

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

**Profesor Patrocinante:**

Dr. Fernando Betancourt C.

**Ingeniero Supervisor:**

Jorge Sánchez E.

**NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA EL USO Y DISPOSICIÓN DE RELAVES MINEROS  
APLICADO A CODELCO, DIVISIÓN EL TENIENTE**

**MATÍAS CASTRO ARIAS**

Informe de Memoria de Título  
Para Optar al Título de  
Ingeniero Civil Metalúrgico

Julio 2018



## RESUMEN.

La presente tesis comprende la evaluación de 3 medidas de solución que se le da al embalse de relaves Carén que posee DET ante los problemas de llenado y contaminación que presenta. Las dos primeras se refieren a 2 evaluaciones económicas de cambios tecnológicos para el método de disposición que posee actualmente el pasivo ambiental, a saber: Disponerlo a la forma de pasta o a la forma de relave filtrado. La tercera solución consiste en utilizar al relave para la fabricación de adoquines en reemplazo de las arcillas o el cemento, para ello se realizó una revisión bibliográfica técnica de la química de geopolimerización para la fabricación de materiales de construcción en base a relaves (adoquines) y el estado actual en que se encuentra el método, además de un estudio de mercado de utilizar los relaves de DET para fabricar adoquines.

Para los cambios de tecnología se obtuvo que la alternativa más económica resultó en instalar una planta de relaves espesados a pasta con una capacidad de tratamiento de 23 ktpd junto a un sistema de impulsión y disposición del contaminante, un canal de evacuación de aguas claras y un sistema de suministro de energía. El CAPEX, OPEX, CPTD y VU fue de MUS\$ 76,33, MUS\$ 10,00, MUS\$ 1,83 y 67 años respectivamente, donde el CAPEX resulta ser 1,89 veces menor que peraltar el muro para la séptima etapa y se extiende la vida útil del embalse en 11,2 años.

Del estudio técnico para la fabricación de adoquines a partir de las técnicas de geopolimerización en base a relaves se encontró que si es factible manufacturarlos, es más, presentan propiedades químicas y mecánicas superiores a las que se obtendrían con materiales y técnicas convencionales. En cuanto al estudio de mercado se obtuvo que con la actual producción de relaves de DET se cubriría más del 100 % de la demanda por arcillas y cemento en Chile (3,49 y 5,1 veces respectivamente), y sólo con 123 y 83 faenas con el mismo nivel de producción de DET se alcanzaría a cubrir el 100 % de la demanda mundial por arcillas y cemento para la fabricación de ladrillos, desalojando a ambas industrias del planeta.

**ABSTRACT.**

This thesis includes the evaluation of 3 measures of solution that is given to the tailings dam "Carén" that has DET in face of the problems of filling and contamination that it presents. The first two refer to 2 economic evaluations of technological changes for the disposition method that currently has the environmental liability, namely: To dispose it to the paste form or to the filtered tail form. The third solution consists of using the tailings for the manufacture of paving stones in replacement of clays or cement, for which a technical bibliographic review of geopolymerization chemistry for the manufacture of construction materials based on tailings (paving stones) and the current state of the method, as well as a market study to use the tailings from DET to manufacture paving stones.

For the changes in technology, it was found that the most economical alternative was to install a thickened pulp slurry plant with a treatment capacity of 23 ktpd, together with a system for driving and disposing of the pollutant, a clear water evacuation channel and a power supply system to treat 23 ktpd. The CAPEX, OPEX, CPTD and VU was million US \$ 76,33, million US \$ 10,00, million US \$ 1,83 and 67 years respectively, where the CAPEX turns out to be 1,89 times less than the wall for the seventh stage and extends the shelf life of the reservoir by 11,2 years.

The technical study for the manufacture of paving stones based on tailings-based geopolymerization techniques found that if it is feasible to manufacture them, they have more chemical and mechanical properties than those obtained with conventional materials and techniques. As for the market study, it was obtained that with the current production of tailings from DET, more than 100% of the demand for clays and cement in Chile would be covered (3,49 and 5,1 times respectively), and only with 123 and 83 work cycles with the same level of production of DET would reach to cover 100% of the global demand for clays and cement for the manufacture of bricks, dislodging both industries from the planet.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	MOTIVACIÓN DE LA TESIS.....	1
1.2	OBJETIVO GENERAL.....	4
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
2	ANTECEDENTES DE LA EMPRESA.....	6
2.1	GEOGRAFÍA DE DET.....	6
2.2	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO.....	6
2.3	DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE ESPESAJE.....	9
2.4	DESCRIPCIÓN DEL EMBALSE DE RELAVES CARÉN.....	12
3	ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	16
3.1	RELAVES.....	16
3.1.1	TIPOS DE DEPÓSITOS DE RELAVES.....	16
3.2	ESPESAMIENTO.....	30
3.2.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	30
3.2.2	EQUIPOS DE ESPESAMIENTO.....	32
3.3	FILTRACIÓN.....	34
3.3.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	34
3.3.2	EQUIPOS DE FILTRACIÓN.....	35
3.4	GEOPOLÍMEROS.....	37
3.4.1	GENERALIDADES DE LOS GEOPOLÍMEROS.....	37
3.4.2	FABRICACIÓN DE ADOQUINES PARA LA CONSTRUCCIÓN MEDIANTE GEOPOLIMERIZACIÓN.....	42
3.4.3	ESTADO ACTUAL DEL USO DE RELAVES PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN MEDIANTE GEOPOLIMERIZACIÓN.....	43
4	METODOLOGÍA.....	48
4.1	PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DEL BALANCE DE MASA EN LA PLANTA DE ESPESAJE DE DET.....	48
4.2	PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE INSTALAR UNA PLANTA DE RELAVES EN PASTA Y UNA PLANTA DE RELAVES FILTRADOS EN DET.....	52

4.3	PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DE MERCADO DE FABRICAR ADOQUINES EN BASE A RELAVES. ....	63
5	RESULTADOS Y DISCUSIONES. ....	64
5.1	RESULTADOS DEL BALANCE DE MASA EN LA PLANTA DE ESPESAJE DE DET. ....	64
5.2	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE CONTINUAR CON EL PERALTE DEL MURO, INSTALAR UNA PLANTA DE RELAVES EN PASTA E INSTALAR UNA PLANTA DE RELAVES FILTRADOS EN DET.....	66
5.2.1	CONSIDERACIONES PARA INSTALAR UNA PLANTA DE RELAVES EN PASTA.....	66
5.2.2	CONSIDERACIONES PARA INSTALAR UNA PLANTA DE RELAVES FILTRADOS.....	72
5.2.3	INDICADORES ECONÓMICOS. ....	78
5.2.4	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	80
5.3	RESULTADOS DE LA FACTIBILIDAD DE MERCADO DE FABRICAR ADOQUINES EN BASE A RELAVES DE COBRE DE DET. ....	86
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....	94
6.1	CONCLUSIONES DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE INSTALAR UNA PLANTA DE RELAVES EN PASTA Y UNA PLANTA DE RELAVES FILTRADOS EN DET. ....	94
6.2	CONCLUSIONES DE LA EVALUACIÓN DE MERCADO DE UTILIZAR LOS RELAVES DE DET PARA LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES PARA LA INDUSTRIA DE LA COSNTRUCCIÓN.....	97
7	BIBLIOGRAFÍA.....	99
8	ANEXOS.....	104
8.1	ANEXO A: OTROS MÉTODOS DE DISPOSICIÓN DE RELAVES. ....	104
8.2	ANEXO B: DESCRIPCIÓN DE TIPOS DE EQUIPOS DE ESPESAMIENTO. ....	108
8.3	ANEXO C: DESCRIPCIÓN DE TIPOS DE EQUIPOS DE FILTRACIÓN. ....	110
8.4	ANEXO D: ÍNDICES DE COSTOS EMPLEADOS PARA EL ESCALAMIENTO Y REACTUALIZACIÓN DE COSTOS.....	113
8.5	ANEXO E: DETALLE DE COSTOS DE REFERENCIA PARA EL CÁLCULO DE LOS INDICADORES ECONÓMICOS A MONEDA DEL 2018 A PARTIR DE ESCALAMIENTOS Y REACTUALIZACIONES DE PRECIOS PARA INSTALAR UNA PLANTA DE RELAVES EN PASTA Y UNA PLANTA DE RELAVES FILTRADOS. ....	116
8.6	ANEXO F: DETALLE DE CÁLCULO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAPITAL FIJO DE UNA INVERSIÓN DE ADQUISICIÓN.....	117

8.7 ANEXO G: CONSIDERACIONES PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS INDICADORES ECONÓMICOS DE CONTINUAR CON EL PERALTE DEL MURO DEL EMBALSE CARÉN DESDE LA ETAPA 7 A LA 12.....	118
8.8 ANEXO H: DETALLE DE CÁLCULO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS INDICADORES ECONÓMICOS DE INSTALAR UNA PLANTA DE RELAVES EN PASTA Y UNA PLANTA DE RELAVES FILTRADOS PARA UNA PRODUCCIÓN DE 140 KTPD DE RELAVES.....	121



## ÍNDICE DE FIGURAS.

<b>Figura 2.1</b> Esquema productivo primario de DET (SID, 2011). .....	8
<b>Figura 2.2</b> Diagrama de flujo de la planta de espesaje de DET (SID, 2011). .....	11
<b>Figura 2.3</b> Área de influencia del agua de descarga del embalse Carén (CIREN, 2003). .....	12
<b>Figura 3.1</b> Tranque de relaves empleando el método aguas arriba para la construcción del muro (Álvarez, 2017).....	19
<b>Figura 3.2</b> Tranque de relaves empleando el método aguas abajo para la construcción del muro (Álvarez, 2017).....	20
<b>Figura 3.3</b> Tranque de relaves empleando el método eje central o mixto para la construcción del muro (Álvarez, 2017).....	21
<b>Figura 3.4</b> Esquema de un depósito de relaves espesados (Ramírez, 2007). .....	23
<b>Figura 3.5</b> Depósito de relaves espesados a pasta (Ramírez, 2007). .....	26
<b>Figura 3.6</b> Depósito de relaves filtrados (Ramírez, 2007). .....	28
<b>Figura 3.7</b> Diagrama interior de un espesador (Vásquez, 2014). .....	31
<b>Figura 3.8</b> Vista de un espesador de pasta (Concha, 2014). .....	33
<b>Figura 3.9</b> Filtros de banda en operación (Capone, 2016). .....	37
<b>Figura 3.10</b> Estructura básica de un geopolímero (Días, 2012). .....	38
<b>Figura 3.11</b> Semi-esqueleto de la estructura de un Na-PPS (Barbosa, et al., 2000). .....	39
<b>Figura 3.12</b> Proceso de geopolimerización (Duxon, et al., 2006). .....	40
<b>Figura 4.1</b> Esquema extraído desde PI System de un espesador. ....	48
<b>Figura 5.1</b> Ubicación de la planta de espesaje y la del depósito de relaves espesados a pasta. ....	67
<b>Figura 5.2</b> Esquema del canal de contorno.....	70
<b>Figura 5.3</b> Ubicación de la planta de filtros y la del depósito de relaves filtrados. ....	73
<b>Figura 5.4</b> Esquema del canal de contorno.....	76
<b>Figura 5.8</b> Consumo y producción de cemento entre los años 2006 al 2018 (ASOCEM, 2017). .....	88
<b>Figura 8.1</b> Relave dispuesto con el método dique de anillo en Kalgoorlie Consolidated Gold Mines (Álvarez, 2017).....	105
<b>Figura 8.2</b> Relave dispuesto con el método de almacenamiento en pozo (Álvarez, 2017).....	106
<b>Figura 8.3</b> Relave dispuesto en el río Jaba, Papua Nueva Guinea (Álvarez, 2017). .....	108
<b>Figura 8.4</b> Esquema ilustrativo de los diferentes equipos de espesamiento (Concha, 2014). .....	110



**ÍNDICE DE GRÁFICOS.**

<b>Gráfica 5.1</b> Disminución del CAPEX de instalar una planta de relaves espesados a pasta entre 140 a 93 ktpd de tratamiento del pasivo ambiental en comparación con peraltar el muro para la etapa 7. .....	83
<b>Gráfica 5.2</b> Disminución del CAPEX de instalar una planta de relaves espesados a pasta entre 70 a 23 ktpd de tratamiento del pasivo ambiental en comparación con peraltar el muro para la etapa 7. .....	83
<b>Gráfica 5.3</b> Proyecciones de vida de los distintos métodos de disposición de relaves en función del tonelaje tratado.....	84



## ÍNDICE DE TABLAS.

<b>Tabla 3.1</b> Principales operaciones mineras que producen relaves en pasta en el mundo (Cabrejos, 2011).....	26
<b>Tabla 3.2</b> Principales operaciones mineras que producen relaves filtrados en el mundo (Capone, 2016).....	29
<b>Tabla 5.1</b> Resultados del balance de masa en la planta de espesaje de DET. ....	64
<b>Tabla 5.2</b> Indicadores económicos de las diferentes alternativas de depositación de relaves evaluadas.....	78
<b>Tabla 5.3</b> Indicadores económicos de la alternativa de instalar una planta de relaves en pasta para diferentes niveles de producción de relaves. ....	81
<b>Tabla 5.4</b> Indicadores económicos de la alternativa de instalar una planta de relaves en filtrados para diferentes niveles de producción de relaves. ....	82
<b>Tabla 5.5</b> Mayores consumidores y productores de cemento en el mundo (ASOCEM, 2017). ....	89
<b>Tabla 5.6</b> Indicadores económicos de instalar una planta de fabricación de ladrillos a partir de relaves entre los años 2018 y 2023.....	92
<b>Tabla 5.7</b> Indicadores económicos de instalar una planta de fabricación de ladrillos a partir de relaves entre los años 2024 y 2028.....	92
<b>Tabla 8.1</b> Índice de costos de la revista Chemical Engineering entre los años 2003 al 2011 (The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2012).....	113
<b>Tabla 8.2</b> Índice de costos de la revista Chemical Engineering entre los años 2012 al 2013 (The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2014).....	114
<b>Tabla 8.3</b> Índice de costos de la revista Chemical Engineering entre los años 2014 al 2015 (The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2015).....	114
<b>Tabla 8.4</b> Índice de costos de la revista Chemical Engineering entre los años 2016 al 2017 (The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2017).....	115
<b>Tabla 8.5</b> Detalle de costos a su fecha de referencia para la instalación y operación de una planta de relaves en pasta.....	116
<b>Tabla 8.6</b> Detalle de costos a su fecha de referencia para la instalación y operación de una planta de relaves filtrados.....	116
<b>Tabla 8.7</b> Detalle de cálculo para la determinación del capital fijo total a partir del costo de adquisición de un espesador (Zamosa, 1996).....	117
<b>Tabla 8.8</b> Resultados del costo de inversión del peralte del muro de cada etapa del embalse Carén (GPR, 2014).....	119
<b>Tabla 8.9</b> Costo operacional en que incurre el embalse Carén por año de operación (GPR, 2014). .....	120
<b>Tabla 8.10</b> Detalle de cálculo para la determinación del CAPEX de instalar una planta de relaves en pasta.....	121

**Tabla 8.11** Detalle de cálculo para la determinación del OPEX de una planta de relaves en pasta.  
..... 123

**Tabla 8.12** Detalle de cálculo para la determinación del CAPEX de instalar una planta de relaves  
filtrados. .... 124

**Tabla 8.13** Detalle de cálculo para la determinación del OPEX de una planta de relaves en pasta.  
..... 125



**NOMENCLATURA.**

CE Index: Chemical Engineering Index.

DET: División El Teniente.

gl: Global.

H: Horizontal.

HCT: High Density Thickener.

HD: High Density.

HDPE: High Density Polyethylene.

I+D: Innovación y Desarrollo.

ml: Metro lineal.

Mt: mega toneladas.

Mta: Mega toneladas al año.

MU: Millones de unidades.

MWC: Mine Waste Cement.

NTP: Norma Técnica Peruana.

NTU: Nephelometric Turbidity Unit.

R-2: Espesador recuperador de agua número 2.

R-3: Espesador recuperador de agua número 3.

R-4: Espesador recuperador de agua número 4.

R-5: Espesador recuperador de agua número 5.

R-6: Espesador recuperador de agua número 6.



R-7: Espesador recuperador de agua número 7.

R-9: Espesador recuperador de agua número 9.

V: Vertical.

$V_{\text{Sólido}}$ : Volumen del sólido.

$V_{\text{Total}}$ : Volumen total.

VU: Vida Útil.



## **1 INTRODUCCIÓN.**

### **1.1 MOTIVACIÓN DE LA TESIS.**

División El Teniente a lo largo de sus más de cien años de operación tiene como su principal residuo los relaves mineros. Éstos actualmente se depositan en el embalse Carén de la región Metropolitana (encontrándose actualmente en la séptima etapa de peralte del muro de un total de 12), y dado que el tranque tiene una capacidad limitada, es relevante poder analizar y evaluar nuevas tecnologías para el uso y disposición de relaves mineros aplicados a esta división.

En los últimos años de la minería y en particular en División El Teniente de Codelco, ha aumentado el nivel de preocupación sobre el destino de los relaves y las consecuencias irreversibles de la liberación de contaminantes que de ellos puede surgir. Estos problemas irán en alza en el futuro, debido principalmente a que se deberán tratar mayores tonelajes para mantener los niveles de producción de la empresa, ya que las menas de minerales cada vez poseen menores leyes del metal de interés. En el presente documento se encuentran análisis de diferentes alternativas para la disposición de relaves mineros conformes con la legislación chilena (DS N°248), en particular, se presentan dos evaluaciones económicas con sus respectivos análisis de sensibilidad para instalar una planta de relaves en pasta y una planta de relaves filtrados en DET, junto con un análisis técnico y de mercado de utilizar el material sólido de DET en la fabricación de ladrillos para cumplir con las exigencias de la ley (DS N°80), apuntando a mejorar los resultados ambientales, técnicos y económicos de la empresa, para así estar por sobre lo exigido por la normativa chilena. Además de los análisis de mejoras tecnológicas para la disposición y uso de estos relaves, en la presente tesis

también se encuentra un balance de masa de sólidos y de agua en la planta de espesaje de DET, donde este último tuvo por finalidad determinar el flujo másico de sólidos que procesa esta planta y así dimensionar de forma específica los equipos de espesamiento y filtración en que incurriría la división en caso de que se implementen las tecnologías de relaves en pasta y filtrados.

Adicionalmente, en la última década, debido a la disminución de las leyes de cobre, la extracción de minerales ha debido aumentar para cubrir la demanda del mercado y las expectativas de las empresas mineras, lo que ha producido un gran volumen de relaves en función de cada unidad de mineral extraído, generando un mayor escrutinio de la sociedad civil y los reguladores, además de la preocupación de las faenas mineras, debido a los problemas de contaminación y espacio de almacenamiento en que incurre el relave. Luego, como la industria minera debe afrontar un aumento constante en la producción de residuos, en particular, las colas del proceso de flotación, surge necesario desarrollar nuevas técnicas para su gestión y control, con el fin de reducir su volumen. Es por esto, que se han desarrollado diferentes técnicas de gestión de relaves como el espesamiento a pasta y el filtrado, que reducen considerablemente el volumen de relave dispuesto en los sectores de disposición final de este pasivo ambiental.

Por otra parte, las características físicas y químicas de los relaves varían con el tipo de mineral, sin embargo, los relaves sólidos usualmente tienen algunas mineralizaciones de sulfuros, los que generarían un potencial problema ambiental. Después de la deposición de los minerales sulfurados, éstos podrían oxidarse en presencia de agua de lluvia o el deshielo para producir ácido sulfúrico, el cual podría lixiviar metales presentes en los relaves. Sumado a lo anterior, los productos químicos de la flotación, tales como colectores, modificadores y otros aditivos para el proceso, también pueden presentar un

riesgo ambiental. Este impacto se magnifica en caso de fallas en los métodos de disposición del material en cuestión, lo cual representa la mayoría de los incidentes ambientales relacionados con la minería.

Por otro lado, la industria de la construcción es una de las más grandes a nivel mundial y crece constantemente, lo cual lleva consigo impactos ambientales negativos, debido a que se deben explotar grandes cantidades y variados recursos naturales, sobre todo en el procesamiento para la fabricación de cemento Portland y la fabricación de ladrillos a partir de arcillas, es por estos motivos que se plantea la utilización de pasivos ambientales, en particular, el material sólido de los relaves del embalse Carén haciendo uso de las técnicas de geopolimerización, para reemplazar al cemento y las arcillas en la fabricación de adoquines, los cuales son materiales muy poco amigables con el medio ambiente, sobre todo el cemento Portland, el cual es una gran responsable en el fenómeno del calentamiento global, ya que se emite en su proceso un 5% del total de dióxido de carbono al medio ambiente (Días, 2012). Cabe destacar que este análisis de reemplazar a las arcillas y al cemento por los relaves sólido de DET para la fabricación de adoquines, se analizó bajo el caso de que DET implemente la tecnología de relaves filtrados (cuya evaluación económica se encuentra en este documento), ya que una vez filtrada la pulpa de relaves se incurriría inmediatamente a la fabricación de los ladrillos, evitando la disposición del material sólido en el embalse Carén.

Es importante señalar que en la presente tesis no se incurrió en la evaluación económica de un sistema de recirculación e impulsión del agua que se encuentra en el embalse Carén, debido principalmente a las siguientes razones:

- En DET no existen problemas de suministro de agua para el procesamiento de sus minerales ya que cuenta con 37 bocatomas a las cuales se les puede extraer el agua para proceso.



- Actualmente en DET existe una planta de espesaje de relaves que recircula una fracción del agua a proceso, previo a la disposición del pasivo ambiental a la canaleta de relave.
- Los gastos de suministro de agua en que incurre la planta son extremadamente bajos, en donde anualmente la planta sólo gasta MUS\$ 5,83 en consumo de agua, repartidos en agua recupera, fresca y potable, cuyos precios son 0,04, 0,133 y 2,1 US\$/m<sup>3</sup> respectivamente (HATCH, 2011).
- Los costos y gastos en que se incurriría en la intalación y operación de un sistema de recirculación de aguas desde el embalse a la planta (85.400 m de distancia y a 2.000 m.s.n.m aproximadamente) sería muy elevados, considerando un costo de US\$ 201,58 por metro lineal en tuberías y US\$ 1.541,46 por Hp instalado para bombas (MWH, 2003b).

NOTA:

Debido a políticas de confidencialidad de Codelco Chile, los parámetros y resultados entregados en este informe no corresponden a los valores reales, estos se encuentran ponderados por un factor entre 0 y 1 reflejando de igual manera el escenario en el que se encuentran envueltos.

## **1.2 OBJETIVO GENERAL.**

Realizar una investigación de aplicabilidad de nuevas tecnologías para la disposición y utilidad de los relaves mineros de El Teniente.

## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Efectuar un balance de masa de sólidos, de agua y de pulpa en la planta de espesaje de DET.
- Efectuar una evaluación económica de disponer los relaves de DET a la forma de relaves en pasta y filtrados.

- Efectuar un análisis técnico bibliográfico y de mercado de reemplazar las acillas y/o el cemento por los relaves sólidos de DET para la fabricación de ladrillos, bajo el caso hipotético de que se implemente la tecnología de relaves filtrados para tratar los relaves en que incurre DET.



## **2 ANTECEDENTES DE LA EMPRESA.**

### **2.1 GEOGRAFÍA DE DET.**

Las instalaciones de DET se encuentran ubicadas en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, a aproximadamente 80 km al sudeste de las ciudad de Santiago y 44 km al este de la ciudad de Rancagua, y a una altura aproximada de 2.100 metros sobre el nivel del mar (MWH, 2003a).

### **2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO.**

El mineral extraído desde los sectores mineros es conducido hacia dos áreas bien definidas para su beneficio, la primera corresponde al complejo Sewell, donde existe una planta de chancado y molienda con una capacidad nominal de 20 ktpd, lugar donde se beneficia la mina a rajo abierto, en donde el mineral molido es conducido por una canaleta hasta la línea de procesos convencional en el área de Colón para una flotación colectiva adicional. La segunda área de beneficio corresponde al complejo Colón, que está conformado por:

- Proceso SAG, el cual tiene una capacidad de procesamiento nominal de diseño de 65 ktpd para un tamaño  $P_{80}$  de 150  $\mu\text{m}$ . El producto es enviado a una planta de flotación colectiva (SID, 2011).
- Proceso de molienda convencional, el cual tiene una capacidad de procesamiento nominal de diseño de 66 ktpd para un tamaño  $P_{80}$  de 160  $\mu\text{m}$ . El producto es enviado a una planta de flotación colectiva (SID, 2011).

Así el área Colón quedó habilitada para alcanzar una capacidad de procesamiento nominal de 131 ktpd.

Los productos de ambas líneas de procesamiento del área Colón continúan etapas conjuntas, las cuales básicamente son:

- Planta de flotación selectiva, donde son enviados los concentrados de la flotación colectiva, y cuyos productos finales son un concentrado de molibdeno filtrado y envasado, y un concentrado de cobre que es conducido a la planta de filtrado y secado ubicada en el área de Caletones.
- La planta de filtros de Caletones recibe el concentrado de cobre, el cual es procesado para entregar un producto con una humedad de aproximadamente de 9%, el que finalmente es derivado a la fundición o a un sistema carguío y transporte para su comercialización.

Por otra parte, los relaves tanto de la línea de procesos Sewell como los del área Colón, son enviados a una planta de espesaje, logrando recuperar una parte importante del agua la que es retornada a proceso. A su vez, la descarga de los espesadores es conducida por medio de una canaleta hasta su disposición final en el embalse de relaves Carén. Para un mejor entendimiento de lo descrito, en la Figura 2.1 se muestra un esquema general del complejo mina-concentradora de El Teniente.

