

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**ANÁLISIS ECONÓMICO DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MUROS
DE SUELO REFORZADO COMO BASE DE INSTALACIÓN DE UNA
CHANCADORA PRIMARIA SEMI - MÓVIL**

**Trabajo de investigación para optar el grado académico de
Magíster en Regulación, Gestión y Economía Minera**

AUTOR

RUBÉN LOUREDES SALAZAR IZQUIERDO

ASESOR:

LUIS FERNANDO GALA SOLDEVILLA

LIMA, PERÚ

Abril, 2019

RESUMEN EJECUTIVO

Nuestro país, al ser un país que se ve influenciado en gran medida por la actividad minera puede verse beneficiado o afectado por las variaciones en el precio de los minerales, es así que la alta probabilidad en el alza de estos precios ha permitido a las empresas mineras desarrollar diversos planes de explotación, ampliación o modernización que incluyen trabajos de mejoras en el transporte, eficiencia en la etapa de concentración, eficiencia en la explotación, entre otros. Esto ha traído consigo la necesidad de construir infraestructura moderna que permita cumplir con estándares y plazos, todo esto dentro de los límites de su presupuesto proyectado. Dentro de este contexto la construcción de muros de suelo reforzado aparece como una excelente alternativa para la instalación de una chancadora primaria semi – móvil, brindándonos mayor cantidad de beneficios durante la etapa de construcción, mantenimiento y cierre que los muros de contención convencionales, y ofreciéndonos los mismos estándares de calidad finales.

Para desarrollar esta investigación, se ha realizado la selección bibliográfica que nos ha permitido brindar una perspectiva general de lo que es la minería a tajo abierto así como las etapas del procesamiento de mineral, luego se realizó un breve análisis de lo que son los costos en las operaciones mineras y además de los conceptos básicos para la reducción de dichos costos. Posteriormente nos hemos enfocado de lleno en la teoría de la construcción de muros de suelo reforzado, evaluación de presupuestos y evaluación de rentabilidad de proyectos de construcción.

Finalmente se realizó el análisis técnico – económico de la construcción de un muro de suelo reforzado ejecutado por Southern Perú Copper Corporation en su proyecto minero Cuajone como base de instalación de su chancadora primaria y se realizó la comparación de costos con otros métodos alternativos como la construcción de un muro de contención de concreto armado y el montaje de una estructura metálica. Como resultado, se obtuvo que el muro de suelo reforzado fue la mejor alternativa analizada ya que llegó a reunir la mayor cantidad de factores técnicos favorables y a su vez ofreció un mejor VAN (US\$ -1'379,428.42) en comparación a la estructura de concreto (US\$ -3'751,615.66) y la estructura de acero (US\$ -2'481,571.62). Escenario que se repite al analizar el CAE de las tres alternativas.

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO.....	ii
ÍNDICE	iii
LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1. TEMA	1
2. PROBLEMA.....	2
3. HIPÓTESIS	4
4. OBJETIVOS	5
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	6
5. MINERÍA A TAJO ABIERTO.....	6
5.1 ETAPAS DEL PROCESAMIENTO DE MINERAL.....	7
5.1.1 TRITURACIÓN Y CHANCADO PRIMARIO	7
5.1.2 MOLIENDA	9
5.1.3 FLOTACIÓN	10
5.1.4 SECADO	10
5.1.5 DISPOSICIÓN DE RELAVES	10
6. DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS DE CHANCADO	10
6.1 DISEÑO DE LA TRITURACIÓN O CHANCADO	11
6.1.1 LOCALIZACIÓN.....	11
6.1.2 TRANSPORTE DEL MINERAL A LA CHANCADORA	12
6.2 TIPOS DE PLANTAS CHANCADORAS	12
6.2.1 PLANTA FIJA O ESTACIONARIA.....	12
6.2.2 PLANTA SEMI FIJA O SEMI ESTACIONARIA	12
6.2.3 PLANTA MÓVIL O PORTÁTIL.....	13
6.2.4 PLANTA SEMI MÓVIL O SEMI PORTÁTIL.....	13

7.	COSTOS DERIVADOS DE LAS OPERACIONES MINERAS	14
7.1	LOS COSTOS DESDE UNA PERSPECTIVA CONTABLE – FINANCIERA	15
7.2	LOS COSTOS DESDE UNA PERSPECTIVA ECONÓMICA	15
7.3	LOS COSTOS DESDE UNA PERSPECTIVA ESTRATÉGICA – COMERCIAL	17
8.	CONCEPTOS BÁSICOS PARA LA REDUCCIÓN DE LOS COSTOS DE UNA OPERACIÓN MINERA	17
8.1	MOVER LA MÍNIMA CANTIDAD DE MATERIAL	18
8.2	MOVER EL MATERIAL LA MENOR DISTANCIA POSIBLE	18
8.3	MOVER EL MATERIAL CON LA MÍNIMA CANTIDAD DE EQUIPOS	18
8.4	MOVER EL MATERIAL CON EL MÍNIMO NÚMERO DE PERSONAS	18
8.5	MOVER EL MATERIAL EN EL MENOR TIEMPO POSIBLE	19
8.6	CORRECTA SELECCIÓN DEL TIPO Y TAMAÑO DE LOS EQUIPOS	19
8.7	CORRECTA DETERMINACIÓN DEL CRONOGRAMA DE ADQUISICIÓN DE EQUIPOS	20
8.8	CORRECTA ELECCIÓN DE SUBCONTRATOS	20
9.	PRESUPUESTOS EN LA CONSTRUCCIÓN Y CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS	21
9.1	INTRODUCCIÓN	21
9.2	PLANEAMIENTO DE LOS PRESUPUESTOS	21
9.3	COSTOS PRESUPUESTADOS VERSUS COSTOS REALES	22
9.4	DEBILIDADES EN LOS PRESUPUESTOS	22
9.5	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PRESUPUESTOS	23
9.6	CRITERIOS DE MEDICIÓN DE LA RENTABILIDAD DE LOS PROYECTOS	25
9.6.1	VALOR ACTUAL NETO (VAN)	25
9.6.2	TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)	27
9.6.3	PERIODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN (PRI)	28
9.6.4	ÍNDICE BENEFICIO/COSTO (B/C)	29
9.6.5	COSTO ANUAL EQUIVALENTE (CAE)	30
9.6.6	VALOR ACTUAL DE LOS COSTOS (VANC)	30
10.	MUROS DE SUELO REFORZADO	31
10.1	INTRODUCCIÓN	31
10.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS MUROS DE SUELO REFORZADO	32
10.3	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	34
10.3.1	DISEÑO DE MUROS DE SUELO REFORZADO	34

10.3.2 CONSTRUCCIÓN DE MUROS DE SUELO REFORZADO CON CARAS DE PANELES PREFABRICADOS.....	38
10.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DE MUROS DE SUELO REFORZADO.....	42
10.4.1 VENTAJAS	42
10.4.2 POTENCIALES DESVENTAJAS	43
10.5 COSTOS RELATIVOS DE LA CONSTRUCCIÓN, MANTENIMIENTO Y CIERRE DE UN MURO DE SUELO REFORZADO	44
10.5.1 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN.....	45
10.5.2 COSTOS DE MANTENIMIENTO	46
10.5.3 COSTOS DE CIERRE	49
10.6 ANÁLISIS DE RIESGOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN MURO DE SUELO REFORZADO.....	49
10.6.1 RIESGOS DEBIDO A SISMOS.....	49
10.6.2 RIESGOS POR FALTA DE CONOCIMIENTO Y EXPERIENCIA	50
10.6.3 RIESGOS POR FALLA EN EL DISEÑO	50
10.6.4 RIESGOS POR FLEXIBILIDAD	51
CAPÍTULO III: CASO DE ESTUDIO Y PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	52
11. TIPOS DE TRANSPORTE UTILIZADOS POR SPCC	54
11.1 TRANSPORTE POR FERROCARRIL.....	54
11.2 TRANSPORTE POR CAMIONES	57
11.3 TRANSPORTE POR FAJAS	60
12. SOLUCIÓN ADOPTADA POR SPCC: IN PIT CRUSHING AND CONVEYING (IPCC).....	61
12.1 VENTAJAS DEL IN-PIT CRUSHING AND CONVEYING (IPCC).....	62
12.2 SISTEMAS DE INSTALACIÓN DE LA CHANCADORA IN-PIT	64
12.2.1 CHANCADORA FIJA: PLANTAS DE CHANCADO FIJAS EN EL SUELO O MONTADAS AL BORDE DE UN TALUD.....	64
12.2.2 CHANCADORA SEMI – FIJA.....	66
12.2.3 CHANCADORA SEMI – MÓVIL DE DESCARGA DIRECTA.....	68
12.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	70
12.3.1 UBICACIÓN Y CONDICIONES DEL SITIO DE PROYECTO	71
12.3.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL PROYECTO	72

12.3.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS TRABAJOS DEL ÁREA 100 (LUGAR DONDE SE ENCUENTRA LA CHANCADORA PRIMARIA	73
12.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS ALTERNATIVAS ANALIZADAS.....	74
13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
14. BIBLIOGRAFÍA	85



LISTA DE TABLAS

Tabla 10. 1: Variedad de Aplicaciones de Estructuras de suelo reforzado. (Railways, 2005)	35
Tabla 10. 2 Ventajas y desventajas de los muros de suelo reforzado VS. muros de concreto armado VS. estructuras metálicas. (Elaboración propia).....	44
Tabla 10. 3 Actividades analizadas en la etapa de construcción de un muro de suelo reforzado. (Elaboración propia).....	46
Tabla 10. 4 Instrumentos necesarios para el monitoreo y control de muros de suelo reforzado. (Elaboración propia).....	48
Tabla 10. 5 Actividades analizadas en la etapa de mantenimiento de un muro de suelo reforzado. (Elaboración propia).....	48
Tabla 10. 6 Actividades analizadas en la etapa de cierre de un muro de suelo reforzado. (Elaboración propia)	49
Tabla 12. 1 Presupuesto de construcción de muro de suelo reforzado. (Elaboración propia)75	
Tabla 12. 2 Presupuesto de construcción de estructura de concreto armado. (Elaboración propia)	75
Tabla 12. 3 Presupuesto de construcción de estructura de acero predimensionado (Elaboración propia)	76
Tabla 12. 4 Presupuesto de mantenimiento de muro de suelo reforzado. (Elaboración propia)	76
Tabla 12. 5 Presupuesto de mantenimiento de estructura de concreto armado (Elaboración propia)	76
Tabla 12. 6 Presupuesto de mantenimiento de estructura de acero predimensionado. (Elaboración propia)	77
Tabla 12. 7 Presupuesto de cierre de muro de suelo reforzado. (Elaboración propia)	77
Tabla 12. 8 Presupuesto de cierre de estructura de concreto armado. (Elaboración propia)	77
Tabla 12. 9 Presupuesto de cierre de estructura de acero predimensionado. (Elaboración propia)	77
Tabla 12. 10 Evaluación económica de las tres alternativas analizadas. (Elaboración propia)	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 10. 1: Componentes de Muro de Suelo Reforzado Fuente (Tarawneh, 2018).....	32
Figura 10. 2: Aplicaciones de tipos de suelo reforzado Fuente: (Railways, 2005).....	33
Figura 10.3: Conectores utilizados para la sujeción de bandas de refuerzo. Fuente: (Freyssinet Tierra Armada, 2015)	36
Figura 10. 4 Construcción de solera de concreto para el montaje de paneles. . Fuente: (Freyssinet Tierra Armada, 2015)	39
Figura 10. 5 Colocación de primera fila de paneles prefabricados. Fuente: (Freyssinet Tierra Armada, 2015).....	40
Figura 10. 6 Secuencia de relleno desde la parte posterior hacia la cara frontal del muro. Fuente: (Freyssinet Tierra Armada, 2015)	41
Figura 10. 7 Nivel de relleno hasta alcanzar los conectores del panel prefabricado. Fuente: (Freyssinet Tierra Armada, 2015)	41
Figura 11. 1 Chancadora fija montada en el borde instalada dentro de una estructura de concreto. Fuente: (Darling, 2011).....	65
Figura 11. 2 Chancadora instalada sobre estación de acero estructural. Fuente (Darling, 2011)	67
Figura 11. 3 Planta chancadora semi - móvil de descarga directa. Fuente (Darling, 2011)	69
Figura 12. 1 Ubicación general de las áreas de trabajo. Fuente SPCC.....	73

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1. TEMA

Debido a la necesidad de construir en lugares donde no se dispone de grandes áreas, no se cuenta con materiales disponibles para la construcción o lugares donde existen serias limitaciones económicas han llevado a que se desarrollen nuevas soluciones de ingeniería en lo relacionado a estructuras de contención y construcción de muros con pendientes pronunciadas. Es así que en la década de los 60' el ingeniero francés Henri Vidal investigó la construcción de terraplenes con bandas de acero recubiertos por placas prefabricadas de concreto, a esta técnica se le llamó Tierra Armada.

Este nuevo sistema compuesto presentaba un comportamiento distinto al comportamiento de los muros de suelo sin ningún reforzamiento ya que además de presentar una elevada cohesión, mejoraba también sus características a tracción y corte (mejorando evidentemente su coeficiente de fricción) lo que permitía que el terraplén pudiera soportar mayores cargas. Posteriormente en la década de los 70' se empezaron a utilizar diferentes tipos de materiales poliméricos denominados geosintéticos que, por sus mejores características técnicas y económicas, sustituyeron a las bandas de acero empleadas por Vidal y su utilización fue mucho más difundida tanto en Europa como en Norteamérica.

De manera general, los muros de suelo reforzado son ampliamente utilizados en casos en los que las propiedades de los suelos no cumplen con todas las características requeridas para su utilización, por lo tanto, requieren de tratamientos especiales para mejorar su comportamiento según las especificaciones deseadas. Es así que el sistema de construcción de muros de suelo reforzado implica darle al suelo propiedades que antes no poseía, ya que si bien es cierto el suelo posee buena resistencia a compresión, no tiene una elevada resistencia a tracción ni a corte, por ende al colocarle refuerzos en forma de geosintéticos entre capas de relleno se consigue que el suelo mejore sus características o propiedades globales. (Shukla, 2006)

El sistema de suelo reforzado se basa en la interacción entre el suelo y un tipo de refuerzo que permita mejorar las propiedades a tracción que éste no posee y de esta manera se consigue hacerlo más resistente a los esfuerzos que actúan sobre él.

2. PROBLEMA

Actualmente debido a la alta probabilidad en el alza del precio de los minerales muchas empresas mineras han iniciado sus planes de explotación, ampliación y modernización, los cuales incluyen entre otras actividades la instalación de nuevos equipos de molienda como es el caso de las chancadoras primarias. Éstas a su vez necesitan estar cercanas a los tajos que están siendo explotados, minimizando de esta manera los costos de transporte de mineral.

En diferentes minas las construcciones realizadas para la instalación de chancadoras primarias abarcan desde grandes bloques de concreto (que supone enormes costos de ejecución) hasta excavaciones masivas para la instalación subterránea de las chancadoras primarias (elevados costos en movimiento de tierras), sin embargo de manera paralela surgen también otras opciones y es por eso que durante el proceso de concepción e ingeniería es importante analizar la manera más rápida, más económica y no menos segura para realizar la cimentación e instalación de una chancadora primaria cercana a un tajo en explotación, considerando aspectos como resistencia del terreno, cargas a ser transmitidas (principalmente ejercida por los equipos propios de la mina) y asentamientos admisibles.

Bajo este enfoque la alternativa que se elija para la construcción de la cimentación, además de presentar características técnicamente favorables, debe considerar la menor interrupción a los trabajos propios de la mina y enfocarse primordialmente en menores tiempos de ejecución acompañados a su vez de menores costos, ambos aspectos brindarán finalmente un producto económicamente rentable que permitirá a la mina la optimización de sus recursos

Asentamientos en el Suelo

La presión admisible del suelo es un factor muy importante que se debe tener en cuenta al realizar un proyecto de construcción ya que podría hacerlo inviable económicamente. Esta propiedad es controlada por los asentamientos admisibles especificados en las

normas, los cuales en caso que no se cumpliesen podrían ocasionar problemas tanto estéticos como estructurales. (Izquierdo, 2014)

Según la NTE E 050 2006, en el caso de cimentaciones de equipos la distorsión angular máxima causada por los asentamientos diferenciales es de 1/750, un valor bastante pequeño que nos obliga a mantener en todo momento una estructura con asentamientos diferenciales mínimos.

Muros de Contención

Se denomina muros de contención a aquellas estructuras cuyo ángulo de inclinación es superior a 70°. La principal función de este tipo de estructuras es la de soportar las presiones laterales originadas por el empuje del terreno, se agrupan de la siguiente manera:

- Muros de Gravedad: se construyen de concreto simple o ciclópeo y dependen de su propio peso y del suelo que descansa sobre éste para su estabilidad. Este tipo de construcción no es económicamente rentable para muros altos. (Das, 2001)
- Muros de Semi – Gravedad: similares a los muros de gravedad pero con una pequeña cantidad de acero de refuerzo, de esta manera se minimiza el tamaño de las secciones del muro. (Das, 2001)
- Muros en Voladizo: son muros que se construyen en concreto armado, consisten en un muro delgado y una losa de base. Son económicos hasta una altura de 8 metros aproximadamente. (Das, 2001)
- Muros de Contrafuertes: similares a los muros en voladizo, sin embargo, tienen muros de concreto verticales denominados contrafuertes que unen el muro con la losa de la base. Posee muy buenas características ya que permite reducir las fuerzas cortantes y momentos flectores. (Das, 2001)
- Muros de Suelo Reforzado: se han convertido mundialmente en una alternativa de construcción frente a los muros de concreto armado y a los taludes conformados naturalmente, su utilización se basa fundamentalmente en la existencia de deficiencias en la capacidad portante del terreno (lo que nos ocasionarían asentamientos diferenciales elevados) o cuando las condiciones naturales del terreno no permitan que las zonas de relleno sean realizadas con ángulos de reposo iguales a las del suelo de relleno (terreno natural). A diferencia de los

muros de concreto armado, su construcción es económicamente rentable en muros de mediana y gran altura. (Macaferri, 2017)

3. HIPÓTESIS

Los muros de suelo reforzado son hoy en día el método más rápido (debido al proceso constructivo que éste tiene, considerando los materiales prefabricados que se utilizan y movimiento de tierras masivo), económico (en base a los precios unitarios de las actividades) y constructivamente práctico (basándonos nuevamente en el proceso de ejecución a forma de “lego”) para soportar las cargas y las vibraciones transmitidas por una chancadora primaria así como las cargas de los camiones que transportan el mineral que alimentará dicha chancadora. Esta hipótesis se fundamenta en pilares como la capacidad portante del terreno, capacidad portante del muro de suelo reforzado, asentamientos diferenciales y disminución de los costos de materiales para la construcción del muro de suelo reforzado. Se realizará una descripción de cada una de estas hipótesis a continuación:

- Mediante diferentes casos se comprobará que la utilización de geosintéticos se ha convertido en una de las alternativas más prácticas y confiables al momento de construir, siendo más específicos, los geosintéticos que son actualmente utilizados como refuerzos en la construcción de muros de suelo reforzado como geotextiles, geomallas y geostraps.
- Capacidad Portante del terreno. Si realizamos el análisis de la capacidad portante del terreno podremos identificar que los muros de suelo reforzado han sido diseñados principalmente cuando existen deficiencias en el suelo de cimentación, proporcionando una distribución más adecuada de cargas y presiones, esta nueva redistribución permitirá finalmente que la carga sea transmitida sin inconvenientes al suelo de cimentación.
- Al momento de realizar el análisis de un muro de suelo reforzado se podrá verificar la estabilidad interna, estabilidad externa, sobrecargas que el muro puede soportar y finalmente la estabilidad global para garantizar que el muro se comportará de la manera para la que fue diseñado considerando la seguridad de las personas y el correcto funcionamiento de los equipos que forman parte de la chancadora primaria y del sistema de fajas.

- Asentamientos Diferenciales. Tal como se indicó líneas arriba los asentamientos diferenciales son un tema delicado al momento de hablar de una cimentación e instalación, por ese motivo se verificará que los asentamientos diferenciales sean los permisibles según el Reglamento Nacional de Edificaciones con la finalidad de que se pueda garantizar la correcta operatividad de todos los equipos durante el tiempo de vida útil proyectado del muro de suelo reforzado.
- Finalmente al realizar el análisis económico se verificará que el costo de ejecución de un muro de suelo reforzado sea considerablemente menor que el costo de construcción de un muro de concreto armado o ciclópeo, a la vez se deberá comprobar que ésta fue la mejor alternativa que tuvo la empresa Southern Perú Copper Corporation para la construcción de su chancadora primaria realizando un análisis de sus precios unitarios y de su presupuesto final, considerando en cada caso los materiales utilizados, la mano de obra empleada y el tiempo que duró la ejecución de este trabajo.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis técnico - económico de la construcción de un muro de suelo reforzado que nos permita elegir a éste como la mejor alternativa para la instalación de una chancadora primaria, considerando las características propias de una mina en ejecución como es el caso de Cuajone, operado por Southern Perú Copper Corporation, a su vez se realizará una comparación con diferentes alternativas como la construcción de muros de concreto armado para la instalación de una chancadora primaria subterránea y el montaje de una estructura de acero predimensionado.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los diferentes tipos de construcciones que se utilizan en la actualidad como base de sostenimiento, ubicación y cimentación de las chancadoras primarias en diferentes minas en Perú, Sudamérica y el mundo; considerando los aspectos propios de cada mina en ejecución.

- Realizar en análisis de costos (análisis de precios unitarios y evaluación de presupuesto) de un muro de suelo reforzado y compararlo con otras alternativas de construcción que nos permitan verificar que el primero es más económico y práctico para la instalación de una chancadora primaria semi – móvil.
- Realizar una evaluación económica (análisis de indicadores de rentabilidad) de la construcción, mantenimiento y cierre del muro de suelo reforzado construido por SPCC en Cuajone como base de cimentación e instalación de una chancadora primaria.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

5. MINERÍA A TAJO ABIERTO

Según la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE), se denomina minería a tajo abierto a la explotación superficial desarrollada en franjas horizontales denominados bancos de donde el mineral es extraído de manera descendente a partir de las capas superiores. Por lo general, para la explotación de un banco de mineral se extrae primero el material estéril que lo recubre, a esta actividad se la conoce como desbroce y conforma una relación de tonelaje de desmonte a mineral; este ratio es variable de mina a mina ya que depende del tipo de yacimiento y de la ubicación y posición del mismo. Este tipo de explotación mueve grandes volúmenes de material y se aplica en yacimientos masivos diseminados de gran tamaño que se encuentran cerca de la superficie ya que si se encontrara a mayores profundidades tendría que moverse mayor cantidad de material estéril, aumentando así el costo de producción. (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2011)

El mineral extraído de las minas generalmente no se puede comercializar tal como se extrae, es necesario realizar un tratamiento previo con la finalidad de elevar su porcentaje de contenido metálico (ley) y de esta manera hacer posible su comercialización. Este tratamiento es denominado “concentración” y es un proceso que inicia con la reducción del tamaño del mineral (chancado y molienda), concentrando por un lado las partes con contenido útil, en tanto que el material sin valor comercial o relave es descartado. La concentración está conformada por los procesos de chancado, molienda, flotación y secado. (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2011)

5.1 ETAPAS DEL PROCESAMIENTO DE MINERAL

5.1.1 TRITURACIÓN Y CHANCADO PRIMARIO

El material extraído es llevado a la chancadora donde se produce la primera etapa del proceso, en esta etapa se reduce el tamaño del mineral a dimensiones determinadas (dependiendo de las características de la chancadora, por lo general hasta un tamaño máximo de 8 pulgadas de diámetro), posteriormente pasa a la chancadora secundaria en donde se reduce a tamaños menores (3 pulgadas) y luego a la chancadora terciaria en donde el mineral queda reducido a un tamaño uniforme máximo de ½ pulgada (1.27 cm) (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2011)

Trituración es el término utilizado para describir la reducción progresiva del tamaño del mineral minado, esta reducción del tamaño del mineral es necesaria ya sea para preparar el mineral para el mercado (en el caso del hierro y el carbón) o, en el caso de los metales preciosos, permitir la liberación y separación de la parte valiosa del mineral. Durante el proceso de beneficio, la liberación y separación son pasos fundamentales en el procesamiento de mineral.

