOS REOLÓGICOS	14
4.2.- REQUERIMIENTOS REOLÓGICOS PARA LA DEPOSITACIÓN DE RELAVES	18
4.3.- REQUERIMIENTOS REOLÓGICOS PARA EL TRANSPORTE POR TUBERÍAS.....	21
4.4.- CONCLUSIONES.	23
5.- CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	24
5.1.- CARACTERIZACIÓN DE LOS SÓLIDOS DE UN RELAVE.....	24
5.1.1.- Distribución de Tamaño de Partícula.....	24
5.1.2.- Mineralogía	25
5.1.3.- Procesos de Calidad del Agua	28
5.1.4.- Representatividad	30
5.2.- CARACTERIZACIÓN DEL RELAVE ESPESADO O PASTA.....	30
5.2.1.- Transporte.....	30
5.2.2.- Depositación	33
5.2.3.- Consideraciones de Licuefacción	35
5.2.4.- Consolidación y Desecamiento de los depósitos de Relaves Espesados	36
5.2.5.- Curva de Retención de Agua.....	37
5.2.6.- Conductividad Hidráulica	38
5.2.7.- Geoquímica.....	39

6.- TEORÍA MECÁNICA DE LA SEDIMENTACIÓN	40
6.1.- MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÁREA UNITARIA DE UN ESPESADOR	41
6.2.- BALANCE DE MASA PARA EL CÁLCULO DEL ÁREA DE UN ESPESADOR.....	47
7.- DISEÑO DE EQUIPOS DE PROCESO	52
7.1.- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	52
7.2.- DISEÑO DEL EQUIPO DE ESPESAMIENTO.....	55
7.2.1.- Desarrollo Experimental.....	55
7.2.2.- Conclusiones	61
7.3.- DISEÑO DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO.....	62
7.3.1.- Cálculos hidráulicos para la impulsión y descarga de relaves	63
7.3.2.- Cálculos hidráulicos para la impulsión del agua recuperada	74
7.4.- EQUIPO DE FILTRACIÓN.....	78
7.4.1.- Filtro Cartridger	78
7.5.- PISCINA RECOLECTORA DEL AGUA RECUPERADA.....	80
8.- EVALUACIÓN ECONÓMICA	83
8.1.- COSTOS DE INVERSIONES INICIALES.....	83
8.2.- COSTOS OPERACIONALES	88
8.3.- DEPÓSITOS DE RELAVES TRADICIONALES V/S DEPÓSITOS EN PASTA	90
9.- CONCLUSIONES	94
10.- BIBLIOGRAFÍA	96

ANEXOS

ANEXO A	98
ANEXO A-1.- Residuos provenientes del Proceso de Flotación	99
ANEXO A-2.- Decreto Supremo N° 248.....	112
ANEXO B	123
ANEXO B-1.- Sedimentación de una partícula esférica y no esférica.....	124
ANEXO C	129
ANEXO C-1.- Cálculos y resultados para un 50% de sólidos a la entrada del espesador.....	130
ANEXO C-2.- Resultados para distintas concentraciones de sólidos en la alimentación	149
ANEXO C-3.- Planillas Excel	166
ANEXO D	199
ANEXO D-1.- Cálculos hidráulicos.....	200
ANEXO D-2.- Determinación del parámetro K.....	232
ANEXO D-3.- Curva de bomba centrífuga para pulpas	233
ANEXO D-4.- Velocidades recomendables y caídas de presión máxima	234
ANEXO D-5.- Propiedades de cañerías de acero	235
ANEXO D-6.- Rugosidad relativa para distintos materiales de tuberías	237
ANEXO D-7.- Curva bomba centrífuga para agua.....	238
ANEXO D-8.- Criterios para la selección y diseño del equipo de filtración	239
ANEXO D-9.- Dimensiones de tubería HDPE Pe 100	240
ANEXO E	241
ANEXO E-1.- Costo instalado del espesador	242
ANEXO E-2.- Factores de indexamiento de equipos comerciales	243
ANEXO E-3.- Cotizaciones de equipos de bombes.....	245
ANEXO E-4.- Costo de equipo de filtración	250
ANEXO E-5.- Costos y riesgos financieros de la disposición de relaves espesados.....	251

TABLAS

Tabla 7.1.- Hoja de especificación de resultados impulsión y descarga de relaves	73
Tabla 7.2.- Hoja de especificación de resultados impulsión de agua recuperada	77
Tabla 8.1.- Costo total de equipos	86
Tabla 8.2.- Costos iniciales de inversión.....	87
Tabla 8.3.- Costos energéticos	88
Tabla 8.4.- Costo personal	88
Tabla 8.5.- Comparación entre un depósito tradicional v/s uno de relaves espesados	92

1.- ANTECEDENTES GENERALES.

1.1.- RESIDUOS MASIVOS PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA MINERA CHILENA.

Un tema importantísimo asociado a las faenas mineras corresponde, a todo aquello relacionado con las obras constructivas de depositación en la superficie de la tierra de los residuos masivos provenientes de la minería tales como los “Relaves”; “Estériles, Minerales de baja ley y desmontes mineros”; “Ripios de Lixiviación” y “Escorias”; los cuales provienen de Plantas de Tratamiento por Flotación, de la extracción Minera, Plantas de Tratamiento por Lixiviación y Fundiciones respectivamente. Esto se debe a que en la Industria Minera Chilena estos depósitos han ido adquiriendo mayor relevancia, debido principalmente a que las leyes de los minerales en los yacimientos en explotación han disminuido, lo que ha obligado a las empresas mineras extraer grandes volúmenes para lograr mantener los mismos niveles de producción, incrementándose así, la cantidad de desechos que deben ser dispuestos ya sea como material estéril o en la forma de pulpa de relaves. Por lo tanto, se hace necesario tener muy presente los riesgos asociados a los grandes depósitos de residuos masivos mineros, ya sea en un ámbito técnico-constructivo como ambiental.

Hasta hace algunas décadas atrás era común en Chile y en otros países de tradición minera, deshacerse por ejemplo, de los relaves derivados de las operaciones minero-metalúrgicas, arrojándolos en lechos de ríos, lagunas, quebradas, valles o al mar próximo y cuando en las cercanías de alguna faena no se disponía de estos sectores naturales tan "convenientemente" los empresarios mineros solían acumular los relaves en áreas de contención, que amurallaban con terraplenes levantados con los mismos relaves y una vez que se agotaba el yacimiento, estos depósitos quedaban abandonados.

En cuanto a los otros tipos de desechos mineros, tales como: Botaderos de Estériles, Minerales de Baja Ley, Desmontes de Minas, Ripios de Lixiviación y Escorias, tampoco era muy adecuada la forma de su depositación desde un punto de vista de seguridad constructiva, estabilidad física y consideraciones ambientales.

Afortunadamente en los tiempos actuales, debido a la regulación legal; tanto técnica como ambiental que nuestro país posee, se hace cada vez más difícil librarse de los desechos mineros con sólo hacerlos desaparecer de la vista y gran parte de las reglamentaciones que se imponen al respecto se refieren en forma específica a la Industria Minera, además las comunidades también hacen oír hoy su voz con fuerza y claridad sobre los problemas de protección de las personas y el medio ambiente.

La normativa vigente que regula todo lo relacionado con los “Depósitos de Residuos Masivos Mineros”, en lo técnico y ambiental exige que se cumplan diversos requerimientos de seguridad, destinados a la protección de las personas y el medio ambiente, por ello todos los esfuerzos que se hagan para establecer criterios a tener en cuenta sobre el control de los riesgos son muy importantes.

1.2.- TIPOS DE RESIDUOS MINEROS.

1.2.1.- Residuos de Extracción:

En función de las características de los yacimientos, para su explotación se hace necesario remover grandes cantidades de material, el cual debe posteriormente ser reubicado en el entorno del yacimiento o planta de procesamiento. Los residuos sólidos que se generan en esta etapa son:

- ◀ **Estéril o Lastre:** Se generan en grandes tonelajes, incluyen aquellos materiales sin valor económico, que sólo han sido removidos del yacimiento y que a lo más han pasado por un proceso de chancado antes de su disposición. Estos residuos provienen de todos aquellos sectores del yacimiento cuyo contenido de mineral valioso es muy bajo para hacer atractiva su recuperación, pero que de todas maneras es necesario remover para poder acceder a zonas más ricas del mismo. El estéril una vez removido del yacimiento se dispone formando las características “tortas o botaderos” de estéril en las cercanías de los yacimientos mineros.

- ◀ **Minerales de Baja Ley:** El tonelaje de minerales de baja ley (mineral cuyo contenido de metal no hace rentable su procesamiento en la actualidad) varía de una faena a otra y son considerables las cantidades que se deben acopiar, para su probable procesamiento en un futuro.

- ◀ **Desmontes de Minas Subterráneas:** En la construcción de galerías, piques y rampas para acceder al yacimiento subterráneo y durante la explotación de él se generan materiales estériles que deben ser dispuestos ya sea en el interior de la mina o en el exterior en forma similar a la minería a rajo abierto.

1.2.2.- Residuos de Fundición:

En los procesos de fusión y conversión se generan las llamadas Escorias.

- ◀ **Escoria:** Es el residuo producido durante la etapa de fundición de los concentrados de cobre. Las escorias principalmente fijan el Hierro y otros metales presentes en el concentrado, mediante la generación de compuestos estables con la sílice que se utiliza como fundente. Las escorias son retiradas desde los hornos y son dispuestas en vertederos, llamados “Vertederos de Escorias”.

1.2.3.- Residuos de Lixiviación:

En el Proceso de Lixiviación de minerales oxidados y sulfuros secundarios, se generan los residuos sólidos llamados Ripios.

- ◀ **Ripios:** En este proceso el mineral chancado, con un tamaño aproximado de un cuarto de pulgada, se dispone formando una pila a la cual se le hace pasar un fluido lixivante durante un período de tiempo definido, (ácido sulfúrico en el caso de minerales de cobre y cianuro en el caso del oro), el cual solubiliza el metal de interés contenido en la pila. Una vez extraído el metal valioso, el mineral “agotado” que queda recibe el nombre de “Ripio de Lixiviación o de Cianuración”. Los ripios pueden ser compactados y sobre ellos construirse una nueva pila o bien pueden ser removidos y dispuestos finalmente en otro sitio. Para la depositación de los ripios de lixiviación se utilizan normalmente sitios preparados e impermeabilizados, con el objeto de evitar el escurrimiento de soluciones generalmente ácidas.

1.2.4.- Residuos de Flotación:

En el Proceso de Flotación, que corresponde a la concentración de los minerales de cobre y oro, se producen los residuos llamados Relaves.

- ◀ **Relaves:** Son residuos que corresponden a una suspensión de sólidos en líquido, formando una pulpa, que se genera y desecha en las plantas de concentración húmeda de especies minerales y estériles que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda fina; esta "Pulpa o Lodo de Relaves" fluctúa en la práctica con una razón aproximada de agua/sólidos que va del orden de 1:1 a 2:1.

Las características y el comportamiento de esta pulpa dependerá de la razón agua/sólidos y también de las características de las partículas sólidas.

Nota:

- Cabe destacar que en la Industria Minera se generan otros tipos de residuos que requieren ser dispuesto en depósitos diferentes a los sistemas señalados anteriormente. Tal es el caso entre otros de los Barros Arseniacales, Borrás de Electroobtención, Desechos de Plásticos, Desechos de Maderas, Aceites Lubricantes, Tambores, Neumáticos, etc.
- En el Anexo A-1 se presenta una revisión de los puntos más relevantes de los residuos provenientes del proceso de flotación; entregándose aspectos medioambientales, económicos y de salud referente a estos desechos y principalmente al método de disposición que ha sido mayormente utilizado a nivel nacional “Los Tranques de relaves”.
- En el Anexo A-2 se entrega un resumen del Decreto Supremo N° 248 “Reglamento para la Aprobación de proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves”.

2.- PROBLEMÁTICA ACTUAL.

Los enormes riesgos ambientales asociados a los Tranques de Relaves (riesgos vistos en el Anexo A-1 en mayor detalle), entre los que se encuentran:

- Los riesgos sísmicos e hidrogeológicos que pueden ocasionar potenciales problemas de licuefacción y de arrastre de desechos hacia cursos de aguas y napas subterráneas, acidificando las aguas y causando la contaminación superficial de suelos productivos.
- La generación de material particulado, lo que causa enormes daños tanto a la salud humana como al desarrollo de la vida vegetal y animal.
- La potencial factibilidad de fallas relacionada con la falta de seguridad y estabilidad del depósito; uno de los riesgo de mayor envergadura y peligrosidad; tanto para la misma Planta como para sus alrededores, debido a las enormes cantidades de vidas humanas que puede cobrar.

Han provocado el rechazo y recelo, a esta forma de depositación, de las comunidades aledañas a estos sectores.

Todos estos factores sumados con:

- ◀ Un aumento sustancial en la cantidad de desechos mineros; debido a un aumento considerable de la producción y una disminución en la ley de las menas de cobre.
- ◀ Una necesidad cada vez mayor de mejorar la recuperación de agua desde los relaves motivado por la escasez de este vital recurso.
- ◀ Una colmatación (relleno mediante sedimentación de materiales) de cuencas en las cercanías de las faenas ubicadas en sectores cordilleranos.
- ◀ Nuevas regulaciones ambientales, con posterioridad a la promulgación de la Ley General de Bases del Medio Ambiente.

Han llevado al estudio y desarrollo de nuevas e innovadoras Tecnologías. Una de las Tecnologías que responde a estos requerimientos y presenta soluciones a las problemáticas actuales es la ***Disposición de Relaves Espesados o en Pasta.***

2.1.- OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS.

El objetivo principal de esta memoria consiste en determinar la Prefactibilidad Técnica – Económica de una Planta de Espesamiento de Relaves ubicada en las inmediaciones de la Planta Concentradora de Cobre de una determinada Minera de la Quinta Región.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Establecer el estado del arte mediante una revisión sistemática de la literatura y publicaciones existentes.
2. Identificar los distintos tipos de depósitos de relaves existentes en la actualidad a nivel nacional, analizando sus falencias, marco legal que los rige y a su vez identificando métodos alternativos de depositación. En base a este último aspecto se investigará específicamente el método de disposición de relaves espesados (o en pasta) desde una perspectiva técnica identificando requerimientos básicos para su aplicación.
3. Determinar los parámetros necesarios para el diseño de los equipos de proceso que formarán parte de la Planta de Espesamientos de relaves.
4. Evaluar económicamente la Planta de Espesamiento de Relaves para determinar de esta forma los costos de inversión total y a su vez los costos operacionales.

3.- MÉTODO ALTERNATIVO A LA DEPOSITACIÓN TRADICIONAL DE RELAVES.

El manejo de los relaves comúnmente se realiza con pulpas diluidas, con bajas concentraciones de sólidos en peso. Los avances introducidos en el manejo tradicional de relaves consideran la creciente dependencia de sofisticadas geomembranas y sistemas de drenaje, como remedio para proteger el agua subterránea y evitar la infiltración, pero puede no corresponder a la solución exigida en el futuro por la comunidad y las autoridades reguladoras.

Durante la década pasada, la demanda por producir materiales de alta resistencia para el relleno de labores subterráneas abandonadas, permitió el desarrollo de innovaciones en las tecnologías utilizadas en la separación sólido-líquido de pulpas. En base a estudios realizados se han analizado variadas alternativas para disminuir primero que todo, los riesgos que presentan los depósitos tradicionales de relaves y a su vez mejorar la recuperación de agua desde los relaves, llegando a la conclusión que la etapa de Espesamiento es la operación unitaria que ofrece más oportunidades para aplicar medidas de mejoramiento continuo de depositación y contribuir a incrementar la eficiencia en el uso del agua.

La producción de relaves con bajos contenidos de humedad, no segregables, espesados o en pasta, en la actualidad está siendo evaluada en nuestro país como una solución práctica para disponer los relaves en superficie. La tecnología ya se encuentra probada en otras operaciones mineras fuera de Chile como Canadá, Australia y Sudáfrica.

3.1.- PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE UN RELAVE ESPESADO O “PASTA DE RELAVE”.

Un relave espesado o pasta de relave corresponde a una mezcla de agua con sólidos, que contiene abundante partículas finas (entre un 15 y 20% en peso de los sólidos debe ser de un tamaño inferior a 20 micrómetros).

Características:

- ◀ El bajo contenido de agua (entre un 10 a un 30%), hace que esta mezcla tenga una consistencia espesa. Existe muy poca diferencia entre una pulpa de relave de alta densidad y una pasta de relave.
- ◀ Los relaves espesados o en pasta pueden ser eficientemente transportados en tuberías sin presentar los problemas de segregación o sedimentación que ocurren normalmente con las pulpas de relaves (relaves con un porcentaje de sólidos inferior que la pasta). La variabilidad de tamaños evita que las partículas se segreguen y sedimenten cuando la mezcla esté en reposo, esto se debe a que las partículas finas (típicamente menores a 20 micrómetros) forman enlaces a través de interacciones electroestática, estos enlaces resultan en una malla continua que actúa como una especie de red que retiene a las partículas más gruesas no pudiendo éstas segregarse ni sedimentar; esta malla se rompe solamente cuando existe algún tipo de presión aplicada.
- ◀ La consistencia alcanzada permite que el relave espesado permanezca estable aún cuando esté varias horas sin moverse. La pasta puede formarse a partir de una gran variabilidad de componentes como cuarzo, feldespato, arcillas, micas y sales.

- ◀ Es posible producir materiales con la consistencia de una pasta a partir de un amplio rango de concentración de sólidos en peso y sobre la base de la variación de la distribución de tamaño de las partículas. Es decir, la producción de relaves espesados o en pasta es específica para cada tipo de material. No obstante, para obtener propiedades de pasta, los materiales requieren tener al menos 15% de concentración en peso de partículas de tamaño menor a 20 micrómetros.

- ◀ Un relave espesado o en pasta puede ser depositado en interior de minas; como relleno de minas subterráneas; o bien depositado en la superficie:
 - Cuando se usa como relleno de minas subterráneas se agrega cemento Pórtland u otros aditivos, para que de esta forma su resistencia y durabilidad se incremente significativamente.

 - Cuando se dispone en superficie, una muy pequeña fracción de agua podrá drenar o infiltrarse, ya que la mayor parte de la humedad es retenida en la pasta.

 - Adicionalmente, se puede mezclar roca estéril de mina y pasta de relave para ser dispuestos conjuntamente. Esta es una forma de encapsular la roca dentro de una matriz de relave “cemento - estabilizada”. Esta alternativa podría eliminar el potencial de generación de aguas ácidas y convertirse en una solución para cumplir con las regulaciones ambientales.

- ◀ La mejor propiedad de los relaves espesados o en pasta es que permite una gran flexibilidad en el desarrollo del sitio de emplazamiento, es por ello que se está utilizando un método alternativo al tradicional de depositación denominado **Thickened Tailings Disposal TTD** (Depositación de Relaves Espesados o en Pasta).

3.2.- MÉTODO DE DISPOSICIÓN DE RELAVES ESPESADOS “THICKENED TAILINGS DISPOSAL” “MÉTODO TTD”

Este método fue creado hace 30 años por Eli Robinsky en Canadá y ha sido implementado en diversos procesos mineros en el mundo. En Chile, dos compañías mineras se encuentran estudiando la factibilidad de implementar el método TTD en sus procesos: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi en la primera Región de Tarapacá y Compañía Minera Las Cenizas en Cabildo, Región de Valparaíso.

El Método de Depositación de Relaves Espesados o en Pasta (TTD) consiste en crear un depósito de relaves en pendiente o loma auto-soportante, para minimizar o eliminar el requerimiento de muros de confinamiento y de laguna de decantación que tienen los tranques de relaves convencionales.

Para lograr esto, es necesario aumentar la consistencia de los relaves, removiendo gran parte del agua que éstos contienen. De este modo, la concentración de sólidos en el relave puede alcanzar valores cercanos al 65 o 75%, con lo que el material deja de ser segregable. Así, el material del depósito será homogéneo, permitiendo que mediante el secado por evaporación, alcance su límite de contracción, lo que representa un estado geotécnico denso, no licuable y sísmicamente estable.

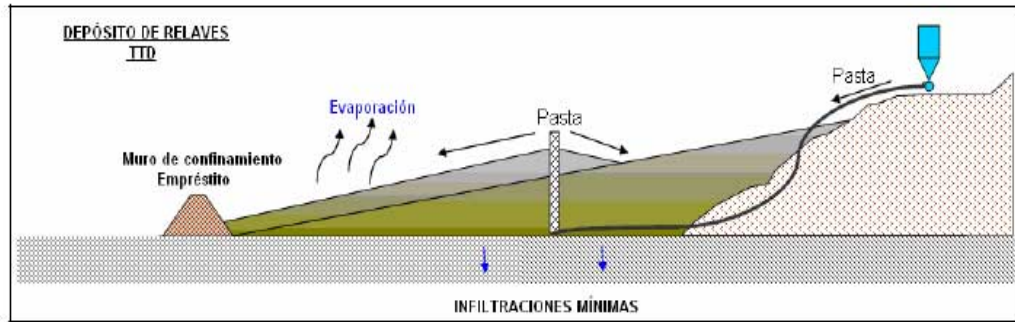


Figura 3.1. Depósito de relaves espesados.

Las superficies de depositación del relave espesado pueden ser valles, laderas de cerros o terrenos planos, ubicados en alguna parte cercana a la planta que genera los residuos. En el caso de valles o cerros, los relaves espesados deben ser descargados desde la parte superior para adoptar una depositación en pendiente. La pulpa fluirá aguas abajo hasta encontrar una pendiente de menor inclinación que su condición de equilibrio, la que depende de la consistencia. Así, los relaves espesados depositados en valles o cerros fluirán hasta encontrar una obstrucción topográfica o un muro. En terrenos planos se suele descargar desde una torre artificial, resultando una loma o cono de relaves.



Figura 3.2. Depósito convencional v/s Depósito de espesados.

Generalmente, gracias al espesamiento, el depósito de pasta recibe entre la tercera y la quinta parte del agua que recibiría en una descarga de relaves convencional. Por lo tanto, sólo se requiere un pequeño dique para contener las aguas lluvias y no existe agua de proceso recuperable. Desde el punto de vista de estabilidad sísmica de un depósito en pendiente, el objetivo es conseguir que el material se comporte como un suelo denso y no licuable; con el método TTD, se aprovechan dos vías de consolidación que permiten lograr este objetivo.

Para faenas de pequeña escala, los relaves espesados o en pasta pueden ser transportados en camiones desde las instalaciones de operación y descargados en el sitio de disposición final. Una vez depositados, se dejan secar y se pueden acopiar. Esta forma de acumular, permite minimizar la superficie de suelo cubierto con relaves, realizar un cierre progresivo y al cese de operaciones, el depósito puede ser dejado sin requerir medidas adicionales de cierre.

Para faenas de mayor tamaño, por economía de escala para el manejo de materiales, el sistema considera el uso de bombas o cintas transportadoras hasta un repartidor que realiza la disposición final.

4.- CONCEPTOS REOLÓGICOS.

Los Relaves Espesados o en Pasta por lo general presentan un comportamiento no newtoniano, de modo que la determinación de las condiciones de funcionamiento del sistema de disposición de relaves requiere un entendimiento cuidadoso de todas las características reológicas del material.

4.1.- IMPORTANCIA DE LOS CONCEPTOS REOLÓGICOS.

La Reología es el estudio de la deformación y el flujo de una materia. En términos de flujo de fluidos, los materiales pueden clasificarse como fluidos newtonianos y no-newtonianos. La viscosidad η de un fluido es definida como la proporción entre el esfuerzo de corte τ y la velocidad de deformación γ como muestra la Ec. 4.1.- En muchos flujos, la velocidad de deformación es equivalente al gradiente de velocidad.

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad \text{Ec. 4.1.-}$$

Los fluidos newtonianos exhiben una relación lineal entre la aplicación de un esfuerzo de corte y la velocidad de deformación resultante, como se muestra en la curva A de la Figura 4.1.

El movimiento del flujo es iniciado en cuanto el esfuerzo de corte es aplicado. La relación lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación indica una viscosidad constante.

Los relaves provenientes de la concentración de un mineral a menudo muestran un comportamiento de flujo no newtoniano, los cuales se caracterizan por poseer un esfuerzo umbral (yield stress).

El esfuerzo umbral es el esfuerzo de corte mínimo que debe ser excedido para que el fluido se ponga en movimiento. Para aplicaciones de fuerzas por debajo del esfuerzo umbral, la red de partículas de la suspensión se deforma elásticamente (comportamiento de un sólido), con la recuperación completa de la deformación una vez retirada la fuerza aplicada.

Cuando el esfuerzo umbral es excedido, la suspensión exhibe el comportamiento de un líquido viscoso donde la viscosidad es por lo general una función de la velocidad de variación de la deformación (shear rate). El comportamiento del esfuerzo umbral es mostrado por las relaciones de las ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned} \gamma &= 0 & \tau &< \tau_y \\ \tau &= \tau_y + \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma} & \tau &> \tau_y \end{aligned}$$

La curva B de la Figura 4.1 nos muestra el esfuerzo umbral seguido de una relación lineal entre un esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de deformación generada, este comportamiento comúnmente es conocido como comportamiento Bingham. Aunque no una viscosidad verdadera según la Ec. 4.1, el gradiente de esta línea está mandado por la viscosidad plástica de Bingham.

En adición de un esfuerzo umbral, la viscosidad del material puede variar con la velocidad de deformación. Cuando la velocidad de deformación aumenta, los materiales pseudoplásticos exhiben una disminución en la viscosidad (curva C, Figura 4.1), los materiales dilatantes exhiben por su parte un aumento de la viscosidad con el aumento de la velocidad de deformación (curva D, Figura 4.1).

El comportamiento de los materiales dilatantes, aunque es relativamente muy raro, algunas veces ha sido observado en suspensiones de minerales.

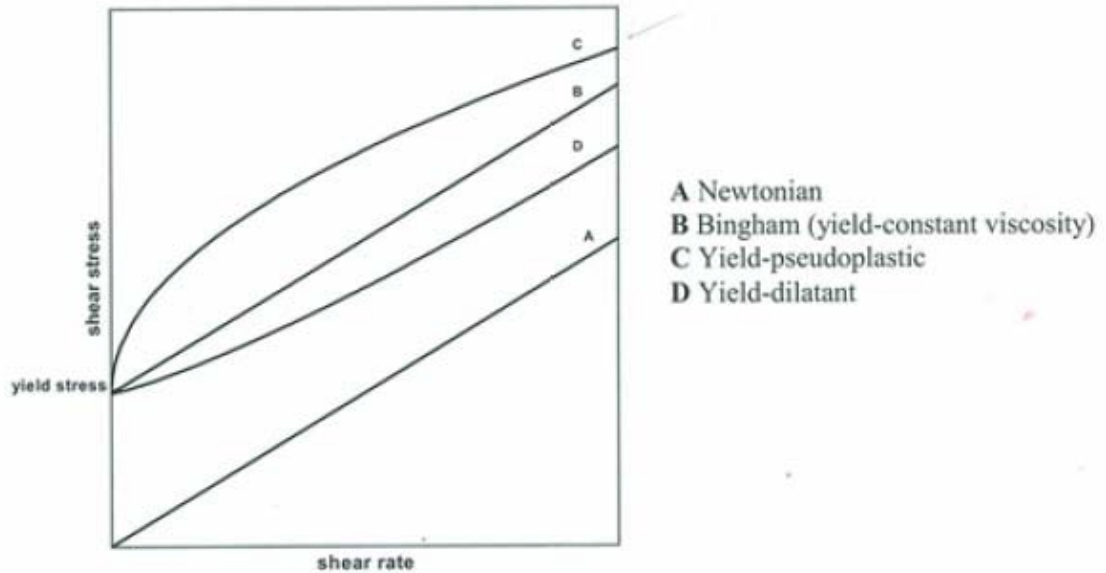


Figura 4.1. Curva típica de fluidos.

Para fluidos de categorías diferentes, varios modelos empíricos se han utilizado para describir el comportamiento de los flujos. Las ecuaciones comúnmente más utilizadas son las de Ostwald de Waele modelo para materiales con fluidos pseudoplásticos y dilatantes, el modelo de Bingham para materiales con esfuerzo umbral y el modelo de Herschel Bulkley para materiales con esfuerzo umbral, pseudoplásticos y dilatantes.

Ostwald-De Waele power law model; $\tau = K\dot{\gamma}^n$
Bingham Model; $\tau = \tau_B + \eta_B \dot{\gamma}$
Herschel Bulkley Model; $\tau = \tau_{HB} + K\dot{\gamma}^n$

Figura 4.2. Modelos empíricos para la descripción del comportamiento de flujos.

La naturaleza pseudoplástica de los relaves industriales, como por ejemplo el fango rojo en la Industria del Aluminio, es atribuida a la alineación de las partículas. Un aumento de la velocidad de deformación, causa la alineación instantánea de las partículas en la misma dirección que el gradiente de velocidad, por lo tanto es entregada una resistencia inferior para fluir. Como tal, la suspensión mostrará una disminución de la viscosidad con el incremento de la velocidad de deformación.

Una remota desviación del comportamiento de un flujo newtoniano es el resultado de una dependencia del tiempo o Tixotropía.

La Tixotropía es el resultado de una destrucción estructural de los enlaces, debido a un gradiente de velocidad, se manifiesta en si mismo como una disminución en la viscosidad y el esfuerzo umbral a medida que pasa el tiempo de aplicación, manteniéndose constante la velocidad de deformación.

La estructura puede volver a recuperar su forma inicial dejándola un tiempo en reposo.

4.2.- REQUERIMIENTOS REOLÓGICOS PARA LA DEPOSITACIÓN DE RELAVES ESPESADOS O EN PASTA.

Un entendimiento de la reología de los relaves es un requisito previo para cuantificar la deposición y el comportamiento de los relaves espesados.

El requerimiento esencial para la disposición en seco es que los relaves deben ser depositados con un esfuerzo de corte suficiente para apoyar las partículas más grandes y asegurar una suspensión homogénea en donde la segregación no ocurrirá.

La segregación en la depositación causará un depósito no uniforme, una clasificación por tamaño de partículas y un uso ineficiente del área de disposición. La relación entre la concentración de sólidos y el esfuerzo de corte debe ser determinada para indicar la concentración mínima necesaria para obtener un esfuerzo de corte ideal.

La caracterización reológica de relaves provenientes de la concentración de un mineral requiere de técnicas y equipamientos especializados. Muchos investigadores de este campo han completado una significativa cantidad de trabajos acerca de mediciones del esfuerzo de corte de suspensiones de minerales. El instrumento vane-shear permite la determinación directa y exacta del esfuerzo cortante en un sólo punto. Muchos investigadores por todo el mundo han adoptado el método vane-shear y han confirmado su aplicabilidad para todo tipo de materiales.

En una tentativa para simplificar las mediciones del esfuerzo cortante, los ensayos de abatimientos "slump test" han sido modificados para evaluar con exactitud el esfuerzo de corte de suspensiones minerales.

Los ensayos de abatimientos "slump test" son realizados usando sólo un cilindro y una regla, eliminando la necesidad de equipamiento sofisticado y permitiendo fácilmente la medición del esfuerzo cortante in-situ por operadores de una planta.

Las propiedades de flujo de suspensiones concentradas de minerales varían considerablemente con la concentración y el tipo de sólidos; sin embargo, un número de características comunes han sido observadas para suspensiones concentradas en general.

La fuerte dependencia de la reología sobre la concentración es ejemplificada en la Figura 4.3. Esta figura muestra el esfuerzo de corte como una función de la concentración para un número determinado de mezclas industriales.

Aunque la relación varía para diferentes materiales, todos los materiales exhiben un exponencial aumento del esfuerzo cortante con la concentración. Además, para todos los materiales el esfuerzo de corte comienza a aumentar rápidamente entre los 80 y 100 [Pa], independientemente de la concentración.

La presencia de un esfuerzo cortante es esencial para la disposición en seco de relaves espesados debido a que asegura que el material será depositado con los ángulos requeridos para la estabilidad del depósito y una capacidad de almacenaje máxima. Un esfuerzo de corte adecuado también asegura que la segregación de tamaño de partícula no ocurra, generando relaves homogéneos.

La concentración a la cual el esfuerzo de corte comienza a elevarse rápidamente nos indica que a esa concentración se han optimizando los requerimientos energéticos de bombeo.

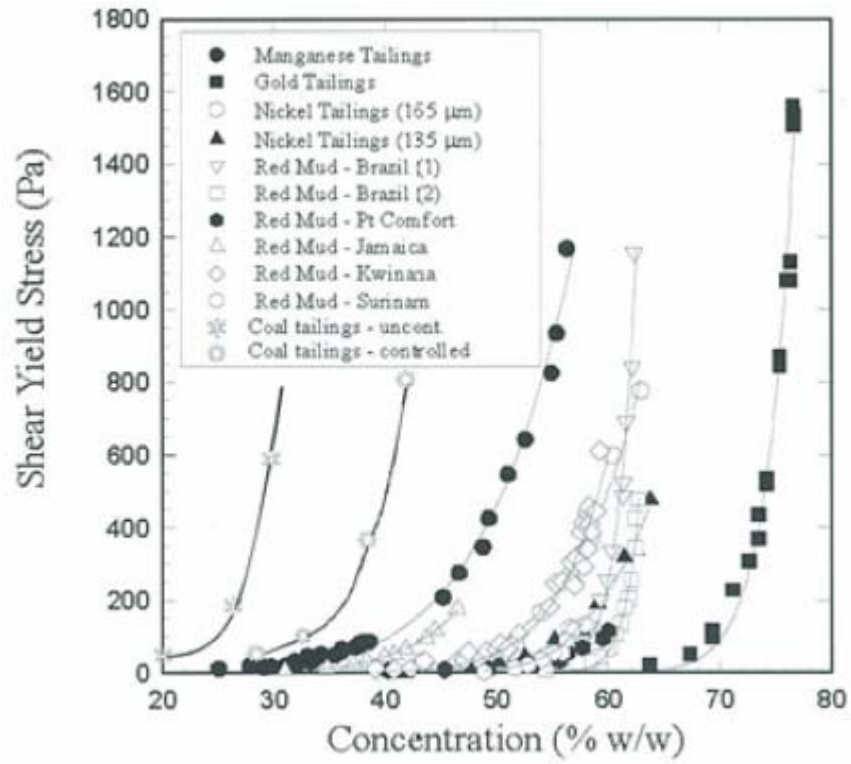


Figura 4.3. Esfuerzo de corte como una función de la concentración para distintos tipos de relaves.

4.3.- REQUERIMIENTOS REOLÓGICOS PARA EL TRANSPORTE POR TUBERÍAS.

La manipulación de las propiedades reológicas de un material para alcanzar los requerimientos de inclinación es importantísima debido a su efecto en los requerimientos de transporte por tubería, requerimientos que deben ser considerados.

El esfuerzo de corte determina el diferencial de presión mínimo requerido por el flujo. Una combinación de esfuerzo de corte y viscosidad dictará las pérdidas diferenciales de presión esperadas en la tubería.

La medición fundamental del comportamiento de un flujo puede ser emprendida usando un tubo capilar reométrico. El tubo capilar reométrico genera datos de esfuerzo de corte y velocidad de deformación que se utilizan para la determinación de los requerimientos energéticos de bombeo y la descripción de la influencia tixotrópica y pseudoplástica.

La Figura 4.4 muestra la disminución de la viscosidad con el aumento de la velocidad de deformación (fluidos pseudoplásticos) para un número determinado de concentraciones de fango rojo (Industria del Aluminio).

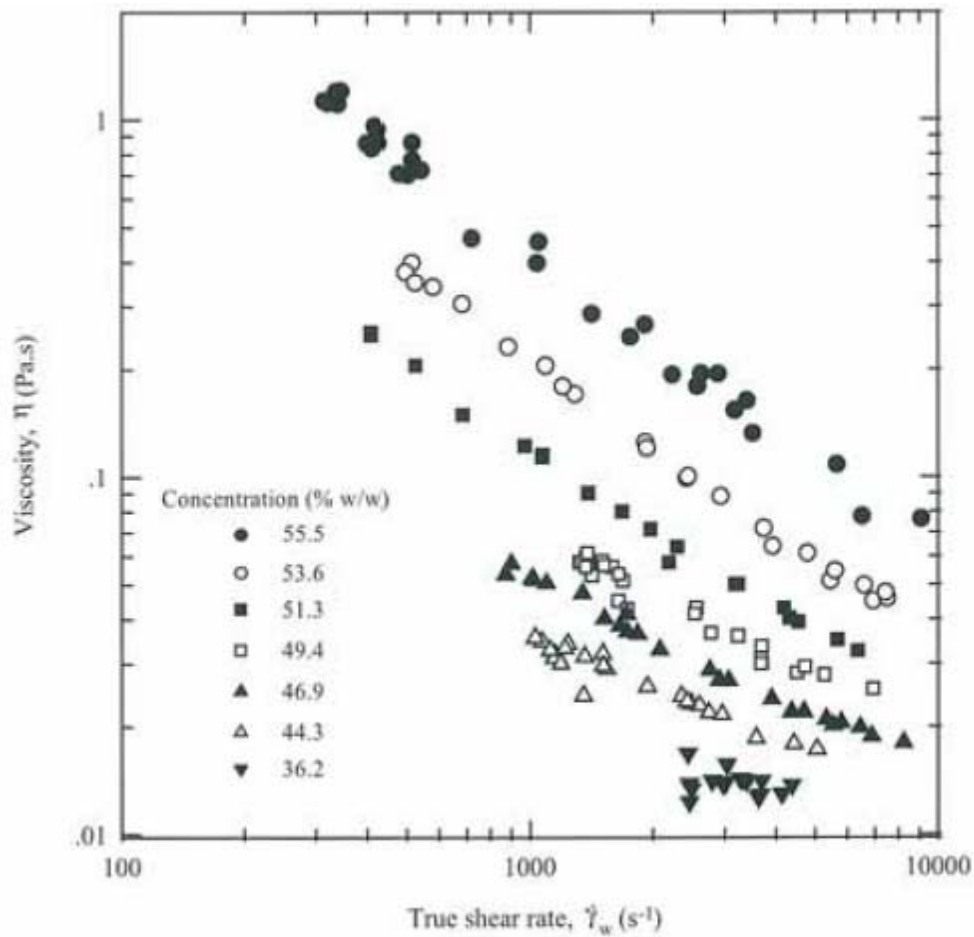


Figura 4.4. Fango rojo; Equilibrio de viscosidad v/s velocidad de deformación para varias concentraciones de sólidos en la Industria del Aluminio.

No solo es suficiente determinar la concentración correspondiente a la viscosidad y el esfuerzo de corte requerido en el sitio de disposición, y entonces operar el espesador para producir esta concentración de relaves, deben además los relaves experimentar una destrucción estructural durante el transporte por cañerías.

4.4.- CONCLUSIONES.

Debido a lo complejo de la reología de relaves bajo cortes y fuerzas compresivas, el conocimiento de las propiedades reológicas permite el diseño de un esquema de disposición que toma las mejores ventajas del comportamiento del material sin afectar el funcionamiento de la planta. Además, los cambios o manipulación de la reología pueden facilitar la recogida de desperdicios de una manera mucho más ecológica y económicamente favorable que el método convencional existente.

La puesta en práctica y la optimización de métodos de disposición en seco implican tres estudios simultáneos de la reología, para determinar:

1. La concentración requerida para alcanzar el grado óptimo y las características de secado del relave una vez depositado.
2. Las condiciones óptimas para el transporte por tubería.
3. La viabilidad de desecación de la mezcla a la concentración requerida.

Como los factores ambientales se traducen en publicaciones económicas, el empuje para reducir el volumen ocupado por cualquier masa dada de desperdicios usando métodos de disposición en seco gana mucha popularidad.

El uso de información reológica es de alta importancia en la evaluación de las características, el transporte y el desecamiento de minerales de relaves espesados.

5.- CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.

Las características del material particulado son relevantes para la preparación de relaves espesados o en pasta.

Una vez que los minerales de interés han sido extraídos de la mena, molidos y procesados, los sólidos finos permanecen habitualmente con un contenido húmedo mucho mayor que el contenido en un lodo. El proceso de espesamiento debería resultar en una reducción del contenido de humedad y así proporcionar una mayor solidez al material. Aunque las pastas y relaves espesados son sobre todo completamente saturados, los sólidos contenidos están en un porcentaje en peso considerablemente superior que en las condiciones iniciales del lodo.

5.1.- CARACTERIZACIÓN DE LOS SÓLIDOS DE UN RELAVE. "PRE-TRATAMIENTO"

5.1.1.- Distribución de Tamaño de Partícula:

Las pruebas de distribución de tamaño de partícula o distribución de tamaño de grano definen las dimensiones relativas de diferentes tamaños de partículas en una masa de suelo. Esta es una evaluación geotécnica estándar; el proceso " Análisis de Clasificación " (por ejemplo, el ASTM, AASHO o procedimientos manuales similares) es realizado por la mayor parte de los laboratorios de pruebas de suelo.

La distribución de partículas más gruesas que 75 [micrómetros] es determinada usando un método mecánico que utiliza tamices conocido el tamaño de apertura, mientras la distribución de partículas más finas que 75 [micrómetros] por lo general son determinadas usando el método del Hidrómetro.

Para el último caso, hay veces que se hace utilizando un analizador de tamaño de partícula por Difracción Láser, como el analizador Malvern, pero éste es un equipo muy caro y la exactitud añadida no es por lo general suficiente para garantizar su empleo.

Con algunos relaves, en particular aquellos con un alto contenido de minerales de arcilla, la distribución de tamaño de partícula indicada por pruebas, puede ser afectada enormemente por la química del fluido de prueba, en donde la química coloidal puede tener un impacto sobre los resultados del Hidrómetro, en estos casos se recomienda precaución al interpretar los resultados.

Los datos de una prueba de distribución de tamaño de partícula son usados para clasificar el suelo según un juego específico de reglas, como el Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (USCS). Considerando las potenciales características de espesamiento de un relave en particular, la sabiduría universal parece ser que mientras más fino sea el material, mayor es la ventaja para ser espesado. Sin embargo, en el espesamiento de materiales más finos es en donde ocurre la mayoría de los problemas, debido a que su comportamiento invariable se hará mucho más pronunciado.

Una regla básica que se ha desarrollado es que debe existir entre un 15 a un 20% de finos (partículas inferior a 20 [micrones]) para que un relave pueda ser transformado en pasta.

5.1.2.- Mineralogía:

Cuando se considera la transformación de los relaves en relaves espesados o en pasta, es útil caracterizar totalmente como sea posible la mineralogía del relave, p.ej. utilizando la técnica de Difracción de Rayos X.

Aunque sea útil caracterizar la mineralogía de la corriente de relaves, es importante distinguir entre partículas clasificadas como arcilla y partículas de mineral de arcilla verdadera.

Muchas operaciones de minería requieren de la trituración y molienda de los minerales duros provenientes de la mena. El resultado de fino puede ser de hasta 2 micrómetros, pero consiste esencialmente en harina de roca y contienen muy poco o algo de minerales de arcilla verdaderos.

Los verdaderos Minerales de arcilla son principalmente silicatos de aluminio hidratados, los cuales poseen dos componentes estructurales básicos: uno es el tetraedro de Silicio - Oxígeno y el otro es el octaedro, en el cual un átomo de aluminio, magnesio y/o hierro es rodeado por seis aniones (2 ó 4 oxígenos y 4 ó 2 hidróxidos).

Como una consecuencia de un proceso llamado sustitución isomórfica, los minerales de arcilla (con la excepción de la Caolinita) desarrollan una carga negativa. Para conservar la neutralidad eléctrica los cationes son atraídos y sostenidos por las partículas de arcilla. La cantidad de cationes de intercambio requeridos para equilibrar la deficiencia de carga en las arcillas es llamada "Capacidad de intercambio de catión" y por lo general es expresada en las unidades de miliequivalente por 100 gramos de arcilla seca. Esta propiedad eléctrica de los minerales de arcilla puede tener un dramático impacto sobre el comportamiento de las arcillas en una mezcla y de ahí hacer impacto en el proceso de espesamiento.

Es común usar alguna forma de medida indirecta para determinar el grado de plasticidad de un material. A modo de ejemplo, en la ingeniería geotécnica, se usan medidas llamadas límite líquido y límite plástico. El límite líquido (w_L) se aproxima al contenido de agua (gravimetría) en el cual un suelo tiene cero esfuerzo de corte.

El límite plástico (w_p) tiene un contenido de agua sobre el cual el suelo tiene un comportamiento plástico (es algo similar al límite entre la pasta y la torta).

La diferencia entre estos dos valores es el llamado índice de plasticidad (I_p) el cual es usado extensamente en la caracterización de suelos arcillosos ($I_p=W_L-W_p$).