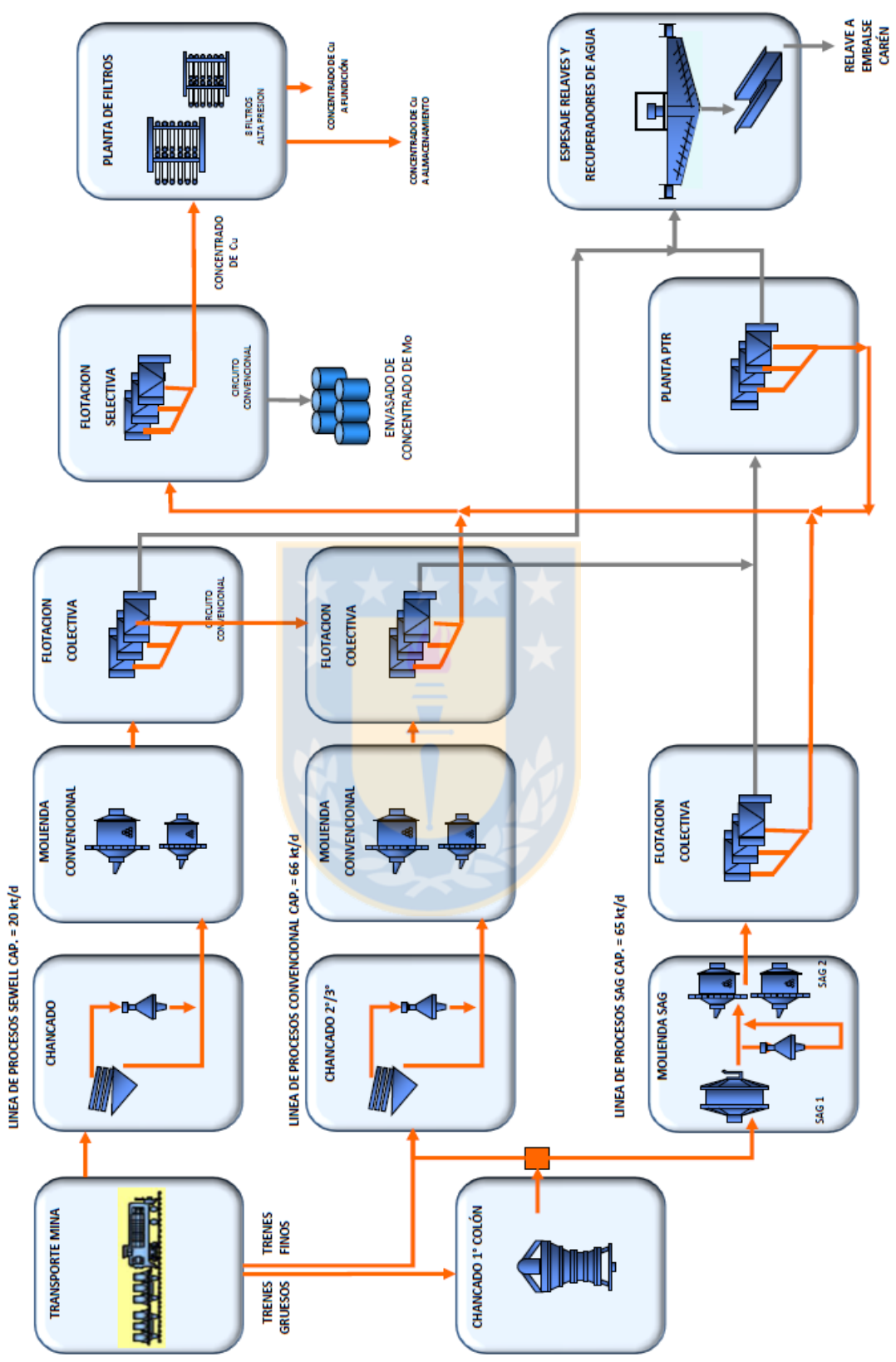


Figura 2.1 Esquema productivo primario de DET (SID, 2011).

### 2.3 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE ESPESAJE

La planta de espesaje de relaves de DET está destinada a la recuperación de agua de las colas provenientes de las líneas de flotación descritas en la sección anterior. Luego, el agua recuperada por rebalse en los espesadores es recirculada a proceso.

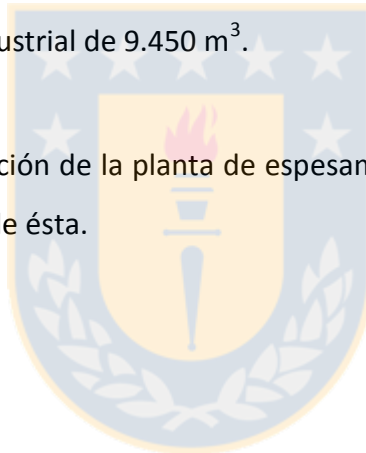
A partir de lo anterior, en la descarga de los espesadores se obtiene una suspensión de mayor porcentaje de sólidos (pulpa de relave), la cual es transportada principalmente por efecto de la fuerza de gravedad al embalse de relaves Carén.

A continuación se presenta una breve descripción de la planta de espesaje de DET (SID, 2011):

- 7 espesadores en paralelo de 325 pies de diámetro cada uno.
  - 2 de ellos son de modelo Eimco modificados al tipo Hi-Cap, en particular, los espesadores 2 y 5 (R-2 y R-5).
  - 4 de ellos son de modelo Eimco convencionales modificados al tipo autodilución, en específico, los espesadores 3, 4, 6 y 7 (R-3, R-4, R-6 y R-7).
  - 1 de ellos es un espesador Dorr-Oliver convencional (R-9).
- 13 bombas de agua centrífuga horizontal.
  - 7 de ellas poseen una potencia de 200 Hp ubicadas en la estación de bombeo N°1.

- 4 de ellas poseen una potencia de 1.200 HP ubicadas en la estación de bombeo N°2.
- 2 de ellas poseen una potencia de 400 Hp todas ubicadas en una estación de bombeo intermedia.
- 4 bombas de agua de 400 HP ubicadas en la estación de bombeo N°3.
- 3 estanques de agua recuperada de 2.000 m<sup>3</sup> cada uno.
- 1 piscina de agua industrial de 9.450 m<sup>3</sup>.

Para una mejor visualización de la planta de espesamiento, en la Figura 2.2 se presenta un flow-sheet de ésta.



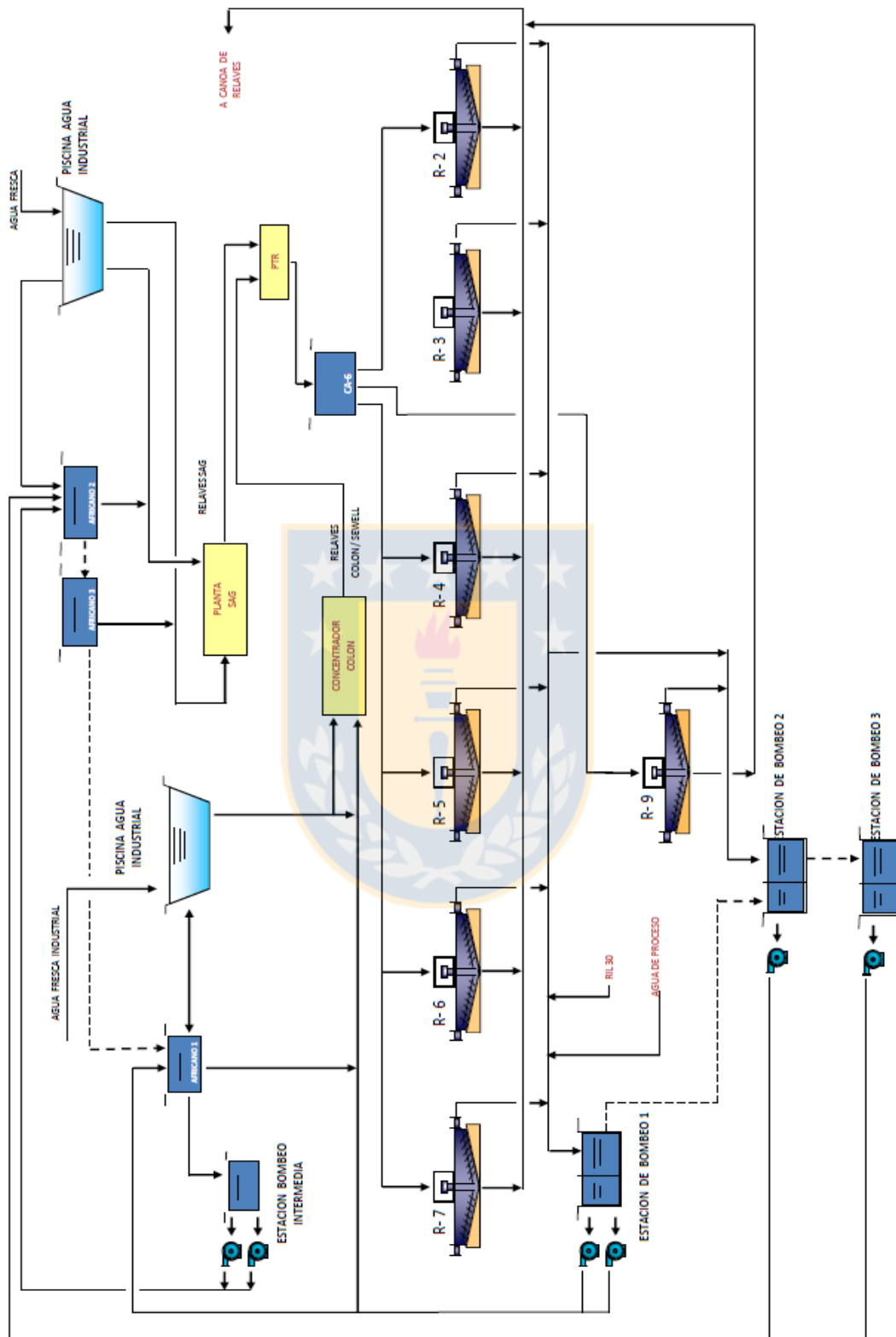
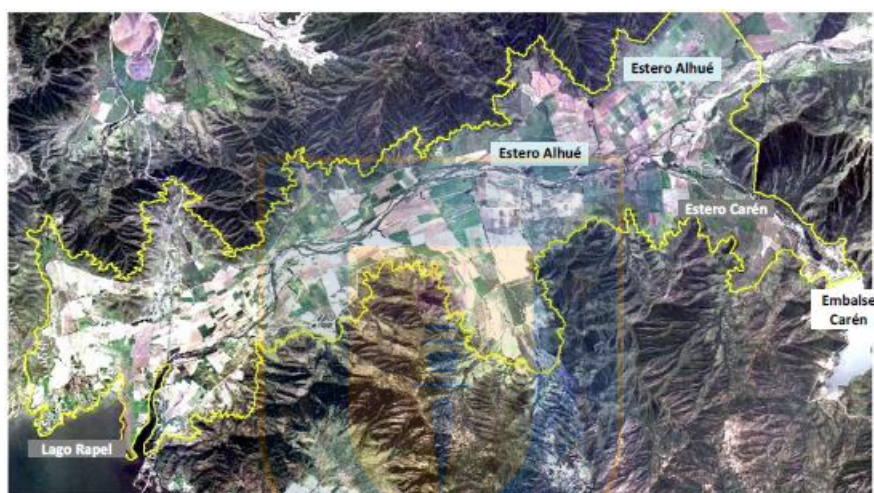


Figura 2.2 Diagrama de flujo de la planta de espesaje de DET (SID, 2011).



## 2.4 DESCRIPCIÓN DEL EMBALSE DE RELAVES CARÉN.

Los relaves de la actividad minera de División El Teniente son vertidos en un embalse artificial construido en la cuenca del estero Carén, las "aguas claras" de este embalse continúan aguas abajo a través del estero del mismo nombre, y después de juntarse con las del estero Alhué, desembocan en el embalse Rapel (Figura 2.3).



**Figura 2.3** Área de influencia del agua de descarga del embalse Carén (CIREN, 2003).

El transporte de dicho material se realiza a través de un relaveducto de 85,4 km de longitud (Colón-Carén). Este embalse está construido sobre el cauce del estero Carén y una vez depositados los relaves, el proceso de sedimentación genera un agua clara que corresponde al efluente del embalse, la cual se descarga en forma controlada a este estero, aguas abajo del muro (CICA, 2006). El sitio presenta capacidad para almacenar residuos mineros finos de DET en forma estable y ambientalmente aceptable mediante la formación de depósitos de relaves sobre el fondo del valle.

El agua clara del relave descargada desde este embalse contiene entre otros elementos: Cu, Fe, Al, B, Mn, Mo, Cd, Pb y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Los elementos que presentan niveles más significativos son Mo y  $\text{SO}_4^{2-}$  (Zbinden, 2011). En el caso del pH se ha observado que es levemente básico.

El área de Carén se ubica dentro de una zona geográfica de intensa actividad sísmica, debido a su cercanía a epicentros de frecuentes terremotos originados costa afuera entre San Antonio y Pichilemu.

De acuerdo con el Plan de Desarrollo Divisional, en el diseño original, la cuenca del valle Carén tiene una superficie de 220 km<sup>2</sup> y una capacidad de la cubeta de 2.400 millones de metros cúbicos (MWH, 2003a).

Las obras hidráulicas principales del embalse son:

- Muro principal (construido por método de crecimiento hacia aguas abajo).
- Cubeta (para contener relaves y aguas claras).
- Canoa de conducción de relaves (Colón-Carén).
- Vertedero de seguridad.
- Torre de evacuación de aguas claras.
- Canal de conducción de aguas claras y de restitución a estero Carén.

El muro principal está actualmente compuesto por materiales de relleno de empréstitos, que forman un prisma de sección trapezoidal. Un corte transversal permite distinguir tres secciones principales: Espaldón, núcleo y sistema de drenaje. Cada sección cumple un cometido distinto que determina el tipo de material de empréstito requerido para su construcción. La presa tiene un ancho de coronamiento de 10 m, con taludes de pendientes de 2,5:1,0 (H: V) y 3,0:1,0 (H: V), aguas abajo y aguas arriba respectivamente. Estas dimensiones se han mantenido en cada etapa de crecimiento del muro, encontrándose actualmente en la sexta (MWH, 2003a).

La laguna de aguas claras de la cubeta es controlada por medio de torres de evacuación, las cuales tiene un sistema que permite controlar el umbral de vertido de aguas, manteniendo una revancha mínima de 3 metros entre las lamas y el peso de agua (MWH, 2003a).

La conducción de relaves es en forma gravitacional con escurrimiento libre mediante una canoa abierta, desde el concentrador Colón hasta el valle del estero Carén. La longitud de la conducción es de 85.400 m, y está formada por una canoa de hormigón armado de 1,4 m de ancho por 1,4 m de alto útil, con una capacidad máxima de conducción de 3,2 m<sup>3</sup>/s. La canoa tiene pendientes de fondo 0,5% y 2% a lo largo de toda su conducción, y en el valle del estero Carén se encuentra en la cota 288.38 m.s.n.m. (MWH, 2003a).

La disposición de los relaves de DET, en el futuro, puede proyectarse de acuerdo a diversas alternativas. Las opciones disponibles se refieren a la selección del sitio más conveniente para el vaciamiento o almacenamiento, y a la selección del método más económico y seguro de descarga y de almacenamiento en los sitios seleccionados. La determinación de la zona más conveniente requiere considerar la optimización del uso del lugar en que

actualmente se encuentra el embalse Carén, versus el desarrollo de nuevos sectores que cumplan condiciones similares de capacidad de embalse. Dentro de las tecnologías alternativas de depositación de los relaves, sólo se analizarán el espesado a pasta de pulpas depositadas en pilas, y el filtrado de relaves para su depositación en domos, ambas sobre el nivel de las lamas del embalse Carén (MWH, 2003a).



### **3 ANTECEDENTES TEÓRICOS.**

#### **3.1 RELAVES.**

Toda planta minera cuyo proceso de concentración es flotación, produce residuos que se denominan relaves, y que corresponden a una suspensión fina de sólidos (1-600  $\mu\text{m}$ ) en líquido, donde el sólido es fundamentalmente el mismo material presente insitu en el yacimiento, al cual se le ha extraído la fracción con mineral valioso conformando una pulpa, la cual se genera y desecha en las plantas de concentración húmeda de especies minerales y estériles; esta "pulpa o lodo de relaves" fluctúa en la práctica con una razón aproximada de agua/sólidos que van del orden de 1:1 a 2:1, además, este material residual posee metales disueltos y reactivos del procesamiento del mineral (Ramírez, 2007). En minería, los relaves pueden representar entre el 95% al 99% del material triturado.

Por lo general, los relaves y el agua de proceso son desechados a un área de descarte final, conocida como zona de almacenamiento de relaves (Engels, 2017).

##### **3.1.1 TIPOS DE DEPÓSITOS DE RELAVES.**

Una vez determinados los parámetros específicos del sitio de disposición del relave (parámetros ambientales, legales, económicos, técnicos, etc.), puede comenzarse el proceso de selección del método de disposición deseado.

Los distintos tipos de depósitos de relaves que se consideran en la actualidad en Chile indicados en el "Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Depósitos de Relaves", son los siguientes:

- Embalses de relaves.
- Tranques de relaves.
- Depósito de relaves espesados.
- Depósito de relaves filtrados.
- Depósito de relaves en pasta.

A continuación, se realizará una breve descripción de estas formas de depositación de relaves (la descripción de otros métodos de disposición del pasivo ambiental se encuentra en el ANEXO A).

#### **3.1.1.1 EMBALSES DE RELAVES.**

Este tipo de depósito de relaves consiste en construir un muro resistente hecho totalmente de material de empréstito compactado, impermeabilizando el talud interior del muro, y también parte o todo su coronamiento; los relaves se depositan completos en la cubeta sin necesidad de clasificación, pero también deben disponer de un sistema de evacuación de las aguas claras de la laguna que se forma. El embalse se puede ejecutar por etapas a medida que se avanza con el depósito de relaves (Ramírez, 2007). Normalmente se utiliza la topografía natural para la construcción de embalses de relaves mineros (EC, 2004). Este diseño es similar al de un depósito de almacenamiento de agua convencional, en el que un terraplén se coloca a través del valle para represar una zona de drenaje (Vick, 1990).

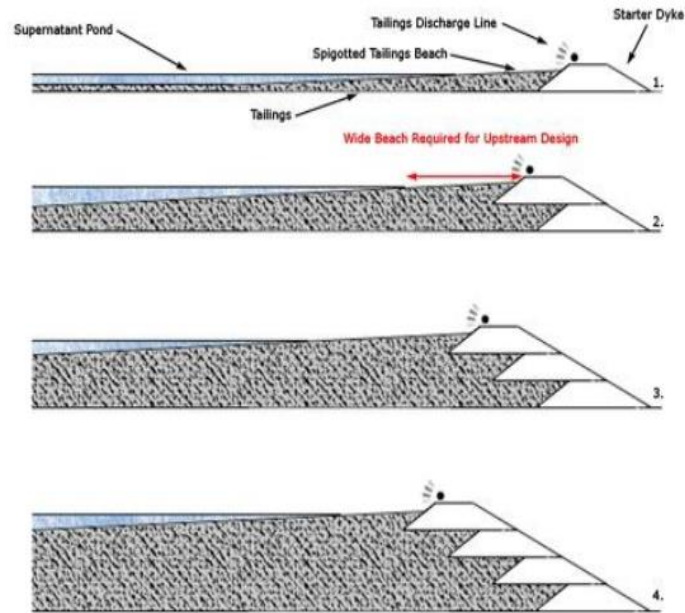
Desde el punto de vista sísmico, los embalses de relaves son más resistente que cualquiera de los métodos indicados para los tranques de relaves (Ramírez, 2007).

### 3.1.1.2 TRANQUES DE RELAVES.

Un tranque de relaves está formado por un muro de contención y una cubeta, en esta última, los sólidos finos sedimentan formando en la superficie una laguna de aguas claras. Esta opción corresponde a tratar los relaves provenientes de la planta de manera de separar la fracción gruesa (arenas de relaves) de la fracción fina (lamas), para poder utilizar la primera como material de construcción del muro perimetral y descargar la segunda a la cubeta. Al construir el muro utilizando las arena de relaves, es posible hacerlo de tres formas o métodos de crecimiento distintas, saber: Crecimiento del muro hacia “aguas arriba” (no lo contempla la legislación actual en Chile), crecimiento del muro hacia “aguas abajo” y crecimiento del muro según el método llamado “eje central o mixto” (Ramírez, 2007). Estos nombres designan la dirección en la que la cresta del terraplén se mueve en relación con el dique de arranque (Vick, 1990). Cualquiera de estos métodos constructivos conforman finalmente a los denominados en Chile “Tranques de Relaves” (Ramírez, 2007). A continuación se presenta una breve descripción de los métodos de construcción de muros para tranques de relaves.

- **Crecimiento del muro hacia aguas arriba:**

La construcción de un terraplén diseñado aguas arriba comienza con una base de dique de arranque permeable (drenaje libre). Con este método de crecimiento los relaves suelen ser descargados desde la parte superior de la cresta de la presa, creando una playa que se convierte en la base para futuros levantamientos de terraplenes (Vick, 1990). En la Figura 3.1 se presenta un esquema de un tranque de relaves empleando el método de crecimiento del muro hacia aguas arriba.



**Figura 3.1** Tranque de relaves empleando el método aguas arriba para la construcción del muro (Álvarez, 2017).

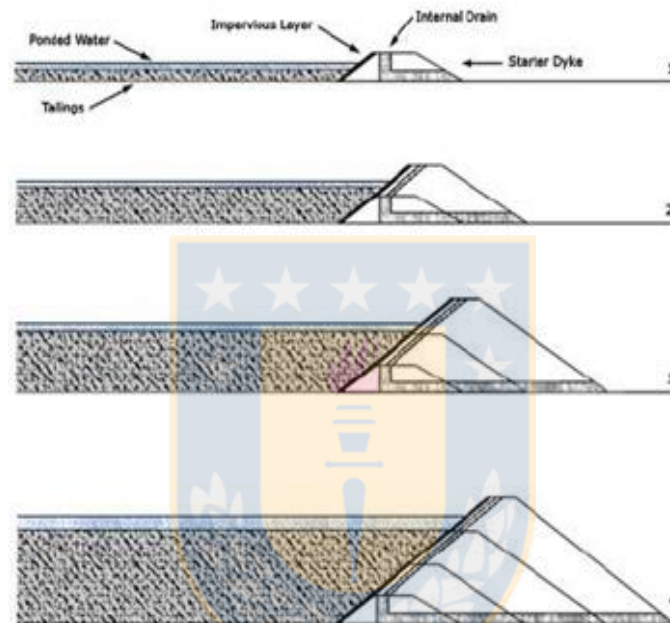
Los terraplenes aguas arriba son adecuados para áreas donde el clima es árido, donde no requieren almacenarse grandes cantidades de agua y la acumulación rápida de ésta es improbable. Esto ayuda a promover playas anchas y prevenir desviaciones frecuentes del nivel del agua que pueden alterar dramáticamente la geometría del estanque, el francobordo y la superficie freática dentro del área de embalse. Los terraplenes aguas arriba no son adecuados para áreas de actividad sísmica, ya que el riesgo de licuefacción aumenta como resultado del potencial de carga dinámica por los terremotos (Álvarez, 2017).

- **Crecimiento del muro hacia aguas abajo:**

El diseño de aguas abajo fue desarrollado para reducir los riesgos asociados con el diseño aguas arriba, en particular cuando se somete a carga dinámica como resultado de temblores (ICOLD & UNEP, 2001).



El diseño del terraplén aguas abajo comienza con un dique de arranque impermeable, a diferencia del diseño aguas arriba que tiene un dique de arranque permeable. Esto cambia la línea central de la parte superior de la presa aguas abajo a medida que se elevan progresivamente las etapas del terraplén (Vick, 1990). En la Figura 3.2 se presenta un esquema de un tranque de relaves empleando el método de crecimiento del muro hacia aguas abajo.



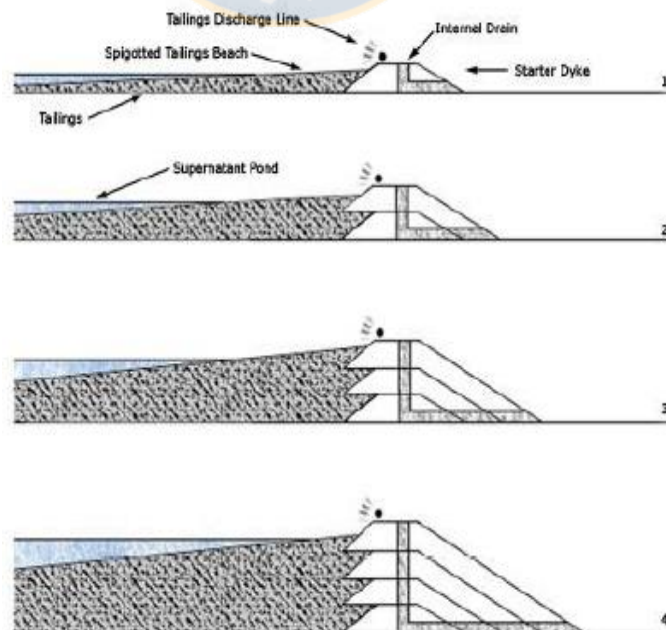
**Figura 3.2** Tranque de relaves empleando el método aguas abajo para la construcción del muro (Álvarez, 2017).

