



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CONSTRUCTIBILIDAD
EN LA ETAPA DE INGENIERÍA EN LOS PROYECTOS
DE LA GRAN MINERÍA DEL COBRE EN CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

ALDO CRISTIAN QUINTEROS MEZA

PROFESOR GUÍA:
ADOLFO OCHOA LLANGATO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
EZEQUIEL CAMUS HAYDEN
SERGIO CELIS GUZMÁN

SANTIAGO DE CHILE
2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL
ALDO CRISTIAN QUINTEROS MEZA
FECHA: 2024
PROFESOR GUÍA: ADOLFO OCHOA LLANGATO

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CONSTRUCTIBILIDAD EN LA ETAPA DE INGENIERÍA EN LOS PROYECTOS DE LA GRAN MINERÍA DEL COBRE EN CHILE

En la actualidad, la minería del cobre se ve enfrentada a un escenario cada vez más competitivo en el mercado internacional, razón por la cual cuando se construye una nueva planta procesadora de cobre, se busca optimizar el proceso constructivo en costo y plazo. Esta tarea se hace cada vez más difícil debido a la tendencia actual en la que se incrementan tanto los costos de construcción como los costos de producción de cobre.

Ante este escenario resulta de interés actuar sobre las variables costo, plazo y seguridad durante el desarrollo de un proyecto para la minería del cobre. En la actualidad se utilizan diversas herramientas de gestión de proyectos entre las cuales se incorpora el análisis de constructibilidad en las etapas de ingeniería de un proyecto.

En este punto surge la motivación para realizar este trabajo, con el fin de mostrar las actividades propias del análisis de constructibilidad y las ventajas que aporta en el desarrollo de un proyecto en las etapas tempranas antes de la construcción. El presente trabajo de título se basa en mayor medida en la experiencia del autor quien ha trabajado por tres décadas vinculado al desarrollo de proyectos durante la ingeniería y la construcción de plantas de lixiviación y plantas concentradoras de cobre. En este trabajo se desarrollan los siguientes tópicos principales:

- a) Se proponen algunas líneas de acción para establecer una metodología de trabajo que permita desarrollar la constructibilidad en un proyecto.
- b) Se exponen cuatro ejemplos de proyectos reales en los que se han aplicado conceptos de constructibilidad y sus beneficios.
- c) Se muestra una visión general de la constructibilidad que va desde identificar obstáculos durante la ingeniería que afectarán a la construcción, establecer estrategias constructivas para implementar durante la construcción, hasta participar en la planificación integral de un proyecto completo con aportes en diferentes especialidades, no solo la construcción.

El presente trabajo pretende mostrar y con ello promover la aplicación del análisis de constructibilidad en cualquier proyecto de minería del cobre sea grande o pequeño, entendiendo que este análisis es aplicable y útil también para proyectos de otra naturaleza como puentes, carreteras, líneas eléctricas para transmisión de energía, obras hidráulicas y otros, con la expectativa de colaborar de forma integral para una mejor gestión de un proyecto. Finalmente se entregan recomendaciones útiles en base a la experiencia en diferentes etapas de un proyecto.

Agradecimientos

El primer agradecimiento es para mi profesor guía Don Adolfo Ochoa Llangato quien me contactó y abrió para mi la oportunidad de reincorporarme a la Universidad después de tantos años y me instó a tomar el desafío de titularme tarea que mantuve largamente postergada.

Mi agradecimiento a la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile que me formó académicamente y me llevó a forjar las herramientas con las que enfrentar no solo la vida laboral.

Mi más sentido y profundo agradecimiento a mi madre que en mi juventud fue un apoyo incondicional, que con sabiduría arrojó luz a lo largo del camino de mi vida y continuó haciéndolo hasta el final de sus días.

Mi agradecimiento al Dios Eterno, creador de todas las cosas, dador de la vida, que me ha acompañado a lo largo de mi vida.

Tabla de Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Motivación.....	2
2.	OBJETIVOS	4
2.1.	Objetivo general.....	4
2.2.	Objetivos específicos	4
3.	ANTECEDENTES GENERALES DE LA MINERÍA EN CHILE.....	5
3.1.	Breve reseña histórica de la minería del cobre en Chile	5
3.2.	Aporte de la minería del cobre a la economía nacional	7
3.3.	Principales yacimientos de cobre en Chile.....	8
3.3.1.	Principales yacimientos de Codelco.....	9
3.3.2.	Principales yacimientos de la minería privada	9
3.4.	Producción de cobre	10
3.4.1.	Producción de cobre Codelco	11
3.4.2.	Producción de cobre mineras privadas	14
3.4.3.	Producción de cobre a nivel nacional.....	16
4.	DESARROLLO DE UN PROYECTO DE MINERÍA DEL COBRE EN CHILE..	19
4.1.	General	19
4.2.	Gestión de proyectos y metodología FEL	20
4.3.	Metodología FEL aplicada a una planta procesadora de cobre	21
4.4.	Descripción de las fases de desarrollo del proyecto	23
4.4.1.	Estudio de perfil	24
4.4.2.	Estudio de prefactibilidad	25
4.4.3.	Estudio de factibilidad	26
4.4.4.	Ingeniería de detalle.....	28
4.4.5.	Construcción	29
4.4.6.	Puesta en marcha	31
5.	PLANTAS DE PROCESAMIENTO DEL MINERAL DE COBRE	33
5.1.	Mineral de cobre	33
5.2.	Descripción de una planta concentradora.....	35
5.2.1.	Chancado.....	37
5.2.2.	Molienda	39
5.2.3.	Flotación	41

5.2.4. Espesamiento	43
5.2.5. Filtrado	46
5.2.6. Secado	47
5.3. Descripción de una planta de lixiviación	47
5.3.1. Conminución	49
5.3.2. Aglomeración y curado	50
5.3.3. Lixiviación en pilas	50
5.3.4. Extracción por solventes	52
5.3.5. Electro obtención	53
6. CONSTRUCTIBILIDAD	54
6.1. Definiciones	54
6.2. Origen de la constructibilidad - Metodología Lean	55
6.3. Evolución de la metodología – Lean construction	57
6.4. Constructibilidad	58
6.5. Escenarios en que se aplica la constructibilidad	62
6.6. Aplicación de la constructibilidad en las distintas fases de un proyecto	62
6.6.1. Constructibilidad en la fase de prefactibilidad	62
6.6.2. Constructibilidad en la fase de factibilidad	66
6.6.3. Constructibilidad en la fase de ingeniería de detalles	71
6.7. Asignación del contratista para la ejecución	73
6.8. Criterios para el análisis de constructibilidad en la ingeniería de detalles	74
6.8.1. Revisión de completitud	74
6.8.2. Verificación de no duplicidad	75
6.8.3. Revisión en la frontera de los contratos	76
6.9. Clasificación, evaluación y ranking de los hallazgos	79
6.10. Breve discusión de las alternativas de solución	79
6.11. Identificación de actividades críticas	80
7. ANÁLISIS DE CONSTRUCTIBILIDAD EN PROYECTOS REALES	82
7.1. Proyectos green field (proyectos nuevos)	82
7.2. Proyectos brown field (proyectos en operación)	83
7.3. Proyectos black field	84
7.4. Análisis de constructibilidad en proyectos green field	85
7.4.1. Montaje de molino SAG	85
7.4.2. Construcción de caminos interiores de un proyecto	91