Un ejemplo de esto es " La carta de plasticidad ", mostrado en la Figura 5.1, que traza el índice de plasticidad versus el límite líquido.

Dependiendo de los valores obtenidos en la carta, el suelo es clasificado en distintos tipos, el ejemplo de algunos valores típicos de límite líquido y límite plástico para minerales de arcilla se presenta en la Tabla 5.1.

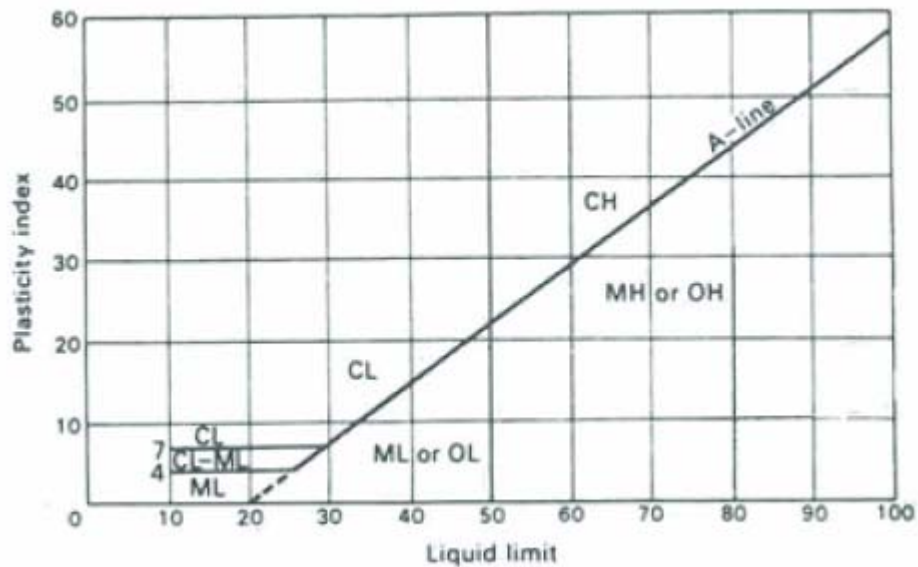


Figura 5.1. Carta de plasticidad para la caracterización de suelos.

Estos límites, por lo general son llamados límites de ATTERBERG, probablemente estas correlaciones son parámetros utilizados para una clasificación reológica y así proporcionar un eslabón entre la ingeniería geotécnica y el procesamiento de minerales. Estos límites presentan cambios con la adición de aditivos como los floculantes y así quizás podrían ser utilizados para caracterizar cambios en el comportamiento ingenieril como resultado de procesos de espesamiento.

Mineral	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)
Montmorillonite	100-900	50-100
Illite	60-120	35-60
Kaolinite	30-110	25-40
Attapulгите	160-230	100-120
Chlorite	44-47	36-40

Tabla 5.1. Valores típicos de límite líquido y límite plástico

5.1.3.- Procesos de Calidad del Agua:

El PH cumple un papel importantísimo en el comportamiento de las suspensiones ricas en arcilla, estos efectos son mayores para la caolinita, menor para la illita y relativamente sin importancia para la montmorillonite. De hecho, para la caolinita, el PH puede ser el factor más importante para controlar la formación de sedimentos en suspensión. Ha sido encontrado que PH bajos promueven la interacción entre el borde del mineral cargado positivamente y la superficie cargada negativamente, conduciendo a la floculación de la suspensión, mientras que un alto PH por lo general promoverá la dispersión dentro de la solución.

Muchas operaciones mineras requieren de la trituración de la mena que es predominantemente rica en sílice. Las partículas de sílice son cargadas negativamente a un mayor PH lo que tendrá un efecto sobre la elección del floculante para el proceso de espesamiento. Por el contrario, las partículas de magnesio tienden a tener cargas positivas para PH altos como 12 y claramente requerirán del empleo de floculantes diferentes a los usados en los relaves ricos en sílice. Para los relaves en particular los cambios en el PH podrían afectar la magnitud de la carga eléctrica.

Por ejemplo: considere los resultados mostrados en la Figura 5.2 para los relaves de circonio. La pregunta que surge es como caracterizar mejor la carga eléctrica. Una medida que parece ser comúnmente usada es la del zeta-potencial, la cual es una medida de la densidad de carga superficial.

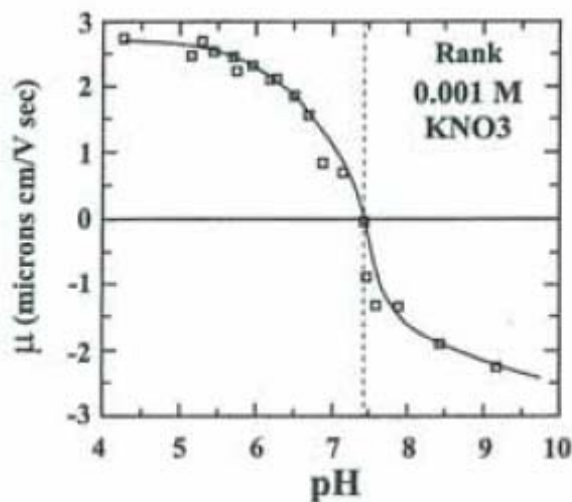


Figura 5.2. Variación de la movilidad electroforética con el pH para relaves de Circonio.

Las fuerzas repulsivas son el resultado del aumento exponencial de la carga en la partícula. La magnitud de esta fuerza es también directamente proporcional al grosor de la capa difusa que rodea la partícula y el grosor de esta capa es una función de la fuerza iónica del agua de proceso de los relaves. Esto tiene un efecto de cationes monovalentes, particularmente el sodio y el litio, promoviendo la dispersión, mientras que las suspensiones de arcilla presentan cationes di y trivalente promoviendo la floculación. Claramente, desde una perspectiva de espesamiento, una estructura dispersada resultará un relave "más denso" que una estructura floculada.

La interacción del agua de proceso y la química de la partícula es claramente compleja y no es totalmente entendida en la actualidad. Sin embargo, como un punto de partida para decidir si floculación y espesamiento probablemente son acertados, el conocimiento del pH, la fuerza iónica del agua de proceso y de ser posible, del relave mismo, son necesarios. Además, alguna medida de la carga superficial de las partículas del relave y también su mineralogía son importantes.

5.1.4.- Representatividad:

Como con muchos componentes de una operación de procesamiento mineral, el éxito de un proceso de espesamiento dependerá de cambios en los parámetros de entrada. En particular, como las diferentes partes del cuerpo mineral son extraídas. Puede haber cambios significativos del tipo de roca y del grado de desgaste de la roca del mineral. Estos cambios, probablemente causan cambios en las características de las partículas del relave como aquellos hablados anteriormente. Es por lo tanto importante asegurar que todas las pruebas de caracterización de pre-tratamientos sean realizadas sobre tantas muestras de la mena como sea necesario para asegurar que el espectro de variabilidad sea cubierto.

5.2.- CARACTERIZACIÓN DEL RELAVE ESPESADO O PASTA. “POST-TRATAMIENTO”

Una vez que el relave ha sido espesado, tiene que ser transportado a la disposición final. El transporte por lo general consistirá en el de bombeo por tuberías. Existen ciertas características del relave espesado o en pasta que determinan la viabilidad de varias operaciones de bombeo y estos factores serán detallados a continuación.

5.2.1.- Transporte:

La consistencia de los relaves espesados produce un material viscoso que por lo general exhibe un comportamiento no-newtoniano. Para estos materiales, dos son las variables de importancia: la viscosidad y el esfuerzo de corte.

◀ Viscosidad:

La viscosidad de un relave espesado o en pasta al ser un flujo no-newtoniano, varía con la velocidad de deformación. La disminución de la viscosidad con el aumento de la velocidad de deformación corresponde a un fluido “pseudoplástico” y puede ser observada para muchos materiales viscosos.

Aunque hay bastantes técnicas para medir la viscosidad, el método mas apropiado para mezclas de minerales (que pueden contener partículas relativamente grandes) es el método del Tubo Capilar Reométrico.

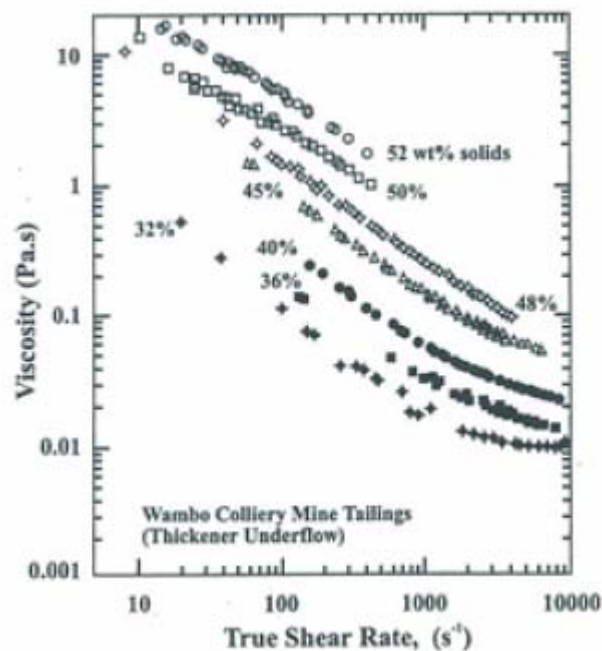


Figura 5.3. Variación de la viscosidad con el esfuerzo de corte de corrientes subterráneas de relaves espesados de carbón.

◀ Esfuerzo de Corte:

El yield stress o esfuerzo de corte corresponde al esfuerzo que debe ser excedido antes de la deformación para que así la mezcla pueda fluir. Rara vez es un valor exacto, este puede variar con el valor de la deformación y la naturaleza de la carga

de tensión. Sin embargo, en general, es una fuerza muy baja comparada con fuerzas usualmente encontradas en los suelos a través de prácticas ingenieriles de geotecnia.

Una de las técnicas preferidas para hacer esta medida es el “shear vane”, que consiste en un aparato que comúnmente también es usado en la ingeniería geotécnica.

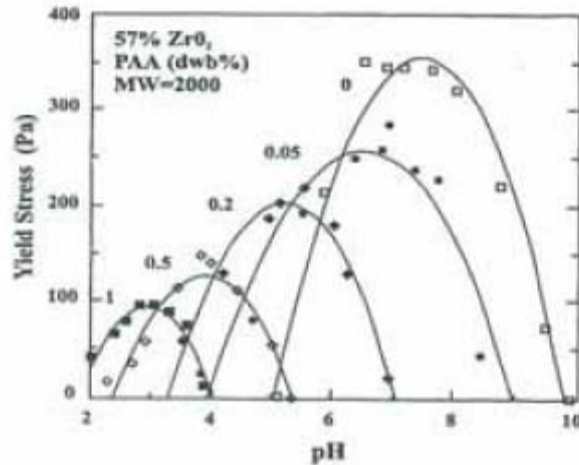


Figura 5.4. Variación del esfuerzo de corte con el PH para relaves de Circonio.

La Figura 5.4 muestra la variación del esfuerzo de corte con el PH para varias concentraciones de sólidos de una suspensión de Circonio. Para todos los valores de concentración de sólidos, existe un valor neutro de PH en el cual el esfuerzo de corte es un máximo.

El esfuerzo de corte de un relave espesado o en pasta puede ser afectado por la adición de floculantes y el costo del transporte del material puede ser optimizado manipulando la adición de floculante y el PH del relave.

La viscosidad y el esfuerzo de corte de los relaves influyen en la energía de bombeo requerida para transportar el material en una tubería causando allí un contenido de sólidos óptimos en donde ésta energía es un mínimo.

5.2.2.- Depositación:

Las principales preocupaciones de un ingeniero geotécnico en relación a un proyecto que implica la tecnología de depositación de relaves espesados o en pasta probablemente sean las propiedades ingenieriles de los relaves una vez que ellos hayan sido depositados.

◀ Geometría del Depósito:

Cuando los relaves son depositados como una mezcla, ellos fluyen como un líquido desde el punto de descarga hacia el punto más bajo del acorralamiento. Este flujo es típicamente separado y serpenteado sobre la playa de depositación. Si el contenido de agua de deposición es alto, como ocurre con la disposición convencional de relaves, la segregación de las partículas más gruesas de las más finas ocurrirá, las partículas más gruesas quedan cerca del punto de deposición y las partículas más finas son transportadas mucho más lejos.

En el proceso de conducción por gravedad, la cantidad de segregación que ocurre y la distribución de los tamaños de partículas a lo largo de la “playa” de depositación es una función tanto del contenido de agua del depósito, la distribución del tamaño de partícula, como de la mineralogía del relave.

Si una corriente de relaves es lo suficientemente espesada, la segregación de partículas será sumamente limitada (esencialmente no ocurrirá en circunstancias ideales) y mezclas aún de muy de alta densidad (y posiblemente algunas pastas) fluirán como un líquido viscoso.

Las cuestas de la playa de depositación serán una función de muchos parámetros incluyendo, desde luego, el contenido de sólidos, la consistencia y la viscosidad del producto espesado.

Basados hasta el momento en la experiencia industrial, aún con mezclas de alta densidad las cuestas tienden a ser relativamente planas (1 el 2 %) en la mayoría de

los casos aunque pueden haber excepciones. Se espera que los relaves espesados con consistencia de una pasta formaran una playa ligeramente más escarpada.

◀ **Fuerza de Corte:**

La fuerza de corte de un depósito de relaves es una consideración crucial para determinar la estabilidad del depósito.

Los análisis de estabilidad generalmente son realizados para lo que es llamada condiciones "inagotadas" "y agotadas". Parámetros de fuerzas y técnicas de pruebas diferentes son usados para estos dos accesos, pueden ser pruebas in situ o bien de laboratorio, estas pruebas son utilizadas para obtener parámetros relevantes. Sin embargo, y sin excepciones, independientemente del acercamiento analítico (p. ej. inagotado contra agotado), el depósito de relaves tiene una sensibilidad inherente a la tensión (mientras más grande es esta tensión, más "de un fracaso" es percibido) y todas las aproximaciones deberían proporcionar esta sensibilidad.

Con las cuestas apacibles que probablemente son resultado de la deposición de mezclas de relaves espesados de muy alta densidad, las consideraciones de estabilidad tienen probablemente una importancia menor, pero pueden tener implicancias para las cubiertas de cierre si las tensiones que son resultado "de un incidente" conducen al comprometimiento de la integridad de la cubierta. Si una estrategia particular de acorralamiento es usada lo que implica la construcción de presas con una cuesta relativamente empinada, entonces la estabilidad puede hacerse en cuestión para toda la etapa del proyecto.

En depósitos convencionales de relaves, la segregación de las corrientes de relaves por lo general causa el desarrollo de partículas más gruesas adyacentes al perímetro de empinamiento. La tensión cortante de estas partículas es mucho más alta que las partículas más fina, las cuales se ubican en el centro del acorralamiento. Aunque esto no entregue ninguna garantía de estabilidad para instalaciones convencionales,

como queda bien demostrado por toda la historia de fracasos para tales instalaciones, esto ayuda en el hecho en que suministra alguna ventaja geotécnica a los depósitos convencionales de relaves.

Debido a la naturaleza no segregable de los relaves espesados de alta densidad, esta fuerza diferencial no se desarrollará y el relave depositado sobre el perímetro del acorralamiento probablemente tendrá una inferior tensión cortante que los depósitos convencionales de relaves.

5.2.3.- Consideraciones de Licuefacción:

Aunque es eventualmente raro el fracaso de un depósito de relaves debido a la licuación, es relativamente catastrófico y probablemente el contribuidor primario a todas las percepciones públicas negativas de estas instalaciones.

La licuefacción puede ocurrir principalmente bajo condiciones transitorias (es decir sismos) o bien condiciones estáticas.

La licuefacción inducida por los sismos probablemente es mayormente conocida que la licuación estática. Independientemente del mecanismo que gatille la licuefacción, un relave sólo se licuará si posee un volumen en un estado potencialmente licuable (algunas veces llamado "meta-estable" "o frágil").

Existe un estado que es sensible a la licuefacción. Exactamente como determinar esta potencial sensibilidad a la licuefacción esta todavía sujeta a mucha investigación y conjeturas, sin embargo en las consideraciones para el uso de relaves espesados y en pasta, esto es un factor que debe ser evaluado en particular si los relaves espesado fueran co-depositados con una fracción gruesa.

5.2.4.- Consolidación y Desecamiento de los depósitos de Relaves Espesados y en Pasta:

En un proceso convencional de depositación de relaves hay un volumen grande de agua asociada con la depositación que será expulsada o bien permanecerá dentro de los vacíos del depósito de relaves. Como no toda el agua puede permanecer en los vacíos de los relaves, la expulsión del agua puede ser realizada rápidamente a través de flujos superficiales durante la deposición o bien a través del tiempo. Otra vía de expulsión puede ser por el drenaje descendente (en algunos casos en los mismos sistemas de drenajes construidos) o bien el drenaje ascendente, en el caso de que las charcas de agua se encuentren sobre la superficie, fluyen sobre la cuesta o se evaporan.

Independientemente de cómo se denomine el proceso de post-depositación, el resultado es una disminución en el volumen ocupado por las partículas sólidas y este proceso es comúnmente llamado consolidación.

La consolidación es un proceso dependiente del tiempo y en depósitos de relaves de grano fino puede ser una preocupación de interés, debido a que aún al final de la vida operacional, el relave todavía puede estar no consolidado y dificultar la rehabilitación y un cierre fácil.

Muchos depósitos de relaves espesados alcanzarán una condición de consolidación primaria dentro de un tiempo muy próximo a la deposición y facilitando esto de una forma muy temprana el acceso al relave para su rehabilitación u otras actividades.

La mayor parte de las operaciones de relaves en Australia, Sur África, el cinturón de cobre Chile/Perú y el Sureste de Estados Unidos aprovechan las relativas altas tarifas de evaporación neta que predominan en la mayor parte de sus áreas mineras, esto es lo que a menudo se llama Resecamiento Solar.

El ressecamiento solar requiere que se permita el tiempo de contacto suficiente entre los relaves depositados y la fuente solar para que ocurra el ressecamiento.

Esta técnica es utilizada en muchas regiones.

5.2.5.- Curva de Retención de Agua:

La relación existente entre retención de agua / fuerza de succión es esencialmente la capacidad de un suelo en particular (con una densidad particular) para conservar el agua cuando se encuentra sujeto a una fuerza de succión (o una presión de poros negativa).

Se muestra un ejemplo típico de un relave espesado de cobre-cinc en la Figura 5.5 y como puede ser visto, la relación existente es por lo general sumamente no lineal.

Como la succión gradualmente aumenta para materiales incompresibles como por ejemplo los relaves de grano grueso, no hay por lo general ninguna disminución inmediata en el contenido de agua del suelo hasta que el valor de entrada de aire sea alcanzado. Esto manda el valor de succión y depende del aire que entra en el esqueleto del suelo, el cual puede variar de unos tantos [Kpa] a varios [Mpa]. A partir de esto, los aumentos en la succión causan una reducción del contenido de humedad.

La naturaleza de esta relación es, sin embargo, sumamente variable. Un suelo o relave arcilloso (es decir compresible) al principio soportará relativamente altas succiones antes de comenzar a desaturarse (pero habrá sufrido una reducción posiblemente muy significativa de volumen antes de este punto).

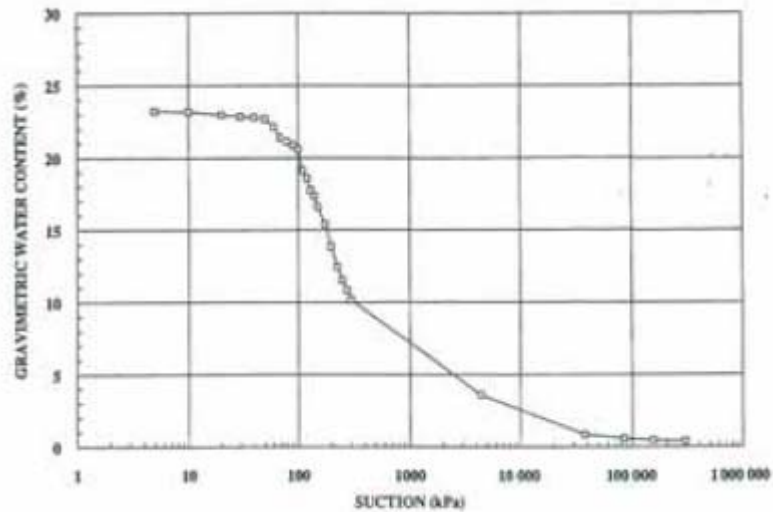


Figura 5.5. Curva de retención de agua para relaves de cobre-cinc.

La importancia de esta relación en el contexto de los depósitos de relaves espesados o en pasta es la capacidad de un material de no segregarse y de conservar la humedad (para así no de-saturarse) en las condiciones climáticas predominantes.

Esto es visto como una ventaja en muchos casos en donde existe la necesidad de prevenir el ingreso de oxígeno hacia los relaves, debido a la oxidación de mineral sulfurados ya que su mineralogía es muy susceptible al oxígeno.

Un alto valor de aire de entrada también puede ser ventajoso en climas semiáridos, donde existe una significativa densificación.

5.2.6.- Conductividad Hidráulica:

La conductividad hidráulica (o el coeficiente de permeabilidad) se relaciona con el grado en el cual el agua de relaves fluirá bajo un gradiente hidráulico aplicado. En una operación de depositación de relaves espesados hay muy poca agua libre en la mayor parte de las circunstancias. Si la técnica utilizada es La Descarga Central Espesada (CTD), cualquier agua libre debería dirigirse a la periferia del depósito cónico y así no se desarrollará una descarga centralizada.

Las mediciones de conductividad hidráulica pueden ser hechas in situ o bien en el laboratorio, basadas en muestras obtenidas en el mismo terreno. En el último caso es muy difícil de obtener muestras realmente representativas, porque muchos relaves son relativamente poco cohesionables y fácil de cambiar por los métodos de muestreos que implican la perforación y la inserción de una cubierta.

5.2.7.- Geoquímica:

El riesgo potencialmente ambiental de los relaves es determinado a través de su acidez, alcalinidad, sensibilidad a la lixiviación y sensibilidad a la oxidación. La acidez y la alcalinidad son determinados en la caracterización química. La sensibilidad a la lixiviación por lo general es evaluada usando el Procedimiento de Característica de Lixiviación Tóxica (TCLP) y la prueba de Extracción Secuencial (del MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE estadounidense 1990).

La sensibilidad a la oxidación es evaluada cuando hay presente sulfuros. Si estos se oxidan ellos liberarán iones de hidrógeno, como productos el sulfato y el Ion metálico. La sensibilidad a la oxidación es evaluada por la contabilidad ácida base.

6.- TEORÍA MECÁNICA DE LA SEDIMENTACIÓN.

En el anexo B-1 se presenta la Teoría Mecánica de Sedimentación tanto de una partícula esférica como de una no esférica.

➤ **Sedimentación:**

Se denomina sedimentación a la operación consistente en separar de una suspensión un fluido claro que sobrenada y una pulpa bastante densa que contenga elevada concentración de materias sólidas, en otras palabras se define como el asentamiento de una partícula o una suspensión de partículas, en un fluido por efecto de una fuerza externa, que puede ser la gravedad, fuerza centrífuga o cualquier otro tipo de fuerza.

Este campo se puede dividir en las operaciones funcionales de “Espesamiento” y “Clarificación”. El objetivo principal del Espesamiento es de incrementar la concentración de los sólidos en la corriente de salida, en tanto que el de la Clarificación es el de obtener un efluente claro. Estas dos funciones son similares y ocurren en forma simultánea, la terminología sólo permite hacer la distinción entre los resultados deseados del proceso primario. En general, los mecanismos de Espesamiento están diseñados para las condiciones de trabajo más severas impuestas por una gran cantidad de pulpa relativamente concentrada, en tanto los Clarificadores incluyen aspectos que aseguran esencialmente la eliminación completa de los sólidos en suspensión.

En la práctica industrial, el Espesamiento de las suspensiones acuosas es una operación continua que se realiza en los llamados “Espesadores”; grandes depósitos de forma cilíndrica con una gran relación diámetro/altura; a los cuales llega, por el centro o por el costado, la suspensión (pulpa), ocurriendo una separación de la pulpa más espesa que sale por el fondo ayudada por los rastrillos que posee para tal fin el espesador.

6.1.- MÉTODO TEÓRICO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÁREA UNITARIA DE UN ESPESADOR.

➤ Método de Coe M. S. & G. M. Clevenger:

Coe & Clevenger, estudiaron un método experimental basado en pruebas de sedimentación Batch, que permiten predecir la capacidad de un espesador continuo. Mediante dos series de pruebas obtienen los datos necesarios para poder efectuar los cálculos.

En la primera serie de experiencias se determina el área necesaria que debe tener un espesador para obtener un rebalse claro, sin sólidos y en la segunda serie de experiencias determinan el volumen necesario que debe tener el espesador para llevar la pulpa alimentada con una concentración dada, hasta una concentración mayor en la descarga del espesador. Es decir calcular el tiempo de retención.

Coe & Clevenger analizaron primeramente, el progreso de la sedimentación de una pulpa en un espesamiento discontinuo, para luego aplicar los conceptos y datos obtenidos, a un espesamiento continuo.

Observaron que al poner una pulpa en un cilindro o probeta de vidrio, después de mezclarla bien, se forma en toda la probeta una pulpa de concentración homogénea, poco tiempo después, esta adopta una estructura floculante, que luego de sedimentar durante breves instantes forma cuatro zonas distintas A, B, C, D como se indica en la Figura 6.1:

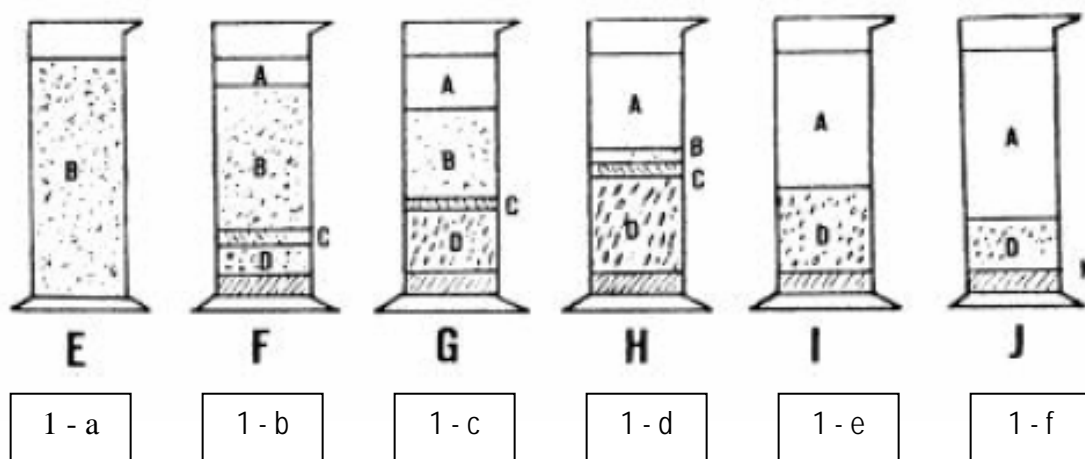


Figura 6.1. Representación gráfica de las cuatro zonas de sedimentación.

También observan que al iniciarse la sedimentación, las partículas se aproximan rápidamente a sus velocidades límites.

Las primeras partículas que llegan al fondo de la probeta, son los granos más gruesos, correspondientes a las arenillas presentes en la pulpa. Inmediatamente después y casi simultáneamente a la sedimentación de la arenilla se posan los flóculos más próximos al fondo, llenando los intersticios entre las partículas de arenilla y se depositan uno sobre otro, formando una zona que se designa por D y que se define como la porción de la pulpa en la que los flóculos considerados como cuerpos integrales, se posan hasta descansar directamente uno sobre otro. Después que la pulpa entra en la zona D, toda separación posterior del líquido tiene que producirse por la expulsión del líquido de los flóculos y de los intersticios entre ellos.

Inmediatamente encima de la zona D, se forma otra de transición C, esta zona presenta canales a través de los cuales asciende el fluido que es desalojado por los sólidos de la zona D al comprimirse.

En la pulpa de esta zona, el porcentaje de sólidos disminuye desde su parte inferior; donde los flóculos entran en la zona D; hacia la parte superior, constituyéndose con esto, una zona de concentración variable.

Encima de la zona C, está la zona B, de consistencia uniforme y constante de pulpa floculada y que tiene la misma consistencia que la pulpa de alimentación. Sobre ésta se encuentra la zona A, compuesta por líquido claro.

La probeta 1-a muestra la pulpa distribuida homogéneamente, que ocupa toda la altura y dispuesta para sedimentar, las probetas 1-b y 1-c muestran las etapas sucesivas de sedimentación, en donde las zonas A y D van creciendo a expensas de B y C.

Cuanto más avanza la sedimentación, las alturas de las distintas zonas van variando, para luego desaparecer B y C, quedando solamente A y D como lo indica la figura 1-e, cuando esto ocurre, es decir, cuando todos los sólidos se encuentran íntegramente en la zona D, se alcanza el “Punto Crítico de Sedimentación”, el cual se define como aquel instante de la sedimentación, en que se forma una interfase precisa, que limita el líquido claro y el sedimento.

A partir de este punto la sedimentación es extremadamente lenta y la operación misma consiste en un aplastamiento gradual de los sólidos, efecto que se denomina Compresión.

Finalmente cuando el peso de sólidos alcanza el equilibrio-mecánico con la fuerza de compresión de los flóculos, se detiene la operación como se indica en la figura 1-f.

En el espesamiento discontinuo o intermitente, las alturas de las distintas zonas varían en función del tiempo y cualquiera de las etapas descritas anteriormente, puede representar la situación en el espesador, según sea el tiempo que se haya dejado sedimentar la pulpa.

En una operación de espesamiento continuo, se presentan las cuatro zonas descritas, al estudiar la sedimentación intermitente, sin embargo, una vez estabilizada la operación las diferentes zonas se mantienen constante en su altura, es decir, cuando la alimentación al espesador es igual al líquido claro removido mas la pulpa espesada en la descarga.

En base a las observaciones anteriores, Coe & Clevenger proponen dos regímenes de espesamiento. Un régimen de asentamiento o “sedimentación libre” y uno de “compresión”.

El punto crítico de sedimentación indica el límite de ambos regímenes, es decir, el paso del régimen de sedimentación libre al de compresión.

◀ **Régimen de Sedimentación Libre:**

De acuerdo a Coe & Clevenger hay varias zonas en un espesador y el área que debe tener este se determina por las condiciones que ellos designan como zona de sedimentación libre. Las cuales se definen como zonas en donde los estratos o capas de flóculos que van descendiendo, a través del seno del líquido, no se interfieren unos con otros, es decir, caen libremente.

En un régimen de sedimentación libre, la cantidad de sólidos que puede sedimentar, a través de una sección transversal unitaria, es igual al producto de la velocidad de sedimentación de los sólidos por la concentración de los sólidos.

Coe & Clevenger, suponen tácitamente que bajo tales condiciones, la velocidad de sedimentación es función de la concentración de los sólidos. Entonces la capacidad de manejo de sólidos o paso de sólidos de cualquier zona o estrato, es solamente función de la concentración de los sólidos en la zona.

En un espesador continuo, los sólidos deben ser capaces de atravesar cualquier zona; entre la concentración inicial alimentada y la concentración final de descarga, a una velocidad igual o mayor que la correspondiente al flujo de pulpa alimentado, de otra manera se produciría una acumulación de sólidos, en cualquier estrato, en que la velocidad de los sólidos fuese menor que la correspondiente a la velocidad de alimentación, es decir habría una zona que limitaría la capacidad de manejo de sólidos, o bien una zona en que el paso de sólidos es menor que cualquier otra en el espesador. Por lo tanto si el espesador tuviese un área menor a la prevista, para manipular los sólidos, se formaría en el acto una acumulación de sólidos en un punto del espesador, que se desplazaría paulatinamente hacia arriba, hasta salir por el rebalse.

Por este motivo, el espesador debe tener una superficie lo suficientemente grande que permita el paso de los sólidos, a través de cualquier concentración, entre la alimentación y la descarga. De esta manera esta área máxima es la que ha de emplearse como base para el diseño del espesador.

Límite de la zona de asentamiento libre:

Cuando se efectúan ensayos, la velocidad de sedimentación de la pulpa, se determina por medio de lecturas tomadas en la unión de las zonas A y B, esto es, donde la superficie de la pulpa se une al líquido.

En la Figura 6.2 se ha representado las alturas de la pulpa (límite entre las zonas A y B) frente al tiempo.

Durante la primera etapa de asentamiento, la velocidad es constante, (régimen de asentamiento libre) como se muestra en la primera porción de la curva. A medida que el sólido se acumula en la zona D, la velocidad de sedimentación disminuye y desciende continuamente hasta que se alcanza la altura final.

El punto crítico se muestra en el gráfico, a partir del cual se inicia el régimen de compresión.

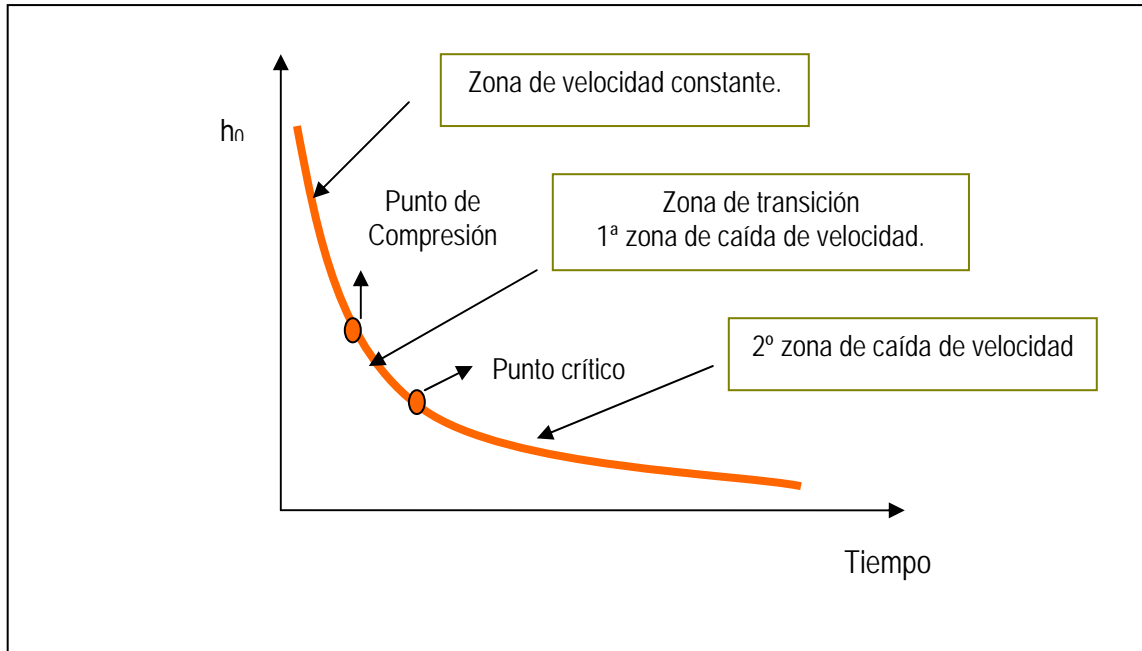


Figura 6.2. Gráfico de sedimentación. (Altura v/s Tiempo).

◀ Régimen de Compresión:

Coe & Clevenger definen el régimen de compresión como aquella zona en que los flóculos entran en contacto presionándose unos con otros, compactándose gradualmente y en que parte del líquido que ha acompañado a los flóculos hasta dicha zona, es expulsado debido a la ruptura de la estructura de los flóculos.

6.2.- BALANCE DE MASA PARA EL CÁLCULO DEL ÁREA DE UN ESPESADOR. "MÉTODO COE & CLEVINGER"

El Método de Coe & Clevenger está basado en balances de masa macroscópicos alrededor del equipo.

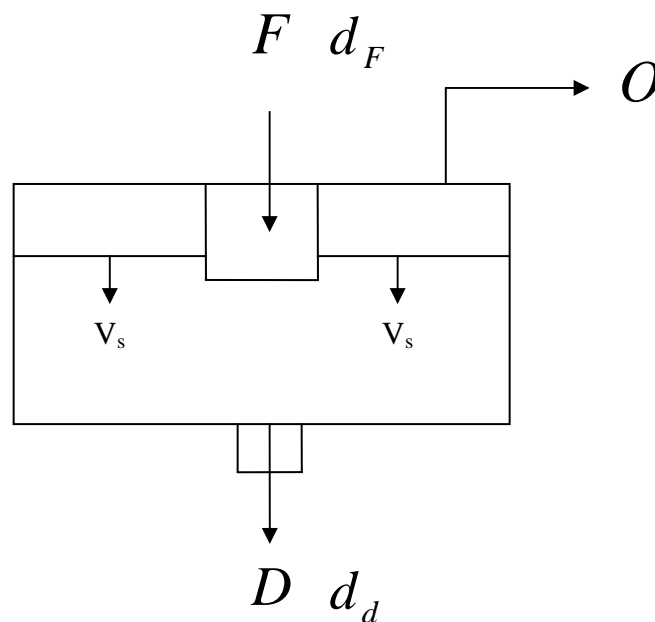


Figura 6.3 Balance macroscópico de masa según Mishler (1912) y Coe & Clevenger (1916).

Si consideramos un espesador en el estado estacionario con un flujo másico de sólidos en la alimentación dado por F (masa/tiempo), una concentración de alimentación de d_F expresada como dilución, esto es la razón de masa de líquido a masa de sólido, un flujo másico de descarga D (masa/tiempo), una concentración de descarga de d_d y un flujo másico de rebalse de O (masa/tiempo). Si se realiza un balance de sólidos y agua se obtiene:

• Balance de sólido: $F = D$ Ec. 6.1.-

• Balance de Agua: $F * d_F = D * d_d + O$ Ec. 6.2.-

Reemplazando la Ecuación 6.1.- en la Ecuación 6.2.- despejando el flujo másico de agua O y transformándolo en flujo volumétrico Q_0 se obtiene:

$$Q_0 = \frac{F * (d_F - d_d)}{\rho_F} \quad \text{Ec. 6.3.-}$$

En donde:

- Q_0 = Flujo volumétrico de agua.
- F = Flujo másico de sólidos en la alimentación.
- d_F = Dilución de alimentación.
- d_d = Dilución de descarga.
- ρ_F = Densidad del agua.

Según Mishler (1912) el caudal de agua Q_0 en un espesador continuo debe ser igual al producto de la velocidad de agua formada en una columna de sedimentación por su área S , para una suspensión de la misma concentración que la alimentación.

Como la velocidad de aparición de agua en la columna es igual a la velocidad de descenso de la interfase agua-suspensión R se obtiene:

$$Q_0 = R * S \quad \text{Ec. 6.4.-}$$

Finalmente la Ec. 6.3.- se puede escribir de la siguiente forma:

$$S = \frac{F * (d_F - d_d)}{\rho_F * R} \quad \text{Ec. 6.5.-}$$

En donde:

- S = Área del espesador.
- F = Flujo másico de sólidos en la alimentación.
- d_F = Dilución de alimentación.
- d_d = Dilución de descarga.
- ρ_F = Densidad del agua.

Coe & Clevenger (1916) indican que la concentración dentro del espesador no es la de la alimentación, ellos argumentan que dentro del espesador hay diferentes concentraciones y que en la zona B se establecerá una suspensión de tal concentración que tenga la mínima velocidad de sedimentación. Todas las otras concentraciones desaparecerán a medida que se establece el estado estacionario.

Es así como la suspensión de alimentación de concentración d_F pasa por diferentes concentraciones d_K antes de salir del espesador a concentración d_d , por lo tanto el balance de Coe & Clevenger será:

- Balance de sólido: $F = D$ Ec. 6.6.-

- Balance de Agua: $F * d_K = D * d_d + O$ Ec. 6.7.-

Despejando el flujo másico de agua O y transformándolo en flujo volumétrico Q_o se obtiene:

$$Q_o = \frac{F * (d_K - d_d)}{\rho_F} \quad \text{Ec. 6.8.-}$$

$$S = \frac{F * (d_k - d_d)}{\rho_F * R} \quad \text{Ec. 6.9.-}$$

Como la concentración de la zona B no se conoce de ante mano, es necesario realizar ensayos de sedimentación Batch a distintas concentraciones, calcular el área con la Ecuación 6.9.- y elegir la máxima área encontrada.

Definiendo área unitaria como área por flujo:

$$AU_o = \frac{S}{F} \quad \text{Ec. 6.10.-}$$

$$AU_o = \frac{d_k - d_d}{\rho_F * R} \quad \text{Ec. 6.11.-}$$

Utilizando la densidad del agua de 62,4 [lb/pie³] y la velocidad de sedimentación en [pie/hr] el área unitaria en $\frac{\text{pie}^2 * \text{hr}}{\text{ton}}$ corresponde a:

$$AU_o = 35,33 \frac{d_k - d_d}{R} \quad \text{Ec. 6.12.-}$$

Para el cálculo del Volumen de la Zona de Compresión, el cual depende primordialmente del tiempo de retención necesario para que la pulpa alcance la consistencia deseada, se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{(t * w) * (\rho_s - \rho_p)}{\rho_s * (\bar{\rho} - \rho_p)} \quad \text{Ec. 6.13.-}$$

En donde:

- V_c = Volumen zona de compresión.
- t = Horas de retención de la carga en el espesador.
- w = Flujo másico de sólidos en la alimentación.
- ρ_s = Densidad sólido seco.
- ρ_p = Densidad de la pulpa a la concentración de alimentación.
- $\bar{\rho}$ = Densidad promedio de la pulpa en la zona de compresión.

La Altura de la Zona de Compresión se obtiene al dividir el volumen de la zona de compresión por el área del espesador.

Es decir:

$$H_c = \frac{V_c}{A} \quad \text{Ec. 6.14.-}$$

Donde:

- H_c = Altura columna de sólidos.
- V_c = Volumen de columna de sólidos.
- A = Área del espesador.

7.- DISEÑO DE EQUIPOS.

7.1.- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

En el diagrama de flujo que se presenta a continuación se identifican las siguientes corrientes de proceso:

F1: Corriente de relaves provenientes de un espesador primario con un 50% en peso de sólidos.

F2: Corriente de agua recuperada proveniente del overflow del espesador.

F3: Corriente de relaves provenientes del underflow del espesador con un 74% en peso de sólidos y dirigida hacia el Depósito de Relaves en Pasta.

F4: Corriente de agua conducida hacia el equipo de filtración.

F5: Corriente de agua conducida hacia la piscina recolectada en donde será reenviada a la Planta de Flotación.

En relación a los equipos de proceso que formarán parte de la Planta de Espesamiento de Relaves se encuentran:

1. Equipo de Espesamiento.

2. Equipos de Bombeo:

B1: Bomba para la impulsión de relaves hacia la Planta de Espesado.

B2: Bomba para la descarga de relaves hacia el Depósito de Pasta.

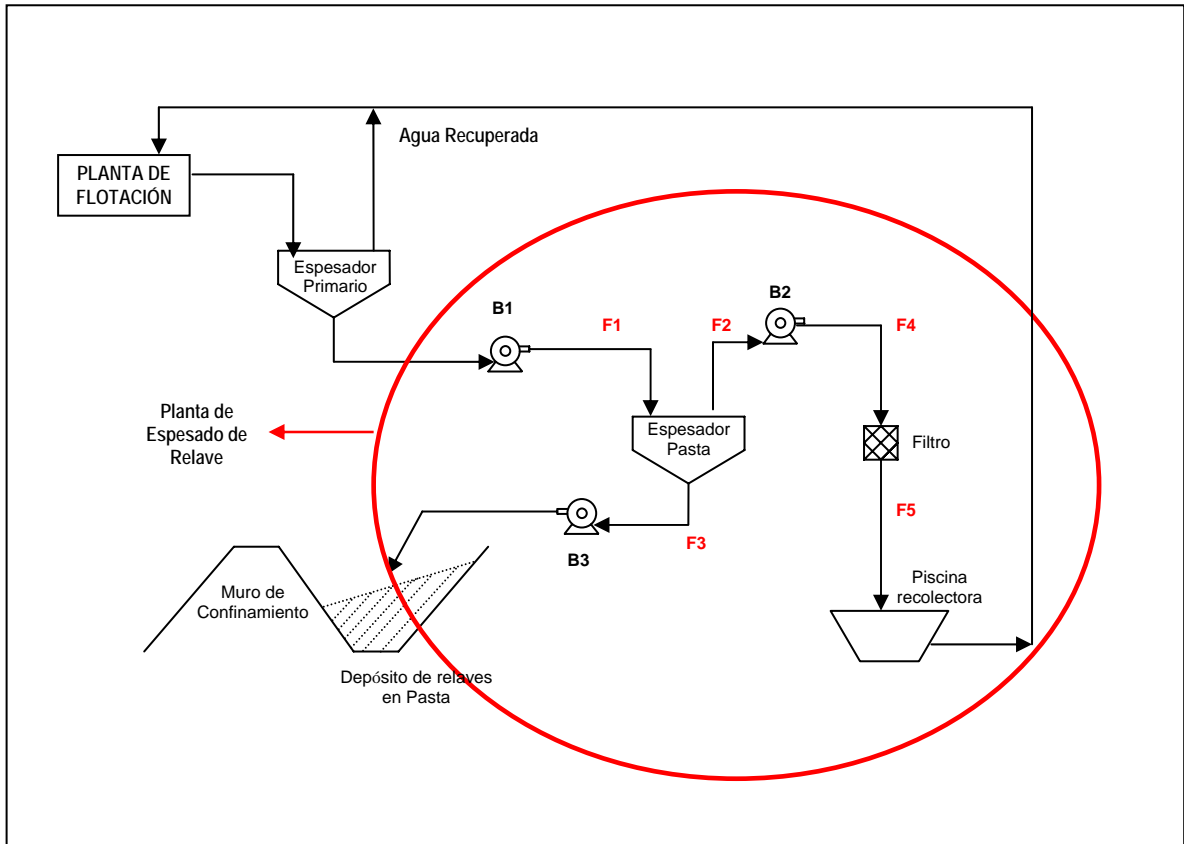
B3: Bomba para la impulsión del agua recuperada.