El diseño aguas abajo es muy versátil para una serie de parámetros de diseño específicos del sitio, y se comporta de manera similar a las presas de retención de agua. Su principal ventaja es que puede tener alturas sin restricciones, debido a que cada levantamiento es estructuralmente independiente de los relaves. La principal desventaja es el coste de levantar el terraplén, ya que se requieren grandes volúmenes de relleno, que aumentan exponencialmente a medida que aumenta la altura del terraplén, y que posteriormente se necesita una gran área alrededor de la presa y que el pie de la presa se desplaza a

medida que crece el muro (Álvarez, 2017). Aunque un terraplén aguas abajo puede teóricamente no tener un límite de altura, la altura final de la presa está determinada por la restricción del avance de la presa (Vick, 1990).

- **Crecimiento del muro empleando el método eje central o mixto:**

El método de la línea central es realmente un punto intermedio entre los diseños aguas arriba y aguas abajo. Es más estable que el método aguas arriba pero no requiere tanto material de construcción como el diseño aguas abajo. Al igual que el método aguas arriba, los relaves son generalmente descargados por espigas desde la cresta del terraplén para formar una playa detrás de la pared de la presa. Cuando se requiere una elevación posterior, el material se coloca tanto en los relaves como en el terraplén existente. La cresta del terraplén se eleva verticalmente y no se mueve en relación con las direcciones aguas arriba y aguas debajo de aumentos subsiguientes (Álvarez, 2017). En la Figura 3.3 se presenta un esquema de un tranque de relaves empleando el método de crecimiento llamado eje central o mixto para la construcción del muro.



**Figura 3.3** Tranque de relaves empleando el método eje central o mixto para la construcción del muro (Álvarez, 2017).

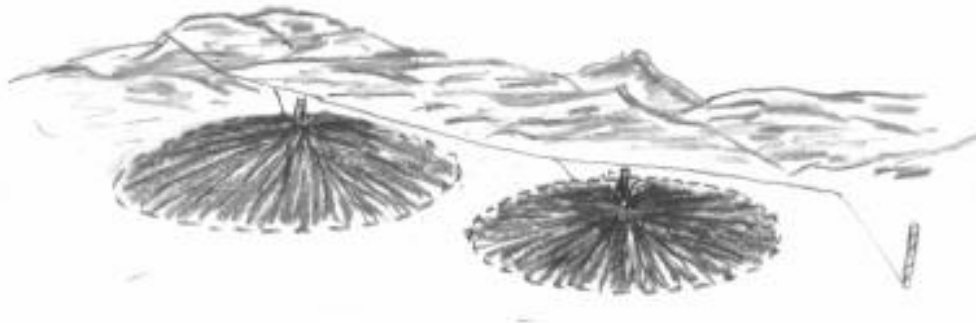
El diseño incorpora las zonas internas de drenaje que se incrementan de manera similar en el método aguas abajo. Por lo tanto, el agua libre puede invadir zonas más cerca de la cresta de la presa que el método aguas arriba sin la preocupación de aumentar la superficie freática y causar un potencial riesgo de fallo. Sin embargo, una presa de la línea central no puede ser utilizada como una gran instalación de retención de aguas debido a que los subsiguientes levantamientos fueron construidos parcialmente de relaves consolidados. Es necesario instalar un sistema de decantación adecuado para evitar que el agua libre sumerja la playa alrededor de la cresta de la presa. En muchos casos, el diseño de la línea central es un buen compromiso entre el riesgo sísmico y los costos asociados con la construcción (Álvarez, 2017).

#### **3.1.1.3 DEPÓSITOS DE RELAVES ESPESADOS:**

Este tipo de depósitos de relaves consiste en disponer los relaves en forma de cono, cuya pendiente dependerá del porcentaje de sólidos que posea la pulpa, es decir, dependerá de la viscosidad de la pulpa. El método está sustentado sobre la base de que a una mayor concentración de sólidos que posea la pulpa de relave, mayor podrá ser el ángulo del talud del depósito.

Cabe destacar que este tipo de depósito no requiere de un dique para bordear la zona donde se deposita el material, sin embargo se recomienda la construcción de un pequeño terraplén algo alejado del borde exterior del depósito, el cual sirve para contener el agua desalojada por el relave la que puede ser captada por un vertedero u otro dispositivo para ser bombeada y recirculada. Este pequeño terraplén sirve a la vez para coleccionar las aguas lluvias y conducir las hacia cauces naturales (Ramírez, 2007). En la Figura 3.4 se

presenta un esquema para la disposición de relaves a la forma de relaves espesados.



**Figura 3.4** Esquema de un depósito de relaves espesados (Ramírez, 2007).

Algunas de las ventajas del uso de relaves espesados son (Ramírez, 2007):

- Mejorar la recuperación de agua y procesos químicos en la planta de procesamiento.
- Minimizar el volumen de almacenamiento.
- Reducir la filtración en caso de que se filtren los relaves.

Por otro lado, existen otros métodos de disposición de relaves que no los contempla el DS N°248, pero que sí son implementados en otras faenas mineras en el mundo, y por motivos de alcances de esta tesis se presentan a continuación.

#### **3.1.1.4 DEPÓSITOS DE RELAVES EN PASTA.**

De acuerdo al DS N° 248 del Ministerio de Minería de Chile, se tiene la siguiente definición para los relaves en pasta:

- Relaves en pasta: Depósito de relaves que presenta una situación intermedia entre el relave espesado y el relave filtrado, corresponde a una mezcla de relaves sólidos y agua, que contiene abundante partículas finas y bajo contenido de agua, de modo que la mezcla tenga una consistencia espesa muy similar a una pulpa de alta densidad. Su depositación se efectúa en forma similar al relave filtrado, sin necesidad de compactación, poseyendo consistencia coloidal (Ministerio de Minería, 2007) .Cuando se habla de relaves espesados a pasta, se hace referencia a pulpas de relaves no newtonianas que han sido sometidas a un proceso de espesamiento, en el que se busca eliminar el agua hasta que las partículas ya no se segreguen y no posean velocidad de sedimentación comenzando a escurrir bajo un yield stress de 150 Pa (IM2, 2009).

A partir de lo anterior, dentro de las principales propiedades de los relaves en pasta se tienen: Poseen alta viscosidad, alta resistencia a la fluencia, no poseen velocidad crítica de sedimentación, y exudan poca o nada de agua una vez depositados.

En base a lo último, se puede decir que el transporte de relaves en pasta depende principalmente de tres tipos de variables, a saber: variables reológicas, variables geométricas y de las variables de impulsión.

- Dentro de las variables reológicas que gobiernan el transporte, se tiene la viscosidad plástica y al yield stress. La viscosidad es un parámetro que expresa la resistencia del material a fluir. Por su parte, el yield stress corresponde al esfuerzo requerido para que el material comience a fluir. Las variables independientes que modifican el comportamiento reológico

de la pasta de relaves son: La granulometría, gravedad específica, pH, contenido de arcillas, entre otras.

- Para el caso de las variables geométricas, se deben tener en consideración las siguientes: tipo de tuberías, materiales utilizados, trazados, entre otras.
- Por su parte, las variables de impulsión hacen referencia a los equipos de impulsión, que para este tipo de transporte son recomendable dos tipos de bombas, a saber: Bombas centrífugas y las bombas de desplazamiento positivo.

Por su parte, es importante señalar que para la depositación de relaves en pasta se requiere de altos niveles de sólidos en la pulpa, para esto son necesarios equipos capaces de cumplir con las concentraciones de sólidos a las cual se diseña el depósito. Los equipos comúnmente utilizados son: Espesadores de alta densidad o compresión (HCT o HD, por sus siglas en inglés), o bien, los espesadores de pasta o cono profundo (Paste o Deep Cone), los cuales se detallan más adelante en el presente documento.

En la Figura 3.5 se presenta la vista de un depósito de relaves espesados a pasta.



**Figura 3.5** Depósito de relaves espesados a pasta (Ramírez, 2007).

A continuación, en la Tabla 3.1, se presentan algunas instalaciones mineras que emplean el espesado a pasta para el tratamiento de sus relaves previo a su disposición final.

**Tabla 3.1** Principales operaciones mineras que producen relaves en pasta en el mundo (Cabrejos, 2011).

Mina	Ubicación	Metal
<b>(Operaciones y proyectos)</b>		<b>Procesado</b>
Kid Creek	Canadá	Zn/Cu
Lucky Friday	EEUU	Zn/Cu
Bulyanhulu Gold	África	Cu/Au/Ag
Agh Darreh	Irán	-
Coal Creek	EEUU	C
Peak Mine	Australia	Au/Cu/Pb/Zn
Goro Nickel	Australia	Ni/Co
Caraiba Mineracao	Brasil	Cu
San Bartolomé	Bolivia	-

<b>Proyecto Cuajone, Toquepala</b>	Perú	Cu
<b>Proyecto Toromocho, Chinalco</b>	Perú	Cu
<b>El Brocal, Huachuacaja</b>	Perú	-
<b>Proyecto Conga, Minera Yanacocha</b>	Perú	Cu/Au/Ag

### 3.1.1.5 DEPÓSITOS DE RELAVES FILTRADOS.

De acuerdo al DS N° 248 del Ministerio de Minería de Chile, se tiene la siguiente definición para los relaves filtrados:

Relaves filtrados: Depósito de relaves donde, que antes de ser depositados, son sometidos a un proceso de filtración, mediante equipos especiales de filtros, donde se aseguren bajos contenidos de humedad (Ministerio de Minería, 2007). Los relaves filtrados son primero espesados con floculantes y luego filtrados, de manera de obtener el contenido de agua adecuado para su disposición. Por razones de estabilidad, los relaves filtrados requieren ser compactados. En este caso, se requiere la desecación de relaves in situ.

En general, los depósitos de relaves filtrados se fundamentan bajo el mismo concepto que los depósitos de relaves espesados, pero en este caso, la pulpa mineral se hace pasar a través de equipos de filtración, alcanzándose porcentajes de humedad del material filtrado menores que en el caso del material que compone a los depósitos de relaves espesados (Ramírez, 2007).

El producto sólido del proceso de filtración es transportado al lugar de disposición en cintas transportadoras, o bien, mediante equipos de movimiento de tierra y/o camiones. En el primer caso se logra un domo de material similar al de los depósitos de relave espesados; mientras que en el segundo caso, se utilizan equipos de movimiento de tierras para ir construyendo módulos de material compactado, los cuales permiten



conformar un depósito aterrazado de gran volumen. En la Figura 3.6 se presenta la vista de un depósito de relaves filtrados.



**Figura 3.6** Depósito de relaves filtrados (Ramírez, 2007).

Por su parte, es importante señalar que para la depositación de relaves filtrados se requiere de altos niveles de sólidos en el material, para esto son necesarios equipos capaces de cumplir con las concentraciones de sólidos a las cual se diseña el depósito. Los equipos comúnmente utilizados son los filtros a vacío, en particular, los filtros de bandas, los que se detallarán más adelante en el presente documento.

A continuación, en la Tabla 3.2, se presentan algunas instalaciones mineras que emplean la tecnología de filtrado para el tratamiento de sus relaves previo a su disposición final.

**Tabla 3.2** Principales operaciones mineras que producen relaves filtrados en el mundo (Capone, 2016).

<b>Mina (Operación)</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Metal procesado</b>
<b>Alcoa</b>	Australia	Al
<b>Chingola</b>	Aambia	Cu
<b>La Coipa</b>	Chile	Au/Ag
<b>Vaal Reef</b>	Sudáfrica	Au/U
<b>Randfontein States</b>	Sudáfrica	Au/U
<b>Lihir Island</b>	Papua Nueva Guinea	Au
<b>El Sauzal</b>	México	Ag/Au
<b>Gecamines</b>	Zaire	Cu
<b>Nabalco</b>	Australia	Al
<b>Mantos Blancos</b>	Chile	Cu
<b>Alamo Dorado</b>	México	Ag/Au
<b>Pogo</b>	EEUU	Au
<b>Raglan</b>	Canadá	Pb/Zn
<b>Greens Creek</b>	EEUU	Au/Ag/Zn
<b>Eskay Creek</b>	Canadá	Cu
<b>Nixon Fork</b>	EEUU	Au
<b>El Peñon</b>	Chile	Au/Ag
<b>La Florida</b>	Chile	Au
<b>Karara</b>	Australia	Fe
<b>Pinos Altos</b>	México	Au
<b>El Dorado</b>	Turquía	Au
<b>Mach Mining</b>	EEUU	C
<b>Mt Thorley</b>	Australia	C

<b>South Bulli</b>	Australia	C
<b>Bengalla</b>	Australia	C
<b>San Rafael</b>	Guatemala	Zn/Pb
<b>La Encantada</b>	México	Au/Ag
<b>Real del Monte</b>	México	Au/Ag
<b>El Toro</b>	México	Au/Ag
<b>Guanacevi</b>	México	Ag
<b>Media Luna</b>	México	Au/Ag
<b>Bang Mining</b>	Arabia Saudita	Cu

Adicionalmente, en Chile, dentro de las instalaciones mineras que filtran sus relaves destacan:

- La Coipa, relaves de oro y plata, 15.000 tpd.
- El Peñón, relaves de oro y plata, 2.600 tpd.
- La Florida, relaves de oro, 2.700 tpd.
- Mantos Blancos, relaves de cobre, 6.000 tpd.

## 3.2 ESPESAMIENTO.

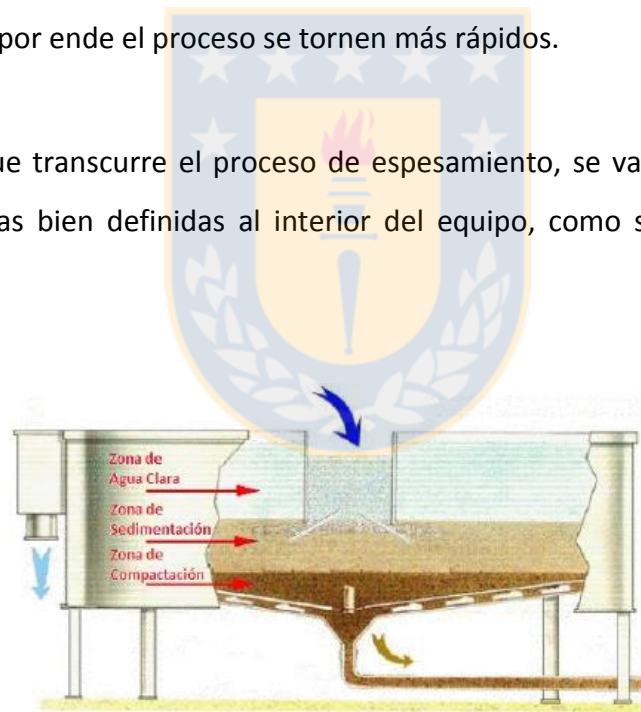
### 3.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

Los espesadores son equipos mecánicos de forma cilíndrica en la parte superior y de forma cónica en la zona inferior, que tienen como fin aumentar el porcentaje de sólidos de una suspensión de partículas de tamaño fino, la que es alimentada por la parte superior de éste y descargada con una mayor densidad por la parte inferior del mismo, además de recuperar una fracción de agua clara por rebalse en el equipo. El fenómeno se lleva a cabo por

decantación del material sólido particulado, a través del efecto combinado de sedimentación gravitacional y consolidación.

El fenómeno de sedimentación gravitacional puede ocurrir de forma natural, pero el tiempo requerido para que el proceso se lleve a cabo de esta forma es de magnitudes considerables, debido principalmente al diminuto tamaño de las partículas, es por esto que se recurre al uso de reactivos químicos llamados floculantes, los cuales son polímeros sintéticos de alto peso molecular, de cadena larga, y con gran afinidad por las superficies de las partículas sólidas. Estos reactivos forman flóculos entre las partículas mediante adsorción, generando agregados del material sólido de mayor masa, haciendo que el fenómeno y por ende el proceso se tornen más rápidos.

A medida que transcurre el proceso de espesamiento, se van formando tres zonas o capas bien definidas al interior del equipo, como se observa en la Figura 3.7.



**Figura 3.7** Diagrama interior de un espesador (Vásquez, 2014).

La zona ubicada en la parte superior conocida como zona de agua clara, corresponde a la zona donde se encuentra el líquido con la menor cantidad de

material particulado posible, el cual es recuperado por rebalse en el espesador.

La zona intermedia conocida como zona de sedimentación, corresponde a aquella zona donde las partículas sedimentan a una velocidad constante por acción de la fuerza de gravedad, y posee una concentración de sólidos similar al flujo de alimentación, aumentando a una menor altura dentro del espesador.

Por último, en la parte baja del espesador se encuentra la zona de compactación, donde se encuentra el material particulado ya sedimentado. En esta región se tiene una concentración de sólidos similar a la del flujo de descarga.

### **3.2.2 EQUIPOS DE ESPESAMIENTO.**

De forma general, se puede afirmar que existen cuatro tipos de espesadores, a saber: Espesadores convencionales, espesadores de alta capacidad, espesadores de alta densidad y espesadores de pasta.

A continuación se presenta una breve descripción del tipo de espesador que permite disponer los relaves a la forma de pasta (en el ANEXO B se encuentra una descripción del resto de los equipos de espesamiento).

#### **3.2.2.1 ESPESADORES DE PASTA.**

Los espesadores de pasta son similares a los espesadores convencionales o de alta capacidad, pero poseen conos más pronunciados y tanques cilíndricos mucho más altos. La altura adicional produce una mayor presión sobre el

sedimento en el fondo del tanque, y por lo tanto, se produce un flujo de descarga más denso, es decir, permiten alcanzar mayores contenidos de sólidos en el material de descarga (Concha, 2014). En la Figura 3.8 se pueden apreciar y dimensionar a este tipo de espesadores.



**Figura 3.8** Vista de un espesador de pasta (Concha, 2014).

El presente estudio se centrará en aplicar los espesadores de pasta, debido a que el resto de los equipos de espesamiento de gran capacidad para el tratamiento de relaves poseen muchas dificultades para alcanzar los niveles de humedad requeridos del pasivo ambiental para su posterior disposición.

### **3.3 FILTRACIÓN.**

#### **3.3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.**

La filtración es un proceso de separación sólido-fluido, mediante el cual el sólido es separado del fluido de una suspensión, haciéndolo pasar a través de un lecho poroso denominado medio filtrante. Mientras el lecho retiene las partículas sólidas, el fluido pasa a través del medio filtrante recibiendo el nombre de filtrado (Concha, 2014).

Para establecer el flujo a través del medio filtrante, es necesario aplicar un gradiente de presión como fuerza impulsora, para ello existen varias formas de aplicar este gradiente de presión, por ejemplo: 1) la gravedad, 2) el vacío, 3) una presión, 4) un vacío y una presión combinados, 5) una fuerza centrífuga y 6) un gradiente de saturación (Concha, 2014). La mayor parte de estas formas de aplicar presión da lugar a diferentes tipos de equipos de filtración, a saber: Filtros a vacío, filtros a presión y filtros hiperbáricos, los cuales se detallan más adelante en el presente documento.

La mayoría de los equipos de filtración, sean continuos o discontinuos, trabajan en ciclos de formación de queque, lavado, secado y descarga (Concha, 2014), en donde:

- Formación del queque: Corresponde al ciclo donde hay un flujo continuo de filtrado a través del medio filtrante y del queque (material filtrado).
- Lavado del queque: Corresponde al ciclo donde se hace pasar un fluido a través del material ya filtrado, el cual se efectúa para eliminar impurezas del queque o para recuperar líquidos valiosos.

- Secado del queque: Secado del queque es aquella etapa en que el agua retenida en los poros del queque es desplazada soplando aire o succionado aire de la atmósfera.
- Descarga del queque: Corresponde al desprendimiento del material filtrado o queque.

### **3.3.2 EQUIPOS DE FILTRACIÓN.**

Dentro de los equipos de filtración a vacío se encuentran: El filtro de tambor, el filtro de discos, el filtro de bandeja y el filtro de banda horizontal. Mientras los tres primeros son capaces de producir queques con humedades de hasta 12 a 18%, el filtro de bandas logra llegar a humedades menores (8 a 10%) (Concha, 2014).

Por otra parte, dentro de los equipos de filtración a presión se tienen: Filtros de prensa de placas verticales, filtros de prensa de placas horizontales y filtros de prensa de discos. Los filtros de presión logran llegar a más bajas humedades y mejores rendimientos que los filtros a vacío, pero son equipos inherentemente discontinuos (Concha, 2014).

Para la elección de la tecnología a aplicar (presión o vacío) es necesario conocer entre otros factores: Las propiedades de la pulpa, las características del sólido, el tonelaje a tratar, etc. (Capone, 2016).

A continuación se presenta una breve descripción del tipo de equipo de filtración que permite disponer los relaves a la forma de relaves filtrados (en el ANEXO C se encuentra una descripción del resto de los equipos de filtración).



### 3.3.2.1 FILTROS DE BANDAS.

Para la filtración de relaves, históricamente los filtros de vacío han sido los más empleados, en particular, los filtros de bandas, debido principalmente a sus mayores capacidades que los a presión (filtros de prensa).

Los filtros de banda de vacío utilizan una banda filtrante horizontal continua, accionada por una polea y soportada por dos cilindros en sus extremos, la cinta se desplaza a velocidad variable y es el lugar donde se deposita el material. El vacío, es producido a través de aberturas en la banda, lugar donde el agua es extraída, formándose un queque que se descarga al final de la cinta hacia una correa recolectora. Como la capacidad por tonelada es alta, el equipo ha sido aceptado en general como el más económico para filtrar relaves. Aun cuando la humedad es similar a la de los filtros de discos, se ha encontrado que los filtros de banda producen una humedad 1 a 2% menor.

A continuación se presentan algunas ventajas de los filtros de bandas, que los hacen aplicables para el filtrado de relaves:

- Filtros totalmente continuos, con la ausencia de tiempos muertos en su operación.
- Velocidad de movimiento de la banda ajustable, según necesidades.
- Alimentación del filtro muy simple.
- Deposición uniforme del producto sobre una superficie plana.
- Funcionamiento mecánico simple, permitiendo un fácil mantenimiento y limpieza correspondiente.
- Buena disponibilidad.

- Baja altura de equipo (reduce altura necesaria de edificio).

En la Figura 3.9 se muestran filtros de banda de vacío en operación.



**Figura 3.9** Filtros de banda de vacío en operación (Capone, 2016).

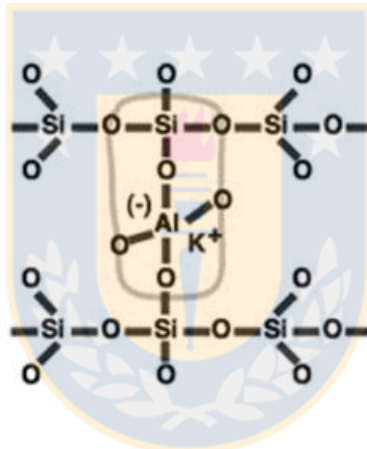
## **3.4 GEOPOLÍMEROS.**

### **3.4.1 GENERALIDADES DE LOS GEOPOLÍMEROS.**

Los geopolímeros son compuestos que resultan producto de la mezcla de materiales ricos en sílice y alúmina (aluminosilicatos amorfos), activándose por reacción con una solución alcalina, formando una estructura tridimensional parecida a la de los polímeros orgánicos. Los aluminosilicatos son un grupo de minerales constituidos principalmente por óxidos de silicio y óxidos de aluminio con estructuras cristalinas y cationes como calcio, magnesio, sodio, potasio, entre otros (Paladines, 2016). Las fuentes de aluminosilicatos podrían ser escorias de alto horno, material sólido de los relaves de cobre, cenizas volantes (la que se podría obtener de una planta de generación de energía

eléctrica por combustión del carbón), etc. Por su parte, la función primordial del activador alcalino, es acelerar la disolución de la fuente de aluminosilicatos para la posterior reorganización de las moléculas. Los activadores alcalinos suelen ser: Hidróxidos, sales de ácidos débiles, sales de ácidos fuertes y sales silícicas. Los activadores más empleados son el hidróxido de sodio o potasio, silicatos y carbonatos (Paladines, 2016).