7.5.	Análisis de constructibilidad en proyectos brown field	95
7.5.1.	Montaje puente grúa	95
7.5.2.	Montaje cañería de reactivos (lechada de cal).....	109
7.6.	Montaje	118
7.6.1.	Maniobras de izaje	120
8.	CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES.....	127
8.1.	Participación de constructibilidad en otras disciplinas.....	128
8.2.	Otras tareas que desarrolla la constructibilidad durante la ingeniería.....	130
8.2.1.	Dimensionamiento de servicios para la construcción.....	130
8.2.2.	Gestión de los contratos de servicio	131
8.3.	Resumen del análisis de constructibilidad en los casos presentados	132
8.3.1.	Montaje molino SAG	132
8.3.2.	Caminos interiores	133
8.3.3.	Reemplazo de puente grúa	133
8.3.4.	Montaje de cañería de reactivos	134
8.4.	Objetivos específicos alcanzados	135
8.5.	Recomendaciones	135
9.	BIBLIOGRAFÍA	138

Índice de tablas

Tabla 1: Participación en proyectos de minería.....	3
Tabla 2: Aporte del cobre al PIB comparado con otras actividades económicas	8
Tabla 3: Yacimientos de Codelco.....	9
Tabla 4: Yacimientos minería privada	9
Tabla 5: Producción de cobre Codelco.....	11
Tabla 6: Producción de cobre minería privada	14
Tabla 7: Producción nacional de cobre	16
Tabla 8: Minerales de cobre	34
Tabla 9: Características de los puentes grúa	98
Tabla 10: Alternativas de ubicación grúa y de ingreso PG	100
Tabla 11: Ventajas y desventajas caso 1	101
Tabla 12: Ventajas y desventajas caso 2	102
Tabla 13: Ventajas y desventajas caso 3	103
Tabla 14: Ventajas y desventajas caso 4	103
Tabla 15: Tabla de carga grúa Liebherr LTM 1350/6.1	107
Tabla 16: Categorías de probabilidad	113
Tabla 17: Categorías de impacto	114
Tabla 18: Matriz de riesgo.....	115
Tabla 19: Actividades no productivas.....	137

Índice de figuras

Figura 1: Producción nacional de cobre desde 1900 a 1960.....	6
Figura 2: Aporte del cobre al PIB	8
Figura 3: Producción anual de cobre Codelco.....	13
Figura 4: Producción anual de cobre minería privada sobre 240 kTM	15
Figura 5: Producción anual de cobre minería privada entre 80 y 240 kTM	15
Figura 6: Producción anual de cobre minería privada bajo 80 kTM	15
Figura 7: Producción nacional de cobre	18
Figura 8: Ciclo de vida de un proyecto de minería del cobre.....	19
Figura 9: Metodología FEL.....	21
Figura 10: Metodología FEL aplicada a un proyecto de minería del cobre.....	22
Figura 11: Diagrama de proceso planta concentradora.....	36
Figura 12: Diagrama de proceso planta de lixiviación	48
Figura 13: Pila de lixiviación.....	51
Figura 14: Pond almacenamiento de PLS.....	51
Figura 15: Diagrama de proceso completo LIX-SX-EW	52
Figura 16: Áreas principales de una planta concentradora	67
Figura 17: Áreas principales de una planta de lixiviación	67
Figura 18: Maqueta para armar.....	77
Figura 19 Maqueta armada	78
Figura 20: Configuración existente	86
Figura 21: Configuración de proyecto	86
Figura 22: Secuencia de montaje - proyecto base	88
Figura 23: Secuencia constructiva propuesta.....	89
Figura 24: Riego con bischofita.....	92
Figura 25: Caminos tratados con bischofita	93
Figura 26: Molienda SAG - Vista frontis Noroeste.....	96
Figura 27: Molienda SAG - Vista en planta	96
Figura 28: Puente grúa en nave molienda SAG	96
Figura 29: Alternativas para emplazar grúa.....	99
Figura 30: Ingreso puente grúa por 2° vano.....	100

Figura 31: Layout de la maniobra (vista aérea)	105
Figura 32: Esquema de la maniobra	106
Figura 33: Grúa Liebherr LTM 1350/6.1	108
Figura 34: Cañería lechada de cal existente	109
Figura 35: Unión victaulic	109
Figura 36: Cañería existente y trazado propuesto en la etapa anterior	110
Figura 37: Interferencia - Línea eléctrica 13,8 kV.....	111
Figura 38: Interferencia - Ducto HDPE D=500 mm agua mina.....	111
Figura 39: Ubicación inicial trinchera – vista en corte	112
Figura 40: Nueva ubicación de la trinchera	117
Figura 41: Nueva ubicación de trinchera - vista en corte.....	117
Figura 42: Montaje de estructura - maniobra simétrica	122
Figura 43: Montaje de tolva camión minero - maniobra simétrica	122
Figura 44: Camión pluma al interior de edificio	123
Figura 45: Montaje a dos grúas.....	123
Figura 46: Maniobra con puente grúa	124
Figura 47: Montaje de alto tonelaje – base turbina.....	124

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos 30 años, el sector de la minería del cobre en Chile ha tenido un desarrollo muy significativo, dando origen a proyectos de gran envergadura tanto en el nivel de inversión (miles de millones de US\$), llegando a dotaciones peak de varios miles de personas en terreno y sin lugar a duda alcanzando un gran volumen de producción de cobre fino (cobre electrolítico) en plantas de lixiviación e importantes volúmenes de concentrado de cobre, cobre blister y cobre electro - refinado en plantas concentradoras de cobre, que superan los 5.000.000 (cinco millones) de toneladas métricas anuales de cobre a nivel nacional durante los últimos 20 años como se puede ver en los informes de producción de cobre oficiales de gobierno. (*Comisión Chilena del Cobre [Cochilco], 2024*).