3. Equipo de Filtración.

4. Piscina recolectora de agua recupera.

Cabe señalar que los relaves provenientes de la Planta de Flotación entran a un proceso previo de espesamiento primario del cual saldrán con un 50% en peso de sólidos, este proceso no será estudiado en detalle.

◀ FLOW SHEET DEL PROCESO:



7.2.- DISEÑO DEL EQUIPO DE ESPESAMIENTO.

Antes de comenzar con el diseño del equipo de espesamiento, es primordial mencionar que las características del relave así como los valores del desarrollo experimental y flujos de alimentación fueron obtenidos de un Trabajo de Titulación de la Universidad Técnica del Estado, todo esto debido a que no se contó con laboratorios y equipos apropiados para realizar los distintos tipos de pruebas necesarias para el diseño.

7.2.1.- Desarrollo Experimental:

El desarrollo experimental de pruebas para realizar el diseño de un espesador fue dividido en dos partes: en “Pruebas de Asentamiento” y en “Pruebas de zona”.

Ambas pruebas fueron realizadas con muestras frescas y representativas provenientes de los relaves del proceso de concentración por flotación.

Se prepararon diferentes pulpas variando el porcentaje de sólidos desde un 36% hasta un 60%, (36%, 38%, 40%, 50%, 60%), concentraciones inferiores y superiores a la concentración de diseño de entrada al espesador (50% en peso de sólidos).

En el Anexo C-1 se presentan los cálculos y resultados para un porcentaje de sólidos en la entrada al espesador de 50% en peso y en el Anexo C-2 los resultados obtenidos para las otras concentraciones de sólidos en la alimentación.

- ◀ “Pruebas de Asentamiento”: Fueron las primeras en realizar y consistieron en que en base a las mediciones de la altura de columnas de sólidos asentados por intervalos de tiempo se construyó la “Curva de Sedimentación”, curva que permitió encontrar la zona de compresión y así calcular la dilución y densidad promedio de dicha zona.

Las “Pruebas de Asentamiento” fueron realizadas en probetas graduadas de 500 [ml]. La agitación de la pulpa se hizo por inversión. Para cada probeta se hicieron tres inversiones con una duración de un minuto cada una.

Una vez colocada la probeta en su base respectiva, se comenzó a medir la altura de la columna de sólidos asentados contra el tiempo justamente después de un minuto de poner la probeta en su sitio. Se anotaron los volúmenes de agua clara formados (que corresponden a la resta entre el volumen original de la pulpa (500 [ml]) y el volumen de sólidos sedimentados) versus el tiempo (intervalos de 5 minutos), siendo la lectura final a 22 [hr] de comenzadas las mediciones.

El asentamiento por unidad de tiempo que se lea, deberá ser uniforme durante la prueba para cada concentración, es decir, las lecturas deben corresponder a la zona de asentamiento libre en la cual la velocidad de sedimentación es constante, hasta que se alcance la compresión, tiempo en el cual el asentamiento decrece.

Al analizar la “Curva de Sedimentación” (curva confeccionada con las Pruebas de Asentamiento) se pudo determinar la Zona de Compresión; zona en donde el asentamiento de sólidos se hace prácticamente constante a través del tiempo; Dicha zona es la de nuestro interés, y será a la cual se le determinará la dilución y densidad promedio.

Para el cálculo de la dilución promedio de la Zona de Compresión es necesario determinar primeramente la dilución para cada intervalo de tiempo.

A través de la siguiente ecuación:

$$\text{Dilución} = d = \frac{\text{masa (líquido)}_{\text{pulpa}}}{\text{masa (sólido)}_{\text{pulpa}}}$$

Para determinar la masa de líquido y sólidos presentes en la pulpa sedimentada se debe realizar un balance de masa al agua y a los sólidos en cada intervalo de medición. Cabe destacar que durante toda la prueba la cantidad de sólidos presentes se mantiene constante y ubicados sólo en la parte inferior de la probeta, no mezclándose con las aguas claras.

Para el cálculo de la densidad promedio de la Zona de Compresión, es necesario determinar la densidad de la pulpa para cada intervalo de tiempo dentro de la Zona de Compresión. Esta se calcula a través de la siguiente ecuación:

Densidad de la pulpa:

$$\frac{\rho(\text{sólido}) * \rho(\text{agua})}{[\rho(\text{sólido}) - (Cp * \rho(\text{sólido})) + Cp * \rho(\text{agua})]} \quad \text{Ec. 7.1.-}$$

En donde Cp corresponde a la fracción en peso de sólidos para cada intervalo de la Zona de Compresión y se determina a través de la ecuación siguiente:

$$Cp = \frac{1}{d + 1} \quad \text{Ec. 7.2.-}$$

La densidad promedio será la suma de las densidades calculadas dividida por el número de intervalos.

- ◀ “Pruebas de Zona”: Tienen como objetivo principal determinar para distintas concentraciones de sólidos las velocidades de sedimentación y de esta forma las áreas unitarias requeridas por el espesador (aplicación Método Coe & Clevenger; método descrito en el capítulo anterior).

Para aplicar el Método de Diseño de Coe & Clevenger en la determinación del área del espesador y a su vez del volumen y altura de la Zona de Compresión es necesario repetir la Prueba de asentamiento descrita anteriormente hasta cuatro veces (es decir inicial + 3 más), con distintas concentraciones para poder reproducir las condiciones que se presentan en el espesador.

Terminado el primer ensayo de asentamiento; realizado con una cantidad de pulpa equivalente a la original (500 [ml]) y mediciones con intervalos de tiempo de 3 [min] llegando a completar 9 [min] en total; se realizan los otros tres ensayos con concentraciones iniciales menores. Para ello se retira el total del agua clara formada con parte del agua presente en la pulpa (50 [ml] en total son retirados) y se inicia de nuevo la prueba.

Para cada prueba realizada (cuatro en total) se midió el espacio total recorrido en [cm] de la interfase agua clara – sólidos asentados. Con la distancia total recorrida por la interfase y el tiempo total que transcurrió en recorrer dicha distancia se calculó la velocidad de sedimentación utilizando la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Distancia}}{\text{Tiempo}} \quad \text{Ec. 7.3.-}$$

Fueron calculadas también para las cuatro pruebas realizadas sus respectivas diluciones mediante un balance de masa total y un balance de masa al agua específicamente.

Una vez determinadas las cuatro diluciones; que corresponderán a las diluciones iniciales; (d_1 d_2 d_3 d_4) y las cuatro velocidades de sedimentación, manteniendo constante la dilución final (equivalente a la dilución promedio de la Zona de Compresión calculada en la primera prueba) se calculó las áreas correspondientes para las distintas concentraciones, tomándose la mayor de ellas. La elección del área mayor se debe a que si el espesador tuviese un área menor a la prevista; para manipular los sólidos; se formaría en el acto una acumulación de sólidos en un punto

del espesador, que se desplazaría paulatinamente hacia arriba, hasta salir por el rebalse.

Fórmula del área unitaria por Coe & Clevenger:

$$AU_0 = \frac{35,33 * (d_k - d_d)}{R} \quad \text{Ec. 7.4.-}$$

Donde:

- AU_0 = Área unitaria. $\left[\frac{\text{pie}^2 * \text{hr}}{\text{ton}} \right]$
- d_k = Dilución (inicial).
- d_d = Dilución (final).
- R = Velocidad de sedimentación. [pie/hr].

Para el caso del cálculo del volumen de la Zona de Compresión de un espesador este se determinó a través de la siguiente fórmula; y dependerá primordialmente del período de retención necesario para que la pulpa alcance la densidad deseada.

$$V_c = \frac{(t * w) * (\rho_s - \rho_p)}{\rho_s * (\bar{\rho} - \rho_p)} \quad \text{Ec. 7.5.-}$$

Donde:

- V_c = Volumen de la zona de compresión [m³].
- t = Tiempo de retención de la carga en el espesador [hr].
- w = Flujo de sólidos en la alimentación [ton/hr].
- ρ_s = Densidad sólido seco [gr/ml].

- ρ_p = densidad de la pulpa en la alimentación [gr/ml].
- $\bar{\rho}$ = densidad promedio de la pulpa en la zona de compresión [gr/ml].

La altura de la Zona de Compresión de un espesador corresponde a:

$$H_c = \frac{V_c}{A} \quad \text{Ec. 7.6.-}$$

Donde:

- H_c = Altura zona de compresión [m]
- V_c = Volumen zona de compresión [m³]
- A = Área del espesador [m²]

7.2.2.- Conclusiones:

En base a los requerimientos de depositación (pendiente entre los rango de 5 a 7%); que fija la concentración de descarga en el espesador entre un rango de 70 y 71% de sólidos; se determina que con una concentración de 50% de sólidos en la alimentación al espesador se llegará a dichos porcentajes de descarga.

Al observar los resultados de las pruebas de sedimentación batch, que se presentan en los Anexos C-1 y C-2, se determinó que no es recomendable operar con porcentajes de sólidos de alimentación bajos, ya que aumenta considerablemente el área total del espesador. Produciéndose una diferencia de 851 [m²] en el área al variar de 36 a 60% el porcentaje de sólidos en la alimentación.

También se observó que la dilución al igual que la velocidad de sedimentación de los sólidos disminuye considerablemente al aumentar el porcentaje de sólidos en la alimentación, esto se debe a que la velocidad de asentamiento en la zona de caída libre es solamente función de la concentración de sólidos de dicha zona, presentando una relación inversa.

El área necesaria para lograr un porcentaje de 74% de sólidos en el underflow del espesador será de 824 [m²] lo que es equivalente a un diámetro de 33 [m].

El volumen y la altura de la zona de compresión serán de 437 [m³] y 0,530 [m] respectivamente.

7.3.- DISEÑO DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO.

Los cálculos hidráulicos fueron realizados para:

1. La impulsión de relaves hacia la Planta de Espesado.
2. La descarga de relaves hacia el Depósito de Pasta.
3. La impulsión del agua recuperada.

En relación a los cálculos hidráulicos de impulsión y descarga de relaves, fueron utilizadas las mismas ecuaciones, las cuales corresponden a las de hidráulica clásica pero corregidas para el transporte de pulpas.

Para la impulsión del agua clara recuperada desde el overflow del espesador se utilizó las ecuaciones tradiciones de transporte de agua.

Con respecto a La Planta de Espesado de Relaves esta será ubicada aguas arriba del Depósito de Relaves en Pasta.

Los relaves provenientes de la Planta de Flotación pasarán por una etapa previa de espesamiento (espesador primario) donde se llegará a un 50% de sólidos, estos relaves con un 50% de sólidos serán enviados a la Planta de Espesado de Relaves para generar un relave con características de pasta que posea una concentración de sólidos de un 74% en peso.

7.3.1.- Cálculos Hidráulicos para la Impulsión y Descarga de Relaves.

◀ **Descripción del trazado para la Impulsión de Relaves hacia la Planta de Espesado:**

Estos relaves serán impulsados una distancia total de 658 [m], distancia que corresponde a la existente entre la bomba de impulsión; (ubicada a la salida de un espesador primario) y la Planta de Espesado, desde una cota inicial de 390 [m.s.n.m] hasta una cota final de 355 [m.s.n.m].

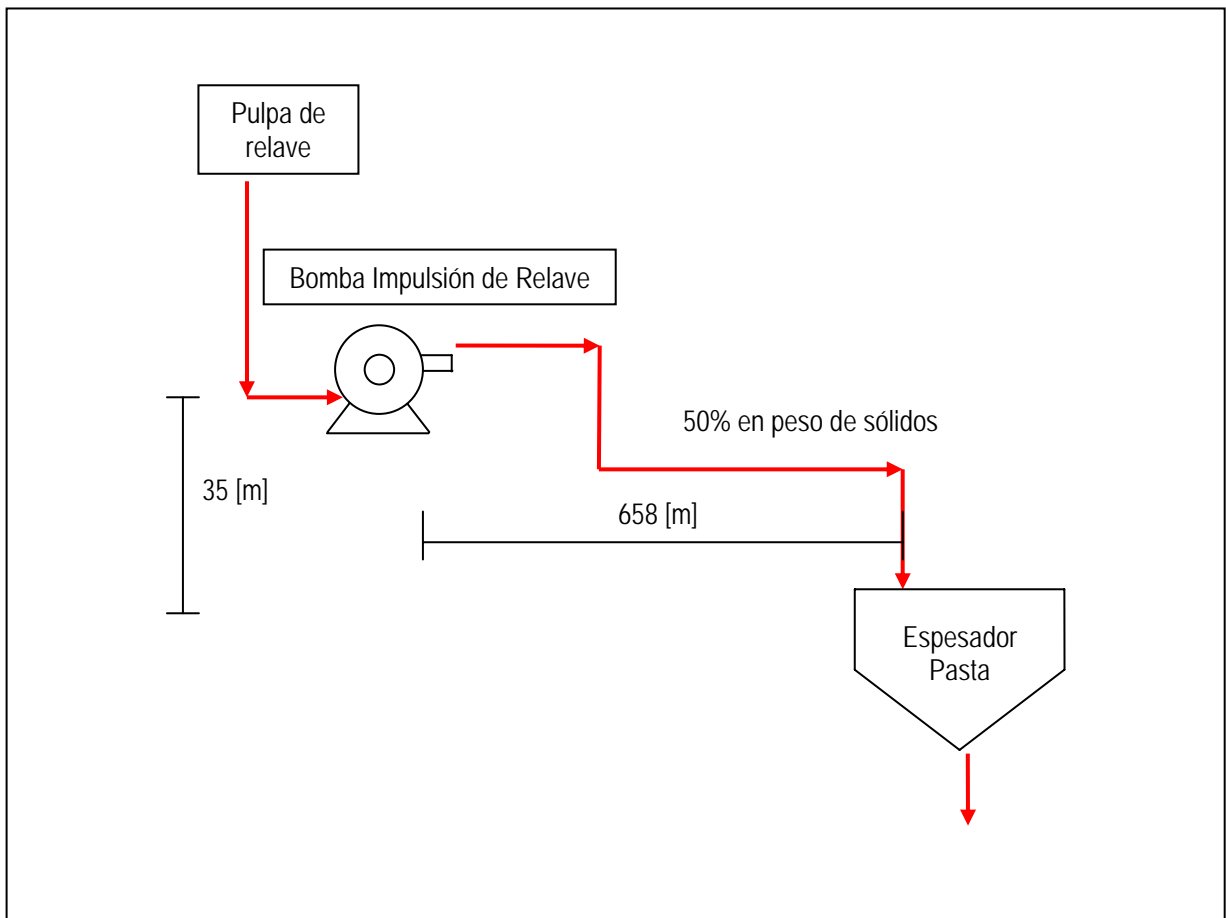


Figura 7.1. Trazado de impulsión de relaves.

➤ **Descripción del trazado para la Descarga de Relaves hacia el Depósito de Pasta:**

La descarga de relaves desde la Planta de Espesado hasta el Depósito de Relaves en Pasta, comprende un tramo de 960 [m], que se inicia en la cota 340 [m.s.n.m] y finaliza en la cota 315 [m.s.n.m].

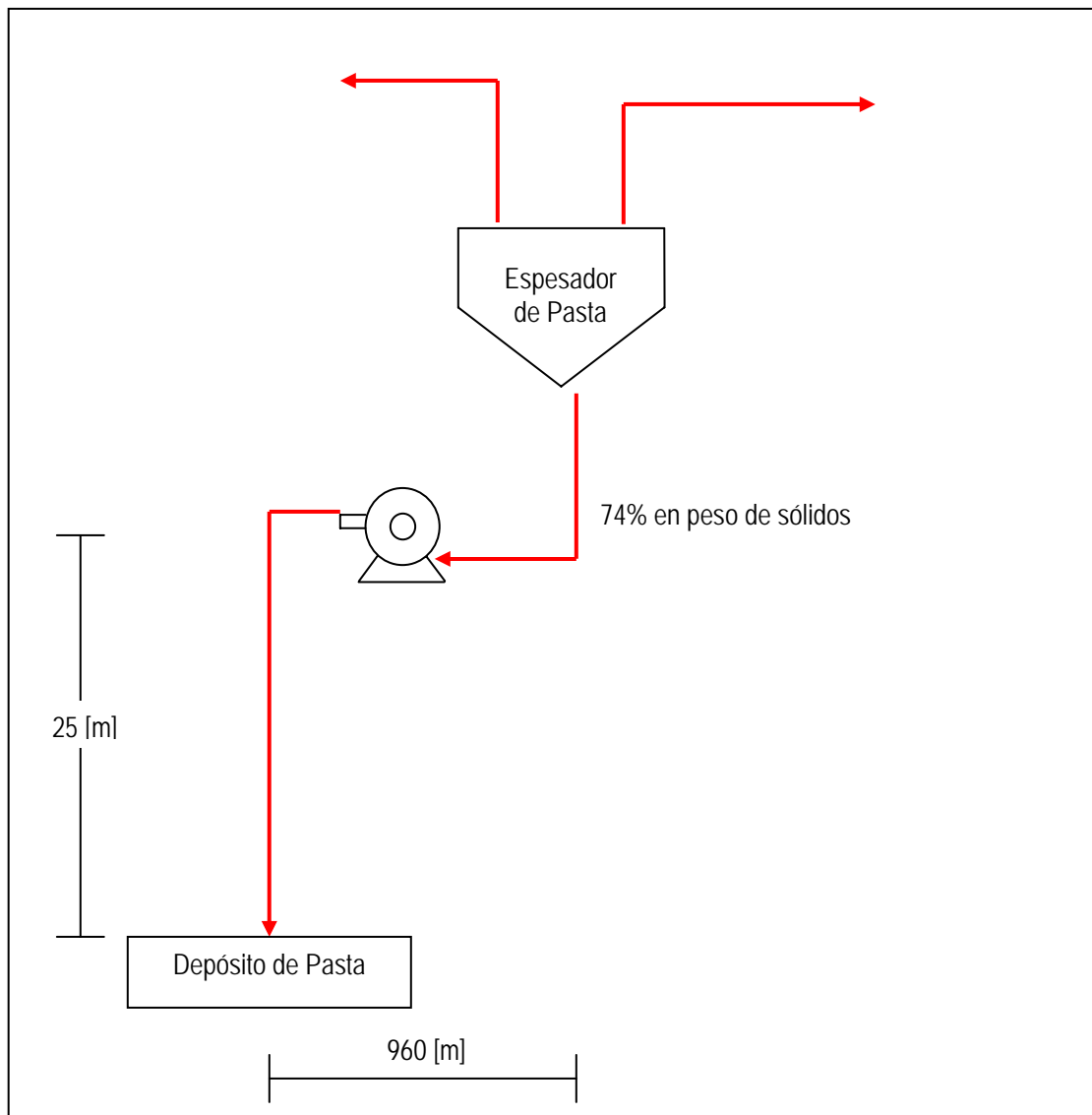


Figura 7.2. Trazado de descarga de relaves.

A continuación son presentadas las bases de Diseño y la Memoria de Cálculo para la impulsión de relaves hacia la Planta de Espesado y la descarga de relaves hacia el Depósito de Pasta.

Los cálculos realizados para ambos casos se encuentran en el Anexo D-1.

Bases de Diseño:

◀ **Fluido a Conducir:**

El fluido a conducir es pulpa de relave, proveniente del proceso de flotación de una Planta de Beneficio.

Datos relevantes del fluido a conducir:

$$SG(\text{Sólido}) = 2,7.$$

$$SG(\text{Líquido}) = 1.$$

$$d_{50} = 0,042 \text{ [mm]}.$$

$$v(\text{cinemática}) = 27,29 \text{ [cst]}.$$

◀ **Caudal de Diseño:**

El caudal de diseño es el correspondiente a una tasa de producción de pasta de relaves de 85.133 [ton/mes].

Se realiza la verificación del sistema para un peak de producción de un 10% sobre la producción de diseño.

En base a la producción de pasta mencionada anteriormente:

- El caudal de diseño de la impulsión de relaves hacia la planta de espesado es de 119,94 [m³/hr] y el caudal para un peak de producción es de 131,92 [m³/hr].
- El caudal de diseño de la descarga de relaves hacia el depósito de pasta es de 63,16 [m³/hr] y el caudal para un peak de producción es de 69,47 [m³/hr].

Estos valores fueron obtenidos del balance de masa que se encuentra en las tablas N°1 y N°2 del Anexo D-1.

Memoria de Cálculo:

Para la realización de todos los cálculos hidráulicos necesario para la impulsión y descarga de relaves, es necesario determinar todas las ecuaciones y a su vez los criterios para su utilización.

◀ **Tuberías:**

Tanto para la impulsión como para la descarga de relaves se utilizó tuberías HDPE Pe 100, con diámetros nominales de 140 [mm], PN 6 (presión nominal) y un espesor de pared de 5,1 [mm]

En la Tabla que se presenta en el Anexo D-9, se encuentra dicha información.

◀ **Cálculo de la velocidad Límite de la pulpa:**

La velocidad límite corresponde a la velocidad de la pulpa en la cual los sólidos permanecen por períodos importantes en el fondo de la tubería, formando dunas móviles o lecho fijo de fondo.

Se calculó la velocidad límite de acuerdo a la expresión de *M^c Elvain* modificada para escurrimiento por presión.

<p><i>VELOCIDAD LÍMITE DE M^c ELVAIN MODIFICADA</i></p> $V_L = 1,09 \cdot F_L \cdot (2 \cdot g \cdot D \cdot (S - 1))^{0,25}$

Ec. 7.7.-

Donde:

V_L = Velocidad límite de la pulpa [m/s].

F_L = Parámetro en función del tamaño y concentración en volumen de sólidos.

$$F_L = F_1 + \frac{(C_V - 0,05)}{(0,3 - 0,05)} \cdot (F_2 - F_1)$$

C_V = Concentración en volumen de sólidos [%].

$$F_1 = 0,169 \cdot \text{Logn}(d_{50}) + 1,25$$

$$F_2 = 0,209 \cdot \text{Logn}(d_{50}) + 1,43$$

d_{50} = Diámetro medio de las partículas [mm].

D = Diámetro interno de la tubería [m].

g = Aceleración de gravedad [m/s²].

S = Gravedad específica del sólido [adimensional].

◀ **Velocidad del Flujo:**

La velocidad real del flujo debe ser igual o superior en un 10% a la velocidad límite de la pulpa, se consideró un valor máximo de velocidad de 4 [m/s] para evitar problemas de desgastes acelerados.

Este valor se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$V_F = \frac{Q}{A} \quad \text{Ec. 7.8.-}$$

Donde:

V_F = velocidad real del flujo [m/s].

Q = Caudal de pulpa [m³/hr].

A = Área de la tubería [m^2].

◀ **Cálculo de las pérdidas de Carga por Fricción:**

El método de cálculo hidráulico consiste en determinar la energía en los puntos singulares de la conducción. La energía se calcula a partir de la ecuación de *Bernoulli*, para lo cual se cuantifican las pérdidas de carga por fricción, que constituyen la variación energética entre dos puntos.

$$B_1 = z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \quad \text{Ec. 7.9.-}$$

$$B_2 = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

Luego:

$$\boxed{B_2 = B_1 - \lambda_F} \quad \text{Ec. 7.10.-}$$

Las pérdidas de carga por fricción se calcularon de acuerdo a la fórmula clásica de *Darcy – Weisbach* para fluido puro, ecuación modificada por la viscosidad de la pulpa.

$$\lambda_F = f * \frac{L}{D} * \left(\frac{v_F^2}{2 * g} \right) \quad \text{Ec. 7.11.-}$$

Donde:

λ_F = Pérdida de carga por fricción [m].

L = Longitud del tramo [m].

V_F = Velocidad del flujo [m/s].

g = Aceleración de gravedad [m/s^2].

D = Diámetro interior de la tubería [m].

f = Coeficiente de fricción de *Colebrook—White*, para tuberías con flujo en régimen turbulento, el que se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$f = \left(1.14 - 2 \log \left(\frac{\varepsilon}{D} + \frac{21.5}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right)^{-2} \quad \text{Ec. 7.12.-}$$

En que ε corresponde a la rugosidad de la cañería y Re al número de Reynolds.

El número de Reynolds se obtiene de:

$$\text{Re} = \frac{\rho * V_F * D}{\mu} \quad \text{Ec. 7.13.-}$$

◀ **Cálculo de Pérdidas Totales:**

Una vez calculadas las pérdidas de carga por fricción se procedió al cálculo de las pérdidas totales que corresponden a la suma de las pérdidas singulares con las pérdidas de carga por fricción.

En relación a las pérdidas singulares, en esta etapa no fueron calculadas detalladamente, así que se adoptó un factor de 2; es decir; las pérdidas totales serán igual a las pérdidas de carga por fricción multiplicadas por dos.

◀ **Cálculo cabeza dinámica total:**

Con las pérdidas totales y la altura geométrica se obtiene La cabeza dinámica total (altura total de impulsión) TDH que se define como:

$$TDH = H_g + \text{Pérdidas totales} \quad \text{Ec. 7.14.-}$$

En donde H_g corresponde a la altura geométrica.

La altura geométrica se obtiene al restar la cota final con la cota inicial; es decir obtener el ΔZ .

◀ **Determinación del Sistema de Bombeo:**

En base a la altura total de impulsión calculada anteriormente se procedió a elegir el tipo de bomba que cumpla con ese requisito de impulsión.

Por las características de la pulpa el sistema de bombeo incluye el uso de una “Bomba Centrífuga con Revestimiento de Goma”.

Para ambos casos (de impulsión y descarga de relaves) la bomba elegida corresponde a una “Bomba Centrífuga” tipo SRL, tamaño 5x5x14.

Este tipo de Bomba Centrífuga corresponde a una adaptación de las bombas corrientes de agua, con modificaciones para resistir la presión, la carga extra debido al peso de la pulpa y los problemas mecánicos de los sellos.

- Son unas de las más utilizadas en las Plantas de Beneficio.
- Su altura de impulsión máxima no supera los 60 m.
- La velocidad periférica del rodete impulsor está limitada a 25 m/s (600 a 1800 RPM), para minimizar el desgaste.
- Los impulsores y carcazas deben estar revestidos interiormente ya sea por fundas de goma sintética, poliuretano, aleaciones niqueladas o acero al manganeso.

La curva característica de la bomba se encuentra en el Anexo D-3.

◀ **Corrección de la curva característica:**

Las curvas entregadas por los fabricantes corresponden al funcionamiento de las bombas con agua pura, es por ello que se debe aplicar un factor de corrección para su uso con pulpas.

El factor de corrección es el siguiente:

$$H = \frac{H_w}{HR} \quad \text{Ec. 7.15.-}$$

Donde:

- H = Altura de impulsión de la bomba.
- H_w = Altura de impulsión de agua pura.
- HR = Factor de corrección.

Modelo de M^c Elvain & Cave para la determinación del factor de corrección:

El modelo propone la siguiente ecuación:

$$HR = 1 - \frac{K * C_v}{20} \quad \text{Ec. 7.16.-}$$

Donde:

- K = Parámetro que se encuentra en función de la gravedad específica del sólido y d_{50} .
- C_v = Concentración en volumen de sólidos [%].

En el Anexo D-2 se presenta el gráfico para la determinación del parámetro K , según el Modelo de M^c Elvain & Cave.

Al realizar la corrección se obtiene la altura real de impulsión de la bomba, altura con la cual se entra a la curva característica.

◀ **Cálculo de la potencia requerida:**

La potencia requerida por el equipo de bombeo se estima según la siguiente expresión:

$$HHP = \frac{Q * H * \rho(pulpa)}{75} \quad \text{Ec. 7.17.-}$$

Donde:

- HHP = Potencia requerida [hp].
- H = Altura total de impulsión TDH [m].
- $\rho(pulpa)$ = Densidad de la pulpa [Kg/m³].
- Q = Caudal de pulpa [m³/s].

◀ **Cálculo de la Potencia entregada por el Motor:**

La potencia entregada por el motor se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$BHP = \frac{HHP}{\eta} \quad \text{Ec. 7.18.-}$$

Donde:

- BHP = Potencia entregada por el motor [hp].
- HHP = Potencia requerida [hp].
- η = Eficiencia [%].

El valor de la eficiencia η entregada por el motor es obtenida de la curva característica de la bomba que se encuentra en el Anexo D-3, en donde se entra con la altura total de impulsión (eje x) y con el caudal (eje y).

Para el caso del caudal máximo, éste se escapa de las condiciones de funcionamiento de la bomba seleccionada, por lo tanto el caudal de diseño será el máximo permisible para un buen funcionamiento de la bomba.

◀ HOJA ESPECIFICACIÓN DE RESULTADOS:

	Impulsión de relaves hacia la Planta de Espesados.	Descarga de relaves hacia el Depósito de Pasta.
1.- Caudal [m ³ /hr]	119,94	63,16
2.- Tuberías		
Material	HDPE	HDPE
Clase	Pe 100	Pe 100
Diámetro nominal [mm]	140	140
Longitud [m]	658	960
3.- Velocidad límite [m/s]	1,219	1,277
4.- Velocidad real [m/s]	2,164	1,325
5.- Relación V_r/V_L	1,775	1,0378
6.- Reynolds	11.103	6.306
7.- Rugosidad relativa	0,0000714	0,0000770
8.- Factor de fricción	0,0303	0,0355
9.- Pérdida de carga por fricción [m]	34,042	23,558
10.- Pérdidas totales [m]	68,084	47,116
11.- TDH (altura total) [m]	33,084	22,116
12.- TDH corregida [m]	31,96	20,696
13.- Potencia entregada por el motor [hp]	33,12	16,45
14.- Eficiencia entregada por el motor [%]	62,5	55
15.- Potencia requerida por el equipo de bombeo [hp]	20,70	9,05

Tabla 7.1. Hoja de especificación de resultados.

7.3.2.- Cálculos Hidráulicos para la Impulsión del Agua Recuperada.

➤ Descripción del trazado para la Impulsión del Agua Recuperada:

La impulsión de las aguas claras consiste en transportar desde la parte superior del espesador en pasta (overflow) hasta una piscina recolectora; el agua recuperada; una distancia total de 800 [m].

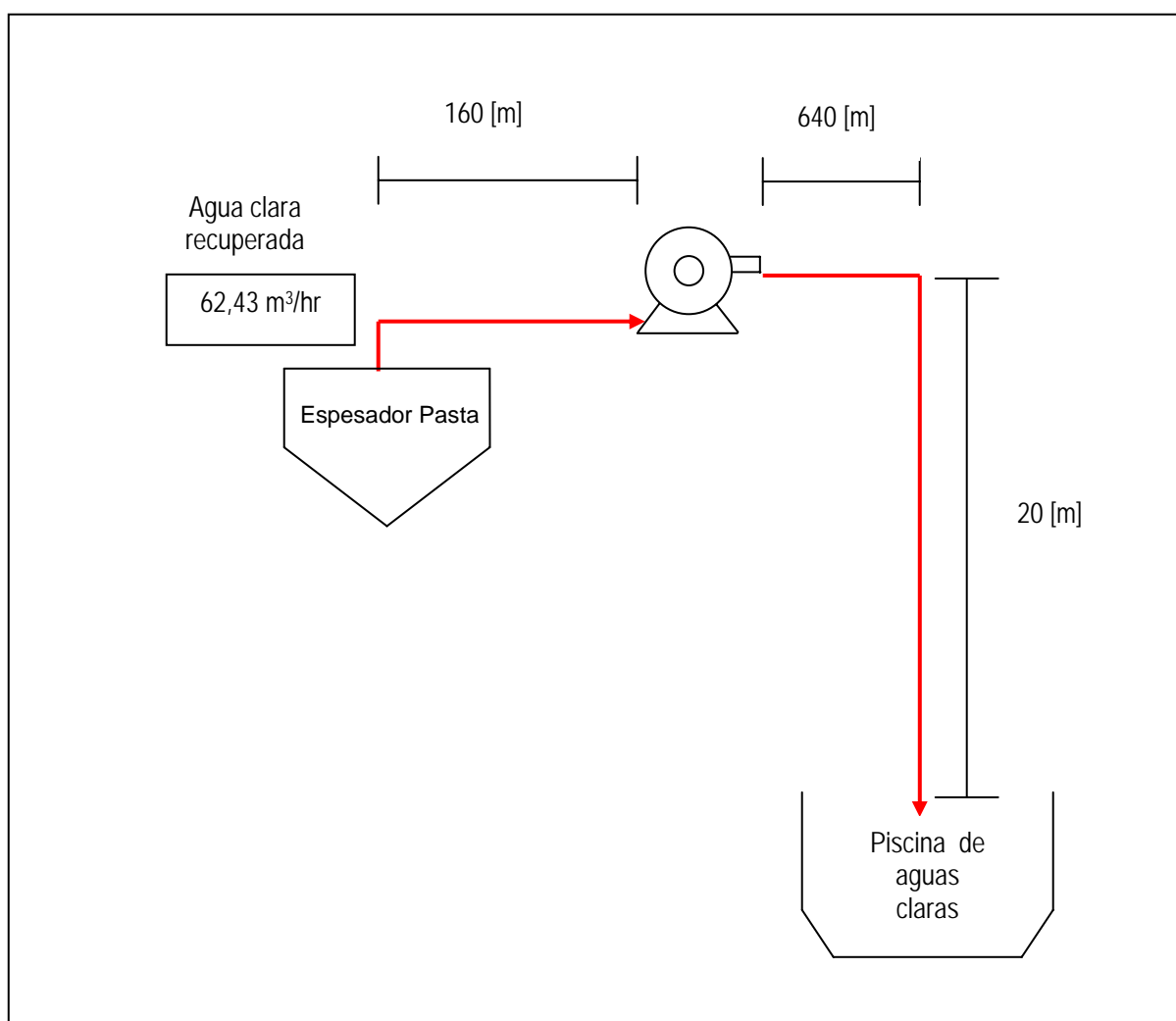


Figura 7.3. Trazado de impulsión de aguas claras.

Bases de Diseño:

El fluido a conducir es agua, cuyo caudal a transportar es equivalente a 62,43 m³/hr, cuando la concentración de entrada al espesador es de un 50% y la de salida de un 74%.

Memoria de Cálculo:

◀ *Determinación de la velocidad del Flujo y Diámetro de la tubería:*

Para realizar las estimaciones de las velocidades de succión y descarga se utiliza la tabla del Anexo D-4, estas velocidades son supuestas y deberán encontrarse en el rango de 2 a 16 [pie/s] (para líneas de agua).

Se da un valor tentativo de velocidad de descarga de 7 pie/s.

Teniendo en cuenta que la velocidad de succión será 2/3 la velocidad de descarga.

Se calcula un factor de capacidad Q^* con el cual se entra en la Tabla de Propiedades de Tuberías de Acero ubicada en el Anexo D-5, y se encuentra el Diámetro nominal.

Q^* = Factor de capacidad [GPM/pie/s].

$$Q^* = \frac{\text{Caudal}}{\text{velocidad}} \quad \text{Ec. 7.19.-}$$

Una vez determinado de la Tabla de Propiedades de Tuberías de Acero el diámetro nominal e interno, se recalcula la velocidad de descarga, a través de la siguiente ecuación:

$$v_d = \frac{Q}{A} \quad \text{Ec. 7.20.-}$$

Con ese nuevo valor de velocidad de descarga se calcula la velocidad de succión; que corresponde a 2/3 la de descarga; y se procede a recalcular nuevamente el Factor de capacidad para así de esta manera obtener la velocidad real de succión.

◀ **Cálculo de las Pérdidas Totales:**

Las ecuaciones y criterios utilizados para el cálculo de las pérdidas de carga por fricción en el transporte de aguas claras, son los mismos que los utilizados para la impulsión y descarga de relaves. Diferenciándose en el hecho de que estos cálculos deben ser realizados tanto para la succión como para la descarga.

◀ **Cabeza dinámica total:**

El cálculo de la altura total de impulsión a través de la ecuación:

$$TDH = H_g + Pérdidas\ totales \quad \text{Ec. 7.21.-}$$

En donde H_g corresponde a la altura geométrica; permitió determinar que la bomba a utilizar corresponde a una bomba de agua Tamaño 3x4 – 8G Modelo 3.196. (La curva de la bomba de agua se encuentra en el Anexo D-7).

Dicha curva no requiere de corrección ya que el fluido con el cual se está trabajando es agua.

Finalmente el cálculo de la potencia requerida por el equipo de bombeo así como la potencia entregada por el motor son calculadas con las mismas ecuaciones utilizadas para la impulsión y descarga de relaves.

En el Anexo D-1 se presentan todos los cálculos realizados.

◀ HOJA ESPECIFICACIÓN DE RESULTADOS:

	Impulsión del agua recuperada
1.- Caudal [m ³ /hr]	62,43
2.- Longitud [m]	800
3.- Tuberías	Acero comercial
4.- Velocidad de succión [m/s]	1,359
5.- Velocidad de descarga [m/s]	2,19
6.- Diámetro de succión [mm]	127,4
7.- Diámetro de descarga [mm]	102,26
8.- Reynolds succión	173.729
9.- Reynolds descarga	216.556
10.- Pérdidas de carga por fricción succión [m]	2,1414
11.- Pérdidas de carga por fricción descarga [m]	25,968
12.- Pérdida de carga por fricción [m]	28,109
13.- Pérdidas totales [m]	56,21
14.- TDH (altura total) [m]	36,21
15.- Potencia entregada por el motor [hp]	12,89
16.- Eficiencia entregada por el motor [%]	65
17.- Potencia requerida por el equipo de bombeo [hp]	8,366

Tabla 7.2. Hoja de especificación de resultados.

7.4.- EQUIPO DE FILTRACIÓN.

7.4.1.- Filtro Cartridger:

◀ **Características del Equipo:**

La filtración por cartuchos (Filtro cartridger), consiste en hacer circular, mediante presión, el fluido a filtrar por el interior de un portacartuchos en el que se encuentran alojados los cartuchos filtrantes. El fluido atraviesa el cartucho filtrante dejando en éste retenidos todos los contaminantes seleccionados.

Los cartuchos filtrantes pueden estar fabricados en diferentes materiales, polipropileno, celulosa, nylon, acero inoxidable, etc. determinándose el empleo de uno u otro cartucho en función de las características del fluido a filtrar.

En el Anexo D-8, se presentan los criterios para la Selección y Diseño preliminar de Equipos de Filtración.

De esta tabla se obtiene para “Filtros Cartridger” los siguientes datos:

1. Dimensiones típicas del equipo:
 - Largo = 1 [m]
 - Diámetro = 1 [m]
 - Superficie de filtración = menor que 50 [m²].
2. Rango de presión:
 - Entre 10 – 100 [kpa].
3. Caudal:
 - El caudal posee un factor L_2 , este factor corresponde a $0,001 * A$, equivalente al de un fluido líquido y en donde A es la superficie de filtración.
 - Para un área máxima de 50 [m²] se obtiene un caudal máximo de 0,05 [m³/s].

4. Ventajas del equipo:

- Buena filtración y bajo costo de capital.

5. Limitaciones del equipo:

- Altos costos de mano de obra y baja capacidad de filtración.

◀ **Área de Filtración del Equipo:**

Para un caudal de agua de 0,0173 [m³/s], el área de filtración es:

$$A = \frac{0,0173}{0,001}$$

- Área de filtración = 17,3 [m²]

◀ **Tiempo de Residencia:**

- El tiempo de residencia corresponderá a 2 [min].

7.5.- PISCINA RECOLECTORA DEL AGUA RECUPERADA.

La planta de espesado, considera la construcción de una piscina para recolectar el agua recuperada desde el espesador, donde se almacenará antes de ser impulsada a la Planta de Beneficio para su recirculación.

Para calcular el volumen de la piscina, se considerará un día de almacenamiento del agua, lo que equivale aproximadamente a 1.700 [m³].

Toda la piscina será impermeabilizada con una carpeta de HDPE.

◀ **Dimensiones de la Piscina Almacenadora:**

Lados:

- Superficial $A = 20$ [m]
 $B = 34$ [m]
- Basal $a = 13$ [m]
 $b = 27$ [m]

Áreas:

- Área superficial = 680 [m²]
- Área basal = 351 [m²]

Talud:

- Horizontal = $x = 1$
- Vertical = $y = 1$

Altura:

- $h = 3,5$ [m]

Revancha:

- $r = 1,25$ [m]

Volúmenes:

- Total = 1.773 [m³]
- Efectivo = 1.007 [m³]
- Revancha = 766 [m³]

Área de carpeta de HDPE:

- Área = 1.228 [m²]

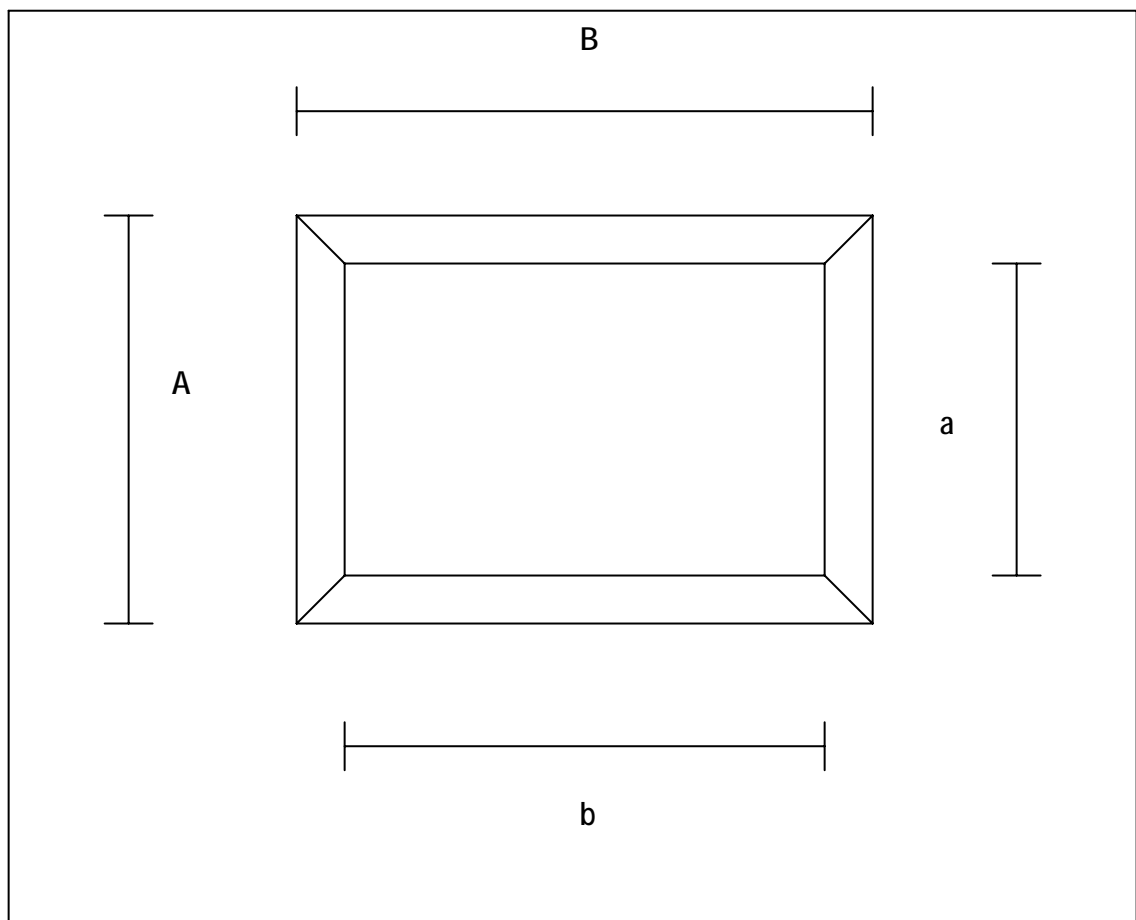


Figura 7.4. Dimensiones de la piscina recolectora.