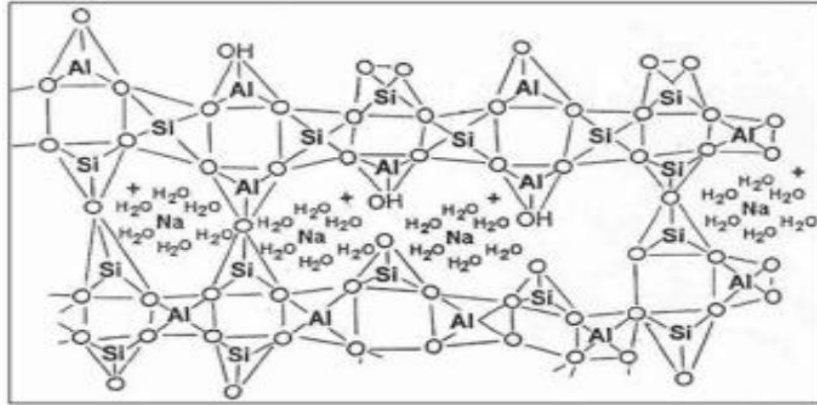
El modelo más aceptado del concepto “geopolimerización”, se basa en que la fuente de aluminosilicatos se disuelve en una solución alcalina, luego, desde esta disolución, hay una reorganización de los elementos que tenderían a formar estructuras simples con la siguiente forma:



**Figura 3.10** Estructura básica de un geopolímero (Días, 2012).

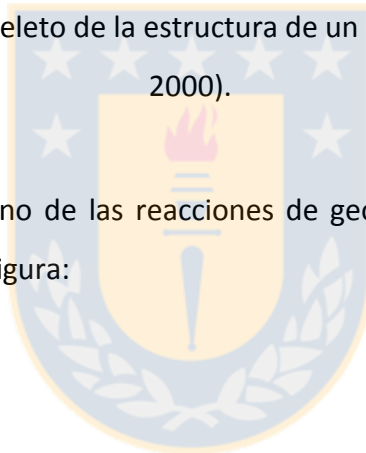
Estas estructuras se reorganizarían formando redes amorfas de tetraedros alternados de  $\text{AlO}_4^-$  y  $\text{SiO}_4$ , generando largas cadenas y repitiendo la estructura simple original, dando lugar a una estructura parecida a la de un polímero orgánico, de ahí el nombre de geopolimerización (Días, 2012). En esta estructura el silicio y el aluminio se enlazan tetraédricamente por intercambio de átomos de oxígeno formando la unidad básica que es el monómero sialato (O-Si-O-Al-O), el cual lleva un exceso de carga negativa debido a la sustitución de  $\text{Si}^{4+}$  con  $\text{Al}^{3+}$ . El balance de cargas en la estructura del polisialato se realiza

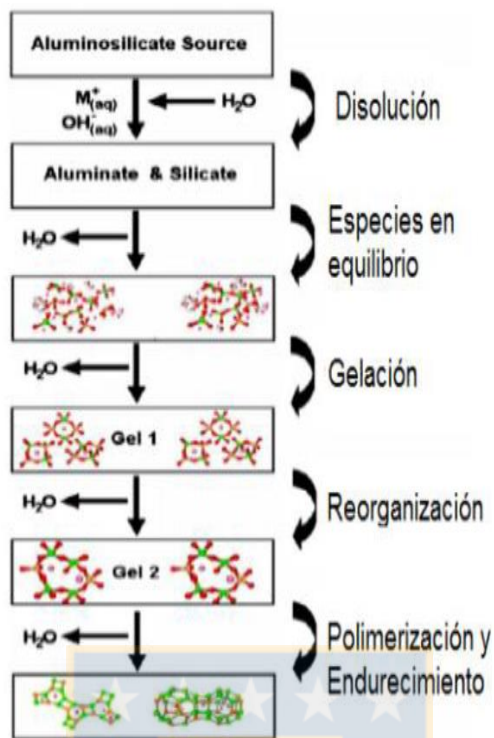
debido a los cationes de metales alcalinos ( $K^+, Na^+$ ) (Paladines, 2016). A continuación, en la Figura 3.11 se presenta la estructura de un geopolímero.



**Figura 3.11** Semi-esqueleto de la estructura de un Na-PPS (Barbosa, et al., 2000).

Por su parte, el fenómeno de las reacciones de geopolimerización se puede ilustrar con la siguiente figura:





**Figura 3.12** Proceso de geopolimerización (Duxon, et al., 2006).

De la Figura 3.12 es posible visualizar que una vez que la fuente de aluminosilicatos entra en contacto con la solución alcalina, los componentes de esta fuente comienzan a disolverse liberando aluminatos y silicatos a la forma de monómeros, los cuales reaccionan entre sí para formar trímeros, tetrameros o cadenas más largas. Una vez que la solución ha alcanzado la saturación, comienza la precipitación del gel aluminosilicato (llamado Gel I), este gel se forma por su mayor contenido de  $Al^{3+}$  en la solución al comienzo de la reacción, esto debido a que los enlaces Al-O de la fuente de aluminosilicatos son más débiles que los enlaces Si-O. Pese a esto, los enlaces Si-O igualmente son disueltos de tal forma que en el medio alcalino va aumentando a tal punto de saturarse generando otro tipo de gel llamado Gel II. Posterior a la formación de ambos geles, comienza un proceso de reorganización de las moléculas, tal como ilustra la Figura 3.12, para la posterior polimerización global del material una vez endurecido. La geopolimerización es la suma de

varias reacciones, que se tienen lugar al mismo tiempo. Estas son la disolución/hidrolisis, reestructuración y policondensación (Paladines, 2016).

Algunas propiedades importantes de los geopolímeros son:

- Alta resistencias tempranas: Pueden desarrollar hasta un 70 % de su resistencia a la compresión dentro de las primeras cuatro horas de curado (Davidovits, 1994a).
- Baja retracción por secado: Cabe destacar que existen cuatro formas de retracción, a saber: Plástica, química, térmica y por secado (Gilbert, s.f.), y la que más afecta a este tipo de material es la retracción por secado, la cual indica la pérdida de volumen que sufre el material debido a la constante pérdida de agua que resulta del secado de éste (Wallah, 2009).
- Alta resistencia a los sulfatos: Debido a la ausencia de calcio en la composición de los materiales geopoliméricos, no se generan reacciones expansivas, las que generarían esfuerzos internos que empeorarían la resistencia de los materiales (Bakharev, 2005).
- Resistencia a altas temperaturas: Los geopolímeros son considerados resistentes a altas temperaturas debido a sus características cerámicas (Davidovits, 1991b).
- Alta resistencia al ataque ácido: El ácido más propenso a atacar a este tipo de material es el ácido sulfúrico, debido a que se encuentra de manera natural en aguas subterráneas y suelos, pero debido a la ausencia de calcio en los geopolímeros, la presencia de este ácido no afectaría a las propiedades de este material.

Estas ventajas sumadas al nivel de sustentabilidad que presentaría su producción, harían de los geopolímeros un material de construcción prometedor.

Cabe destacar que durante la fabricación de un geopolímero muchos factores pueden afectar las propiedades finales de este material, como por ejemplo, el tipo de activador alcalino, su concentración, proporciones, los tipos de aditivos empleados, además de la naturaleza y pureza de las materias primas que se usan como fuente de aluminosilicatos.

### **3.4.2 FABRICACIÓN DE ADOQUINES PARA LA CONSTRUCCIÓN MEDIANTE GEOPOLIMERIZACIÓN.**

- **Adoquines a partir de hormigón:**

El hormigón es generalmente una mezcla de agua, cemento y áridos. El principio de este material es que el cemento al hidratarse con agua, forma una pasta que es capaz de endurecer y aglomerar los áridos generando una gran resistencia, lo que le permite ser usado como un material para construir. El hormigón convencional necesita el uso de cemento portland, mezcla de clínquer con yeso con algún otro aditivo (cenizas volantes, puzolanas, escorias de alto horno, etc), este clínquer es obtenido a través de calcinación de piedra caliza y arcilla en un horno a temperaturas de entre 1350 °C y 1450 °C (Días, 2012).

Por otra parte, el hormigón podría fabricarse a partir de pasivos ambientales mediante las técnicas de geopolimerización, en donde el cemento podría reemplazarse por alguna fuente de aluminosilicatos, como lo pueden ser las cenizas volantes, escorias de alto horno y/o relaves de la minería, el cual al mezclarse con alguna solución alcalina, se activa formando un geopolímero con propiedades satisfactorias, que al juntarse con áridos se genera un

hormigón de elevada calidad, denominado desde ahora, hormigón geopolimérico. Luego, para la fabricación de los ladrillos, sólo bastaría moldear el hormigón aún húmedo en moldes, esperar su secado para su posterior cocción.

- **Adoquines a partir de arcillas:**

El ladrillo de arcillas corresponde básicamente a una mezcla de arcillas trituras y agua, dando lugar a una pasta, la cual es posteriormente moldeada para entregarle una forma al material, esta pasta luego pasa por una etapa de secado de 3 a 5 días para endurecer la mezcla, y posteriormente pasa por una etapa de compactación para finalmente someterla a cocción a elevadas temperaturas (por sobre los 700°C), lo cual le entrega las propiedades características a este tipo de ladrillo, como lo son: Alta resistencia mecánica, elevado aislamiento térmico y acústico, consistencia y durabilidad (Paladines, 2016).

Por su parte, el ladrillo podría fabricarse a partir de las técnicas de geopolimerización, reemplazando la fuente de arcillas por alguna fuente de aluminosilicatos, la cual es activada por contacto con alguna solución alcalina, dando lugar a un material geopolimérico con excelentes propiedades para ser empleado como material de construcción.

### **3.4.3 ESTADO ACTUAL DEL USO DE RELAVES PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN MEDIANTE GEOPOLIMERIZACIÓN.**

- **Estado Actual:**

En cuanto al estado actual para la fabricación de materiales de construcción en base a relaves mineros aplicando las técnicas de geopolimerización se tienen



diversos estudios que potencian su implementación, a continuación se hace referencia a alguno de ellos:

- En primer lugar se tiene al trabajo presentado por Pedro Díaz Sossa, el cual se titula “Estudio de factibilidad de obtención de hormigones geopoliméricos a partir de desechos minerales”. En este estudio se presentó una forma alternativa de fabricar hormigón por reemplazo del cemento portland por muestras de relave de cobre de División El Soldado de Anglo American y cenizas volantes de clase F a través de las reacciones de geopolimerización, donde el la solución alcalina constó de agua, silicato de sodio e hidróxido de sodio, y los áridos fueron ripios de cobre, hormigones desechados, entre otros. Los resultados mostraron que si es factible la fabricación de hormigones a partir de una fuente de aluminosilicatos, que en este caso fueron relaves de cobre, sin embargo, al aumentar la concentración de éstos las resistencias mecánicas se ven disminuidas producto de que estos materiales son cristalinos por lo que no tendrían la misma capacidad de disolución que los materiales amorfos (Días, 2012).
- Como segundo trabajo se tiene al presentado por Heiddy Pizarron Andrade y Sylvia Aquino Camargo, el cual se titula “Reutilización del relave minero de la Cía. Minera San Ignacio de Morococha S.A. en la industria y agroindustria para el diseño de la mejora social de las poblaciones aledañas en Chanchamayo”. Que tuvo como fin establecer aplicaciones del relave de la faena Cía. Minera San Ignacio de Morococha para mejorar la calidad de vida de los poblados aledaños al depósito de este relave.
- Como Tercer trabajo se tiene al presentado por Juan Pablo Paladines Benítez, el cual se titula “Fabriación de ladrillos a base de lodos de

relaves de minas”. Este trabajo tuvo como finalidad utilizar los relaves de la Concesión Minera “Pituca II” ubicada en la provincia de Zamora Chinchipe (Ecuador) para la elaboración de ladrillos mediante las técnicas de geopolimerización por reemplazo de las arcillas obteniéndose. Los resultados de este estudio mostraron que sí es factible la fabricación de ladrillos a partir de estos relaves mineros, encontrándose que la combinación de variables para la fabricación de estos adoquines que le entregan las mejores propiedades son: una concentración de la solución alcalina de 15 M de NaOH, un contenido en peso de la solución de 26 % con la mezcla del relave, y una temperatura de cocción del material ya moldeado de 120 °C (Paladines, 2016).

- Como cuarto trabajo se tiene al presentado por María Alejandra Tejada Fernández y Erick Gianfranco Loayza Palazuelos, el cual se titula “Proyecto de inversión para la producción y comercialización de adoquines ecoamigables hechos a partir de residuos mineros en la provincia de Arequipa al 2017”. El relave que se utilizó es el que se encuentra como residuo en la empresa Arequipeña Cepromet Minera Porvenir, la cual centra sus operaciones en la extracción de oro. La investigación tuvo como propósito determinar la viabilidad de la puesta en marcha de una fábrica productora de adoquines en la ciudad de Arequipa, usando como materia prima fundamental relaves mineros, reemplazando así al clásico cemento Portland. El estudio técnico demostró que la elaboración de adoquines a partir de relaves mineros cumple holgadamente con todos los requisitos de la Norma Técnica Peruana NTP 399.6 en términos de resistencia a la compresión (Tejada & Loayza, 2017), en cuanto a la evaluación económica se obtuvo indicadores económicos prometedores, sin embargo, el estudio sólo se

centró a una zona muy reducida en Perú como para considerar expandir esta industria.

- En Perú un grupo de investigadores de la Escuela de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos produjo ladrillos y baldosas a partir de la reutilización de relaves. Para ello utilizaron la metodología de fijación y micro-encapsulación de los metales pesados, que permite su estabilización y evita la migración hacia el medio ambiente. Asimismo, en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional de México proponen la elaboración de cementos alternativos, cuyas propiedades mecánicas y durabilidad química sean superiores a las del cemento Portland. Se busca que su proceso de fabricación genere menos dióxido de carbono que el cemento convencional, a través del uso de desechos como las cenizas que producen las plantas termoeléctricas y los relaves mineros (Minería chilena, 2018).

- **Propuesta chilena:**

- La Facultad de Ingeniería de la Universidad Andrés Bello se encuentra desarrollando una investigación que apunta hacia esta misma dirección. De acuerdo a los estudios mineralógicos y químicos que han realizado en los relaves, la presencia de alúmina ( $Al_2O_3$ ), sílice ( $SiO_2$ ) y un activador alcalino tal como hidróxido de sodio ( $NaOH$ ) permitirían la creación de geopolímeros. Éstos son cementos que se caracterizan por presentar resistencia química y térmica, buenas propiedades mecánicas, bajos niveles de emisiones de  $CO_2$  y menores costos de producción. Juan Céspedes, director de la carrera de Ingeniería en Minas, explica que si bien para neutralizar los metales pesados que

poseen los relaves existen técnicas de micro-encapsulamiento, dicha tecnología dependerá del tipo de residuo (Minería chilena, 2018).

- Un ambicioso proyecto sustentable está desarrollando Olga Penagos Piñeros, ingeniera civil y magister en gestión y derecho ambiental, en el cual desarrolla una técnica en la construcción de adoquines en base a residuos mineros y conchas marinas, iniciativa que se orienta a la construcción de parques, plazas y miradores turísticos en Iquique. La investigación, que se encuentra en su segunda etapa, se denomina Minewastecement (MWC) y es apoyada por Corfo a través del instrumento “Validación y Empaquetamiento de Innovaciones basados en I+D” y la carrera de Ingeniería Civil en Metalurgia de la Unap. La investigación concluyó que la mezcla MWC lograr crear bienestar social a través de su empleo en el rubro de la construcción y otros que sean de interés, de tal forma que se desarrolle un modelo de negocio exitoso para la industrialización y comercialización. En suma, se demuestra que ambientalmente no se genera un importante impacto de este producto en sus diferentes usos en la construcción y obras de ingeniería, principalmente mediante el estudio de especies vivas, animales o vegetales que se pongan en contacto con los adoquines. Hoy en día el proyecto se encuentra en proceso para la construcción de un mirador turístico en el sector de la Cuesta del Toro en Alto Hospicio (CORFO, 2016).

## 4 METODOLOGÍA.

### 4.1 PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DEL BALANCE DE MASA EN LA PLANTA DE ESPESAJE DE DET.

El balance de masa de agua, sólidos y pulpa en la planta de espesamiento, se desarrolló a partir de la extracción de los siguientes datos operacionales diarios: Caudal de alimentación, caudal de agua clara, y porcentaje de sólidos de la descarga interior y exterior de cada uno de los espesadores, para todo el año 2017, donde los datos extraídos fueron valores promedios diarios entregados por el programa PI System que posee la compañía, el cual reporta constantemente datos en línea de las variables operacionales más importantes de los equipos, en la Figura 4.1 se puede observar el esquema de un espesador y los valores que va entregando el software durante la operación del equipo.



**Figura 4.1** Esquema extraído desde PI System de un espesador.

A partir de la Figura 4.1, se puede apreciar que para desarrollar el balance de masa en cada espesador hay que resolver un sistema de ecuaciones, donde las

incógnitas para cada uno de ellos son: Flujo másico de la descarga, y porcentaje de sólidos en el flujo de alimentación. Con esto se puede llegar a:

$$B. G.: F_a = F_{ac} + F_d \quad (1)$$

$$B. S.: w_a \times F_a = w_d \times F_d \quad (2)$$

$$\rho_p = \frac{F_p}{Q_p} \quad (3)$$

$$\rho_p = \frac{\rho_s \rho_f}{\rho_s(1 - w) + \rho_s w} \quad (4)$$

$$w_d = P_{d1} \times w_{d1} + P_{d2} \times w_{d2} \quad (5)$$

$$P_{d1} = \frac{w_{d1}}{w_{d1} + w_{d2}} \quad (6)$$

$$P_{d2} = \frac{w_{d2}}{w_{d1} + w_{d2}} \quad (7)$$

En donde:

$F_a$ : Flujo másico de pulpa de alimentación a un espesador.

$F_{ac}$ : Flujo másico de agua clara que rebalsa de un espesador.

$F_d$ : Flujo másico de pulpa que se descarga de un espesador.

$F_p$ : Flujo másico de pulpa.

$P_{d1}$ : Promedio de la fracción de sólidos en la descarga interior de un espesador.

$P_{d2}$ : Promedio de la fracción de sólidos en la descarga exterior de un espesador.

$\rho_f$ : Densidad del líquido.



$\rho_p$ : Densidad de pulpa.

$\rho_s$ : Densidad del sólido.

$\rho_{\text{sólido}}$ : Densidad del sólido.

$w_a$ : Fracción de sólidos en masa en el flujo de alimentación a un espesador.

$w_d$ : Fracción de sólidos en masa en el flujo de descarga de un espesador.

Nota: A partir de la ecuación (4) se puede determinar las densidades de pulpa tanto de la alimentación como de la descarga. Se considera una densidad del material sólido de 2.71 ton/m<sup>3</sup> y del líquido de 1 ton/m<sup>3</sup> (IM2, 2009).

Reordenado el sistema de ecuaciones y resolviéndolo, se puede llegar a:

$$w_a = \frac{Q_a(-\rho_s + \rho_s w_d - w_d) + Q_{ac}(-\rho_s^2 w_d + \rho_s^2 + \rho_s w_d)}{Q_a\left(\frac{-\rho_s}{w_d} + \rho_s - 1\right) + Q_{ac}(-\rho_s^2 w_d + \rho_s w_d + \rho_s^2 - \rho_s + \rho_s w_d - w_d)}$$

$$Q_d = \frac{Q_a w_a}{w_d} \times \frac{\rho_s(1 - w_d) + w_d}{\rho_s(1 - w_a) + w_a}$$

En donde:

$Q_a$ : Flujo volumétrico de pulpa de alimentación.

$Q_{ac}$ : Flujo volumétrico de agua clara del rebalse de cada espesador.

$Q_d$ : Flujo volumétrico de pulpa de descarga.

Para el resto de los espesadores el procedimiento es análogo.

Con estos resultados se puede obtener las cantidades respectivas de agua, sólidos y pulpa que ingresan y egresan diariamente en cada espesador. Luego, al sumar los 7 flujos máxicos de sólidos de la descarga de cada uno de estos

equipos, se obtiene la cantidad de sólidos que va a la canaleta de relaves para su posterior disposición en el embalse Carén. Cabe destacar que a partir de este flujo másico de sólidos, se pudo dimensionar los equipos de espesamiento y filtración para la instalación de la planta de relaves en pasta y la planta de relaves filtrados respectivamente, empleando adicionalmente los siguientes valores entregados por empresas proveedoras:

- Dimensionamiento base para un espesador Paste Thickener Dorr Oliver: 0,058 [m<sup>2</sup>/tpd], para un porcentaje de sólidos de la descarga de 68 %p/p. Es importante mencionar que para lograr relaves en pasta en DET se necesita un 67 %p/p de la pulpa, empleando un criterio de yield stress de 150 Pa, valor que se considera límite inferior para caracterizar a una pulpa como pasta (IM2, 2009).
- Tasa de filtración para filtros Belt Filters Delkor: 0,54 [t/h-m<sup>2</sup>], considerando una humedad de diseño para el material filtrado de 22 %p/p y que cada equipo posee un área efectiva de filtración de 200 m<sup>2</sup> (IM2, 2009).

Es importante señalar que para la realización del balance de masa adicionalmente se extrajeron los siguientes datos desde PI System: Caudal de agua clara, turbidez del agua clara, nivel de la interfaz de agua clara, caudal de alimentación, porcentaje del Process Value y del Set Point de cada una de las válvulas de descarga y alimentación a cada espesador, porcentaje de sólidos de la descarga interior y exterior de cada equipo de espesamiento, torque de las rastras norte y sur de los espesadores y el nivel de las rastras. Estas variables fueron analizadas con el fin de filtrar los datos en momentos cuando los equipos se encontraban detenidos, presentaban valores negativos en las mediciones, o bien, no existían valores operacionales, etc.



#### 4.2 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE INSTALAR UNA PLANTA DE RELAVES EN PASTA Y UNA PLANTA DE RELAVES FILTRADOS EN DET.

La evaluación económica de instalar una planta de relaves en pasta y una planta de relaves filtrados se basó en la determinación de los siguientes indicadores económicos: CAPEX, OPEX, tiempo de vida útil, VAC, CAUE y CPTD de cada uno de los proyectos, basados en la cantidad de relaves que genera DET, lo cual se determinó a partir del balance de masa en la planta de espesaje de esta empresa. A continuación se presenta el procedimiento que se utilizó para poder determinar cada uno de los indicadores económicos mencionados previamente.

En primer lugar, la evaluación económica de ambos proyectos constó básicamente en la determinación del CAPEX y OPEX de las respectivas plantas. A continuación se presenta como determinar estos indicadores económicos.

- **CAPEX o capital total:** Este valor se obtuvo como la suma del capital fijo, con el capital de trabajo, y con los gastos de puesta en marcha. A continuación se describe como se calculó cada uno de estos puntos.
  - **Capital fijo:** Este valor se refiere a las inversiones necesarias para la adquisición de los equipos y su instalaciones, y todos los gastos necesarios para que la planta quede en condiciones de operar (Zamosa, 1996), es decir, corresponde a la suma de los costos directos (costos fijos de compra e instalaciones), con los costos indirectos (costos variables de ingeniería, construcción, etc.).

Dado que DET proporcionó costos de fechas pasadas de equipos, maquinarias, etc., de diferentes capacidades, se determinó el capital fijo de las plantas por reactualización de precios y escalamiento, lo cual se explica a continuación.

Si se desea determinar aproximadamente el costo de un equipo A para la fecha actual, conociendo los de otro similar B para la misma fecha, el costo del equipo A puede obtenerse aplicando la siguiente relación.

$$C_A = C_B \times (X_A/X_B)^n$$

En donde:

$X_A$ : Capacidad de un equipo A.

$X_B$ : Capacidad de un equipo B.

$C_A$ : Costo del equipo A.

$C_B$ : Costo del equipo B.

$n$ : Constante empleada para el escalamiento de los costos.

Análogamente, si se desea determinar aproximadamente el costo de un equipo A para la fecha actual con una cierta capacidad, conociendo los de otro similar B a una fecha pasada de la misma capacidad, el costo del equipo A puede obtenerse aplicando la siguiente relación.

$$C_A = C_B \times \frac{I_A}{I_B}$$

En donde:

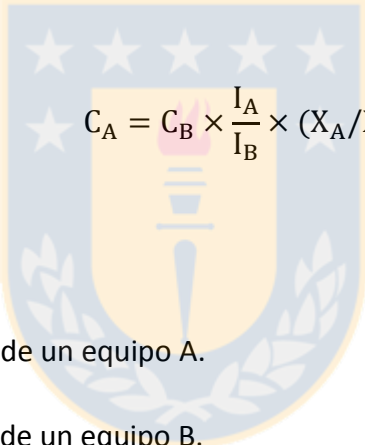
$C_A$ : Costo del equipo A.

$C_B$ : Costo del equipo B.

$I_A$ : Índice de costo del equipo A a fecha determinada.

$I_B$ : Índice de costo del equipo B a una fecha pasada.

Adicionalmente, si se desea determinar aproximadamente el costo de un equipo A para la fecha actual, conociendo los de otro similar B a una fecha pasada de diferente capacidad, el costo del equipo A puede obtenerse aplicando la siguiente relación.



$$C_A = C_B \times \frac{I_A}{I_B} \times (X_A/X_B)^n$$

En donde:

$X_A$ : Capacidad de un equipo A.

$X_B$ : Capacidad de un equipo B.

$C_A$ : Costo del equipo A.

$C_B$ : Costo del equipo B.

$I_A$ : Índice de costo del equipo A a fecha determinada.

$I_B$ : Índice de costo del equipo B a una fecha pasada.

$n$ : Constante empleada para el escalamiento de los costos.

Los índices más utilizados para reactualizar el costo de equipos y plantas de procesos, son los índices de Marshall and Swift, los cuales son publicados todos los años en la revista Chemical

Engineering. En el ANEXO D se presentan los índices de costos que se emplearon para la reactualización y escalamiento de precios para la evaluación económica de instalar una planta de relaves en pasta y una planta de relaves filtrados entre los años 1982 a 2017. Cabe destacar que esta ecuación es válida para una cota máxima de 5 años, y para aquellas inversiones con moneda nacional en que no se alcanzó la fecha actual, se reactualizó el valor de la inversión con fecha pasada a valor monetario de hoy con la siguiente ecuación.

$$VF = VI \times \frac{IPC_F}{IPC_I} \times \frac{TC_I}{TC_F}$$

En donde:

$V_I$ : Valor inicial.

$V_F$ : Valor final.

$IPC_I$ : Índice de Precios al Consumidor a una fecha pasada.

$IPC_F$ : Índice de Precios al Consumidor a una fecha determinada.

$TC_I$ : Tasa de Cambio a una fecha determinada.

$TC_F$ : Tasa de Cambio a una fecha pasada.

Adicionalmente, para aquellas inversiones con moneda estadounidense en que no se alcanzó la fecha actual, se reactualizó el valor de la inversión con fecha pasada a valor monetario de hoy con la siguiente ecuación.

$$VF = VI \times \frac{IPC_F}{IPC_I} \times \frac{IPM_F}{IPM_I}$$

En donde:

$V_I$ : Valor inicial.