El grado de liberación alcanzado por la trituración define la curva de recuperación del mineral en el proceso de beneficio y a su vez éste representa típicamente el más alto costo de capital y gasto de operación. Por ende, el proceso de trituración tiene un gran impacto en el resultado final de la operación. Un adecuado diseño del circuito de beneficio, así como una buena operación de éste son críticos para el éxito completo del proyecto.

Debido a que el proceso de trituración comienza con el minado, el grado de chancado alcanzado debería ser utilizado como un indicador de performance para el proceso de beneficio, de manera adicional el circuito de chancado también debería ser desarrollado considerando el proceso de minado seleccionado. Una voladura eficiente es efectiva tanto para reducir el tamaño máximo como para mejorar la generación de finos. De manera general se puede concluir lo siguiente:

- Los patrones escalonados de perforación (en comparación con los cuadrados) reducen la máxima distancia entre las perforaciones y, por lo general, reducen el tamaño máximo del mineral a ser transportado.

- La calidad de la perforación en términos de precisión (en los ejes X, Y y Z) mejoran la fragmentación y ofrecen beneficios de costos.
- El efecto de la secuencia de volado, el tamaño de la voladura y la geometría del patrón se deben considerar para evaluar el resultado de la trituración.

Por lo general, el material minado debe someterse a una etapa de reducción de tamaño para facilitar su acarreo, las preguntas que se deben abordar incluyen el tamaño, número y tipo de chancadora utilizada para producir la alimentación adecuada del molino, dónde colocar las chancadoras y cómo alimentarlas. La elección de la chancadora primaria suele ser entre chancadoras de mandíbula y chancadoras giratorias (utilizada en Cuajone – SPCC). Normalmente las chancadoras giratorias son utilizadas para procesar cantidades mayores a 1,000 t/h de mineral.

Por otro lado, la ubicación de la chancadora primaria es una cuestión crítica. Las chancadoras primarias se pueden ubicar de manera permanente, pueden ser semi-móviles o móviles. Incluso las chancadoras instaladas de manera permanente pueden ser desmontadas y reubicadas durante la vida útil de una mina, por lo que la pregunta sobre cuál de las tres opciones a elegir debe ser analizada considerando los costos de capital y los costos de operación de la flota incremental de camiones requerida en comparación con las estaciones de chancado móvil o semi – móvil.

Las plantas fijas dependen simplemente de la flota de camiones para llevar el mineral a la chancadora. Las plantas móviles y semi-móviles a menudo utilizan orugas de transporte que tienen capacidades de más de 1,000 toneladas, para reubicar periódicamente la estación de chancado.

La evolución de la diversidad del tamaño de los camiones junto con una tendencia general de profundización de los pits (y muchas veces incremento de las pendientes), han tendido a afectar el sistema In Pit Crushing and Conveying (IPCC), sin embargo, estos últimos ofrecen mayores ventajas en términos de reducción de costos de operación, incremento de disponibilidad y menores requerimientos de mano de obra en comparación con los primeros.

Aparte de la elección de la chancadora y de la ubicación y movilidad de ésta, las consideraciones de diseño incluyen el tipo de alimentación de la chancadora y el

transporte del mineral hacia el stock pile; a su vez, al hablar del tipo de alimentación, se deben considerar el número de camiones y el tamaño de la tolva de descarga (hopper).

Las chancadoras primarias pueden ser alimentadas directamente por camiones mineros o pueden ser alimentadas por fajas de acarreo, la descarga directa es el método más simple de alimentación, sin embargo, el inconveniente que ocasiona es que es difícil mantener un pico de producción permanente debido a los tiempos de espera de los camiones. Por otro lado, las fajas de acarreo ofrecen la capacidad de desconectar parcialmente la chancadora de la tolva de descarga, pero su construcción significa mayores costos de capital, así como los sustanciales costos de mantenimiento.

5.1.2 MOLIENDA

En esta etapa el mineral chancado es mezclado algunas veces con reactivos y agua, y en otros casos solamente con agua; luego es procesado en molinos de bolas o de barras, en este proceso el material queda reducido a un tamaño final de 180 micrones (0.18 mm) lo que permite finalmente la liberación de la mayor parte de los minerales de cobre, plomo, zinc en forma de partículas individuales, posteriormente el equipo realiza la clasificación del material en donde la mezcla que tiene la consistencia y el tamaño adecuado (también denominado “finos”) ingresa a las celdas de flotación y el material que no cumple con los requerimientos de tamaño mínimo (“gruesos”) regresa al molino para ser procesado nuevamente. (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2011)

Este proceso puede ser realizado de dos diferentes formas, molienda convencional o molienda SAG (Semi Autógenos); la molienda convencional puede ser realizada en molinos de barras o de bolas, siendo los últimos los utilizados en plantas modernas. Los molinos SAG son equipos de mayores dimensiones, por ende poseen una capacidad de molienda mayor, y de manera adicional cuentan con un desarrollo tecnológico superior al de los molinos convencionales e incluso pueden moler material que viene directamente de la chancadora primaria. (CODELCO, 2018)

El chancado y la molienda han sido considerados como dos procesos separados, con cada etapa realizada para cierto rango de tamaño del mineral, este concepto está arraigado al histórico circuito convencional que implicó el chancado por etapas, seguido por el molino de barras del circuito abierto y el molino de bolas del circuito cerrado. Sin embargo, los equipos modernos han cambiado este concepto a partir de la fabricación de molinos autógenos, molinos semiautógenos (AG/SAG) y molinos de alta presión (HPGR),

entre otros, abarcando una amplia gama de aplicaciones de trituración y rangos de tamaño de partículas.

5.1.3 FLOTACIÓN

La flotación es un proceso físico – químico que permite la separación de los minerales, el material molido y mezclado con agua, cal y reactivos (espumantes, colectores o depresantes) es llevado hacia las celdas de flotación, en estas celdas la mezcla del material molido con agua y reactivos forman una especie de burbujas que emergen hacia la superficie transportando dentro de ellas partículas de sulfuros de mineral formando una especie de espuma que rebosa el nivel de las celdas de flotación, dicha espuma es recogida para continuar con el proceso de sedimentación y filtración para obtener el concentrado final. (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2011)

5.1.4 SECADO

Como se explicó en la etapa anterior, el material resultante del proceso de flotación es recogido a través de pequeños canales y es conducido mediante agua a los tanques espesadores para realizar el proceso de sedimentación, posteriormente este material es trasladado para realizar los procesos de filtrado y secado. (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2011)

5.1.5 DISPOSICIÓN DE RELAVES

Los residuos o relaves provenientes del proceso de flotación como de la planta de secado son transportados hacia las canchas de relaves donde son almacenados considerando los estándares ambientales establecidos en el país donde se realiza la operación minera. (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2011)

6. DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS DE CHANCADO

Según la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO), la selección del tipo y tamaño de la chancadora a utilizar depende de los siguientes factores (CODELCO, 2018):

- Volumen del material o tonelaje a triturar
- Tamaño de la alimentación
- Tamaño del producto de salida

- Dureza de la roca matriz, ya que la proporción de mineral suele ser pequeña. Este índice es de suma importancia y se expresa normalmente por la escala de Mohs, la cual tiene implicancia al momento de seleccionar el tipo de equipo a utilizar
- Tenacidad, según el índice de tenacidad de la roca a triturar, el que se compara con el de la caliza a la que se le asigna el índice 1.
- Abrasividad, debido fundamentalmente al contenido de sílice, principal causante del desgaste de los equipos
- Humedad del material en el yacimiento y en la planta, según las condiciones climatológicas del lugar
- Contenido de finos y lamas, los materiales finos pueden disminuir la permeabilidad originando dificultades en la percolación posterior.

6.1 DISEÑO DE LA TRITURACIÓN O CHANCADO

“Antes de iniciar el proceso de trituración o chancado es recomendable realizar una selección previa mediante un zarandeo o cribado, con la finalidad de segmentar el material en diferentes granulometrías. Este proceso previo nos ofrece ventajas como el aumento de la capacidad del equipo, evitar atascos en las cámaras de recepción de material de las chancadoras, reducción del consumo de energía y la obtención de un material con menor cantidad de finos”. (CODELCO, 2018)

Durante la etapa del diseño del chancado y con el objetivo de disminuir los costos de operación, especialmente en la etapa de chancado primario, se deben considerar los siguientes factores (CODELCO, 2018):

6.1.1 LOCALIZACIÓN

Dependiendo la localización de la mina y de la planta concentradora, la chancadora se debe ubicar en un punto en el que el recorrido entre esos dos puntos sea mínimo, sin embargo, y por temas de seguridad, las chancadoras se han mantenido alejadas del tajo de la mina debido a las voladuras; por otro lado, se debe considerar que el transporte del material chancado es menos costoso, ya que ocupa un menor volumen y además ocasiona un menor desgaste a las tolvas de los camiones, así mismo el material proveniente de mina tiene un recorrido más continuo. Por estas razones actualmente es

más conveniente ubicar a la chancadora primaria lo más cerca posible del tajo/yacimiento y de ser posible dentro de éste. (CODELCO, 2018)

6.1.2 TRANSPORTE DEL MINERAL A LA CHANCADORA

Por lo general se afirma que el 40% del costo minero en una explotación a tajo abierto corresponde a las actividades de perforación, voladura y carguío, el otro 60% corresponde al transporte del material hacia la planta concentradora. (CODELCO, 2018)

A través de los años diferentes estudios han demostrado que el transporte en camiones, a pesar de su flexibilidad, es más costoso que el transporte realizado mediante otros medios tales como las fajas transportadoras; sin embargo es necesario considerar que el transporte mediante fajas transportadoras tiene su limitante en el tamaño del material ya que el transporte por fajas necesita que la trituración o chancado sea realizado en el tajo o lo más cerca a éste. (CODELCO, 2018)

6.2 TIPOS DE PLANTAS CHANCADORAS

Considerando el transporte del material y la necesidad de movilidad de las chancadoras, se clasifican en plantas fijas o estacionarias, semi fijas, móviles o portátiles y semi portátiles.

6.2.1 PLANTA FIJA O ESTACIONARIA

Este tipo de plantas permanecen en el lugar de su instalación durante gran parte de la vida del yacimiento. Debido a sus características y en la medida de lo posible, ésta debe localizarse cerca del yacimiento y en un nivel inferior respecto de la zona de tajeo del yacimiento para disponer de una alimentación desde la parte superior por parte de los camiones. (CODELCO, 2018)

6.2.2 PLANTA SEMI FIJA O SEMI ESTACIONARIA

Las plantas semi fijas o semi estacionarias son un grupo de plantas ampliamente utilizadas en la minería en Chile debido a su versatilidad al momento de realizar su montaje, instalación, desmontaje y transporte, considerando lo anterior, la descripción de estas plantas es la siguiente:

“Este tipo de plantas se instalan en faenas de períodos largos en las que se prevé la reubicación de la planta de trituración o chancado, de este modo, sus equipos y bases se construyen para ser individualmente desmantelados y transportados a un nuevo lugar, aun cuando se puedan perder parte de los cimientos de apoyo” (CODELCO, 2018).

La nueva localización de la planta requiere un acondicionamiento previo conformado, entre otros, por nuevas cimentaciones, lo que puede provocar una para temporal en la producción. (CODELCO, 2018)

6.2.3 PLANTA MÓVIL O PORTÁTIL

Este tipo de plantas cuentan de manera integrada un sistema de transporte como parte de su equipamiento, la mayor parte de estas se pueden transportar por sí mismas debido a su sistema de rodamiento conformado por ruedas con cubierta de goma, cadenas (orugas) o rieles. Por su excelente maniobrabilidad y su capacidad de movilización, generalmente son ubicadas junto al tajo de la mina con la finalidad de ser provistas de material directamente por un equipo de carga. Al estar en movimiento permanente, necesitan de un sistema adicional de transportadores flexibles (como un sistema de fajas) que les brinde la capacidad de acoplarse al sistema de transporte masivo de mineral hacia la planta concentradora. (CODELCO, 2018)

Hasta hace más de diez años, la capacidad de movimiento de este tipo de plantas estaba limitada por el gran tamaño de los equipos, la gran masa que poseen y las fuerzas desarrolladas por las excéntricas hacían difícil su adaptación a unidades móviles, sin embargo los avances obtenidos en los diseños y nuevas técnicas de construcción han hecho posible que hoy existan grandes chancadoras móviles. (CODELCO, 2018)

6.2.4 PLANTA SEMI MÓVIL O SEMI PORTÁTIL

Mientras que las plantas móviles de trituración son construidas a partir de piezas ya montadas en su propio equipo de transporte, las plantas semi móviles se mueven de una ubicación a otra como varias cargas separadas.

Cada planta de trituración viene lista para operar con su propia tolva de alimentación, faja de alimentación, faja de descarga y cinta de transferencia de material. El tamaño y diseño de la chancadora depende naturalmente del trabajo a la que está destinada. Las plantas

con el tambor giratorio más grande o trituradoras de mandíbula pueden alcanzar disponibilidades de más del 90% trabajando con las rocas más duras mientras que al mismo tiempo recortan el costo de transporte interno en más del 50%.

Las plantas de trituración semi móviles son más recomendadas en situaciones en las que éstas serán reubicadas en cortos intervalos de tiempo. Este caso se presenta especialmente en grandes minas a tajo abierto donde los minerales pueden estar siendo extraídos en varios puntos en simultáneo. Para mantener las cargas tan bajas como sean posibles, las plantas semi móviles más grandes están diseñadas en módulos individuales para lograr un transporte más fácil y rápido. (Thyssen Krupp, 2017)

7. COSTOS DERIVADOS DE LAS OPERACIONES MINERAS

Antes de emprender cualquier análisis económico o de toma de decisiones, se deben estimar los costos operativos y de capital de los equipos de la operación minera. Los costos de los equipos varían dependiendo de la ubicación de la mina y es importante mencionar que no hay ningún costo que pueda aplicarse universalmente a todas las minas. Los costos de operación de los equipos se pueden desarrollar a partir de las estadísticas de la mina, de los proveedores, de los contratistas y del principio de integración de la economía en el contexto de la minería. Una evaluación sólida debe incorporar todas estas fuentes, con costos determinados de forma independiente verificados con al menos otro método. La acumulación de costos a partir de estadísticas, proveedores y contratistas es una tarea sencilla que no requiere mayor desarrollo, sin embargo, la acumulación de costos a partir de principios económicos – mineros es una mezcla de arte y ciencia y, debidamente realizada, agrega un valor considerable a cualquier evaluación minera. (Runge, 1998)

La estructura de costos de una empresa minera estará directamente relacionada con el objetivo que ésta persiga y de la información con la que cuenta para conseguirlos. Actualmente es reconocida la terminología de clasificación a través de los conceptos C1, C2 y C3 (Dirección de Estudios y Políticas Públicas - CODELCO, 2015); siendo el significado de cada uno de éstos, según Oswaldo Nieto los siguientes (Nieto, 2014):

C1: Costos Directos (Procesos Mina, Beneficio de Minerales, Fundición, Refinería, Gastos Generales y Administrativos, Transporte de Concentrados o metales, Impuestos al proceso minero, Gastos de Comercialización).

C2: Costos Directos + Depreciación + Amortización

C3: Costos C2 + Costos Indirectos (Costos corporativos, investigación, exploración, regalías o impuestos, costos extraordinarios) + Intereses

Actualmente es importante saber gestionar estos costos ya que nos permite obtener información importante, histórica o aproximada, cuantitativa o cualitativa sobre el comportamiento interno de una empresa o proyecto para la correcta toma de decisiones. (Guillermo, 2009)

Por esta razón se debe considerar las diferentes definiciones de costo que tienen las áreas que ayudan a generar y proyectar valor a la empresa minera como son:

- Área contable, financiera/económica
- Área estratégica - comercial

7.1 LOS COSTOS DESDE UNA PERSPECTIVA CONTABLE – FINANCIERA

Se denominan costos de producción a aquellos costos necesarios para brindar un servicio o fabricar un producto, a su vez, éstos están clasificados como costos directos (Mano de obra, materiales e insumos o equipos) e indirectos (energía eléctrica, combustibles, lubricantes, otros materiales, etc). También se consideran los costos incurridos por el desgaste de los activos, como depreciaciones y amortizaciones. (Dirección de Estudios y Políticas Públicas - CODELCO, 2015)

Por otro lado, también se tienen los costos de comercialización que son aquellos en los que se incurre para realizar la venta final, estos costos si bien no son necesarios para la producción, si lo son para realizar venta de los productos y lograr los ingresos proyectados. (Dirección de Estudios y Políticas Públicas - CODELCO, 2015)

7.2 LOS COSTOS DESDE UNA PERSPECTIVA ECONÓMICA

El problema más común en la minería es la confusión entre el concepto de "costo" y las características que pueda tener algún evento indeseable. Debido a la naturaleza del negocio una nueva mina incluye muchas características indeseables: el proceso de aprobación regulatoria, el desgaste de las carreteras locales causado por el aumento del

tráfico y la posibilidad de dificultades durante la construcción. Estas son sólo algunas características indeseables de la mina, pero no pueden ser considerados como costos.

Esta tentación de pensar en las características negativas como costos es fomentado por la tradición del negocio minero ya que, en la evaluación de cualquier proyecto, los ingresos (las buenas consecuencias) se ponderan contra los gastos (las malas consecuencias).

El valor de un evento determinado es la suma de todos sus elementos, buenos y malos. Un estudio minero típico debe evaluar todos estos atributos y determinar una suma de ingresos, gastos operativos, impuestos y similares ajustada al riesgo y al tiempo para llegar a un número comúnmente conocido como el valor actual neto (VAN). Por lo tanto, el costo real del proyecto es el valor actual neto de la alternativa más atractiva que se deja de lado para tomar la alternativa elegida.

Es importante indicar que existe una diferencia importante entre el tratamiento contable de los costos y el tratamiento económico de los costos. La depreciación desde una perspectiva contable generalmente significa una reducción constante en el valor de un equipo a lo largo del tiempo, sin embargo, desde una perspectiva económica la depreciación dentro de cualquier período de compromiso significa la diferencia entre (1) el valor del equipo si esa inversión hubiese tenido que realizarse al comienzo del período y (2) el valor si hubiese tenido que realizarse en el fin de ese mismo período. Esta "depreciación económica" nos permite interpretar gran parte de las decisiones tomadas en la industria minera, desde inversiones en desarrollos de acceso hasta inversiones en nuevas tecnologías cuando los equipos más antiguos aún pueden seguir siendo utilizados. (Runge, 1998)

Excepto por las grandes inversiones, el gasto monetario es un buen indicador del valor de la alternativa perdida en una economía de mercado. Sin embargo, la distinción no debe ser olvidada. Las empresas mineras que trabajan en países menos desarrollados, por ejemplo, no pueden suponer que los precios de mercado sean un indicador adecuado del valor de las alternativas perdidas. Por ejemplo, si una empaquetadura especial para una bomba de los espesadores no está disponible, entonces el costo de la empaquetadura definitivamente no es el precio que ésta pueda tener sino puede ser miles de dólares de producción perdida.

La distinción entre el valor de mercado de algo y el valor real de la misma cosa también es importante en la elección de inversiones de capital. El valor de mercado de una empresa minera en medio de un importante programa de desarrollo de minas puede no estar fielmente representado por el precio de las acciones de la compañía. La evaluación fiel del mercado requiere un mercado informado y en el proceso de desarrollo de las minas hay momentos en que los mercados están necesariamente bastante mal informados. (Runge, 1998)

7.3 LOS COSTOS DESDE UNA PERSPECTIVA ESTRATÉGICA – COMERCIAL

En la industria minera con la finalidad de determinar la competitividad de una empresa específica y compararla con sus similares utilizamos el C1 o “net direct cash cost”. (Dirección de Estudios y Políticas Públicas - CODELCO, 2015)

En otras palabras, como se indicó líneas arriba, el C1 agrupa los costos incurridos a través de todo el proceso minero hasta la venta final del producto, descontando los ingresos provenientes de subproductos en caso existieran (Nieto, 2014). De manera adicional el costo C1 incorpora para el caso de las empresas mineras que comercializan concentrados los costos asociados a fundición y refinación y los costos por transporte. (Dirección de Estudios y Políticas Públicas - CODELCO, 2015)

8. CONCEPTOS BÁSICOS PARA LA REDUCCIÓN DE LOS COSTOS DE UNA OPERACIÓN MINERA

El objetivo de una mina es extraer y comercializar de forma rentable un producto esencial durante la vida de un depósito mineral en particular mediante un método que conserve todos los recursos.