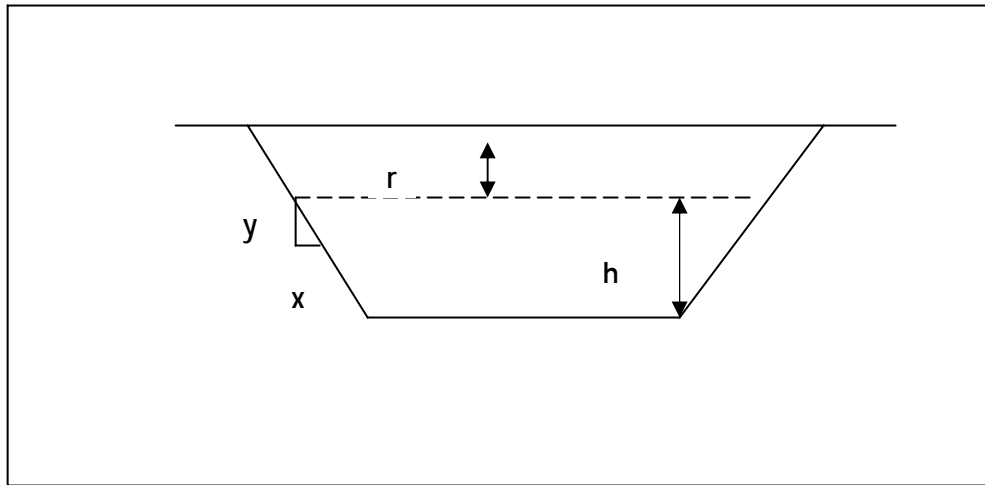


Figura 7.5. Dimensiones de la piscina recolectora.

8.- EVALUACIÓN ECONÓMICA.

8.1.- COSTOS DE INVERSIONES INICIALES.

Costos reactualizados de equipos principales obtenidos a través de bibliografía y cotizaciones:

◀ Costo del Espesador:

Obtenido a través de bibliografía en la gráfica del Anexo E-1.

Para un diámetro del espesador de 40 [m] se obtiene que el costo instalado es de 700 US\$/m² para el año 1995.

Si el área del espesador es de 824 [m²] se obtiene un costo instalado de US\$ 576.800.

Este precio que se obtiene por bibliografía se encuentra en años anteriores al requerido, año 2007, por lo cual se realiza una corrección de los precios mediante el método de índices de costos de equipos adjuntado en el Anexo E-2, Este método actualiza los precios de la siguiente manera:

$$\boxed{Costo\ 2 = Costo1 * \frac{Indice\ 2}{Indice\ 1}} \quad Ec. 8.1.-$$

En donde:

Costo 2 = Precio del equipo en el año 2007, en US\$.

Costo 1 = Precio del equipo en el año que indica la bibliografía, en US\$.

Índice 1 = Índice en el año 2007.

Índice 2 = Índice en el año que indica la bibliografía.

$$\text{Costo}(2007) = 576.800 * \frac{132}{100}$$

Costo Instalado Espesador para el año 2007 = US\$ 770.000

◀ **Costo Equipos de Bombeo:**

El sistema de bombeo consta de tres bombas, dos de las cuales poseen las mismas características.

Los costos de cada bomba fueron obtenidos por cotizaciones directas con proveedores.

Estas cotizaciones corresponden a valores entregados en EEUU, para llevarlos a valores en Chile hay que multiplicarlas por 1,2.

En el Anexo E-3, se presentan dichas cotizaciones.

Costo de bomba impulsión de relaves hacia el espesador US\$ 15.534

Costo de bomba descarga de relaves hacia el depósito = US\$ 15.534

Costo de bomba impulsión de aguas claras = US\$ 5.800

Costo Total Equipos de Bombeo = US\$ 37.000

◀ **Costo de Filtro:**

El costo del equipo de filtración utilizado fue obtenido por bibliografía, presente en el Anexo E-4.

Para un tiempo de residencia de 2 [min], el tamaño de lote o (Batch size) es de 2,076 [m³]. Con este valor se entra en el gráfico y se obtiene el costo del equipo comprado.

El costo del equipo para el año 2002 es de US\$ 1.500 para acero inoxidable.

Este precio que se obtiene por bibliografía se encuentra en años anteriores al requerido, año 2007, por lo cual se realiza una corrección de los precios mediante el método de índices de costos de equipos.

$$\text{Costo}(2007) = 1.500 * \frac{123}{100}$$

Costo Equipo de Filtración para el año 2007 = US\$ 1.900

◀ **Costo Piscina Recolectora del Agua Recuperada:**

Los costos de construcción de la piscina recolectora corresponden a:

- 1.- Excavación: 5 US\$/m³.
- 2.- Carpeta de HDPE: 2,5 US\$/m².
- 3.- Instalación carpeta HDPE: 1,5 US\$/m².

Si el volumen de excavación corresponde a 1.780 [m³] y el área de la carpeta de HDPE a 1.230 [m²].

Costo de Piscina Recolectora = US\$ 14.000

	Valor en US\$
Espesador	770.000
Equipos de bombeo	37.000
Filtro	1.900
Piscina recolectora de agua	14.000

Costo Total de Equipos Comprados	823.000
-------------------------------------	---------

Tabla 8.1. Tabla resumen costo total de Equipos.

A continuación será presentada una tabla resumen en la cual se encuentran todos los costos iniciales de inversión.

Cabe señalar que los precios por unidad, unidades ya sea m³, m², o Kg fueron obtenidos de la ingeniería básica del proyecto de Depósito en Pasta de la Minera las Cenizas Planta Cabildo, en específico las planillas de Inversiones y costos.

	Unidad	Precio por unidad US\$	Cantidad	Total US\$
Plataforma para instalaciones				
1.- Excavación para plataforma.	m ³	5,0	12.000	60.000
2.- Transporte de excedentes.	m ³	2,0	13.500	27.000
Equipos y dependencias				
1.- Espesador.	-	-	1	770.000
2.- Bombas.	-	-	3	37.000
3.- Filtro.	-	-	1	1.900
4.- Piscina recolectora.	-	-	1	14.000
5.- Container.	-	-	1	3.800
Obras civiles y montaje				
1.- Radier espesador.	m ²	30	600	18.000
2.- Excavaciones fundación.	m ³	5,0	100	500
3.- Fundación espesador.	m ³	300	100	30.000
4.- Montaje mecánico, eléctrico, control, piping etc.	-	100.000	1	100.000
Transporte de relaves y agua recuperada				
1.- Tubería HDPE PN6 D=140 mm Peso medio 2,24 Kg/m Impulsión	kg	3,0	4.032	12.096
2.- Tubería HDPE PN6 D=140mm Peso medio 2,24 Kg/m Descarga	Kg	3,0	4.704	14.112
3.- Tubería Acero D= 6 pulg Peso medio 41,66 Kg/m	Kg	1,5	72.905	109.360

Tabla 8.2. Costos iniciales de inversión.

Capital Total de Inversión = MUS\$ 1,2

8.2.- COSTOS OPERACIONALES.

ENERGÍA:

	Potencia Consumida	
	hp	KW
Espesador de pasta	40	29,8
Bomba impulsión de relave	20,7	15,42
Bomba descarga de relave	9,05	6,74
Bomba impulsión agua recuperada	8,36	6,22
Total		58,19

Tabla 8.3. Costos energéticos.

Producción pasta de relave = 118,24 ton/hr

Consumo Kwh por tonelada = 0,492 Kwh/ton

Valor del Kwh = US\$ 0,06

Consumo energético por ton de relave depositado	0,03 US\$/ton
--	----------------------

PERSONAL:

	Turnos por día	Valor US\$/mes	Tota US\$/mes
Operador Planta de Relaves	4	1.500	6.000

Tabla 8.4. Costo personal.

Como la Planta de Espesamiento de Relaves no posee ingresos por ventas, los ingresos por operación serán equivalentes al costo total del producto (el producto en este caso será la pasta de relave), esto provoca que el flujo de caja y todo el análisis posterior no sea realmente representativo de la conveniencia del proyecto, es por ello que no es recomendable analizar la rentabilidad de la planta desde una perspectiva económica.

Al ser la Planta de Espesamiento el proceso fundamental para la aplicación de la tecnología TTD (Deposición de relaves espesados o en pasta), una de las formas de analizar su rentabilidad es a través de los beneficios sociales y ambientales que esta Tecnología presenta.

Para ello es necesario hacer una comparación entre el método tradicional de disposición de relaves (que en nuestro país corresponde a los Tranques de Relaves) y la tecnología TTD (Deposición de relaves espesados o en pasta) viendo sus ventajas y desventajas.

8.3.- DEPÓSITOS DE RELAVES TRADICIONALES V/S DEPÓSITOS EN PASTA.

◀ Comparación Cualitativa:

1. Los Depósitos en Pasta reducen significativamente la necesidad de diseñar y construir enormes muros de contención, además de disminuir considerablemente la cantidad de material involucrado en su construcción. Esto se debe a que generalmente, gracias al espesamiento, el depósito de pasta recibe entre la tercera y la quinta parte del agua que recibiría una descarga de relaves convencional. Por lo tanto, sólo se requiere un pequeño dique para contener principalmente las aguas lluvias.
2. Con los Depósitos en Pasta disminuyen los riesgos de fallas geomecánicas asociados a los tranques convencionales, debido a que se ha extraído el máximo de agua permisible, encontrándose los relaves en un estado no saturados; este estado no saturado de los relaves baja las posibilidades de generar aguas ácidas y lixiviación de metales.
3. Las pérdidas de agua por evaporación son significativamente menores en comparación con las que se producen en los depósitos tradicionales, esto se debe a que el agua expuesta a evaporación es mínima. Adicionalmente, se disminuye el tamaño de la laguna de agua clara en la cubeta del tranque, ya que la cantidad de agua liberada por los relaves es mínima y se evapora al exponer la pasta a la atmósfera. Otro punto importantísimo es la disminución en la pérdida de agua por infiltraciones.
4. Al disponer relaves en pasta se reduce la superficie de suelo requerida para disponer los relaves, con lo cual se optimiza el uso del suelo; esto equivale a

concluir que para una misma superficie, la capacidad de almacenamiento se incrementa en forma importantísima.

5. Debido a la forma en que se producen los enlaces entre las partículas, la emisión de material particulado; producto de la acción del viento; se reduce a prácticamente cero en los Depósitos en Pasta.
6. La recuperación de agua desde los relaves se incrementa enormemente en los Depósitos en Pasta, lo que se refleja en una importante reducción de los costos de abastecimiento de agua fresca. Este punto es particularmente importante para el caso de las faenas mineras ubicadas en la zona norte de nuestro país, que en muchos casos tienen limitadas posibilidades de expansión debido a una baja disponibilidad de agua.
7. La disposición de relaves en pasta abre la posibilidad de co-depositarlos junto a otros residuos mineros, como por ejemplo material estéril, contribuyendo a la estabilidad de este tipo de depósitos. A esto debe agregarse que dadas las características de impermeabilidad de la pasta, permite un encapsulamiento del material estéril con potencial de generación de aguas ácidas.
8. Los depósitos tradicionales de relaves a través de la historia han presentado una serie de fallas ya sea por eventos sísmicos o bien por problemas geomecánicos, que han provocado el repudio de la comunidad aledaña al sector. La disposición en pasta por su parte se presenta como una tecnología alternativa mucho mas amigable con el entorno ya sea social como ambiental.
9. Finalmente respecto a las actividades de cierre, prácticamente no se requieren medidas adicionales para estabilizar el depósito ya que los relaves que son dispuestos en forma de pasta quedan muy bien consolidados, en el caso en que se requiera medidas de vegetación o de remediación, estas pueden realizarse en forma paralela a la operación. En un depósito tradicional, se

requiere un largo tiempo para que los relaves alcancen un grado de consolidación que permita realizar trabajos, estos plazos pueden ser incluso muchos años.

◀ **Comparación Cuantitativa:**

Para realizar una comparación cuantitativa a continuación se entregarán algunos datos de un Depósito Tradicional de Relave (Tranque de Relave las Luces II, perteneciente a la Minera las Cenizas) y un Depósito en Pasta (perteneciente a la Minera las Cenizas, Planta Cabildo).

Los datos siguientes fueron obtenidos del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, específicamente en el área de búsqueda de proyectos sometidos al SEIA.

	Tranque de Relave las Luces II	Depósito de Relaves en Pasta Planta Cabildo
Superficie de depositación [ha]	35	40
Razón de disposición de relaves [ton/mes]	52.000	75.000
Vida útil del deposito [años]	12	10
Capacidad de almacenamiento de relave [ton]	7.488.000	9.000.000
Inversión total en US\$	2.000.000	6.000.000

Tabla 8.5. Comparación entre un Depósito Tradicional de relave y un Depósito de Relaves Espesados o en Pasta.

Fuente: Sistema de evaluación de impacto ambiental.

Dentro de las obras comunes para ambos Depósitos de Relaves están:

- Muro de partida.
- Obras de drenaje.
- Obras de impulsión de relaves.
- Recuperación y recirculación de aguas claras.
- Canal de contorno para evacuación de aguas lluvias.
- Líneas de conducción de eléctricas.
- Camino de acceso.
- Instalaciones temporales.

Los costos de cada una de estas obras varían según la ubicación geográfica del depósito, la distancia existente entre la Planta de Beneficio y el depósito, disponibilidad de mano de obra y muchos otros factores que hacen que el capital total de inversión varíe según sea el caso.

En el Anexo E-5 se presenta los costos y riesgos financieros de la tecnología de disposición de relaves espesados o en pasta.

9.- CONCLUSIONES.

1. La industria Minera está permanentemente evaluando la factibilidad económica de depositar sus relaves espesados o en forma de pasta, porque si bien ya se ha probado que es técnicamente factible, hay una serie de condiciones de costos que todavía dificultan su aplicación.
2. Al ser realizado un análisis cualitativo (Capítulo N° 8) se concluye que son mucho más las ventajas que desventajas existentes en la Depositación de Relaves Espesados, a continuación son presentadas las principales fortalezas y debilidades de este método de disposición.

<i>Fortalezas</i>	<i>Debilidades</i>
Ahorro consumo de agua.	Debe presentar un bajo porcentaje de finos.
Aumenta capacidad de tranque.	Poca experiencia a nivel nacional.
Partículas no segregan, mínima polución.	-
No se requiere uso de grandes muros.	-
Minimización riesgos de fallas y licuefacción.	-
Estabilidad sísmica.	-
Disminución contaminación de aguas y ríos.	-
Buena experiencia a nivel mundial.	-

3. En relación al análisis cuantitativo; hecho en el mismo capítulo; se puede concluir que la superficie necesaria de deposición de un relave espesado es mucho menor que la necesaria para depositar un relave tradicional (relave con alto contenido de agua), esta observación se obtiene al determinar que para 52.000 [ton/mes] de pasta de relave a depositar se necesitan sólo 28 [ha] y no las 35 [ha] que serían necesarias para depositar una misma cantidad relave

convencional. Lo anterior se encuentra directamente relacionado con la optimización en el uso del suelo.

4. Otro punto importantísimo concluido es acerca de la inversión total, la cual es mucho mayor para los Depósitos de Relaves en Pasta; esto se debe a que este tipo de depósitos debe incluir en la inversión total, además de los costos relacionados con la depositación propiamente tal, el costo de la Planta de Espesamiento de Relaves.
5. En resumen, se llegará a un punto en que la Tecnología de Relaves Espesados será conveniente en términos económicos debido a que están ocurriendo dos procesos en forma simultánea: por un lado la tecnología va avanzando y los equipos se van haciendo más asequible y, por otro lado, los requerimientos ambientales y el mayor valor del recurso agua, van elevando los costos de las compañías.

10.- BIBLIOGRAFÍA.

- ◀ Pedro Arnoldo Salazar Fernández. 1977. Trabajo de Titulación: “Cálculo de un Espesador para relaves después de un etapa de remolienda de concentrado Sewell”, Universidad Técnica del Estado.
- ◀ Peters & Timmerhaus West. 2003. “Plant Design and Economics for Chemical Engineers”. 5ª Edición.
- ◀ Coulson & Richardson. 1988. “Ingeniería Química”.
- ◀ Svarovsky & Ladislav. 1984. “Hydrocyclones”.
- ◀ Fernando Concha. 2001. “Manual de Filtración & Separación”. Cap. N°8 y Cap. N°14.
- ◀ Perry.1998. “Manual del Ingeniero Químico”. 6ª Edición. Editorial McGraw – Hill.
- ◀ Nassir Sapag & Reinaldo Sapag. 2000. “Preparación y Evaluación de Proyectos”.
- ◀ Chemical Engineering Progress. 1990. “Design Cost Factors for Factors for Scaling – up Engineering Equipment”.
- ◀ Luís Vega Alarcón: “Apuntes de Ingeniería Económica”, Escuela de Ingeniería Química, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2006.
- ◀ José Torres Titus: “Apuntes de Mecánica de Fluidos”, Escuela de Ingeniería Química, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2002.

- ◀ Roberto Muñoz: “Apuntes de Fluidodinámica”, Departamento de Tecnología Química, Universidad de Chile, 1979.
- ◀ Sofra, F. & Boger, D. 2001. “Slope Prediction for Thickened Tailings and Pastes”. Tailings and Mine Waste 2001. Colorado, USA.
- ◀ Bugin A, Costa J. 1989. “Recuperacao de áreas con Mineracao de Carvao”. Brasil Mineral.
- ◀ Robinsky, E. 1975. “Thickened Discharge a new approach to tailing disposal”.
- ◀ “Hydrologic and Hydrogeologic Evaluation of the Thickened Tailing Disposal System at Kidd Creek Division, Falconbridge Limited”
Evaluación hidrológica e hidrogeológica del sistema de Disposición de espesados en la División Kidd Creek de Falconbridge Limited.

ANEXO A

ANEXO A-1

RESIDUOS PROVENIENTES DEL PROCESO DE FLOTACIÓN.

Este tipo de residuo minero llamado “Relave” será el de interés, ya que se trabajará a lo largo de todo el desarrollo de esta memoria con residuos provenientes de una Planta de Concentración de Cobre.

A continuación se entregarán aspectos medioambientales, económicos y de salud referente a estos desechos y principalmente al método de disposición que ha sido mayormente utilizado a nivel nacional “Los Tranques de relaves”.

1.- Los Relaves y su Impacto Ambiental en la Minería Chilena:

Análisis realizados a distintos relaves en Chile han identificado elementos como cobre, calcio, magnesio, sodio, potasio, entre otros, en su composición. Mientras, en otros, también se han detectado muestras de arsénico, cadmio, cianuro libre, compuestos fenólicos, hierro disuelto y suspendido, molibdeno, plomo, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, sulfatos, aceites y grasas. Es por esta peligrosa presencia de muchos agentes tóxicos que se debe tener muchísima precaución en su forma y lugar de disposición.

Históricamente, los relaves eran dispuestos de la forma más conveniente para el dueño de la empresa Minera, considerando la topografía pero siempre bajo el criterio de mínimo costo. Esto, unido a la falta de conciencia y legislación ambiental en todo ámbito, trajo como consecuencia que los relaves fueran descargados generalmente a cursos de aguas como ríos y arroyos.

Sin embargo, en las últimas décadas esta práctica ha ido cambiando. Hoy se tiene una mayor conciencia de los impactos ambientales asociados a la actividad minera y, producto de la apertura de los mercados, las empresas cada vez más incorporan los criterios ambientales en sus procesos productivos, situación a la que no ha sido ajeno nuestro país.

En Chile, en 1965, debido a la falla del Tranque de relave “El Cobre”, murieron 200 personas. Este hecho marcó significativamente a la minería en nuestro país, lo que finalmente se tradujo en la dictación en 1970 del Decreto Supremo N°86 del Ministerio de Minería, sobre Construcción y Operación de los Depósitos de Relaves, decreto que fue derogado mediante la promulgación del D.S. N° 248, del Ministerio de Minería, publicado en el diario oficial el 11 de abril del 2007. Este nuevo reglamento se denomina “Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves”. Decreto mucho más complejo que incluye nuevos e innovadores métodos de depositación de relaves no incluidos en el decreto anterior.

El Decreto Supremo N° 248 estipula que existen tres tipos generales de depósitos de relaves: los Depósitos Superficiales, los Depósitos Subterráneos y los Depósitos Marinos o Lacustre.

- ◀ Los principales tipos de “Depósitos Superficiales” de relaves existentes en Chile son los denominados “Tranques Convencionales de relaves”, que introducen en la operación una etapa de separación de tamaño del mineral contenido en la pulpa y, además, utilizan la arena para construir un muro de contención de la fracción más fina y las aguas sobrenadantes. Algunos ejemplos de Tranques de Relaves son: Talabre, Los Pelambres, Ovejería y Las Tórtolas entre otros. Otro tipo de depósito superficial muy utilizado es el denominado “Tipo Embalse”, que utiliza material de empréstito para la construcción del muro, diferenciándose de los tranques convencionales en que se construyen para una capacidad determinada de relaves.

Finalmente también existe una alternativa no tradicional de depositación, que corresponde a la depositación de Relaves Espesados, en Pasta o Filtrados; depósitos que no han sido implementados masivamente en Chile; ya que se encuentran en etapa de evaluación, diferenciándose sólo en el porcentaje de sólidos presentes en el relave.

Serán nuestro objetivo de estudio a lo largo de esta memoria; siendo analizados en profundidad en el capítulo N° 4.

- ◀ Dentro de los “Depósitos Subterráneos” se encuentran los depósitos en minas subterráneas en operación y abandonadas; y los depósitos en excavaciones abiertas.

Región	Nº de Depósitos
I	1
II	14
III	34
IV	38
V	11
RM	5
VI	2
XI	2
Total	107

*Tabla 1. Depósitos de Relaves por región.
Fuente: U. De Chile 2002.*

Riesgos Ambientales asociados a los Tranques de Relave:

Los depósitos de relaves generan riesgos por diversas causas, los que pueden clasificarse en las siguientes categorías:

1. Riesgo sísmico.
2. Riesgo hidrogeológico.
3. Generación de polvo.
4. Contaminación del suelo.
5. Uso alternativo del terreno.
6. Consumo de agua y fallas en el sistema de disposición.

- 1. Riesgo Sísmico:** Chile es un país eminentemente sísmico, de ahí la gran importancia que adquiere esta variable. Su impacto está directamente relacionado con el tamaño, diseño y construcción del tranque y las características del lugar dónde se ubica el depósito, obviamente dependiendo de la magnitud del sismo. Este riesgo se evalúa a través de la estabilidad de los taludes y el riesgo de licuefacción (fenómeno en el cual el relave pasa a ser un fluido viscoso de alta densidad). Ante un evento sísmico puede ocurrir la contaminación de cursos de agua, zonas agrícolas y, lamentablemente daños sobre vidas humanas.
- 2. Riesgo Hidrogeológico:** Este tipo de riesgo puede dar lugar a distintos tipos de efectos tales como arrastre de desechos y residuos debido a lluvias, crecidas de ríos y avalanchas, acidificación de las aguas, solubilización de metales, arrastre de sedimentos y contaminación de napas subterráneas. Todos ellos impactan de forma diferente el medio ambiente contaminando, por ejemplo, aguas y suelos. Esto puede suceder ya sea debido a la incorporación de relaves a los cursos de aguas (ríos, lagos u océanos, fuentes de abastecimiento de agua potable, recursos para la agricultura y la recreación); como a la inestabilidad presente en las instalaciones por la erosión de los muros, alterando el hábitat de los cursos de agua superficial o percolando las napas subterráneas.

En el caso de descargas directas de relave a los cursos de agua o al océano, pueden generarse problemas de cieno y turbidez que sepultan flora y fauna, así como contaminación de los cursos de agua y la abrasión continua del fondo. Además, las partículas en suspensión obstaculizan el paso de la luz solar, generando daños a las especies habitantes.
- 3. Riesgo por Generación de Polvo:** En el caso de los relaves, la generación de polvo se produce debido a que el tamaño de sus partículas las hace propensas a la erosión eólica. Este fenómeno se presenta con mayor fuerza en depósitos abandonados o que están en proceso de secamiento.

Provoca impacto en la salud humana, debido a que sus partículas son tan finas que pueden ser inhaladas y pasar al sistema respiratorio, causando efectos físicos y químicos importantes. Además, el polvo provoca daños físicos directos a las plantas e impide parcial o totalmente el proceso de fotosíntesis. También reduce la fecundación de las flores, el rendimiento y la calidad de los árboles frutales y plantas de cultivo.

4. **Contaminación del Suelo:** Este fenómeno se presenta cuando las sales y metales de los relaves consolidados en el subsuelo se mueven hacia la superficie del suelo productivo. La contaminación de los suelos toma mayor fuerza durante la revegetación de los terrenos.

Es así como se producen dos fenómenos de contaminación: primero: cuando los elementos entran en contacto con las raíces de las plantas provocando su muerte; y segundo: cuando los metales, como el cobre y el molibdeno, son absorbidos y acumulados por las plantas, que al ser consumidas por animales provocan ciertas enfermedades como por ejemplo la molibdenosis.

5. **Riesgo por pérdidas de Agua:** En el norte de Chile, como en muchas zonas áridas del mundo, se están utilizando las escasas fuentes de agua para desarrollar la actividad minera. La disposición de relaves genera una importante pérdida de agua, ya sea a través de filtraciones, humedad retenida o evaporación, que se hace más importante en zonas calurosas y sin precipitaciones.

6. **Riesgos por Fallas en el Sistema de Disposición:** Durante la construcción, operación y aún después de ello, los sistemas de disposición de relaves están expuestos a fallas de mal diseño, construcción, operación y/o accidentes que pueden originar derrames.

Además, tenemos los impactos asociados al cierre inadecuado de los tranques, provocando contaminación de ríos, lagos, bordes costeros, problemas de seguridad y riesgo de colapso de la instalación, emisión de

material particulado, alteraciones estéticas y paisajísticas, generación de drenaje ácido, entre otros.

Todos los riesgos ambientales que generan los Tranques de Relave se ven alterados en su magnitud por la peligrosidad de sus componentes, el contenido de metales pesados, los reactivos y otras características como por ejemplo el pH del relave.

2.- Aspectos Económicos referentes a los Tranques de Relaves:

El tremendo desarrollo de la actividad minera, durante los últimos 20 años, tiene numerosos costos ambientales (mencionados anteriormente) relacionados con las características propias de la actividad minera, en especial el crecimiento de esta actividad y otros costos asociados a los efectos de la producción.

El conjunto de estos costos (algunos de ellos imposibles de evitar) forman un panorama que muestra los efectos que dicha actividad tiene sobre el medio ambiente.

A esto se agrega el hecho que la minería genera problemas futuros que no han sido resueltos, como la viabilidad económica después del agotamiento de las minas o el establecimiento de planes de cierre de faenas que consigan la reparación ambiental.

Por lo tanto, se puede establecer que son necesarios mecanismos de gestión, fiscalización y control de la Industria Minera que permitan la sustentabilidad de este sector.

◀ Costos de Desarrollo:

El boom del sector minero ha traído costos ambientales asociados a la sobreexplotación del recurso mineral, convirtiéndose la minería en una de las actividades industriales que genera la mayor cantidad de desechos.

En la medida que el sector crece, mayor es la cantidad de desechos que se genera, lo que se ha visto influenciado por dos factores:

En primer lugar, en la actualidad, la mayoría de los yacimientos que se encontraban a baja profundidad ya han sido explotados, lo que significa que ahora los proyectos de explotación se hallan a mayor profundidad, requiriéndose la extracción de una mayor cantidad de materia estéril antes de obtener el mineral.

Aun cuando la extracción de grandes cantidades de material estéril no tiene efectos ambientales desastrosos en Chile, ya que la mayoría de las minas se encuentran en zonas despobladas, sí se genera gran preocupación por el polvo arenoso que afecta a la población y vegetación cercana a la mina.

En segundo lugar, la caída en la ley de los minerales tiene una incidencia fundamental, ya que de ello depende cuánto desecho se genera durante el proceso de molienda. En la actualidad, la mayoría de las menas de cobre tienen en promedio una ley de menos del 1%, lo que significa que de cada tonelada (1.000 kilos) de mena, sólo 10 kilogramos son cobre y los 990 kilogramos restantes son desechos.

Bajo esta perspectiva, la producción de desechos mineros se ha acrecentado enormemente durante los últimos años, entendiéndose que la producción minera, sólo considerando el cobre, se ha incrementado en más de un 161% durante el período 1990-2002 (Fuente: Anuario de la Minería de Chile, Sernageomin 2006).

◀ **Costos de Producción:**

El agua:

Como ya se ha mencionado, la generación de desechos en la minería es enorme.

Una empresa de la Gran Minería puede llegar a producir más de 10.000 toneladas de desechos al día.

Ritmo de disposición (ton/día)	Tamaño
Más de 10.000	Gran Minería
Entre 1.000 y 10.000	Mediana Minería
Menos de 1.000	Pequeña Minería

Tabla 2. Ritmo de disposición por tamaño de industria.

Fuente: U de Chile (2002).

La forma más barata de transportar dichos desechos es a través del agua. Como se puede suponer, el uso de agua para el transporte de los desechos es altísimo, lo que provoca costos a otros sectores al aumentar su valor, debido a que este insumo se hace cada vez más escaso.

El consumo de agua en la Industria Minera obtenido del “Acuerdo Marco de Producción Limpia Sector Gran Minería (Noviembre 2000)” “Uso Eficiente de Agua en la Industria Minera y Buenas Prácticas” corresponde a:

- Consumo Total = 1.238.356 m³/día
- Consumo unitario planta concentradora = 0,99 m³/ton mineral
- Consumo unitario planta hidrometalúrgica= 0,20 m³/ton mineral
- Consumo unitario otros procesos = 0,10 m³/ton mineral
- Consumo promedio = 0,75 m³/ton mineral

◀ **Costos de Cierre y Abandono:**

Se han estimado los costos para el manejo de los relaves en la cordillera, de forma que se minimice el riesgo de un accidente durante su operación y en su etapa post operacional.

Las actividades unitarias definidas para la estimación son las siguientes:

- Remoción de los relaves de cordillera.
- Traslado del material de la cordillera al valle.
- Instalación de tranque en el valle.
- Operación del tranque en el valle.
- Manejo del agua residual.
- Cierre del tranque en el valle.
- Cierre del tranque en la cordillera.

Se estimó que el costo total de cierre; es decir realizar las actividades descritas anteriormente; para un tranque en la cordillera es de aproximadamente de US\$ 124 millones (la estimación se realizó en base al Catastro de Tranques de Relaves de Sernageomin 1989-1990, considerando tranques operativos y no operativos, cuya capacidad máxima de diseño supera los 300.000 m³).

3.- Efectos de los Relaves en la Salud:

La actividad industrial y minera facilita la movilidad de elementos a través de los distintos compartimentos ambientales. Los “Elementos traza” son aquellos cuya concentración en la corteza terrestre es igual o inferior a 1.000 ppm. Muchos elementos traza son esenciales para la vida. Particularmente los metales traza pueden clasificarse entre metales pesados (densidad superior a 5 g/cm³) y ligeros (densidad inferior 5 g/cm³).

La actividad industrial y minera permite que estos metales contaminen las aguas, pero también se les encuentra en el aire, formando gases y/o partículas fácilmente transportables y potencialmente respirables por el hombre.

- ◀ **Cobre:** Es uno de los metales más abundantes. Para muchos organismos es un micronutriente esencial. La Norma Chilena de Agua Potable 409 (Nch 409) establece como concentración máxima de 1 [mg/l]. En algunos organismos los efectos tóxicos son por exposición inmediata. Todos los organismos experimentan daños debido a concentraciones excesivas; algunas algas sufren daños con niveles de concentración de 0,5 [mg/l].

Los efectos en animales superiores dan cuenta de daños cerebrales.

- ◀ **Plomo:** Metal ampliamente distribuido en el aire, agua, suelos y alimentos. El uso como aditivo antidetonante en la gasolina permitió que se distribuyera globalmente. Provoca alteraciones graves en la salud, aún en bajas concentraciones, que incluyen daños cerebrales, daños al sistema reproductor, células sanguíneas, posible causante de aborto etc.

La Nch 409 de agua potable establece que el límite máximo de plomo en aguas debe ser 0,05 [mg/l].

- ◀ **Arsénico:** Se utiliza principalmente en pesticidas y preservantes de la madera, es el responsable de cáncer a la piel y pulmonar. También se le encuentra en la fundición de cobre y otros metales. La toxicidad depende de su forma química ya que el arsénico inorgánico es mucho más tóxico que el orgánico.

El cáncer pulmonar generalmente es una enfermedad ocupacional para trabajadores de fundiciones y de plantas de insecticidas. La NCh 409 de agua potable establece como límite máximo de arsénico 0,05 [mg/l].

- ◀ **Bario:** La forma más tóxica es el Cloruro de bario. En el organismo el bario se comporta como el calcio y se deposita en los huesos. La exposición al bario es a través de los alimentos y el agua. La Nch 409 lo contempla entre los elementos a controlar. Sin embargo la Environmental Protection Agency (EPA) de EE.UU. establece como límite 1 [mg/l] en el agua potable.

- ◀ **Mercurio:** Es un metal líquido. Actúa como neurotoxina capaz de causar daños cerebrales en fetos y perturbaciones emocionales en adultos. Los mariscos pueden ser una causa de contaminación, dado que éste metal se acumula en organismos filtradores. El mercurio tiende a distribuirse en las zonas cercanas a las minas, fundiciones, incineradores de desechos sólidos y plantas generadoras que utilizan combustibles fósiles. La Nch 409 establece en 0,001 [mg/l] como límite máximo de concentración en agua potable.

4.- Casos Emblemáticos de Desastres en Tranques de Relaves:

◀ **Minera Cerro Negro:**

El 3 de octubre del 2003 se produjo un grave accidente en la Minera Cerro Negro, ubicada en Cabildo, a 50 Kilómetros al este de La Ligua, en la Región de Valparaíso.

Sorpresivamente, se desprendió la pared de contención del quinto sector del tranque, que contenía 300.000 toneladas de material rocoso particulado, producto del procesamiento de las faenas mineras de producción de cobre.

Unas 50.000 toneladas de material escurrieron por las quebradas en un tramo de más de 10 kilómetros hacia el valle del sector de Guayacán, hasta llegar a las aguas del estero los Ángeles, que provee agua a los diferentes predios agrícolas de la zona y desemboca en el caudal del río la Ligua. Para contrarrestar los efectos del derrame, se iniciaron de inmediato trabajos de

movimiento de tierra y la construcción de cuatro pozos con maquinaria pesada, para que el material escurrido se deposite allí.

Ante la sospecha de que la contaminación se hubiese extendido, se dispuso la prohibición de uso de agua proveniente de napas y esteros en los sectores rurales aledaños al desastre. Unos mil habitantes de los sectores afectados quedaron sin agua para consumo y uso personal, situación que fue parcialmente paliada con la distribución a través de camiones aljibes proporcionados por la Municipalidad local.

El relave derramado contenía restos de al menos cinco minerales, entre ellos cadmio y metales pesados. De allí el riesgo de contaminación que produjo al deslizarse por los valles y mezclarse con las aguas para beber y regar.

◀ **Minera Las Cenizas:**

En 1981, durante los temporales de invierno, las aguas lluvias arrastraron relave de la Minera Las Cenizas, ubicada en pleno corazón de la ciudad de Cabildo Quinta Región, hasta el borde mismo de la Carretera 5 Norte. En esa ocasión los problemas no pasaron a mayores, pero toda la zona por donde pasó el barro arrastrado por las aguas lluvias, quedó cubierta de sedimentación mineral que de algún modo afectó a la producción agrícola.

◀ **El caso de la Minera Cobrex:**

En la cuarta Región, en el año 2002 ocurrieron dos graves accidentes en La Minera Cobrex.

En septiembre, el tranque de relaves Talcuna 1 de la Minera, ubicado a 40 kilómetros de La Serena en la quebrada de Marquesa, Valle del Elqui, sucumbió y provocó un derrame de 8.000 metros cúbicos de relave al río Elqui. La contaminación del cauce del río ocasionó enormes efectos en los cultivos, aunque los canales fueron cerrados antes que un gran volumen de agua supuestamente contaminada alcanzara a ingresar a las superficies sembradas. Se comprobó contaminación de cobre, hierro y manganeso en cantidades muy superiores a las permitidas para el consumo humano.

Como si esto no bastara, a principios de noviembre; dos meses después; volvió a producirse un nuevo derrame sobre el río Elqui, que esta vez puso en peligro las instalaciones de la Empresa Sanitaria de Coquimbo.

Los casos mencionados anteriormente son sólo algunos de los tantos desastres acontecidos a través de la historia en los Depósitos Tradicionales de Relaves, siendo los más significativos; ya sea por las vidas humanas cobradas como por los daños provocados; el colapso del Tranque Barahona de la Mina el Teniente VI Región ocurrido durante el terremoto de Talca en 1928 y en donde murieron 54 personas; y el colapso del depósito de relaves de la Mina el Soldado en la V Región, ocurrido durante el terremoto del día 28 de marzo de 1965 (mueren aprox. 200 personas). Este último desastre dio origen al D.S N° 86 (1970) del Ministerio de Minería, que corresponde a la primera reglamentación que permitió precisar las ideas y exigencias tecnológicas en la construcción de los tranques de relaves.

ANEXO A-2

Decreto Supremo N° 248-

**“Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño,
Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de
Relaves”**

El D.S N° 86 del Ministerio de Minería promulgado el 31 de julio de 1970, fue publicado el 13 de agosto de 1970 en el diario oficial N° 27.722. Se consideró por la necesidad de precisar las ideas y exigencias tecnológicas en la construcción de los tranques de relaves.

Este Decreto Supremo aprobó el denominado “Reglamento de Construcción y Operación de Tranques de Relaves”. Derogado mediante el D.S. N° 248, del Ministerio de Minería, de fecha 29 de diciembre de 2006, el cual ha sido publicado en el diario oficial N° 38.735 del 11 de abril de 2007.

Este nuevo reglamento se denomina “Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves”.

Consta de 8 títulos dispuestos en capítulos y su configuración contiene en total 59 artículos, además de 2 artículos transitorios.

Consideraciones tomadas para el nuevo reglamento de Depósitos de Relaves D.S. N° 248:

1. La necesidad de proteger la salud y seguridad de las personas, la protección del medio ambiente y la utilización racional de los recursos naturales.
2. La diversidad de sistemas de depósitos de relaves y el avance que han experimentado los métodos de diseño, construcción y operación de aquellos.

3. La necesidad de precisar las exigencias técnicas para obtener la aplicación de conceptos más avanzados en la construcción de depósitos de relaves de la minería chilena.
4. La importancia de dar cumplimiento a las disposiciones sobre eficiencia y coordinación de los órganos de la Administración del Estado, contenida en el D.F.L N° 1/19.653 de 2000, que fija el texto Refundido, Coordinado y Sistematizado de la ley N° 18.575 Orgánica Constitucional de Bases de la Administración General del Estado.

La Estructura del Reglamento es la siguiente:

TÍTULO I

DISPOSICIONES GENERALES:

CAPÍTULO PRIMERO: Propósito y Campo de Aplicación.

CAPÍTULO SEGUNDO: Definiciones.

CAPÍTULO TERCERO: Funciones y Atribuciones del Servicio.

CAPÍTULO CUARTO: Obligaciones de las Empresas.

CAPÍTULO QUINTO: Responsabilidades y Derechos del Usuario.

TÍTULO II

PROCEDIMIENTOS PARA LA APROBACIÓN DE PROYECTOS DE DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE DEPÓSITOS DE RELAVES, DE PARTE DEL SERVICIO:

CAPÍTULO PRIMERO: Presentación del Proyecto

CAPÍTULO SEGUNDO: Aprobación del Proyecto.

TÍTULO III

CONSTRUCCIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE RELAVES:

CAPÍTULO PRIMERO: Generalidades.

CAPÍTULO SEGUNDO: Ejecución de las Obras.

TÍTULO IV

OPERACIÓN Y MANTENCIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE RELAVES:

CAPÍTULO PRIMERO: Previsiones Generales

CAPÍTULO SEGUNDO: De la Operación y Mantenición.

CAPÍTULO TERCERO: Emergencias.

TÍTULO V

CIERRE TEMPORAL, DEFINITIVO Y REANUDACIÓN:

CAPÍTULO PRIMERO: Reanudación de las Operaciones luego de un Cierre Temporal.

CAPÍTULO SEGUNDO: Cierre definitivo.

TÍTULO VI

ALGUNOS CRITERIOS DE CONTROL

TÍTULO VII

SANCIONES

TÍTULO FINAL

Tipos de depósitos de relaves que contempla el nuevo reglamento:

- TRANQUES DE RELAVES.
- EMBALSES DE RELAVES.
- DEPÓSITO DE RELAVES ESPESADOS.
- DEPÓSITO DE RELAVES FILTRADOS.
- DEPÓSITO DE RELAVES EN PASTAS.

CONTENIDOS DESTACABLES DEL TÍTULO I DEL REGLAMENTO:

En el Capítulo Primero:

- El artículo 1 señala:

El presente reglamento tiene por objeto fijar normas sobre:

a) Procedimientos para la aprobación de los proyectos de depósitos de relaves mineros.

b) Requisitos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves mineros y la disposición de sus obras anexas que garanticen la seguridad de las personas y de los bienes.

- Los artículos 2 y 3 indican:

Que las faenas mineras que generen y deban depositar relaves, deben cumplir con el reglamento y que a Sernageomin le corresponde la aplicación y fiscalización del reglamento, sin perjuicio de las atribuciones que en materia de fiscalización posean otros órganos del estado.

En el Capítulo Segundo:

- El artículo 4 indica:

Que se entenderá para efecto del reglamento por: director, organismos o autoridades fiscalizadoras, reglamento, servicio, terceros, usuario o proponente.

- Los artículos 5 y 6 indican:

Los alcances que tendrán algunos conceptos básicos y técnicos relativos a los depósitos de relaves, similares a los indicados en el D.S. N° 86, y se incorporan otros como: presión de poros, colapso, suspensión temporal, cierre, modificación significativa, relaves Espesados, relaves en Pasta, etc.

En los Capítulos Tercero al Quinto:

Se destacan las funciones y atribuciones del servicio; obligaciones de las empresas; responsabilidades y derechos del usuario.

- El artículo 7 indica:

Las funciones específicas del servicio como son: dictar, aplicar y controlar normas de seguridad minera que deben cumplir los usuarios de depósitos de relaves; recibir, revisarlos y aprobar si corresponde las solicitudes de proyectos de depósitos de relaves, proponer modificaciones o rechazarlos; aprobar mediante resolución

fundada del director y previo informe de los organismos técnicos del servicio, nuevas formas de depositación de relaves. etc.

- El artículo 8 establece:

Que para una empresa minera que lo requiera deberá presentar al servicio un proyecto de depósito de relaves el cual tendrá que cumplir con este reglamento y el reglamento de seguridad minera y con toda la normativa legal, reglamentaria y disposiciones vigentes.

- El artículo 9:

Exige la aprobación previa del servicio de cualquier proyecto de depósito de relaves, cualquiera sea su tipo, ritmo de crecimiento, dimensión y ubicación, antes de su construcción y operación.

- El artículo 10:

Establece que las modificaciones durante la construcción u operación del depósito de relaves o de un Proyecto aprobado, deberán ser informadas al servicio antes de su implementación, para obtener su aprobación.

- El artículo 11:

Establece que las consecuencias derivadas de una mala operación; incorrecta aplicación de reglamentos o incumplimiento parcial o total de las instrucciones o normativas del servicio serán de responsabilidad directa del usuario o proponente.

- El artículo 12:

Establece que se considerará con derecho preferencial al usuario de un depósito de relaves, frente a derechos de terceros que construyan con posterioridad instalaciones o habitaciones aguas abajo del depósito.

- El artículo 13:

Establece un requisito indispensable que deben cumplir los proyectos de tranques de relaves, este requisito corresponde a que el volumen de la cubeta sea a lo menos 3 veces el volumen del muro total de contención.