$V_F$ : Valor final.

$IPC_I$ : Índice de Precios al Consumidor a una fecha pasada.

$IPC_F$ : Índice de Precios al Consumidor a una fecha determinada.

$IPM_I$ : Índice de Precios del Mercado a una fecha pasada.

$IPM_F$ : Índice de Precios del Mercado a una fecha determinada.

En el ANEXO E se detallan los costos de referencia de cada uno de los componentes de ambas plantas para el escalamiento y reactualización de precios de cada uno de éstos.

Por su parte, una vez escalados y reactualizados los precios de cada uno de los componentes de la planta sin instalar, se procedió a calcular la inversión en cañerías, instrumentación, instalaciones auxiliares, más los costos indirectos y otros anexos mediante una serie de factores que se aplican al valor de los equipos de proceso para determinar los costos totales en que incurriría la inversión de capital fijo, estos cálculos se pueden visualizar en el ANEXO F.

- **Capital de trabajo:** Algunos autores lo estiman en un 15% a 20% del valor del capital fijo (Zamosa, 1996), y se refiere a aquella inversión necesaria para que la planta ya instalada pueda operar, comprendiendo las necesidades para la adquisición de materias primas, insumos diversos, pago de sueldos y salarios y todo aquel gasto operacional, el que se determina por un cierto periodo de tiempo (Zamosa, 1996), o dicho de otra forma, se refiere a la

inversión en que incurre la planta para llevar a cabo sus actividades con normalidad en el corto plazo. Para efectos de esta tesis se escogió un valor del 20% del valor del capital fijo.

- **Gastos de puesta en marcha:** Algunos autores estiman estos gastos en alrededor de un 8% a 10% del capital fijo (Zamosa, 1996), y se refiere a aquella inversión necesaria en que debe incurrir la planta de espesamiento a pasta y la planta de relaves filtrados para el inicio de sus actividades. Para efectos de esta tesis se escogió un valor del 10% del valor del capital fijo.
- **OPEX o Costos de operación:** Este valor se determinó como la suma de los costos directos o variables de operación, con los costos indirectos o fijos de operación, y con los gastos generales de la planta, y corresponden sólo a los costos relacionados con la producción y operación de la planta. A continuación se describe como se calculó cada uno de estos puntos.
  - **Costos directos de operación:** Estos costos reciben el nombre de directos, debido a que dependen directamente de la producción, y a la vez son variables, pues varían al variar la producción, a diferencia de los costos fijos, los cuales permanecen constantes cualquiera que sea la producción (Zamosa, 1996). Para efectos de esta tesis se consideraron los costos de reactivos (floculante), costos de suministros (electricidad), sueldos (supervisores, mantenedores y operadores), costos de mantenimiento y reparaciones, y otros costos relacionados a gastos y suministros de fábrica, tales como ropa de trabajo de los obreros, cartas de los instrumentos, materiales de aseo y limpieza, lubricación, etc., todo lo cual puede estimarse en un 15% del costo total de

mantenimiento, además, también hay que considerar los gastos de laboratorio y reactivos para los análisis, lo cual para un cálculo aproximado se puede estimar en un 10-20% del costo correspondiente al personal de operación (Zamosa, 1996), y que para efectos de esta tesis se escogió un 15%.

- **Costos indirectos o fijos de operación:** Estos costos reciben el nombre de fijos pues aunque la planta está detenida, siguen afectando a la economía de la industria, y por lo tanto deben ser contabilizados (Zamosa, 1996). Para efectos de esta tesis se consideraron sólo los costos de seguros de equipos, edificios y los de las diversas instalaciones de la planta. Para los equipos y maquinarias en condiciones normales de operación, estas primas en la mayoría de los países son del orden del 0,5 al 1% sobre el valor del bien asegurado (Zamosa, 1996), y para efectos de esta tesis se escogió un valor de un 1%. Para edificios estas primas pueden oscilar entre 0,3 a 0,8% (Zamosa, 1996), y para efectos de esta tesis se escogió un valor de un 0,8%.
- **Gastos generales de la planta:** En estos gastos deben incluirse los correspondientes a los siguientes servicios y departamentos: administración de la planta, departamento del personal, contabilidad, oficina de pago de la planta, ingeniería general, laboratorios de control, enfermería o clínica de la planta, servicios de seguridad, servicios generales de mantenimiento y talleres, restaurant y casino, portería y vigilancia, servicios de comunicaciones, etc (Zamosa, 1996). Estos gastos se pueden estimar entre un 50 y un 100% de los costos totales que demande

el personal de operación y mantenimiento, incluyendo los supervisores respectivos (Zamosa, 1996).

- **Tiempo de vida útil:** Para la determinación de la vida útil del proyecto de instalar una planta de relaves en pasta se consideró el valor del volumen máximo de relaves que está permitido depositar de esta forma en el lugar de disposición final y el flujo volumétrico de pulpa de alta densidad que se estaría depositando en él, luego, con estos valores se puede calcular la vida útil del proyecto de la siguiente manera:

$$t_{\text{útil}} = \frac{V_{\text{permitido}}}{Q_{\text{pasta}}}$$

En donde:

$t_{\text{útil}}$ : Tiempo de vida útil.

$V_{\text{Permitido}}$ : Volumen de material sólido de relave que está permitido depositarlo sobre el nivel de las lamas del embalse Carén.

$Q_{\text{Pasta}}$ : Flujo volumétrico de relave a la forma de pasta.

Por su parte, para la determinación de la vida útil del proyecto de instalar una planta de relaves filtrados se consideró el valor del volumen máximo de relaves que está permitido depositar de esta forma en el lugar de disposición final y la capacidad de los camiones de transporte de los relaves filtrados, luego, con estos valores se puede calcular la vida útil del proyecto de la siguiente manera:

$$t_{\text{útil}} = \frac{V_{\text{permitido}}}{N \times C}$$



En donde:

$t_{\text{útil}}$ : Tiempo de vida útil.

$V_{\text{Permitido}}$ : Volumen de material sólido de relave que está permitido depositarlo sobre el nivel de las lamas del embalse Carén.

C: Capacidad de cada camión.

N: Número de camiones.

Seguidamente, una vez calculados los valores de CAPEX, OPEX y tiempo de vida útil de los proyectos de instalar una planta de relaves en pasta y una planta de relaves filtrados a partir de las evaluaciones económicas respectivas, se procedió a multiplicar los valores del costo de capital total y el de operación por 1,25 (25 % de contingencias), lo cual entrega el valor del CAPEX y OPEX final total, esto se realizó con el fin de cubrir variaciones de costos que pueden ocurrir pero para los cuales un alcance específico no se puede identificar o establecer a partir de los planos, o documentos, de acuerdo al nivel de ingeniería con el que se cuenta.

Posteriormente se procedió al cálculo de los demás indicadores económicos (VAC, CAUE y CPTD) que permiten visualizar la rentabilidad del proyecto comparado con el anteproyecto (continuar con el peralte del muro del embalse Carén desde la etapa 7 a la 12). A continuación se explica el cálculo de cada uno de estos indicadores económicos.

- **VAC o valor actual de costos:** Este indicador económico representa la sumatoria de todos los costos de operación e inversiones de un proyecto a lo largo de toda su vida útil en moneda de hoy, y se calculó con la siguiente ecuación:

$$VAC = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}$$

En donde:

$C_t$ : Valor del flujo un flujo de caja en el periodo t.

$I_0$ : Inversión inicial.

i: Tasa de interés.

n: Años de vida de los proyectos, para el cálculo de los indicadores económicos.

- **CAUE o costo anual unitario equivalente:** Este indicador económico corresponde a todos los desembolsos en que incurre la planta convertidos en una cantidad anual uniforme equivalente que es la misma para cada periodo de la vida útil del proyecto, y se calculó con la siguiente ecuación:

$$CAUE = VAC \times \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

En donde:

i: Tasa de interés.

n: Años de vida de los proyectos, para el cálculo de los indicadores económicos.

- **CPTD o costo promedio por tonelada depositada:** Este valor corresponde a los costos anuales en que debe incurrir la planta por unidad de tonelada de relave seco que se deposite en el lugar de disposición final del pasivo ambiental, y se calculó con la siguiente ecuación:

$$\text{CPTD} = \text{CAUE} / \dot{m}_{\text{sólido}}$$

En donde:

$\dot{m}_{\text{sólido}}$ : Flujo másico de sólidos.

Cabe destacar que los flujos de caja del anteproyecto (continuar con el método actual de peralte del muro desde la etapa 7 a la 12) no se presentan en esta tesis puesto que los valores de CAPEX, OPEX y tiempo de vida útil se encontraban como datos en informes de DET, sin embargo, las consideraciones para su realización se encuentran en el ANEXO G, luego, para este apartado sólo se incurrió al cálculo de los indicadores VAC, CAUE y CPTD, los que se obtuvieron de forma análoga al caso de instalar una planta de relaves en pasta y una planta de relaves filtrados.

- **Análisis de sensibilidad:** En la evaluación de la rentabilidad de un proyecto se puede observar que existen una serie de factores y parámetros que son susceptibles de sufrir variaciones (Zamosa, 1996), y que por lo tanto afectan la evaluación económica del proyecto y a los indicadores económicos que se calculan de ella. El análisis de sensibilidad estudia todas las posibles fluctuaciones de los parámetros que puedan afectar la rentabilidad de un proyecto (Zamosa, 1996). Para efectos de esta tesis se escogió la variación del flujo másico de sólidos que es tratado en la planta de espesamiento y en la planta de filtros, puesto que esta variable influye en la cantidad de compra de casi todos los equipos y maquinarias de la planta y sus costos anuales, además de afectar la vida útil del proyecto.

#### **4.3 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DE MERCADO DE FABRICAR ADOQUINES EN BASE A RELAVES.**

Para el estudio de mercado de reemplazar las arcillas o el cemento por relaves de cobre de El Teniente en la fabricación de ladrillos, se procedió a analizar las siguientes variables del mercado local (nivel país) y global, a través de una revisión bibliográfica:

- Demanda local y global por las arcillas y el cemento.
- Oferta local y global por las arcillas y el cemento.
- Consumo per cápita local y global por las arcillas y el cemento.
- Costos y utilidades en que se incurriría en caso de instalar una planta de fabricación de adoquines utilizando relaves.

NOTA:

Para este apartado sólo se intenta que el lector visualice de forma general el impacto que traería ocupar los relaves en la fabricación de ladrillos en la economía de Chile y el mundo reemplazando a la industria tradicional, bajo el caso hipotético de que en DET se implemente la tecnología de relaves filtrados para tratar sus relaves y de esta forma incurrir de forma inmediata a la fabricación de los adoquines.

## 5 RESULTADOS Y DISCUSIONES.

### 5.1 RESULTADOS DEL BALANCE DE MASA EN LA PLANTA DE ESPESAJE DE DET.

A partir de la resolución del balance de masa dentro de la planta de espesamiento con los valores promedios diarios de caudal de agua clara, caudal de pulpa de alimentación, y porcentajes de sólidos de descarga interior y exterior de cada espesador para cada día del año 2017, se llegó a los siguientes resultados:

**Tabla 5.1** Resultados del balance de masa en la planta de espesaje de DET.

Variable	Valor
$\bar{F}_a$ [ktpd]	<b>507,04</b>
$\bar{F}_{ac}$ [ktpd]	243,77
$\bar{F}_d$ [ktpd]	263,27
$\bar{F}_{s,a}$ [ktpd]	136,90
$\bar{F}_{s,d}$ [ktpd]	136,90
$\bar{F}_{a,a}$ [ktpd]	370,14
$\bar{F}_{a,d}$ [ktpd]	126,37
$\bar{w}_a$	0,27
$\bar{w}_d$	0,52

En donde:

$\bar{F}_a$ : Flujo másico promedio de pulpa de alimentación a un espesador.

$\bar{F}_{ac}$ : Flujo másico promedio de agua clara que rebalsa de un espesador.

$\bar{F}_{a,a}$ : Flujo másico promedio de agua de alimentación a un espesador.

$\bar{F}_{a,d}$ : Flujo másico promedio de agua que se descarga de un espesador.

$\bar{F}_d$ : Flujo másico promedio de pulpa que se descarga de un espesador.

$\bar{F}_{s,a}$ : Flujo másico promedio de sólidos de alimentación a un espesador.

$\bar{F}_{s,d}$ : Flujo másico promedio de sólidos que se descarga de un espesador.

$\bar{w}_a$ : Fracción de sólidos en masa promedio en el flujo de alimentación a un espesador.

$\bar{w}_d$ : Fracción de sólidos en masa promedio en el flujo de descarga de un espesador.

De acuerdo a la Tabla 5.1 es claro ver que:

- Actualmente en DET se recirculan a la planta concentradora 243,77 ktpd de agua ( $243,77 \text{ m}^3$ ) provenientes del rebalse de los espesadores de la planta de espesaje, lo que trae subsecuentes ahorros en los gastos en que deben incurrir las etapas de molienda húmeda.
- El flujo másico de sólidos de entrada y salida de la planta de espesaje da como resultado 136,90 ktpd, valor menor que la capacidad nominal de la planta concentradora y que la misma planta de espesaje, por lo que existe una fracción de capacidad ociosa en ambas plantas.
- Los 136,90 ktpd de sólidos junto con los 126,37 ktpd de agua de descarga de los espesadores, son conducidos a través de una canaleta hasta su disposición final en el embalse de relaves Carén.

El relave formado posee un porcentaje de sólidos cercado a 52%, valor alejado incluso para disponerlo a la forma de relaves espesados, luego, el residuo

corresponde simplemente a una pulpa de mayor densidad. Sin embargo, este aumento en la concentración de sólidos previo a la disposición final del pasivo ambiental, permite evaluar 2 vías alternativas para disponer los relaves, la primera es instalar una planta de espesadores de pasta, y la segunda es instalar una planta de filtros para relaves, con el fin de disponer al sólido en forma de pasta o un material filtrado respectivamente. La evaluación económica de estas dos alternativas se muestran en la sección 5.2 del presente documento, realizadas a partir de los resultados de la presente sección, en particular, el flujo total de sólidos de descarga de la planta de espesaje.

## **5.2 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE CONTINUAR CON EL PERALTE DEL MURO, INSTALAR UNA PLANTA DE RELAVES EN PASTA E INSTALAR UNA PLANTA DE RELAVES FILTRADOS EN DET.**

### **5.2.1 CONSIDERACIONES PARA INSTALAR UNA PLANTA DE RELAVES EN PASTA.**

NOTA:

Los valores presentados en estas consideraciones son resultados escalados y actualizados a la fecha de hoy desde informes y contratos de DET con empresas de ingeniería, el detalle de costos a su fecha de referencia se encuentran en el ANEXO E.

Esta alternativa consiste en disponer a los relaves espesados a pasta a la forma de pilas con pendientes laterales de 7 %, cuya altura máxima de las pilas alcanzarían 88 m de altura sobre el nivel de las lamas al término de la sexta etapa de construcción del embalse Carén, que permiten el almacenamiento de 463.000.000 m<sup>3</sup> (MWH, 2003b). Los relaves que se consideran con un 50 %p/p de sólidos serán espesados en una planta ubicada en el punto A que se

presenta en la Figura 5.1, y posteriormente serán impulsados por medio de un grupo de bombas hidráulicas y de desplazamiento positivo a través de ductos HDPE hasta los diversos puntos de colocación que estarán próximos al punto B de la Figura 5.1. En el escenario de producción de 140.000 ton/día, esta alternativa tendría una duración inicial estimada de 11 años.



**Figura 5.1** Ubicación de la planta de espesaje y la del depósito de relaves espesados a pasta.

La alternativa de relaves espesados a pasta involucra el suministro, construcción e implementación de los siguientes ítems:

- **Planta de espesamiento:** Espesadores de pasta, obras civiles, sistemas mecánicos de impulsión de pulpas (bombas), sistemas de distribución de pulpas (piping), instrumentos de medición (instrumentación), equipos y salas de eléctricas (sistemas y equipos eléctricos).
- **Suministro de energía eléctrica:** Subestación eléctrica y línea de alta tensión.



- **Canales de contorno:** Obras civiles.
- **Investigaciones y planta piloto.**
- **Reactivos:** Floculante.
- **Personal:** Supervisores, operadores y mantenedores.

Para hacer comparables los indicadores económicos, en particular, el VAC, CAUE y CPTD, se ha considerado el mismo calendario de inversión utilizado para la alternativa de depositación tradicional Luego, Se considera que se requiere de 1 año de plazo para la construcción de todas las obras necesarias (año 2018). Cada uno de los ítems se describe a continuación.

- **Costos de construcción:**
  - **Espesadores:** Se ha determinado que para un escenario de producción de 140.000 ton/día se requieren 6 espesadores Paste Thickener Dorr Oliver de 45 metros de diámetro cada uno considerando un dimensionamiento base de 0,058 m<sup>2</sup>/tpd (IM2, 2009), con un costo total de capital por cada equipo de espesamiento de MUS\$ 7,86, valor escalado y actualizado a fecha de hoy. Cabe destacar que el relave de DET debe contener un 67% de sólidos para ser considerado pasta, valor obtenido de pruebas reológicas por parte de Outotec, utilizando como criterio un yield stress de 150 Pa, el cual se considera límite inferior para caracterizar una pulpa como pasta (IM2, 2009).
  - **Obras civiles:** Este ítem corresponde a todas aquellas obras necesarias para el movimiento de tierras para la instalación de plataformas para

obras de hormigón, salas eléctricas, salas de control, fundaciones, etc. Este valor se estimó en MUS\$ 2,28 de capital fijo total, valor que fue actualizado y escalado a moneda de hoy.

- **Sistemas mecánicos:** Este inciso corresponde al costo total de bombas hidráulicas y de desplazamiento positivo para el transporte de la pasta a su punto de disposición final, y se estimó en un valor global de MUS\$ 4,14, cuyo valor fue escalado y actualizado a moneda del 2018.
- **Piping:** Para este inciso se estimó un valor total de costos directos e indirectos de MUS\$ 5,35, y corresponde al valor global escalado y actualizado a moneda de hoy para la compra y montaje de todas las cañerías y válvulas para el correcto funcionamiento del sistema de transporte de relaves.
- **Instrumentación:** Este apartado corresponde al costo global de toda la instrumentación necesaria para el funcionamiento de la planta, junto a los costos asociados a la unión con el sistema de control global a Rancagua. Se estimó este valor en MUS\$ 1,75 entre costos directos e indirectos en moneda de hoy.
- **Sistemas y equipos eléctricos:** Este ítem corresponde a la adquisición y montaje de motores, salas eléctricas, gabinetes y tableros, centro de control de motores, centros de distribución, transformadores, generadores, cables, etc. Este valor se estimó en MUS\$ 2,18 en moneda de hoy entre costos directos e indirectos.
- **Suministro de Energía:** Para abastecer la demanda de potencia estimada de los equipos, se requiere la construcción de una línea alta



a pasta, con la que se determinarán las dimensiones y características de los equipos requeridos para una operación óptima de la alternativa. Se estima un costo aproximado de MUS\$ 3,98 para la implementación de la planta, valor en moneda de hoy que incluye tanto costos directos e indirectos del capital fijo.

- **Costos de operación:**

- **Costo de Energía Eléctrica:** Considerando el valor suministrado por la DET de US\$ 0,11 por kWh (GEDE, 2017), se determinaron los costos anuales asociados al consumo eléctrico de los equipos. Por su parte, se estimó que los costos energéticos del proceso de espesamiento propiamente tal es de US\$ 0,08, valor escalado y actualizado a fecha de hoy.
- **Reactivos:** Se estimó un valor de US\$ 0,013 para el floculante por tonelada de pulpa, valor escalado y actualizado a fecha de hoy.
- **Sueldos:** Este valor corresponde a US\$ 127.000 por año para supervisores y US\$ 76.000 para operadores y mantenedores de DET (GEDE, 2017).
- **Costo de Mantenimiento:** Se requerirán gastos de mantención que incluyan la compra y reemplazo de piezas, trabajos de mantención de equipos y conducciones. Se estimó un valor de un 5% del total del capital fijo de inversión de la planta de espesamiento a pasta junto a sus instalaciones anexas por año para estos efectos.

- **Costos de operación de la planta piloto:** El valor de este costo operacional fue evaluado en MUS\$ 0,31 en moneda del 2018.
- **Otros costos:** Este ítem se divide en dos tipos de costos, el primero corresponde a un 15% de los costos totales de mantenimiento, y el segundo a un 15% de los costos totales en que se incurre por personal de operación.
- **Seguros:** Este valor corresponde a un 1% de los costos fijo para las máquinas y a un 0,8% de los costos fijos de los edificios.
- **Gastos generales:** Se tiene un valor de US\$ 0.11 por tonelada depositada de relave.

Se asume que la construcción de las obras se inicia el año 2018, y que la operación comienza en el año 2019.

## 5.2.2 CONSIDERACIONES PARA INSTALAR UNA PLANTA DE RELAVES FILTRADOS.

NOTA:

Los valores presentados en estas consideraciones son resultados escalados y actualizados a la fecha de hoy desde informes y contratos de DET con empresas de ingeniería, el detalle de costos a su fecha de referencia se encuentran en el ANEXO E.

Esta alternativa consiste en módulos de relaves filtrados, dispuestos y compactados con métodos tradicionales de movimiento de tierras, para formar un relleno que alcanzaría los 75 metros de altura sobre el nivel de las

lamas al término de la sexta etapa de construcción del embalse Carén. Estos módulos permitirán el almacenamiento de  $1.083.000.000 \text{ m}^3$  (MWH, 2003b). Los relaves que se consideran con un 50 %p/p de sólidos serían filtrados en una planta ubicada en el punto A que se presenta en la Figura 5.3. Esta planta filtraría los relaves que serían transportados hasta su lugar de depositación a las cercanías del punto B de la Figura 5.3 por medio de una correa mecanizada. Desde allí, serían cargados sobre camiones que los llevan a sus puntos específicos de disposición final donde son distribuidos y compactados. En el escenario considerando de producción de 140.000 ton/día, esta alternativa tendría una duración inicial estimada de 34 años.



**Figura 5.3** Ubicación de la planta de filtros y la del depósito de relaves filtrados.

La alternativa de relaves filtrados involucra el suministro, construcción e implementación de los siguientes ítems:

- **Planta de filtros:** Filtros de bandas, obras civiles, sistemas mecánicos de impulsión del filtrado, sistemas de distribución del líquido filtrado, instrumentación, equipos y salas eléctricas.

- **Correa de distribución:** Obras civiles, instrumentación, equipos y salas eléctricas.
- **Suministro de energía eléctrica:** Línea de alta tensión y subestación eléctrica.
- **Canales de contorno:** Obras civiles.
- **Colocación y compactación:** Camiones, bulldozers y rodillos vibratorios.
- **Personal:** Supervisores, operadores y mantenedores.

Para hacer comparables los indicadores económicos, en particular, el VAC, CAUE y CPTD, se ha considerado el mismo calendario de inversión utilizado para la alternativa de depositación tradicional Luego, Se considera que se requiere de 1 año de plazo para la construcción de todas las obras necesarias (año 2018). Cada uno de los ítems se describe a continuación.

- **Costos de construcción:**
  - **Planta de Filtros:** Se precisa instalar una planta de filtros con una capacidad para procesar 140.000 ton/día, que tendría un costo aproximado de MUS\$ 183,79, lo cual representa a 55 Belt Filters de Delkor de 200 m<sup>2</sup> cada uno operando a una tasa de filtración de 0,54 t/h-m<sup>2</sup> y para una humedad final de diseño de 22 % (IM2, 2009), valor en moneda de hoy que incluye los costos de inversión directos e indirectos. Esta planta requiere una potencia igual o superior a 17.500 Hp (MWH, 2003b).

- **Correa de Distribución:** Los relaves ya filtrados son transportados a través de una correa mecanizada con un largo de 5,0 km (MWH, 2003b). Esta correa tiene un costo de US\$ 5003,42 por metro lineal entre costos directos e indirectos de operación en moneda de hoy, y consume una potencia de alrededor de 15.000 Hp (MWH, 2003b).
- **Suministro de Energía:** Al igual que la alternativa de relaves espesados a pasta, se ha determinado que se requiere la construcción de una línea de alta tensión de 66 kV, la cual se alimentaría en el poblado de Doñihue, y tendría una longitud aproximada de 25 km (MWH, 2003b). Se considera un costo aproximado de US\$ 100.651,35 por km trazado entre costos directos e indirectos en moneda de hoy. Adicionalmente, se requiere la construcción de una subestación eléctrica con un valor aproximado de MUS\$ 2,20 de capital fijo en moneda del 2018.
- **Canales de contorno:** Se ha determinado la construcción de un canal de contorno, que colectan las aguas del estero Carén y de las laderas de la cubeta para disponer el agua residual en el embalse Rapel, estos canales proyectados deberían ser excavados en suelo y en roca, donde a longitud total de canales de contorno se estimó en 47.800 m (ver Figura 5.4). Se determinó un costo de US\$ 602,41 por metro lineal de canal en promedio, valor a fecha de hoy que incluye tanto los costos directos e indirectos del capital fijo.





**Figura 5.4** Esquema del canal de contorno.

- **Costos de operación.**

- **Costo de Energía Eléctrica:** Considerando el valor suministrado por la DET de US\$ 0,11 por kWh (GEDE, 2017), se determinaron los costos anuales asociados al consumo eléctrico de los equipos.
- **Sueldos:** Este valor corresponde a US\$ 127.000 por año para supervisores y US\$ 76.000 para operadores y mantenedores de DET (GEDE, 2017).
- **Costos de Mantenimiento:** Se requerirán gastos de mantención que incluyan la compra y reemplazo de piezas, trabajos de mantención de equipos y conducciones. Se estimó un valor de un 5% del total del capital fijo de inversión de la planta de filtros junto a sus instalaciones anexas por año para estos efectos.