Se estima que Chile posee reservas de cobre por 190 millones de toneladas que corresponde casi al 30% de los recursos cupríferos mundiales, es el país con más reservas de cobre a nivel mundial, le siguen Perú y Australia. (Statista Research Department, 2024)

Considerando además el cada vez más alto nivel de competitividad que existe entre los países productores de cobre en el concierto internacional; y que se verifican “ciclos” con tendencias al alza y a la baja en los precios del cobre a nivel internacional, ciclos que pueden durar intervalos de tiempo de varios meses, incluso años; y teniendo presente además que los costos de producción en general son crecientes, es decir, tienden a aumentar y en algunos casos se logran mantener aumentando la eficiencia del proceso e incorporando nuevas tecnologías, lo que significa un importante esfuerzo.

Por otro lado, también están presentes las exigencias medioambientales que se deben cumplir de acuerdo con la legislación vigente. Además, debe lograrse una buena relación con la comunidad cercana al proyecto, con la que se establecen acuerdos y compromisos que se deben cumplir. Todo lo anterior sin dejar de lado los aspectos de seguridad tanto durante la etapa de construcción como durante la operación de un proyecto de minería. Sobre la base de todo lo anterior resulta de interés indagar en cuanto a posibles medidas que permitan mejorar aspectos tales como:

- Disminuir los costos de construcción y los costos de operación de una planta para procesar mineral de cobre.
- Disminuir los efectos sobre el medio ambiente en aras de mantener un adecuado equilibrio ecológico y hacer viable el proyecto en términos de dar cumplimiento a las exigencias legales en materia de salud ocupacional y medio ambiente.

Y no menos importante, establecer metodologías constructivas que permitan establecer con mayor nivel de certidumbre el plazo de ejecución de las obras, que resguarden la seguridad de los trabajadores y de los bienes materiales (equipos y maquinaria) que intervienen durante el desarrollo de la construcción y durante la vida útil del proyecto.

Este objetivo tan amplio de disminuir los costos de construcción y de operación, dar cumplimiento a la normativa de medio ambiente, mantener buenas relaciones con la

comunidad y resguardar la seguridad de los equipos y muy especialmente a las personas que trabajen en el proyecto, tiene sin duda, muchas aristas.

El punto de vista en el que se enfoca el presente trabajo apunta a la “Constructibilidad”. Este trabajo pretende mostrar las bondades que ofrece el análisis de constructibilidad en el desarrollo de una planta procesadora de cobre y con eso contribuir a un mejor desempeño general del proyecto. La aplicación de un análisis de constructibilidad a un trabajo específico, en la mayoría de los casos arroja como resultado una disminución de los costos de construcción, un menor plazo de ejecución y en mayor o menor medida contribuye a mejorar el nivel de seguridad para las personas durante la construcción.

1.1. Motivación

El presente trabajo se basa en mayor medida en la experiencia personal que ha tenido el autor que durante los primeros 15 años de su vida laboral participó en la etapa de construcción en proyectos para la minería del cobre en Chile. Posteriormente durante los siguientes 15 años ha trabajado también en las etapas previas a la construcción tales como prefactibilidad, factibilidad e ingeniería de detalles, participando además en el proceso de planificación de la construcción y por cierto en la fase de construcción. Todo este proceso laboral ha motivado el interés de dar a conocer la importancia de la constructibilidad, actividad que en sus inicios no era muy conocida pero que actualmente tiene mayor importancia, al punto de considerarse como una disciplina más dentro de la ingeniería.

En consecuencia, está el interés de traspasar, en la medida de lo posible, la experiencia que existe actualmente en la industria en esta materia y traspasar la experiencia personal adquirida a lo largo de los años en el desarrollo de plantas para procesar el mineral de cobre. Con lo anterior se espera realizar un aporte que permita tener una comprensión integral de las distintas etapas de desarrollo por la que pasa un proyecto de minería del cobre, una visión objetiva de las tareas a desarrollar durante la ingeniería para desarrollar la constructibilidad y así enfrentar de mejor forma la etapa de construcción.

El autor del presente informe ha desarrollado actividades de planificación y análisis de constructibilidad durante las etapas previas a la construcción en el campo de la minería del cobre, participando en varios de los principales proyectos de minería del cobre en Chile tales como:

Tabla 1: Participación en proyectos de minería

Proyecto	Empresa	Dueño	Lugar	Tipo de proyecto	Cargo
Spence	Aker Solutions	BHP Billiton	Calama	Planta de lixiviación (Planta nueva)	Durante la ingeniería: (2004-2005) Superintendente de construcción Durante la construcción: (2005-2006) Superintendente del área Infraestructura
Esperanza (actualmente Centinela)	Aker Solutions	AMSA Antofagasta Minerals	Calama	Planta concentradora, concentrado y muelle (Planta nueva)	Durante la ingeniería: (2007) Superintendente de construcción
					Durante la construcción: (2008-2009) Superintendente del área Infraestructura
Antamina	Jacobs	BHP Billiton	Perú	Planta concentradora (Ampliación a 130 ktpd)	Durante la ingeniería: (2009-2010) Superintendente de construcción
					Durante la construcción: (2011) Superintendente de construcción & Líder de Tie ins
Collahuasi Fase III	SNC Lavalin	Anglo American Glencore Mitsui	Iquique	Planta concentradora (Ampliación a 450 ktpd)	Durante la ingeniería: (2012) Jefe de disciplina constructibilidad
Timna	SNC Lavalin	AHMSA Alto Hornos México	Israel	Planta de lixiviación (Planta nueva)	Durante la ingeniería: (2013-2014) Jefe de disciplina constructibilidad

Fuente: Elaboración propia

En este trabajo se presenta una visión de la constructibilidad, su aplicación en el desarrollo de proyectos para la minería del cobre y aportes producto de la experiencia en este campo.

En el desarrollo de este trabajo se analizarán casos reales, como:

- a) Montaje de molino SAG
- b) Construcción de caminos interiores de un proyecto
- c) Montaje Puente Grúa
- d) Montaje cañería de reactivos

Finalmente se entregarán recomendaciones para realizar un análisis de constructibilidad a un proyecto.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Mostrar las ventajas que tiene el hecho de introducir un análisis de constructibilidad en las fases tempranas previas a la construcción (prefactibilidad, factibilidad, ingeniería de detalles), sin perjuicio de su aplicación durante la etapa de construcción.

2.2. Objetivos específicos

- a) Entregar una visión amplia de la constructibilidad, más allá de la definición académica que se tiene de ella.
- b) Presentar y describir proyectos en que el autor ha aplicado el concepto de constructibilidad y los resultados obtenidos.
- c) Enlistar los aspectos claves de un proyecto de minería en Chile y analizar su transversabilidad, para determinar recomendaciones comunes a los proyectos en la minería asociados a plantas de lixiviación y a plantas concentradoras de cobre.
- d) Entregar recomendaciones para abordar la constructibilidad en proyectos para la minería del cobre en Chile.