La conservación de un recurso natural esencial es sinónimo del uso completo del cuerpo mineralizado y solo se logra si la operación minimiza el gasto de recursos humanos, físicos, de tiempo y financieros. Las operaciones diseñadas sobre cualquier otra base están sujetas a fallas durante los períodos de tensión económica con el problema social resultante del desempleo y el problema ambiental del desperdicio de las reservas. Por lo tanto, las reglas básicas de planificación y operación minera son:

8.1 MOVER LA MÍNIMA CANTIDAD DE MATERIAL

Las pendientes del banco deben ser diseñadas con el ángulo de seguridad máximo que permita proteger a los operadores y deberá cumplir con las regulaciones de seguridad vigentes. Las pendientes más planas incrementan la relación de desmonte y disminuyen las reservas de mineral económico lo que limita la vida de la mina o desperdicia el recurso. Las acumulaciones de reservas de material entre las secuencias operativas se deben minimizar para proporcionar solo la cantidad determinada requerida para mantener la producción programada. El exceso de perforaciones, voladuras y acumulaciones de material antes o dentro de la chancadora o el circuito de la planta representan gastos innecesarios. (Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2009)

8.2 MOVER EL MATERIAL LA MENOR DISTANCIA POSIBLE

La distancia entre el yacimiento mineral y las instalaciones de procesamiento del producto final debe estar diseñada para eliminar todo movimiento innecesario y para utilizar la fuerza de la gravedad siempre que sea posible. En la mina, por ejemplo, la chancadora se ubica lo más cerca posible del cuerpo mineral para utilizar la ventaja de costo de transportar por camiones o cintas transportadoras. (Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2009)

8.3 MOVER EL MATERIAL CON LA MÍNIMA CANTIDAD DE EQUIPOS

La productividad se representa por las unidades de producto por unidad de tiempo trabajado; por ende, se debe diseñar el sistema minimizando la flota de equipos. Es un principio fundamental de ineficiencia que siempre se encuentre un uso para los equipos excedentes, generando un aumento de la fuerza de trabajo operativa, de mantenimiento, administrativa y de supervisión, así como las instalaciones y los suministros necesarios para mantenerlos. (Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2009)

8.4 MOVER EL MATERIAL CON EL MÍNIMO NÚMERO DE PERSONAS

Una programación inadecuada de mano de obra resulta en una fluctuación en la cantidad de empleos generados, con su consecuente efecto de desmoralización de la fuerza de trabajo y reducción de la productividad. (Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2009)

8.5 MOVER EL MATERIAL EN EL MENOR TIEMPO POSIBLE

La conservación del tiempo agrega el necesario sentido de urgencia a una operación, desarrolla el talento en la fuerza de trabajo y genera orgullo en la consecución de los objetivos. Estas reglas parecen simples y repetitivas; sin embargo, una investigación de operaciones existentes o pasadas muestra que el diseño básico a menudo está influenciado por la especialidad técnica o la opinión de la persona a cargo, lo que resulta en un desperdicio de recursos porque estas reglas básicas no se han aplicado a las decisiones tomadas. (Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2009)

8.6 CORRECTA SELECCIÓN DEL TIPO Y TAMAÑO DE LOS EQUIPOS

Teniendo en cuenta las grandes cantidades de mineral y roca involucradas, el equipo de minería seleccionado deberá ser el más grande disponible que pueda manejar el tonelaje, proporcionará la mezcla requerida (en el caso de plantas concentradoras) y operará a un costo óptimo. El costo es particularmente importante ya que, por ejemplo, hasta la fecha las palas más grandes, las de más de 13.8 m³ y las de más de 170 toneladas no pueden operar en los yacimientos de hierro densos y abrasivos a un costo de mantenimiento razonable. La historia indica que estos límites aumentan con la experiencia. La selección de un fabricante para suministrar el equipo requiere una evaluación objetiva; en general, todos los proveedores principales pueden proporcionar unidades que funcionarán adecuadamente sin embargo las diferencias están en los elementos individuales de operación y mantenimiento; por lo tanto, la evaluación debe basarse en una comparación de componentes comunes y la selección deberá considerar la calificación general.

El planificador no debe limitarse al pasado ya que existe una gran necesidad de innovación en el manejo de materiales. En cualquier sistema, se deben tener en cuenta los avances técnicos en la digitalización del diseño del tajo, despacho de flotas y programas de diagnóstico y mantenimiento de motores. Además, elementos tales como chancadoras primarias semi abiertas y plantas de cribado o zarandeo, cintas transportadoras, asistencia de camiones eléctricos y procedimientos de voladura están experimentando cambios que mejorarán la eficiencia de las minas en el futuro. (Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2009)

8.7 CORRECTA DETERMINACIÓN DEL CRONOGRAMA DE ADQUISICIÓN DE EQUIPOS

El cronograma se basa en las cantidades de material que se va a excavar. Los requisitos de mineral en bruto generalmente son constantes mientras que la extracción varía según la profundidad, la inmersión y la contaminación interna del cuerpo mineralizado. El cronograma de compras sigue los requisitos anuales de producción y desbroce, según lo determinado en el plan de minado de las reservas (vida del depósito). El tamaño de la flota será mínimo durante la fase de preproducción, aumentará al máximo necesario para mantener la producción más un inventario de mineral depurado, y luego finalmente disminuirá al tamaño requerido para la producción y la eliminación de roca interna. La minería selectiva es un procedimiento completamente aceptable para retrasar los gastos, en cambio la falta de planificación no lo es. La clave es mantener la producción y evitar un programa de desbroce o eliminación inadecuado. (Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2009)

8.8 CORRECTA ELECCIÓN DE SUBCONTRATOS

El equipo utilizado para realizar el desbroce y posteriormente extraer el mineral es usualmente el mismo; por lo tanto, los subcontratos o similares no son considerados. Por definición, los mineros son expertos en el movimiento de tierras, por lo tanto, realizar un subcontrato para la ejecución del desbroce puede ser entendido como una declaración de incompetencia. El desbroce realizado en la etapa de preproducción por parte del operador de la mina es un valioso período de adaptación para la fuerza de trabajo y éste se debe utilizar completamente para desarrollar los hábitos de trabajo del equipo antes de comenzar la rutina de las operaciones normales.

El subcontrato de las actividades de desbroce solo debería ser considerado en los siguientes casos: extracción por métodos diferentes al método de extracción proyectado, como dragado, raspadores o dragalina; extracción de cantidades mayores a las requeridas durante las operaciones normales. (Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2009)

9. PRESUPUESTOS EN LA CONSTRUCCIÓN Y CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS

9.1 INTRODUCCIÓN

Se define presupuesto a la expresión formal de los planes, metas y objetivos de la administración que cubre todos los aspectos de las operaciones durante un periodo de tiempo determinado y además permite establecer objetivos y fijar una dirección para alcanzarlos. (Guillermo, 2009)

Los presupuestos proporcionan control sobre el entorno inmediato, ayudan a dominar los aspectos financieros del trabajo y/o proyecto y permiten solucionar problemas antes de que estos ocurran, además se enfocan en la importancia de evaluar las alternativas de acción antes de tomar las decisiones que se planteen implementar. (Jae K. Shim, 2012)

Un presupuesto es un plan financiero para controlar operaciones y resultados futuros, está expresado en números y es necesario para trabajar de manera efectiva y eficiente; cuando se utiliza eficazmente, es una técnica que da como resultado una gestión sistemática y productiva ya que permite la correcta asignación de recursos, realizar cambios en el personal, programar la producción y manejar la empresa o proyecto de la mejor manera. Además, ayuda a mantener los gastos dentro de los límites definidos, así como los métodos alternativos de operación.

9.2 PLANEAMIENTO DE LOS PRESUPUESTOS

El presupuesto es un sistema de control y planeamiento, este comunica a todos los miembros de una organización o proyecto lo que se espera de cada uno de ellos. Por otro lado, el planeamiento determina las actividades que deben ser realizadas para alcanzar los objetivos y las metas, éste muestra las actividades que deben ser realizadas, cómo deben ser realizadas, cuándo y por quién.

Los presupuestos son los planos de las acciones proyectadas y representa la formalización del proceso de planificación. El planeamiento es tomar una decisión basados en la investigación y en análisis, entonces las reuniones de planificación presupuestarias se deben realizar de manera rutinaria para discutir temas como la cantidad de personal requerido, los objetivos, recursos y el cronograma del proyecto. (Chain, 2005)

Además, debe existir una comunicación clara que permita establecer cómo se obtuvieron los números (expresados en el presupuesto) y por qué, así como qué suposiciones se realizaron y cuáles son los objetivos.

9.3 COSTOS PRESUPUESTADOS VERSUS COSTOS REALES

Un presupuesto ofrece alertas tempranas para evitar potenciales problemas, sin embargo, la eficacia del mismo depende de que tan acertadas y precisas sean las estimaciones. Durante la etapa de planeamiento se deben considerar todos los factores dentro de un esquema realista. El presupuesto podría ser impreciso debido a factores como problemas económicos, disturbios políticos, cambios competitivos en una la industria, la introducción de nuevos productos o cambios en la regulación de un país.

Durante la etapa inicial, el presupuesto es un plan mientras que en la etapa final el presupuesto es un instrumento de control para ayudar a la administración a medir su desempeño en relación al plan a fin de mejorar dicho desempeño en el futuro. Los ingresos y costos presupuestados son comparados con los actuales ingresos y costos con la finalidad de determinar variaciones, además se debe determinar si estas variaciones son controlables o incontrolables. Si éstas son controlables, deben identificarse los responsables y se debe tomar acción para corregir los problemas o inconvenientes presentados. (Jae K. Shim, 2012)

Esta comparación debe realizarse entre los costos actuales de una actividad determinada y los costos presupuestados para esa misma actividad, bajo ese esquema, existe una base lógica de comparación. El porcentaje o monto (monetario) de diferencia entre el presupuesto y el costo actual debe ser mostrado en algún tipo de reporte de desempeño.

Por otro lado, las variaciones autorizadas en los costos presupuestados pueden ser el resultado de aumentos salariales inesperados, incremento del precio de las materias primas, etc; en estos casos se pueden permitir variaciones siempre y cuando el gerente de proyecto o empresa los pueda justificar. (Chain, 2005)

9.4 DEBILIDADES EN LOS PRESUPUESTOS

Los signos de las debilidades en los presupuestos deben ser detectados para que se puedan tomar las medidas correctivas pertinentes, entre estos signos tenemos (Jae K. Shim, 2012):

- Los objetivos planteados son irreales.
- La administración es indecisa.
- El presupuesto toma demasiado tiempo para ser elaborado.
- Los encargados de elaborar el presupuesto no se encuentran familiarizados con los trabajos que están siendo presupuestados y no buscan información necesaria.
- Los encargados del presupuesto no se encuentran actualizados.
- Los presupuestos son realizados utilizando siempre diferentes métodos.
- Existe falta de información básica necesaria para realizar el presupuesto.
- Existe una mala comunicación entre los encargados de elaborar el presupuesto y el personal de operaciones.
- El presupuesto se elabora sin el aporte de aquellos que se verán involucrados posteriormente. El resultado de esto será probablemente errores en el presupuesto.
- Los gerentes no saben cómo ha sido asignado su presupuesto o qué componentes tienen a cargo. Evidentemente, si los gerentes no entienden la información, no podrán realizar correctamente sus funciones.
- El documento del presupuesto es excesivamente largo, confuso o está lleno de información innecesaria.
- Los gerentes ignoran el presupuesto porque parecen poco realistas o se realizan cambios con demasiada frecuencia.
- Las variaciones significativas y desfavorables no tienen el seguimiento adecuado ni se analizan y corrigen. Además, una variación considerable entre las cifras reales y presupuestadas (sean positivas o negativas) es un indicador de un mal presupuesto. Otro problema que se puede producir es que una vez que se identifican las variaciones es demasiado tarde para corregir sus causas.
- Existe un desajuste de servicios o productos.

9.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PRESUPUESTOS

Preparar un presupuesto requiere tiempo y recursos, por lo tanto, los beneficios que éstos no ofrecen deben ser mayores a sus desventajas. Los presupuestos nos ofrecen las siguientes ventajas (Jae K. Shim, 2012):

- Presenta los objetivos y los recursos disponibles para alcanzarlos.

- Comunica a los gerentes qué es lo que se espera de ellos, además permite identificar cualquier problema en la comunicación, las relaciones de trabajo, falta de recursos y otros.
- Mejora la toma de decisiones ya que hace hincapié en los eventos futuros y las oportunidades asociadas a estos eventos.
- Fomenta la delegación de responsabilidades y de esta manera permite a los gerentes enfocarse en las características de sus planes y cómo alcanzarlos efectivamente.
- Fomenta el estudio cuidadoso antes de la toma de decisiones.
- Permite a las gerencias tomar conciencia de los problemas que enfrentan los niveles más bajos de la organización promoviendo de esta manera las relaciones laborales.
- Permite identificar las desviaciones entre el presupuesto y los costos reales, brindando señales de alarma si existiesen cambios o desviaciones.
- Brinda señales tempranas de posibles problemas y oportunidades.
- Permite a las diferentes gerencias supervisar, controlar y dirigir las actividades dentro de la empresa. Los estándares de desempeño actúan como incentivo para lograr un mejor desempeño.

Por otro lado, las desventajas que pueden presentar los presupuestos son las siguientes:

- Promueve la astucia ya que los presupuestos pueden presentarse inicialmente inflados sabiendo que se verán reducidos, por lo tanto finalmente se obtendría el monto que realmente se quería.
- Puede recompensar a los gerentes que establecen objetivos modestos y penalizar a aquellos que establecen objetivos ambiciosos y no llegan a alcanzarlos.
- Los gerentes pueden pensar que el presupuesto restringe su flexibilidad para adecuarse a algunas situaciones cambiantes.
- No considera la calidad ni el servicio al cliente.

Existe el riesgo de que se rellene con elementos innecesarios, creando así una holgura presupuestaria.

9.6 CRITERIOS DE MEDICIÓN DE LA RENTABILIDAD DE LOS PROYECTOS

Se denominan criterios de medición a las diferentes herramientas y técnicas que existen para poder medir la rentabilidad de los proyectos, éstos pueden ser medidos de diferentes maneras: en unidades monetarias, porcentaje, tiempo que demora la recuperación del a inversión, entre otros (Chain, 2005). Entre los criterios que se pueden analizar tenemos los siguientes:

- VAN (Valor Actual Neto)
- TIR (Tasa Interna de Retorno)
- PRI (Periodo de Recuperación de la Inversión)
- RAZÓN COSTO/BENEFICIO
- CAE (Costo Anual Equivalente)
- VANC (Valor Actual de Costos)

9.6.1 VALOR ACTUAL NETO (VAN)

El VAN es el criterio de evaluación más utilizado, conocido y, de manera general, más admitido, esta medida de rentabilidad compara los ingresos vs los egresos de un proyecto en un momento determinado y, por lo general, este momento es el tiempo cero aunque podría evaluarse en cualquier fase o etapa del proyecto. El motivo por el cual se evalúa en el tiempo cero es que es más sencillo observar la magnitud de los montos de dinero en el momento más próximo al que se va a tomar la decisión de inversión. (Chain, 2005)

Gabriel Baca (Baca Urbina, 2013) nos dice que:

“sumar los flujos descontados en el presente y restar la inversión inicial equivale a comparar todas las ganancias esperadas contra todos los desembolsos necesarios para producir esas ganancias, en términos de su valor equivalente en un tiempo cero”

Es evidente que para que un proyecto sea aceptado, los ingresos deberán ser mayor que los egresos lo cual permitirá que el VAN sea mayor a cero. Para el cálculo del VAN se utiliza una tasa de descuento (k) o un costo de capital, que es el mínimo porcentaje que los inversionistas están dispuestos a recibir por el monto de dinero prestado/invertido.

Gabriel Baca (Baca Urbina, 2013) también nos hace referencia a lo siguiente:

“Si la tasa de descuento o costo de capital aplicada en el cálculo del VAN fuera una tasa inflacionaria promedio pronosticada para los próximos años, las ganancias de la empresa solo servirían para mantener el valor adquisitivo real que tenía el dinero en el año cero, siempre y cuando se reinviertan todas las ganancias. Con un VAN = 0 no se aumenta el patrimonio de la empresa durante el horizonte planificado, si el costo del capital es igual al promedio de la inflación en ese periodo. Pero aunque el VAN = 0, habrá un aumento en el patrimonio de la empresa si el costo de capital aplicado para el cálculo es superior a la tasa de inflación promedio en ese periodo.”

Finalmente (Sapag Chain, 2008) hace mención que si el VAN del proyecto es igual a cero, significa que éste renta exactamente lo que el inversionista deseaba (costo de capital) de la inversión, y si el VAN fuese mayor a cero significaría que el proyecto está proporcionando una cantidad adicional sobre lo exigido, en otras palabras, estaría implicando una ganancia extra.

La fórmula para el cálculo del VAN es la siguiente:

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

En donde:

I_0 = Inversión inicial

I_t = Ingresos en el periodo “t”

C_t = Egresos en el periodo “t”

t = periodo que se está analizando

i = tasa de descuento, tasa de interés o costo de capital empleado

Como conclusiones acerca del VAN tenemos lo siguiente:

- Es un indicador que considera el valor del dinero en el tiempo, en otras palabras, considera el costo de oportunidad del capital del inversionista.

- En caso de proyectos mutuamente excluyentes el VAN permite seleccionar eficazmente qué proyecto ejecutar.
- Para su cálculo es necesario una tasa de actualización “i” que es determinada por el evaluador pero que sin embargo no es sencillo obtener ya que se deben considerar muchos factores.
- Su resultado debe ser interpretado en términos monetarios y no como una tasa.

9.6.2 TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

En términos generales, la TIR es la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero. Es la tasa que iguala la suma de los flujos descontados a la inversión inicial. (Baca Urbina, 2013)

Reinaldo Sapag (Sapag Chain, 2008), define a la TIR de la siguiente manera:

“El criterio de la tasa interna de retorno (TIR) evalúa el proyecto en función de una única tasa de rendimiento por periodo, con la cual la totalidad de los beneficios actualizados son exactamente iguales a los desembolsos expresados en moneda actual”

Por otro lado Bierman y Smidt (Smidt, 1977) la definen como:

“La TIR representa la tasa de interés más alta que un inversionista podría pagar sin perder dinero, si todos los fondos para el financiamiento de la inversión se tomaran prestados y el préstamo se pagara con las entradas en efectivo de la inversión a medida que se fuesen produciendo”.

La fórmula para el cálculo de la TIR es la siguiente:

$$0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{I_t - C_t}{(1 + TIR)^t}$$

En donde:

I_0 = Inversión inicial

I_t = Ingresos en el periodo “t”

C_t = Egresos en el periodo "t"

t = periodo que se está analizando

TIR = tasa de descuento que hace que el VAN sea 0.

Como conclusiones acerca del VAN tenemos lo siguiente:

- Si la TIR es mayor a la tasa de descuento mínima (el rendimiento de la empresa es mayor que el mínimo fijado como aceptable), el proyecto debe ser aceptado, y si es menor, debería ser rechazado. (Baca Urbina, 2013)
- La TIR es comprensible con facilidad ya que brinda un porcentaje de rentabilidad, además complementa la información que proporciona el VAN.
- No debe ser utilizado como único criterio de evaluación, sobre todo en proyectos mutuamente excluyentes si éstos tienen distintas características como duración, escala o distribución de beneficios.
- Un mismo proyecto podría tener distintas tasas de retorno ya que la ecuación podría tener diferentes soluciones (TIR múltiple).

9.6.3 PERIODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN (PRI)

Este criterio consiste en determinar en cuántos periodos (por lo general expresado en años) se podrá recuperar la inversión realizada inicialmente y se compara con el número de periodos que la empresa considera como aceptable. (Sapag Chain, 2008)

Se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$PRI = \frac{I_0}{(I - C)}$$

En donde:

I_0 = Inversión inicial

I = Ingresos en el periodo

C = Egresos en el periodo

Este análisis se realiza a partir de la proyección de flujos de caja del proyecto, sin embargo, tiene algunos defectos evidentes como que no considera el valor del dinero en el tiempo y sólo se enfoca en la recaudación dentro de un periodo determinado, y bajo este criterio el mejor proyecto es aquel en el que se recupera más rápidamente la inversión. (Baca Urbina, 2013)

No puede ser considerado como un buen criterio de evaluación ya que ignora los resultados posteriores al periodo de recuperación de la inversión del proyecto.

9.6.4 ÍNDICE BENEFICIO/COSTO (B/C)

Este criterio de evaluación consiste en dividir todos los ingresos del proyecto entre todos los costos en los que se va a incurrir para obtener dichos beneficios. Ambos (ingresos y costos) deberán ser llevados al valor presente, entonces estaremos considerando así el valor del dinero en el tiempo.

Este método fue utilizado inicialmente en proyectos de origen social con apoyo del gobierno, cuando no era necesario que las inversiones del estado sean económicamente rentables, entonces el resultado del cociente entre ingresos/costos debía ser igual a 1 ya que simplemente era necesario recuperar los gastos que se habían realizado. (Baca Urbina, 2013)

La fórmula para el cálculo de este índice es la siguiente:

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{I_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}}$$

En donde:

I_t = Ingresos totales

I = Costos Totales

i = tasa de descuento, tasa de interés o costo de capital empleado

Es importante mencionar que los costos deben considerar los costos de capital realizados inicialmente.

Si el índice B/C es mayor a 1 significa que el proyecto es rentable, sin embargo este índice sólo debe utilizarse cuando se requiera determinar si un proyecto debe realizarse o no, mas no es recomendable para comparar proyectos porque su magnitud absoluta puede ser engañosa.

9.6.5 COSTO ANUAL EQUIVALENTE (CAE)

El costo anual equivalente es un criterio que permite indicar cuál es el costo anual al que equivale la inversión inicial realizada, en otras palabras, indica cuál es el monto uniforme que se deberá invertir cada año durante la vida útil del proyecto para equiparar la inversión inicial. Por lo general se utiliza en proyectos en donde el objetivo final es un servicio pero que puede ser brindado de maneras diferentes. (Gala Soldevilla, 2017)

La fórmula para el cálculo del CAE es la siguiente:

$$CAE = I_0 * \frac{(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1}$$

En donde:

I_0 = Inversión inicial

n = tiempo o periodo analizado

i = tasa de descuento, tasa de interés o costo de capital empleado

9.6.6 VALOR ACTUAL DE LOS COSTOS (VANC)

El valor actual de los costos es el valor de los flujos de egresos futuros actualizados a una tasa de descuento, se utiliza en proyectos conformados sólo por egresos o en los que no se cuenta información de los ingresos. Es muy utilizado en proyectos mineros operativos en donde se desea evaluar la conveniencia de realizar cambios de equipos o introducir cambios tecnológicos que no variará la calidad ni cantidad del producto final sino solamente su costo. (Gala Soldevilla, 2017)

La fórmula para el cálculo del VANC es la siguiente:

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

En donde:

I_0 = Inversión inicial

C_t = Egresos/Costos en el periodo "t"

t = periodo que se está analizando

i = tasa de descuento, tasa de interés o costo de capital empleado

10. MUROS DE SUELO REFORZADO

10.1 INTRODUCCIÓN

El concepto de suelo reforzado no es algo nuevo, sino que principios básicos demuestran su abundante presencia en la naturaleza a través de los animales, las aves y la acción de las raíces de los árboles. Desde tiempos antiguos el hombre ha intentado usar el suelo con otros materiales para poder utilizarlo y suplir así sus necesidades de vivienda y otros. Este tipo de principio fue utilizado también en la construcción de la Gran Muralla China y la construcción de los templos Babilonios, es así que con el transcurso de los años los materiales textiles fueron tal vez utilizados por primera vez en la construcción de carreteras en Estados Unidos en la década de los '30 y los sintéticos tejidos fabricados para el control de la erosión fueron hechos recién en 1958. (Railways, 2005)

Los refuerzos aplicados al suelo le permiten incrementar su capacidad portante y a la vez reducir los asentamientos, por otro lado, también reduce la probabilidad de licuefacción del terreno. En las últimas dos décadas la construcción de estructuras con suelo reforzado se ha difundido ampliamente en la práctica sobretodo de la ingeniería civil y geotécnica debido a su facilidad de construcción y su economía comparado con otros métodos convencionales. La función del refuerzo es mejorar las propiedades mecánicas del suelo y estos refuerzos se pueden presentar a manera de inclusión de elementos estructurales como pilas granulares, mezclas de cal – cemento, barras o bandas metálicas, láminas sintéticas, grids, celdas u otros.