CONTENIDOS DESTACABLES DEL TÍTULO II DEL REGLAMENTO:

El Capítulo Primero:

- Consta sólo del artículo 14:

Se refiere a los diversos antecedentes que debe incluir un proyecto de depósitos de relaves, entre otros:

- Ubicación del depósito incluyendo: plano regulador, hoya hidrográfica etc.
- Antecedentes para formar la base de datos del depósito.
- Métodos constructivos.
- Parámetros de diseño geotécnico, geológicos, hidrológicos, meteorológicos etc.
- Presentación de un diagrama de flujo y plano general de las obras asociadas al depósito de relaves.
- Descripción e ilustración de las características especiales de diseño.
- Análisis de estabilidad sísmica.
- Determinación de distancia peligrosa.
- Manual de emergencias.
- Programas de capacitación de personal para la operación segura del depósito y las obras anexas y para el manejo adecuado de las situaciones de emergencia.

Capítulo Segundo:

- En los artículos 15 al 18 se indica que:
 - Los proyectos de depósitos de relaves serán aprobados por el servicio mediante resolución, que deberá ser dictada dentro del plazo de 60 días hábiles. será requisito, si corresponde, la previa aprobación ambiental, de acuerdo a lo establecido en el artículo 67 del decreto supremo N° 95.
 - Los rechazos de solicitud de proyectos, también requieren de una resolución fundada, la cual deberá ser notificada al interesado.
 - El proponente tendrá un plazo de 15 días para apelar de las observaciones o modificaciones, o bien, 60 días para subsanarlas y en

caso de exceder dicho plazo, el servicio considerará que se le presenta un nuevo proyecto.

CONTENIDOS DESTACABLES DEL TÍTULO III DEL REGLAMENTO:

Capítulo Primero:

- El artículo 19:

Será responsabiliza del usuario velar que la construcción del depósito de relaves se ajuste al proyecto aprobado.

- El artículo 20:

Establece que al proyecto deberán incorporarse las condiciones de diseño de ingeniería que satisfagan los compromisos ambientales adquiridos en la resolución ambiental respectiva.

- El artículo 21:

Exige la autorización previa del servicio, para efectuar modificaciones al proyecto aprobado, durante la etapa de construcción.

Capítulo Segundo:

- El artículo 22:

Establece que el usuario comunicará al servicio la fecha de inicio y el cronograma de construcción del proyecto. En todo caso, la ejecución de las obra debe iniciarse en un plazo no superior a 6 meses desde la aprobación del proyecto.

- El artículo 23:

Establece que en el caso que las obras estén encargadas a contratistas, se debe cumplir con lo establecido en el Reglamento de Seguridad Minera.

- El artículo 24:

Indica que el servicio deberá realizar inspecciones técnicas periódicas en terreno, para verificar que la construcción se ajuste al proyecto aprobado.

- En el artículo 25:

Se menciona que si la construcción u operación no se ajusta al proyecto aprobado y el usuario no da cumplimiento con lo indicado en los artículos anteriores, el servicio podrá ordenar el cese de la construcción u operación en su caso.

- En el artículo 26:

Se indica que el usuario presentará planos de las obras iniciales construidas dentro del plazo de un 1 mes contado desde la fecha de término de la construcción o desde el inicio de la depositación de relaves.

CONTENIDOS DESTACABLES DEL TÍTULO IV DEL REGLAMENTO:

Capítulo Primero:

- Desde los artículos 27 al 29 se establece:

El usuario debe comunicar al servicio la fecha de la puesta en operación del depósito o cambios respecto al cronograma propuesto; también se señala que el servicio debe realizar inspecciones técnicas al proyecto; y de la facultad de las autoridades fiscalizadoras para comunicar al servicio las irregularidades que detecten en la operación de depositación de relaves.

Capítulo Segundo:

- Del artículo 30 al 32:

Establecen que el usuario deberá enviar al servicio un informe trimestral sobre la operación y mantención del depósito; el servicio podrá solicitar cualquier otra información adicional que pueda ser de utilidad, siendo el usuario el único responsable de la operación y mantención de los depósitos.

- En el artículo 33:

Se indica que el servicio siempre podrá hacer las comprobaciones que estime necesarias y sancionar el incumplimiento de las normas, conforme a la ley y el reglamento si corresponde.

Capítulo Tercero:

- Del artículo 34 al 38 se establecen:

Las obligaciones de los usuarios respecto de elaborar y mantener actualizado un manual de emergencias del depósito de relaves; notificar, de inmediato al servicio la situaciones de emergencias que se presenten indicando las características del siniestro; en tal caso el servicio evaluará la situación y enviará personal técnico, si lo amerita; determinará la necesidad de efectuar trabajos adicionales, pudiéndolos exigir a costa del usuario y si la causa se debe a fenómenos naturales que impidan

una operación normal, éstas deberán suspenderse hasta que las condiciones de seguridad se restablezcan.

CONTENIDOS DESTACABLES DEL TÍTULO V DEL REGLAMENTO:

Capítulo Primero:

- Del artículo 39 al 43 se establecen:

Las medidas de seguridad que debe adoptar el usuario cuando suspenda las operaciones del depósito, en forma temporal o definitiva comunicándolo previamente al servicio, si el cese de operaciones excede el plazo de dos años el usuario deberá presentar un plan de cierre a menos que solicite una prórroga. Para reiniciar la operación después de un cierre temporal deberá solicitar autorización al servicio.

Si en la reanudación de las operaciones el usuario estima necesario efectuar modificaciones al proyecto aprobado deberá actuar de acuerdo al art.14 en lo que se modifique, finalmente cuando exista cambio de usuario entre el cese de operaciones y el reinicio de actividades, el nuevo usuario deberá informar este cambio al servicio.

Capítulo Segundo:

- Del artículo 44 al 47 se señala:

Sobre el cierre definitivo para el cual, se deberá presentar un plan de cierre, pero antes que se cumpla su vida útil, el usuario deberá disponer de un proyecto de cierre del mismo y de las obras anexas, aprobado por el servicio considerando lo establecido en el artículo transitorio del reglamento de seguridad minera; el proyecto de cierre contendrá un plan de acondicionamiento del depósito para soportar condiciones en el largo plazo; en caso que se quiera poner en funcionamiento un depósito de relaves cerrado en forma definitiva, se deberá presentar un nuevo proyecto, incluyendo un nuevo plan de cierre.

CONTENIDOS DESTACABLES DEL TÍTULO VI DEL REGLAMENTO:

- Del artículo 48 al 55:

Se contempla criterios de control, que deberán estar contenidos en todo proyecto de depósito de relave cuando corresponda, entre otros se indican:

- En los tranques de relaves la laguna de aguas claras debe mantenerse lo más alejado del muro de contención.
- la revancha debe ser como mínimo un (1) metro. Sin perjuicio de considerar los fenómenos climáticos que exigieran una mayor revancha.
- El coronamiento debe tener un ancho que asegure la estabilidad del muro, de a lo menos dos (2) metros.
- El muro de inicio o partida de un tranque de relaves debe tener una altura equivalente a 1/10 de la altura final del muro de contención, con un mínimo de 2 metros de altura. Este muro debe estar impermeabilizado en su coronamiento y talud interior.
- En el caso de un tranque de relaves la arena debe contener no más de un 20% de partículas menores a 74 micrones.

- En el artículo 56:

Se indica que el sistema de impermeabilización del fondo de la cubeta de los tranques y embalses de relaves o del área donde se depositan los relaves espesados, de ser necesario, deberá contemplar un tratamiento previo del terreno utilizado, esto para impedir o minimizar filtraciones de aguas contaminadas al exterior del depósito o infiltraciones a cursos de aguas subterráneas.

- En el artículo 57 se indica:

En el caso de precipitación de nieve o granizo sobre el prisma resistente y en que, a la vez, se produzca la posibilidad de que debido a bajas temperaturas puedan intercalarse capas de agua a estado sólido, que puedan crear planos de falla en el muro, deberá paralizarse la depositación de arenas en el muro, hasta que pase la situación de riesgo.

CONTENIDO DEL TÍTULO VII DEL REGLAMENTO:

- El artículo 58 establece:

Las contravenciones al presente reglamento y a las resoluciones que para su cumplimiento se dispongan, en que incurran las empresas mineras, serán

sancionadas en conformidad a lo dispuesto en los artículos 590 y siguientes del Reglamento de Seguridad Minera.

CONTENIDO DEL TÍTULO FINAL DEL REGLAMENTO:

- El artículo 59 indica:

El presente reglamento se aplica a todos los proyectos que sean presentados desde la fecha de vigencia del presente decreto así como también modificaciones de los depósitos existentes, cuando aquellas impliquen variación de las condiciones bajo las cuales fue aprobado el proyecto original. Cualquier otro uso que desee darse al depósito de relaves, tales como: reprocesamiento, depositación de otros residuos producto de la actividad minera o tránsito permanente sobre él, una vez concluida la operación; si no ha sido incluido en el proyecto aprobado por el servicio, debe contar con la aprobación de éste.

ANEXO B

ANEXO B-1

SEDIMENTACIÓN DE UNA PARTÍCULA ESFÉRICA Y NO ESFÉRICA.

1.- SEDIMENTACIÓN DE UNA PARTÍCULA ESFÉRICA.

◀ Sedimentación Libre:

Consideremos una partícula esférica de densidad ρ y diámetro D , que parte del reposo y que sedimenta en un fluido inmóvil de densidad ρ_1 y viscosidad μ . La masa del fluido con respecto a la partícula se supone que es muy grande siendo la distancia de la partícula a las paredes del vaso o a cualquier otro sólido por lo menos de 10 a 20 veces el diámetro de la partícula.

Estas condiciones definen el proceso denominado “Sedimentación Libre”. La partícula se acelerará bajo la influencia de la gravedad. A medida que se acelera, el fluido ofrece una resistencia a la fricción cada vez mayor y llegará un momento en que la fuerza de resistencia del líquido sea igual a la fuerza de gravedad, por lo que la aceleración se anula y la partícula a partir de este momento sedimenta a una velocidad constante.

Esta velocidad se denomina velocidad límite de sedimentación v_t .

$$F = \frac{\pi * D^2 * \rho * v^2}{4 * g_c} * \varphi' \left(\frac{D * v * \rho}{\mu} \right) \quad \text{Ec. 1.-}$$

Donde:

- F = Fuerza total de resistencia (fuerza de resistencia del fluido).
- φ' = Función cuya forma se determina experimentalmente.

Cuando la velocidad v alcanza el valor de la velocidad límite v_t , la fuerza de resistencia F debe ser igual a la fuerza de gravedad.

Puesto que el volumen de la partícula es proporcional al cubo del diámetro.

$$f = \frac{\pi * D^3 * g}{6 * g_c} (\rho_s - \rho) \quad \text{Ec. 2.-}$$

Donde:

- f = Fuerza de la gravedad.

Igualando la fuerza de la gravedad y la fuerza resistente:

$$\frac{\pi * D^3 * g}{6 * g_c} (\rho_s - \rho) = \frac{\pi * D^2 * \rho * v_t^2}{4 * g_c} \varphi \left(\frac{D * v * \rho}{\mu} \right) \quad \text{Ec. 3.-}$$

◀ Ley de Stokes:

Debido a la generalidad de la Ec. 1.- puede esperarse que sucedan las mismas cosas en el proceso de sedimentación: para velocidades bajas la resistencia será viscosa y para altas velocidades la resistencia será debido a los torbellinos. Se ha encontrado que efectivamente esto es lo que sucede.

Stokes ha deducido una relación para la resistencia ofrecida al movimiento de una esfera en un fluido, en condiciones tales que la resistencia total es originada por la fricción interna del fluido y los efectos de la inercia despreciables.

Esta relación se aplica al flujo laminar y puede expresarse por:

$$\varphi \cdot \left(\frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} \right) = \frac{12 \cdot \mu}{D \cdot v \cdot \rho} \quad \text{Ec. 4.-}$$

Sustituyendo la Ecuación 4.- en la ecuación 3.- se obtiene:

$$\frac{\pi \cdot D^3 \cdot g}{6 \cdot g_c} (\rho_s - \rho) = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \rho \cdot v_t^2}{4 \cdot g_c} \cdot \frac{12 \cdot \mu}{D \cdot v_t \cdot \rho} \quad \text{Ec. 5.-}$$

Y despejando v_t :

$$\text{Ley de Stokes:} \quad v_t = \frac{D^2 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g}{18 \cdot \mu} \quad \text{Ec. 6.-}$$

2.- SEDIMENTACIÓN DE UNA PARTÍCULA NO ESFÉRICA.

Se han realizado estudios rigurosos debido a que, en la mayor parte de las operaciones industriales se trabaja con partículas de forma irregular. Se ha establecido que la curva C (Coeficiente de Arrastre) en función de Re (Nº de Reynolds) para las esferas coincide muy razonablemente (+/- 20%) con la de las partículas irregulares, teniendo la previsión de excluir las formas extremas, tales como placas, agujas o partículas huecas, para números de Re menores de 50. En estos casos, el diámetro medio es obtenido por análisis granulométrico o por cualquier otro método.

Para números de Reynolds mayores de 50, el Coeficiente de Arrastre se eleva más rápidamente que con las esferas. Como resultado de ello, la velocidad de sedimentación es del 40 al 60% de la que tiene las partículas esféricas de igual diámetro. Estos valores son los más aproximados. Siempre que sean necesarias

evaluaciones más exactas de las velocidades de sedimentación, se necesita obtener información adicional sobre la forma de las partículas o efectuar pruebas de sedimentación.

$$C = \frac{24 * \mu}{D * v * \rho} \quad \text{Ec. 7.-}$$

Donde:

- C = Coeficiente de arrastre.

$$v_t = \left[\frac{4 * D_s * (\rho_s - \rho) * g}{3 * C * \rho} \right]^{0,5} \quad \text{Ec. 8.-}$$

Donde:

- v_t = Velocidad Límite de sedimentación.

- ◀ **Sedimentación Impedida:** Si la sedimentación se efectúa con grandes concentraciones de sólidos, de tal manera que las partículas están tan próximas que las colisiones entre ellas son prácticamente continuas y los descensos relativos de las partículas implican desplazamientos de las más ligeras por las más pesadas, se denomina “Sedimentación Obstaculizada”. Las velocidades de sedimentación más bajas encontradas en la sedimentación obstaculizada pueden atribuirse a un cierto número de efectos: Puesto que la concentración de sólidos en el líquido es elevada, hay un desplazamiento apreciable del fluido opuesto a la dirección del movimiento de las partículas sólidas y una disminución en la sección recta efectiva que puede utilizar el fluido, de tal manera que la resistencia al movimiento de las partículas sólidas aumenta. Además el fluido a través del cual se está moviendo la suspensión de sólidos puede considerarse no como un líquido único, sino como un “fluido” formado por un líquido y partículas suspendidas en él. Tanto la viscosidad como la densidad son diferentes a las de un líquido solo y serán funciones de la concentración de partículas sólidas en la suspensión. Como en la mayor parte de los casos la sedimentación

obstaculizada se verifica en la región correspondiente al flujo laminar para partículas únicas.

Se han propuesto varios métodos empíricos, en la mayor parte de los casos basados en los datos obtenidos con partículas esféricas de tamaño uniforme.

Se tiene una relación del siguiente tipo:

$$U = U_{to} * \psi(\varepsilon) \quad \text{Ec. 9.-}$$

$$\varepsilon = \frac{\text{Volumen de la Suspensión} - \text{Volumen de las partículas sólidas}}{\text{Volumen de la Suspensión}}$$

Ec. 10.-

En donde:

U = Velocidad de sedimentación de la suspensión.

U_{to} = Velocidad de sedimentación límite de una partícula única en una cantidad infinita de fluido, a la misma temperatura que la suspensión.

ε = Fracción en volumen de espacios vacíos en la suspensión.

ψ = Función de la fracción en volumen de los espacios vacíos.

Diversos han propuesto diferentes formas de la función ψ , basados en los datos obtenidos para esferas uniformes, han propuesto la siguiente forma para partículas bien dispersadas (no floculadas).

$$\psi(\varepsilon) = \varepsilon^2 * 10^{-1,82(1-\varepsilon)} \quad \text{Ec. 11.-}$$

Para valores de ε que van desde 0,5 a 0,95 y valores de concentración de sólidos en la suspensión (volumen de partículas sólidas por unidad de volumen de suspensión) que va desde 0,05 a 0,50.

ANEXO C

ANEXO C-1

A modo de ejemplo se presentarán a continuación los cálculos y resultados realizados para una concentración de entrada al espesador de 50% en peso de sólidos.

◀ Datos de Proceso:

- 1) Flujo másico de Relave en el overflow (entrada al espesador) = 175 [ton/hr]
- 2) Gravedad específica del sólido = 2,7
- 3) Porcentaje de sólidos de alimentación = 50%

◀ Pruebas Experimentales de Asentamiento:

Al realizarse las Pruebas Experimentales de Asentamiento en una probeta de 500 [ml] se obtuvieron los siguientes resultados:

Tiempo [min]	Columna de sólidos asentados [cm]	Columna de agua clara [cm]
0	31	0
5	30,74	0,26
10	30,43	0,57
15	30,06	0,94
20	29,81	1,19
25	29,5	1,5
30	29,25	1,75
35	28,94	2,06
40	28,62	2,38
45	28,37	2,63
50	28,06	2,94

55	27,75	3,25
60	27,38	3,62
65	27,2	3,8
70	26,88	4,12
75	26,64	4,36
80	26,33	4,67
85	26,02	4,98
90	25,77	5,23
95	25,46	5,54
100	25,15	5,85
105	24,84	6,16
110	24,59	6,41
115	24,22	6,78
120	23,96	7,04
135	23,09	7,91
150	22,23	8,77
165	21,36	9,64
180	20,3	10,7
210	18,32	12,68
240	16,71	14,29
300	16,34	14,66
420	16,21	14,79
1320	16,15	14,85

Zona de
Compresión

Tabla 1. Pruebas de sedimentación.

Los datos de la tabla anterior son graficados para formar “La Curva de Sedimentación” (tiempo v/s columna de sólidos asentados).

El punto en donde el asentamiento de sólidos se hace prácticamente constante a través del tiempo, indicando el límite existente entre el régimen de sedimentación libre y el de compresión, se denomina Punto Crítico.

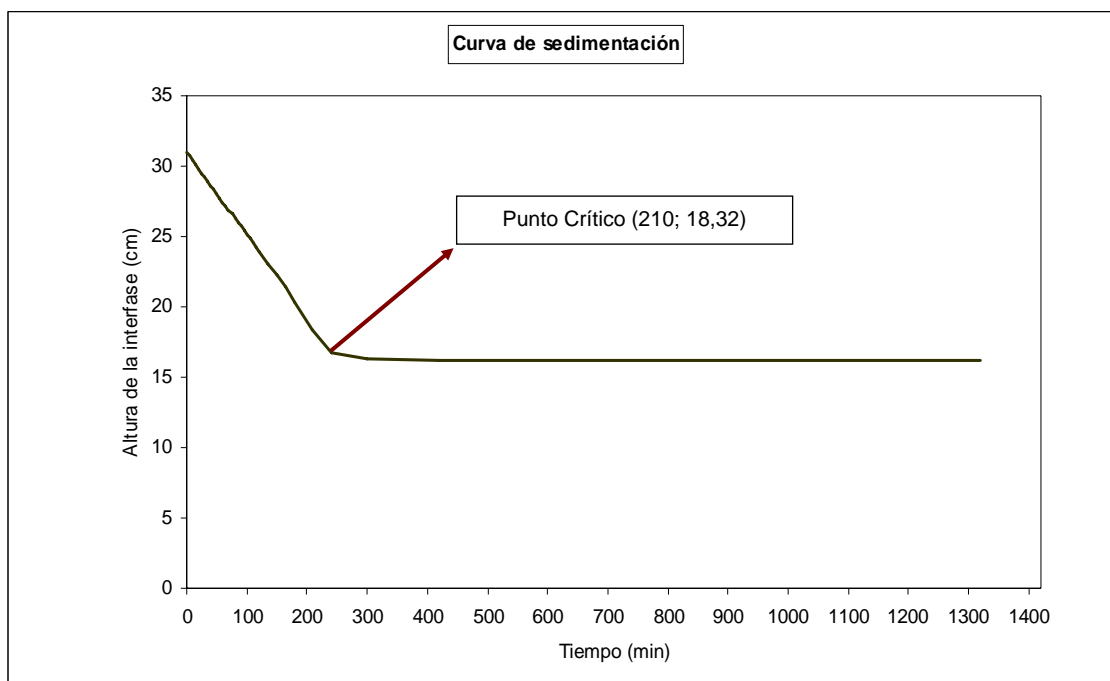


Figura 1. Curva de Sedimentación.

Este Punto Crítico se alcanza a los 210 [min] (3,5 hr) de comenzadas las “Pruebas de asentamiento”, en donde se ha alcanzado una altura de sólidos sedimentados de 18,32 [cm].

La lectura final fue realizada a 22 [hr] de comenzadas las pruebas, alcanzándose una altura de sólidos final de 16,15 [cm].

1.- PRUEBAS DE ASENTAMIENTO:

Cada 5 minutos, hasta completar 22 horas, se fue anotando la altura [cm] y el volumen [ml] de los sólidos sedimentados. La resta entre el volumen original de la pulpa (500 [ml]) y el volumen de sólidos sedimentos nos entrega el volumen de agua clara formado.

Datos:

- Volumen de pulpa = 500 [ml].
- Densidad del fluido (agua) = 1 [gr/ml].
- Gravedad específica del sólido = $s = 2,7$.

$$s = \frac{\rho(\text{sólido})}{\rho(\text{agua})_{T^{\circ}\text{amb.}}} \quad \text{Ec. 1.-}$$

- Densidad del sólido seco = 2,7 [gr/ml].
- Fracción en peso de sólidos = $C_p = 50\%$.
- Densidad de la pulpa:

$$\frac{\rho(\text{sólido}) * \rho(\text{agua})}{\left[\rho(\text{sólido}) - (C_p * \rho(\text{sólido})) + C_p * \rho(\text{agua}) \right]} \quad \text{Ec. 2.-}$$

- Densidad de la pulpa = $\frac{2,7 * 1}{\left[2,7 - (0,50 * 2,7) + 0,50 * 1 \right]}$
- Densidad de la pulpa = 1,459 [gr/ml].
- Masa de pulpa inicial = $\rho(\text{pulpa}) * \text{volumen}(\text{pulpa})$
- Masa de pulpa inicial = 729,72 [gr].
- Masa de sólidos inicial = $C_p * \text{Masa pulpa}$
- Masa de sólidos inicial = $0,50 * 729,72$
- Masa de sólidos inicial = 364,86 [gr].
- Masa de agua inicial = $\text{masa}(\text{total}) - \text{masa}(\text{sólidos})$
- Masa de agua inicial = $729,72 - 364,86$
- Masa de agua inicial = 364,86 [gr].

◀ **Cálculo de Dilución Zona de Compresión:**

Tiempo [min]	Columna de sólidos asentados [cm]	Volumen de sólidos asentados [ml]
180	20,3	327,42
210	18,32	295,48
240	16,71	269,52
300	16,34	263,55
420	16,21	261,45
1320	16,15	260,48

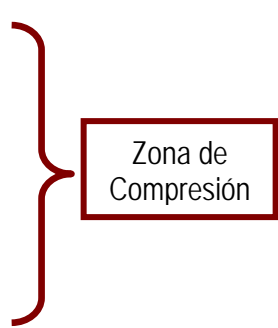


Tabla 2. Zona de compresión.

Para calcular la dilución promedio de la zona de compresión es necesario determinar primeramente la dilución para cada intervalo de tiempo.

A través de la siguiente ecuación:

$$\text{Dilución} = d = \frac{\text{masa (líquido)}_{\text{pulpa}}}{\text{masa (sólido)}_{\text{pulpa}}} \quad \text{Ec. 3.-}$$

Diluciones por intervalos:

Para 180 [min], un volumen de pulpa (sólidos asentados) de 327,42 [ml] y un volumen de agua clara de 172,58 [ml] la dilución es:

◀ Masa de sólidos = masa de sólidos calculada inicialmente.

$$\text{Masa de sólidos} = 364,86 \text{ [gr].}$$

◀ Masa de agua = $\text{masa pulpa}(\text{total}) - [\text{masa}(\text{sólidos}) + \text{masa}(\text{agua clara})]$

$$\text{Masa de agua} = 729,72 - [364,86 + 172,58]$$

$$\text{Masa de agua} = 192,28 \text{ [gr].}$$

$$\leftarrow \text{Dilución} = \frac{\text{masa(líquido)}_{\text{pulpa}}}{\text{masa(sólido)}_{\text{pulpa}}}$$

$$\leftarrow \text{Dilución} = \frac{192,28}{364,86} = 0,527$$

Para 210 [min], un volumen de pulpa (sólidos asentados) de 295,48 [ml] y un volumen de agua clara de 204,52 [ml] la dilución es:

← Masa de sólidos = masa de sólidos calculada inicialmente.

$$\text{Masa de sólidos} = 364,86 \text{ [gr]}$$

← Masa de agua = $\text{masa pulpa}(\text{total}) - [\text{masa}(\text{sólidos}) + \text{masa}(\text{agua clara})]$

$$\text{Masa de agua} = 729,72 - [364,86 + 204,52]$$

$$\text{Masa de agua} = 160,34 \text{ [gr]}$$

$$\leftarrow \text{Dilución} = \frac{\text{masa(líquido)}_{\text{pulpa}}}{\text{masa(sólido)}_{\text{pulpa}}}$$

$$\leftarrow \text{Dilución} = \frac{160,34}{364,86} = 0,439$$

Para 240 [min], un volumen de pulpa (sólidos asentados) de 269,52 [ml] y un volumen de agua clara de 230,48 [ml] la dilución es:

← Masa de sólidos = masa de sólidos calculada inicialmente.

$$\text{Masa de sólidos} = 364,86 \text{ [gr]}$$

← Masa de agua = $\text{masa pulpa}(\text{total}) - [\text{masa}(\text{sólidos}) + \text{masa}(\text{agua clara})]$

$$\text{Masa de agua} = 729,72 - [364,86 + 230,48]$$

$$\text{Masa de agua} = 134,38 \text{ [gr]}$$

$$\leftarrow \text{Dilución} = \frac{\text{masa(líquido)}_{\text{pulpa}}}{\text{masa(sólido)}_{\text{pulpa}}}$$

$$\leftarrow \text{Dilución} = \frac{134,38}{364,86} = 0,368$$

Para 300 [min], un volumen de pulpa (sólidos asentados) de 263,55 [ml] y un volumen de agua clara de 236,45 [ml] la dilución es:

← Masa de sólidos = masa de sólidos calculada inicialmente.

$$\text{Masa de sólidos} = 364,86 \text{ [gr]}$$

← Masa de agua = $\text{masa pulpa}(\text{total}) - [\text{masa}(\text{sólidos}) + \text{masa}(\text{agua clara})]$

$$\text{Masa de agua} = 729,72 - [364,86 + 236,45]$$

$$\text{Masa de agua} = 128,41 \text{ [gr]}$$

$$\leftarrow \text{Dilución} = \frac{\text{masa(líquido)}_{\text{pulpa}}}{\text{masa(sólido)}_{\text{pulpa}}}$$

$$\leftarrow \text{Dilución} = \frac{128,41}{364,86} = 0,352$$

Para 420 [min], un volumen de pulpa (sólidos asentados) de 261,45 [ml] y un volumen de agua clara de 238,55 [ml] la dilución es:

← Masa de sólidos = masa de sólidos calculada inicialmente.

$$\text{Masa de sólidos} = 364,86 \text{ [gr]}$$

← Masa de agua = $\text{masa pulpa}(\text{total}) - [\text{masa}(\text{sólidos}) + \text{masa}(\text{agua clara})]$

$$\text{Masa de agua} = 729,72 - [364,86 + 238,55]$$

$$\text{Masa de agua} = 126,31 \text{ [gr]}$$

$$\leftarrow \text{Dilución} = \frac{\text{masa(líquido)}_{\text{pulpa}}}{\text{masa(sólido)}_{\text{pulpa}}}$$

$$\leftarrow \text{Dilución} = \frac{126,31}{364,86} = 0,346$$

Para 1320 [min], un volumen de pulpa (sólidos asentados) de 260,48 [ml] y un volumen de agua clara de 239,52 [ml] la dilución es:

← Masa de sólidos = masa de sólidos calculada inicialmente.

$$\text{Masa de sólidos} = 364,86 \text{ [gr]}$$

← Masa de agua = $\text{masapulpa}(\text{total}) - [\text{masa}(\text{sólidos}) + \text{masa}(\text{aguaclara})]$

$$\text{Masa de agua} = 729,72 - [364,86 + 239,52]$$

$$\text{Masa de agua} = 125,34 \text{ [gr]}$$

$$\leftarrow \text{Dilución} = \frac{\text{masa(líquido)}_{\text{pulpa}}}{\text{masa(sólido)}_{\text{pulpa}}}$$

$$\leftarrow \text{Dilución} = \frac{125,34}{364,86} = 0,344$$

Para el cálculo de la dilución promedio, se debe primeramente calcular la dilución promedio por intervalo, la cual se determina al multiplicar cada valor de dilución por el intervalo de tiempo en la cuál fue calculada:

Tiempo [min]	Dilución	Intervalo de tiempo [hr]	Dilución promedio por intervalo
180	-	-	-
210	0,439	0,5	0,2195
240	0,368	0,5	0,184
300	0,352	1	0,352
420	0,346	2	0,692
1320	0,344	-	-

Tabla 3. Cálculo dilución promedio por intervalo.

- Dilución promedio zona de compresión = $\frac{\sum(\text{dilución promedio intervalo})}{\sum(\text{intervalos})}$
- Dilución promedio zona de compresión = $\frac{0,2195 + 0,184 + 0,352 + 0,692}{4}$
- Dilución promedio zona de compresión = 0,3618

◀ **Cálculo de la fracción en peso de sólidos:**

Para calcular el C_p (fracción en peso de sólidos) de cada dilución se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_p = \frac{1}{d + 1} \quad \text{Ec. 4.-}$$

◀ **Cálculo de la densidad promedio zona de compresión:**

Para el cálculo de la densidad promedio de la zona de compresión, es necesario determinar la densidad de la pulpa para cada intervalo de tiempo dentro de la zona de compresión. Esta se calcula a través de la siguiente ecuación:

Densidad de la pulpa:

$$\frac{\rho(\text{sólido}) * \rho(\text{agua})}{[\rho(\text{sólido}) - (Cp * \rho(\text{sólido})) + Cp * \rho(\text{agua})]} \quad \text{Ec. 5.-}$$

La densidad promedio será la suma de las densidades calculadas dividida por el número de intervalos.

A continuación se presenta una tabla resumen que contienen los valores de dilución y densidad promedio de la zona de compresión:

Tiempo [min]	Volumen de la pulpa [ml]	Volumen de agua clara [ml]	Dilución	Cp %	Densidad de la pulpa [gr/ml]
180	327,42	172,58	0,527	65,48	1,701
210	295,48	204,52	0,439	69,47	1,777
240	269,52	230,48	0,368	73,08	1,852
300	263,55	236,45	0,352	73,96	1,871
420	261,45	238,55	0,346	74,28	1,878
1320	260,48	239,52	0,344	74,43	1,881

Tabla 4. Resumen zona de compresión.

- Densidad promedio de la pulpa zona de compresión = $\frac{\sum \rho_p(\text{intervalos})}{6}$
- Densidad promedio de la pulpa zona de compresión = 1,826 [gr/ml]

2.- PRUEBAS DE ZONA:

◀ Resultados Pruebas Experimentales de Zona:

Tiempo [min]	Volumen de pulpa [ml]			
	500 ml	450 ml	400 ml	350 ml
	Espacio recorrido [cm] de interfase agua clara – sólidos asentados			
0	0	0	0	0
3	0,48	0,4	0,43	0,35
6	0,25	0,22	0,2	0,19
9	0,22	0,18	0,13	0,15

Tabla 5. Pruebas experimentales de zona.

Para calcular las velocidades de sedimentación de los distintos volúmenes se utiliza

la fórmula tradicional de velocidad que corresponde a $\frac{Distancia}{Tiempo}$

Tabla resumen:

	Volumen de pulpa [ml]			
	500 ml	450 ml	400 ml	350 ml
Espacio total recorrido [cm]	0,95	0,8	0,76	0,69
Espacio total recorrido [pie]	0,0311	0,026	0,024	0,0226
Tiempo total [hr]	0,15	0,15	0,15	0,15
Velocidad sedimentación [pie/hr]	0,207	0,174	0,166	0,151

Tabla 6. Velocidades de sedimentación.

◀ **Cálculos de dilución para las distintas pruebas:**

Para determinar las diluciones de las distintas pruebas se debe realizar un balance de masa total y un balance de masa al agua.

- **Para un volumen de pulpa inicial de 500 [ml]:**

Densidad de la pulpa a un 50% en peso de sólidos = 1,459 [gr/ml]

Masa total de la pulpa = 729,72 [gr]

Masa de sólidos en la pulpa = 364,86 [gr]

Masa de agua en la pulpa = 364,86 [gr]

Después de transcurridos 9 minutos de sedimentación se formó 0,95 [cm] de agua clara la que equivale a un volumen de 15,27 [ml]. Dicho volumen se obtiene a través de la fórmula: $V = 2 * \pi * r * h$ y en donde el radio corresponde a 2,56 [cm].

Balance de masa al agua:

Agua en la pulpa después de la sedimentación = $364,86 - 15,27$ [ml]

Agua en la pulpa después de la sedimentación = $349,59$ [gr]

Balance de masa al sólido:

El sólido dentro de la pulpa después de los 9 [min] de sedimentación es el mismo presente originalmente o sea $364,86$ [gr].

Por lo tanto la dilución d_1 es:

$$d_1 = \frac{\text{masa}_{\text{líquido}}}{\text{masa}_{\text{sólido}}} = \frac{349,59}{364,86} = 0,958$$

- **Al extraer 50 [ml] de agua pura a los 500 [ml] de pulpa inicial:**

Masa de pulpa = 450 [ml]

Masa de agua clara extraída = $15,27$ [gr]

Masa de agua extraída de la pulpa = $50 - 15,27 = 34,73$ [gr].

Masa de agua en la pulpa final = $349,59 - 34,73 = 314,86$ [gr].

Masa de sólidos en la pulpa = $364,86$ [gr].

Después de transcurridos 9 minutos de sedimentación se formó $0,8$ [m] de agua clara la que equivale a un volumen de $12,86$ [ml].

Balance de masa al agua:

Agua en la pulpa después de la sedimentación = $314,86 - 12,86$ [ml].

Agua en la pulpa después de la sedimentación = 302 [gr].

Balance de masa al sólido:

El sólido dentro de la pulpa después de los 9 min de sedimentación es el mismo presente originalmente o sea $364,86$ [gr].

Por lo tanto la dilución d_2 es:

$$d_2 = \frac{\text{masa_líquido}}{\text{masa_sólido}} = \frac{302}{364,86} = 0,8277$$

- **Al extraer 50 [ml] de agua pura a los 450 [ml] de la pulpa anterior:**

Masa de pulpa = 400 [ml].

Masa de agua clara extraída = 12,86 [gr].

Masa de agua extraída de la pulpa = 50 – 12,86 = 37,14 [gr].

Masa de agua en la pulpa final = 302 – 37,14 = 264,86 [gr].

Masa de sólidos en la pulpa = 364,86 [gr].

Después de transcurridos 9 minutos de sedimentación se formó 0,76 [cm] de agua clara la que equivale a un volumen de 12,22 [ml].

Balance de masa al agua:

Agua en la pulpa después de la sedimentación = 264,86 – 12,22 [ml].

Agua en la pulpa después de la sedimentación = 252,66 [gr].

Balance de masa al sólido:

El sólido dentro de la pulpa después de los 9 [min] de sedimentación es el mismo presente originalmente o sea 364,86 [gr].

Por lo tanto la dilución d_3 es:

$$d_3 = \frac{\text{masa_líquido}}{\text{masa_sólido}} = \frac{252,66}{364,86} = 0,692$$

- **Al extraer 50 [ml] de agua pura a los 400 [ml] de la pulpa anterior:**

Masa de pulpa = 350 [ml].

Masa de agua clara extraída = 12,22 [gr].

Masa de agua extraída de la pulpa = $50 - 12,22 = 37,78$ [gr].

Masa de agua en la pulpa final = $242,66 - 37,78 = 214,88$ [gr].

Masa de sólidos en la pulpa = 364,86 [gr].

Después de transcurridos 9 minutos de sedimentación se formó 0,69 [cm] de agua clara la que equivale a un volumen de 11,09 [ml].

Balance de masa al agua:

Agua en la pulpa después de la sedimentación = $214,88 - 11,09$ [ml].

Agua en la pulpa después de la sedimentación = 203,79 [gr].

Balance de masa al sólido:

El sólido dentro de la pulpa después de los 9 min de sedimentación es el mismo presente originalmente o sea 364,86 [gr].

Por lo tanto la dilución d_4 es:

$$d_4 = \frac{\text{masa}_{\text{líquido}}}{\text{masa}_{\text{sólido}}} = \frac{203,79}{364,86} = 0,558$$

Tabla resumen con los datos calculados:

	Volumen de pulpa [ml]			
	500 ml	450 ml	400 ml	350 ml
Espacio total recorrido [cm]	0,95	0,8	0,76	0,69
Espacio total recorrido [pie]	0,0311	0,026	0,024	0,022
Tiempo total [hr]	0,15	0,15	0,15	0,15
Velocidad de sedimentación [pie/hr]	0,207	0,174	0,166	0,151
Dilución (inicial)	0,958	0,827	0,692	0,558
% en peso de sólidos, después de los 9 [min]	51,06	54,71	59,08	64,16
Dilución zona de compresión (final)	0,362	0,362	0,362	0,362

Tabla 7. Resumen cálculos finales.

3.- CÁLCULO DEL ÁREA DEL ESPESADOR:

Una vez que se obtienen todos los valores de dilución y velocidad para las cuatro pruebas, se procede a calcular las distintas áreas del espesador.

$$AU_0 = \frac{35,33 * (d_k - d_d)}{R} \quad \text{Ec. 6.-}$$

	Dilución inicial alimentación	Dilución Final descarga	Velocidad de sedimentación	Área unitaria en $\frac{pie^2 * hr}{ton}$
Área unitaria 1	0,958	0,362	0,207	101,72
Área unitaria 2	0,827	0,362	0,174	94,041
Área unitaria 3	0,692	0,362	0,166	70,233
Área unitaria 4	0,558	0,362	0,151	45,992

Tabla 8. Cálculo de las áreas unitarias.

De las cuatro áreas unitarias calculadas anteriormente se elige la mayor de ellas, que en este caso corresponde a $101,72 \frac{pie^2 * hr}{ton}$, la elección del área mayor se debe a que si el espesador tuviese un área menor a la prevista, para manipular los sólidos, se formaría en el acto una acumulación de sólidos en un punto del espesador, que se desplazaría paulatinamente hacia arriba, hasta salir por el rebalse.

- Para un flujo de sólidos en la alimentación = $87,5 \frac{ton}{hr}$

	Área en pie^2	Área en m^2
Área del espesador	8.870	824

Tabla 9. Área del espesador.

4.- CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LA ZONA DE COMPRESIÓN:

Se determina a través de la siguiente fórmula:

$$V_c = \frac{(t * w) * (\rho_s - \rho_p)}{\rho_s * (\bar{\rho} - \rho_p)} \quad \text{Ec. 7.-}$$

Donde:

- V_c = Volumen de la zona de compresión [m³].
- t = Tiempo de retención de la carga en el espesador [hr].
- w = Flujo de sólidos en la alimentación [ton/hr].
- ρ_s = Densidad sólido seco [gr/ml].
- ρ_p = densidad de la pulpa en la alimentación [gr/ml].
- $\bar{\rho}$ = densidad promedio de la pulpa en la zona de compresión [gr/ml].

t [hr]	w $\left[\frac{ton}{hr}\right]$	ρ_s $\left[\frac{gr}{ml}\right]$	ρ_p $\left[\frac{gr}{ml}\right]$	$\bar{\rho}$ $\left[\frac{gr}{ml}\right]$
4	87,5	2,7	1,459	1,827

Tabla 10. Volumen de la zona de compresión.

$$V_c = \frac{(4 * 87,5) * (2,7 - 1,459)}{2,7 * (1,827 - 1,459)}$$

Volumen de la zona de compresión = 437,181 [m³].

Volumen de la zona de compresión = 15.439 [pie³].

5.- CÁLCULO DE LA ALTURA ZONA DE COMPRESIÓN:

La altura de la zona de compresión corresponde a:

$$H_c = \frac{V_c}{A} \quad \text{Ec. 8.-}$$

Dado:

- H_c = Altura zona de compresión [m]
- V_c = Volumen zona de compresión [m³]
- A = Área del espesador [m²]

$$H_c = \frac{437,181}{824}$$

Altura zona de compresión = 0,5305 [m]

Altura zona de compresión = 1,7405 [pie]

ANEXO C-2

RESULTADOS OBTENIDOS PARA DISTINTAS CONCENTRACIONES DE SÓLIDOS EN LA ALIMENTACIÓN.

A continuación se presentarán los resultados obtenidos para un 36, 38, 40 y 60 % de sólidos en la alimentación al espesador.

Los datos obtenidos de la realización de las pruebas de asentamiento y de zona junto con las planillas Excel se encuentran en el Anexo C-3.

◀ RESULTADOS OBTENIDOS PARA UN 36% DE SÓLIDOS EN LA ALIMENTACIÓN.

Tiempo [min]	Columna de sólidos asentados [cm]	Volumen de sólidos asentados [ml]
180	17,48	282
210	15,38	248
240	15,13	244
300	14,88	240
420	14,76	238
1320	14,57	235




Tabla 1. Zona de compresión.

Tiempo [min]	Volumen de sólidos asentados [ml]	Volumen de agua clara [ml]	Dilución	Cp %	Densidad de la pulpa [gr/ml]
180	282	218	0,841	54,3	1,519
210	248	252	0,695	58,9	1,590
240	244	256	0,678	59,5	1,600
300	240	260	0,661	60,2	1,610
420	238	262	0,652	60,5	1,615
1320	235	265	0,639	61,0	1,623

Tabla 2. Dilución y densidad de la zona de compresión.

Dilución Promedio	Densidad promedio [gr/ml]
0,6629	1,593

Tabla 3. Densidad y dilución promedio zona de compresión.

	Volumen de pulpa [ml]			
	500 ml	450 ml	400 ml	350 ml
Espacio total recorrido [cm]	0,65	0,55	0,5	0,48
Espacio total recorrido [pie]	0,021	0,018	0,016	0,015
Tiempo total [hr]	0,15	0,15	0,15	0,15
Velocidad de sedimentación [pie/hr]	0,142	0,120	0,109	0,105
Dilución alimentación (inicial)	1,732	1,524	1,313	1,100
% en peso de sólidos, después de los 9 [min]	36,6	39,6	43,2	47,6
Dilución descarga (final)	0,662	0,662	0,662	0,662

Tabla 4. Resultados obtenidos de las pruebas de zona.

	Área unitaria en $\frac{pie^2 * hr}{ton}$	
Área unitaria 1	265,963	→ Área máxima elegida
Área unitaria 2	253,244	
Área unitaria 3	210,270	
Área unitaria 4	147,189	

Tabla 5. Áreas unitarias obtenidas.

	Área en [pie ²]	Área en [m ²]
Área del espesador	16.756	1.557

Tabla 6. Área del espesador.

	Volumen [pie ³]	Volumen [m ³]
Volumen zona de compresión	15.435	437

Tabla 7. Volumen zona de compresión.

	Altura en [pie]	Altura en [m]
Altura zona de compresión	0,921	0,280

Tabla 8. Altura zona de compresión.

	Diámetro en [pie]	Diámetro en [m]
Diámetro Espesador	146	45

Tabla 9. Diámetro espesador.

◀ RESULTADOS OBTENIDOS PARA UN 38% DE SÓLIDOS EN LA ALIMENTACIÓN.

Tiempo [min]	Columna de sólidos asentados [cm]	Volumen de sólidos asentados [ml]
180	19,28	311
210	16,99	274
240	16,18	261
300	15,93	257
420	15,87	256
1320	15,75	254

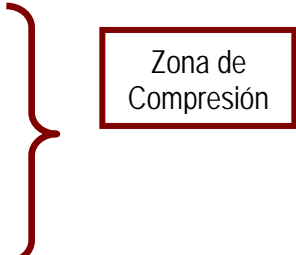


Tabla 10. Zona de compresión.

Tiempo [min]	Volumen de sólidos asentados [ml]	Volumen de agua clara [ml]	Dilución	Cp %	Densidad de la pulpa [gr/ml]
180	311	189	0,875	53,3	1,505
210	274	226	0,727	57,9	1,573
240	261	239	0,675	59,7	1,602
300	257	243	0,659	60,2	1,611
420	256	244	0,655	60,4	1,614
1320	254	246	0,647	60,7	1,619

Tabla 11. Dilución y densidad de la zona de compresión.