3. ANTECEDENTES GENERALES DE LA MINERÍA EN CHILE

Con el fin de poner en perspectiva la importancia que tiene la minería del cobre en la industria a nivel nacional y su aporte en la economía del país, se presenta a continuación información general de referencia en relación a la producción de cobre en Chile.

3.1. Breve reseña histórica de la minería del cobre en Chile

La minería ha estado presente en la historia de nuestro país desde tiempos muy antiguos. Antes que los españoles llegaran al continente los indígenas ya utilizaban el mineral de cobre de la cordillera de los andes para fabricar herramientas y otros utensilios. Durante los primeros 200 años de la Conquista la explotación del cobre consistió en faenas pequeñas realizadas principalmente en el norte del país. (Cardemil, 2023, p3)

A fines del siglo XIX hubo un crecimiento importante en la minería debido al aumento de la demanda del cobre a nivel mundial a raíz de la aparición de la industria eléctrica con la fabricación de variados electrodomésticos y sistemas de iluminación eléctrica en las principales ciudades del mundo.

Sólo por nombrar un antecedente: Según Rincón Educativo (s.f.), a Thomas Edison se le atribuye la invención de la lámpara incandescente en octubre de 1879. Posteriormente, Edison continuó mejorando su diseño y en enero de 1880, obtuvo la patente estadounidense número 223.898 para su invento.

Con la implementación de la iluminación eléctrica en las principales ciudades del mundo se generó una importante demanda de cobre para fabricar los conductores eléctricos de la red de alumbrado, como también para los devanados de cobre en motores y generadores eléctricos.

A principios de 1900 Chile vivió su primer crecimiento de importancia cuando compañías estadounidenses realizaron importantes inversiones para explotar los yacimientos de Chuquicamata y Potrerillos en el norte de Chile y El Teniente en la ciudad de Rancagua.

De acuerdo con Memoria Chilena (2024), el desarrollo de la minería del cobre en Chile a principios del siglo pasado se puede resumir de la siguiente manera.

Chuquicamata y Potrerillos

1912: La empresa norteamericana “Chile Exploration Company” inició la explotación de Chuquicamata.

1916: La empresa “Andes Copper Mining” inició la explotación de Potrerillos.

1923: La empresa norteamericana “Anaconda Copper Company” compró el 51% del complejo minero de Chuquicamata en 77 millones de dólares, la transacción más grande realizada hasta ese entonces en Wall Street.

1929: La “Anaconda Copper Company” adquirió otra gran parte alcanzando el 98,41%.

1940: La “Anaconda Copper Company” alcanzó el 99,5% concluyendo la transacción.

El Teniente

1902: El ingeniero William Braden reconoció el mineral y compró los derechos de la pertenencia minera. Dos años después creó en Nueva York la “Braden Copper Company”.

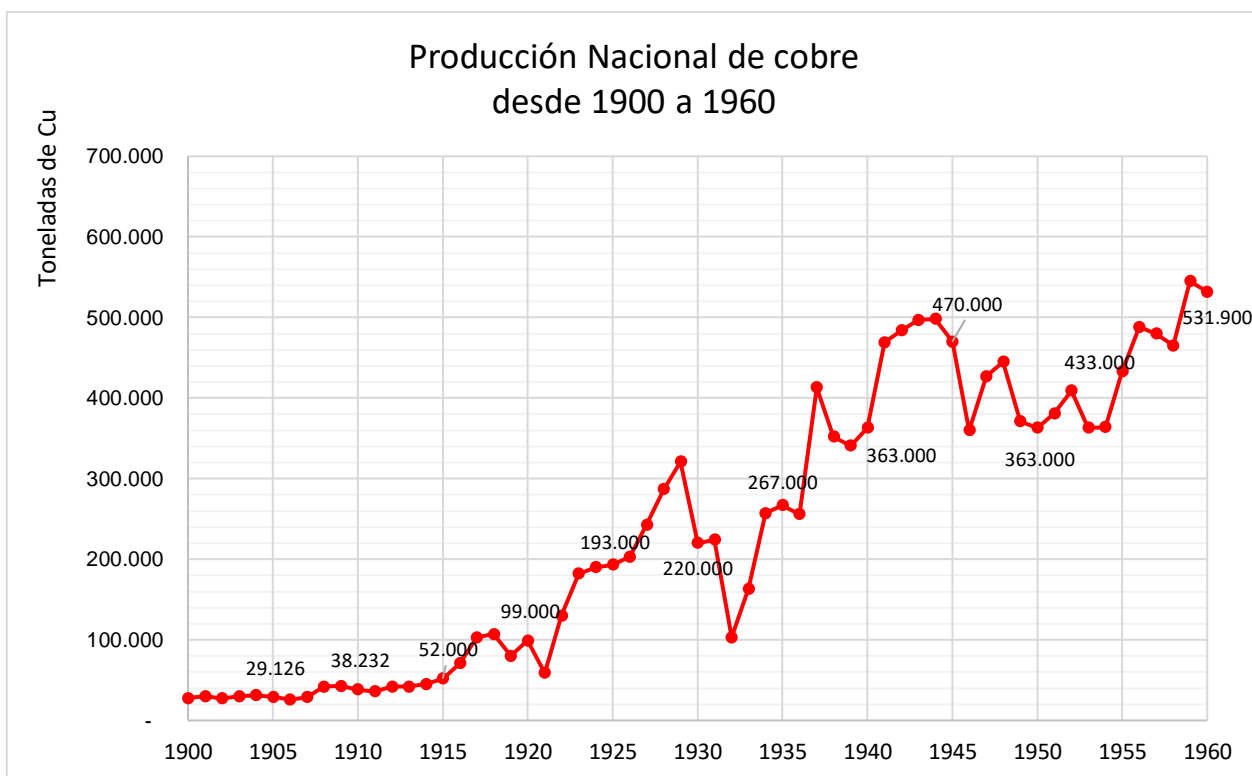
1905: Se iniciaron las obras para procesar el mineral del yacimiento.

1906: Se inició la explotación del yacimiento.

1916: La “Braden Copper Company” se transformó en filial de la recién creada “Kennecott Copper Company”.

La inversión extranjera en el rubro minero fue creciendo durante el siglo XX, con aportes provenientes de EEUU, Reino Unido, Francia, Alemania e Italia. De esa manera Chile consolidó su posición como uno de los principales productores de cobre en el mundo alrededor de la década de 1950.