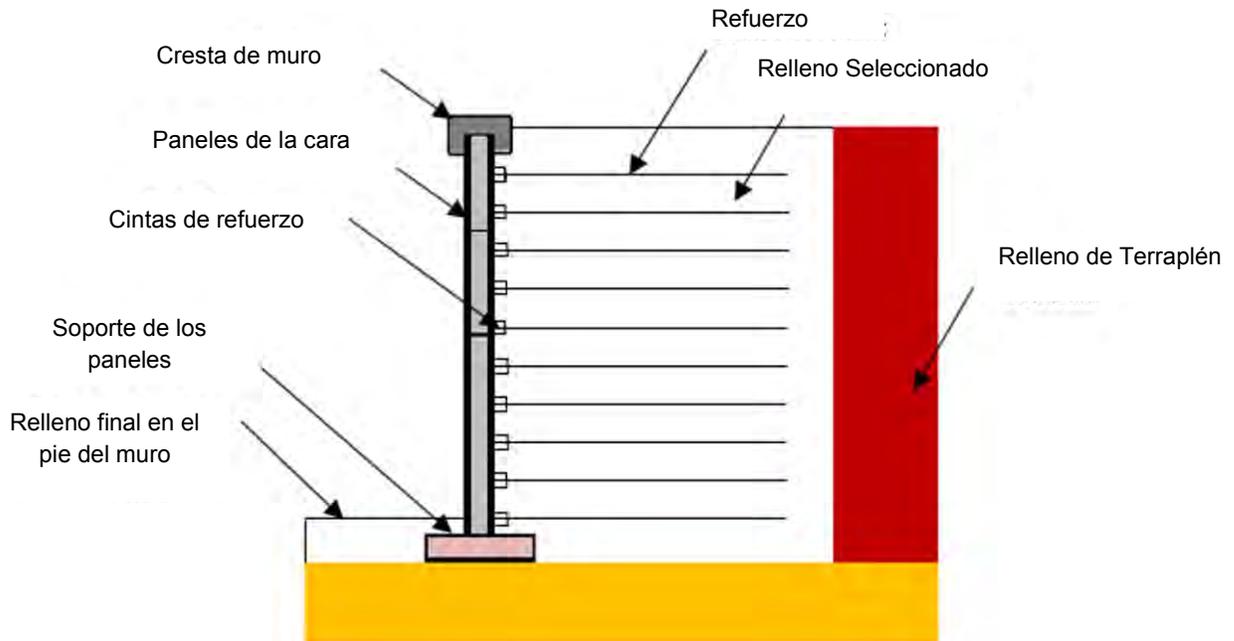


Figura 10. 1: Componentes de Muro de Suelo Reforzado Fuente (Tarawneh, 2018)

10.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MUROS DE SUELO REFORZADO

El concepto de combinar dos materiales de diferentes características de resistencia para formar un material compuesto de mayor resistencia es bastante familiar en la práctica de la ingeniería civil y ha sido utilizado durante siglos. Las construcciones de concreto armado son ejemplos de tales materiales compuestos ya que combina la alta resistencia a la tracción del acero con la alta resistencia a la compresión, pero relativamente baja a la tracción del concreto. Del mismo modo, los suelos que tienen poca o ninguna resistencia a la tracción también se pueden fortalecer mediante la inclusión de materiales con alta resistencia a la tracción. Esta movilización de la resistencia a la tracción se obtiene mediante la interacción de la superficie entre el suelo y el refuerzo a través de la fricción y la adhesión. El suelo reforzado se obtiene colocando materiales extensibles o inextensibles tales como bandas metálicas o refuerzo polimérico dentro del suelo para obtener las propiedades requeridas. (Prime AE Group, 2011)

El refuerzo del suelo a través de tiras metálicas, rejillas o mallas y láminas de tiras poliméricas es ahora una técnica bien desarrollada y ampliamente aceptada de mejora de

la tierra. El anclaje y clavado del suelo también se adopta para obtener una mejora en las propiedades.

El uso de la técnica de suelo reforzado se debe principalmente a su versatilidad, rentabilidad y facilidad de construcción. Esta técnica es particularmente útil en lugares urbanos donde la disponibilidad de suelo es mínima y se requiere que la construcción tenga lugar con un tráfico de perturbación mínimo. Las diversas aplicaciones de tierra reforzada se muestran en la Figura 10.2.

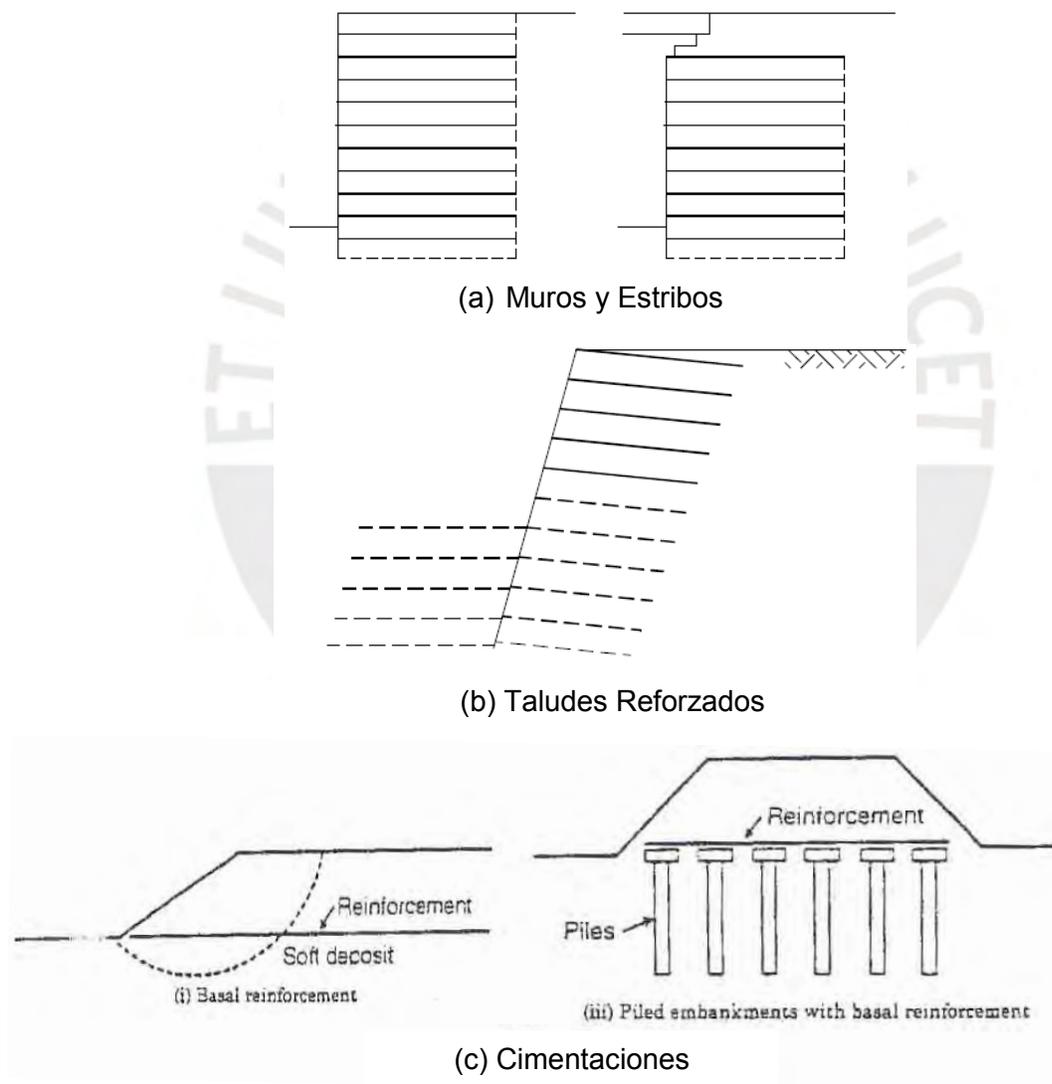


Figura 10. 2: Aplicaciones de tipos de suelo reforzado Fuente: (Railways, 2005)

10.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

10.3.1 DISEÑO DE MUROS DE SUELO REFORZADO

Debido a su naturaleza el suelo reforzado es una combinación de ingeniería estructural y geotécnica. La evolución del diseño en estado límite en la ingeniería estructural ha permitido la definición de factores de carga parciales los cuales son aplicados a las combinaciones de carga utilizados en el diseño. En ingeniería geotécnica la aplicación de factores parciales a los diversos parámetros geotécnicos no ha sido encontrado práctico durante el diseño en general y por esta razón aún se utilizan factores generales de seguridad.

Durante el diseño de un muro de suelo reforzado se considera que se alcanza el estado límite cuando se produce una de las siguientes situaciones:

- Colapso o daño mayor
- Deformaciones que exceden los límites máximos permitidos.
- Otras formas de daño menor que volverían a la estructura antiestética, harían que requiera un mantenimiento no planificado o acortarían la vida útil de la estructura.

La primera condición es denominada también estado límite último, mientras que las otras dos condiciones son consideradas estados límite de servicio.

10.3.1.1 VIDA ÚTIL DE LA ESTRUCTURA

El tiempo de servicio de una estructura de suelo reforzado debe ser considerado durante la etapa de diseño, la mayoría de veces la vida de los elementos de refuerzo seleccionados es igual a la vida útil de la estructura. En algunos casos, sobre todo en cimentaciones de terraplenes, toda la estructura puede haber sido diseñada para tener una vida útil bastante larga sin embargo la parte reforzada podría funcionar durante un tiempo más corto mientras que el terreno circundante ganaría más resistencia en el tiempo. La Tabla 10.1 muestra ejemplos de la vida útil de estructuras de suelo reforzado utilizadas de diferentes maneras:

Tabla 10. 1: Variedad de Aplicaciones de Estructuras de suelo reforzado. (Railways, 2005)

Categoría	Vida útil típica (años)	Ejemplo
Trabajos temporales	1 a 2	Trabajos temporales de contratistas
Corto plazo	5 a 10	Trabajos temporales de contratistas Refuerzos de bases o taludes
Industriales	10 a 50	Estructuras en minas
Largo plazo	60	Estructuras marinas y terraplenes en carreteras
Largo plazo	70	Muros de contención
Largo plazo	120	Muros de contención en carreteras, estructuras como bases de puentes, otros.

10.3.1.2 FACTORES DE SEGURIDAD

Los factores de seguridad parciales son requeridos y aplicados durante la etapa de diseño para obtener el factor de seguridad total de la estructura reforzada. Estos factores parciales requeridos son los siguientes (Railways, 2005):

- Factor de ramificación económica
- Factor parcial de material para refuerzos metálicos
- Factor parcial de material para refuerzos poliméricos
- Factor parcial de material para el suelo

- Factores parciales de carga
- Factores de interacción de suelo – refuerzo

10.3.1.3 CONEXIONES Y SUJETADORES

Las conexiones y los sujetadores son a menudo necesarios en estructuras de suelo reforzado en las cuales los elementos de refuerzo están conectados de alguna manera a la cara de la estructura. En estos casos se debe aplicar el adecuado factor de material para determinar la resistencia de la conexión y los elementos de refuerzo.

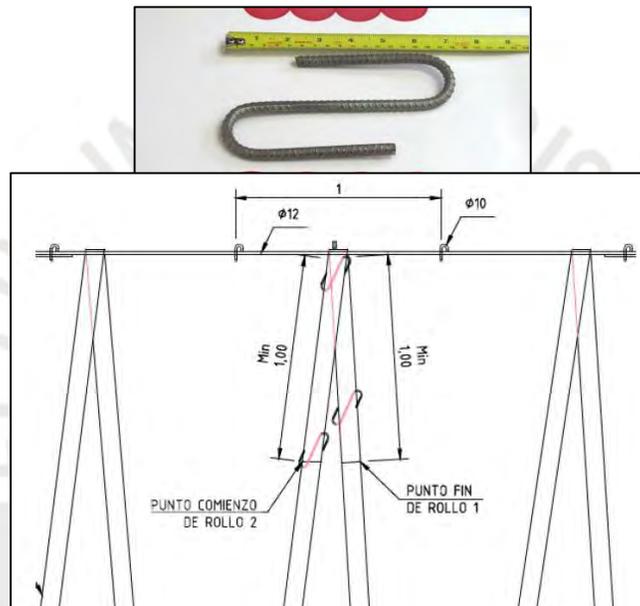


Figura 10.3: Conectores utilizados para la sujeción de bandas de refuerzo. Fuente: (Freyssinet Tierra Armada, 2015)

10.3.1.4 INFORMACIÓN DE DISEÑO

Para realizar el diseño de un muro de suelo reforzado se requiere evaluar la siguiente información:

- Investigación de la ubicación del proyecto
- Consideración ambiental
- Combinaciones de carga
- Registro de diseño

a) Investigación de la ubicación del proyecto

En la investigación inicial debe ser considerado el análisis del tipo de suelo y éste a su vez debe ser considerado en el diseño y en algunos casos (cuando se realiza la construcción sobre suelos blandos) el suelo debe ser monitoreado durante la construcción.

- Estudio inicial de campo
Se debe acceder a las características y disponibilidad de los posibles materiales de relleno junto con los detalles de drenaje local.
- Investigación de terreno
Se debe realizar la investigación del área donde se construirá el muro de suelo reforzado, la presencia de agua subterránea, el estudio de suelos y además realizar la investigación o estudio durante la etapa de construcción con la finalidad de monitorear los asentamientos.

b) Consideraciones medioambientales

Los efectos de las cargas y la presión deben ser considerada en el diseño tales como las cargas sísmicas o de impacto, cargas debido a la presión del agua incluyendo la presión de filtración, la flotabilidad y la presión lateral, y la mayor tolerancia al deterioro del refuerzo.

Los efectos químicos y biológicos del material utilizado deberían ser considerados en el diseño. Los materiales comúnmente utilizados como refuerzos del suelo son bandas metálicas, refuerzo polimérico y las juntas de refuerzo polimérico. Durante el diseño el PH del suelo, sus contenidos químicos, el efecto de los rayos UV y la temperatura del ambiente deben ser considerados.

Además de lo antes mencionado, el daño post construcción también tiene que ser considerado durante la etapa de diseño.

c) Combinaciones de carga

La combinación de cargas más adversa que probablemente tenga que soportar el muro de suelo reforzado durante su vida útil tiene que ser utilizada en el diseño.

d) Registro de diseño

Deben mantenerse algunos registros de diseño importantes para permitir la revisión del diseño del muro de suelo reforzado en el futuro.

10.3.2 CONSTRUCCIÓN DE MUROS DE SUELO REFORZADO CON CARAS DE PANELES PREFABRICADOS

La construcción de muros de suelo reforzado con paneles prefabricados se realiza de la siguiente manera (Federal Highway Administration, 2009):

a) Preparación de la subrasante

Esta etapa implica la eliminación de materiales inadecuados del área que ocupará la estructura de contención. Toda la materia orgánica, vegetación, material proveniente de deslizamientos de tierra y otros deben ser retirados hasta obtener la subrasante compacta.

En áreas de cimentación inestables, podrían realizarse algunos métodos de mejora del terreno como excavación y reemplazo, compactación dinámica, columnas de arena, drenajes u otros; previos a la construcción del muro. (Freyssinet Tierra Armada, 2015)

b) Colocación de la base de nivelación como referencia de la primera fila de paneles prefabricados

Esta base de nivelación está fabricada, por lo general, de concreto no reforzado y mide, dependiendo de las dimensiones del panel, 30 cm de ancho, 15 cm de espesor y es utilizada solo en la construcción de muros en los cuales se realizará el montaje de paneles prefabricados.

La finalidad de esta base de nivelación es servir de referencia o guía para el montaje de los paneles frontales mas no tiene una finalidad estructural.



Figura 10. 4 Construcción de solera de concreto para el montaje de paneles. . Fuente: (Freyssinet Tierra Armada, 2015)

c) Montaje de los primeros paneles sobre la base de nivelación (primera fila)

Dependiendo del diseño del muro de suelo reforzado, la primera fila de paneles puede componerse por paneles completos o paneles de media altura, sin embargo, solamente esta primera fila debe estar apoyada sobre la base de nivelación para mantener la estabilidad y sobre todo el alineamiento. Los demás paneles prefabricados se acúan a manera de lego sobre los paneles adyacentes (inferiores y laterales).

Es importante mencionar que la colocación del relleno debe realizarse una vez colocados los paneles prefabricados hasta alcanzar la altura superior de los refuerzos.



Figura 10. 5 Colocación de primera fila de paneles prefabricados. Fuente: (Freyssinet Tierra Armada, 2015)

d) Acomodación y compactado del relleno sobre la subrasante hasta alcanzar el primer nivel del refuerzo

El relleno deberá ser compactado hasta alcanzar la densidad especificada, usualmente va del 95% al 100% del CBR y dentro del rango especificado del contenido óptimo de humedad (Freyssinet Tierra Armada, 2015).

La clave para un buen rendimiento es la colocación y compactación consistentes. El espesor del relleno debe ser controlado de acuerdo a los requerimientos de las especificaciones y a la distribución vertical de los elementos de refuerzo, sin embargo, este espesor no debe superar los 30 cm. El relleno debe ser descargado en la parte posterior y central del refuerzo y luego ser expandido hacia la cara frontal. (Freyssinet Tierra Armada, 2015)

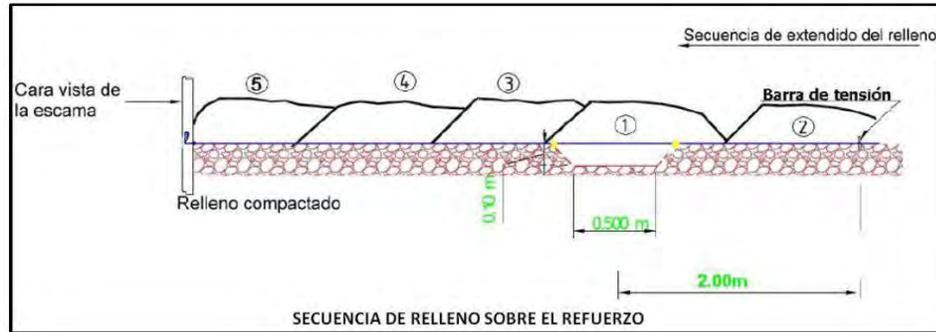


Figura 10. 6 Secuencia de relleno desde la parte posterior hacia la cara frontal del muro.
Fuente: (Freyssinet Tierra Armada, 2015)

e) Colocación de la primera capa de los elementos de refuerzo en el relleno del muro

Los refuerzos serán colocados y conectados a los paneles frontales cuando el relleno haya alcanzado el nivel del refuerzo. Estos refuerzos por lo general son colocados de manera perpendicular a la parte trasera de los paneles frontales. (Freyssinet Tierra Armada, 2015)

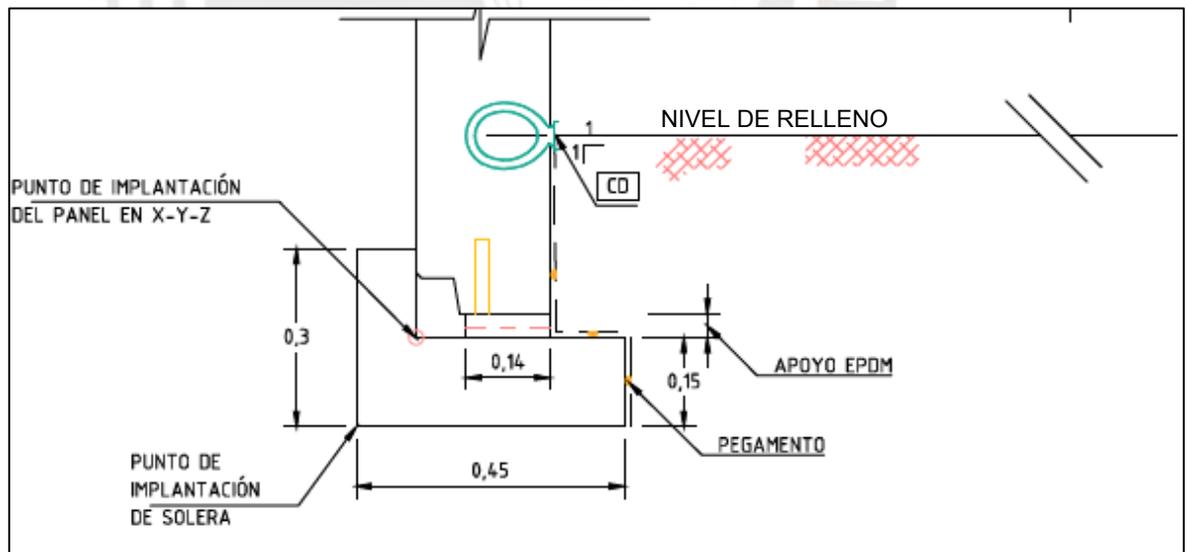


Figura 10. 7 Nivel de relleno hasta alcanzar los conectores del panel prefabricado. Fuente: (Freyssinet Tierra Armada, 2015)

f) Colocación del relleno sobre los elementos de refuerzo hasta el nivel del siguiente refuerzo y compactación

Los pasos descritos anteriormente serán repetidos para cada capa sucesiva.

g) Construcción de barreras de tráfico

Esta secuencia final de construcción se realiza luego de haber colocado los paneles finales y completado el relleno hasta su nivel final.

10.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DE MUROS DE SUELO REFORZADO

10.4.1 VENTAJAS

Los muros de suelo reforzado tienen muchas ventajas en comparación con el concreto armado convencional y con los muros de contención de concreto que actúan por gravedad, entre estas ventajas tenemos las siguientes (Federal Highway Administration, 2009):

- Utiliza un procedimiento de construcción simple y rápido, además no requiere gran equipamiento de construcción.
- No requiere habilidades especiales para la construcción.
- Requiere menos preparación del sitio que otras alternativas.
- Necesita menos espacio frente a la estructura para realizar el proceso constructivo y de operación de ejecución.
- Reduce la necesidad de derecho de paso.
- No necesita un soporte de cimentación rígido e inflexible ya que las estructuras son tolerantes a las deformaciones.
- Son más rentables.
- Son técnicamente factibles incluso para alturas superiores a los 30 m.

Los materiales pre fabricados, la rápida construcción y la competencia entre diferentes empresas ha resultado en la reducción relativa de costos en comparación con otros tipos

de muros de contención tradicionales, por lo tanto, es más probable que los muros de suelo reforzado sean más económicos que otros sistemas para alturas mayores a 3 m o donde cimentaciones especiales serían requeridas para la construcción de un muro convencional.

Una de las más grandes ventajas de los muros de suelo reforzado son su flexibilidad y capacidad de tolerar deformaciones debido a condiciones pobres de cimentación en el subsuelo. A su vez, basado en observaciones realizadas en zonas sísmicas activas, estas estructuras han demostrado una resistencia mayor a los sismos que los muros de concreto rígido.

Los elementos de concreto prefabricado que forman parte de la cara visible de los muros de suelo reforzado pueden ser realizados con diferentes formas y texturas considerando los elementos estéticos. A la vez elementos de mampostería, madera y gaviones también pueden utilizarse para lograr una mejor interacción con el ambiente.

10.4.2 POTENCIALES DESVENTAJAS

Las desventajas pueden estar asociadas con todas las estructuras de suelo reforzado y dependen en gran medida de las condiciones del terreno y del proyecto; son las siguientes (Federal Highway Administration, 2009):

- Requiere un espacio relativamente largo detrás del muro o la cara del talud para instalar el refuerzo requerido, dependiendo del tipo de anclaje que se va a utilizar.
- Los muros de suelo reforzado requieren el uso de relleno granular seleccionado.
- El diseño del sistema suelo – refuerzo a menudo requiere una responsabilidad compartida entre los proveedores de materiales y los propietarios del proyecto.