- **Colocación y Compactación:** El material acarreado por la correa debe ser finalmente distribuido, colocado y compactado. Esta operación se realiza según procedimientos tradicionales de movimientos de tierras. Para la determinación de estos costos se han considerado los siguientes equipos.
- ✓ **Camiones:** Se considera un valor US\$ 58,28 por hora de camión (precio actualizado al 2018), con una capacidad de 73 m<sup>3</sup>/h (MWH, 2003b). Si se asume una operación continua las 24 horas del día, se requerirán 49 camiones.
  - ✓ **Bulldozers:** Se requieren bulldozers para la distribución del material antes de ser compactado. Estos equipos tienen una capacidad aproximada de 700 m<sup>3</sup>/h (MWH, 2003b), y un costo de US\$ 109,57 por hora, precio actualizado al 2018. Considerando una operación continua las 24 horas del día, se requerirán 5 unidades.
  - ✓ **Rodillos Vibratorios:** Se encargan de la compactación del material. Estos equipos tienen un rendimiento aproximado de 200 m<sup>3</sup>/h (MWH, 2003b), y un costo de US\$ 50,12 por hora, precio actualizado al 2018. Considerando una operación continua las 24 horas del día, se requerirán 18 unidades.
- **Otros costos:** Este ítem se divide en dos tipos de costos, el primero corresponde a un 15% de los costos totales de mantenimiento, y el segundo a un 15% de los costos totales en que se incurre por personal de operación.

- **Seguros:** Este valor corresponde a un 1% de los costos fijo para las máquinas y a un 0,8% de los costos fijos de los edificios.
- **Gastos generales:** Se tiene un valor de US\$ 0.28 por tonelada depositada de relave, valor escalada y actualizado al 2018.

Se asume que la construcción de las obras se inicia el año 2018, y que la operación comienza en el año 2019.

### 5.2.3 INDICADORES ECONÓMICOS.

En base a las consideraciones anteriores, en la Tabla 5.2 se encuentran los indicadores económicos para la instalación de una planta de relaves en pasta (RP) y una planta de relaves filtrados (RF) para una capacidad de tratamiento de 140 ktpd, obtenidos a partir de los flujos de caja respectivos, además de los indicadores económicos de continuar con el peralte del muro (PM) desde la etapa 7 a la 12. El detalle de cálculo para la obtención de los indicadores económicos de instalar ambas plantas de tratamiento de relaves se encuentra en el ANEXO H.

**Tabla 5.2** Indicadores económicos de las diferentes alternativas de depositación de relaves evaluadas.

<b>Método/IC</b>	<b>CAPEX</b>	<b>OPEX</b>	<b>VAC</b>	<b>CAUE</b>	<b>CPTD</b>	<b>VU</b>
	<b>[MUS\$]</b>	<b>[MUS\$]</b>	<b>[MUS\$]</b>	<b>[MUS\$/año]</b>	<b>[MUS\$/ton]</b>	<b>[años]</b>
<b>RP</b>	182,51	18,67	305,89	42,85	0,84	11
<b>RF</b>	387,71	101,61	1.477,88	127,55	2,50	34
<b>PM</b>	803,24	3,40	367,91	31,10	0,61	38

Se puede observar que considerando tanto el CAPEX como el VAC de los costos totales de cada uno de los proyectos, se obtiene que la alternativa más económica corresponde a la instalar una planta de relaves en pasta, incluyendo una estación de bombeo para impulsar los relaves y así descargarlos por sobre la cota del actual túnel Carén. Sin embargo, la vida útil de este último proyecto es mucho menor que la de continuar con el peralte del muro del embalse (aproximadamente 3,45 veces inferior). Adicionalmente, los costos de operación anual resultan ser 5,49 veces superior que la alternativa de continuar con el peralte del muro desde la etapa 7 a la 12, lo que se ve reflejado en el valor de los costos promedios por tonelada depositada, que resultan ser aproximadamente 1,38 veces superior. Sin embargo, se puede aseverar que el CAPEX de la alternativa de sólo peraltar el muro para la etapa 7 actualizando el valor que se encuentra en el ANEXO G, es notoriamente inferior a la inversión y puesta en marcha que la alternativa de espesado a pasta de relaves (0.74 veces inferior).

Por su parte, la alternativa de disposición de relaves filtrados resulta económicamente no factible en vista de los altos costos de inversión y operación que involucra, ya que requiere elevadas cantidades de equipos de filtración, consumos elevados de energía eléctrica para la operación de los filtros, y de numerosos equipos pesados de movimientos de tierra para la formación y compactación de los depósitos. El costo promedio por tonelada depositada resulta ser 2,98 veces superior al valor proyectado que para la instalación y operación de una planta de relaves en pasta y 4,10 veces superior a la de continuar con el método tradicional de peralte del muro. Sin embargo, presenta un CAPEX 2,07 veces inferior al de peraltar el muro desde la etapa 7 a la 12, pero si se considera el levantamiento de esta estructura sólo para la etapa 7, actualizando el valor de inversión que se encuentra en el ANEXO G, se puede aseverar que la alternativa de filtrado de relaves resulta más cara que el

peralte del muro desde la perspectiva de todos los indicadores económicos calculados.

En resumen y en base a los resultados presentados en la Tabla 5.2, la alternativa con un menor costo promedio por tonelada depositada y un menor CAUE (indicador económico que se emplea para comparar proyectos con diferentes años de vida útil), después de finalizada la etapa 6 de crecimiento del embalse, corresponde a la continuar con el método tradicional de peralte del muro del embalse Carén. El costo estimado es 4,10 veces inferior al valor proyectado que para la instalación y operación de una planta de relaves filtrados y 1,38 veces inferior a la instalación y operación de una planta de relaves espesados a pasta.

Nota:

- La optimización del uso de los recursos durante la puesta en marcha de cada una de las alternativas puede considerar modificaciones en los criterios empleados. Por esta razón, se recomienda la realización de un estudio enfocado a lograr el máximo aprovechamiento de los recursos durante la construcción de las pilas y los domos.

#### **5.2.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.**

Adicionalmente al apartado anterior, se realizó un análisis de sensibilidad para las alternativas de instalar una planta de relaves en pasta y una planta de relaves filtrados, obteniéndose los resultados que se presentan en las Tablas 5.3 y 5.4 respectivamente, desde donde se pueden apreciar distintos indicadores de costos para diferentes casos hipotéticos de tratamiento de relaves, en donde la diferencia del flujo de pulpa no alcanzado a tratar por

ambas plantas es arrojado tradicionalmente al embalse Carén y por ende los peraltamientos del muro se verían aplazados.

NOTA:

Este análisis de sensibilidad tiene como fin buscar la alternativa que resulte lo más económicamente factible para un cierto flujo de tratamiento de relave, y que además maximice el incremento de la vida útil del embalse Carén (los indicadores económicos presentados en las tablas siguientes no adicionan las inversiones ni los costos operacionales de peraltar el muro simultáneamente al funcionamiento tanto de la planta de espesamiento como de la planta de filtros).

**Tabla 5.3** Indicadores económicos de la alternativa de instalar una planta de relaves en pasta para diferentes niveles de producción de relaves.

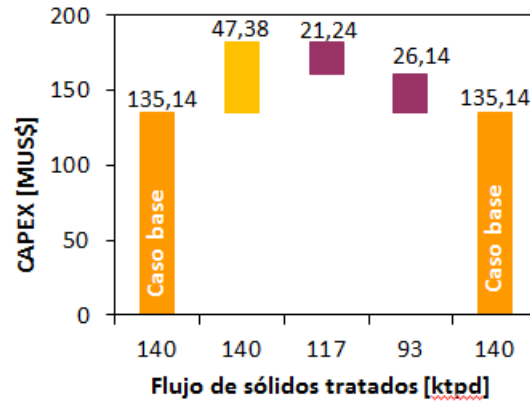
<b>Tonelaje/IC</b>	<b>CAPEX</b> [MUS\$]	<b>OPEX</b> [MUS\$]	<b>VAC</b> [MUS\$]	<b>CAUE</b> [MUS\$/año]	<b>CPTD</b> [MUS\$/ton]	<b>VU</b> [años]
<b>140</b>	182,51	18,67	305,89	42,85	0,84	11
<b>117</b>	161,27	17,02	285,82	36,16	0,85	13
<b>93</b>	140,04	15,13	264,00	29,83	0,88	16
<b>70</b>	118,80	13,28	244,27	23,95	0,94	22
<b>47</b>	97,56	11,75	222,87	19,36	1,13	33
<b>23</b>	76,33	10,00	191,40	15,40	1,83	67

**Tabla 5.4** Indicadores económicos de la alternativa de instalar una planta de relaves en filtrados para diferentes niveles de producción de relaves.

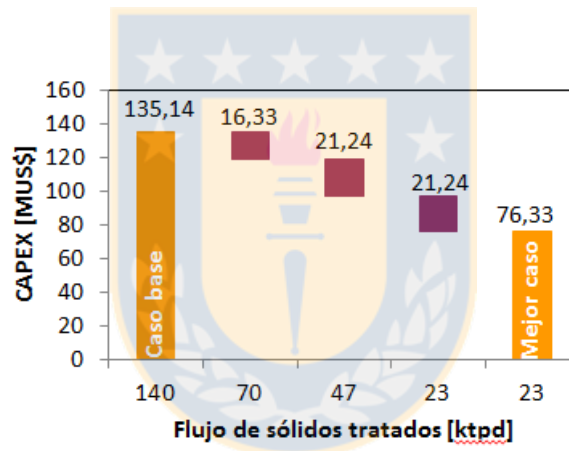
<b>Tonelaje/IC</b>	<b>CAPEX</b>	<b>OPEX</b>	<b>VAC</b>	<b>CAUE</b>	<b>CPTD</b>	<b>VU</b>
	<b>[MUS\$]</b>	<b>[MUS\$]</b>	<b>[MUS\$]</b>	<b>[MUS\$/año]</b>	<b>[MUS\$/ton]</b>	<b>[años]</b>
<b>140</b>	387,71	101,61	1.477,88	127,55	2,50	34
<b>117</b>	357,69	88,97	1.343,50	112,26	2,63	41
<b>93</b>	323,71	75,22	1.178,41	96,03	2,83	52
<b>70</b>	287,66	62,54	1.007,34	81,05	3,17	67
<b>47</b>	246,41	49,31	816,84	65,38	3,81	100
<b>23</b>	193,14	34,55	593,05	47,44	5,65	211

A partir de estas tablas es posible decir que:

- La alternativa de instalar una planta de relaves espesados a pasta se ve favorecida para su implementación en DET, ya que a medida que disminuye la cantidad del relave tratado por la planta de espesamiento, el CAPEX de inversión disminuye de manera considerable estando siempre por debajo del CAPEX de continuar con el método actual de peralte del muro desde la etapa 7 a la 12, es más, el CAPEX resulta inferior que sólo peraltar el muro para la etapa 7 si la planta de espesamiento comienza a tratar una cantidad menor a 70 ktpd de relave, lo cual se puede visualizar en las Gráficas 5.1 y 5.2.



**Gráfica 5.1** Disminución del CAPEX de instalar una planta de relaves espesados a pasta entre 140 a 93 ktpd de tratamiento del pasivo ambiental en comparación con peraltar el muro para la etapa 7.

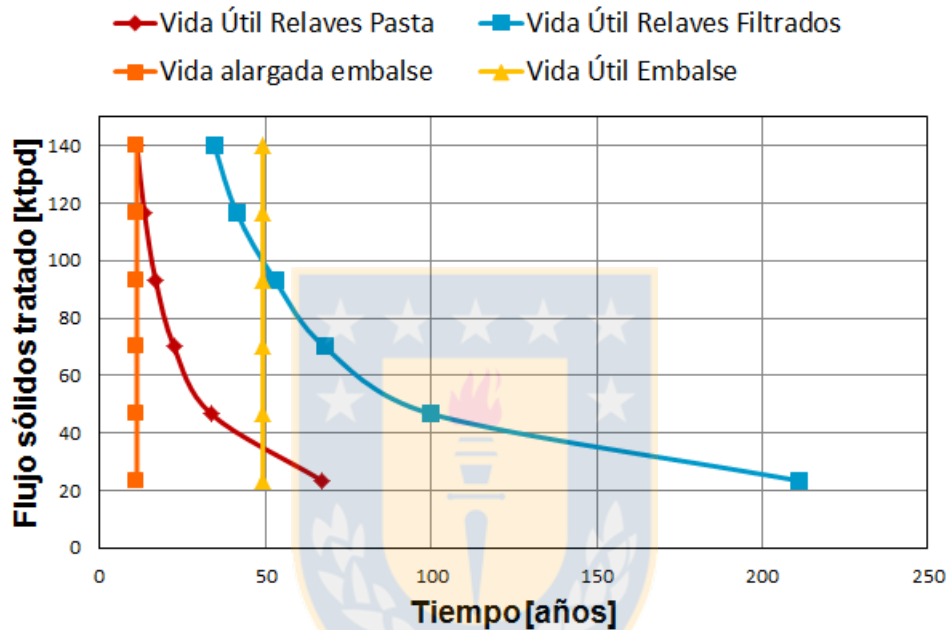


**Gráfica 5.2** Disminución del CAPEX de instalar una planta de relaves espesados a pasta entre 70 a 23 ktpd de tratamiento del pasivo ambiental en comparación con peraltar el muro para la etapa 7.

Sin embargo, los costos operacionales son siempre superiores a continuar con el método actual. Adicionalmente, los costos promedios por tonelada depositada y el CAUE (indicador económico que se emplea para comparar proyectos con diferentes años de vida útil) siempre son mayores al método de disposición actual del relave, cualquiera sea el nivel de tratamiento que tenga la planta de espesamiento (valor que incluye tanto al CAPEX y al



OPEX en su cálculo). Pese a esto último, la vida útil de esta iniciativa incrementa de manera exponencial con la disminución del pasivo ambiental tratado, alcanzando un máximo de 67 años para un flujo de relave tratado de 23 ktpd, alargando la vida útil del embalse en 11,2 años, lo cual se puede visualizar en la siguiente gráfica.



**Gráfica 5.3** Proyecciones de vida de los distintos métodos de disposición de relaves en función del tonelaje tratado.

A partir de esta última gráfica es posible visualizar la extensión de la vida útil del embalse Carén al tratar los relaves por la planta de espesamiento, desde donde se puede apreciar que la vida útil del embalse se ve prolongada en 11,2 años para todos los flujos del pasivo ambiental tratado por la planta de espesaje, además de la disminución de la vida útil de las alternativas de disposición de relaves en pasta y filtrados al aumentar el flujo másico tratado por estas plantas.

Luego, en base a la Gráfica 5.3, es posible discernir que no es necesario tratar todo el flujo másico de relaves para aumentar la vida útil del embalse Carén, ya que a bajos tonelajes de tratamiento por parte de la planta de espesamiento, la vida útil del embalse aumenta considerablemente (11,2 años para flujos de 70, 47 y 23 ktpd, para ambos métodos de disposición del relave).

- Por otro lado, independientemente del nivel de producción de relaves, la alternativa de disponer al pasivo ambiental a la forma de un material filtrado resulta extremadamente cara en comparación con el método de disposición actual que presenta DET, considerando todos los indicadores económicos calculados, a excepción del CAPEX, el cual es siempre menor al de continuar con el método actual, cualquiera sea el nivel tratamiento que procese la planta de filtros, sin embargo, el CAPEX de continuar con el método de disposición actual, considera la inversión de peraltar el muro para las siguientes 6 etapas restantes que le quedan de vida útil al embalse, luego, si se considera sólo el levantamiento del muro para la etapa 7, la alternativa de peralte del muro resulta más económica que instalar una planta de relaves filtrados desde el punto de vista de la inversión, cualquiera sea el nivel de tratamiento de la planta.
- Adicionalmente, comparando el método de disposición de relaves en pasta con el método de disposición de relaves filtrados, se puede observar que los costos promedios por tonelada depositada de la alternativa de pasta están siempre por debajo de la alternativa de relaves filtrados. De las Tablas 5.3 y 5.4, es posible inferir que la alternativa de relaves filtrados es aproximadamente 3,19 veces más cara que la alternativa de pasta, promediando los costos promedios por tonelada depositada de todos los niveles de tratamiento de relaves que procesen ambas plantas.

- Luego, a modo de síntesis, la alternativa que resulta más económica siempre resulta en continuar con el método actual de peralte de muro, cualquiera sea el nivel de tratamiento que procesen la planta de espesamiento y la planta de filtros.

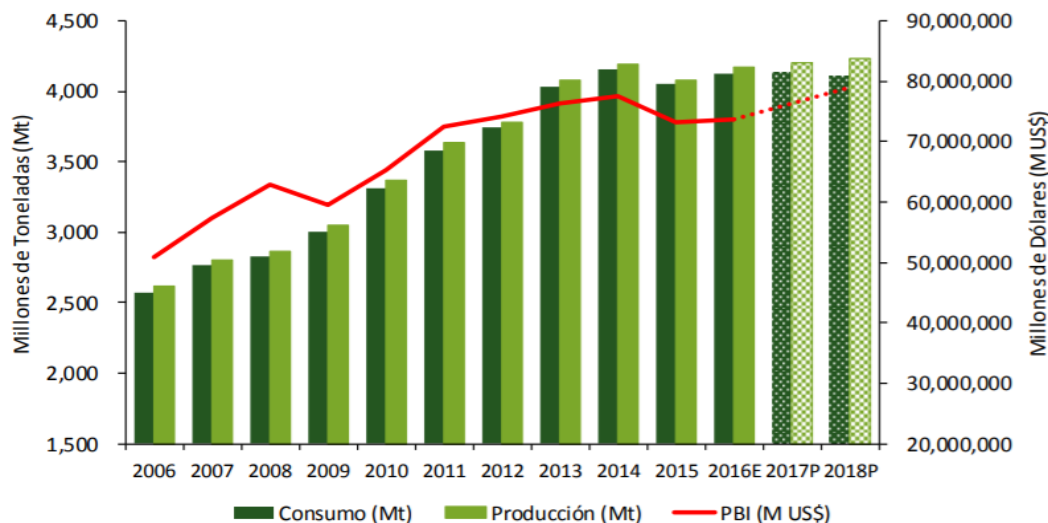
### **5.3 RESULTADOS DE LA FACTIBILIDAD DE MERCADO DE FABRICAR ADOQUINES EN BASE A RELAVES DE COBRE DE DET.**

Para este apartado se pretende que el lector visualice de forma general el impacto que generaría reemplazar a las arcillas y al cemento Portland para la fabricación de ladrillos en la economía, bajo el caso hipotético de que en DET se implemente la tecnología de relaves filtrados y de esta forma fabricar de forma inmediata los adoquines.

En primer lugar, se tiene que la producción mundial de ladrillos de arcilla es de alrededor de 1,500 billones de unidades al año, y de estos, el 87 % corresponde a lo producido en países asiáticos. Un alto porcentaje de esta producción corresponde a ladrillos fabricados a mano; así, por ejemplo, en China, con una producción total del orden de 1,000 billones de unidades, apenas el 12,5 % se fabrican en procesos automatizados y controlados (Roballo-Salazar, et al., 2016). Adicionalmente, se tiene que India es el segundo mayor productor de ladrillos cocidos con arcilla, lo que representa aproximadamente el 10 por ciento de la producción global. Se estima que India produce alrededor de 140 mil millones de ladrillos al año (Khan & Vyas, 2008). Sumado a lo anterior, en los Estados Unidos (tercer mayor productor de arcilla en el mundo) se producen alrededor de 9.000 millones de ladrillos cada año (Ahmari & Zhang, 2012), con un crecimiento anual entre 2012-2017 de 1,0 %. A su vez, cabe destacar que tanto China, India y Estados Unidos son los mayores exportadores de ladrillos a nivel mundial con una participación del 14 %, 19% y 5 % de las exportaciones respectivamente (OEC, 2018).

Ahora bien, considerando que para una producción de relaves de DET de 49,97 millones de toneladas al año, se podrían fabricar efectivamente 12.293 millones de unidades con medidas de 25x12x5 (largo x ancho x alto), esta cantidad potencial de fabricación no alcanzaría a cubrir gran parte de la producción de los mayores productores mundiales de este material de construcción (1,23 % y 8,78 % de la demanda de China e India respectivamente), sin embargo, alcanzaría a cubrir más del 100 % de la demanda de Chile (3,49 veces) considerando un consumo per cápita de 200 adoquines por persona. Adicionalmente al análisis anterior, la demanda mundial para la fabricación de ladrillos de arcilla se podría cubrir fácilmente en caso de que 123 faenas mineras tengan el mismo nivel de producción de relaves que DET y estén dispuestas a concretar la posibilidad de reemplazar a las arcillas por relaves para la fabricación de adoquines hechos de arcilla. Este análisis se hace más justificado considerando los volúmenes del pasivo ambiental que se encuentran dispuestos por décadas en los embalses y/o tranques de las empresas mineras.

Por otro lado, el consumo mundial de cemento alcanzó las 4.129 Mt en el 2016, logrando un avance de 1,8 % con respecto al año 2015 y, en el 2015, se contrajo en 2,4 % con respecto al 2014. En donde China continuó liderando la demanda de cemento con 2.395 Mt en el 2016, alcanzando el 58 % de la participación mundial. Dicha participación alcanzó su punto máximo en el año 2014 con 59,4 %. Excluyendo a China, el consumo mundial de cemento alcanzó las 1,734Mt en el 2016, creciendo un 1,0 % con respecto al 2015. Adicionalmente, se espera que tanto la producción de cemento como su consumo a nivel mundial para el 2017 y el 2018 se mantengan relativamente constantes respecto al año 2016, tal y como ilustra la Figura 5.8.



**Figura 5.5** Consumo y producción de cemento entre los años 2006 al 2018

(ASOCEM, 2017).

Por otro lado, el consumo per-cápita mundial alcanzó los 557 kg en el 2016, logrando un avance de 0,7 % con respecto al 2015. Sin embargo, aún se encuentra por debajo de los niveles alcanzados en el 2014 (574 kg) y en el 2013 (565 kg). Excluyendo a China, el consumo per-cápita alcanzó los 287 kg en el 2016.

Sumado a lo anterior, la producción de cemento mundial alcanzó el 4,174 Mt en el 2016, obteniendo un crecimiento de 2,3 % con respecto al 2015. En donde China mantiene el liderazgo con el 57,6 % de la producción mundial, seguida de India con el 6,9 %. En general, la capacidad de producción de cemento se ubicó en 6,141Mta en el 2016, alcanzando un avance de 7,8% con respecto al 2014.

A continuación en la Tabla 5.5, se presenta el ranking de los mayores consumidores y productores de cemento del mundo.

**Tabla 5.5** Mayores consumidores y productores de cemento en el mundo  
(ASOCEM, 2017).

<b>País</b>	<b>Consumo de cemento [Mt]</b>	<b>Producción de cemento [Mt]</b>
<b>China</b>	2.280,56	2.350,00
<b>India</b>	301,57	302,57
<b>U.S.A</b>	100,51	88,50
<b>Turquía</b>	71,76	82,00
<b>Indonesia</b>	67,85	81,80
<b>Vietnam</b>	63,82	70,46
<b>Egipto</b>	63,20	68,65
<b>Brasil</b>	54,05	63,70
<b>Rusia</b>	53,43	61,00
<b>Irán</b>	53,16	54,35
<b>Corea del Sur</b>	50,87	54,33
<b>Arabia</b>	50,15	52,70

A partir de los valores presentados se tiene que DET produciendo 136,9 ktpd de relaves alcanzaría a cubrir un 1,21% de demanda mundial de cemento, y un 1,20% de su producción, es decir, con sólo 83 y 84 faenas mineras que tengan un nivel de producción de relaves similar a DET se alcanzaría a cubrir el 100% de la demanda y producción mundial de cemento respectivamente. Adicionalmente, considerando un consumo per cápita de 0,557 ton de cemento por persona, implicaría que Chile tendría una demanda de 10,03 millones de toneladas por año, luego, con sólo la producción actual de DET (49,97 millones de toneladas por año) se alcanzaría a cubrir más 5 veces (aproximadamente 5,10 veces) la demanda de Chile, lo que llevaría a la quiebra a las empresas cementeras del país (Polpaico, Bio Bio y Melón). Este

análisis se hace más justificado considerando los volúmenes del pasivo ambiental que se encuentran dispuestos por décadas en los embalses y/o tranques de las empresas mineras.

Es por estos motivos que desde un punto de vista del mercado, el reemplazo de las arcillas y el cemento por relaves de cobre para la fabricación de ladrillos resulta no factible, debido a la cantidad de desempleos que le generaría no sólo a nivel nacional, sino que también a nivel mundial en caso de que más instalaciones mineras se atrevieran a concretar esta iniciativa.

Adicionalmente al análisis anterior, a continuación se presentan algunos indicadores económicos para instalar una planta de fabricación de ladrillos a partir de relaves para un ente estatal (Tejada & Loayza, 2017).