Figura 1: Producción nacional de cobre desde 1900 a 1960



Fuente: Elaboración propia con datos tomados de Braun et al. *Economía Chilena 1810-1995. Estadísticas históricas* (Enero 2000, p.42-45).

Chilenización y nacionalización del cobre

En 1964 el gobierno de Eduardo Frei Montalva inició el proceso denominado "Chilenización del cobre". El cambio de propiedad se llevó a cabo mediante los llamados "Contratos ley", idea encabezada por el ministro de Minería de la época, Alejandro Hales.

El proceso continuó y se llegó a la "Nacionalización del cobre" durante el gobierno de Salvador Allende, a través de una reforma constitucional que fue aprobada por unanimidad en el parlamento en 1971.

En un comienzo las propiedades mineras fueron expropiadas y estatizadas para ser administradas individualmente por la Corporación de Fomento de la Producción (Corfo) creada en 1939, organismo del Estado Chileno encargado de impulsar la actividad productiva nacional.

En diciembre de 1975 se promulga el decreto ley N° 1290 que deroga los artículos 6° y 7° de la ley 17.483, sobre: "Adquisición y enajenación de determinadas pertenencias por la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) y la Corporación de Fomento de la Producción (Corfo).

En febrero de 1976, a través del decreto ley N° 1350 se creó la Corporación del Cobre (Codelco) que reemplazó a la Corfo en materia de minería del cobre.

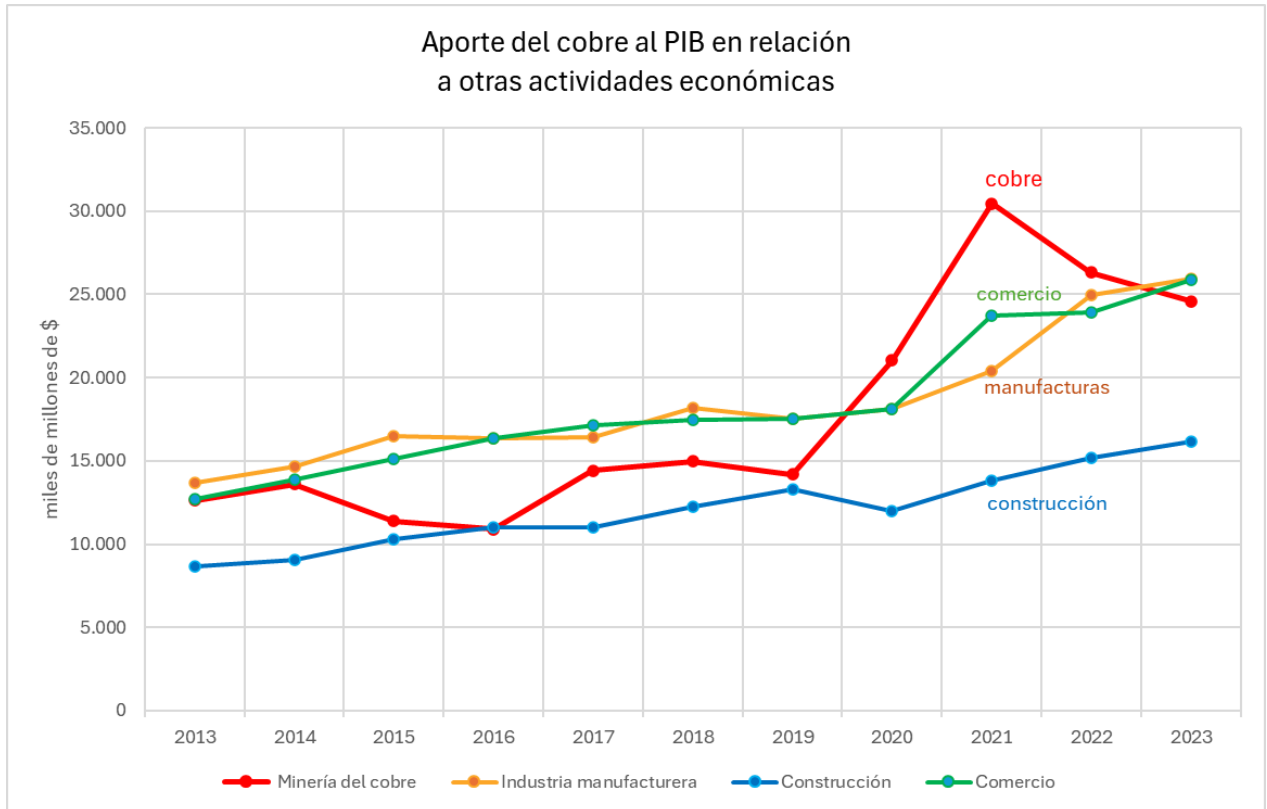
En síntesis, las modificaciones consisten en un sistema mixto de propiedad minera, que permite añadir capitales extranjeros a empresas mineras nacionalizadas.

En 1982 tras la promulgación de la Ley 18097: "Ley Orgánica Constitucional de Concesiones Mineras" el sector se abrió nuevamente a la inversión privada. Esta legislación permitió recibir inversión extranjera para realizar exploraciones y nuevas prospecciones mineras para desarrollar los yacimientos de cobre de la minería privada en Chile. (*Desnacionalización del cobre. 2024*).

3.2. Aporte de la minería del cobre a la economía nacional

Entre 1990 y 2000 el sector minero mostró un dinamismo sin precedentes, amparado por la abundancia de minerales, la estabilidad económica y social del país y reglas comerciales que propiciaron la llegada de nuevos y abundantes capitales de inversión extranjera. Es así como la industria minera del cobre ha jugado un rol protagónico configurando el escenario socioeconómico de Chile a lo largo de los años. Lo anterior se puede ver en algunas variables como el crecimiento del PIB, el crecimiento del empleo, el tipo de cambio, la inversión, los ingresos fiscales, las exportaciones, el saldo de la cuenta corriente, entre muchos otros. La minería del cobre en Chile representa un aporte de gran importancia al Producto Interno Bruto (PIB) del país. A modo ilustrativo se muestra el aporte de la industria del cobre al PIB del país en los últimos 10 años en comparación a otras actividades económicas.