A manera de resumen, si hacemos una comparación entre los muros de suelo reforzado con estructuras de concreto armado y estructuras de acero pre-dimensionado, las ventajas y desventajas que tenemos son las presentadas en la Tabla 10.2:

Tabla 10. 2 Ventajas y desventajas de los muros de suelo reforzado VS. muros de concreto armado VS. estructuras metálicas. (Elaboración propia)

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
MUROS DE SUELO REFORZADO	1 Procedimiento de construcción rápido y simple.	1 Requiere un espacio relativamente grande para almacenar los materiales que serán utilizados.
	2 No requiere grandes habilidades para su construcción.	2 Requieren la utilización de un relleno granular seleccionado para que se alcancen las especificaciones requeridas.
	3 No necesita una cimentación rígida e inflexible ya que son tolerantes a las deformaciones.	3 Existe una elevada responsabilidad compartida entre el diseñador, proveedor de materiales y construcción ya que la calidad del muro depende en gran medida de los materiales utilizados y del procedimiento constructivo realizado.
	4 Son factibles a partir de alturas mayores a 3 metros y supera alturas de 30 metros.	
	5 Posibilidad de alcanzar altos ratios en construcción, tanto en relleno como en montaje de paneles prefabricados.	
	6 Elevada flexibilidad y capacidad para tolerar deformaciones.	
	7 Capacidad de reducir la tendencia a licuefacción del suelo de cimentación.	
CONCRETO ARMADO	1 Posee un elevado grado de durabilidad si se realizan mantenimientos preventivos adecuados.	1 Elevado precio de los materiales de construcción utilizados.
	2 Elevada capacidad de resistencia a esfuerzos de compresión, tracción, corte (causados muchas veces por los sismos)	2 Elevada rigidez que no permiten deformaciones considerables en la estructura, pudiendo ocasionar el colapso de la misma.
	3 No requiere de costos de mantenimiento elevados si es que éste se encuentra en un ambiente favorable.	3 Cambios volumétricos que éste experimenta a lo largo del tiempo (debido a los cambios de temperatura) que puede generar daños en la estructura.
	4 Elevada experiencia tanto para su construcción como para su control de calidad debido a la historia que tiene detrás.	4 Requiere cimentaciones lo suficientemente resistentes sobre las cuales pueda apoyarse la superestructura.
	5 Capacidad de adquirir diversas formas dependiendo de las necesidades a cubrir.	5 No es rentable para la instalación de estructuras temporales debido a su alto costo de construcción.
ESTRUCTURA METÁLICA	1 Está compuesto por materiales de gran resistencia, permitiendo ocupar espacios menores que, por ejemplo, el concreto armado.	1 Requiere mano de obra especializada para su construcción.
	2 Posteriormente al desmontaje los materiales pueden ser utilizados nuevamente.	2 Elevados costos de mantenimiento para evitar problemas relacionados con la corrosión de los elementos estructurales.
	3 Son estructuras más ligeras que permiten disminuir los daños ocasionados por fuerzas externas como los sismos.	3 Necesidad de contar con una cimentación adecuada para asegurar la correcta transmisión de cargas al terreno.
	4 Se pueden obtener ratios de montaje bastante favorables dependiendo de la experiencia del personal utilizado.	4 Elevados costos de los materiales utilizados, principalmente relacionados con los perfiles estructurales.
	5 Permiten cubrir grandes luces sin la necesidad de tener considerables cambios en las dimensiones de las vigas.	5 Elevada fragilidad frente a inconvenientes que generen cambios de temperatura elevados como los incendios que pueden ocasionar el colapso de la estructura.

10.5 COSTOS RELATIVOS DE LA CONSTRUCCIÓN, MANTENIMIENTO Y CIERRE DE UN MURO DE SUELO REFORZADO

10.5.1 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN

Los costos específicos de un muro de suelo reforzado dependen de diversos factores entre los cuales tenemos: requerimientos de corte y relleno, tamaño y tipo del muro, tipo de suelo, materiales de relleno disponibles, acabado final, vida útil de la estructura, entre otros. Se ha determinado que los muros de suelo reforzado con caras de concreto prefabricado son por lo general menos costosos que los muros de contención de concreto para alturas mayores a 3 m bajo condiciones de cimentación promedio.

De manera general, el uso de muros de suelo reforzado da como resultado un ahorro del orden de 25 a 50 por ciento y posiblemente más en comparación con una estructura de contención convencional de concreto armado, especialmente cuando esta última se apoya en un sistema de cimentación profunda (debido a un suelo de cimentación pobre o blando) (Macafferri, 2017). Este ahorro sustancial es obtenido por la eliminación de las cimentaciones profundas, lo cual es posible gracias a que las estructuras de suelo reforzado se pueden acomodar relativamente bien a los asentamientos diferenciales.

Otras características de ahorro incluyen la facilidad y velocidad de construcción. Los costos totales para muros de suelo reforzados varían en función de la altura, tamaño del proyecto, tratamiento estético, accesibilidad del sitio y costo del relleno seleccionado, además también se debe considerar los costos de transporte asociados a los materiales y a la ubicación del proyecto.

Los costos actuales de un muro de suelo reforzado dependerán del costo de cada uno de sus principales componentes, para muros que utilizan paneles de concreto prefabricado los costos relativos típicos son los siguientes (Federal Highway Administration, 2009):

- Montaje de paneles y ganancia de contratistas: 20% – 30% de los costos totales.
- Materiales de refuerzo (bandas metálicas, poliméricas u otros): 15% - 30% del costo total.
- Sistema de paneles frontales: 20% - 40% de los costos totales.
- Relleno del muro incluyendo colocación: 30% - 60% del costo total, en donde el relleno es un material granular extraído de una fuente fuera del sitio de proyecto.

De manera adicional, se debe considerar el costo de la excavación que puede ser algo mayor que para otros sistemas debido al ancho requerido en la zona de refuerzo.

Al realizar un análisis más detallado acerca de los costos de construcción (considerando los precios unitarios de cada actividad), se pueden evaluar los ítems de la Tabla 10.3 como los principales:

Tabla 10. 3 Actividades analizadas en la etapa de construcción de un muro de suelo reforzado. (Elaboración propia)

CONSTRUCCIÓN					
PARTIDA	PARTIDAS	UND	PRESUPUESTO		
			METRADO	PU (US\$)	TOTAL
			A	B	C=AxB
	MOVIMIENTOS DE TIERRAS				
1	RELLENO ESTRUCTURAL CON MATERIAL DE PRÉSTAMO. INCLUYE CARGA Y ACARREO DEL PRIMER KM				
2	ACARREO KM SUBSECUENTE DE MATERIAL				
3	MURO DE TIERRA MECÁNICAMENTE ARMADO CON SUPERFICIE DE CARA LIBRE PREFABRICADO DE CONCRETO.				
4	(INCLUYE LA INSTALACIÓN DE TIRANTES DE MATERIAL GEOSINTÉTICO Y ANCLAJES EN ROCA, MALLA GEOTEXTIL Y ALMOHADILLA DE CAUCHO PROVISTOS POR TIERRA ARMADA, EL MATERIAL NECESARIO SERÁ PROVISTO POR EL CONTRATISTA)				
	CONCRETO				
5	INSTALACIÓN DE ACERO DE REFUERZO (VARILLA), INCLUYE: CONSUMIBLES COMO ALAMBRE DE AMARRE, SEPARADORES, TAPONES DE SEGURIDAD, ETC.				
6	SUMINISTRO, INSTALACIÓN Y RETIRO DE ENCOFRADOS PARA TODO TIPO DE ESTRUCTURAS				
TOTAL					

10.5.2 COSTOS DE MANTENIMIENTO

Dado que la tecnología de construcción de los muros de suelo reforzado está bien establecida en la teoría, los programas de monitoreo y mantenimiento se limita a los casos en los que se haya utilizado nuevos materiales en el diseño, cuando se anticipen grandes asentamientos diferenciales, cuando los elementos de refuerzo sean muy propensos a la corrosión u otros fenómenos particulares. Bajo estas condiciones, el monitoreo y control puede ser usado para:

- Confirmar niveles de tensión y se vigile la seguridad durante la construcción.
- Control de las tarifas de construcción.
- Proporcionar información de los requisitos de mantenimiento y monitoreo del comportamiento del muro a largo plazo.

El primer paso para la planificación de los costos de mantenimiento es definir el propósito de las mediciones que se van a realizar ya que existen muchos instrumentos y herramientas útiles para efectuar los trabajos de mantenimiento y control.

Para todas las estructuras de sostenimiento los parámetros más importantes a controlar son los siguientes:

- Desplazamiento horizontal de la cara del muro.
- Desplazamiento vertical de la superficie de toda la estructura.
- Nivel de deterioro de la cara del muro.
- Comportamiento del drenaje del relleno.
- Distribución de la presión vertical en la base de la estructura.
- Relación entre los asentamientos y la distribución de los esfuerzos.

Tanto los desplazamientos horizontales como verticales pueden ser monitoreados mediante levantamientos topográficos permanentes midiendo puntos en la cara del muro o en la parte superior de éste. Para realizar este monitoreo es necesario establecer antes benchmark's que nos permitan realizar este tipo de evaluaciones. El máximo desplazamiento horizontal de la cara del muro debe ser del orden de $H/250$ cuando se utilizan refuerzos rígidos y de $H/75$ para refuerzos flexibles, donde H es la altura total del muro. (Federal Highway Administration, 2009)

La inclinación debido al desplazamiento diferencial horizontal desde la parte inferior hasta la parte superior del muro debe ser menor a 4mm por metro de altura del muro. Se debe prever que los movimientos horizontales luego de la construcción del muro de suelo reforzado deben ser muy pequeños y los movimientos verticales dependerán de los asentamientos de la cimentación.

De manera general, los posibles instrumentos para el monitoreo y mantenimiento de las estructuras de suelo reforzado son los presentados en la Tabla 10.4:

Tabla 10. 4 Instrumentos necesarios para el monitoreo y control de muros de suelo reforzado. (Elaboración propia)

PARÁMETROS	INSTRUMENTOS REQUERIDOS
1. Desplazamiento horizontal de la cara del muro	- Análisis visual. - Métodos topográficos. - Estaciones de control horizontal. - Medidores de inclinación.
2. Movimiento vertical de la estructura completa	- Análisis visual. - Métodos topográficos. - Implementación de benchmarks. - Medidores de inclinación.
3. Desplazamiento local o daño en los elementos de la cara del muro	- Análisis visual. - Medidores de grietas
4. Comportamiento del drenaje del suelo	- Análisis visual de los puntos de descarga de agua. - Piezómetros de tubo abierto.

Para la evaluación de los costos de mantenimiento del muro de suelo reforzado, se analizará la alternativa de ejecución de trabajos de topografía que permitan identificar tanto los desplazamientos horizontales, así como desplazamientos verticales, a su vez también se realizarán evaluaciones de la inclinación de la cara del muro con la finalidad de comprobar su verticalidad y se analizarán los costos en los cuales se incurre utilizando la Tabla 10.5:

Tabla 10. 5 Actividades analizadas en la etapa de mantenimiento de un muro de suelo reforzado. (Elaboración propia)

MANTENIMIENTO					
PARTIDA	PARTIDAS	UND	PRESUPUESTO		
			METRADO	PU (US\$)	TOTAL
			A	B	C=AxB
1	TRAZO, REPLANTEO Y VERIFICACIÓN DE NIVELES Y VERTICALIDAD				
2	MEDICIÓN DE INCLINACIÓN DEL MURO				
TOTAL					-

10.5.3 COSTOS DE CIERRE

Como en todo proyecto minero, se deben considerar los costos en los cuales se va a incurrir con la finalidad de dejar el terreno natural en similares condiciones a las encontradas inicialmente, y la construcción de una estructura auxiliar como es un muro de suelo reforzado no es ajena a este tipo de costos. Es así que en la Tabla 10.6 se han identificado las siguientes actividades a desarrollar en la etapa de cierre:

Tabla 10. 6 Actividades analizadas en la etapa de cierre de un muro de suelo reforzado. (Elaboración propia)

CIERRE					
PARTIDA	PARTIDAS	UND	PRESUPUESTO		
			METRADO	PU (US\$)	TOTAL
			A	B	C=AxB
1	DEMOLICIÓN DE CIMENTACIÓN				
2	EXCAVACIÓN DE MATERIAL RIPEABLE				
3	ACARREO SUBSECUENTE DE MATERIAL DE EXCAVACIÓN				
4	DESMONTAJE DE PANELES PREFABRICADOS				
TOTAL					
					-

10.6 ANÁLISIS DE RIESGOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN MURO DE SUELO REFORZADO

Hasta el momento se han venido mostrando todos los beneficios que nos proporcionan los muros de suelo reforzado, sin embargo, también es muy importante realizar un análisis de cuáles son los riesgos que podría acarrear este nuevo sistema para la instalación de una chancadora primaria. Para esto nos enfocaremos en los que consideramos los 4 puntos más importantes a la hora de hablar de riesgos, y son los siguientes: riesgos por sismo, debido al conocimiento y experiencia (ingeniería, tecnología y construcción), riesgos por fallas en el diseño y los riesgos por flexibilidad (estrategia de operaciones).

10.6.1 RIESGOS DEBIDO A SISMOS

Como se ha venido explicando en los capítulos anteriores, las ventajas que nos ofrecen los muros de suelo reforzado, además de sus bajos costos de instalación, son los referidos la flexibilidad y adaptación a las deformaciones que éstos poseen. Por otro lado, también debemos considerar la capacidad que poseen de reducir los problemas de licuefacción ocasionados por los sismos. A pesar de esto, si analizamos de manera más profunda, los problemas que se pueden generar son los relacionados por deformaciones

excesivas (tanto lateral como verticalmente) o por la pérdida de verticalidad de la cara del muro, ambos ocasionados, por lo general, por la ruptura o deformación excesiva de los refuerzos utilizados lo que podría ocasionar la falla total de la estructura (alcanzar el estado límite último). Sin embargo, como se explicó en capítulo 10.3.1, al momento de realizar el diseño se consideran factores de seguridad que permitan, de cierta manera, no alcanzar en ningún momento dicho estado límite. Finalmente, pese a todas las medidas tomadas tanto en la etapa de diseño como de construcción, se pueden dar eventos particulares (sismos de gran magnitud no prevista) que ocasionen la falla del muro de suelo reforzado, así como de cualquier estructura de concreto y/o acero.

10.6.2 RIESGOS POR FALTA DE CONOCIMIENTO Y EXPERIENCIA

Como se menciona en capítulos anteriores, los muros de suelo reforzado vienen siendo utilizados hace muchos años en diferentes países tanto en Europa como en Estados Unidos, en nuestro país, de manera particular han venido siendo utilizados en proyectos de infraestructura vial, sin embargo, en la rama minera su utilización es relativamente reciente, sin embargo, debido a los beneficios que ofrecen su utilización se está masificando en diferentes proyectos.

Analizando el tema de riesgos por falta de conocimientos y experiencia, se puede indicar que existen empresas de ingeniería dedicados exclusivamente a brindar soluciones geotécnicas en las cuales utilizan a los muros de suelo reforzado como una de sus principales soluciones. De manera adicional, diferentes universidades y empresas alrededor del mundo se encuentran actualmente realizando investigaciones para obtener mejoras constantes en los tipos de materiales utilizados tanto como refuerzos, así como caras de muro, analizando diferentes geometrías, materiales, entre otros.

10.6.3 RIESGOS POR FALLA EN EL DISEÑO

Una falla en el diseño es un factor que va a ocasionar problemas en cualquier tipo de estructuras, ya sea de muro de suelo reforzado, concreto, acero u otros. Sin embargo, este tipo de fallas puede ocasionarse principalmente por dos factores, por falla humana (problemas con el diseñador y/o empresa diseñadora) o por falta de información que no permita sustentar adecuadamente el diseño. El primero de estos factores se puede evitar realizando permanentes verificaciones tanto de los factores de seguridad utilizados, así como de los parámetros del terreno asumidos para el diseño (ubicación geográfica, tipo

de terreno, magnitud de las cargas que la estructura va a soportar, etc.). Finalmente es necesario realizar una verificación con algún software de apoyo para verificar la estabilidad total de la estructura, su posible respuesta ante sismos, cargas de diseño, sobre cargas, y otros.

El segundo factor (falta de información) es menos probable ya que internacionalmente se manejan estándares de diseño tales como los propuestos por el *Federal Highway Administration – U.S Department of Transportation* de los Estados Unidos, *Ministry of Railways – Government of India*, e incluso los manuales de diseño propuestos por empresas especialistas como *Stoneterra*. Por ende, podemos concluir que existe información, amplia y diferente para analizar los distintos escenarios que se puedan presentar en la etapa de diseño.

10.6.4 RIESGOS POR FLEXIBILIDAD

Hablando de este punto es importante mencionar a qué nos estamos refiriendo con flexibilidad. En esta tesis estamos analizando, de manera general, las ventajas que ofrecen los muros de suelo reforzado como base de instalación de una chancadora primaria, y a su vez hacemos una comparación con otros métodos de instalación tradicionales. Es así que la flexibilidad se refiere a las facilidades del desplazamiento de la chancadora primaria que ofrece una u otra alternativa de instalación.

También es importante no perder de vista los tipos de chancadoras con las que se cuenta en la actualidad (fija, semi - fija, semi - móvil, móvil), para este análisis (tomando como ejemplo el caso de la chancadora primaria instalada en Cuajone por SPCC) estamos considerando una chancadora semi – móvil, cuyas características serán explicadas a mayor profundidad más adelante, que, debido a sus características intrínsecas tiene la posibilidad de desplazarse cada cierto periodo de tiempo. Por ende, un muro de suelo reforzado ofrece los requisitos para que la chancadora pueda desplazarse sin ningún tipo de restricción, a diferencia de una estructura de concreto (que debería ser demolida antes del desplazamiento de la chancadora) y de una estructura metálica (que es necesaria ser desmontada).

Sin embargo, es importante recalcar que este análisis se debe realizar considerando básicamente el sistema de chancado que se va a utilizar y las veces que se planea desplazar la chancadora primaria durante su vida útil.

CAPÍTULO III: CASO DE ESTUDIO Y PROPUESTA DE SOLUCIÓN

GENERALIDADES

Las operaciones de SPCC de cobre en Perú comprenden las actividades típicamente desarrolladas para producir concentrados de cobre y de molibdeno (extracción, molienda, flotación); la fundición para producir ánodos de cobre y la refinación para producir cátodos de cobre. (Southern Perú Copper Corporation, 2017)

Además, cuenta con operaciones en las minas de Toquepala y Cuajone en las alturas de la cordillera de los Andes, a unos 860 kilómetros al sureste de la ciudad de Lima, Perú y también opera una fundición y una refinería en la ciudad costera de Ilo. (Southern Perú Copper Corporation, 2017)

“Las operaciones de Cuajone consisten de una mina de cobre a tajo abierto y una concentradora ubicada en el sur del Perú, a 30 kilómetros de la ciudad de Moquegua. La concentradora tiene una capacidad de molienda de 87,000 toneladas por día. La remoción del material de recubrimiento comenzó en 1970 y la producción del mineral comenzó en 1976. Las operaciones de Cuajone utilizan un método de minado convencional a tajo abierto para extraer el mineral de cobre para su posterior procesamiento en la concentradora”. (Southern Perú Copper Corporation, 2017)

Al revisar el Planeamiento Estratégico de la empresa SPCC y su Informe Anual 2017 se puede identificar que uno de los objetivos de la empresa al 2030 es estar entre los mayores productores de cobre refinado con la estructura de costos más bajos lo que la convertiría en una de las empresas más rentables. Entre los intereses relacionados a la rentabilidad, en el Planeamiento Estratégico se enuncian las siguientes (Cornejo Walter, 2018):

- *“Producir la máxima cantidad de cobre al menor costo posible. Vinculado al principio de maximización de beneficios o utilidades que debe operar como un faro de referencia en la toma de decisiones y ser correctamente matizado con los demás intereses.*
- *Obtener una rentabilidad para los accionistas de SPCC superior a la requerida.*

- *Obtener bajos costos de extracción, fundición y refinado general. Como fue establecido anteriormente, el mercado del cobre se asemeja, en algunas características, a una estructura de competencia perfecta, donde la baja concentración de la oferta hace que los productores sean tomadores de precio y no ejerzan presiones decisivas en su determinación. En consecuencia, los productos enfocan sus esfuerzos en una estructura de costos que garantice la viabilidad operativa cuando los precios del cobre están a la baja, pudiendo luego aprovechar al máximo los momentos de precios altos”.*

De manera adicional, como principales objetivos a largo plazo tienen los siguientes (Cornejo Walter, 2018):

- *“Al 2030 refinar por lo menos 800,000 toneladas de concentrado de cobre, de los cuales se producirá 600,000 toneladas. Durante el 2016 la producción de cobre alcanzó las 312,900 toneladas. Southern Perú Copper Corporation ocupó el cuarto puesto entre los productores cupríferos peruanos durante el 2016 con una producción equivalente al 13.29% de la producción nacional.*
- *Al 2030 tener una rentabilidad del capital invertido del 15%, esta rentabilidad se basará en una estrategia de reducción de costos. Al año 2016 esta rentabilidad fue del 9%. SPCC únicamente tiene incidencia en la parte de costos, pero depende del precio del cobre en las ventas.*
- *Al 2030 tener reservas de cobre no menores a las actuales (26.2 millones de toneladas) al precio de US\$ 2.90 por libra”.*

Para alcanzar estos objetivos a largo plazo SPCC realizará programas de inversiones de capital y exploraciones, para ello deberá invertir en proyectos de expansión y modernización un monto de US\$ 5,000 millones hasta el 2022, de los cuales US\$ 250 millones fueron destinados a Cuajone para su proyecto de construcción de una nueva chancadora primaria y sistema de transporte por fajas (Cornejo Walter, 2018) con la finalidad de reducir los costos relacionados al transporte de mineral y así amortiguar de cierta manera las menores ventas realizadas, ocasionadas debido a una disminución en las leyes de mineral y a un mayor índice de dureza de la roca, lo cual origina menores recuperaciones metalúrgicas.

11. TIPOS DE TRANSPORTE UTILIZADOS POR SPCC

En minería a tajo abierto el transporte de mineral se realiza mediante camiones, ferrocarriles o cintas transportadoras. SPCC ha venido utilizando a lo largo de los años camiones y locomotoras diésel para el transporte de mineral hasta la planta procesadora. El transporte mediante ferrocarril ha sido utilizado desde los años 60', sin embargo el problema que se tiene con éste es la cantidad de equipos (locomotoras y tolvas) requeridos para alcanzar su producción proyectada, haciéndolo ineficiente debido a los altos costos que generaría. Por otro lado, el transporte mediante camiones ha brindado sobre todo las siguientes ventajas: superar pendientes pronunciadas, menores radios de curvatura, ambos apuntando a reducir los trabajos de movimiento de tierras y transporte de desmonte, generando por ende un menor costo. Sin embargo, este tipo de transporte requiere una condición óptima de los caminos de transporte y además se puede ver afectado gravemente por la climatología de la zona, ocasionando a su vez mayor cantidad de accidentes laborales. (Instituto Geológico y Minero de España, 1982)

Es debido a esta razón que desde el año 2002 SPCC ha venido desarrollando proyectos de ingeniería que le permitieran mejorar el tipo de transporte utilizado, proponiendo como soluciones la compra de camiones, trenes o la instalación de un sistema de fajas transportadoras de mineral. Al momento de analizar la mejor alternativa se consideraron factores como que actualmente la industria minera está enfocándose en la excelencia operacional y de seguridad apuntando a niveles de “cero accidentes”. Además entre estos factores también se incluye la necesidad de obtener mayores eficiencias no solo para hacer frente al incremento de los costos de capital de los activos mineros, como equipo, combustible, neumáticos y mano de obra, sino también su funcionamiento general y el chancado in-pit así como el transporte de mineral es una parte importante de esto. (Ccori, 2002)

11.1 TRANSPORTE POR FERROCARRIL

Antes de la segunda guerra mundial, el transporte ferroviario era el principal tipo de transporte en grandes minas a cielo abierto. Sin embargo en la actualidad la mayor parte del material extraído, que se explota en minas a cielo abierto, se transporta desde el tajo hasta la planta chancadora utilizando camiones.