El autor estructuró su flujo de caja de la siguiente manera:

- Ingresos: Los valores mostrados en este inciso corresponden a la multiplicación del precio de venta de cada ladrillo (\$250,49/adoquín) por la demanda proyectada por el autor al año correspondiente.
- Costos: La estructura de costos para la fabricación se adoquines se estructuró de la siguiente manera:
  - Costos de fabricación: Los cuales se refieren a toda erogación referida a la producción de los adoquines
  - ✓ Costos directos: Materia prima, insumos y mano de obra directa

- ✓ Costos indirectos: Mano de obra indirecta, materiales indirectos (insumos utilizados a lo largo del proceso de producción, epps, elementos de mantenimiento y otros).
  - ✓ Gastos indirectos: depreciaciones.
  - ✓ Gastos de operación: Gastos administrativos, Gastos de ventas y promociones (publicidad radial, televisiva, por redes sociales, plataforma web, diseño del manual de marca, etc.).
- Inversiones:
    - Inversión fija: Gastos de dinero con propósitos de equipos, máquinas, infraestructura, entre otros.
    - Inversión intangible: Inversiones por conceptos de servicios o derechos adquiridos durante la ejecución del proyecto.
    - Capital de trabajo: Gastos necesarios para el funcionamiento de la planta al corto plazo sin que presente algún déficit.

A continuación se presentan algunos indicadores económicos para instalar una planta de fabricación de ladrillos a partir de relaves (Tejada & Loayza, 2017).



**Tabla 5.6** Indicadores económicos de instalar una planta de fabricación de ladrillos a partir de relaves entre los años 2018 y 2023.

Año	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<b>Demanda [MU]</b>	0,00	1,50	1,67	1,86	2,07	2,30
<b>Ingresos totales [M\$]</b>	0,00	375,74	418,01	465,03	517,35	575,55
<b>Egresos totales [M\$]</b>	0,00	398,65	446,21	499,70	559,89	627,59
<b>Inversión tangible [M\$]</b>	-74,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Inversión intangible [M\$]</b>	-4,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Capital de trabajo [M\$]</b>	-35,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Inversión total</b>	-115,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Flujo de caja económico acumulado [M\$]</b>	-115,46	-22,92	-28,20	-34,67	-42,54	-52,04
<b>VAN [M\$]</b>	-434,56					

**Tabla 5.7** Indicadores económicos de instalar una planta de fabricación de ladrillos a partir de relaves entre los años 2024 y 2028.

Año	2024	2025	2026	2027	2028
<b>Demanda [MU]</b>	2,56	2,84	3,16	3,52	3,92
<b>Ingresos totales [M\$]</b>	640,30	712,34	792,47	881,63	980,81
<b>Egresos totales [M\$]</b>	685,53	771,22	867,62	976,08	1.098,09
<b>Inversión tangible [M\$]</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Inversión intangible [M\$]</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Capital de trabajo [M\$]</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Inversión total</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Flujo de caja económico acumulado [M\$]</b>	-45,23	-58,88	-75,15	-94,45	-117,28

Por otro lado, se encontró que el costo para la fabricación de adoquines en base a relaves mezclados con un 20 %p/p de cemento, 14 días de curado y

cocidos a temperaturas entre los 750 y 950 °C resulta 2,4 veces más caro que fabricar ladrillos de la forma tradicional (Roy, et al., 2007).

A partir del flujo de caja y de los indicadores económicos mostrados, es posible decir que la implementación y puesta en marcha de una planta de ladrillos en base a relaves no es económicamente factible al mediano plazo para estos bajos niveles de producción establecidos. Adicionalmente, a pesar de que con estos niveles de producción no se disminuiría apreciablemente el volumen de sólidos del pasivo ambiental en el embalse Carén, la producción de adoquines amigables con el medio ambiente podría ser útil para la fabricación de viviendas u otro tipo de obras civiles para las poblaciones aledañas a la hacienda Loncha (lugar donde se encuentra actualmente el embalse de DET), como por ejemplo al poblado de Alhué.



## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 6.1 CONCLUSIONES DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE INSTALAR UNA PLANTA DE RELAVES EN PASTA Y UNA PLANTA DE RELAVES FILTRADOS EN DET.

- Si se considera sólo la depositación de los relaves (sin incurrir en la evaluación económica de un sistema de recirculación de aguas), se puede decir que el método de disposición de relaves filtrados presenta un OPEX, VAC, CAUE y costos promedios por tonelada depositada más elevado que el resto de las alternativas para una producción de 140 ktpd del residuo, haciéndolo no factible desde estos puntos de vista. Se recomienda evaluar los mismos indicadores económicos de la depositación de los relaves estimando los ahorros por la recuperación y recirculación del agua a la planta concentradora, ya que el agua recuperada por los métodos de filtración son superiores a los de espesamiento y podría ser un factor crítico que haría a la tecnología de filtrado de relaves económicamente más rentable que las restantes. En general, el método de disposición por filtrado es extremadamente alto ya que requiere consumos elevados de energía eléctrica para la operación de los equipos y de numerosas maquinarias de movimiento de tierra para la formación y compactación de los depósitos. Adicionalmente, el CAPEX de la alternativa de filtrado de relaves es superior a la de pasta, cualquiera sea el nivel de relaves tratados, pero es siempre inferior a la alternativa de continuar con el peralte del muro del embalse Carén desde las etapas 7 a la 12 para un nivel de tratamiento de 140 ktpd del pasivo ambiental, sin embargo, el CAPEX de esta última es muy superior a sólo peraltar el muro para la etapa 7. En general, el CAUE y el costo promedio por tonelada depositada de la alternativa de filtrado de relaves resultan ser 2,98 veces superior al valor proyectado que para la instalación y operación de una planta de relaves en

pasta, y 4,10 veces superior a la de continuar con el método tradicional de peralte del muro, para una producción de 140 ktpd del pasivo ambiental. Luego, la alternativa de filtrado de relaves es descartada en términos económicos para una producción de 140 ktpd del contaminante.

- Por su parte, para una producción base de 140 ktpd del pasivo ambiental, la alternativa con menor CAPEX dentro de los métodos de disposición de relaves es la de intalar una planta de relaves espesados a pasta (2,13 veces más económica que instalar una planta de relaves filtrados y 4,40 veces más económica que seguir con el método actual), sin embargo, esta alternativa presenta una vida útil mucho menor que los demás métodos de disposición de relaves (3,18 veces menos que la alternativa de relaves filtrados y 3,45 veces menos que continuar con el peralte del muro del embalse Carén), por lo que eventualmente se descartaría esta alternativa. Además, pese a tener un costo operacional por debajo del método de disposición de relaves filtrados, el valor del OPEX es 5,49 veces superior al método actual que lleva el embalse Carén, lo que se ve reflejado en el CAUE y en el valor de los costos promedios por tonelada depositada, que resultan ser aproximadamente 1,38 veces superior. Adicionalmente, se puede aseverar que el el CAPEX de la alternativa de sólo peraltar el muro para la etapa 7 es notoriamente inferior a la inversión y puesta en marcha que la alternativa de espesado a pasta de relaves. Luego, esta última opción de disposición de relaves es descartada en términos económicos para una producción de 140 ktpd del contaminante.
- Por otro lado, a partir del análisis de sensibilidad, se puede concluir que cualquiera sea el nivel de tratamiento de relaves, la alternativa de instalar una planta de filtros presenta todos sus indicadores económicos por sobre el caso base de continuar con el método de disposición actual, a excepción

del CAPEX, el cual es siempre menor al caso base. Sin embargo, este indicador económico es siempre superior al de continuar con el peralte del muro, si sólo se considera el levantamiento de esta obra para la séptima etapa. Luego, la alternativa de relaves filtrados queda descartada, cualquiera sea el nivel de producción de relaves que procese la planta de filtros. Por otro lado, la alternativa de pasta se ve favorecida para su implementación en DET, ya que para un tonelaje de tratamiento menor o igual a 70 ktpd del pasivo ambiental por parte de la planta de espesaje, el CAPEX de inversión resulta incluso menor que el peralte del muro de la séptima etapa; y para todos los flujos de tratamiento analizados, el CAPEX de inversión es siempre menor que el peralte del muro desde la etapa 7 a la 12. Sin embargo, la alternativa de pasta presenta costos anuales unitarios equivalentes y costos promedios por tonelada depositada siempre mayores que continuar con el peralte del muro, considerando las 6 etapas restantes que le quedan de vida útil, cualquiera sea el nivel de tratamiento del pasivo ambiental. Además, esta última alternativa presenta vidas útiles muy bajas para altos flujos de tratamiento del relave (11, 13 y 16 años para un procesamiento de 140, 117 y 93 ktpd de relaves respectivamente), pero elevadas vidas útiles para bajos flujos de tratamiento (22, 33 y 67 años para un procesamiento de 70, 47 y 23 ktpd de relaves respectivamente), luego, esta alternativa resulta tentadora si se desea espesar a pasta bajos niveles del pasivo ambiental, alargándose la vida útil del embalse en 11,2 años para tratamientos de 70, 47 y 23 ktpd de relaves por parte de la planta de espesamiento.

Para este apartado se establece como recomendación general la construcción de una planta piloto, con la finalidad de realizar pruebas más detalladas con el relave y establecer con mayor exactitud el comportamiento operacional que puede tener a escala industrial tanto en la planta de filtros, como en la planta

de espesamiento y en el depósito mismo, además de realizar estudios de la estabilidad de éstos, ángulos de talud del depósito, humedad del queque y de la pulpa para su posterior compactación, cizalle de la pulpa, lugar de disposición del pasivo ambiental, entre otros, con el fin de establecer las condiciones operacionales óptimas que minimicen los costos.

## **6.2 CONCLUSIONES DE LA EVALUACIÓN DE MERCADO DE UTILIZAR LOS RELAVES DE DET PARA LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES PARA LA INDUSTRIA DE LA COSNTRUCCIÓN.**

- Finalmente desde un punto de vista del mercado, si se tomara la iniciativa de fabricar adoquines amigables con el medio ambiente utilizando los relaves que genera DET actualmente (49,97 millones de toneladas al año), no se alcanzaría a cubrir gran parte de la demanda de los países más consumidores de arcilla y cemento para la fabricación de ladrillos, sin embargo, se alcanzaría a cubrir más del 100 % de la demanda de Chile por estos materiales (más de 3 la demanda por la arcilla y más de 5 veces la demanda por el cemento), lo que implicaría un desalojo completo de estas industrias en Chile, es más, con sólo 123 y 83 faenas mineras con el mismo nivel de producción de DET se alcanzaría a cubrir completamente la demanda mundial por las arcillas y el cemento respectivamente, llevando a la quiebra a estas industrias a nivel global. Por otro lado, a partir del flujo de caja y de los indicadores económicos mostrados para instalación y puesta en marcha de una planta de fabricación de adoquines en base a relaves para una producción anual promedio de 2,54 millones de unidades de ladrillos y un precio de venta de \$ 250,49/adoquín para un inversionista estatal, es posible decir que no resulta económicamente factible al mediano plazo, ya que el VAN resulta M\$ --434,56 para una vida útil del

proyecto de 10 años, además, el volumen de relaves en el embalse Carén permanecería casi intacto, por lo que no resulta tentadora la iniciativa.

A partir de estas del marco teórico de la presente tesis se puede establecer que sí es posible fabricar materiales geopoliméricos aptos para la construcción desde una perspectiva técnica utilizando relaves de cobre, sin embargo desde el punto de vista económico no resulta factible, puesto que esta forma de crear materiales con fines estructurales desalojaría una gran cantidad de empresas dedicadas a este rubro (sino es que todas), sin embargo, se establece como recomendación general para este apartado que se tome en cuenta la iniciativa de instalación y puesta en marcha de una planta de fabricación de adoquines amigables con el medioambiente utilizando como insumo al relave de DET, ya que a pesar de que no se disminuiría apreciablemente el volumen de sólidos del pasivo ambiental en el embalse Carén, la producción de adoquines amigables con el medio ambiente podría ser útil para la fabricación de viviendas u otro tipo de obras civiles para las poblaciones aledañas a la hacienda Loncha (lugar donde se encuentra actualmente el embalse de DET), como por ejemplo al poblado de Alhué.

## 7 BIBLIOGRAFÍA.

- Ahmari, S., & Zhang, L. (2012). Production of Eco-Friendly Ricks from Copper Mine Tailings through Geopolymerization. *Construction and Building Materials*, 29, 323-331.
- Álvarez, M. (2017). *Sustainability of Mining Tailings Treatments Associated with Risk*. Trabajo Fin de Master, Universidad de Oviedo, Departamento de Explotación y Prospección de Minas.
- ASOCEM. (2017). *Panorama Mundial de la Industria del Cemento*.
- Bakharev, T. (2005). Durability of Geopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solutions. *Cement and Concrete Research*, 35, 1233-1246.
- Barbosa, V., Mackenzie, K., & Thaumaturgo, C. (2000). Synthesis and Characterisation of Materials Base on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymers. *International Journal of Inorganic Materials*, 2, 309-3017.
- Cabrejos, J. (2011). *Estudio de Pre-Factibilidad para la Recuperación de Agua a Partir de Relaves de Gran Minería de Cobre Mediante la Tecnología de Relaves Espesados*. Tesis Para Optar al Título Profesional de Ingeniero Metalurgista, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, Lima.
- Capone, M. (2016). *Filtros de Prensa Para Relaves*. Tesis Para Optar al Grado de Magíster en Gestión y Dirección de Empresas, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Industrial, Santiago de Chile.
- CICA. (2006). *Recopilación y Análisis de Antecedentes Hidrológicos e Hidrogeológicos del Valle Carén-Alhué*. CICA Ingenieros Consultores.
- CIREN. (2003). *Estudio del Uso y los Derechos de Aprovechamiento de Aguas en el Área de Influencia del Estero Carén*.
- Concha, F. (2014). *Solid-Liquid Separation in the Mining Industry* (Vol. 105). (A. Thess, Ed.) Concepción, Concepción, Chile: Springer.
- CORFO. (2 de Noviembre de 2016). [www.corfo.cl](http://www.corfo.cl). Recuperado el 20 de Mayo de 2018, de [https://www.corfo.cl/sites/cpp/sala\\_de\\_prensa/nacional/16-11-02\\_proyecto\\_corfo\\_construye\\_adoquines\\_con\\_residuos\\_mineros;jsessionid=XreBJWIHGUSfi\\_JtU4iCU2g8qenhlgL69vSnCEPLdnFVeePzwbHz!219625812!1627620561](https://www.corfo.cl/sites/cpp/sala_de_prensa/nacional/16-11-02_proyecto_corfo_construye_adoquines_con_residuos_mineros;jsessionid=XreBJWIHGUSfi_JtU4iCU2g8qenhlgL69vSnCEPLdnFVeePzwbHz!219625812!1627620561)



- Davidovits, J. (1991b). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J. (1994a). Properties of Geopolymer Cements. *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes.*, 131-149.
- Días, P. (2012). *Estudio de Factibilidad de Obtención de Hormigones Geopoliméricos A Partir de Desechos de Minerales*. Memoria Para Optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago de Chile.
- Duxon, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. (2006). Geopolymer Technology: The Current State of The Art. *Advance in Geopolymer Science & Technology*, 2917-2933.
- EC. (2004). *Draft Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities*. European Commission, Edificio EXPO, Seville.
- Engels, J. (2017). *What Are Tailings?-Their Nature and Production*.
- EPA. (1994). *Technical Report -Design and Evaluation of Tailings Dams, Office of Solid Waste*. U.S. Environmental Protection Agency , Washington.
- GEDE. (2017). *Actualización de Antecedentes Económicos y Comerciales para Planificación 2018*. Nota Interna, Codelco, DET, Rancagua.
- Gilbert, R. (s.f.). Creep and Shrinkage Models for High Strength Concrete-Proposal for Inclusion in AS3600. 4(2), 95-116.
- GPR. (2014). *Deposición Relaves Largo Plazo-Carén PEX División El Teniente*. Codelco-Chile, DET, Gerencia de Proyectos de Relaves, Vicepresidencia de Proyectos, Rancagua.
- HATCH. (2011). *Informe Final Estudio Evaluación Hídrica DET*. Consultoría para la Realización de Evaluación Hídrica y Uso Eficiente del Agua y Plan de Mejoramiento DET, Codelco Chile, División El Teniente, Gerencia Desarrollo Teniente Futuro, Rancagua.
- ICOLD & UNEP. (2001). *Bulletin 121: Tailings Dams-Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt From Practical Experiences*. International Commission on Large Dams (ICOLD) & United Nations Environmental Programme (UNEP), Paris.

- IM2. (2009). *Filtración de Relaves o Relaves en Pasta*. Proyecto Informe de Avance N°1: Caracterización Reológica y Pruebas de Laboratorio a Relaves de División El Teniente y División Andina, Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia S.A., Filial Codelco-Chile, Santiago de Chile.
- JRI. (2010). *Estimación de Costos de Inversión, Transporte de Relaves de Alta Densidad a Tranque Carén*. Ingeniería de Perfil Avanzada, JRI.
- Khan, R., & Vyas, H. (2008). A Study of Impact of Brick Industries on Environmental and Human Health in Ujjain City (India). *Journal of Environmental Research And Development*, 2(3), 421-425.
- Minería chilena. (14 de mayo de 2018). *www.mch.cl*. Recuperado el 20 de Mayo de 2018, de <http://www.mch.cl/reportajes/el-fin-de-los-relaves/#>
- Ministerio de Minería. (2007). *Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de de los Depósitos de Relaves*. Gobierno de Chile. Santiago de Chile: Biblioteca del Congreso Nacional.
- MWH. (2003a). *Informe Diagnóstico de Situación Actual y Proyecciones de Crecimiento del Embalse Carén*. Proyecto Escenarios Productivos y Su Impacto Sobre la Vida Útil y las Etapas de Peraltamiento del Embalse Carén, Montgomery Watson Harza, Santiago de Chile.
- MWH. (2003b). *Evaluación Técnica-Económica de Alternativas de Disposición de Relaves*. Proyecto Escenarios Productivos y Su Impacto Sobre la Vida Útil y las Etapas de Peraltamiento del Embalse Carén, Montgomery Watson Harza Chile, Santiago de Chile.
- OECD. (2018). <https://atlas.media.mit.edu/en/>. Recuperado el 16 de 5 de 2018, de <https://atlas.media.mit.edu/es/profile/hs92/2508/>
- Paladines, J. (2016). *Fabricación de Ladrillos a Base de Lodos de Relaves de Minas*. Trabajo de Titulación Para Optar al Grado de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja.
- Ramírez, N. (2007). *Guía Técnica de Operación y Control de Depósitos de Relaves*. Documento Externo, Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Seguridad Minera, Santiago de Chile.

- Roballo-Salazar, R., Mejía de Gutiérrez, R., & Mulford-Carvajal, A. (2016). Producción de Elementos Constructivos a Partir de Residuos de Ladrillo Activados Alcalinamente. *Revista Facultad de Ingeniería, 25*(43), 21-30.
- Roy, S., Adhikari, G. R., & Gupta, R. N. (2007). Use Gold Mill Tailing in Making Bricks: A Feasibility Study. *Waste Management and Research, 25*, 475-482.
- SID. (2011). *Diagramas de Flujo de Planta Concentradora*. Codelco, Superintendencia de Desarrollo, Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, División El Teniente, Rancagua.
- Tejada, M., & Loayza, E. (2017). *Proyecto de inversión para la producción y comercialización de adoquines ecoamigables hechos a partir de residuos mineros en la provincia de Arequipa al 2017*. Universidad Católica San Pablo, Facultad de Ingeniería y Computación, Escuela Profesional de Ingeniería Industrial., Arequipa.
- Tejada, M., & Loayza, E. (2017). *Proyecto de Inversión para la Producción y Comercialización de Adoquines Ecoamigables Hechos a partir de Residuos Mineros en la Provincia de Arequipa al 2017*. Tesis de Pregrado, Universidad Católica San Pablo, Facultad de Ingeniería y Computación, Arequipa.
- The Canadian Journal of Chemical Engineering. (22 de Abril de 2012). *es.scribd.com*. Recuperado el 20 de Abril de 2018, de SCRIBD: <https://es.scribd.com/document/90635126/CE-Plant-Cost-Index>
- The Canadian Journal of Chemical Engineering. (16 de Marzo de 2014). *es.scribd.com*. Recuperado el 20 de Abril de 2018, de SCRIBD: <https://es.scribd.com/doc/212684611/CEPCI>
- The Canadian Journal of Chemical Engineering. (10 de Septiembre de 2015). *es.scribd.com*. Recuperado el 20 de Abril de 2018, de SCRIBD: <https://es.scribd.com/doc/277921333/CEPCI-2015>
- The Canadian Journal of Chemical Engineering. (29 de Junio de 2017). *es.scribd.com*. Recuperado el 20 de Abril de 2018, de SCRIBD: <https://es.scribd.com/document/352561651/CEPCI-June-2017-Issue>
- Vásquez, P. (2014). *Diseño e Implementación Lógica de Control Experto en Espesador de Relaves-Planta Las Tortolas*. Tesis de Titulación Presentada Como Requisito Parcial Para Optar al Grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería Química, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Valparaíso.

- VCP. (12 de Febrero de 2010). Estudio Prefactibilidad Disposición Relaves Espados Embalse Carén y Comparación Peralte 6ª Etapa y Siguietes. *API*. Rancagua, Cachapoal, Chile.
- Vick, S. G. (1990). *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*.
- Wallah, S. (2009). Drying Shrinkage of Heated-Cured Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Modern Applied Science*, 3(12).
- Zamosa, A. (1996). *Manual de Proyectos de Ingeniería Química* (Vol. 2). Santiago de Chile, Chile.
- Zbinden, A. (2011). *Evaluación del Riego con Agua Clara de Relave Alta en Molibdeno y Sulfatos Sobre la Calidad del Suelo y del Forraje*. Tesis Para Optar al Grado de Magister en Gestión y Planificación Ambiental, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y de La Conservación de la Naturaleza, Santiago de Chile.

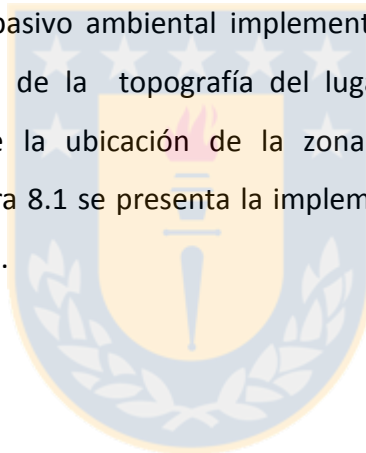


## 8 ANEXOS.

### 8.1 ANEXO A: OTROS MÉTODOS DE DISPOSICIÓN DE RELAVES.

- **Método de disposición llamado diques de anillo:**

Para la implementación de este método de disposición de relaves es necesario de una gran cantidad de material de construcción y obras civiles, por lo que se incurriría en altos niveles de inversión, esto se debe a que el sitio de emplazamiento del relave se debe perimetrar completamente creando una especie de anillo que encierre el depósito, por lo que se intuiría de que el sitio de emplazamiento del pasivo ambiental implementando esta alternativa de disposición no depende de la topografía del lugar, por lo que resultaría flexible la selección de la ubicación de la zona de disposición final. A continuación, en la Figura 8.1 se presenta la implementación de este método de disposición de relaves.





**Figura 8.1** Relave dispuesto con el método dique de anillo en Kalgoorlie Consolidated Gold Mines (Álvarez, 2017).

- **Método de disposición llamado en el pozo:**

Este método de disposición de relaves consiste en disponer a la pulpa de relaves en minas a rajo abierto abandonadas, lo que resultaría muy económico en el caso hipotético de que la distancia de transporte de relaves sea lo suficientemente acotada como para compararse con los costos de transporte en que incurren los demás métodos de disposición. Una ventaja importante de este método de disposición es que no se requiere de un muro de contención, eliminando los riesgos asociados con la inestabilidad (EPA, 1994), ya que el talud de la mina se emplearía con esta finalidad. A continuación, en la Figura 8.2 se presenta la implementación de este método de disposición de relaves.



**Figura 8.2** Relave dispuesto con el método de almacenamiento en pozo (Álvarez, 2017).

- **Disposición de relaves como relleno de trabajos subterráneos:**

Este método de disposición de relaves que se ha empleado oportunamente consiste en almacenar al pasivo ambiental en espacios subterráneos creados previamente, para ello primero es necesario mezclar la pulpa de relaves con algún aglutinante (por ejemplo, cemento), para el posterior bombeo de la mezcla a los agujeros creados para su relleno. Este método se ha empleado para el relleno de túneles de mina (calles, zanjas, piques, etc.) que ya están fuera de explotación.

Para la generación de rellenos que se emplean en la disposición de relaves existen diversos métodos, a continuación se presentan algunos:

- El primero consiste en generar una pasta igual a la que se obtendría empleando el método de disposición de relaves en pasta, luego la pulpa de alta densidad simplemente es bombeada a los agujeros de disposición final.
- El segundo método consiste en clasificar la pulpa mediante el empleo de hidrociclones (equipos que sirven para la separación de la fracción gruesa de la fina del mineral sólido, que se encuentra en suspensión en la pulpa), con este método de disposición la fracción fina del mineral (limos) es dispuesta superficialmente debido a su baja permeabilidad, por otro lado, la fracción gruesa (arenas de relave) es bombeada hacia el subsuelo donde se encuentran los agujeros pudiéndose o no mezclarse con algún aglutinante (a medida que las arenas se consolidan en el lugar de disposición, el agua que de exceso se puede purgar o bien se pierde por infiltraciones).

- **Disposición de relaves en alta mar (ríos, lagos y mares):**

Este método de disposición de relaves consiste en depositar el pasivo ambiental en ríos, lagos o bien en el mar, donde la descarga submarina es el método más empleado dentro de estos tres sitios. La disposición del contaminante en este caso se realiza a la máxima profundidad posible del mar. La evacuación en alta mar puede emplearse sólo cuando las técnicas de disposición de relaves terrestres no sean posibles, lo cual puede deberse a altas actividades sísmicas, altos eventos de lluvias o bien por poseer un terreno para disponer al pasivo ambiental muy reducido. La disposición de relaves submarina es empleada extensamente en la zona del Pacífico Occidental, lugar donde se presentan estos eventos que crearían riesgos elevados para el desarrollo de estructuras de retención convencionales. A



continuación, en la Figura 8.3 se presenta la implementación de este método de disposición de relaves.