Figura 2: Aporte del cobre al PIB



Fuente: Elaboración propia con datos tomados del informe “Producto interno bruto por clase de actividad económica”. Base de Datos Estadísticos. Banco Central (2024)

Tabla 2: Aporte del cobre al PIB comparado con otras actividades económicas

Producto interno bruto por clase de actividad económica, referencia 2018 (miles de millones de pesos)											
Actividad económica	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Minería del cobre	12.627	13.596	11.371	10.885	14.430	14.972	14.187	21.019	30.465	26.324	24.598
Industria manufacturera	13.710	14.677	16.495	16.380	16.427	18.194	17.537	18.106	20.424	24.994	25.949
Construcción	8.641	9.057	10.313	11.021	11.016	12.252	13.271	12.022	13.799	15.210	16.172
Comercio	12.728	13.850	15.106	16.356	17.136	17.494	17.508	18.146	23.691	23.934	25.904
PIB	137.309	147.951	158.623	168.765	179.315	189.435	195.532	201.258	239.562	263.843	281.870

Fuente: Elaboración propia con datos extraídos del informe “Producto interno bruto por clase de actividad económica”. Base de Datos Estadísticos. Banco Central (2024)

3.3. Principales yacimientos de cobre en Chile

En relación a los yacimientos de cobre en Chile, éstos se pueden clasificar en dos grandes grupos. Por un lado están los yacimientos de cobre que forman parte de la Corporación del Cobre (Codelco), que es una empresa 100% estatal. Por otra parte están las empresas privadas que explotan y administran yacimientos de cobre en el territorio nacional.

3.3.1. Principales yacimientos de Codelco

Tabla 3: Yacimientos de Codelco

Nombre	Ubicación	Región	Compañía	Inicio producción
El Teniente	Machalí	O'Higgins	Codelco	1905
Chuquicamata	Calama	Antofagasta	Codelco	1915
Salvador	Diego de Almagro	Atacama	Codelco	1959
Andina	Los Andes	Valparaíso	Codelco	1970
Radomiro Tomic	Calama	Antofagasta	Codelco	1997
Gabriela Mistral	Sierra Gorda	Antofagasta	Codelco	2008
Ministro Hales	Calama	Antofagasta	Codelco	2010

Fuente: Elaboración propia basada en informe Cochilco: Producción anual cobre de mina por empresa. (2024)

3.3.2. Principales yacimientos de la minería privada

Tabla 4: Yacimientos minería privada

Nombre	Ubicación	Región	Compañía	Inicio producción
Ojos del Salado	Tierra Amarilla	Atacama	Cía Minera Ojos del Salado	1929
Michilla	Mejillones	Antofagasta	Minera Michilla	1959
Escondida	Antofagasta	Antofagasta	Minera Escondida	1990
Candelaria	Tierra Amarilla	Atacama	Cía Minera Candelaria	1993
Cerro Colorado	Pozo Almonte	Tarapacá	BHP Billiton	1994
Quebrada Blanca	Pica	Tarapacá	Cía Minera Quebrada Blanca	1994
Zaldívar	Antofagasta	Antofagasta	Minera Zaldívar	1995
El Abra	Calama	Antofagasta	Sociedad Contractual Minera El Abra	1996
Carmen de Andacollo	Andacollo	Coquimbo	Cía Minera Teck Carmen de Andacollo	1996
Lomas Bayas	Sierra Gorda	Antofagasta	Glencore	1998

Tabla 4: Yacimientos minería privada (continuación)

Nombre	Ubicación	Región	Compañía	Inicio producción
Collahuasi	Pica	Tarapacá	Cía Minera Doña Inés de Collahuasi	1999
Los Pelambres	Salamanca	Coquimbo	Minera Los Pelambres	1999
Spence	Sierra Gorda	Antofagasta	BHP Billiton	2006
Franke	Taltal	Antofagasta	Franke SCM	2009
Punitaqui	Punitaqui	Coquimbo	Minera Altos de Punitaqui	2010
Centinela	Sierra Gorda	Antofagasta	Minera Centinela	2014
Caserones	Tierra Amarilla	Atacama	SCM Lumina Copper Chile	2014
Antucoya	María Elena	Antofagasta	Minera Antucoya	2015
Sierra Gorda	Sierra Gorda	Antofagasta	Sierra Gorda SCM	2015

Fuente: Elaboración propia basada en informe Cochilco: Producción anual cobre de mina por empresa. (2024)

3.4. Producción de cobre

En este acápite se muestra la información estadística que se tiene de la producción de cobre en el país.

3.4.1. Producción de cobre Codelco

Producción de cobre anual en yacimientos de Codelco desde 1960 hasta 2023.

Tabla 5: Producción de cobre Codelco

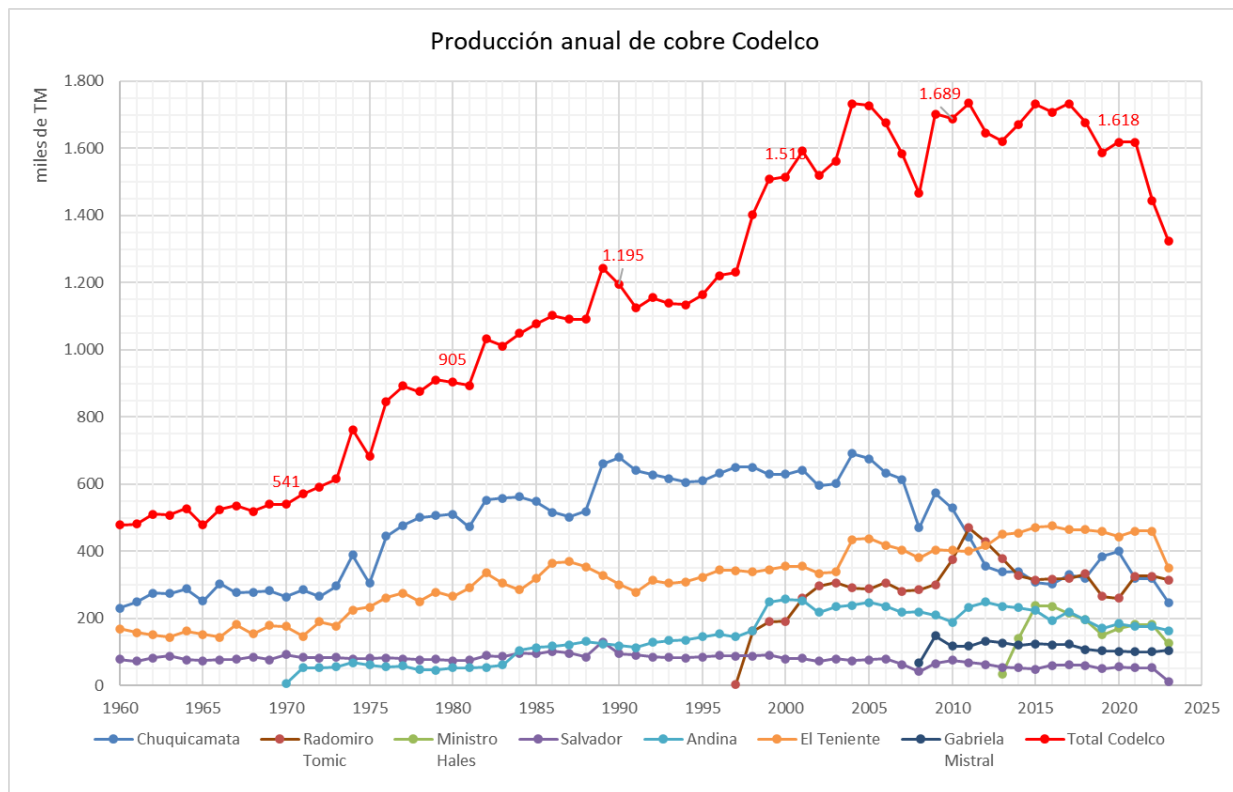
Producción de Cobre Codelco (miles de TM)								
año	Chuquicamata	Radomiro Tomic	Ministro Hales	Salvador	Andina	El Teniente	Gabriela Mistral	Total Codelco
1960	231			79		169		479
1961	250			73		159		481
1962	276			82		152		510
1963	275			88		144		507
1964	288			77		163		528
1965	253			74		152		479
1966	304			77		145		525
1967	277			78		182		536
1968	279			86		154		520
1969	283			77		180		540
1970	265			93	6	177		541
1971	286			85	54	147		571
1972	266			83	54	190		593
1973	297			84	56	178		615
1974	389			80	68	226		763
1975	305			81	62	234		682
1976	446			83	57	262		847
1977	478			81	59	276		893
1978	501			78	48	251		877
1979	507			78	47	278		910
1980	511			75	53	266		905
1981	472			77	53	292		894
1982	553			90	54	336		1.033
1983	559			87	61	305		1.012
1984	563			96	105	285		1.050
1985	549			95	113	319		1.077
1986	516			103	118	365		1.102
1987	503			97	122	369		1.091
1988	519			86	132	354		1.091
1989	660			130	124	329		1.243