Bajo condiciones favorables, basados en el costo por tonelada transportada, el transporte por ferrocarril es superior a otros métodos en el transporte de mineral hacia chancadoras o botaderos. La ventaja del transporte por ferrocarril incrementa a medida que aumenta las distancias de transporte o los volúmenes de producción. Sin embargo un aumento en la longitud del recorrido solo tiene un efecto limitado en el costo del transporte ferroviario. (Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2009)

Tal vez el requisito indispensable, y a su vez la mayor limitante para este tipo de transporte, es la necesidad de mantener un grado suave para la vía. Las pendientes de 0.5 a 1% pueden considerarse suaves, aunque para recorridos ascendentes se pueden aceptar pendientes máximas de 3% y para recorridos descendentes 4%. Lo óptimo es que los trenes puedan operar sobre vías niveladas o en pendientes descendentes, de esta manera se podrán obtener menores costos de transporte ya que habrá ahorros significativos en el costo de mantenimiento de motores, ruedas, generadores y motores de tracción, no obstante, el costo de mantenimiento de los sistemas de freno aumentará, ocasionando un efecto de compensación.

Por otro lado, al necesitar pendientes suaves para su recorrido, se necesita aumentar la longitud del recorrido, por ejemplo, para salir de un pit de 90 m, con una pendiente de 3%, se necesitará una rampa de casi 3 km de longitud. Y si la pendiente fuese de 2%, la longitud de la rampa sería mayor a 4.5 km.

El transporte ferroviario en minería debe estar complementado por otros métodos de transporte para desarrollar un sistema que se adapte mejor a la topografía del terreno, a las características del cuerpo mineralizado y al método de explotación. (Instituto Geológico y Minero de España, 1982)

De manera general, en proyectos en donde la distancia desde el pit hasta la planta procesadora está entre 4.8 km y 6.4 km, la topografía es favorable y por ende el movimiento de tierras para la construcción de las vías férreas no es necesario o es mínimo y se tienen grandes reservas de mineral, la utilización de transporte ferroviario es definitivamente factible. (Darling, 2011)

Costos del transporte por ferrocarril

Los procedimientos para estimar los costos de un ferrocarril en mina superficial no son diferentes de los utilizados para cualquier otra actividad industrial. Los requisitos básicos para obtener resultados confiables son (1) desarrollar datos de producción precisos, (2) realizar buenos cálculos de ingeniería y diseño, (3) estimar correctamente el capital y los costos operativos, y (4) seguir un procedimiento de costos bien aceptado. La información de costos de proyectos anteriores puede ser útil en el proceso de estimación, pero no se debe confiar demasiado en ellos. (Runge, 1998)

Los ferrocarriles tienen una gran inversión inicial en la construcción de vías, patios, estructuras, flotas, entre otros. Por lo tanto, pueden ocurrir cambios significativos en los costos de años anteriores debido a cambios en la tecnología. En segundo lugar, los principales trabajos ferroviarios, como el movimiento de tierras y las vías, dependen mucho de la topografía del terreno. La influencia de las condiciones del lugar, como la topografía y la pendiente trasciende los costos operativos y de capital. Sin embargo de manera general, los costos de construcción por km de vía puede variar entre US\$ 100,000 y US\$ 1'000,000.00 e incluso más.

En la práctica, los buenos procedimientos de planificación, ingeniería y diseño deben determinar los diversos requisitos de construcción, especificaciones de equipo, requisitos de personal, rendimiento operativo y uso de principales suministros. Por ejemplo, el movimiento de tierras y el trazo de las vías se deben realizar a partir de planos de ingeniería, los requisitos de los equipos deben basarse en los planes de producción del proyecto y el consumo de combustible debe obtenerse de los cálculos de velocidad, tiempo y distancia.

Los costos asociados con el mantenimiento de los equipos y el seguimiento representan una fracción importante de los costos operativos totales, tanto como del 60% al 80%. (Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2009)

La correcta estimación es sumamente importante, la confiabilidad de las estimaciones de costos puede mejorarse en gran medida trabajando con fabricantes y proveedores.

11.2 TRANSPORTE POR CAMIONES

Los camiones gigantes son actualmente los principales equipos utilizados para el transporte de material en minas a tajo abierto, se introdujeron a mediados de la década de 1930, los primeros camiones fueron de aproximadamente 15 toneladas de capacidad, posteriormente en la década de 1950 aumentaron su capacidad hasta 60 toneladas y posteriormente se introdujeron camiones mejores y más grandes con capacidades de hasta 320 toneladas.

Los camiones gigantes hacen posible el desarrollo de grandes depósitos de mineral de baja ley, estos depósitos con altas proporciones de desmonte y grandes cantidades de residuos se pueden acumular debido a las economías de escala logradas.

Entre las principales ventajas que tiene tenemos las siguientes (Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2009):

- Versatilidad, pueden transportar una amplia variedad de materiales.
- Buena tracción, debido a la distribución favorable de peso.
- Buen rendimiento en condiciones desfavorables de carretera.
- Buena maniobrabilidad debido a la corta distancia entre ejes y el pequeño círculo de giro.
- Adecuado para un impacto de carga severo,
- Bueno para descargar material en tolvas restringidas y sobre bancos.
- Provee máxima flexibilidad con capacidades de hasta 320 toneladas.

Por otro lado, las desventajas que tienen son (Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2009):

- No son adecuados para recorrer largas distancias y a alta velocidad debido a la presión relativamente alta de los neumáticos.
- Debe detenerse, girar y retroceder para descargar.
- Posee una carga útil nominal de 55 a 60%

Consideraciones del camino de acarreo

Los caminos de acarreo deberán ser ubicados considerando que el principal objetivo es minimizar los costos de transporte, sin embargo, esta ubicación también debe ser consistente con los otros objetivos del planeamiento de la mina.

Longitud

La longitud del camino de acarreo es una consideración importante en la selección de camiones, vida útil de los neumáticos, la producción de los camiones y en general el costo de transporte. Por concepto, la longitud del camino se debe minimizar de acuerdo con las pendientes de la carretera.

Pendiente

Las pendientes del camino de acarreo son determinadas como porcentajes (elevación vertical/distancia horizontal * 100). Las cuestas arriba o elevaciones verticales son adversas o desfavorables, expresadas como porcentajes positivos (+). Las cuestas abajo o caídas verticales son calificaciones favorables expresadas como un porcentaje negativo (-). Las pendientes óptimas para los camiones de acarreo son del 7% al 10% pero deben evaluarse para cada tipo de camiones. Para distancias cortas esta pendiente puede llegar al 15%. (Darling, 2011)

Distancia de visibilidad

Los caminos de acarreo deben diseñarse con una distancia de visión adecuada para que el operador pueda detener un camión que se desplaza a la velocidad de operación antes de llegar a un obstáculo. La distancia de visión está limitada a las crestas de curvas verticales debido a la superficie de la carretera y en las curvas horizontales debido a las bermas, rocas escarpadas, estructuras, etc. Esta distancia de visibilidad es un factor muy importante a considerar al momento de diseñar el camino ya que la falta de visibilidad es uno de los factores que causan mayor cantidad de accidentes entre camiones y vehículos menores.

Construcción

El camino de acarreo debe tener una base estable que soporte adecuadamente el elevado peso de los camiones mineros. En muchas minas los estratos naturales proporcionan una base adecuada. La base de la carretera debe estar superpuesta por material como piedra chancada o grava, relaves gruesos o tierra estabilizada (afirmado).

El material de la superficie debe tener un alto coeficiente de adherencia o tracción en las condiciones de operación. El ancho del camino de acarreo para un recorrido de uno o dos carriles de ser entre 2 y 3.5 veces el ancho del camión. Además los lados del camino deben tener una cierta pendiente para obtener un drenaje adecuado. De manera adicional se deben construir bermas en los costados del camino para asegurar la seguridad. (Darling, 2011)

En las curvas, la elevación de la superficie de la carretera debe elevarse desde el interior hacia el exterior de la curva (peralte). Este peralte es necesario para contrarrestar la fuerza centrífuga exterior, reduciendo la tensión en los neumáticos, la dirección y otros componentes del vehículo. El peralte requerido está en función del factor de fricción, la velocidad del vehículo y el radio de la curva. En curvas cerradas, a menudo es necesario ensanchar la carretera debido al mínimo radio de giro en el vehículo y al espacio libre. Por último, los carriles de escape y/o bermas de colisión son necesarios para detener a camiones fuera de control.

Costos del transporte por camiones

De manera general, los costos asociados a los camiones son los costos de posesión y costos operativos. Los costos de compra y operación de un camión específico varían ampliamente dependiendo del precio del camión, cargos financieros, condiciones de carga y transporte, precios de combustible y lubricantes locales, nivel de desgaste de las llantas, disponibilidad y precios de las piezas, disponibilidad de mano de obra, habilidades, salarios, etc. Las estimaciones de costos deben realizarse basándose en una evaluación precisa de las condiciones de la minería y los datos locales actuales.

La propiedad de los camiones y los costos operativos pueden presentarse como costos anuales o por hora. Los costos por hora generalmente se basan en el tiempo de

operación real del camión, que no incluye el tiempo de actividad, retraso, mantenimiento preventivo, reparación y tiempos de espera.

Los costos de propiedad y operación, junto con la producción de la flota de camiones se utilizan para determinar el costo total de transporte. El costo de transporte por lo general es una parte importante en el costo total de la mina y el costo por unidad de mineral extraído. Sin embargo, el costo de transporte no refleja los costos de perforación y voladura, carga, construcción, mantenimiento de carreteras de transporte, supervisión y otras actividades que pueden influir en el costo del transporte. Por lo tanto, las decisiones de selección de flota de camiones deben basarse en el costo total de la mina en lugar de solo el costo de transporte ya que la flota de camiones interactúa con otras actividades y equipos de la operación minera.

Los costos de producción de transporte generalmente se expresan como costo por tonelada o costo por tonelada – kilómetro. El costo por tonelada es simplemente el costo total del camión dividido por las toneladas totales transportadas por el camión. El costo por tonelada – kilómetro considera la distancia que se transporta el material y se calcula por el costo total del camión dividido por el acumulado de toneladas kilómetros, que es el peso acumulado multiplicado por la distancia.

11.3 TRANSPORTE POR FAJAS

En los últimos años, los cambios en los costos relativos de los equipos, mano de obra y combustibles han hecho de las fajas transportadoras el medio más económico para mover grandes cantidades de mineral minado por largas distancias.

La confiabilidad, la capacidad para transportar grandes volúmenes y la eficiencia energética de las fajas transportadoras las han hecho dominantes en el transporte minero hace ya algunos años. Los recientes costos de los combustibles derivados del petróleo y el mayor énfasis en la protección del medio ambiente han generado un incremento en el uso de las fajas transportadoras. Uno de los desarrollos más recientes para el acarreo de mineral a largas distancias ha sido el uso de curvas horizontales que se adaptan al terreno y eliminan la necesidad de costosas estructuras y unidades de transferencia de fajas.

Con el incremento en el costo de combustibles derivados de petróleo y el aumento de las restricciones debido a la contaminación ambiental que producen por la emisión de partículas, las fajas transportadoras han sido desarrolladas para reemplazar a los vehículos móviles en muchas aplicaciones. Actualmente las fajas transportadoras convencionales, fajas montadas sobre orugas, fajas extensibles y otras, están siendo utilizadas en conjunto con chancadoras portátiles.

Costos de operación y mantenimiento

El costo de operación de un sistema de fajas de transporte se compone básicamente de dos partes: mano de obra y energía utilizada. El costo de la mano de obra puede variar mucho dependiendo del número de fajas, su ubicación, tiempo de operación por día, tipo de instalación operativa (mina, cantera, planta) y el grado de automatización. Dependiendo de estos factores se puede determinar la cantidad de personal operativo que observe periódicamente el funcionamiento del sistema de operación y las horas requeridas del personal que trabaje en la sala de control.

El costo de la energía también puede variar mucho; en el Perú, durante el año 2015, se tuvo un precio de 7.79 ctv US\$ - KW.h (Ministerio de Energía y Minas, 2016). Las fajas que trabajan sobre superficies en descenso, de naturaleza regenerativa, requieren consideraciones especiales ya que la faja generará energía en lugar de consumirla.

El costo anual de mantenimiento se puede aproximar usando una regla general de 1% a 2% del costo de la faja instalada. (Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2009)

12. SOLUCIÓN ADOPTADA POR SPCC: IN PIT CRUSHING AND CONVEYING (IPCC)

Con la finalidad de establecer y mantener competitividad en el mercado internacional de productos minerales fue necesario adoptar la última tecnología y sistemas económicos probados en minería a cielo abierto. En los mercados de hoy los problemas como el incremento del material a ser desechado (desmonte), el incremento en las distancias de transporte, el incremento de las profundidades de las minas, la disminución de las leyes de mineral y el continuo incremento de los costos de energía y mano de obra han obligado a las empresas a innovar en sus métodos de transporte de mineral.

El transporte de mineral y de material de desmonte desde los pit's hacia las chancadoras mediante camiones es un sistema de transporte bastante flexible. Los encargados de la planificación en las minas, especialmente en los proyectos Green Field, encuentran en el transporte mediante camiones el sistema más fácil de diseñar y planificar. A medida que el pit se hace más profundo los planners deberían realizar un nuevo análisis entre el costo y la flexibilidad de los sistemas de transporte. Esto asegurará que las operaciones continuarán teniendo los mejores y más económicos sistemas de manejo de material para sus operaciones. (Darling, 2011)

A medida que los pit's se profundizan y aumentan sus capacidades, el sistema IPCC se ha convertido en el método elegido para el transporte y acarreo de mineral para los planners en la mayoría de las minas. En respuesta a este nuevo sistema los fabricantes de camiones han desarrollado equipos cada vez más grandes sin embargo cuando es posible realizar una planificación a largo plazo, el IPCC es el sistema preferido para el manejo de materiales.

Existen 3 principales pasos en el diseño de una excelente planta de chancado (1) el diseño del proceso, (2) la selección de los equipos, (3) el plan y ubicación. Los dos primeros están dictados por los requisitos de producción y las características del material sin embargo el diseño puede verse influenciado por las decisiones y la experiencia de un gran número de partes. Estos pueden incluir a personal de ingeniería, personal de operaciones y mantenimiento, fabricantes de equipos y especialmente los planificadores de la mina. (Mohammad Reza, 2011)

Los tipos de chancadoras in-pit usualmente revisadas por los planificadores de minas para el mineral duro son plantas fijas, plantas semi – móviles o completamente móviles dentro del pit mientras que las capacidades de estas chancadoras son superiores a las 2,500 ton/h (toneladas métricas por hora).

12.1 VENTAJAS DEL IN-PIT CRUSHING AND CONVEYING (IPCC)

La principal razón para la implementación de una planta móvil o semi – móvil en lugar de una planta chancadora estacionaria es la optimización del transporte de material alrededor y fuera del pit en su camino hacia los botaderos o planta de procesamiento. En este caso, la optimización significa la comparación entre el costo total del transporte por

camiones y el transporte por fajas transportadoras en combinación con plantas chancadoras, stockpiles y equipos de descarga.

El diseño básico de las plantas chancadoras no ha cambiado mucho en los últimos años, únicamente han sido agregados equipos supresores de polvo y/o colectores de polvo como respuesta a un incremento en los estándares de protección ambiental en las compañías mineras.

Entre las ventajas que presentan los sistemas IPCC, las más sobresalientes son las siguientes (Darling, 2011):

- Ubicar la chancadora en el pit reduce el costo debido a que acorta la distancia de acarreo entre los cargadores y la planta chancadora.
- Se reducen los costos de operación relacionados con el combustible, llantas y lubricantes; los precios de estos productos tienden a aumentar a una tasa que excede la tasa de inflación monetaria.
- Se reducen los costos de mano de obra, aunque la mayoría de los sistemas in-pit ya sea en operación o en etapa de planificación utilizan el acarreo por camiones, la distancia de acarreo es más corta y el número de camiones puede reducirse total o parcialmente. Esta reducción produce una correspondiente disminución en operadores y personal de mantenimiento.
- En comparación con el transporte por camiones, se reducen los riesgos de seguridad.
- Debido a que la mayoría de las empresas mineras trabajan a largo plazo, las chancadoras y las fajas transportadoras ofrecen una mayor previsibilidad para la proyección de costos futuros.
- La dependencia de la disponibilidad de combustible y de las llantas para los camiones disminuye considerablemente.
- Las fajas pueden atravesar pendientes mayores a 30° mientras que los camiones trabajan en pendientes aproximadas a 8° y 10°. Esta capacidad permite obtener distancias de transporte más cortas y reduce la construcción de carreteras de transporte.
- Con la reducción de los costos de transporte, los cuerpos de mineral de baja ley pueden ser explotados económicamente. Esto es particularmente muy importante

porque muchos cuerpos de mineral están disminuyendo en ley a medida que se profundizan.

- Las emisiones de CO₂ se reducen en gran medida.
- Las fajas transportadoras son más eficientes que los camiones en cuanto al uso de energía.
- Las fajas transportadoras, a comparación de los camiones, requieren personal menos calificado para su mantenimiento.
- El equipo de IPCC puede lograr una máxima disponibilidad operativa debido a una mayor independencia de las condiciones climáticas como la niebla, lluvia, nieve y heladas.
- El costo de mantenimiento de los caminos de acarreo se reduce significativamente.
- Se puede mantener un flujo continuo de transporte de mineral.

12.2 SISTEMAS DE INSTALACIÓN DE LA CHANCADORA IN-PIT

Los sistemas de chancado in-pit desarrollados y operados actualmente tienen diversos grados de movilidad que van desde unidades completamente móviles hasta plantas permanentemente fijas. Las plantas chancadoras pueden ser estacionarias (montadas sobre cimentaciones de concreto) o de estilo semi-móvil, apoyadas en pontones de acero.

A medida que avanza la operación minera, las chancadoras semi – móviles se pueden reubicar dentro de la mina utilizando remolques de ruedas. Por lo general, las palas cargan el material minado en los camiones y luego éstos transportan el mineral hasta la chancadora, entonces si reubicamos la chancadora a medida que la mina se expande, la distancia de transporte de estos camiones es siempre mínima.

Entre los tipos de sistemas de chancado in-pit tenemos los siguientes: chancadoras fijas, chancadoras semi – fijas, chancadoras móviles y chancadoras semi – móviles. (Instituto Tecnológico Minero de España, 1995)

12.2.1 CHANCADORA FIJA: PLANTAS DE CHANCADO FIJAS EN EL SUELO O MONTADAS AL BORDE DE UN TALUD

Las chancadoras fijas se instalan en una estructura de concreto debajo del nivel del suelo, éstas se ubican por lo general fuera del pit y nunca se mueven.

Las chancadoras fijas montadas en el borde de un banco se instalan normalmente en una estructura de concreto armado que forman parte o están unidas a la pared de un banco. Una parte o toda la estructura puede ser fabricada de acero y puede ser desmontada y movida y por lo general se instalan durante 15 años o más.

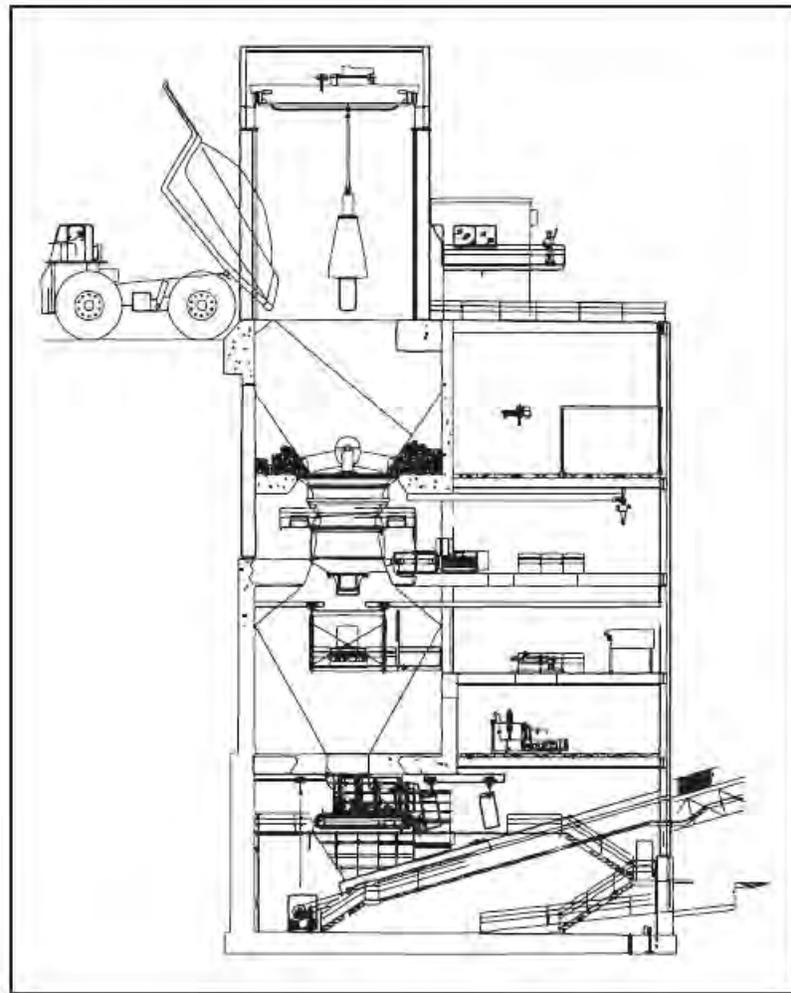


Figura 11. 1 Chancadora fija montada en el borde instalada dentro de una estructura de concreto. Fuente: (Darling, 2011)

Este tipo de chancadoras incorporan cada vez más estructuras tradicionales de descarga directa. Con estos diseños la tolva sobre la chancadora está diseñada para sostener de 1.5 a 2 veces la capacidad del camión más grande que se descargará en la chancadora durante la operación.

Los depósitos de descarga son dimensionados ligeramente más grandes que las tolvas de alimentación para adaptarse a cualquier condición de material fino con la finalidad de

reducir la altura total y, por lo tanto, los costos de capital. Mientras que los alimentadores de la plataforma de descarga son reemplazados por fajas transportadoras de descarga resistentes al impacto.

Con las chancadoras in – pit montadas en el borde de un banco, la altura total requiere que las paredes laterales se apoyen y estén conformadas por estructuras reforzadas. Pero por lo general las chancadoras fijas tradicionales se instalan por debajo del nivel del suelo y se alimentan a nivel.

Algunas de las ventajas que ofrecen este tipo de chancadoras son las siguientes (Darling, 2011):

- Son plantas tradicionales con configuraciones simples fácilmente adaptables para chancadoras in – pit.
- Tienen unos costos de mantenimiento menores debido a que no necesita instalar una plataforma alimentadora.
- Menores costos de capital debido al bajo grado de movilidad.
- Tienen mayor capacidad y brindan un producto final más fino debido al peso de la columna de mineral sobre la chancadora.