**Figura 8.3** Relave dispuesto en el río Jaba, Papua Nueva Guinea (Álvarez, 2017).

Por su parte, la descarga del pasivo ambiental empleando éste método de disposición, crea múltiples efectos ambientales negativos para muchos ecosistemas, generando tanto problemas ambientales, sociales (percepción de la población), y posibles problemas legales en caso de cumplir las normas ambientales pertinentes al sitio de emplazamiento del relave.

## 8.2 ANEXO B: DESCRIPCIÓN DE TIPOS DE EQUIPOS DE ESPESAMIENTO.

- **Espesadores convencionales:**

El espesador convencional se caracteriza porque su bandeja de alimentación se encuentra en la parte superior del equipo, y al entrar al espesador, el flujo de alimentación se mezcla con parte del agua recuperada, diluyéndose a un valor denominado concentración conjugada. Esta suspensión diluida sedimenta a velocidad constante, formando un manto de altura variable, para

transformarse en sedimento en la parte inferior del equipo (Concha, 2014). La Figura 8.4 muestra un esquema de un espesador convencional.

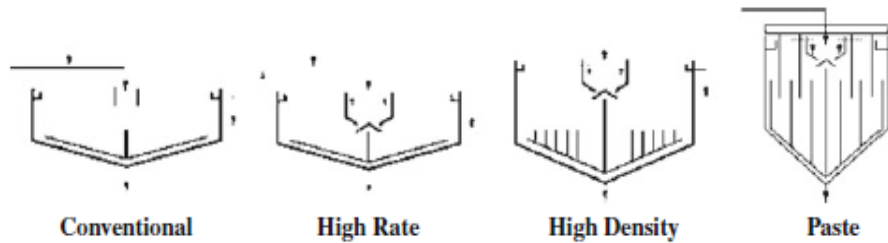
- **Espesadores de alta capacidad:**

El espesador de alta capacidad tiene como parte distintiva una bandeja de alimentación muy profunda, que descarga el flujo de alimentación bajo el nivel del sedimento. Al mezclarse la alimentación y el sedimento, se forma una suspensión de mayor porcentaje de sólidos que la de la alimentación. Es por esta razón que en los espesadores de alta capacidad no existe una zona de sedimentación.

Muchas veces se recicla parte de la descarga del espesador de alta capacidad, con el fin de aumentar la concentración de la alimentación antes de producir la mezcla con el sedimento. El resultado es que generalmente estos espesadores tienen mayor capacidad que los convencionales, sin embargo, se ha demostrado que los espesadores de alta capacidad cuyo tiempo de residencia está en el orden de minutos en vez de horas para los convencionales, son intrínsecamente inestables, y por lo tanto, son difíciles de operar y controlar (Concha, 2014). La Figura 8.4 muestra un equipo de espesamiento de alta capacidad.

- **Espesadores de alta densidad:**

Los espesadores de alta densidad son muy similares a los espesadores de pasta, la única diferencia entre ellos es que los espesadores de pasta son mucho más altos y delgados que los espesantes de alta densidad (Concha, 2014). La Figura 8.4 muestra un espesador de alta densidad.



**Figura 8.4** Esquema ilustrativo de los diferentes equipos de espesamiento (Concha, 2014).

### 8.3 ANEXO C: DESCRIPCIÓN DE TIPOS DE EQUIPOS DE FILTRACIÓN.

- **Equipos de filtración a vacío:**

- **Filtros de tambor:**

El filtro de tambor consiste en un tambor rotatorio con su parte inferior sumergida en la suspensión. La superficie del tambor está cubierta por un medio filtrante denominado tela filtrante. La suspensión es succionada desde el interior del tambor, donde se ha generado un vacío. Mientras el filtrado pasa al interior del tambor y es evacuado a través de tuberías apropiadas, el sólido es retenido en la superficie cilíndrica formando un queque. A medida que el tambor rota, las secciones de superficie que estaban sumergidas en la suspensión emergen de ésta, haciendo que aire sea succionado debido al vacío interior, lo que seca al queque. Durante el giro es posible lavar el queque rociando agua en su superficie y permitiendo que se seque de la misma forma anterior. Una vez completado un giro, y antes de entrar nuevamente en la suspensión, un mecanismo raspa la superficie descargando el queque en una tolva. A continuación se inicia un nuevo ciclo de filtrado-secado-lavado-secado-descarga (Concha, 2014).

➤ **Filtros de discos:**

El filtro de discos consiste en un eje central que soporta un número determinado de discos, cada uno de los cuales está conectado a un equipo de vacío. Los discos tienen su parte inferior sumergida en la suspensión, de manera similar al caso del filtro de tambor. Cada disco está cubierto de una tela filtrante y, al igual que en el filtro de tambor, trabaja en ciclos de filtrado-secado-lavado-secado y descarga a medida que el sistema de discos va girando (Concha, 2014).

➤ **Filtros de bandeja:**

El filtro de bandeja consiste en una serie de bandejas abiertas ubicadas horizontalmente en un plano que rota alrededor de un eje central vertical. Las bandejas están formadas por numerosos sectores en forma de trapecio inclinados hacia el eje central que conectan con una válvula común bajo el centro del equipo. El queque puede ser lavado mediante chorros de líquido una vez terminada la filtración. Es posible realizar un lavado co-currente. La descarga del queque se lleva a cabo mediante un tornillo espiral que lo arrastra hacia el centro, o por volteo de las bandejas (Concha, 2014).

• **Equipos de filtración a presión:**

➤ **Filtro prensa de placas verticales:**

En los filtros de presión de placas verticales la separación toma lugar en cámaras formadas entre las superficies de drenaje de placas filtrantes moldeadas que se mantienen unidas entre sí. Estas placas poseen orificios para la alimentación de la pulpa y el drenaje líquido filtrado, las placas están fijadas entre sí mediante una presión hidráulica, están montadas verticalmente sobre y entre dos barras laterales o suspendidas de vigas. Estas barras o vigas

están conectadas en un extremo a un cabezal fijo o alimentador, mientras que por el otro extremo están conectados a un cabezal de cierre. Las placas se comprimen entre sí mediante un arreglo de cierre de un pistón hidráulico en cuyo extremo se encuentra el cabezal móvil que empuja ordenadamente las placas contra el cabezal fijo, formando así una sola unidad filtrante compuesta por el grupo de placas de filtración (Concha, 2014).

➤ **Filtro prensa de placas horizontales:**

Este tipo de filtro prensa consiste básicamente en una cámara filtrante horizontal situado dentro de un marco de estructura principal. Por la forma de su diseño, permite la incorporación de cámaras adicionales montadas unas sobre otras, permitiendo incrementar el área de filtración sin generar un aumento en el área de piso de la instalación. Cada una de estas cámaras de filtración posee sellos inflables en ambos extremos, los que se dilatan durante la operación para sellar la cámara. Las cámaras se encuentran fijadas a la estructura y no poseen movimiento durante la operación de filtrado. Cada cámara posee una correa filtrante montada sobre un rodillo impulsor en cada extremo, operando independientemente de las otras correas que posee el equipo. Cada rodillo posee un motor hidráulico que acciona la correa durante la operación de descarga del queque. En la parte superior de cada cámara se encuentra instalado un diafragma de goma flexible que es utilizado para comprimir la suspensión y el queque, siendo éste el encargado de formar y reducir la humedad del queque (Concha, 2014).

➤ **Filtro prensa de discos:**

El filtro prensa de disco consiste en una sola cámara situada sobre una correa transportadora que a su vez es el medio filtrante. Un pistón hidráulico provee la fuerza para producir la filtración (Concha, 2014).

- **Filtros hiperbáricos:**

Los filtros hiperbáricos son equipos de filtración en los cuales existe un filtro de vacío dentro de una cámara presurizada, aumentando de esta forma el gradiente de presión. El equipo consiste en un filtro a vacío, ya sea de disco, tambor o banda, inmerso en una cámara de presión. Con este tipo de filtros se puede obtener humedades de 8% y menores (Concha, 2014).

#### 8.4 ANEXO D: ÍNDICES DE COSTOS EMPLEADOS PARA EL ESCALAMIENTO Y REACTUALIZACIÓN DE COSTOS.

A continuación, en las Tablas 8.1, 8.2, 8.3 y 8.4, se presentan los índices de costos empleados para el escalamiento y reactualización de costos para las evaluaciones económicas de los proyectos de instalar una planta de relaves en pasta y una planta de relaves filtrados.

**Tabla 8.1** Índice de costos de la revista Chemical Engineering entre los años 2003 al 2011 (The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2012).

Año	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
<b>CE INDEX</b>	402,0	444,2	468,2	499,6	525,4	583,9	509,1	558,2	582,4
<b>Equipment</b>	445,1	508,1	543,7	588,0	624,4	710,3	596,8	670,2	708,2
<b>Heat Exchanges and Tanks</b>	363,6	464,8	513,9	548,0	592,1	712,4	529,9	629,9	671,4
<b>Process Machinery</b>	450,3	491,0	519,7	549,7	598,3	644,3	631,8	631,8	665,3
<b>Pipe, valves and fittings</b>	570,7	600,6	623,7	708,0	733,6	835,6	828,3	828,3	868,9
<b>Process instruments</b>	363,4	374,3	381,8	420,1	425,2	445,6	424,8	424,8	443,7
<b>Pumps and Compressions</b>	705,4	719,4	752,5	785,7	831,2	862,1	903,1	903,1	904,7
<b>Electrical equipment</b>	341,6	351,0	372,1	403,1	430,5	453,8	473,2	473,2	502,6
<b>Structural supports</b>	428,6	537,5	584,8	625,3	662,6	770,6	697,5	697,5	752,8
<b>Construction Labor</b>	309,3	307,8	305,6	309,3	315,1	319,7	327,8	327,8	325,8

<b>Buildings</b>	400,6	428,6	445,1	468,6	476,8	504,8	513,9	513,9	517,1
<b>Engineering Supervision</b>	347,3	345,2	346,8	350,9	357,0	353,7	339,7	339,7	333,6

**Tabla 8.2** Índice de costos de la revista Chemical Engineering entre los años 2012 al 2013 (The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2014).

<b>CE Plant Cost Index Report</b>			
<b>Año</b>	2012	2013	
<b>CE INDEX</b>	593,8	569,4	
<b>Equipment</b>	726,2	689,5	
<i>Heat Exchanges and Tanks</i>	683,6	626,2	
<i>Process Machinery</i>	680,1	656,5	
<i>Pipe, valves and fittings</i>	926,7	875,6	
<i>Process instruments</i>	428,9	413,2	
<i>Pumps and Compressions</i>	928,1	924,5	
<i>Electrical equipment</i>	515,2	512,6	
<i>Structural supports</i>	763,8	746,8	
<b>Construction Labor</b>	322,9	319,8	
<b>Buildings</b>	527,7	536,5	
<b>Engineering Supervision</b>	328,3	327,6	

**Tabla 8.3** Índice de costos de la revista Chemical Engineering entre los años 2014 al 2015 (The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2015).

<b>CE Plant Cost Index Report</b>			
<b>Año</b>	2014	2015	
<b>CE INDEX</b>	574,3	562,9	
<b>Equipment</b>	697,0	678,8	
<i>Heat Exchanges and Tanks</i>	635,1	609,7	
<i>Process Machinery</i>	665,0	663,8	

<i>Pipe, valves and fittings</i>	876,2	845,6
<i>Process instruments</i>	410,8	402,0
<i>Pumps and Compressions</i>	938,6	958,4
<i>Electrical equipment</i>	515,3	511,9
<i>Structural supports</i>	767,4	741,7
<b>Construction Labor</b>	320,5	323,8
<b>Buildings</b>	543,2	545,0
<b>Engineering Supervision</b>	321,0	319,0

**Tabla 8.4** Índice de costos de la revista Chemical Engineering entre los años 2016 al 2017 (The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2017).

<b>CE Plant Cost Index Report</b>			
	<b>Año</b>	2016	2017
<b>CE INDEX</b>		535,3	558,3
<b>Equipment</b>		638,0	672,0
<i>Heat Exchanges and Tanks</i>		545,2	587,3
<i>Process Machinery</i>		644,8	671,1
<i>Pipe, valves and fittings</i>		800,3	852,0
<i>Process instruments</i>		383,0	403,0
<i>Pumps and Compressions</i>		969,7	973,1
<i>Electrical equipment</i>		508,3	512,1
<i>Structural supports</i>		697,4	729,7
<b>Construction Labor</b>		323,3	323,1
<b>Buildings</b>		538,4	552,2
<b>Engineering Supervision</b>		315,7	315,0



**8.5 ANEXO E: DETALLE DE COSTOS DE REFERENCIA PARA EL CÁLCULO DE LOS INDICADORES ECONÓMICOS A MONEDA DEL 2018 A PARTIR DE ESCALAMIENTOS Y REACTUALIZACIONES DE PRECIOS PARA INSTALAR UNA PLANTA DE RELAVES EN PASTA Y UNA PLANTA DE RELAVES FILTRADOS.**

**Tabla 8.5** Detalle de costos a su fecha de referencia para la instalación y operación de una planta de relaves en pasta.

Ítem	referencia	Uni- dad	Valor al año de referencia
Espesador [MUS\$]	(IM2, 2009).	c/u	1,800
Costos obras civiles [kUS\$]	(JRI, 2010)	gl	2.319,600
Costos mecánica [kUS\$]	(JRI, 2010)	gl	3.924,180
Costos piping [kUS\$]	(JRI, 2010)	gl	5.072,220
Costos intrumentación [kUS\$]	(JRI, 2010)	gl	1.858,860
Costos electricidad [kUS\$]	(JRI, 2010)	gl	20.230,260
Canales de contorno [US\$]	(MWH, 2003b)	ml	500,000
Línea de alta tensión [US\$]	(MWH, 2003b)	km	65,000
Subestación eléctrica [US\$]	(MWH, 2003b)	gl	1.500.000,000
Planta piloto [kUS\$]	(VCP, 2010)	gl	3.776,400
Operación planta piloto [kUS\$]	(VCP, 2010)	año	280,000
Energía planta espesamiento [US\$]	(Capone, 2016)	ton	0,130
Floculante [US\$]	(GPR, 2014)	ton pulpa	0,014
Gastos generales [US\$]	(Capone, 2016)	ton	0,172

**Tabla 8.6** Detalle de costos a su fecha de referencia para la instalación y operación de una planta de relaves filtrados.

Ítem	Referencia	Unidad	Valor al año de
------	------------	--------	-----------------

			referencia
Planta de filtros [MUS\$]	(MWH, 2003b)	gl	150.000,0
Correa de distribución	(MWH, 2003b)	ml	3.000,0
Canales de contorno [US\$]	(MWH, 2003b)	ml	500,0
Línea de alta tensión [US\$]	(MWH, 2003b)	km	65,0
Subestación eléctrica [US\$]	(MWH, 2003b)	Gl	1.500.000,0
Camiones [US\$]	(MWH, 2003b)	h	50,0
Bulldozers [US\$]	(MWH, 2003b)	h	94,0
Rodillos vibratorios [US\$]	(MWH, 2003b)	h	43,0
Floculante [US\$]	(GPR, 2014)	ton pulpa	5,0
Gastos generales [US\$]	(Capone, 2016)	ton	0,2

## 8.6 ANEXO F: DETALLE DE CÁLCULO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAPITAL FIJO DE UNA INVERSIÓN DE ADQUISICIÓN.

Para la determinación del capital fijo de un equipo cuando sólo se tiene el valor del costo de adquisición de éste, se puede calcular el valor total del costo de inversión multiplicando el valor de adquisición por una serie de factores, los cuales se presentan en la Tabla 8.7.

**Tabla 8.7** Detalle de cálculo para la determinación del capital fijo total a partir del costo de adquisición de un espesador (Zamosa, 1996).

Item	% Del valor del equipo sin instalar	Valor [MUS\$]
Proceso Sólido-Fluido		
<b>Costo directo espesador</b>		
Equipo de proceso sin instalar	100	1,80
Costo de la instalación	39	0,70

Instrumentación y control (instalado)	13	0,23
Cañerías instaladas	31	0,56
Instalación eléctrica	10	0,18
Edificios (incluidos servicios)	29	0,52
Pavimentación y urbanización	10	0,18
Instalaciones auxiliares (instalados)	55	0,99
Terreno	6	0,11
<b>Total Costo directo de la planta</b>	<b>293</b>	<b>5,27</b>
<b>Costo indirecto espesador</b>		
Ingeniería y supervisión	32	0,58
Gastos de construcción	34	0,61
<b>Total costos directos e indirectos</b>	<b>359</b>	<b>6,46</b>
Utilidad Contratista (5%costos directos e indirectos)	18	0,32
Contingencias (10% costos directos e indirectos)	36	0,65
<b>Total capital fijo</b>	<b>413</b>	<b>7,43</b>

Cabe destacar que sólo se muestra el detalle de los factores de multiplicación para la inversión de adquisición de un espesador, puesto que este fue al único que se le aplicó esta metodología para la estimación de su costo de capital fijo total. Para el resto de los equipos se conocía el valor del capital de inversión fijo total.

## **8.7 ANEXO G: CONSIDERACIONES PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS INDICADORES ECONÓMICOS DE CONTINUAR CON EL PERALTE DEL MURO DEL EMBALSE CARÉN DESDE LA ETAPA 7 A LA 12.**

A continuación en las Tablas 8.8 y 8.9, se presenta el detalle de cálculo para la determinación del CAPEX y OPEX de la alternativa de continuar con el peralte del muro del embalse Carén. El resto de los indicadores económicos se pueden determinar a partir de estos dos valores calculados por simple aplicación de las ecuaciones mostradas en la Sección 4.2.

- **Costos Inversión:** A continuación se presentan los resultados de la estimación de costos desde las etapas 7 a la 12 para el peralte del muro del embalse Carén el cual tiene una vida útil de 38 años (referencia).

Tabla 8.8 Resultados del costo de inversión del peralte del muro de cada etapa del embalse Carén (GPR, 2014).

<b>Costos Etapas Peralto [kUSD]</b>						
<b>Descripción</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>Costos directos proyecto</b>	100.830	105.415	91.500	106.901	107.474	83.410
<b>Costos directo construcción</b>	65.054	68.012	59.034	68.971	69.341	53.815
<b>Infraestructura (instal. Faenas)</b>	430	740	740	740	740	740
<b>Muros</b>	34.147	42.494	48.412	53.457	59.972	50.603
<b>Instrumentación</b>	161	2.597	245	245	1.722	263
<b>Obras de captación y evacuación</b>	16.819	2.120	3.416	2.050	4.052	2.035
<b>Caminos y mirador</b>	10.440	18.310	1.752	10.085	837	146
<b>Comunicaciones y red eléctrica</b>	354	27	27	27	27	27
<b>Manejo forestal</b>	2.703	1.723	4.442	2.367	1.990	0
<b>Costos indirectos contratistas</b>	35.776	37.403	32.466	37.930	38.134	29.595
<b>Gastos generales y</b>	29.274	30.605	26.566	31.037	31.203	24.217

<b>utilidades</b>						
<b>Otros indirectos contratistas</b>	6.502	6.798	5.900	6.893	6.930	5.379
<b>Costos indirectos proyecto</b>	26.255	28.462	24.705	28.863	29.018	22.521
<b>Indirectos e ingeniería</b>	15.070	15.812	13.725	16.035	16.121	12.511
<b>Costos del dueño</b>	11.185	12.650	10.980	12.828	12.897	10.009
<b>Contingencia</b>	16.802	17.710	15.372	17.959	18.056	14.013
<b>Total final</b>	143.887	151.586	131.577	153.723	154.548	119.943

- **Costos de Operación:** Se estima que la operación del embalse hasta la etapa 12 mantendrá la misma organización actual, que se mantendrá tanto en el área de embalse como en la sala de control centralizado en Rancagua y, por tanto, con el mismo nivel de costos operativos, asociados al área del embalse Carén. A continuación, en la Tabla 8.9, se encuentran los montos del costo operacional en que incurre el embalse Carén, los cuales se encuentran expresados en moneda corriente 2013, en dólares norteamericanos (GPR, 2014).

**Tabla 8.9** Costo operacional en que incurre el embalse Carén por año de operación (GPR, 2014).

<b>Ítem</b>	<b>Monto Anual [kUSD/año]</b>
<b>Gastos primarios</b>	1.221,9
<b>Remuneraciones</b>	727,8
<b>Materiales</b>	75,3
<b>Combustibles</b>	4
<b>Servicios de terceros</b>	408,6
<b>Otros servicios</b>	6

<b>Gastos secundarios</b>	2.288,2
<b>Mantenimiento y reparación</b>	932
<b>Suministros</b>	41,1
<b>Equipos de servicios</b>	341,1
<b>Servicios varios</b>	973,6
<b>Total</b>	3.510,1

#### 8.8 ANEXO H: DETALLE DE CÁLCULO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS INDICADORES ECONÓMICOS DE INSTALAR UNA PLANTA DE RELAVES EN PASTA Y UNA PLANTA DE RELAVES FILTRADOS PARA UNA PRODUCCIÓN DE 140 KTPD DE RELAVES.

A continuación en las Tablas 8.10, 8.11, 8.12 y 8.13, se presenta el detalle de cálculo para la determinación del CAPEX y OPEX de instalar una planta de relaves en pasta y una planta de relaves filtrados. El resto de los indicadores económicos se pueden determinar a partir de estos dos valores calculados para ambas plantas por simple aplicación de las ecuaciones mostradas en la Sección 4.2.

**Tabla 8.10** Detalle de cálculo para la determinación del CAPEX de instalar una planta de relaves en pasta.

Descripción	Inversión [MUS\$]
<b>Capital fijo</b>	119,78
<b>Planta de espesamiento</b>	82,28

<b>Espesadores</b>	47,17
<b>Obras civiles</b>	2,28
<b>Mecánica</b>	3,99
<b>Piping</b>	5,35
<b>Instrumentación</b>	1,75
<b>Electricidad</b>	21,75
<b>Suministro de energía</b>	4,72
<b>Línea alta tensión</b>	2,52
<b>Subestación eléctrica</b>	2,20
<b>Canales de contorno</b>	28,80
<b>Construcción de canales</b>	28,80
<b>Planta piloto</b>	3,98
<b>Investigación y planta piloto</b>	3,98
<b>Capital de trabajo</b>	23,96
<b>Capital de trabajo (20% CF)</b>	23,96
<b>Gastos de puesta en marcha</b>	9,58
<b>Gastos de puesta en marcha (8% CF)</b>	9,58
<b>Contingencias</b>	28,96
<b>Contingencias (25%)</b>	28,96
<b>CAPEX</b>	182,27

**Tabla 8.11** Detalle de cálculo para la determinación del OPEX de una planta de relaves en pasta.

<b>Descripción</b>	<b>Costo [MUS\$]</b>
<b>Costos directos de operación</b>	13,79
<i>Energía planta espesamiento</i>	0,01
<i>Operación planta piloto</i>	0,31
<i>Reactivos y catalizadores</i>	0,97
<i>Energía bombas</i>	3,71
<i>Sueldos supervisores</i>	0,51
<i>Sueldos operadores y mantenedores</i>	1,22
<i>Mantenimiento y reparaciones</i>	5,99
<i>Otros costos directos 1</i>	0,90
<i>Otros costos directos 2</i>	0,18
<b>Costos indirectos de operación</b>	1,12
<i>Seguros maquinarias</i>	0,80
<i>Seguros edificios</i>	0,32
<b>Gastos generales de planta</b>	0,01
<i>Gastos varios</i>	0,01
<b>Contingencias</b>	
<i>Contingencias (25%)</i>	3,73
<b>OPEX</b>	18,65



**Tabla 8.12** Detalle de cálculo para la determinación del CAPEX de instalar una planta de relaves filtrados.

Descripción	Inversión [MUS\$]
<b>Capital fijo</b>	242,32
<b>Planta de filtros</b>	208,80
<i>Planta de filtros</i>	183,79
<i>Correa de distribución</i>	25,02
<b>Suministro de energía</b>	4,72
<i>Línea de alta tensión</i>	2,52
<i>Subestación eléctrica</i>	2,20
<b>Canales</b>	28,80
<i>Construcción de canales</i>	28,80
<b>Capital de trabajo</b>	48,46
<i>Capital de trabajo (20% CF)</i>	48,46
<b>Gastos de puesta en marcha</b>	19,39
<i>Gastos de puesta en marcha (8% CF)</i>	19,39
<b>Contingencias</b>	77,54
<i>Contingencias (25%)</i>	77,54
<b>CAPEX</b>	387,71

**Tabla 8.13** Detalle de cálculo para la determinación del OPEX de una planta de relaves en pasta.

Descripción	Costo [MUS\$]
<b>Costos directos de operación</b>	78,88
<i>Reactivos y catalizadores</i>	0,36
<i>Suministros eléctrico</i>	22,93
<i>Sueldos supervisores</i>	1,14
<i>Sueldos operadores y mantenedores</i>	2,51
<i>Mantenimiento y reparaciones</i>	12,12
<i>Camiones</i>	25,02
<i>Bulldozers</i>	5,04
<i>Rodillos vibratorios</i>	7,94
<i>Otros costos directos 1</i>	1,82
<i>Otros costos directos 2</i>	0,38
<b>Costos indirectos de operación</b>	2,36
<i>Seguros maquinarias</i>	2,09
<i>Seguros edificios</i>	0,27
<b>Gastos generales de planta</b>	0,05
<i>Gastos varios</i>	0,05
<b>Contingencias</b>	
<i>Contingencias (25%)</i>	20,32
<b>OPEX</b>	101,61