Tabla 5: Producción de cobre Codelco (Continuación)

Producción de Cobre Codelco (miles de TM)								
año	Chuquicamata	Radomiro Tomic	Ministro Hales	Salvador	Andina	El Teniente	Gabriela Mistral	Total Codelco
1990	681			95	119	301		1.195
1991	641			91	114	279		1.126
1992	628			85	129	314		1.156
1993	617			84	134	305		1.139
1994	606			83	136	309		1.134
1995	610			86	146	323		1.165
1996	632			90	154	345		1.221
1997	650	4		88	146	343		1.231
1998	650	162		88	164	339		1.403
1999	630	190		92	249	346		1.508
2000	630	191		81	258	356		1.516
2001	642	260		81	253	356		1.592
2002	597	297		73	219	334		1.520
2003	601	306		80	236	339		1.563
2004	692	291		75	240	436		1.733
2005	676	289		78	248	437		1.728
2006	634	307		81	236	418		1.676
2007	615	281		64	218	405		1.583
2008	470	285		43	220	381	68	1.466
2009	574	301		66	210	404	148	1.702
2010	528	375		76	189	404	117	1.689
2011	443	470		69	234	400	118	1.735
2012	356	428		63	250	417	133	1.647
2013	339	380	34	54	237	450	128	1.622
2014	340	327	141	54	232	456	121	1.672
2015	309	316	238	49	224	471	125	1.732
2016	302	318	237	60	193	475	122	1.708
2017	331	319	215	62	220	464	123	1.734
2018	321	333	196	61	196	465	107	1.678
2019	385	266	152	51	170	460	104	1.588
2020	401	261	171	56	185	443	102	1.618
2021	319	326	182	53	177	460	101	1.618
2022	319	326	182	53	177	460	101	1.446
2023	248	315	126	13	165	352	106	1.325

Fuente: Elaboración propia. Transcripción de datos a partir de informe Cochilco: Producción anual cobre de mina por empresa. (2024)

Figura 3: Producción anual de cobre Codelco



Fuente: Elaboración propia basada en informe Cochilco: Producción anual cobre de mina por empresa. (2024)

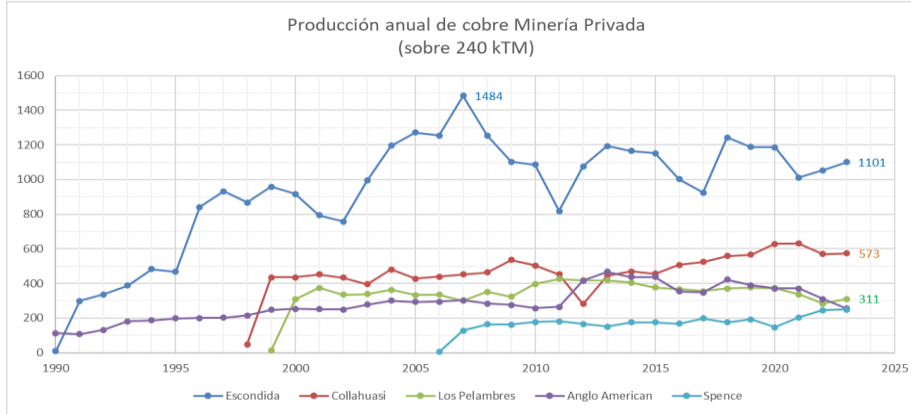
3.4.2. Producción de cobre mineras privadas