Algunas desventajas que presentan las chancadoras finas son (Darling, 2011):

- La estructura de concreto armado no puede ser movida.
- Los diseños de acero estructural normalmente no están diseñados para ser movidos.
- La altura total es mayor debido al mayor nivel del banco de los puntos de descarga de material.

12.2.2 CHANCADORA SEMI – FIJA

Las chancadoras semi – fijas están montadas sobre una estructura de acero que descansa sobre una base de concreto armado. La estructura alberga algunos o todos los equipos auxiliares y subsistemas para operar la chancadora. Esta chancadora puede estar ubicada dentro o cerca del borde del pit y se requiere cierto grado de desmontaje para mover la estructura. La frecuencia planificada de movimientos para una chancadora de este tipo es entre 5 y 10 años. (Mohammad Reza, 2011)

En una planta de chancado semi – fija, una parte de la estación de chancado está fabricada de acero. La tolva de alimentación de descarga directa, la estructura de soporte de la chancadora y las salas de control son por lo general de acero. Sin embargo, las diferencias en el diseño están relacionadas en las características de la parte inferior de la chancadora que pueden ser de concreto o acero.

Por lo general solamente la chancadora y toda (o parte de) la tolva de descarga está montada sobre una base de acero, mientras que el resto de la estación se apoya sobre una estructura de concreto armado. La parte de acero puede ser movida por un equipo de transporte y, mientras que la estación se traslada a una nueva estructura civil, la antigua estructura es demolida.

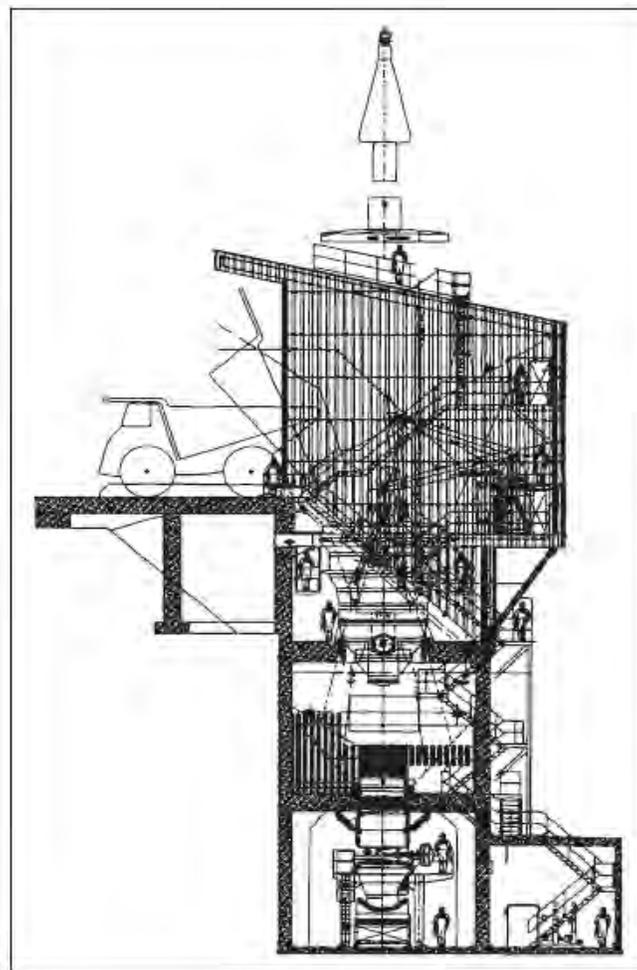


Figura 11. 2 Chancadora instalada sobre estación de acero estructural. Fuente (Darling, 2011)

Las ventajas de las chancadoras semi – fijas con alimentación directa incluyen:

- Mayor flexibilidad a largo plazo debido a la movilidad limitada, que permite futuros cambios y modificaciones.
- Posee un alto rendimiento en la cámara de trituración.
- Menores costos de mantenimiento debido a una mayor cantidad de aplastamiento en la parte superior de la cámara de descarga y menor desgaste abrasivo localizado.

Entre las desventajas de este tipo de sistemas tenemos:

- Solamente la chancadora y parte o la totalidad de la tolva de descarga están montadas sobre una base de acero.
- El soporte de la estación está compuesto por una estación de construcción civil. Una mayor altura total se debe a un mayor nivel del banco del punto de descarga.

12.2.3 CHANCADORA SEMI – MÓVIL DE DESCARGA DIRECTA

Las plantas chancadoras semi – móviles de descarga directa han sido el diseño de elección para las IPCC desde los años 2000. Este diseño incorpora todas las características de una estación de chancado tradicional instalada en el suelo. La planta chancadora incorpora la tolva de alimentación, la chancadora y los sistemas de lubricación e hidráulico para sostener la chancadora, así como todo el equipo de mantenimiento, incluyendo un triturador de rocas y generalmente una grúa con capacidad para levantar el eje principal.

También incluye una sala de control para el operador y salas eléctricas. Por encima de la chancadora giratoria tradicional con dos puntos de descarga se encuentra la tolva la cual puede contener dos veces la capacidad del camión más grande que se va a utilizar durante la operación. Por ejemplo, para una operación con camiones de 360 toneladas, se requerirá una tolva con capacidad de 720 toneladas.

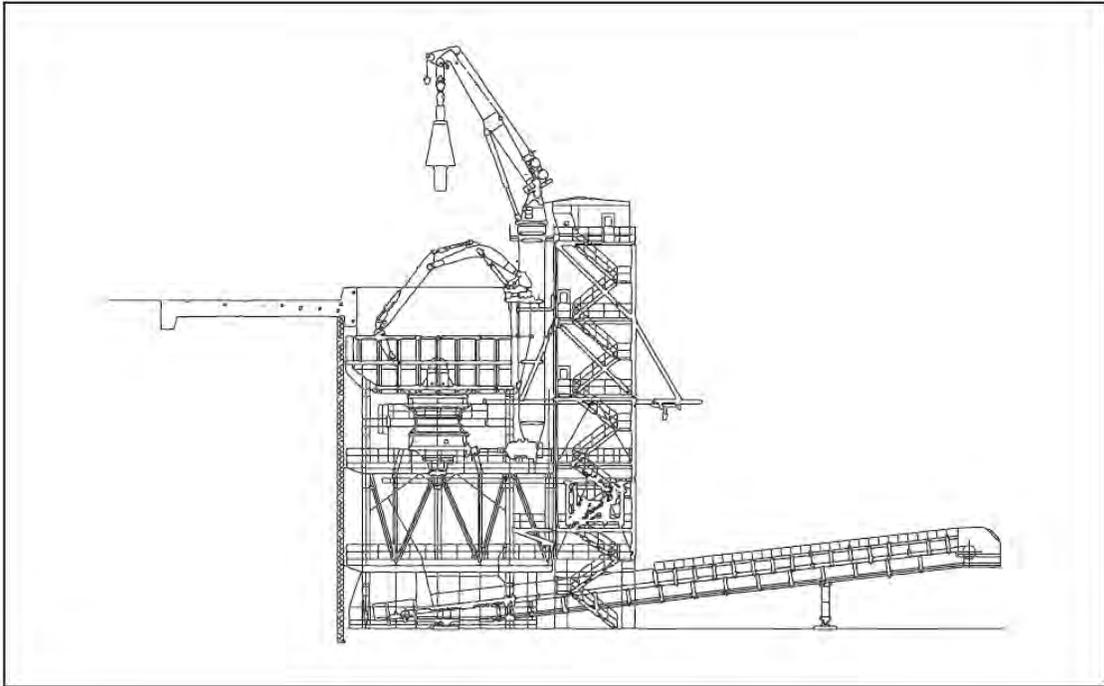


Figura 11. 3 Planta chancadora semi - móvil de descarga directa. Fuente (Darling, 2011

Según lo muestra la figura 11.3, la estructura es autoportante y se apoya en el piso de la mina con o sin pontones. El diseño de la planta permite 2 o 3 puntos de descarga. La chancadora generalmente se ubica cerca al centroide de los bancos en explotación con la finalidad de minimizar la distancia de transporte del camión. Las mamparas están integradas a la estructura para permitir el movimiento de la estructura utilizando equipos de transporte comercialmente disponibles. La frecuencia planificada de movimientos para una chancadora semi – móvil está entre 1 y 10 años.

Las ventajas de las chancadoras semi – móviles de descarga directa son:

- Mayor flexibilidad a largo plazo debido a la capacidad de mover la estación completa intacta.
- Menores costos de mantenimiento debido a una mayor cantidad de aplastamiento en la parte superior de la cámara y menor desgaste abrasivo localizado en comparación con los diseños de alimentación indirecta.

Las desventajas de este tipo de chancadoras son:

- Es una estructura grande y pesada que requiere grandes transportadores para su movimiento.
- Mayor altura general debido al mayor nivel de banco de punto de descarga, lo que **requiere muros de contención extensos, como muros de suelo reforzado.**

12.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

Durante los años 2015 y 2016 la empresa SKEx Construcciones se adjudicó la buena pro para la construcción de las obras civiles del proyecto “Mejora Tecnológica en el Transporte de Mineral a Concentradora – Cuajone”, proyecto impulsado por la empresa minera SOUTHERN PERÚ COPPER CORPORATION, asumiendo así la responsabilidad de asegurar que en la etapa de construcción sean realizados unos adecuados procedimientos constructivos y de control de riesgos para lograr el correcto funcionamiento de las instalaciones que se ejecutarían.

La empresa constructora estableció las condiciones para alcanzar los requisitos de calidad y desempeño para la correcta ejecución de los trabajos mediante información extraída de los planos y de las especificaciones técnicas brindadas en su momento por SPCC (Southern Perú Copper Corporation). Los trabajos comprendieron excavaciones, rellenos, compactaciones, preparación de superficies a fin de materializar las plataformas en donde se ejecutarían las diferentes instalaciones y construcciones; incluyendo también mallas a tierra y drenes verticales entre otros.

De manera adicional, se realizaron obras de concreto armado masivo y puntual para la futura chancadora primaria, sistema de fajas y ampliación de la subestación existente.

Este proyecto fue respaldado por una descripción de la secuencia de construcción de las obras (Plan de Ejecución), el cual hacía mención a los principales procedimientos de trabajos específicos que se realizaron, así como las estrategias utilizadas que se aplicaron para cumplir con los estándares de seguridad, calidad, TIEMPO Y COSTO indicados en el momento de la licitación.

En la Memoria Anual del año 2017, se indicó que se había terminado el proyecto de triturado y acarreo del mineral mediante la instalación de una chancadora primaria en el tajo de la mina y un sistema de fajas de 7 kilómetros para transportar el mineral a la concentradora, reemplazando así el acarreo por ferrocarril. Esto ha permitido la reducción del consumo de combustibles fósiles y ha generado a su vez ahorros operativos por

US\$23 millones anuales. Habiendo finalizado con una inversión total de US\$226 millones.
(Southern Perú Copper Corporation, 2017)

12.3.1 UBICACIÓN Y CONDICIONES DEL SITIO DE PROYECTO

Los trabajos ejecutados se encuentran situados dentro del asentamiento minero Cuajone de Southern Perú Copper Corporation, ubicado geográficamente en la Cordillera Occidental del Sur del Perú, en el Distrito de Torata, Provincia de Mariscal Nieto, Departamento de Moquegua, Perú.

Condiciones de sitio de la zona de trabajo (Ambiente, 2018):

Temperatura del Aire

- Temperatura máxima del aire 26 °C
- Temperatura media del aire 10 °C
- Temperatura mínima del aire -5 °C

Humedad Relativa

- Promedio 44%.

Precipitaciones

- Promedio anual, diciembre a marzo 71.5 mm
- Promedio anual, abril a noviembre 9.2 mm
- Máximo en 24 hrs 44 mm
- Máximo mensual (1985-2010) 143 mm
- No se reporta caída de nieve

Helada

- Penetración 0.15 m
- Altitud 3,400 msnm

En Cuajone, el periodo de lluvias es variable y de manera general se presentan desde diciembre hasta marzo, con presencia de neblina y lluvia con alta variabilidad como es típico de esta zona del país.

El Proyecto se desarrolló desde la zona oeste del tajo abierto hasta la pila de almacenamiento existente localizada en el área de la concentradora.

El Proyecto se codificó en tres áreas como sigue:

- Área 100 : Chancadora primaria / faja de descarga / sacrificio
- Área 200 : Sistema de fajas sobre superficie
- Área 700 : Aprovechamiento de energía

12.3.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL PROYECTO

Southern Perú Copper Corporation (SPCC) desarrolló el Proyecto Mejora Tecnológica en el Sistema de Transporte de Mineral a Concentradora Cuajone (PMTC) que incluyó la instalación de una nueva chancadora primaria giratoria, y un sistema de fajas sobre superficie, diseñado para transportar el material chancado hacia la pila de almacenamiento existente localizada en el área de la concentradora.

Anteriormente el sistema utilizaba un ferrocarril que transportaba el mineral desde hasta la chancadora primaria existente. La descarga de mineral chancado alimenta a la pila de almacenamiento intermedio a través de la faja existente.

Área 100. Chancado primario giratorio

El mineral será transportado en camiones desde la mina hacia la estación de chancado donde será descargado directamente en la alimentación de la chancadora. Dicha alimentación está diseñada con dos islas de descarga de camiones para recibir el mineral. Dicha estación de chancado es una Thyssen Krupp modelo KB 63x114 con una producción nominal de 8.000 mtph, con un máximo de operación de diseño de 8.800 mtph. La tolva de alimentación está diseñada para contener 520m³ (aproximadamente 830 mton). Este equipo reducirá el tamaño del mineral a P80 de 152mm.

La estación de chancado será ubicada en el límite norte del tajo existente, y será alojada dentro de una estructura abierta de acero equipada con una grúa de pedestal de 140 ton, con un malacate auxiliar de 20 ton para mantenimiento.

Un pica roca será instalado en la tolva de descarga, en tanto que un compresor, secador y receptor de aire de instrumentos será instalado para operación y mantenimiento.



Figura 12. 1 Ubicación general de las áreas de trabajo. Fuente SPCC

12.3.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS TRABAJOS DEL ÁREA 100 (LUGAR DONDE SE ENCUENTRA LA CHANCADORA PRIMARIA)

En esta área se llevarán a cabo las obras civiles complementarias a la instalación del equipo de chancado primario semi – móvil, camino de acceso a la chancadora, patio de maniobras; acorde y comprometido con los hitos y objetivos en seguridad, calidad, tiempo y costo requeridos por SPCC, realizando sin ser limitativo lo siguiente:

- Se debe realizar obras civiles de movimientos de tierra masivos y locales, estabilización de taludes, excavaciones, voladura de pre corte vertical,

conformación de terraplenes, rellenos estructurales y/o masivos en las zonas de accesos y contorno del equipo de chancado conforme a planos y Especificaciones Técnicas del proyecto.

- Trabajos de eliminación de materiales de excavación excedente, caminos de acceso temporal y definitivos y su perfilamiento y compactación, conforme a los requerimientos de los planos y Especificaciones Técnicas del proyecto,
- Se debe ejecutar obras de excavación/relleno, encofrados, habilitación y colocación de acero de refuerzo, concreto simple para solados y concreto armado para las estructuras auxiliares de la chancadora semi – móvil a instalar conforme a los requerimientos de los planos y Especificaciones Técnicas del proyecto.
- Construcción de un muro con sostenimiento de shotcrete, incluye provisión e instalación de pernos de anclaje a roca, malla electro soldada, varillas de refuerzo y drenajes.
- Construcción de un muro de panel de concreto prefabricado en un todo de acuerdo a especificaciones de “Tierra Armada” (proveedor del sistema).
- La instalación de todos los sistemas de puesta a tierra subterráneos, pararrayos, que deba efectuarse para su posterior conexión y puesta en servicio con los equipos mecánicos, eléctricos y de instrumentación (materia de un posterior contrato). Colocación de soleras, defensas camineras, carpeta de grava, cercos perimétricos, cunetas y sistemas de drenaje en plataforma y taludes, como obras varias y complementarias.
- Colocación de cercos perimétricos correctamente aterrados.

12.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS ALTERNATIVAS ANALIZADAS

Con la finalidad de comprobar la hipótesis propuesta al inicio de este estudio, la última parte abarca el análisis económico de tres alternativas analizadas: la construcción de una estructura de concreto armado, la construcción de una estructura metálica y finalmente la construcción de un muro de suelo reforzado.

Para cada una de estas alternativas se ha realizado el presupuesto de construcción, el presupuesto de mantenimiento de las estructuras y finalmente el presupuesto de cierre, siendo los resultados los mostrados en la Tabla 12.1, 12.2, 12.3 los correspondientes a la etapa de construcción.

Tabla 12. 1 Presupuesto de construcción de muro de suelo reforzado. (Elaboración propia)

CONSTRUCCIÓN					
PARTIDA	PARTIDAS	UND	PRESUPUESTO		
			METRADO	PU (US\$)	TOTAL
			A	B	C=AxB
	MOVIMIENTOS DE TIERRAS				
	AREA 100 CHANCADORA PRIMARIA				
	MURO DE CONTENCIÓN DE PANEL DE CONCRETO PREFABRICADO				
1	RELLENO ESTRUCTURAL CON MATERIAL DE PRÉSTAMO. INCLUYE CARGA Y ACARREO DEL PRIMER KM	m3	11,000.00	20.90	229,859.36
2	ACARREO KM SUBSECUENTE DE MATERIAL	m3/km	74,000.00	0.66	48,667.95
3	MURO DE TIERRA MECÁNICAMENTE ARMADO CON SUPERFICIE DE CARA LIBRE PREFABRICADO DE CONCRETO. (INCLUYE LA INSTALACIÓN DE TIRANTES DE MATERIAL GEOSINTÉTICO Y ANCLAJES EN ROCA, MALLA GEOTEXTIL Y ALMOHADILLA DE CAUCHO PROVISTOS POR TIERRA ARMADA, EL MATERIAL NECESARIO SERÁ PROVISTO POR EL CONTRATISTA)	m2	1,130.00	566.08	639,672.93
	CONCRETO				
	AREA 100 CHANCADORA PRIMARIA				
	CHANCADORA PRIMARIA				
5	INSTALACIÓN DE ACERO DE REFUERZO (VARILLA), INCLUYE: CONSUMIBLES COMO ALAMBRE DE AMARRE, SEPARADORES, TAPONES DE SEGURIDAD, ETC.	Ton	2.82	2,017.28	5,687.67
6	SUMINISTRO, INSTALACIÓN Y RETIRO DE ENCOFRADOS PARA TODO TIPO DE ESTRUCTURAS	m2	433.56	83.63	36,256.97
7	CONCRETO PARA CIMENTACIÓN $f_c=280$ kg/cm ²	m3	74.52	438.55	32,680.50
TOTAL					992,825.37

Tabla 12. 2 Presupuesto de construcción de estructura de concreto armado. (Elaboración propia)

CONSTRUCCIÓN					
PARTIDA	PARTIDAS	UND	PRESUPUESTO		
			METRADO	PU (US\$)	TOTAL
			A	B	C=AxB
1	CONCRETO EN PLACAS $f_c=280$ kg/cm ²	m3	3,276.00	438.55	1,436,678.93
2	ENCOFRADO Y DEENCOFRADO DE PLACAS	m2	4,704.00	83.63	393,377.55
3	ACERO DE REFUERZO	kg	215.75	2,381.78	513,876.89
4	CONCRETO PREMEZCLADO LOSAS $F_c=280$ kg/cm ² EN LOSAS MACIZAS	m3	1,925.10	438.55	844,246.22
5	ENCOFRADO Y DEENCOFRADO DE LOSAS MACIZAS	m2	1,098.00	87.81	96,412.62
TOTAL					3,284,592.20

Tabla 12. 3 Presupuesto de construcción de estructura de acero predimensionado (Elaboración propia)

CONSTRUCCIÓN					
PARTIDA	PARTIDAS	UND	PRESUPUESTO		
			METRADO	PU (US\$)	TOTAL
			A	B	C=AxB
1	EXTRA PESADA: PERFILES DE PESO >175 KG/M Y CHAPAS DE ESPESOR >15 MM	kg	220,512.60	8.04	1,773,534.79
2	PLATAFORMAS RECTAS (GRATING)	kg	56,264.99	2.91	163,933.66
3	INSTALACIÓN DE ACERO DE REFUERZO (VARILLA), INCLUYE: CONSUMIBLES COMO ALAMBRE DE AMARRE, SEPARADORES, TAPONES DE SEGURIDAD, ETC.	Ton	25.39	1,248.95	31,707.68
4	SUMINISTRO, INSTALACIÓN Y RETIRO DE ENCOFRADOS PARA TODO TIPO DE ESTRUCTURAS	m2	84.00	35.23	2,959.32
5	SUMINISTRO Y COLADO DE CONCRETO F'C = 280 KG/CM2 EN MUROS, GUARNICIONES Y DADOS (T3).	m3	441.00	299.34	132,008.94
TOTAL					2,104,144.39

Las tablas 12.4, 12.5 y 12.6 muestran los presupuestos de mantenimiento de estas mismas estructuras.

Tabla 12. 4 Presupuesto de mantenimiento de muro de suelo reforzado. (Elaboración propia)

MANTENIMIENTO					
PARTIDA	PARTIDAS	UND	PRESUPUESTO		
			METRADO	PU (US\$)	TOTAL
			A	B	C=AxB
1	TRAZO, REPLANTEO Y VERIFICACIÓN DE NIVELES Y VERTICALIDAD	mes	1.00	4,195.92	4,195.92
2	MEDICIÓN DE INCLINACIÓN DEL MURO	mes	1.00	326.45	326.45
TOTAL					4,522.37

Tabla 12. 5 Presupuesto de mantenimiento de estructura de concreto armado (Elaboración propia)

MANTENIMIENTO					
PARTIDA	PARTIDAS	UND	PRESUPUESTO		
			METRADO	PU (US\$)	TOTAL
			A	B	C=AxB
1	TRAZO, REPLANTEO Y VERIFICACIÓN DE NIVELES Y VERTICALIDAD	mes	1.00	4,195.92	4,195.92
2	ENSAYO FÍSICO-QUÍMICO DE PROBETAS DE CONCRETO ENDURECIDO	mes	0.50	743.49	371.75
3	ENSAYO NO DESTRUCTIVO DE VERIFICACIÓN DE GRIETAS (ULTRASONIDO)	hr/mes	1.00	1,000.00	1,000.00
TOTAL					5,567.66

Tabla 12. 6 Presupuesto de mantenimiento de estructura de acero predimensionado. (Elaboración propia)

MANTENIMIENTO					
PARTIDA	PARTIDAS	UND	PRESUPUESTO		
			METRADO	PU (US\$)	TOTAL
			A	B	C=AxB
1	IMPRIMACIÓN DE SECADO RÁPIDO, FORMULADA CON RESINAS ALQUÍDICAS MODIFICADAS Y FOSFATO DE ZINC.	m2	4,262.35	9.28	39,536.48
TOTAL					39,536.48

Por último, los costos de cierre de cada una de estas estructuras se presentan en las tablas 12.7, 12.8 y 12.9.