Dilución Promedio	Densidad promedio [gr/ml]
0,6671	1,587

Tabla 12. Densidad y dilución promedio zona de compresión.

	Volumen de pulpa [ml]			
	500 ml	450 ml	400 ml	350 ml
Espacio total recorrido [cm]	0,7	0,65	0,6	0,51
Espacio total recorrido [pie]	0,022	0,021	0,019	0,016
Tiempo total [hr]	0,15	0,15	0,15	0,15
Velocidad de sedimentación [pie/hr]	0,153	0,142	0,131	0,112
Dilución alimentación (inicial)	1,586	1,389	1,192	0,998
% en peso de sólidos, después de los 9 [min]	38,6	41,8	45,6	50,0
Dilución descarga (final)	0,667	0,667	0,667	0,667

Tabla 13. Resultados obtenidos de las pruebas de zona.

	Área unitaria en $\frac{pie^2 * hr}{ton}$
Área unitaria 1	212,202
Área unitaria 2	179,563
Área unitaria 3	141,484
Área unitaria 4	104,866

→ Área máxima elegida

Tabla 14. Áreas unitarias obtenidas.

	Área en [pie ²]	Área en [m ²]
Área del espesador	14.112	1.311

Tabla 15. Área del espesador.

	Volumen [pie ³]	Volumen [m ³]
Volumen zona de compresión	17.632	499

Tabla 16. Volumen zona de compresión.

	Altura en [pie]	Altura en [m]
Altura zona de compresión	1,249	0,38

Tabla 17. Altura zona de compresión.

	Diámetro en [pie]	Diámetro en [m]
Diámetro Espesador	134	41

Tabla 18. Diámetro espesador.

◀ RESULTADOS OBTENIDOS PARA UN 40% DE SÓLIDOS EN LA ALIMENTACIÓN.

Tiempo [min]	Columna de sólidos asentados [cm]	Volumen de sólidos asentados [ml]
180	20,27	327
210	18,29	295
240	16,68	269
300	16,31	263
420	16,18	261
1320	16,12	260

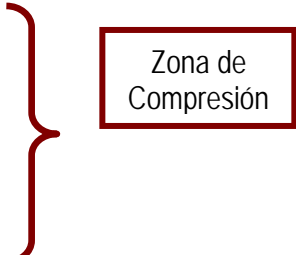


Tabla 19. Zona de compresión.

Tiempo [min]	Volumen de sólidos asentados [ml]	Volumen de agua clara [ml]	Dilución	Cp %	Densidad de la pulpa [gr/ml]
180	327	173	0,853	53,9	1,514
210	295	205	0,733	57,6	1,570
240	269	231	0,636	61,1	1,625
300	263	237	0,613	61,9	1,639
420	261	239	0,606	62,2	1,644
1320	260	240	0,602	62,4	1,647

Tabla 20. Dilución y densidad de la zona de compresión.

Dilución Promedio	Densidad promedio [gr/ml]
0,627	1,607

Tabla 21. Densidad y dilución promedio zona de compresión.

	Volumen de pulpa [ml]			
	500 ml	450 ml	400 ml	350 ml
Espacio total recorrido [cm]	0,69	0,61	0,59	0,57
Espacio total recorrido [pie]	0,022	0,020	0,019	0,018
Tiempo total [hr]	0,15	0,15	0,15	0,15
Velocidad de sedimentación [pie/hr]	0,150	0,133	0,129	0,125
Dilución alimentación (inicial)	1,458	1,276	1,090	0,904
% en peso de sólidos, después de los 9 [min]	40,6	43,9	47,8	52,5
Dilución descarga (final)	0,627	0,627	0,627	0,627

Tabla 22. Resultados obtenidos de las pruebas de zona.

	Área unitaria en $\frac{pie^2 * hr}{ton}$	
Área unitaria 1	194,590	→ Área máxima elegida
Área unitaria 2	171,844	
Área unitaria 3	126,779	
Área unitaria 4	78,552	

Tabla 23. Áreas unitarias obtenidas.

	Área en [pie ²]	Área en [m ²]
Área del espesador	13.621	1.265

Tabla 24. Área del espesador.

	Volumen [pie ³]	Volumen [m ³]
Volumen zona de compresión	18.453	523

Tabla 25. Volumen zona de compresión.

	Altura en [pie]	Altura en [m]
Altura zona de compresión	1,354	0,41


Tabla 26. Altura zona de compresión.

	Diámetro en [pie]	Diámetro en [m]
Diámetro Espesador	132	40

Tabla 27. Diámetro espesador.

◀ RESULTADOS OBTENIDOS PARA UN 60% DE SÓLIDOS EN LA ALIMENTACIÓN.

Tiempo [min]	Columna de sólidos asentados [cm]	Volumen de sólidos asentados [ml]
180	20,49	330,27
210	18,51	298,55
240	16,9	272,58
300	16,53	266,61
420	16,4	264,52
1320	16,34	263,55



Zona de Compresión

Tabla 28. Zona de compresión.

Tiempo [min]	Volumen de sólidos asentados [ml]	Volumen de agua clara [ml]	Dilución	Cp %	Densidad de la pulpa [gr/ml]
180	330,48	169,52	0,315	76,0	1,918
210	298,55	201,45	0,249	80,0	2,016
240	272,58	227,42	0,195	83,6	2,113
300	266,61	233,39	0,183	84,5	2,138
420	264,52	235,48	0,178	84,8	2,147
1320	263,55	236,45	0,176	85,0	2,151

Tabla 29. Dilución y densidad de la zona de compresión.

Dilución Promedio	Densidad promedio [gr/ml]
0,190	2,081

Tabla 30. Densidad y dilución promedio zona de compresión.

	Volumen de pulpa [ml]			
	500 ml	450 ml	400 ml	350 ml
Espacio total recorrido [cm]	0,99	0,88	0,84	0,72
Espacio total recorrido [pie]	0,032	0,028	0,027	0,023
Tiempo total [hr]	0,15	0,15	0,15	0,15
Velocidad de sedimentación [pie/hr]	0,216	0,192	0,183	0,157
Dilución alimentación (inicial)	0,633	0,533	0,431	0,331
% en peso de sólidos, después de los 9 [min]	61,2	65,2	69,8	75,1
Dilución descarga (final)	0,190	0,190	0,190	0,190

Tabla 31. Resultados obtenidos de las pruebas de zona.

	Área unitaria en $\frac{pie^2 * hr}{ton}$
Área unitaria 1	72,361
Área unitaria 2	63,040
Área unitaria 3	46,352
Área unitaria 4	31,704

→ Área máxima elegida

Tabla 32. Áreas unitarias obtenidas.

	Área en [pie ²]	Área en [m ²]
Área del espesador	7.598	706

Tabla 33. Área del espesador.

	Volumen [pie ³]	Volumen [m ³]
Volumen zona de compresión	12.664	359

Tabla 34. Volumen zona de compresión.

	Altura en [pie]	Altura en [m]
Altura zona de compresión	1,666	0,50

Tabla 35. Altura zona de compresión.

	Diámetro en [pie]	Diámetro en [m]
Diámetro Espesador	98	30

Tabla 36. Diámetro espesador.

ANEXO C-3

PLANILLAS EXCEL

**PARA UN 36% EN PESO DE SÓLIDOS EN LA
ALIMENTACIÓN.**

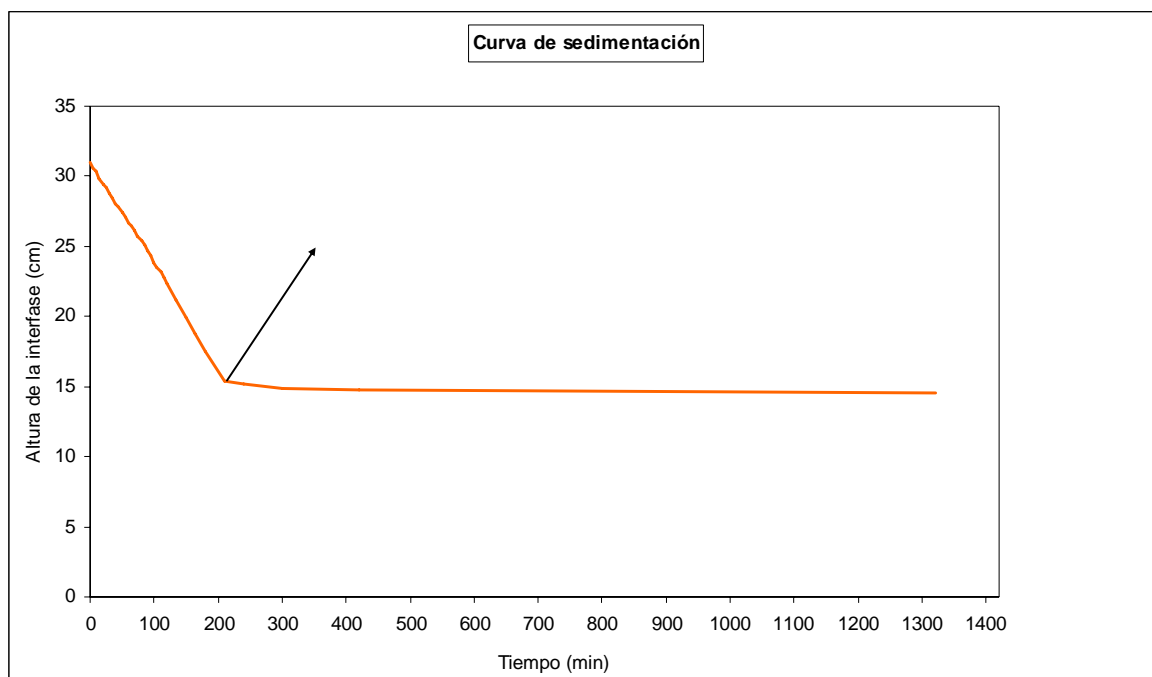
Porcentaje en peso de sólidos en la alimentación 36%

Pruebas de asentamiento realizadas en una probeta graduada de 500 ml

Tiempo (min)	Sólidos asentados (cm)	Columna de agua clara (cm)
0	31	0
5	30,57	0,43
10	30,32	0,68
15	29,82	1,18
20	29,45	1,55
25	29,2	1,8
30	28,77	2,23
35	28,46	2,54
40	28,09	2,91
45	27,78	3,22
50	27,4	3,6
55	27,09	3,91
60	26,72	4,28
65	26,41	4,59
70	26,1	4,9
75	25,73	5,27
80	25,42	5,58
85	25,05	5,95
90	24,68	6,32
95	24,3	6,7
100	23,87	7,13
105	23,56	7,44
110	23,19	7,81
115	22,82	8,18
120	22,38	8,62
135	21,2	9,8
150	19,96	11,04
165	18,79	12,21
180	17,48	13,52
210	15,38	15,62
240	15,13	15,87
300	14,88	16,12
420	14,76	16,24
1320	14,57	16,43

Dentro de la tabla la zona achurada corresponde a la Zona de Compresión.

Lectura final realizada a 22 hr de comenzadas las pruebas de asentamiento



Zona de compresión Punto Crítico	
Tiempo (min)	cm de sólidos asentados
210	15,38

Datos iniciales

Volumen de pulpa alimentación	500	ml
Porcentaje en peso sólidos alimentación	36	%
Densidad sólido seco	2,7	gr/ml
Densidad fluido (agua)	1	gr/ml
Gravedad específica sólido	2,7	-
Densidad agua a T° ambiente	1	gr/ml

Densidad de la pulpa alimentación	1,29310345	gr/ml
Masa de pulpa alimentación	646,551724	gr
Masa sólidos de alimentación	232,758621	gr
Masa agua de alimentación	413,793103	gr
Dilución inicial alimentación	1,77778	-

"Prefactibilidad Técnica-Económica de una Planta de Espesamiento de Relaves"

Volumen de la pulpa; sólidos asentados (ml)	Volumen de agua clara (ml)	Masa de sólidos (gr)	Masa de líquido (gr)	Dilución	% en peso de sólidos	Intervalo de tiempo (hr)	Dilución promedio por intervalo
500	0						
493	7						
489	11						
481	19						
475	25						
471	29						
464	36						
459	41						
453	47						
448	52						
442	58						
437	63						
431	69						
426	74						
421	79						
415	85						
410	90						
404	96						
398	102						
392	108						
385	115						
380	120						
374	126						
368	132						
361	139						
342	158						
322	178						
303	197						
282	218	232,759	195,793	0,841	54,313		
248	252	232,759	161,793	0,695	58,993	0,5	0,3476
244	256	232,759	157,793	0,678	59,597	0,5	0,3390
240	260	232,759	153,793	0,661	60,214	1	0,6607
238	262	232,759	151,793	0,652	60,527	2	1,3043
235	265	232,759	148,793	0,639	61,003		

Prueba de zona

Volumen pulpa (ml)

Tiempo (min)
0
3
6
9

500	450	400	350
Espacio recorrido (cm) interfase agua clara - pulpa			
0	0	0	0
0,45	0,25	0,2	0,2
0,1	0,2	0,18	0,18
0,1	0,1	0,12	0,1

Espacio total recorrido (cm)
Espacio total recorrido (pie)
Tiempo total (hr)
Velocidad de sedimentación pie/hr
Dilución (inicial)
% de sólidos, después de los 9 min.
Dilución promedio (final)

0,65	0,55	0,5	0,48
0,02132	0,01804	0,0164	0,015744
0,15	0,15	0,15	0,15
0,1421	0,1203	0,1093	0,105
1,732861719	1,524957067	1,313597333	1,100164551
36,59167946	39,60463381	43,22273308	47,61531659
0,662888889	0,662888889	0,662888889	0,662888889

Volumen inicial de pulpa: 500 ml		
Densidad del agua	1	gr/ml
Densidad de la pulpa (alimentación)	1,293103448	gr/ml
Volumen inicial de pulpa	500	ml
Masa inicial	646,5517241	gr
Masa de sólidos	232,7586207	gr
Masa de agua	413,7931034	gr
Después de 9 min de sedimentación		
Volumen de agua clara	10,4546	ml
Masa de agua clara	10,4546	gr
Masa de agua en la pulpa final	403,3385034	gr
Masa de sólidos en la pulpa final	232,7586207	gr

A los 500 ml se le extraen 50 ml de agua		
Volumen inicial de pulpa: 450 ml		
Masa de agua clara extraída	10,4546	gr
Agua extraída de pulpa	39,5454	gr
Masa de agua inicial	363,7931034	gr
Masa de sólidos inicial	232,7586207	gr
Después de 9 min de sedimentación		
Volumen de agua clara	8,8462	ml
Masa de agua clara	8,8462	gr
Masa de agua en la pulpa final	354,9469034	gr
Masa de sólidos en la pulpa final	232,7586207	gr

A los 450 ml se le extraen 50 ml de agua		
Volumen inicial de pulpa: 400 ml		
Masa de agua clara extraida	8,8462	gr
Agua extraida de pulpa	41,1538	gr
Masa de agua inicial	313,7931034	gr
Masa de sólidos inicial	232,7586207	gr
Después de 9 min de sedimentación		
Volumen de agua clara	8,042	ml
Masa de agua clara	8,042	gr
Masa de agua en la pulpa final	305,7511034	gr
Masa de sólidos en la pulpa final	232,7586207	gr

A los 400 ml se le extraen 50 ml de agua		
Volumen inicial de pulpa: 350 ml		
Masa de agua clara extraida	8,042	gr
Agua extraida de pulpa	41,958	gr
Masa de agua inicial	263,7931034	gr
Masa de sólidos inicial	232,7586207	gr
Después de 9 min de sedimentación		
Volumen de agua clara	7,72032	ml
Masa de agua clara	7,72032	gr
Masa de agua en la pulpa final	256,0727834	gr
Masa de sólidos en la pulpa final	232,7586207	gr

Cálculo del área del espesador

Area unitaria = Superficie / flujo másico de alimentación

	pie ² *hr / ton	
Area unitaria 1	265,963	Area máxima elegida
Area unitaria 2	253,244	
Area unitaria 3	210,270	
Area unitaria 4	147,189	

Area total de espesador

	ton/hr
Flujo de alimentación	175
Flujo de sólidos en la alimentación	63

	pie ²	m ²
Area del espesador	16755,63901	1556,649

Volumen zona de compresión	437,059508	m ³
Volumen zona de compresión	15434,6079	pie ³

Horas de retención de la carga en el espesador	4	hr
Toneladas secas por hora	63	ton/hr
Densidad sólido seco	2,7	gr/ml
Densidad de la pulpa en la alimentación	1,29310345	gr/ml
Densidad promedio de la pulpa en la zona compresión	1,59354387	gr/ml

Altura zona de compresión	0,92115902	pie
Altura zona de compresión	0,28076947	m

Cálculo diámetro del espesador

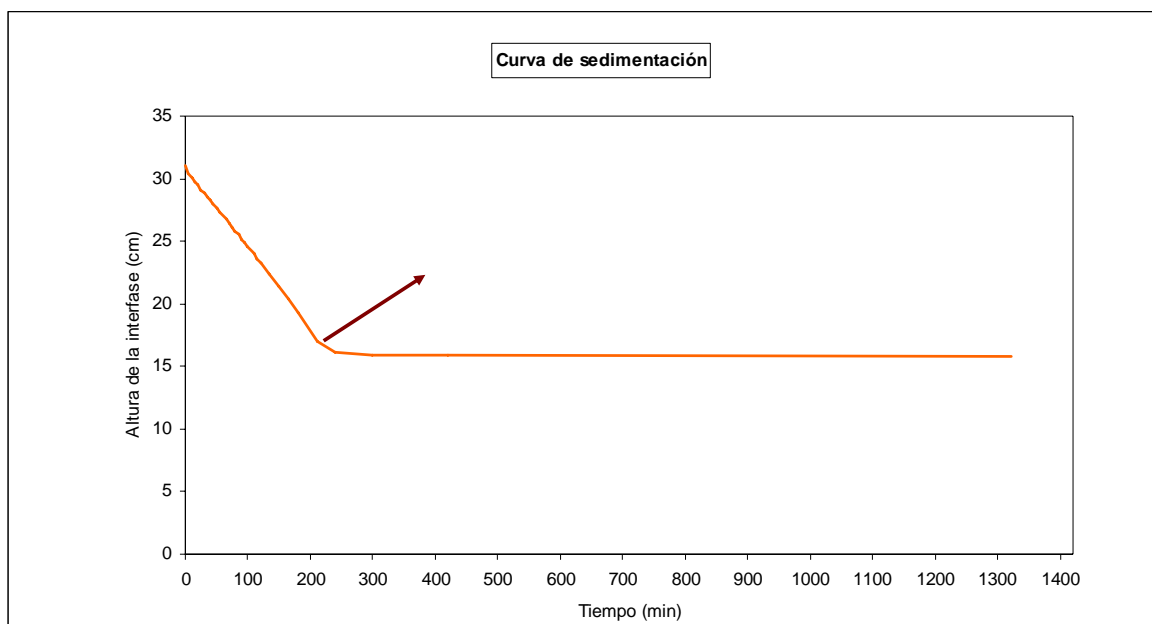
Radio espesador (pie)	73,03063107
Diámetro (pie)	146,0612621
Diámetro (m)	44,5194727

PARA UN 38% EN PESO DE SÓLIDOS EN LA ALIMENTACIÓN

Pruebas de asentamiento realizadas en una probeta graduada de 500 ml

Tiempo (min)	Columna de sólidos asentados (cm)	Columna de agua clara (cm)
0	31	0
5	30,38	0,62
10	30,07	0,93
15	29,7	1,3
20	29,51	1,49
25	29,08	1,92
30	28,83	2,17
35	28,52	2,48
40	28,27	2,73
45	27,96	3,04
50	27,65	3,35
55	27,34	3,66
60	27,09	3,91
65	26,72	4,28
70	26,41	4,59
75	26,1	4,9
80	25,79	5,21
85	25,54	5,46
90	25,17	5,83
95	24,92	6,08
100	24,61	6,39
105	24,3	6,7
110	23,99	7,01
115	23,62	7,38
120	23,31	7,69
135	22,38	8,62
150	21,39	9,61
165	20,4	10,6
180	19,28	11,72
210	16,99	14,01
240	16,18	14,82
300	15,93	15,07
420	15,87	15,13
1320	15,75	15,25

La zona achurada de la tabla corresponde a la Zona de Compresión.



Zona de compresión Punto Crítico	
Tiempo (min)	cm de sólidos asentados
210	16,99

Datos iniciales

Volumen de pulpa alimentación	500	ml
Porcentaje en peso sólidos alimentación	38	%
Densidad sólido seco	2,7	gr/ml
Densidad fluido (agua)	1	gr/ml
Gravedad específica	2,7	-
Densidad agua a T° ambiente	1	gr/ml

Densidad de la pulpa alimentación	1,31450828	gr/ml
Masa de pulpa alimentación	657,254138	gr
Masa sólidos de alimentación	249,756573	gr
Masa agua de alimentación	407,497566	gr
Dilución inicial alimentación	1,63158	-

"Prefactibilidad Técnica-Económica de una Planta de Espesamiento de Relaves"

Volumen de la pulpa; sólidos asentados (ml)	Volumen de agua clara (ml)	Masa de sólidos (gr)	Masa de líquido (gr)	Dilución	% en peso de sólidos	Intervalo de tiempo (hr)	Dilución promedio por intervalo
500	0						
490	10						
485	15						
479	21						
476	24						
469	31						
465	35						
460	40						
456	44						
451	49						
446	54						
441	59						
437	63						
431	69						
426	74						
421	79						
416	84						
412	88						
406	94						
402	98						
397	103						
392	108						
387	113						
381	119						
376	124						
361	139						
345	155						
329	171						
311	189	249,757	218,498	0,875	53,338		
274	226	249,757	181,498	0,727	57,914	0,5	0,3633
261	239	249,757	168,498	0,675	59,714	0,5	0,3373
257	243	249,757	164,498	0,659	60,291	1	0,6586
256	244	249,757	163,498	0,655	60,437	2	1,3093
254	246	249,757	161,498	0,647	60,730		

Prueba de zona

Volumen pulpa (ml)

Tiempo (min)
0
3
6
9

500	450	400	350
Espacio recorrido (cm) interfase agua clara - pulpa			
0	0	0	0
0,4	0,45	0,32	0,3
0,15	0,1	0,18	0,11
0,15	0,1	0,1	0,1

Espacio total recorrido (cm)
Espacio total recorrido (pie)
Tiempo total (hr)
Velocidad de sedimentación pie/hr
Dilución
% de sólidos
Dilución promedio

0,7	0,65	0,6	0,51
0,02296	0,02132	0,01968	0,016728
0,15	0,15	0,15	0,15
0,1531	0,1421	0,1312	0,112
1,586499853	1,389524857	1,19254986	0,99815081
38,66228713	41,84932402	45,608997	50,0462725
0,667139864	0,667139864	0,667139864	0,66713986

Volumen inicial de pulpa: 500 ml		
Densidad del agua	1	gr/ml
Densidad de la pulpa (alimentación)	1,314508277	gr/ml
Volumen inicial de pulpa	500	ml
Masa inicial	657,2541383	gr
Masa de sólidos	249,7565725	gr
Masa de agua	407,4975657	gr
Después de 9 min de sedimentación		
Volumen de agua clara	11,2588	ml
Masa de agua clara	11,2588	gr
Masa de agua en la pulpa final	396,2387657	gr
Masa de sólidos en la pulpa final	249,7565725	gr

A los 500 ml se le extraen 50 ml de agua		
Volumen inicial de pulpa: 450 ml		
Masa de agua clara extraída	11,2588	gr
Agua extraída de pulpa	38,7412	gr
Masa de agua inicial	357,497566	gr
Masa de sólidos inicial	249,756573	gr
Después de 9 min de sedimentación		
Volumen de agua clara	10,4546	ml
Masa de agua clara	10,4546	gr
Masa de agua en la pulpa final	347,042966	gr
Masa de sólidos en la pulpa final	249,756573	gr

A los 450 ml se le extraen 50 ml de agua		
Volumen inicial de pulpa: 400 ml		
Masa de agua clara extraida	10,4546	gr
Agua extraida de pulpa	39,5454	gr
Masa de agua inicial	307,4975657	gr
Masa de sólidos inicial	249,7565725	gr
Después de 9 min de sedimentación		
Volumen de agua clara	9,6504	ml
Masa de agua clara	9,6504	gr
Masa de agua en la pulpa final	297,8471657	gr
Masa de sólidos en la pulpa final	249,7565725	gr

A los 400 ml se le extraen 50 ml de agua		
Volumen inicial de pulpa: 350 ml		
Masa de agua clara extraida	9,6504	gr
Agua extraida de pulpa	40,3496	gr
Masa de agua inicial	257,497566	gr
Masa de sólidos inicial	249,756573	gr
Después de 9 min de sedimentación		
Volumen de agua clara	8,20284	ml
Masa de agua clara	8,20284	gr
Masa de agua en la pulpa final	249,294726	gr
Masa de sólidos en la pulpa final	249,756573	gr

Cálculo del área del espesador

Area unitaria = Superficie / flujo másico de alimentación

	pie ² *hr / ton	
Area unitaria 1	212,202	Area máxima elegida
Area unitaria 2	179,563	
Area unitaria 3	141,484	
Area unitaria 4	104,866	

Area total de espesador

	ton/hr
Flujo de alimentación	175
Flujo de sólidos en la alimentación	66,5

	pie ²	m ²
Area del espesador	14111,40504	1310,992

Volumen zona de compresión	499,290792	m ³
Volumen zona de compresión	17632,2846	pie ³

Horas de retención de la carga en el espesador	4	hr
Toneladas secas por hora	66,5	ton/hr
Densidad sólido seco	2,7	gr/ml
Densidad de la pulpa en la alimentación	1,31450828	gr/ml
Densidad promedio de la pulpa en la zona compresión	1,58788923	gr/ml

Altura zona de compresión	1,24950595	pie
Altura zona de compresión	0,38084941	m

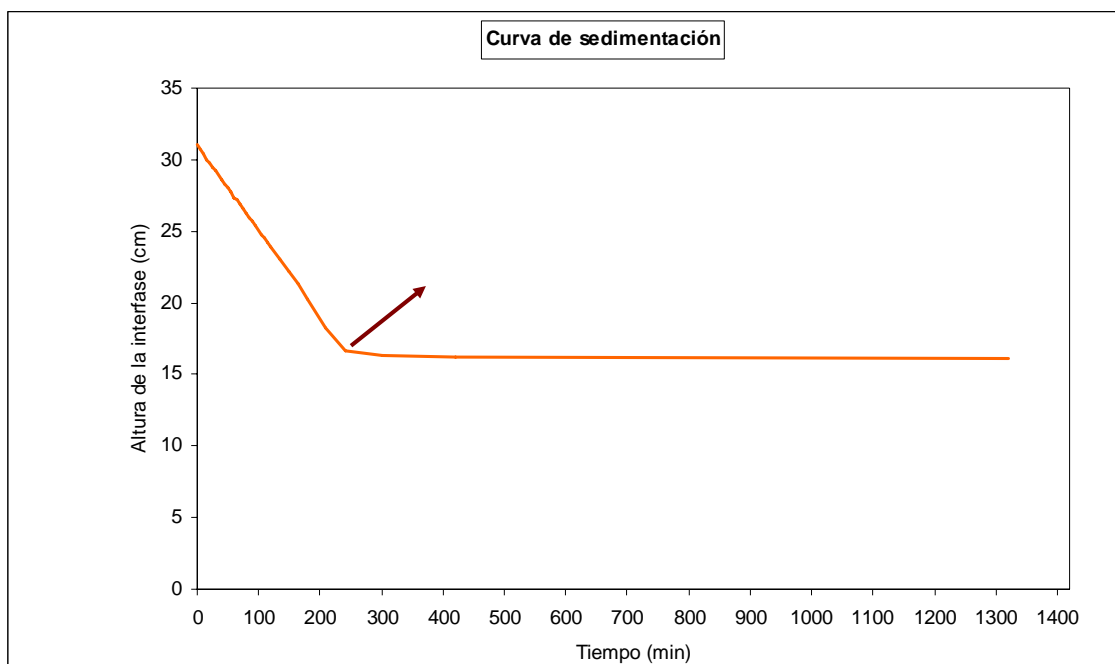
Cálculo diámetro de espesador	
-------------------------------	--

Radio espesador (pie)	67,0208119
Diámetro espesador (pie)	134,041624
Diámetro espesador (m)	40,8558869

PARA UN 40% EN PESO DE SÓLIDOS EN LA ALIMENTACIÓN

Pruebas de asentamiento realizadas en una probeta graduada de 500 ml

Tiempo (min)	Columna de sólidos asentados (cm)	Columna de agua clara (cm)
0	31	0
5	30,69	0,31
10	30,38	0,62
15	30,01	0,99
20	29,76	1,24
25	29,45	1,55
30	29,2	1,8
35	28,89	2,11
40	28,58	2,42
45	28,33	2,67
50	28,02	2,98
55	27,71	3,29
60	27,34	3,66
65	27,16	3,84
70	26,84	4,16
75	26,6	4,4
80	26,29	4,71
85	25,98	5,02
90	25,73	5,27
95	25,42	5,58
100	25,11	5,89
105	24,8	6,2
110	24,55	6,45
115	24,18	6,82
120	23,93	7,07
135	23,06	7,94
150	22,2	8,8
165	21,33	9,67
180	20,27	10,73
210	18,29	12,71
240	16,68	14,32
300	16,31	14,69
420	16,18	14,82
1320	16,12	14,88



Zona de compresión Punto Crítico	
Tiempo (min)	cm de sólidos asentados
210	18,29

Datos iniciales

Pruebas de asentamiento realizadas en una probeta graduada de 500 ml

Volumen de pulpa alimentación	500	ml
Porcentaje en peso sólidos alimentación	40	%
Densidad sólido seco	2,7	gr/ml
Densidad fluido (agua)	1	gr/ml
Gravedad específica	2,7	-
Densidad agua a T° ambiente	1	gr/ml

Densidad de la pulpa alimentación	1,33663366	gr/ml
Masa de pulpa alimentación	668,316832	gr
Masa sólidos de alimentación	267,326733	gr
Masa agua de alimentación	400,990099	gr
Dilución inicial alimentación	1,50000	-

"Prefactibilidad Técnica-Económica de una Planta de Espesamiento de Relaves"

Volumen de la pulpa; sólidos asentados (ml)	Volumen de agua clara (ml)	Masa de sólidos (gr)	Masa de líquido (gr)	Dilución	% en peso de sólidos	Intervalo de tiempo (hr)	Dilución promedio por intervalo
500	0						
495	5						
490	10						
484	16						
480	20						
475	25						
471	29						
466	34						
461	39						
457	43						
452	48						
447	53						
441	59						
438	62						
413	87						
429	71						
424	76						
419	81						
415	85						
410	90						
405	95						
400	100						
396	104						
390	110						
386	114						
372	128						
358	142						
344	156						
327	173	267,327	227,990	0,853	53,971		
295	205	267,327	195,990	0,733	57,698	0,5	0,3666
269	231	267,327	169,990	0,636	61,129	0,5	0,3179
263	237	267,327	163,990	0,613	61,979	1	0,6134
261	239	267,327	161,990	0,606	62,268	2	1,2119
260	240	267,327	160,990	0,602	62,413		

Prueba de zona

Volumen pulpa (ml)

Tiempo (min)
0
3
6
9

500	450	400	350
Espacio recorrido (cm) interfase agua clara - pulpa			
0	0	0	0
0,34	0,32	0,4	0,31
0,2	0,18	0,1	0,1
0,15	0,11	0,09	0,16

Espacio total recorrido (cm)
Espacio total recorrido (pie)
Tiempo total (hr)
Velocidad de sedimentación pie/hr
Dilución
% de sólidos
Dilución promedio

0,69	0,61	0,59	0,57
0,022632	0,02001	0,019352	0,018696
0,15	0,15	0,15	0,15
0,1509	0,1334	0,1290	0,125
1,458485409	1,27626	1,090427942	0,90459423
40,67544987	43,9317	47,83709497	52,504622
0,627472222	0,62747	0,627472222	0,62747222

Volumen inicial de pulpa: 500 ml		
Densidad del agua	1	gr/ml
Densidad de la pulpa (alimentación)	1,336633663	gr/ml
Volumen inicial de pulpa	500	ml
Masa inicial	668,3168317	gr
Masa de sólidos	267,3267327	gr
Masa de agua	400,990099	gr
Después de 9 min de sedimentación		
Volumen de agua clara	11,09796	ml
Masa de agua clara	11,09796	gr
Masa de agua en la pulpa final	389,892139	gr
Masa de sólidos en la pulpa final	267,3267327	gr

A los 500 ml se le extraen 50 ml de agua		
Volumen inicial de pulpa: 450 ml		
Masa de agua clara extraída	11,09796	gr
Agua extraída de pulpa	38,90204	gr
Masa de agua inicial	350,990099	gr
Masa de sólidos inicial	267,326733	gr
Después de 9 min de sedimentación		
Volumen de agua clara	9,81124	ml
Masa de agua clara	9,81124	gr
Masa de agua en la pulpa final	341,178859	gr
Masa de sólidos en la pulpa final	267,326733	gr

A los 450 ml se le extraen 50 ml de agua		
Volumen inicial de pulpa: 400 ml		
Masa de agua clara extraída	9,81124	gr
Agua extraída de pulpa	40,18876	gr
Masa de agua inicial	300,990099	gr
Masa de sólidos inicial	267,3267327	gr
Después de 9 min de sedimentación		
Volumen de agua clara	9,48956	ml
Masa de agua clara	9,48956	gr
Masa de agua en la pulpa final	291,500539	gr
Masa de sólidos en la pulpa final	267,3267327	gr

A los 400 ml se le extraen 50 ml de agua		
Volumen inicial de pulpa: 350 ml		
Masa de agua clara extraída	9,48956	gr
Agua extraída de pulpa	40,51044	gr
Masa de agua inicial	250,990099	gr
Masa de sólidos inicial	267,326733	gr
Después de 9 min de sedimentación		
Volumen de agua clara	9,16788	ml
Masa de agua clara	9,16788	gr
Masa de agua en la pulpa final	241,822219	gr
Masa de sólidos en la pulpa final	267,326733	gr

Cálculo del área del espesador

Area unitaria = Superficie / flujo másico de alimentación

	pie ² *hr / ton	
Area unitaria 1	194,590	Area máxima elegida
Area unitaria 2	171,844	
Area unitaria 3	126,779	
Area unitaria 4	78,552	

Area total de espesador

	ton/hr
Flujo de alimentación	175
Flujo sólidos de alimentación	70

	pie ²	m ²
Area del espesador	13621,2799	1265,45

Volumen zona de compresión	522,536489	m ³
Volumen zona de compresión	18453,1984	pie ³

Horas de retención de la carga en el espesador	4	hr
Toneladas cortas secas por hora	70	ton/hr
Densidad sólido seco	2,7	gr/ml
Densidad de la pulpa en la alimentación	1,33663366	gr/ml
Densidad promedio de la pulpa en la zona compresión	1,60721025	gr/ml

Altura zona de compresión	1,35473308	pie
Altura zona de compresión	0,41292264	m

Cálculo diámetro de espesador	
--------------------------------------	--

Radio espesador (pie)	65,8466242
Diámetro espesador (pie)	131,693248
Diámetro espesador (m)	40,1401021

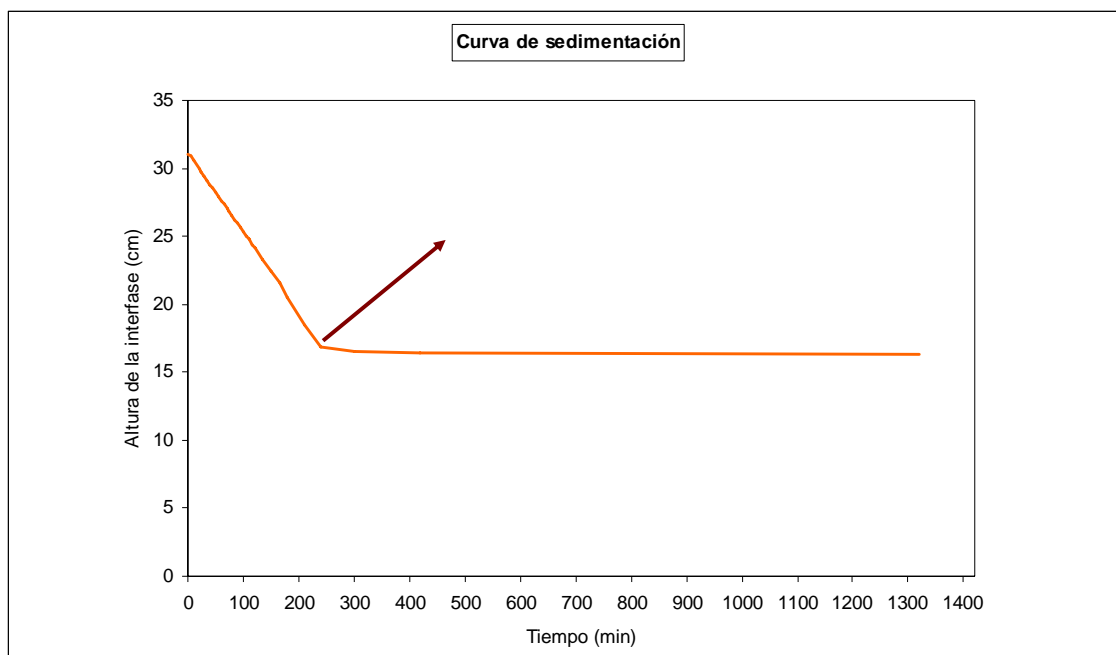
PARA UN 60% EN PESO DE SÓLIDOS EN LA ALIMENTACIÓN

Pruebas de asentamiento realizadas en una probeta graduada de 500 ml

Tiempo (min)	Columna de sólidos asentados (cm)	Columna de agua clara (cm)
0	31	0
5	30,93	0,07
10	30,62	0,38
15	30,25	0,75
20	30,00	1,00
25	29,69	1,31
30	29,44	1,56
35	29,13	1,87
40	28,81	2,19
45	28,56	2,44
50	28,25	2,75
55	27,94	3,06
60	27,57	3,43
65	27,39	3,61
70	27,07	3,93
75	26,83	4,17
80	26,52	4,48
85	26,21	4,79
90	25,96	5,04
95	25,65	5,35
100	25,34	5,66
105	25,03	5,97
110	24,78	6,22
115	24,41	6,59
120	24,15	6,85
135	23,28	7,72
150	22,42	8,58
165	21,55	9,45
180	20,49	10,51
210	18,51	12,49
240	16,9	14,10
300	16,53	14,47
420	16,4	14,60
1320	16,34	14,66

La zona achurada de la tabla corresponde a la Zona de Compresión.

Lectura final realizada a 22 hr de comenzadas las pruebas de asentamiento



Zona de compresión Punto Crítico	
Tiempo (min)	cm de sólidos asentados
210	18,51

Datos iniciales

Pruebas de asentamiento realizadas en una probeta graduada de 500 ml

Volumen de pulpa alimentación	500	ml
Porcentaje en peso sólidos alimentación	60	%
Densidad sólido seco	2,7	gr/ml
Densidad fluido (agua)	1	gr/ml
Gravedad específica	2,7	-
Densidad agua a T° ambiente	1	gr/ml

Densidad de la pulpa alimentación	1,60714286	gr/ml
Masa de pulpa alimentación	803,571429	gr
Masa sólidos de alimentación	482,142857	gr
Masa agua de alimentación	321,428571	gr
Dilución inicial alimentación	0,66667	-

"Prefactibilidad Técnica-Económica de una Planta de Espesamiento de Relaves"

Volumen de la pulpa; sólidos asentados (ml)	Volumen de agua clara (ml)	Masa de sólidos (gr)	Masa de líquido (gr)	Dilución	% en peso de sólidos	Intervalo de tiempo (hr)	Dilución promedio por intervalo
500	0						
498,87	1,13						
493,87	6,13						
487,90	12,10						
483,87	16,13						
478,87	21,13						
474,84	25,16						
469,84	30,16						
464,68	35,32						
460,64	39,36						
455,64	44,36						
450,64	49,36						
444,68	55,32						
441,77	58,23						
436,61	63,39						
432,74	67,26						
427,74	72,26						
422,74	77,26						
418,71	81,29						
413,71	86,29						
408,71	91,29						
403,71	96,29						
399,68	100,32						
393,71	106,29						
389,52	110,48						
375,48	124,52						
361,61	138,39						
347,58	152,42						
330,48	169,52	482,143	151,912	0,315	76,041		
298,55	201,45	482,143	119,976	0,249	80,074	0,5	0,1244
272,58	227,42	482,143	94,009	0,195	83,683	0,5	0,0975
266,61	233,39	482,143	88,041	0,183	84,559	1	0,1826
264,52	235,48	482,143	85,944	0,178	84,871	2	0,3565
263,55	236,45	482,143	84,976	0,176	85,016		

Prueba de zona

Volumen pulpa (ml)

Tiempo (min)
0
3
6
9

500	450	400	350
Espacio recorrido (cm) interfase agua clara - pulpa			
0	0	0	0
0,5	0,48	0,45	0,33
0,25	0,25	0,23	0,21
0,24	0,15	0,16	0,18

Espacio total recorrido (cm)
Espacio total recorrido (pie)
Tiempo total (hr)
Velocidad de sedimentación pie/hr
Dilución (entrada)
% de sólidos
Dilución promedio (salida)

0,99	0,88	0,84	0,72
0,032472	0,02886	0,027552	0,023616
0,15	0,15	0,15	0,15
0,2165	0,1924	0,1837	0,157
0,633640853	0,53361	0,431237357	0,33153678
61,21296477	65,2058	69,86961283	75,1011923
0,190255749	0,19026	0,190255749	0,19025575

Volumen inicial de pulpa: 500 ml		
Densidad del agua	1	gr/ml
Densidad de la pulpa (alimentación)	1,607142857	gr/ml
Volumen inicial de pulpa	500	ml
Masa inicial	803,5714286	gr
Masa de sólidos	482,1428571	gr
Masa de agua	321,4285714	gr
Después de 9 min de sedimentación		
Volumen de agua clara	15,92316	ml
Masa de agua clara	15,92316	gr
Masa de agua en la pulpa final	305,5054114	gr
Masa de sólidos en la pulpa final	482,1428571	gr

A los 500 ml se le extraen 50 ml de agua		
Volumen inicial de pulpa: 450 ml		
Masa de agua clara extraída	15,92316	gr
Agua extraída de pulpa	34,07684	gr
Masa de agua inicial	271,428571	gr
Masa de sólidos inicial	482,142857	gr
Después de 9 min de sedimentación		
Volumen de agua clara	14,15392	ml
Masa de agua clara	14,15392	gr
Masa de agua en la pulpa final	257,274651	gr
Masa de sólidos en la pulpa final	482,142857	gr

A los 450 ml se le extraen 50 ml de agua		
Volumen inicial de pulpa: 400 ml		
Masa de agua clara extraída	14,15392	gr
Agua extraída de pulpa	35,84608	gr
Masa de agua inicial	221,4285714	gr
Masa de sólidos inicial	482,1428571	gr
Después de 9 min de sedimentación		
Volumen de agua clara	13,51056	ml
Masa de agua clara	13,51056	gr
Masa de agua en la pulpa final	207,9180114	gr
Masa de sólidos en la pulpa final	482,1428571	gr

A los 400 ml se le extraen 50 ml de agua		
Volumen inicial de pulpa: 350 ml		
Masa de agua clara extraída	13,51056	gr
Agua extraída de pulpa	36,48944	gr
Masa de agua inicial	171,428571	gr
Masa de sólidos inicial	482,142857	gr
Después de 9 min de sedimentación		
Volumen de agua clara	11,58048	ml
Masa de agua clara	11,58048	gr
Masa de agua en la pulpa final	159,848091	gr
Masa de sólidos en la pulpa final	482,142857	gr

Cálculo del área del espesador

Area unitaria = Superficie / flujo másico de alimentación

	pie ² *hr / ton	
Area unitaria 1	72,361	Area máxima elegida
Area unitaria 2	63,040	
Area unitaria 3	46,352	
Area unitaria 4	31,704	

Area total de espesador

	ton/hr
Flujo de alimentación	175
Flujo sólidos de alimentación	105

	pie ²	m ²
Area del espesador	7597,946942	705,87

Volumen zona de compresión	358,602634	m ³
Volumen zona de compresión	12663,9301	pie ³

Horas de retención de la carga en el espesador	4	hr
Toneladas cortas secas por hora	105	ton/hr
Densidad sólido seco	2,7	gr/ml
Densidad de la pulpa en la alimentación	1,60714286	gr/ml
Densidad promedio de la pulpa en la zona compresión	2,08120519	gr/ml

Altura zona de compresión	1,66675685	pie
Altura zona de compresión	0,50802749	m

Cálculo diámetro espesador

Radio espesador (pie)	49,1782063
Diámetro espesador (pie)	98,3564125
Diámetro espesador (m)	29,9790345

ANEXO D

ANEXO D-1

El Anexo D-1 incluye los cálculos hidráulicos para:

- ↖ La impulsión de relaves hacia la Planta de Espesado.
- ↖ La descarga de relaves hacia el Depósito de Pasta.
- ↖ La impulsión del agua clara formada en el overflow del espesador.