Tabla 12. 7 Presupuesto de cierre de muro de suelo reforzado. (Elaboración propia)

CIERRE					
PARTIDA	PARTIDAS	UND	PRESUPUESTO		
			METRADO	PU (US\$)	TOTAL
			A	B	C=AxB
1	DEMOLICIÓN DE CIMENTACIÓN	m3	74.52	38.34	2,857.28
2	EXCAVACIÓN DE MATERIAL RIPEABLE	m3	11,000.00	5.56	61,160.00
3	ACARREO SUBSECUENTE DE MATERIAL DE EXCAVACIÓN	m3	74,000.00	0.66	48,840.00
4	DESMONTAJE DE PANELES PREFABRICADOS	kg	393,660.00	0.42	165,337.20
TOTAL					278,194.48

Tabla 12. 8 Presupuesto de cierre de estructura de concreto armado. (Elaboración propia)

CIERRE					
PARTIDA	PARTIDAS	UND	PRESUPUESTO		
			METRADO	PU (US\$)	TOTAL
			A	B	C=AxB
1	DEMOLICIÓN DE CIMENTACIÓN	m3	661.50	38.34	25,363.51
2	DEMOLICIÓN DE MUROS DE CONCRETO ARMADO	m3	3,276.00	60.03	196,649.35
3	DEMOLICIÓN DE LOSAS DE CONCRETO ARMADO	m3	1,263.60	70.74	89,390.13
TOTAL					311,402.99

Tabla 12. 9 Presupuesto de cierre de estructura de acero predimensionado. (Elaboración propia)

CIERRE					
PARTIDA	PARTIDAS	UND	PRESUPUESTO		
			METRADO	PU (US\$)	TOTAL
			A	B	C=AxB
1	DEMOLICIÓN DE CIMENTACIÓN	m3	441.00	38.34	16,909.01
2	DESMONTAJE DE ESTRUCTURA METÁLICA PESADA	kg	220,512.60	1.36	299,720.73
3	DESMONTAJE DE PLATAFORMAS RECTAS	kg	56,264.99	1.13	63,781.99
TOTAL					380,411.72

Finalmente, se realizó la evaluación económica de cada una de estas alternativas, para lograr esto, los criterios de medición que han sido utilizados fueron el VANC (VAN de costos), y el CAE (Costo Anual Equivalente), obteniéndose los resultados presentados a continuación en la Tabla 12.10.

Tabla 12. 10 Evaluación económica de las tres alternativas analizadas. (Elaboración propia)

AÑO	0	1	2	3	4	5
	INVERSIÓN INICIAL	MANTENIMIENTO	MANTENIMIENTO	MANTENIMIENTO	MANTENIMIENTO	MANTENIMIENTO
MSEW	- 992,825.37	- 54,268.44	- 54,268.44	- 54,268.44	- 54,268.44	- 54,268.44
Concreto Armado	- 3,284,592.20	- 66,811.97	- 66,811.97	- 66,811.97	- 66,811.97	- 66,811.97
Est. Metálica	- 2,104,144.39	- 47,443.78	- 47,443.78	- 47,443.78	- 47,443.78	- 47,443.78

6	7	8	9	10	11
MANTENIMIENTO	MANTENIMIENTO	MANTENIMIENTO	MANTENIMIENTO	MANTENIMIENTO	CIERRE
- 54,268.44	- 54,268.44	- 54,268.44	- 54,268.44	- 54,268.44	-278,194.48
- 66,811.97	- 66,811.97	- 66,811.97	- 66,811.97	- 66,811.97	-311,402.99
- 47,443.78	- 47,443.78	- 47,443.78	- 47,443.78	- 47,443.78	-380,411.72

VAN MSEW	- 1,379,428.42	CAE MSEW	- 244,136.99
VAN Concreto A.	- 3,751,615.66	CAE Concreto A.	- 663,976.56
VAN Est. Metálica	- 2,481,571.62	CAE Est. Metálica	- 439,198.88

Según lo que se puede observar en la Tabla 12.10, el Muro de Suelo Reforzado (MSEW) es la alternativa que requiere una menor inversión inicial a comparación de las otras dos. Además, pese a que los costos de mantenimiento son mayores en comparación con los de la Estructura Metálica, sus costos de cierre son nuevamente significativamente menores. Es debido a esta razón que tanto el VANC como el CAE del MSEW nos ofrecen los mejores resultados económicos. De manera adicional en el capítulo 13. Conclusiones se brindará un panorama más amplio y detallado del análisis técnico/económico realizado.

13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En una industria en la cual parte de la competencia radica en obtener cada vez una mayor rentabilidad, diferentes empresas mineras vienen realizando programas de modernización que les permitan obtener sistemas de operación más eficientes y que les brinden como resultado final una considerable reducción en sus costos de operación. Diferentes estudios realizados han permitido determinar que los costos más altos tanto en operación (OPEX) como en inversión (CAPEX) radican en el transporte y oscilan entre el 50% y el 60% cuando se realiza de manera convencional, es decir, con camiones o ferrocarriles. Si

bien es cierto este sistema ofrece una mayor flexibilidad a la hora de realizar la operación de transporte en sí, sus costos se ven afectados directamente por el precio del combustible y sus derivados.

Es debido a esta razón que muchas empresas mineras han realizado estudios para la implementación de sistemas de chancado y transporte mediante fajas o IPCC (In-Pit Crushing and Conveying). Esto se debe a los bajos costos operativos que ofrecen a comparación del sistema de transporte tradicional gracias a la ausencia o disminución del número de camiones necesarios y por lo tanto el menor consumo de combustible y llantas, además del menor impacto ambiental que generan debido a que utiliza energía eléctrica y no combustible. Además, como un punto adicional importante, debemos mencionar la mejora considerable en temas de seguridad, puesto que permite mejorar los ratios de evaluación ya que por un lado se reduce la cantidad de conductores y, por otro, se reduce el recorrido que realizan para llegar hasta la chancadora primaria, dándonos como resultado final una menor tasa de accidentabilidad.

Pese a los beneficios que ofrece el sistema de chancado y transporte por fajas (IPCC), éste ha tenido un éxito limitado en minas a tajo abierto muy profundas y/o de roca dura y los camiones e incluso el ferrocarril continúa siendo el medio de transporte principal. Esto se debe a que los camiones mineros son los preferidos para el transporte de mineral en minas de geometría difícil y además el “temor” de algunas mineras que no les permiten implementar nuevas tecnologías.

Como se puede entender en el caso de estudio, las principales actividades que desarrolla SPCC son aquellas relacionadas con obtener concentrados de cobre y molibdeno, entre ellas la extracción, molienda y flotación. Sin embargo, no se debe perder de vista las labores que se dan entre estas actividades principales como es el transporte. Según ha identificado CODELCO a lo largo de los años, el costo de transporte para una operación minera a tajo abierto rodea aproximadamente el 60% de los costos totales de producción, siendo un factor decisivo la elección del medio de transporte que se va a utilizar; de manera adicional tampoco se debe perder de vista algunos de los conceptos básicos para la reducción de costos, entre los cuales tenemos que se debe mover el material la menor distancia posible utilizando la menor cantidad de equipos y personas.

Guiados a partir de estos conceptos analizados, Southern Perú Copper Corporation decidió ejecutar el proyecto de mejora tecnológica para el transporte de mineral en Cuajone, considerando la construcción de una nueva chancadora primaria ubicada cerca al tajo en explotación además de un sistema de fajas (IPCC) que finalmente le permitirá obtener un ahorro operativo anual de US\$ 23 millones de dólares (Southern Perú Copper Corporation, 2017). Este proyecto buscar realizar la combinación de métodos de transporte ya que se utilizarán los camiones mineros para alimentar la chancadora primaria semi-móvil y luego el mineral será transportado por fajas una distancia aproximada de 7.5 km hasta llegar a la chancadora secundaria.

De manera general, los beneficios que SPCC llegó a identificar y que consideró al momento de implementar el IPCC fueron los siguientes (Ccori, 2002):

- Las fajas transportadoras tienen una mayor eficiencia energética (alrededor del 75%) mientras que los camiones poseen el 45%, esta diferencia se hace aún más evidente cuando las pendientes de los caminos de transporte de mineral son mayores.
- Se pueden reducir las distancias de transporte ya que las cintas pueden funcionar con pendientes de hasta 33% mientras que los camiones trabajan con una pendiente máxima de 8% y el ferrocarril de 2%; de manera adicional al no ser necesarias algunas rampas de transporte, los bancos del tajo pueden ser más escarpados permitiendo una mejora en el ratio medio de las explotaciones.
- La operación es menos sensible a incidencias climatológicas como las épocas de lluvia que muchas veces acarrear accidentes.

Es importante mencionar que el contrato de adquisición tanto la chancadora primaria así como el sistema de fajas fue adjudicado a Thyssen Krupp Industrial Solutions. Este nuevo sistema sirve para transportar el mineral desde el tajo hasta la planta concentradora y fue concebido para reemplazar el transporte por ferrocarril así como para optimizar el transporte por camiones. El tipo de chancadora que se instaló fue una chancadora **semi – móvil** con tolva de descarga directa, además de 2 fajas transportadoras con una capacidad de 120,000 t/d. Las áreas de operación incluyendo la infraestructura eléctrica están físicamente separadas y son independientes del nivel de descarga de los camiones lo cual permite reducir significativamente la vibración, polvo y ruido. Además este tipo de chancadoras son diseñadas especialmente para minas que se ven afectadas frecuentemente por actividades sísmicas.

En este trabajo nos enfocamos en uno de los desafíos principales del proyecto que fue primero la elección del sistema de instalación de la chancadora primaria y posteriormente la construcción del muro de contención que le sirviera de soporte y por la cual circularían los camiones para depositar el mineral en la tolva de la chancadora primaria; entramos a analizar la alternativa elegida y el por qué se eligió ésta sobre otras alternativas, considerando el tipo de chancadora primaria que se eligió instalar y además los beneficios adicionales brindados en las diferentes etapas de un proyecto minero como son la concepción, construcción, operación y cierre.

Entre las alternativas de solución propuestas se presentaron estructuras de concreto armado masivo con refuerzo de acero, estructuras de acero predimensionado, muros pantalla de concreto armado con anclas pasivas y finalmente los muros de suelo reforzado; todos ellos considerando las características de la topografía de la zona, facilidades para la construcción, tiempo de ejecución, riesgos asumidos debido a la cercanía al tajo en explotación y el tipo de chancadora a ser instalada.

La primera opción fue descartada debido a las siguientes razones: la primera razón fue por temas económicos ya que era inviable la construcción tanto de la cimentación como de la superestructura de concreto armado ya que acarrearía costos de construcción bastante elevados, además de no ofrecer ningún tipo de beneficio adicional en comparación con las otras tres alternativas analizadas. La segunda razón es que durante la etapa de operación la chancadora semi-móvil no podría ser desplazada con facilidad ya que la estructura de concreto no se lo permitiría, restringiendo así su ubicación a un área determinada. La tercera razón es que en la etapa de cierre se generarían nuevamente altos costos debido a la necesaria demolición de la estructura para su cierre final.

La segunda opción analizada fue realizar el montaje de una estructura de acero predimensionado, esta opción fue descartada debido a las siguientes razones: la primera fue que durante la etapa de construcción necesitaría primero la ejecución de obras de concreto armado que sirvieran de soporte para la estructura, además que el montaje de la estructura en sí tomaría más tiempo ya que las labores electromecánicas requieren de mayor precisión y especialización de las personas que se encargan de ejecutar las tareas. La segunda razón fue que durante la etapa de operación el elevado costo de montaje y desmontaje de la estructura debería compensarse con el tiempo en el que la chancadora

se mantuviera en un área determinada para no acarrear sobrecostos (se recomienda que este tipo de estructuras permanezcan fijas por un periodo no menor a 5 años); además que de acuerdo al análisis realizado por CODELCO la construcción de nuevas cimentaciones y el montaje de la estructura podrían provocar una para temporal en la producción. La tercera razón es que en la etapa de cierre el inconveniente sería que además de realizar el desmontaje de la estructura, se tendría que demoler las cimentaciones de todas las ubicaciones que tuvo la chancadora primaria.

Para analizar la tercera y la cuarta alternativa es importante tener en claro el concepto de lo que es un muro de contención. Según Braja M. Das los muros de contención son estructuras que tienen como función principal soportar cargas laterales (a veces ocasionadas por el empuje del terreno) y sobrecargas transmitidas desde la parte superior del muro; éstos se clasifican en muros de gravedad, con contrafuertes, con anclas pasivas (todas de concreto armado) o pueden ser de suelo reforzado. Una vez definido esto, se analizaron otras dos alternativas que fueron las siguientes:

La tercera opción analizada fue la construcción de un muro pantalla de concreto armado, esta opción si bien es cierto que durante la etapa de operación y durante la etapa de cierre nos brindaba beneficios similares a los muros de suelo reforzado, se descartó debido a que, durante la etapa de construcción, la extensión de los anclajes desde la cara de la roca hasta la cara del muro de concreto imposibilitaría realizar los trabajos de relleno masivo de material controlado, ocasionando de manera general una afectación directa en el rendimiento de los trabajos ya que se debería tener mucho cuidado para no dañar los anclajes colocados.

Finalmente, el proyecto eligió el muro de suelo reforzado como alternativa para la colocación de la chancadora primaria, si analizamos esta alternativa elegida de la misma manera en la que se analizaron las tres anteriores tenemos las siguientes ventajas: en la etapa de construcción el proceso de ejecución que tiene este tipo de estructuras permitiría alcanzar mayores ratios de producción gracias a la disposición en forma de “lego” de la cara del muro y también gracias a que, a diferencia del muro de pantalla de concreto, se podía realizar trabajos masivos de relleno controlado. En la etapa de operación la ventaja ofrecida es que el muro de suelo reforzado no interfiere en el desplazamiento de la chancadora primaria ya que éste se encuentra a los costados de la misma, esta ventaja

es tal vez una de las más importantes debido a que por la misma naturaleza de la chancadora (semi – móvil) ésta podrá desplazarse en cualquier momento sin ninguna restricción. Finalmente, en la etapa de cierre, la demolición de la base de la chancadora será mínima a comparación de la primera y segunda alternativa, reduciendo en gran medida los costos de cierre.

Además de este análisis realizado, es importante mencionar los beneficios adicionales que nos ofrece el muro de suelo reforzado, entre los cuales tenemos que permite mejorar las características del terreno natural incrementando su capacidad portante, reducir los asentamientos diferenciales y, a diferencia de los muros de concreto armado, reduciendo también la posibilidad de licuefacción frente a un sismo. De manera adicional, al ser una estructura más flexible, posee un mejor comportamiento frente a las deformaciones.

Si realizamos un resumen de lo analizado anteriormente tenemos el siguiente análisis mostrado en la tabla 13.1:

Tabla 13.1: Análisis de los diferentes sistemas de instalación de una chancadora primaria (Elaboración propia)

ALTERNATIVA	CONSTRUCCIÓN	OPERACIÓN	CIERRE	TIPO DE CHANCADORA ÓPTIMA
Estructura de Concreto Armado	Elevados costos debido a los materiales que se utilizan.	Imposibilidad de desplazamiento de la chancadora.	Elevados costos por demolición de estructura.	Planta de chancado fija.
Estructura de Acero Predimensionado	Elevados costos debido al nivel de especialización que se requiere durante la construcción.	Dificultad de desplazamiento debido a los altos costos de montaje/desmontaje de la estructura metálica.	Elevados costos por demolición de cimentaciones y desmontaje de la estructura.	Planta de chancado semi - fija.
Muro Pantalla de Concreto Armado	Bajos ratios de rendimiento en la colocación del relleno.	Libre posibilidad de desplazamiento de la chancadora.	Altos costos de demolición de la pantalla de concreto armado.	Planta de chancado semi - móvil.
Muro de Suelo Reforzado	Bajos costos de construcción, elevados ratios de avance.	Libre posibilidad de desplazamiento de la chancadora.	Bajos costos de demolición de la cimentación.	Planta de chancado semi - móvil.

Por último, al realizar un análisis tanto de los presupuestos como de la evaluación del VAN y del CAE podemos concluir lo siguiente:

- El presupuesto de construcción del muro de suelo reforzado (US\$ 992,825.37) es significativamente menor al presupuesto de la estructura de concreto armado (US\$ 3'284,592.20) y de la estructura de acero predimensionado (US\$ 2'104,144.39), siendo cada uno de éstos 3.31 y 2.12 veces mayores al primero.
- Los presupuestos de mantenimiento mensual para cada una de estas tres alternativas nos dan como resultado que el costo de mantenimiento de la estructura de acero es menor que los costos de mantenimiento del muro de suelo reforzado, sin embargo, los costos de cierre del primero son bastante mayores en comparación con el segundo.
- Acerca de los costos de cierre, como ya se mencionó líneas arriba, los más elevados le corresponden a la estructura de acero, seguido por la estructura de concreto armado y cerrando con el muro de suelo reforzado. Esto se debe a las actividades relacionadas con el cierre de cada una de estas estructuras, los trabajos de desmontaje para la estructura de acero, la demolición para la estructura de concreto armado y el movimiento de tierras para el muro de suelo reforzado.
- Al analizar y comparar el VANC de las tres alternativas podemos observar que el VANC más rentable es definitivamente el del muro de suelo reforzado (US\$ -1'379,428.42), seguido por la estructura de acero (US\$ -2'481,571.62) y finalmente el menos rentable es el de concreto armado (US\$ -3'751,615.66).
- De la misma manera, analizando el CAE, se obtuvo que la decisión más rentable era la construcción del muro de suelo reforzado, dándonos un equivalente de inversión anual igual a US\$ 244,136.99.

Como conclusión final, y en base al fundamento teórico y a la evaluación económica realizada podemos afirmar que el mejor método de instalación de una chancadora primaria semi – móvil es a partir de la construcción de un muro de suelo reforzado. E incluso se mantendría como la opción más rentable si es que en un periodo de 10 años dicha chancadora tuviese que ser desplazada a una nueva ubicación y se tuviese que construir un nuevo muro de suelo reforzado (análisis realizado a partir de los presupuestos de construcción).

14. BIBLIOGRAFÍA

- Ambiente, M. d. (14 de Septiembre de 2018). *Instituto Geofísico del Perú*. Obtenido de Sub Dirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrósfera: <http://www.met.igp.gob.pe/clima/HTML/moquegua.html>
- Baca Urbina, D. (2013). *Evaluación de Proyectos*. México D.F: Mc Graw Hill.
- Ccori, C. H. (2002). Transporte de Mineral por Medio de Fajas Transportadoras en una Mina a Tajo Abierto. *Ciencia & Tecnología*, 4.
- Chain, N. S. (2005). *Criterios de Evaluación de Proyectos*. Mexico D.F: Mc Graw-Hill.
- CODELCO. (09 de Mayo de 2018). www.codelcoeduca.cl. Obtenido de www.codelcoeduca.cl: https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_lixivacion_procesochancado.asp
- Cornejo Walter, D. M. (2018). *Planeamiento Estratégico Southern Perú Copper Corporation*. Lima: PUCP.
- Darling, P. (2011). *SME Mining Engineering Handbook*. Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- Das, B. M. (2001). *Principio de ingeniería de cimentaciones*. México D.F: International Thomson.
- Dirección de Estudios y Políticas Públicas - CODELCO. (2015). *Caracterización de los costos de la gran minería del Cobre*. Santiago: CODELCO.
- Federal Highway Administration. (2009). *Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes*. Washington: U.S Department of Transportation.

- Fernández, A. V. (2001). *Manual de geosintéticos en la construcción de muros y terraplenes*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Figuerola, I. S. (2016). *Estudio de la estabilidad de muros ecológicos con geotextiles mediante métodos tenso - deformacionales*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Freyssinet Tierra Armada. (2015). *Manual de Instalación Terraplus y Terralink*. Lima: FTA Perú.
- Gala Soldevilla, F. (15 de Noviembre de 2017). Medidas de Rentabilidad. *Medidas de Rentabilidad de un Proyecto Minero*. Lima, Lima, Perú: PUCP.
- Guillermo, I. C. (2009). *Análisis de Costos y Presupuestos en el Planeamiento Estratégico Comercial*. Lima: Pacífico.
- Instituto Geológico y Minero de España. (1982). *Análisis de los costos que afectan la explotación minera como base para el desarrollo de las actividades técnico-empresariales del IGME*. Madrid: Ministerio de Industria y Energía.
- Instituto Tecnológico Minero de España. (1995). *Manual de arranque, carga y transporte en minería a cielo abierto*. Madrid: Ministerio de Industria, Comercio y Turismo de España.
- Izquierdo, R. S. (2014). *Mejoramiento de Suelos Arenosos Mediante el Uso de Columnas de Grava*. Lima: PUCP.
- Jae K. Shim, J. G. (2012). *Budgeting Basics and Beyond*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Koerner, R. (2012). *Designing with geosynthetics*. Xlibris Corp.
- Loli, M. A. (2010). *Estudio del Cálculo de Flota de Camiones para una Operación Minera a Tajo Abierto*. Lima: Repositorio PUCP.
- Macaferri. (2017). Construcciones con muro de suelo reforzado. *Perú Construye*, 44-49.
- Ministerio de Energía y Minas. (2016). *Tarifas Eléctricas en el Perú*. Lima: Ministerio de Energía y Minas.
- Mohammad Reza, F. M. (2011). *Review of the in-pit crushing and conveying (IPCC) system and its case study in copper industry*. Teherán: Reserchgate.

- Muñoz, M. D. (2013). El mercado del cobre a nivel mundial: Evolución, características y potencialidades futuras. *INGENIARE*, 248-261.
- Nieto, O. R. (2014). Nueva Visión de Costeo: All in Sustaining Cost, Growth y el Cash Cost. *GESTIÓN MINERA* (pág. 22). Lima: INSTITUTO DE INGENIEROS DE MINAS DEL PERÚ.
- Orihuela, G. T. (2006). *Tratado de Contabilidad de Costos por Sectores Económicos*. Lima: Gobi EIRL.
- Ortega, E. J. (2005). *Diseño y construcción de una trituradora de mandíbulas de excéntrica elevada*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Prime AE Group. (2011). *Spreadsheet Design of Mechanically Stabilized Earth Walls*. Pennsylvania: Pennsylvania Department of Transportation.
- Railways, G. o. (2005). *Concept and Design of Reinforced Earth Structures*. Lucknow: Geotechnical Engineering Directorate.
- Rivera, F. R. (2016). *Análisis y mejora de procesos en planta de producción de una empresa minera de concentrado de cobre*. Lima: PUCP.
- Runge, I. C. (1998). *Mining Economics and Strategy*. Colorado: SME.
- Sapag Chain, R. (2008). *Preparación y Evaluación de Proyectos*. Bogotá: McGraw Hill.
- Shukla, S. K. (2006). *Fundamentals of geosynthetic engineering*. Londres: Taylor & Francis.
- Smidt, H. B. (1977). *El presupuesto de bienes de capital*. Mexico DF: Fondo de Cultura Económica.
- Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. (2011). *Manual de Aplicación Práctica de las NIIF en el Sector Minero*. Lima: Grambs Corporación Gráfica.
- Society for Mining, Metallurgy and Exploration. (2009). *Surface Mining*. Colorado: SME.
- Southern Perú Copper Corporation. (2017). *Informe Anual 2017*. Lima.
- Thyssen Krupp. (2017). *Mineral Processing*. Ennigerloh: Thyssen Krupp Industrial Solutions.

White, D. M. (2010). *Engineering Design Manual*. Vancouver: Stoneterra .

Zúñiga, J. E. (2017). *Estudio comparativo de costos entre muros de contención por el método convencional y por el método del suelo reforzado con geomallas*. Huaraz: Universidad Nacional Santiago Antúñez de Mayolo.