1.- CÁLCULOS HIDRÁULICOS PARA LA IMPULSIÓN DE RELAVES HACIA LA PLANTA DE ESPESADO.

1.- Balance de Masa:

Para una tasa de producción de pasta de relaves de 85.133 [ton/mes] y una máxima tasa de producción de 93.646 [ton/mes] (que equivale a un peak en la producción de un 10%), fue realizado el balance de masa.

De este balance de masa se calculó que el caudal de diseño para la impulsión de relaves hacia la planta de espesado es de 119,94 [m³/hr] y el caudal para un peak de producción es de 131,92 [m³/hr].

A continuación en las Tablas 1 y 2 se presentan los balances de masa del sistema.

En donde:

Tabla 1: Balance de flujo para un 50% en peso de sólidos a la entrada del espesador de pasta y una producción de pasta de relaves equivalente a 85.133 [ton/mes].

Tabla 2: Balance de flujo para un 50% en peso de sólidos a la entrada del espesador de pasta y una máxima producción de pasta de relaves (superior en un 10% a la de diseño) de 93.646 [ton/mes].

	Unidades	Entrada Espesador de pasta	Salida Espesador de pasta	Agua Clara recuperada
Flujo másico de relave.	$\frac{ton}{hr}$	175	118,24	-
Flujo másico de sólido.	$\frac{ton}{hr}$	87,5	87,5	-
Flujo másico de agua.	$\frac{ton}{hr}$	87,5	30,74	56,76
Flujo volumétrico de relave.	$\frac{m^3}{hr}$	119,94	63,162	-
Cp.	%	50	74	-

Tabla 1. Balance de Flujo para una concentración de 50% en peso de sólidos y una tasa de producción de relaves en pasta de 85.133 [ton/mes].

	Unidades	Entrada Espesador de pasta	Salida Espesador de pasta	Agua Clara recuperada
Flujo másico de relave.	$\frac{ton}{hr}$	192,48	130,06	-
Flujo másico de sólido.	$\frac{ton}{hr}$	96,24	96,24	-
Flujo másico de agua.	$\frac{ton}{hr}$	96,24	33,81	62,43
Flujo volumétrico de relave.	$\frac{m^3}{hr}$	131,92	69,47	-
Cp.	%	50	74	-

Tabla 2. Balance de Flujo para una concentración de 50% en peso de sólidos y una tasa máxima de producción de relaves en pasta de 93.646 [ton/mes].

◀ **Fluido a Conducir:**

Datos relevantes:

- $SG(\text{Sólido}) = 2,7$.
- $SG(\text{Líquido}) = 1$.
- C_p (porcentaje de sólidos) = 50 [%].
- $\rho(\text{pulpa}) = 1,459$ [ton/m³].
- $d_{50} = 0,042$ [mm].
- $v(\text{cinemática}) = 27,29$ [cst].

2.- Cálculos y Resultados:

A continuación se presentan los resultados para los dos casos estudiados (el primer caso corresponde a un 50% de sólidos, a la entrada del espesador de pasta, y una producción de diseño de 85.133 [ton/mes] y el segundo caso un mismo porcentaje de sólidos, pero una producción máxima equivalente a un peak de un 10% en la producción de pasta de relaves).

◀ **Caudal de Diseño:**

A continuación se presentan los caudales utilizados para verificar el sistema de impulsión:

Concentración [%]	Caudal [m ³ /hr]	Observación
50	119,94	Diseño
50	131,92	Peak de producción

Tabla 3. Caudales de los dos casos estudiados.

◀ **Dimensionamiento de Tuberías:**

Material	Clase	Diámetro nominal [mm]	Longitud [m]
HDPE	Pe 100	140	658

Tabla 4. Dimensionamiento de tuberías.

Del Anexo D-9, en donde aparecen las propiedades de las tuberías de HDPE se obtuvieron los siguientes datos:

Diámetro externo: Obtenido a través de la siguiente ecuación:

$$SRD = \frac{D_e}{\text{Espesor de Pared}} \quad \text{Ec. 1.-}$$

En donde:

- D_e = Diámetro externo.
- SRD = Relación adimensional estándar que equivale a 27,6.
- Espesor de Pared = 5,1 [mm].

$$D_e = 27,6 * 5,1$$

- $D_e = 140,76$ [mm]
- Área de la tubería = $0,0153$ [m²].

◀ **Velocidad Límite:**

A continuación se presenta la comparación entre la velocidad real del flujo y la velocidad límite, para ambos caudales, verificándose que las velocidades cumplan con los criterios de diseño.

	Caudal [m ³ /hr]	Velocidad real [m/s]	Velocidad límite [m/s]	Relación V_R / V_L
Diseño	119,94	2,164	1,219	1,775
Máximo	131,92	2,380	1,219	1,952

Tabla 5. Relación entre la velocidad real y límite del flujo.

Se puede observar que para ambos caudales, la velocidad cumple con el criterio de diseño, el cual indica que la velocidad real debe ser mayor a la velocidad límite en al menos un 10%.

◀ **Cálculo de Pérdidas Totales:**

En las siguientes tablas se presentan los cálculos para la obtención de las Pérdidas de Carga por Fricción para ambos caudales:

	Caudal [m ³ /hr]	Densidad [ton/m ³]	Velocidad [m/s]	Diámetro [m]	Viscosidad [cst]	Reynolds
Diseño	119,94	1,459	2,164	0,140	27,29	11.103
Máximo	131,92	1,459	2,380	0,140	27,29	12.213

Tabla 6. Cálculo del número de Reynolds.

	Reynolds	Rugosidad relativa ε / D	Factor de fricción	Pérdidas de carga por fricción [m]
Diseño	11.103	0,0000714	0,0303	34,042
Máximo	12.213	0,0000714	0,0295	40,151

Tabla 7. Cálculo de Pérdidas de Carga por Fricción.

◀ **Cálculo de cabeza dinámica total:**

La cabeza dinámica total o TDH se define como:

$$TDH = H_g + \text{Pérdidas totales} \quad \text{Ec. 2.-}$$

En donde H_g corresponde a la altura geométrica.

La altura geométrica se obtiene al restar la cota final con la cota inicial; es decir obtener el ΔZ .

- Cota inicial = 390 [m.s.n.m]
- Cota final = 355 [m.s.n.m]

	Caudal	Altura geométrica [m]	Pérdidas totales [m]	TDH [m]
Diseño	119,94	-35	68,084	33,084
Máximo	131,92	-35	80,302	45,302

Tabla 8. Cálculo de la altura total de impulsión.

◀ **Corrección de la curva característica:**

La curva entregada por el fabricante de la bomba seleccionada (Bomba centrífuga con revestimiento de goma tipo SRL, tamaño 5x5x14) corresponde al funcionamiento de la bomba con agua pura, es por ello que se debe aplicar un factor de corrección para su uso con pulpas.

El factor de corrección es el siguiente:

$$H = \frac{H_w}{HR} \quad \text{Ec. 3.-}$$

Donde:

- H = Altura de impulsión de la bomba.
- H_w = Altura de impulsión de agua pura.
- HR = Factor de corrección.

Dado:

- $d_{50} = 0,042$ mm
- $SG(\text{sólido}) = 2,7$

Se obtiene:

- $K = 0,025$

$$HR = 1 - \frac{K * C_v}{20} \quad \text{Ec. 4.-}$$

- $HR = 1 - \frac{0,025 * 27}{20} = 0,96625$

	Caudal [GPM]	HR	Altura de impulsión de la bomba [m]	Altura de agua pura (entrar en la curva de la bomba) [m]
Diseño	528,01	0,9662	33,084	31,96
Máximo	580,75	0,9662	45,302	43,77

Tabla 9. Corrección curva de la bomba.

◀ **Cálculo de Potencia requerida:**

La potencia requerida por el equipo de bombeo se estima según la siguiente expresión:

$$HHP = \frac{Q * H * \rho(pulpa)}{75} \quad \text{Ec. 5.-}$$

◀ **Cálculo de la potencia entregada por el motor:**

La potencia entregada por el motor se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$BHP = \frac{HHP}{\eta} \quad \text{Ec. 6.-}$$

El valor de la eficiencia η entregada por el motor es de un 62,5% para el caudal de diseño (valor obtenido de la curva de la bomba de pulpa que se encuentra en el Anexo D-3).

Para el caso del caudal máximo, éste se escapa de las condiciones de funcionamiento de la bomba seleccionada, por lo tanto el caudal de diseño será el máximo permisible para un buen funcionamiento de la bomba.

	Caudal [m ³ /s]	Altura Total [m]	Densidad [kg/m ³]	HHP [hp]	η [%]	BHP [hp]
Diseño	0,0333	31,96	1.459	20,70	62,5	33,12

Tabla 10. Cálculos de potencias requeridas y entregadas.

2.- CÁLCULOS HIDRÁULICOS PARA LA DESCARGA DE RELAVES HACIA EL DEPÓSITO DE PASTA.

1.- Balance de Masa:

El balance de masa fue realizado en los cálculos anteriores (Cálculos hidráulicos de impulsión de relaves al espesador).

A continuación se presenta los valores de mayor interés:

	Flujo másico de relave.	Flujo másico de sólidos.	Flujo másico de agua.	Caudal	C _p
Salida Espesador en Pasta	118,24	87,49	30,74	63,16	74
Unidades	$\frac{ton}{hr}$	$\frac{ton}{hr}$	$\frac{ton}{hr}$	$\frac{m^3}{hr}$	%

Tabla 11. Balance de Masa para una concentración de 74% en peso de sólidos y una tasa de producción de relaves en pasta de 85.133 [ton/mes].

2.- Cálculos y Resultados:

A continuación se presentan los resultados para un 74% de sólidos, a la salida del espesador en pasta, y una producción de diseño de 85.133 [ton/mes].

◀ Datos relevantes:

- $SG(\text{Sólido}) = 2,7$.
- $SG(\text{Líquido}) = 1$.
- $C_p = 74$ [%].
- $\rho(\text{pulpa}) = 1,872$ [ton/m³].
- $d_{50} = 0,042$ [mm].
- $v(\text{cinemática}) = 27,29$ [cst].

◀ **Caudal de Descarga:**

El caudal de diseño es el correspondiente a una tasa de producción de Pasta de Relaves equivalente a 85.133 [ton/mes]. El cual tiene un valor de 63,16 [m³/hr].

◀ **Tuberías:**

Se utilizarán tuberías HDPE Pe 100.

El diámetro nominal adoptado será de 140 [mm] es decir 5,5 [pulg].

Para un PN 6 (Presión nominal) se obtiene que el espesor mínimo de pared será de 5,1 [mm].

Se adoptará una rugosidad de 0,01 [mm].

En la Tabla que se presenta en el Anexo D-9, se encuentra dicha información.

Diámetro externo: Obtenido a través de la siguiente ecuación:

$$SRD = \frac{D_e}{\text{Espesor de Pared}} \quad \text{Ec. 7.-}$$

En donde:

- D_e = Diámetro externo.
- SRD = Relación adimensional estándar que equivale a 27,6.
- Espesor de Pared = 5,1 [mm].

$$D_e = 27,6 * 5,1$$

- $D_e = 140,76$ [mm]

Diámetro interno: el diámetro interno corresponde a:

$$D_i = D_n - 2 * \text{Espesor de pared} \quad \text{Ec. 8.-}$$

- $D_i = 129,8$ [mm]
- Área de la tubería = 0,0132 [m²].

◀ **Caudal de Diseño:**

A continuación se presenta el caudal utilizado para verificar el sistema de impulsión:

Concentración [%]	Caudal [m ³ /hr]	Observación
74	63,16	Diseño

Tabla 12. Caudal de diseño.

◀ **Velocidad del flujo:**

	Caudal [m ³ /hr]	Área Tubería [m ²]	Velocidad Flujo [m/s]
Diseño	63,16	0,0132	1,325

Tabla 13. Velocidad real del flujo.

◀ **Velocidad Límite:**

A continuación se presenta la comparación entre la velocidad real del flujo y la velocidad límite, verificándose que la velocidad cumpla con los criterios de diseño.

	Caudal [m ³ /hr]	Velocidad real [m/s]	Velocidad límite [m/s]	Relación V_R / V_L
Diseño	63,16	1,325	1,277	1,0378

Tabla 14. Relación entre la velocidad real y límite del flujo.

Se puede observar que la velocidad cumple con el criterio de diseño, el cual indica que la velocidad real debe ser mayor a la velocidad límite en al menos un 10%.

◀ **Cálculo de Pérdidas Totales:**

En las siguientes tablas se presentan los cálculos para la obtención de las Pérdidas de Carga por Fricción.

	Caudal [m ³ /hr]	Densidad [ton/m ³]	Velocidad [m/s]	Diámetro [m]	Viscosidad [cst]	Reynolds
Diseño	63,16	1,872	1,325	0,1298	27,29	6.306

Tabla 15. Cálculo del número de Reynolds.

	Reynolds	Rugosidad relativa ε / D	Factor de fricción	Pérdidas de carga por fricción [m]
Diseño	6.306	0,0000770	0,0355	23,558

Tabla 16. Cálculo de Pérdidas de Carga por Fricción.

◀ **Cabeza dinámica total:**

- Cota inicial = 340 [m.s.n.m]
- Cota final = 315 [m.s.n.m]

	Caudal	Altura geométrica [m]	Perdidas totales [m]	TDH [m]
Diseño	63,16	-25	47,116	22,116

Tabla 17. Cálculo de la altura total de impulsión.

◀ **Corrección de la Curva Característica:**

Dado:

- $d_{50} = 0,042 \text{ mm}$
- $SG(\text{sólido}) = 2,7$

Se obtiene:

- $K = 0,025$
- $HR = 1 - \frac{0,025 * 51,29}{20} = 0,9358$

Para la bomba elegida que corresponde a una "Bomba Centrífuga" tipo SRL, tamaño 5x5x14 se obtuvo la siguiente corrección:

	Caudal [GPM]	HR	Altura de impulsión de la bomba [m]	Altura de agua pura (entrar en la curva de la bomba) [m]
Diseño	278,04	0,9358	22,116	20,696

Tabla 18. Corrección curva de la bomba.

◀ **Cálculo de Potencia requerida:**

$$HHP = \frac{0,01754 * 20,69 * 1872}{75}$$

- Potencia requerida = 9,05 [hp].

◀ **Cálculo de la potencia entregada por el motor:**

El valor de la eficiencia η entregado por el motor es de un 55%, (valor obtenido de la curva de la bomba de pulpa que se encuentra en el Anexo D-3).

$$BHP = \frac{9,05}{0,55}$$

- Potencia entregada por el motor = 16,45 [hp]

3.- CÁLCULOS HIDRÁULICOS PARA LA IMPULSIÓN DEL AGUA RECUPERADA.

1.- Bases de Diseño:

El fluido a conducir es agua, cuyo caudal a transportar es equivalente a 62,43 m³/hr, cuando la concentración de entrada al espesador es de un 50% y la de salida de un 74%.

Datos del fluido:

- Caudal = 274,83 [GPM].
- Densidad del agua = 1.000 [kg/m³].
- Viscosidad del agua = 0,0009968 [kg/m*s].

2.- Cálculos y Resultados:

◀ *Determinación de la velocidad del Flujo y Diámetro de la tubería:*

Dado:

- v_d = Velocidad de descarga [pie/s].
- $v_d = 7$ [pie/s].

Q^* = Factor de capacidad [GPM/pie/s].

$$Q^* = \frac{\text{Caudal}}{\text{velocidad}} \quad \text{Ec. 9.-}$$

$$Q^* = \frac{274,83}{7} = 39,26$$

En la tabla del Anexo D-5, para un factor de 39,26 y una cédula 40 ST 40S se determina que el diámetro nominal de las tuberías es de 4 [pulg].

- $D_N = 4$ [pulg].
- $D_I = 4,026$ [pulg].

Luego con estos valores se recalcula la velocidad de descarga:

$$v_d = \frac{Q}{A} \quad \text{Ec. 10.-}$$

Dado:

- $Q = 0,61233$ [pie³/s].
- $A = 0,0884$ [pie²].
- v_d Real de descarga = 6,92 [pie/s].

Para la velocidad de succión se tiene:

$$v_s = \frac{2}{3} * v_d \quad \text{Ec. 11.-}$$

- $v_s = 4,617$ [pie/s].

Se calcula nuevamente el Factor de Capacidad Q^* pero ahora con la nueva velocidad de succión:

- $Q^* = \frac{274,83}{4,617} = 59,52$ [GPM/pie/s].

De la tabla que se encuentra en el Anexo D-5 se obtiene:

- $D_N = 5$ [pulg].

- $D_i = 5,017$ [pulg].
- $A = 0,1372$ [pie²].
- $v_s = \frac{0,61233}{0,1372}$
- Velocidad real de succión = 4,461 [pie/s].

	Velocidad [pie/s]	Velocidad [m/s]	Diámetro interno [mm]
Succión	4,461	1,359	127,40
Descarga	6,92	2,109	102,26

Tabla 19. Tabla resumen.

◀ **Cálculo de las Pérdidas Totales:**

	Diámetro [m]	Velocidad [m/s]
Succión	0,1274	1,359
Descarga	0,1022	2,109

	Densidad [kg/m ³]	Viscosidad [kg/m*s]	Reynolds
Succión	1.000	0,0009968	173.729
Descarga	1.000	0,0009968	216.556

Tabla 20. Valores de Reynolds para la succión y descarga.

Como las tuberías serán de acero comercial se tiene del Anexo D-6, las rugosidades relativas:

- ε / D Descarga = 0,0004
- ε / D Succión = 0,0003
- f Descarga = 0,01824
- f Succión = 0,0180

Para la Succión se obtiene:

$$\lambda_F = 0,0180 * \frac{160}{0,12740} * \left[\frac{(1,359)^2}{2 * 9,8} \right]$$

- Pérdidas de carga por fricción Succión = 2,1414 [m].

Para la Descarga se obtiene:

$$\lambda_F = 0,01824 * \frac{640}{0,10226} * \left[\frac{(2,109)^2}{2 * 9,8} \right]$$

- Pérdidas de carga por fricción Descarga = 25,968 [m].
- Pérdidas de Carga por Fricción = 28,109 [m].

El cálculo de las pérdidas totales incluye la suma de las pérdidas singulares con las pérdidas de carga por fricción.

En relación a las pérdidas singulares, en esta etapa no serán calculadas detalladamente, así que se adoptará un factor de 2; es decir; las pérdidas totales serán igual a las pérdidas de carga por fricción multiplicadas por dos.

- Pérdidas totales = $2 * 28,1094 = 56,21$ [m].

◀ **Cabeza dinámica total:**

La cabeza dinámica total o TDH se define como:

$$TDH = H_g + \text{Pérdidas totales}$$

En donde H_g corresponde a la altura geométrica.

La altura geométrica se obtiene al restar la cota final con la cota inicial; es decir obtener el ΔZ .

- Cota inicial = 355 [m.s.n.m].
- Cota final = 335 [m.s.n.m].

Altura geométrica [m]	Perdidas totales [m]	TDH [m]
-20	56,21	36,21

Tabla 21. Cabeza dinámica total

La bomba a utilizar corresponde a una bomba de agua Tamaño 3x4 – 8G Modelo 3.196.

◀ **Cálculo de Potencia requerida:**

La potencia requerida por el equipo de bombeo se estima según la siguiente expresión:

$$HHP = \frac{Q * H * \rho(\text{pulpa})}{75} \quad \text{Ec. 12.-}$$

Donde:

- HHP = Potencia requerida [hp].
- H = Altura total de impulsión TDH [m].
- $\rho(\text{pulpa})$ = Densidad de la pulpa [Kg/m^3].
- Q = Caudal de pulpa [m^3/s].

$$HHP = \frac{0,01733 * 36,21 * 1000}{75}$$

- Potencia requerida = 8,366 [hp]

◀ **Cálculo de la potencia entregada por el motor:**

La potencia entregada por el motor se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$BHP = \frac{HHP}{\eta} \quad \text{Ec. 13.-}$$

El valor de la eficiencia η entregado por el motor es de un 65%, (valor obtenido de la curva de la bomba de agua que se encuentra en el Anexo D-7).

$$BHP = \frac{8,366}{0,65}$$

- Potencia entregada por el motor = 12,82 [hp]

4.- PLANILLAS EXCEL PARA LA IMPULSIÓN DE RELAVES HACIA LA PLANTA DE ESPESADO.

◀ CAUDAL DE DISEÑO:

IMPULSIÓN DE RELAVES CAUDAL DE DISEÑO

Datos fluido a conducir

Masa total de pulpa de relave	175	ton/hr
Densidad sólido seco	2,7	ton/m3
Concentración de sólido en peso	50	%
Masa de solidos	87,5	ton/hr
Tamaño de solidos (D50)	0,042	mm

Masa de agua	87,5	ton/hr
Densidad del agua	1	ton/m3
Volumen de agua	87,5	m3/hr

densidad de la pulpa	1,459	ton/m3
Volumen de pulpa de relave (caudal)	119,945168	m3/hr

Definición de tramo

Metro inicial	Metro final	cota inicial [m.s.n.m]	cota final [m.s.n.m]
0	658	390	355

Velocidad del flujo	2,164378881	m/s
---------------------	-------------	-----

Datos de la tubería		
Clase de tubería	HDPE	
Diametro nominal de tubería (tabla)	140	mm
Diametro externo de tubería (tabla)	140,76	mm
Espesor de pared (tabla)	5,1	mm
Tipo	Pe 100	
Rugosidad	0,01	mm
Abrasion	0	mm/año
Vida util	10	años
Longitud	658	m

Cálculos de pérdidas de carga		
Diámetro tubería (tabla)	140	mm
Area de tubería	0,01539384	m ²
Velocidad	2,16437888	m/s
Viscosidad cinemática	27,29	centistoke
Rugosidad relativa	7,1429E-05	-
Número de Reynods	11103,4461	-
Factor de fricción (fórmula)	0,03030459	
Pérdidas por fricción	34,0421314	m

Cálculo velocidad límite		
Concentración de sólidos en volumen	0,27	-
Valor de F1	0,71425552	-
Valor de F2	0,7674521	-
Valor de FI	0,76106851	-
Velocidad límite Mc.Elvain	1,21915383	m/s
Relación velocidad / velocidad límite	1,77531238	-

Cálculo golpe de ariete		
Valor de K	120	-
Velocidad de la onda	171,355239	m/s
Tiempo de cierre (valor entregado)	1	s
Tiempo crítico	7,67995196	s
Para el caso más desfavorable de una detención repentina de la bomba		
Utilizo ecuación para cierre rapido (Ec.Allieve)		
Sobrepresión	37,8446591	m.c.a

◀ CAUDAL MÁXIMO:

IMPULSIÓN DE RELAVES CAUDAL MÁXIMO

Datos fluido a conducir

Masa total de pulpa de relave	192,48	ton/hr
Densidad sólido seco	2,7	ton/m3
Concentración de sólido en peso	50	%
Masa de solidos	96,24	ton/hr
Tamaño de solidos (D50)	0,042	mm

Masa de agua	96,24	ton/hr
Densidad del agua	1	ton/m3
Volumen de agua	96,24	m3/hr

densidad de la pulpa	1,459	ton/m3
Volumen de pulpa de relave (caudal)	131,925977	m3/hr

Definición de tramo

Metro inicial	Metro final	cota inicial [m.s.n.m]	cota final [m.s.n.m]
0	658	390	355

Velocidad del flujo	2,380569412	m/s
---------------------	-------------	-----

Datos de la tubería		
Clase de tubería	HDPE	
Diametro nominal de tubería (tabla)	140	mm
Diametro externo de tubería (tabla)	140,76	mm
Espesor de pared (tabla)	5,1	mm
Tipo	Pe 100	
Rugosidad	0,01	mm
Abrasion	1	mm/año
Vida util	10	años
Longitud	658	m

Cálculos de pérdidas de carga		
Diámetro tubería (tabla)	140	mm
Area de tubería	0,01539384	m ²
Velocidad	2,38056941	m/s
Viscosidad cinemática	27,29	centistoke
Rugosidad relativa	7,1429E-05	-
Número de Reynods	12212,5217	-
Factor de fricción (fórmula)	0,02954562	
Pérdidas por fricción	40,151024	m

Cálculo velocidad límite		
Concentración de sólidos en volumen	0,27	-
Valor de F1	0,71425552	-
Valor de F2	0,7674521	-
Valor de FI	0,76106851	-
Velocidad límite Mc.Elvain	1,21915383	m/s
Relación velocidad / velocidad límite	1,95264072	-

Cálculo golpe de ariete		
Valor de K	120	-
Velocidad de la onda	171,355239	m/s
Tiempo de cierre (valor entregado)	1	s
Tiempo crítico	7,67995196	s
Para una detención repentina de la bomba		
Utilizo ecuación para cierre rápido (Ec. Allieve)		
Sobrepresión	41,6247999	m.c.a

5.- PLANILLAS EXCEL PARA LA DESCARGA DE RELAVES HACIA EL DEPÓSITO.

DESCARGA DE RELAVES CAUDAL DE DISEÑO

Datos fluido a conducir

Masa total de pulpa de relave	118,24	ton/hr
Densidad sólido seco	2,7	ton/m3
Concentración de sólido en peso	74	%
Masa de solidos	87,4976	ton/hr
Tamaño de solidos (D50)	0,042	mm

Masa de agua	30,7424	ton/hr
Densidad del agua	1	ton/m3
Volumen de agua	30,7424	m3/hr

densidad de la pulpa	1,872	ton/m3
Volumen de pulpa de relave (caudal)	63,1623932	m3/hr

Definición de tramo

Metro inicial	Metro final	cota inicial [m.s.n.m]	cota final [m.s.n.m]
0	960	340	315

Velocidad del flujo	1,325915337	m/s
---------------------	-------------	-----

Datos de la tubería		
Clase de tubería	HDPE	
Diametro nominal de tubería (tabla)	140	mm
Diametro externo de tubería (tabla)	140,76	mm
Espesor de pared (tabla)	5,1	mm
Tipo	Pe 100	
Rugosidad	0,01	mm
Corrosion	0	mm/año
Vida util	10	años
Longitud	960	m

Cálculos de pérdidas de carga		
Diámetro interno tubería (tabla)	129,8	mm
Area de tubería	0,01323245	m ²
Velocidad	1,32591534	m/s
Viscosidad cinemática	27,29	centistoke
Rugosidad relativa	7,7042E-05	-
Número de Reynods	6306,47896	-
Factor de fricción (fórmula)	0,03551143	
Pérdidas por fricción	23,5580955	m

Cálculo velocidad límite		
Concentración de sólidos en volumen	0,51294118	-
Valor de F1	0,71425552	-
Valor de F2	0,7674521	-
Valor de FI	0,81276306	-
Velocidad límite Mc.Elvain	1,27757197	m/s
Relación velocidad / velocidad límite	1,03784003	-

Cálculo golpe de ariete		
Valor de K	120	-
Velocidad de la onda	859,326145	m/s
Tiempo de cierre (valor entregado)	1	s
Tiempo crítico	2,23430884	s
Para el caso más desfavorable de una detención repentina de la bomba		
Utilizo ecuación para cierre rapido (Ec.Allieve)		
Sobrepresión	116,264665	m.c.a

6.- PLANILLAS EXCEL PARA LA DESCARGA DE AGUAS CLARAS.

CÁLCULOS HIDRÁULICOS PARA LA DESCARGA DE AGUAS CLARAS.

	m3/hr	pie3/s	GPM
Caudal	62,43	0,61233425	274,835839

DESCARGA

	pie/s	
Velocidad de descarga	7	
Factor de capacidad	39,2622628	
En tabla propiedades de cañerías de acero cédula 40ST,40S y entrando con el factor se obtiene:		
	pulg	pie
Diámetro nominal	4	0,33332
Diámetro interno	4,026	0,33548658
	pie/s	m/s
Velocidad real de descarga	6,92703449	2,111

Cálculos de pérdidas de carga (descarga)		
Diámetro interno tubería (tabla)	102,25631	mm
Area de tubería	0,00821242	m ²
Velocidad	2,111	m/s
Densidad del agua	1000	kg/m ³
Viscosidad del agua	0,0009968	Kg/m*s
Rugosidad relativa	0,0004	-
Número de Reynods	216556,049	-
Factor de fricción (fórmula)	0,01824915	
Pérdidas por fricción	25,9688624	m
Largo tramo de descarga	640	m

SUCCIÓN

	pie/s		
Velocidad de succión	4,61802299		
Factor de capacidad	59,5137442		
En tabla propiedades de cañerías de acero cédula 40ST,40S y entrando con el factor se obtiene:			
	pulg	pie	mm
Diámetro nominal	5	0,41665	126,99492
Diámetro interno	5,017	0,41806661	127,426703
	pie/s	m/s	
Velocidad real de succión	4,46073773	1,359	

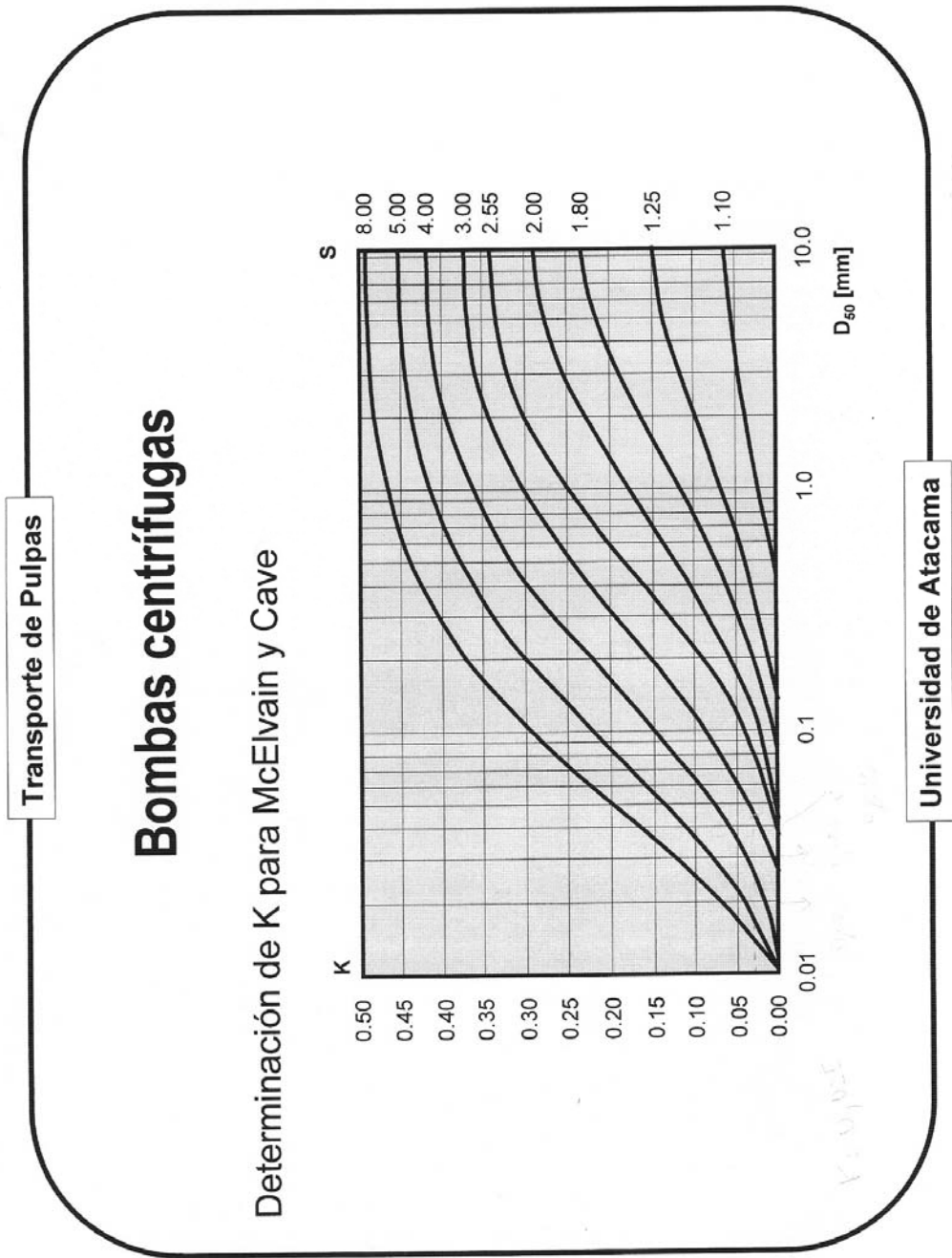
Cálculos de pérdidas de carga (succión)		
Diámetro interno tubería (tabla)	127,426703	mm
Area de tubería	0,01275298	m2
Velocidad	1,359	m/s
Densidad del agua	1000	Kg/m3
Viscosidad agua	0,0009968	Kg/m*s
Rugosidad relativa (tabla)	0,0003	-
Número de Reynods	173728,821	-
Factor de fricción (fórmula)	0,01809912	
Pérdidas por fricción	2,14141054	m
Longitud del tramo succión	160	m

Pérdidas de carga por fricción	28,110273	m
--------------------------------	-----------	---

Pérdidas totales	56,2205459	m
------------------	------------	---

ANEXO D-2

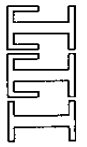
DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO K, SEGÚN EL MODELO DE M^C ELVAIN & CAVE.



ANEXO D-3

CURVA DE BOMBA CENTRÍFUGA PARA PULPAS.

CP 6.6.1
Page 52



A-C Pump

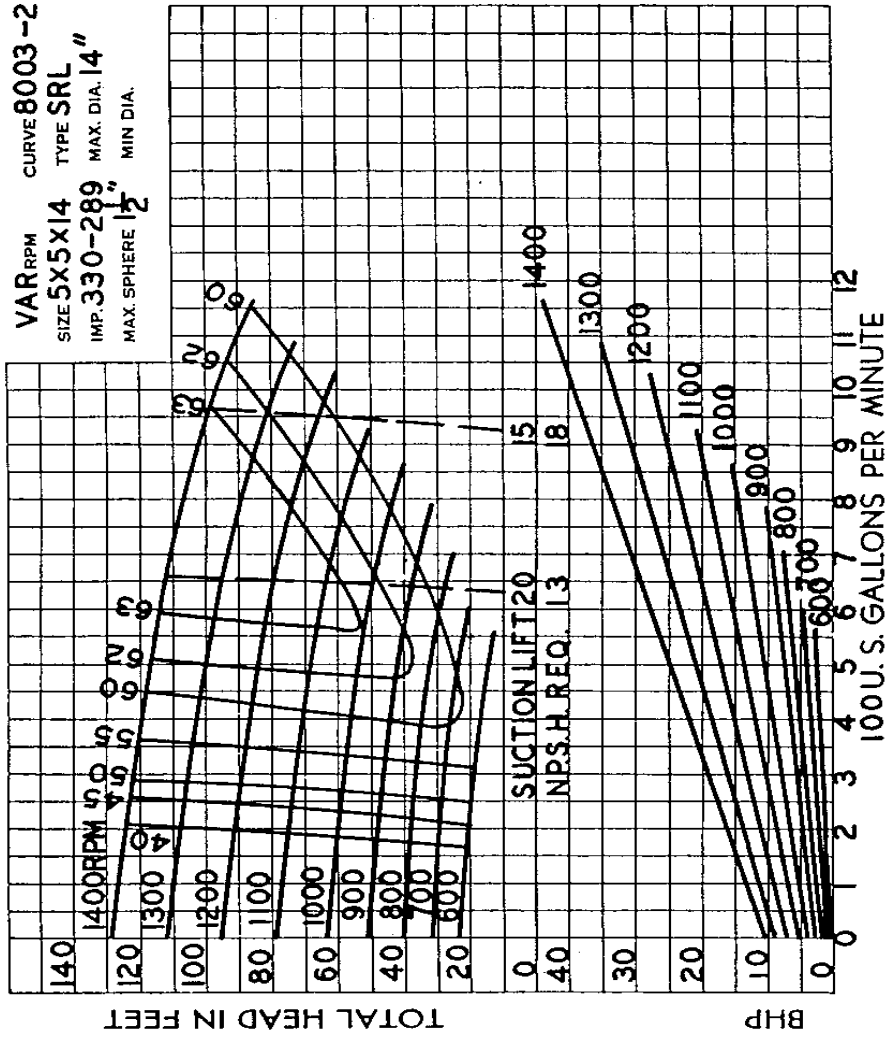
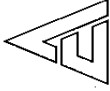
A unit of ITT Corporation

TYPE SRL & SRL-C PUMPS

Oaktree Curves

5x5x14 SRL

6x6x15 SRL



ANEXO D-4

VELOCIDADES RECOMENDABLES Y CAÍDA DE PRESIÓN MÁXIMA PARA ACERO AL CARBÓN CON LÍQUIDOS DE PROCESOS Y SERVICIOS.

Tipo de servicio	Velocidad [pie/s]	Máxima caída de Presión Psi/100 pies de cañerías
1.- Recomendación General	5 – 15	4
2.- Flujo Laminar	5 – 5	4
3.- Flujo Turbulento densidad (lb/pie ³)		
100	5 – 8	4
50	6 – 10	4
20	10 – 15	4
4.- Succión de Bomba		
Ebullendo	2 – 6	0,5
No Ebullendo	4 – 8	1,0
5.- Descarga bomba		
0 – 250 GPM	6 – 8	6
250 – 700 GPM	8 – 10	4
> 700 GPM	10 – 15	2
6.- Salida por Fondo	4 – 6	0,6
7.- Purga Rehervidor	1 – 4	0,15
8.- Líquido desde condensador	3 – 6	0,5
9.- Líquido a enfriador	4 – 6	-
10.- Líneas refrigerantes	2 – 4	0,4
11.- Líneas por gravedad	3 – 8	0,4
12.- Alimentación a Torres	4 – 6	-
Líneas de agua		
1.- Servicio general	2 – 16	2
Diámetro en pulgadas		
1	2 – 3	2
2	3 – 4,5	2
4	5 – 7	2
6	7 – 9	2
8	8 – 10	2
10	10 – 12	2
12	10 – 14	2
16	10 – 15	2
20 y mayor	10 – 16	2
2.- Succión Bombas y drenaje	4 – 7	2
3.- Descarga Bomba	8 – 15	2
4.- Agua de enfriamiento	12 - 16	2

ANEXO D-5

PROPIEDADES DE CAÑERÍAS DE ACERO.

Tabla 9.3 Propiedades de Cañerías de Acero

Diámetro Nominal pulg	Diámetro Externo pulg	Número de Catálogo (Schedule)	Espesor de Pared pulg	Diámetro Interno pulg	Área de la Sección Transversal		Capacidad a los de Velocidad		
					Metá pulg ²	Flujo pie ²	GPM	H ₂ O en gal	
1/8	0.405	10S	0.049	0.307	0.055	0.00051	0.231	115.5	
		40ST, 40S	.068	.269	0.72	.00010	.179	89.5	
		80XS, 80S	.095	.215	.215	.00025	.113	56.5	
	0.540	10S	.065	.410	.097	.00092	.412	206.5	
		40ST, 40S	.088	.364	.125	.00072	.323	161.5	
		80XS, 80S	.119	.302	.157	.00050	.224	112.0	
	1/2	0.675	10S	.065	.545	.125	.00162	.727	363.5
			40ST, 40S	.091	.493	.167	.00133	.596	298.0
			80XS, 80S	.126	.423	.217	.00098	.440	220.0
3/4	1.050	5S	.065	.710	.158	.00275	1.234	617.0	
		10S	.083	.674	.197	.00248	1.112	556.0	
		40ST, 40S	.109	.622	.250	.00211	0.945	472.0	
		80XS, 80S	.117	.546	.320	.00163	0.730	365.0	
		160	.188	.464	.385	.00117	0.527	263.5	
XX	.294	.252	.501	.00035	0.155	77.5			
1	1.315	5S	.065	1.185	.255	.00768	3.449	1725	
		10S	.109	1.0097	.413	.00656	2.946	1473	
		40ST, 40S	.133	1.049	.494	.00600	2.690	1345	
		80XS, 80S	.179	0.957	.639	.00199	2.240	1120	
		160	.250	0.815	.836	.00362	1.625	812.5	
XX	.358	0.599	1.076	.00196	0.878	439.0			
1 1/4	1.660	5S	.065	1.530	0.326	0.1277	5.73	2865	
		10S	.109	1.442	0.531	0.1134	5.09	2545	
		40ST, 40S	.140	1.380	0.668	0.1010	4.57	2285	
		80XS, 80S	.191	1.278	0.881	0.0891	3.99	1995	
		160	.250	1.160	1.107	0.0734	3.29	1645	
XX	.382	0.896	1.534	.00438	1.97	985			
1 1/2	1.900	5S	.065	1.770	0.375	0.1709	7.67	3835	
		10S	.109	1.682	0.614	0.1513	6.91	3465	
		40ST, 40S	.145	1.610	0.800	0.1414	6.34	3170	
		80XS, 80S	.200	1.500	1.069	0.1225	5.49	2745	
		160	.281	1.338	1.429	0.0976	4.38	2190	
XX	.400	1.100	1.885	.00660	2.96	1480			
2	2.375	5S	.065	2.245	0.472	0.2740	12.31	6170	
		10S	.109	2.157	0.776	0.2538	11.39	5695	
		40ST, 40S	.154	2.067	1.075	0.2330	10.45	5225	
		80XS, 80S	.218	1.939	1.477	0.2050	9.20	4600	
		160	.311	1.687	2.495	.01552	6.97	3485	
XX	.436	1.503	2.656	.01232	5.53	2765			
2 1/2	2.875	5S	.083	2.709	0.728	0.04003	17.97	8985	
		10S	.120	2.635	1.039	.03787	17.00	8500	
		40ST, 40S	.203	2.469	1.701	.03322	14.92	7460	
		80XS, 80S	.276	2.323	2.251	.02942	13.20	6600	
		160	.375	2.125	2.945	.02463	11.07	5535	
XX	.552	1.771	4.028	.01711	7.58	3840			
3	3.500	5S	0.83	3.334	0.891	.06063	27.21	13.605	
		10S	.120	3.260	1.274	.05796	26.02	13.010	
		40ST, 40S	.216	3.068	2.228	.05130	23.00	11.500	
		80XS, 80S	.300	2.900	3.016	.04587	20.55	10.275	
		160	.438	2.621	4.213	.03755	16.86	8.430	
XX	.600	2.300	5.466	.02885	12.95	6.475			
3 1/2	4.0	5S	.083	3.83	1.021	.08017	35.98	17.990	
		10S	.120	3.760	1.463	.07711	34.51	17.305	
		40ST, 40S	.226	3.548	2.680	.06870	30.80	15.400	
		80XS, 80S	.318	3.361	3.678	.06170	27.70	13.850	
4	4.5	5S	.083	4.331	1.152	.12215	45.0	23.000	
		10S	.120	4.260	1.651	.09898	41.1	22.200	

40ST, 40S	237	4.026	3.17	.08840	39.6	10.800
80XS, 80S	337	3.826	4.41	.07986	35.8	17.900

ANEXO D-6

RUGOSIDAD RELATIVA PARA DISTINTOS MATERIALES DE TUBERÍAS.

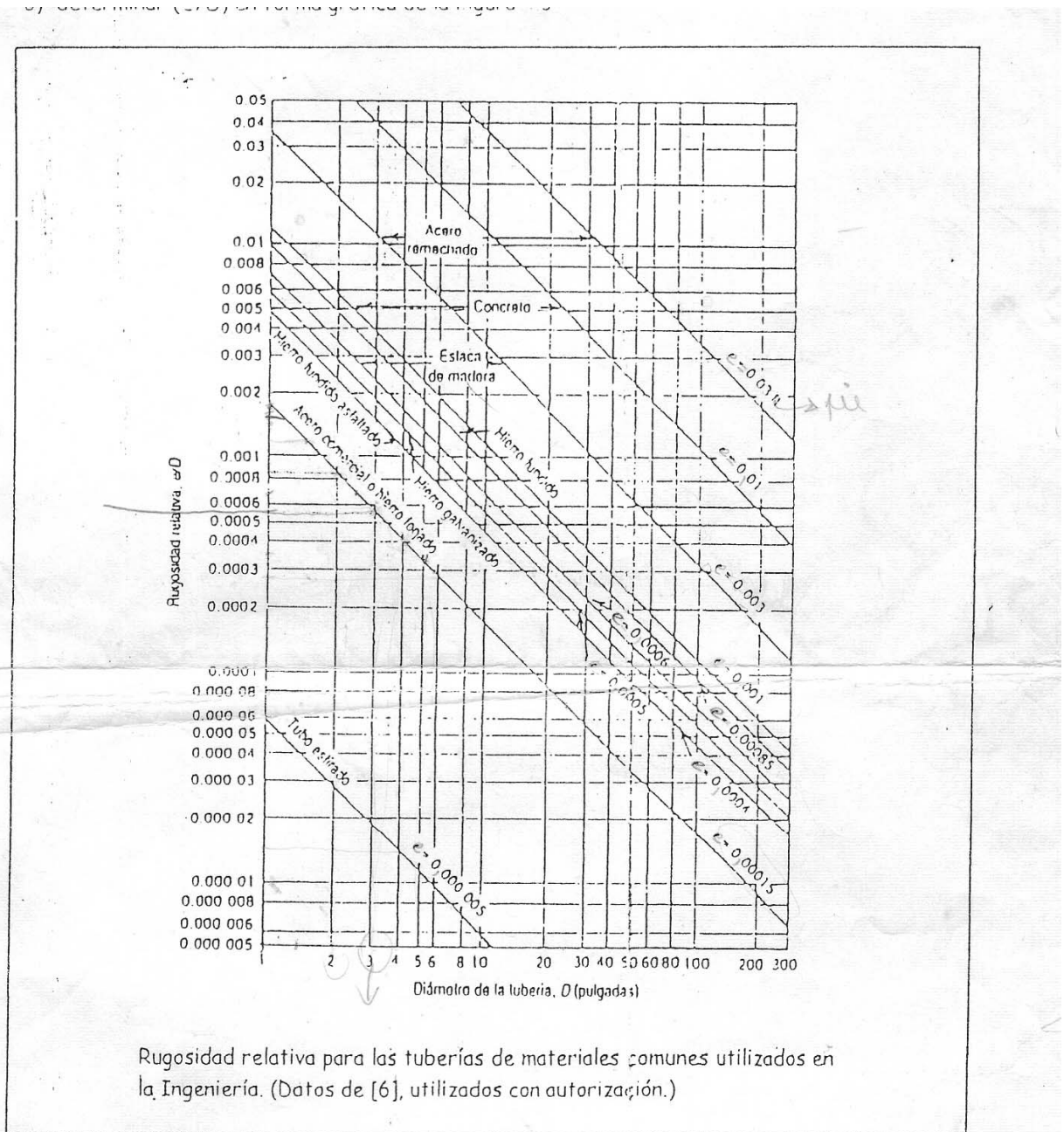
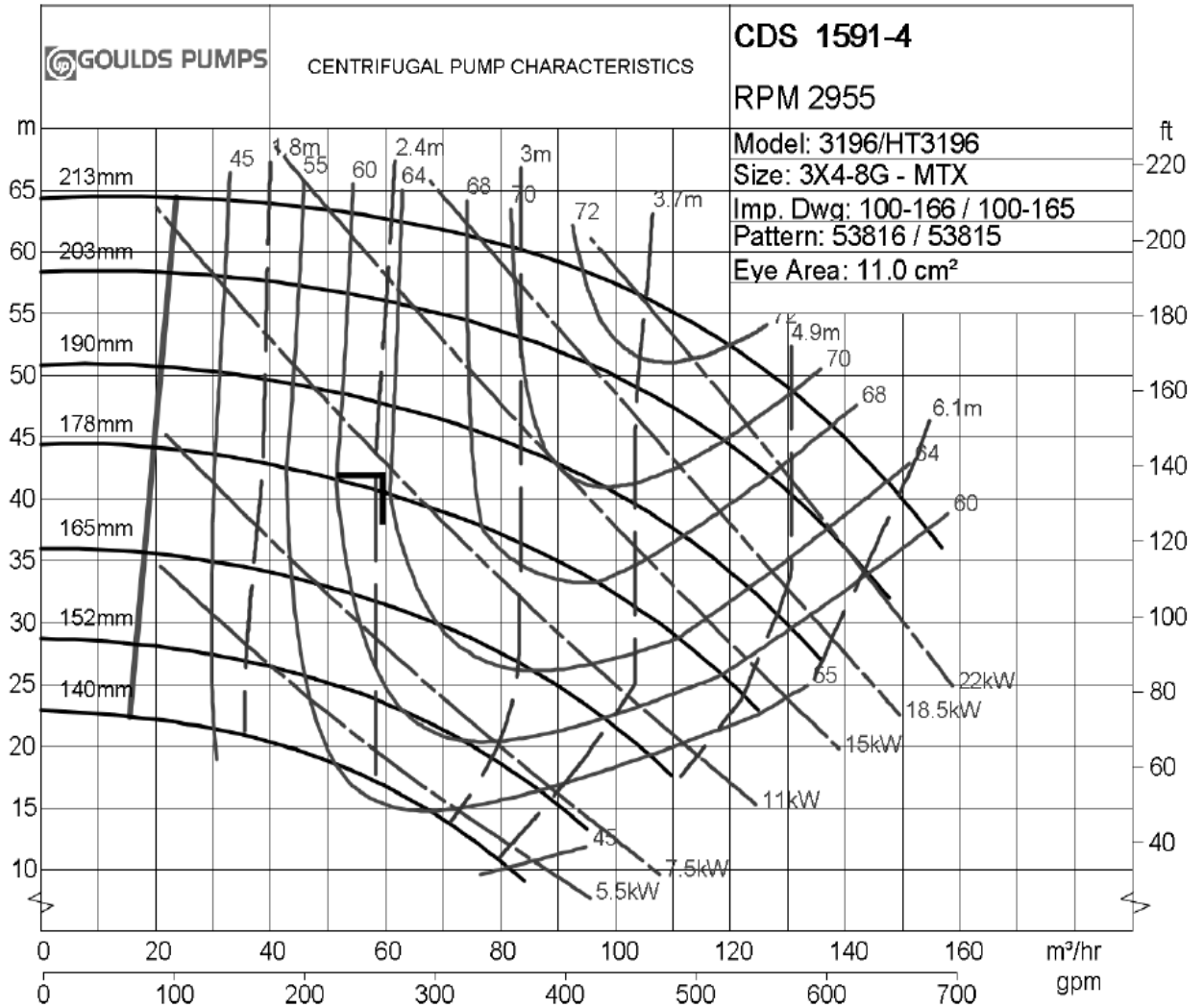


Figura 4.3

ANEXO D-7

CURVA BOMBA CENTRÍFUGA PARA AGUA.



ANEXO D-8

CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN Y DISEÑO DEL EQUIPO DE FILTRACIÓN.

Table 15-17 Criteria for the selection and preliminary design of selected filtration equipment¹

Filtration equipment, class and type	Typical equipment dimensions <i>L</i> , m	<i>D</i> , or <i>W</i> , m	Area, m ²	Press. drop, kPa	Flow rate, m ³ /s ²	Solids, wt% in cake	Equipment advantages	Equipment limitations
Strainer	2-5	0.5-1.5	1-7.5		<i>L</i> ₁	—		
Screens (vibratory)	<20	<50	<3 × 10 ⁵	0.5-2	<i>G</i> ₁	—	Low capital cost, low power reqn [†] , easy discharge	High maintenance, particle size limitations
Bag filters	1	1	<50	10-100	<i>L</i> ₂ , <i>G</i> ₁	—	High capacities, good cake dryness, easy discharge	Large space reqn [†] , nonwashability, high capital cost
Cartridge	1	1	<50	10-100	<i>L</i> ₂ , <i>G</i> ₁	—	Good filtrate clarity and cake dryness, low capital cost	Poor washability, high labor costs, low capacity
Cake filtration								
Rotary drum (vac.) Single compant	1.5-4	0.6-2	0.5-15	10-100	<i>L</i> ₁	60-80	High capacities, good washability, low labor cost	High capital and labor costs, high power reqn [†] , poor filtrate clarity
Rotary drum (press.) Single compant	1.5-4	0.6-2	0.5-15	50-300	<i>L</i> ₁	50-70	High capacity, low labor cost, handles toxic materials	High capital and labor costs, high power reqn [†] , poor filtrate clarity
Rotary disk	1-4	2-6	10-600	10-100	<i>L</i> ₁	40-60	High capacity, low labor cost, good washability, thick cakes	Poor filtrate clarity, poor cake dryness, limited washability
Table	2-8	2-8	1-60	<100	<i>L</i> ₁	50-70	High capacity, low labor cost, good washability, thick cakes	Low cake comp., poor discharge, poor filtrate clarity, large space requirement
Tilting pan	6-25	6-25	6-200	<100	<i>L</i> ₁	50-70	High capacity, low labor cost, good washability, thick cakes	High capital cost, poor filtrate clarity, large space reqn [†]
Shell and leaf	2-5	0.5-2	0.1-300	10-600	<i>L</i> ₁	50-70	Good filtrate clarity, low capital cost, high cake comp.	High labor costs, high filtrate loss, poor cake depth formation
Plate and frame	0.5-20	0.1-2	1-1000	10-1000	<i>L</i> ₁	60-80	Low capital cost, high cake dryness, high cake comp.	Low capacity, high labor cost
Screw					<i>L</i> ₁	80-90	High cake dryness, high cake comp., low labor cost	High capital cost, poor filtrate clarity
Roll					<i>L</i> ₁	80-95	High cake dryness, high cake comp., low labor cost	High capital cost, poor filtrate clarity
Belt	0.5-15	0.2-3	0.2-100	<100	<i>L</i> ₁	50-70	Med. capacity, low labor cost, thick cake formation	High capital cost, low cake comp., poor filtrate clarity, large space reqn [†]
Deep-bed filtration					<i>L</i> ₂ , <i>G</i> ₂	10-20	High capacities, low capital cost, high filtrate clarity	Poor cake dryness, poor cake discharge, thin cake formation
Sand filter	<4	<12	$\pi D^2/4$	<5	<i>L</i> ₂ , <i>G</i> ₂	10-20	High filtrate clarity	Poor cake dryness, poor cake discharge, thin cake formation
Membrane					<i>L</i> ₁	—	Excellent filtrate clarity, filter very fine particles	High capital, labor and maintenance costs, high space reqn [†]
Ultrafiltration	0.1-1		<80	<1000	<i>L</i> ₁	—		

¹Modified from data presented by G. D. Ulrich, *A Guide to Chemical Engineering Design and Economics*, J. Wiley, New York, 1984, S. M. Walas, *Chemical Process Equipment—Selection and Design*, Butterworth-Heinemann, Newton, MA, 1988, R. J. Wakeman and E. S. Tarleton, *Filtration*, Elsevier Advanced Technology, Oxford, United Kingdom, 1999, D. R. Woods, *Process Design and Engineering Practice*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995, and N. P. Cheremisinoff, *Liquid Filtration*, 2d ed., Butterworth-Heinemann, Newton, MA, 1996.
[†]*L*₁ = liquid flow rate — for <1 wt % solids; $7 \times 10^{-6} A$ to $10^{-3} A$; for >5 wt % solids; $10^{-4} A$ to $3 \times 10^{-3} A$; for fibers or pulps; 0.0014 to 0.0154. *L*₂ = liquid flow rate — 0.0014. *G*₁ = gas flow rate — 0.0054 to 0.54. *G*₂ = gas flow rate — 0.1A. (*A* is area in m².)

ANEXO D-9

DIMENSIONES TUBERÍA HDPE-Duratec PE 100

es $\sigma_s = 8 \text{ MPa} = 80 \text{ bar}$ (ver tabla anterior), se calcula el espesor de pared de acuerdo a la fórmula anterior:

$$e = \frac{16 \cdot 200}{2 \cdot 80 + 16} = 18,2 \text{ mm}$$

Si observamos la tabla 5.1.1, vemos, en efecto, que para tuberías de HDPE PE 100, diámetro 200 mm, clase de presión PN 16, el espesor de pared mínimo es de 18,2 mm.

5.1 Tubería HDPE PE 100 norma ISO 4427

Tabla 5.1.1: Dimensiones tubería HDPE-Duratec PE 100 (norma ISO 4427)

DIÁMETRO NOMINAL D	DIÁMETRO EQUIVALENTE ¹⁾	RELACIÓN DIMENSIONAL ESTÁNDAR SDR ²⁾															
		SDR 41		SDR 27,6		SDR 21		SDR 17		SDR 13,6		SDR 11		SDR 9			
		PRESIÓN NOMINAL PN ³⁾															
mm	pulgadas	PN 4		PN 6		PN 8		PN 10		PN 12,5		PN 16		PN 20			
		Esesor mínimo	Peso medio	Esesor mínimo	Peso medio	Esesor mínimo	Peso medio	Esesor mínimo	Peso medio	Esesor mínimo	Peso medio	Esesor mínimo	Peso medio	Esesor mínimo	Peso medio		
mm	Kg/m	mm	Kg/m	mm	Kg/m	mm	Kg/m	mm	Kg/m	mm	Kg/m	mm	Kg/m	mm	Kg/m		
16	3/8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,3	0,10	
20	1/2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,3	0,14	
25	3/4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,3	0,17	-	2,8	0,20	
32	1	-	-	-	-	-	-	2,3 ⁴⁾	0,23	2,4	0,24	3,0	0,28	3,6	0,33	-	
40	1 1/4	-	-	-	-	2,3 ⁴⁾	0,29	2,4	0,30	3,0	0,36	3,7	0,44	4,5	0,52	-	
50	1 1/2	-	-	2,3 ⁴⁾	0,37	2,4	0,38	3,0	0,46	3,7	0,56	4,6	0,68	5,6	0,81	-	
63	2	-	-	2,3	0,47	3,0	0,59	3,8	0,73	4,7	0,89	5,8	1,07	7,1	1,28	-	
75	2 1/2	-	-	2,8	0,66	3,6	0,84	4,5	1,03	5,6	1,26	6,8	1,51	8,4	1,81	-	
90	3	2,3	0,68	3,3	0,94	4,3	1,20	5,4	1,49	6,7	1,82	8,2	2,18	10,1	2,61	-	
110	4	2,7	0,96	4,0	1,38	5,3	1,80	6,6	2,21	8,1	2,68	10,0	3,23	12,3	3,88	-	
125	5	3,1	1,25	4,6	1,80	6,0	2,32	7,4	2,83	9,2	3,45	11,4	4,20	14,0	5,01	-	
140	5 1/2	3,5	1,57	5,1	2,24	6,7	2,91	8,3	3,55	10,3	4,33	12,7	5,24	15,7	6,30	-	
160	6	4,0	2,03	5,8	2,91	7,7	3,81	9,5	4,65	11,8	5,66	14,6	6,86	17,9	8,35	-	
180	6	4,4	2,52	6,6	3,72	8,6	4,78	10,7	5,89	13,3	7,18	16,4	8,83	20,1	10,57	-	
200	8	4,9	3,12	7,3	4,57	9,6	5,94	11,9	7,25	14,7	8,84	18,2	10,90	22,4	13,07	-	
225	8	5,5	3,95	8,2	5,79	10,8	7,53	13,4	9,21	16,6	11,43	20,5	13,80	25,2	16,55	-	
250	10	6,2	4,93	9,1	7,13	11,9	9,19	14,8	11,30	18,4	14,06	22,7	17,00	27,9	20,36	-	
280	10	6,9	6,15	10,2	8,96	13,4	11,62	16,6	14,46	20,6	17,65	25,4	21,30	31,3	25,59	-	
315	12	7,7	7,71	11,4	11,27	15,0	14,61	18,7	18,32	23,2	22,35	28,6	27,00	35,2	32,38	-	
355	14	8,7	9,83	12,9	14,35	16,9	18,89	21,1	23,30	26,1	28,35	32,2	34,26	39,7	41,16	-	
400	16	9,8	12,44	14,5	18,15	19,1	24,09	23,7	29,49	29,4	35,96	36,3	43,50	44,7	52,22	-	
450	18	11,0	15,72	16,3	23,41	21,5	30,46	26,7	37,38	33,1	45,58	40,9	55,13	50,3	66,10	-	
500	20	12,3	19,52	18,1	28,92	23,9	37,64	29,7	46,19	36,8	56,28	45,4	68,01	55,8	81,49	-	
560	22	13,7	24,34	20,3	36,29	26,7	47,14	33,2	57,84	41,2	70,59	50,8	85,25	-	-	-	
630	24	15,4	30,82	22,8	45,87	30,0	59,55	37,4	73,27	46,2	89,08	57,2	108,01	-	-	-	
710	28	17,4	39,94	25,7	58,30	33,9	75,86	42,1	93,03	52,2	113,41	-	-	-	-	-	
800	32	19,6	50,78	29,0	74,06	38,1	96,15	47,4	117,96	58,8	143,93	-	-	-	-	-	
900	36	22,0	64,02	32,6	93,77	42,9	121,73	53,3	149,26	-	-	-	-	-	-	-	
1000	40	24,5	79,23	36,2	115,68	47,7	150,44	59,3	184,51	-	-	-	-	-	-	-	
1200	48	29,4	114,12	43,4	166,32	57,2	216,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1400	54	34,3	155,30	50,6	226,23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1600	64	39,2	202,81	57,9	295,58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

1) Diámetro nominal equivalente en pulgadas, como referencia con la norma ASME B36.10.
 2) La relación dimensional estándar SDR corresponde al cociente entre el diámetro externo y el espesor de pared de la tubería. Es adimensional.
 3) La presión nominal PN corresponde a la máxima presión de operación admisible de la tubería a 20°C, en bar.
 4) Valores no cubiertos por la norma ISO 4427. En base a nuestra experiencia, recomendamos un espesor mínimo de 2,3 mm para estas medidas.

Esta tabla se basa en las normas ISO 4427 e ISO 4065.
 Los pesos están calculados en base a valores medios de diámetro y espesor, según tolerancias especificadas en la norma ISO 11922-1.

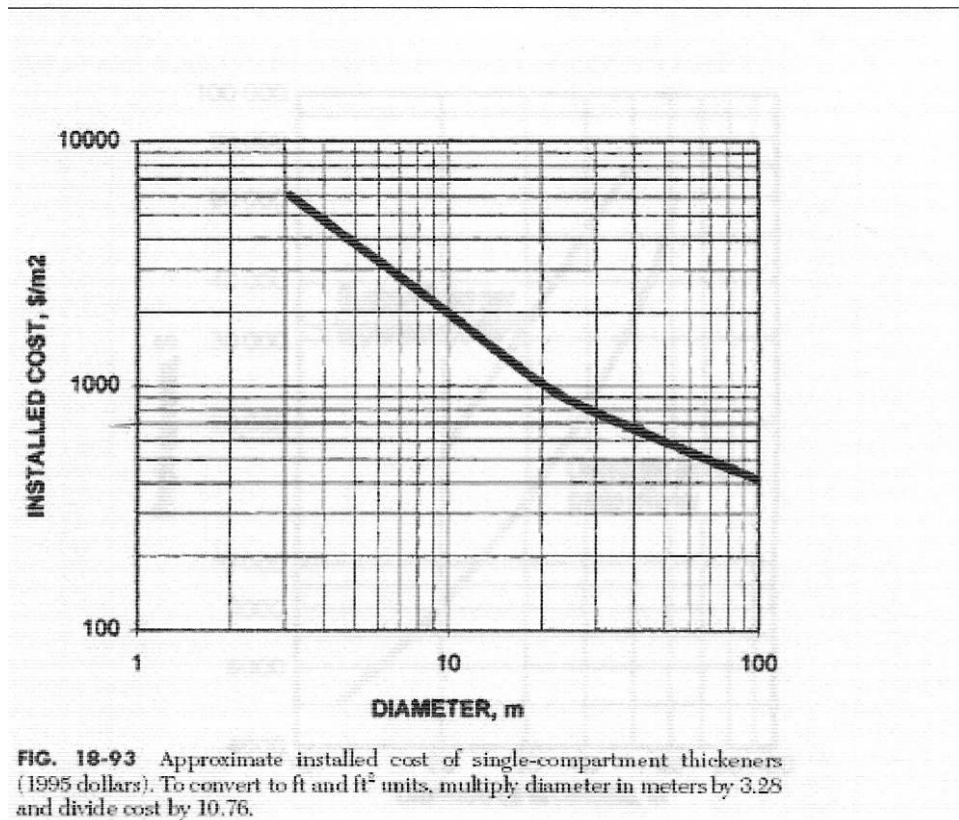
Las cifras coloreadas en azul indican los diámetros (con sus respectivas presiones nominales) que actualmente puede fabricar Duratec.

Tubería suministrada en rollos o tiras.

ANEXO E

ANEXO: E-1

COSTO INSTALADO DE UN ESPESADOR.



ANEXO: E-2
FACTORES DE INDEXAMIENTO DE EQUIPOS COMERCIALES.

TABLE 1: COMMERCIAL EQUIPMENT INDEX FACTORS

2007 COST = 100

Year	Average
2007	100
2006	106
2005	110
2004	117
2003	121
2002	123
2001	124
2000	125
1999	127
1998	127
1997	128
1996	131
1995	132
1994	137
1993	141
1992	144
1991	146
1990	149
1989	153
1988	160
1987	167
1986	170
1985	172
1984	175
1983	180
1982	184
1981	192
1980	211
1979	229
1978	251
1977	269
1976	283
1975	300
1974	331
1973	381
1972	395
1971	407
1970	429
1969	455

TABLE 2: INDUSTRIAL MACHINERY AND EQUIPMENT INDEX FACTORS

2007 COST = 100

Year	Average
2007	100
2006	103
2005	105
2004	110
2003	113
2002	114
2001	114
2000	114
1999	115
1998	116
1997	118
1996	119
1995	122
1994	125
1993	128
1992	130
1991	132
1990	136
1989	140
1988	146
1987	153
1986	155
1985	158
1984	162
1983	166
1982	169
1981	178
1980	196
1979	219
1978	241
1977	262
1976	281
1975	298
1974	347
1973	408
1972	425
1971	436
1970	455
1969	480

ANEXO: E-3

COTIZACIONES DE EQUIPOS DE BOMBEO.

PROFORMA INVOICE

Customer : Karen Vargas
Proposal No: 3 PRUEBA

Main Offer

ITEM NO	QTY	MODEL	SIZE	CONSTRUCTION	DRIVER RATING/FRAME	RPM	UNIT TOTAL	GRAND TOTAL
Bomba Pulpa	1	SRL	5x5x14 Frame 2	Natural Rubber Liner	40.0 hp/324T	1500	12,945	12,945
Bomba de Agua	1	3196	3x4-8G MTX	Ductile iron	20.0 hp/256T	3000	4,834	4,834
TOTAL 2 units (Main offer) in USD								17,779

◀ Bomba de Pulpa:



Karen Vargas

Proposal No: 3 PRUEBA

Item No: Bomba Pulpa

Santiago Sales
ITT Goulds Pumps - Chile
Sales Office
Camino de la Colina #
1448
Huechuraba - Santiago
CHILE

January 30, 2008

Attn: Karen Vargas

MODEL:SRL Frame 2 SIZE:5x5x14 QTY: 1

Operating conditions

SERVICE

LIQUID Water Temp. 25.0 deg C, SP.GR 1.000, Viscosity 1.000 cp

CAPACITY Rated 100.00 m³/hr

HEAD 30.00 (m)

Performance at 1286 RPM

PUBLISHED EFFY 60.0% (CDS)

RATED EFFY 60.0%

RATED POWER 13.57 kW (Run out 23.96 kW) **

NPSHR N/A

DISCH PRESSURE(R) 2.94 bar g (3.22 bar g @ Shut off)

PERF. CURVE E-10818-0 (Rotation CW viewed from coupling end)

SHUT OFF HEAD 32.87 m

MIN. FLOW Continuous Stable: 54.39 m³/hr Hydraulic: 54.39 m³/hr Thermal: N/A

PRICE in USD	
Pump Unit	Incl
Driver	Incl
Boxing	
Testing	Incl
Freight	
Accessories	
Total 1 Unit	12,945

** Power shown is at the pump shaft, add additional power of 0.96 kW to account for drive belt losses

Materials

CONSTRUCTION Natural Rubber Liner

CASING Cast Iron with Natural Rubber Liner (max.casing pres. @ rated temp. 5.17 bar g)

ST.BOX COVER Cast iron

IMPELLER Natural Rubber - Open (356 mm rated, max=356 mm)

SHAFT MATERIAL SAE 1045

SHAFT SLEEVE XH-800

LUBRICATION Flood oil

GLAND Cast Iron Split

BEARINGS TORR 22212-W33-F3 (Inboard) TORR 22312-W33-F3 (Outboard)

DRIVER GUARD Steel

V-BELT DRIVE Wood' s single speed

BASEPLATE Overhead base

Sealing Method

PACKING Teflon dipped acrylic

Flanges

Bolt circle compatible with 125# FF flanges

Liquid end features

Discharge Position 90°

St.box-Seal chamber features

High dilution

Proposal No: 3 PRUEBA Item No: Bomba Pulpa MODEL: SRL Frame 2 5x5x14

Testing

Non witnessed casing hydrostatic-test

Baseplate Features

Drilled Base

Painting

Goulds Blue standard painting

Driver : Electric motor Manufacturer : Pump mfg's Choice

FURNISHED BY	Pump mfg	MOUNTED BY	Pump mfg
RATING	40.0 hp (29.8 KW)	ENCLOSURE	Severe Duty/Mill and Chemical - Epact Efficient
PHASE/FREQ/VOLTS	3/50 Hz/380	SPEED	1500 RPM
INSULATION/SF	F/1.00	FRAME	324T

Weights

TOTAL NET UNIT WEIGHT 689 kg

Program Version 1.24.0.1

Our offer does not include specific review and incorporation of any Statutory or Regulatory Requirements and the offer is limited to the requirements of the design specifications. Should any Statutory or Regulatory requirements need to be reviewed and incorporated then the Customer is responsible to identify those and provide copies for review and revision of our offer.

Our quotation is offered in accordance with our conditions of Sale.

Are you aware of PumpSmart Process Systems?

PumpSmart is a system that utilizes a standard process pump in conjunction with ITT 's unique and patented PumpSmart Control System and Software. The software, which resides on the controller microprocessor chip, allows the pump to monitor and react to any system condition.

PumpSmart

- * Eliminates control valves, flow meters, and recirculation lines.
- * Significantly reduces energy costs.
- * Significantly increases MTBF.

Please contact your local Goulds Pumps representative for details and a demonstration CD-ROM. You may also contact us at www.gouldspumps.com or e-mail pumpsmart@fluids.itind.com.

◀ **Bomba de agua:**



Karen Vargas

Proposal No: 3 PRUEBA

Item No: Bomba de Agua

Santiago Sales
 ITT Goulds Pumps - Chile
 Sales Office
 Camino de la Colina #
 1448
 Huechuraba - Santiago
 CHILE

January 30, 2008

Attn: Karen Vargas

MODEL:3196 MTX SIZE:3x4-8G QTY: 1

Operating conditions

SERVICE Bomba de agua
 LIQUID Water Temp. 20.0 deg C, SP.GR 1.000, Viscosity 1.000 cp
 CAPACITY Rated 60.00 m³/hr
 HEAD 40.00 (m)
Performance at 2955 RPM
 PUBLISHED EFFY 64.0% (CDS)
 RATED EFFY 63.5%
 RATED POWER 10.29 kW (Run out 14.87 kW)
 NPSHR 2.43 m
 DISCH PRESSURE(R) 4.13 bar g (4.50 bar g @ Shut off)
 PERF. CURVE 1591-4 (Rotation CW viewed from coupling end)
 SHUT OFF HEAD 45.94 m
 MIN. FLOW Continuous Stable: 20.07 m³/hr Hydraulic: 20.07 m³/hr Thermal: N/A

PRICE in USD	
Pump Unit	Incl
Driver	Incl
Boxing	
Testing	
Freight	
Accessories	
Total 1 Unit	4,834

Materials

CONSTRUCTION Ductile iron
 CASING Ductile iron (max.casing.pres. @ rated temp. 17.24 bar g)
 ST.BOX COVER Ductile iron
 IMPELLER Ductile iron - Open (181 mm rated, max=213 mm, min=140 mm)
 CASING GASKETS Aramid Fiber with EPDM Rubber
 IMPELLER O-RING Teflon
 SHAFT MATERIAL SAE 4140
 SHAFT SLEEVE 316SS
 LUBRICATION Flood oil
 ST.BOX TYPE Standard non cooled
 GLAND 316SS Plain
 BEARINGS 6309 (Inboard) 5309 (Outboard)
 COUPLING Rexnord - Omega Rex Elastomer- ES-4 (standard orange element)-S.F. 1.00
 COUPLING GUARD Carbon steel
 BASEPLATE Cast iron camber top B00058A

Sealing Method

PACKING Non asbestos

Flanges

150# flat face

Liquid end features

Impeller balanced to ISO 1940 G8.3

Frame features

Proposal No: 3 PRUEBA Item No: Bomba de Agua MODEL: 3196 MTX 3x4-8G

Ductile iron frame adapter
Labyrinth oil seals - Inpro VBXX-D

Testing

Non witnessed casing hydrostatic-test

Painting

Goulds Blue standard painting

Warranty

3 Year Standard Warranty (All the components, manufactured by ITT Goulds pumps, in the liquid end and power end are covered).

Driver : Electric motor Manufacturer : Pump mfg`'s Choice

FURNISHED BY	Pump mfg	MOUNTED BY	Pump mfg
RATING	20.0 hp (14.9 KW)	ENCLOSURE	Severe Duty/Mill and Chemical - Epact Efficient
PHASE/FREQ/VOLTS	3/50 Hz/380	SPEED	3000 RPM
INSULATION/SF	F/1.00	FRAME	256T

Weights and Measurements

TOTAL NET UNIT WEIGHT / VOLUME	304 kg / 0.304 m ³
TOTAL GROSS UNIT WEIGHT / GROSS VOLUME	349 kg / 0.558 m ³

Program Version 1.24.0.1

Our offer does not include specific review and incorporation of any Statutory or Regulatory Requirements and the offer is limited to the requirements of the design specifications. Should any Statutory or Regulatory requirements need to be reviewed and incorporated then the Customer is responsible to identify those and provide copies for review and revision of our offer.

Our quotation is offered in accordance with our conditions of Sale.

PUMPSMART FLOW ECONOMY ESTIMATES

FIXED SPEED

4.4

m³/hr/kW

Expected range for typical operation 3.40 to 5.26 m³/hr/kW



PUMPSMART

6.1

m³/hr/kW

Expected range for typical operation 5.14 to 6.69 m³/hr/kW

[Click Here To Learn More!](#)

Estimated Annual Savings 1,650 USD

ANEXO: E-4

COSTO DE EQUIPO DE FILTRACIÓN "CARTRIDGER".

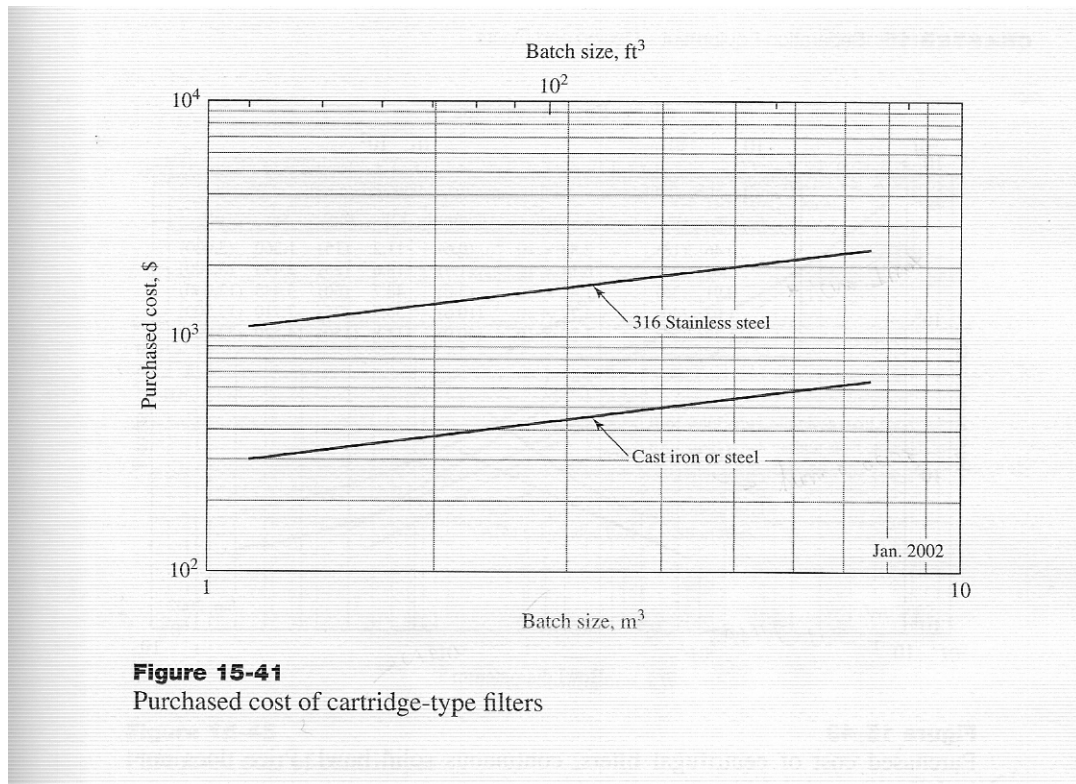


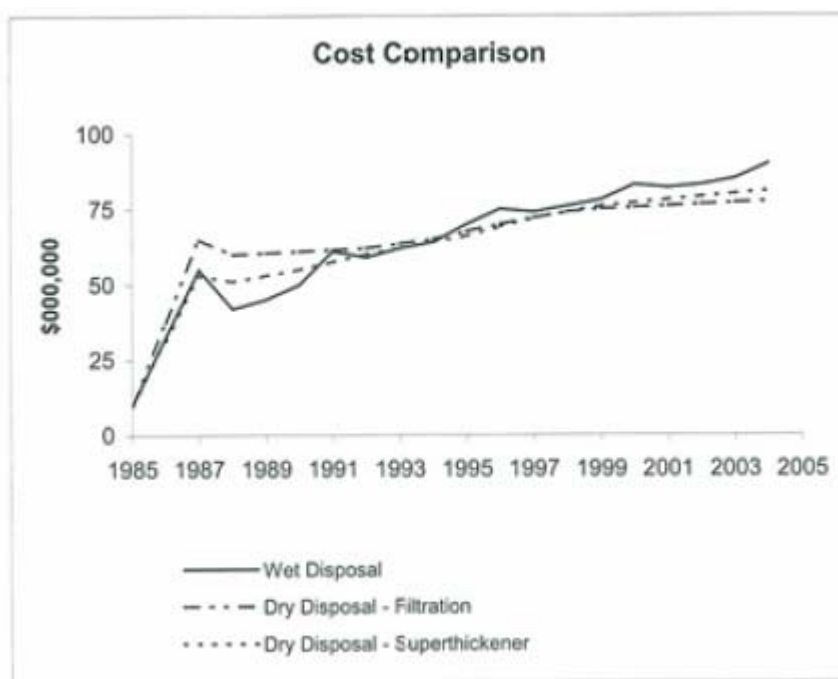
Figure 15-41
Purchased cost of cartridge-type filters

ANEXO E-5

COSTOS Y RIESGOS FINANCIEROS DE LA TECNOLOGÍA DE DISPOSICIÓN DE RELAVES ESPESADOS O EN PASTA

Algunos beneficios y costos económicos son fácilmente cuantificables en términos de dinero (dólares), sin embargo, los beneficios sociales y ambientales pueden ser más difíciles de cuantificar, pero, no obstante, son de suma importancia y demasiado valiosos.

Una comparación de los costos de las distintas estrategias de manejo de relaves se muestra en la Figura 9.1:



Source: Cooling, 1997a

Figura 1. Comparación de costos entre la disposición de relaves húmedos y secos (filtrados y ultra espesados) de mineral de bauxita.

Para evaluar plenamente los beneficios de ésta tecnología, un estudio económico basado en el "costo total del ciclo de vida" es necesario. Los costos de inversión y

operación, el calendario de ejecución de obras y el valor temporal del dinero son necesarios tener presentes y aplicarlos a todo el plan de desarrollo de un proyecto, incluida la clausura.

Por ejemplo, los relaves en pasta incorporados como relleno en minas subterráneas, pueden conducir a ahorros de costos en toda la operación a pesar de los costos adicionales que implica las instalaciones de espesamiento de relaves. Los beneficios no monetarios; como por ejemplo la mejora de la percepción pública; también deben ser evaluados, utilizando para ello medidas de calidad adecuadas.

Los ahorros son posibles en el agua, la energía, la conservación de reactivos, la reducción de las necesidades de embalse, un cierre mucho más rápido y reducciones de las disposiciones financieras. Costos adicionales de inversión y de operación debido a los equipos de espesamiento, como bombas y cañerías, compensan parcialmente estos ahorros.

◀ **Costos de Inversión:**

La depositación de relaves espesados o en pasta puede reducir significativamente los costos de las estructuras de contención, pero este ahorro se compensa a través de gastos en equipos de espesamiento.

Contención de Relaves:

La reducción en los costos de inversión será el resultado de una reducción en la necesidad ingenieril de muros de contención de los relaves depositados, en particular en los primeros años de desarrollo del proyecto.

En la mayor parte de las minas con depósitos de relaves tradicionales, los relaves deben ser contenidos por estructuras de altas especificaciones ingenieriles. Se requiere que estos muros contengan la mezcla bombeada de la planta, que las arenas y lodos decanten para que de esta forma el agua de proceso se separe de ellos. Estas obras por lo general son construidas antes que la producción comience y por consiguiente representan un gasto por encima de los costos de inversión.

Los relaves de alta densidad o espesados pueden ser descargados con forma de cono o bien pueden ser apilados, ellos no necesitan muros de altas especificaciones en comparación con lo requerido por los relaves “convencionales”, ahorros sustanciales desde ese punto de vista pueden ser realizados. La capacidad de usar materiales de una inferior especificación para la construcción del muro de contención provoca una reducción en los costos de implementación.

Costos de Espesamiento, Bombeo y Tuberías:

Los costos adicionales de inversión para operaciones que adoptan la disposición de relaves espesados o en pasta se derivan del equipamiento necesario para el espesado y transporte de los relaves, como por ejemplo el equipo de espesamiento, bombas y tuberías.

El costo del espesador y bombas requeridas para producir y mover el producto puede ir entre cien mil a millones de dólares según el tamaño y aplicaciones.

La implementación de ésta tecnología por lo general requerirá menos tuberías que el sistema tradicional. Sin embargo, transportar mezclas de alta densidad y pastas, que por lo general implica presiones de tuberías más altas, conlleva a tubos nominales y accesorios mucho más caros.

◀ **Costos Operacionales:**

Los costos adicionales de operación para el espesamiento de relaves son principalmente los del mantenimiento de espesadores, ciclones y filtros, tuberías y bombas. Cuando los filtros son usados, los costos de transporte del material seco puede ser un factor importante de analizar.

Conservación del Agua:

En áreas donde el agua es cara o bien escasa, los ahorros de agua son mucho más importantes que los costos que implica el espesamiento de relaves. Esto es en

particular relevante si las operaciones son interrumpidas debido a una escasez de agua; existen minas ubicadas en áreas áridas o bien en áreas en donde existe un acceso restringido al agua, muchas compañías han debido pagar por el agua o bien bombearla desde distancias extremas, incurriendo en grandes gastos de inversión y operación.

Conservación de Reactivos:

En algunas operaciones mineras, las compañías no están dispuestas a exponer o bien perder reactivos al medio ambiente ya sea por motivos económicos como medioambientales. Ejemplo de lo anterior es el empleo de cianuro en la industria del oro y de xantatos en la flotación de metales. Tanto el cianuro como el xantato son perdidos debido a que se estropean al ser expuestos a la luz solar, siendo ambos casos de pérdida, de gran interés desde una perspectiva ambiental. Ahorros sustanciales pueden ser alcanzados en la industria del aluminio cuando la soda cáustica es recuperada con el agua de proceso en el espesador.

La operación de espesamiento de relaves permite recircular agua de proceso dentro de la planta, sin ser esta agua depositada en los almacenamientos de relaves, de esta forma se reducen bastante las pérdidas de reactivos al ambiente.

Reducción de Costos de Relleno:

En minas subterráneas, el uso de pastas de relaves como relleno subterráneo proporciona un camino económico y ambientalmente beneficioso para tratar un buen porcentaje de sus relaves. El relave es mezclado con un agregado que normalmente es cemento, formándose de esta forma una mezcla estable con un límite de resistencia inherente a la tracción.

La pasta de relave en la actualidad es utilizada como relleno subterráneo en un número creciente de minas alrededor del mundo, debido a que sus ventajas ya han sido probadas.

◀ **Costos de Cierre:**

La rehabilitación de depósitos de relaves es con frecuencia la más difícil, debido al tiempo que consume y los caros componentes que participan en el cierre de un sitio minero. Los relaves son a menudo en una compañía minera la responsabilidad más grande durante todo el período de cierre y tienen el potencial para proporcionar los ahorros de costos más grandes.

La Tecnología de disposición de relaves espesados o en pasta por lo general proveerá de una superficie estable y consolidada que puede ser recuperada antes y más fácilmente que los depósitos convencionales de relaves. Por consiguiente, la recuperación y el cierre son por lo general menos costosos.

Disminución de Provisiones Financieras y Costos de Seguros:

Los depósitos de relaves convencionales a menudo se escapan del muro que los contiene, permitiendo así el transporte de contaminantes hacia la tierra y aguas superficiales y subterráneas. Tales escapes pueden continuar a lo largo de muchas décadas, por lo tanto requieren la asignación de provisiones financieras para cubrir dichas contingencias, existiendo a su vez también muchos seguros asociados para compensar reclamaciones futuras por posibles daños.

Por su parte, los relaves espesados al contener menos cantidad de agua y consolidarse rápidamente, no tienen la misma tendencia de escaparse y pueden ser rehabilitados tempranamente, mitigando la necesidad de provisiones financieras y de seguros a largo plazo.

◀ **Beneficios Sociales y Ambientales:**

Los beneficios cualitativos pueden ser mucho más difíciles de cuantificar, sin embargo son de muy alto valor. Tales beneficios son encontrados en las áreas en donde se han reducido considerablemente los riesgos y fallas de los relaves, la

liberación de gases de invernadero, riesgo de control y regulación, responsabilidades futuras y en áreas en donde han ocurrido mejoras en seguridad y percepción pública.

Reducción de los Riesgos y Fallas en los Relaves:

La mayor parte de la fallas en la contención de los relaves ocurren por la violación de la estructura de contención provocando la liberación; que por lo general son tóxicos; de líquidos y/o relaves licuefactibles. Las fallas en la fundación del muro son también posibles, pero nuevamente es mucho más probable que ocurra en depósitos de relaves "mojados".

Los depósitos de relaves espesados o en pasta por lo general alcanzan rápidamente una alta densidad y no contienen un exceso de agua, exceso necesario para generar un charco de aguas claras decantadas. Es por lo anterior que se reducen considerablemente los riesgos de fracasos de estos depósitos.

En base a los precedentes anteriores se concluye que a pesar de que exista un buen diseño de ingeniería y una buena construcción y posterior monitoreo, hay una probabilidad finita de que exista un fracaso en los depósitos tradicionales de relaves.

Los depósitos de relaves espesados o en pasta son menos móviles y es por ello que en caso de una liberación imprevista de relave, las consecuencias pueden ser mucho menos severas.

Percepciones Públicas y “La Licencia para Operar”:

Es fácil de entender como los relaves húmedos y no consolidados, contaminados muchas veces con reactivo tóxicos de proceso inducirán a una respuesta temerosa o ultrajada por parte de la comunidad. O bien, es igualmente de fácil ver como los relaves espesados de alta densidad que rápidamente se consolidan y no poseen agua libre circulante, podrían considerablemente mejorar la percepción de la comunidad del riesgo planteado por los relaves.

Tales asuntos de percepción a veces son caracterizados como " licencia pública para operar". Donde los miembros de la comunidad pueden ver y entender fácilmente que la forma de almacenaje de los relaves implica un bajo riesgo ambiental, lo que implica que la aceptación y la obtención de la licencia pública para funcionar probablemente serán más rápidas y cada vez más seguras.

Las percepciones son una de las herramientas más poderosas para el funcionamiento de la licencia pública. Los relaves espesados o en pasta pueden ser un contribuidor significativo para mejorar las percepciones de la dificultosa manera de manejar y procesar los minerales acorde a las consideraciones ambientales.