Tabla 6: Producción de cobre minería privada

Producción Chilena de Cobre Minería Privada (miles de TM)																					
año	Escondida	Collahuasi	Los Pelambres	Anglo American	El Abra	Candelaria	Mantos Copper	Zaldívar	Cerro Colorado	Centinela (Oxidos)	Quebrada Blanca	Lomas Bayas	Michilla	Spence	Centinela (Sulfuros)	Caserones	Sierra Gorda	Antucoya	Andacollo	Otros	Total Privadas
1.990	9	-	-	112	-	-	73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200	393
1.991	298	-	-	107	-	-	79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	205	689
1.992	336	-	-	132	-	-	69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	239	776
1.993	389	-	-	181	-	-	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	271	916
1.994	484	-	-	188	-	31	78	-	21	-	7	-	27	-	-	-	-	-	-	251	1.086
1.995	467	-	-	199	-	150	76	22	36	-	46	-	56	-	-	-	-	-	-	271	1.324
1.996	841	-	-	201	51	137	122	78	59	-	68	-	63	-	-	-	-	-	-	275	1.895
1.997	933	-	-	202	194	156	133	96	60	-	67	-	63	-	-	-	-	-	-	257	2.161
1.998	868	48	-	216	199	215	138	135	75	-	71	19	62	-	-	-	-	-	-	238	2.284
1.999	959	435	12	248	220	227	152	150	100	-	73	45	61	-	-	-	-	-	-	202	2.884
2.000	917	436	309	254	197	204	155	148	119	-	69	51	52	-	-	-	-	-	-	176	3.086
2.001	794	453	374	252	218	221	157	140	134	43	75	56	50	-	-	-	-	-	-	182	3.147
2.002	758	434	336	250	225	199	153	148	128	84	74	59	52	-	-	-	-	-	-	161	3.061
2.003	995	395	338	278	227	213	147	151	132	92	80	60	53	-	-	-	-	-	-	183	3.342
2.004	1.195	481	363	301	218	200	155	148	120	98	76	62	50	-	-	-	-	-	-	214	3.679
2.005	1.272	427	334	294	211	163	150	123	90	98	81	63	46	-	-	-	-	-	-	241	3.593
2.006	1.256	440	335	295	219	170	152	146	116	94	82	64	47	4	-	-	-	-	-	265	3.685
2.007	1.484	452	300	302	166	181	152	143	99	93	83	62	45	128	-	-	-	-	-	285	3.974
2.008	1.254	464	351	284	166	174	149	134	104	91	85	59	48	165	-	-	-	-	-	334	3.861
2.009	1.104	536	323	277	164	134	152	137	94	90	87	73	41	162	-	-	-	-	-	319	3.692
2.010	1.087	504	398	258	145	136	140	144	89	95	86	72	41	178	-	-	-	-	-	356	3.730
2.011	818	453	426	264	123	148	131	132	94	97	63	74	42	181	97	-	-	-	-	384	3.528
2.012	1.076	282	418	417	154	123	115	131	73	105	62	73	38	167	173	-	-	-	-	381	3.787
2.013	1.194	445	419	467	156	168	111	127	74	103	56	74	38	152	177	16	-	-	-	378	4.154
2.014	1.165	470	405	437	166	135	104	101	80	94	48	66	47	176	181	45	13	-	-	357	4.089
2.015	1.153	455	376	438	147	150	106	103	74	76	39	71	29	176	145	75	88	12	73	254	4.040
2.016	1.002	507	368	354	100	135	99	103	74	56	35	80	0	167	180	117	98	66	73	230	3.845
2.017	925	524	356	349	78	150	88	103	66	65	23	78	0	199	164	123	102	81	76	220	3.770
2.018	1.243	559	371	422	91	102	84	95	66	93	26	73	0	176	155	137	102	72	67	222	4.154
2.019	1.188	565	376	389	82	111	86	116	72	81	21	79	13	193	196	146	114	72	54	246	4.199
2.020	1.187	629	372	371	72	95	79	97	69	93	13	74	20	147	154	126	156	79	57	226	4.115
2.021	1.011	630	336	370	73	119	95	87	57	89	12	64	21	203	185	110	198	79	45	222	4.005
2.022	1.054	571	284	311	92	126	98	89	51	98	10	72	16	245	149	124	173	79	39	202	3.885
2.023	1.101	573	311	255	98	131	86	81	35	79	64	66	19	249	163	137	150	78	40	210	3.926

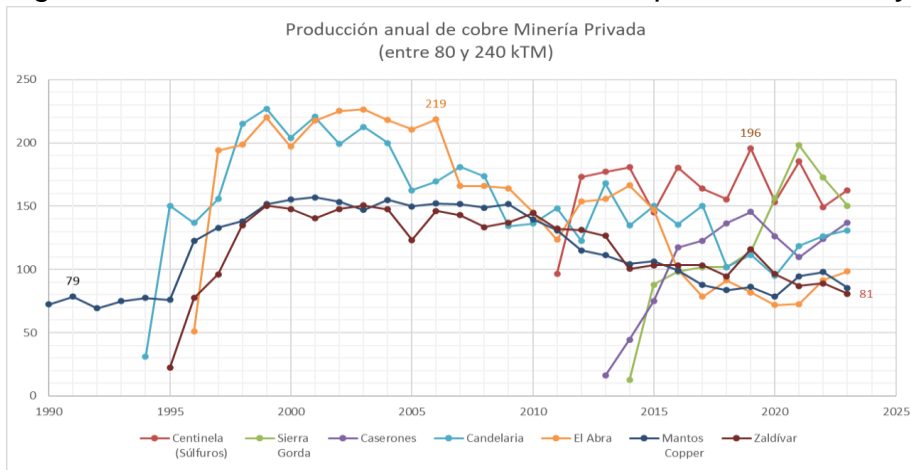
Fuente: Elaboración propia. Transcripción de datos a partir de informe Cochilco: Producción anual cobre de mina por empresa. (2024)

Figura 4: Producción anual de cobre minería privada sobre 240 kTM



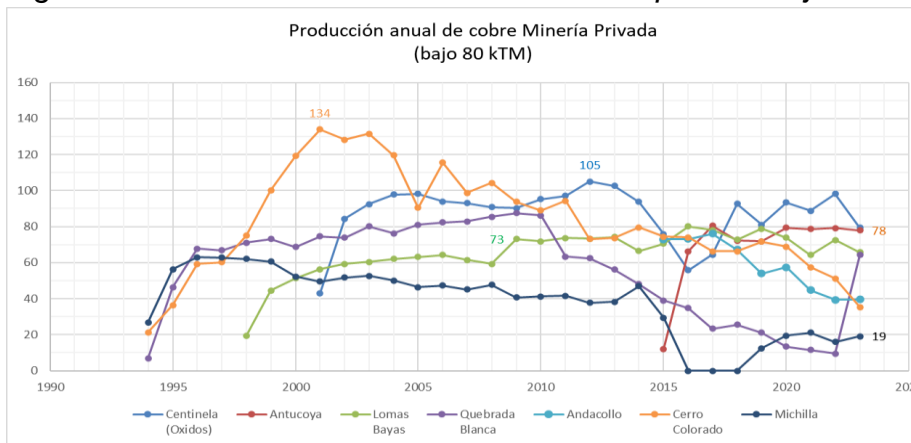
Fuente: Elaboración propia basada en informe Cochilco: Producción anual cobre de mina por empresa. (2024)

Figura 5: Producción anual de cobre minería privada entre 80 y 240 kTM



Fuente: Elaboración propia basada en informe Cochilco: Producción anual cobre de mina por empresa. (2024)

Figura 6: Producción anual de cobre minería privada bajo 80 kTM



Fuente: Elaboración propia basada en informe Cochilco: Producción anual cobre de mina por empresa. (2024)

3.4.3. Producción de cobre a nivel nacional

Tabla 7: Producción nacional de cobre

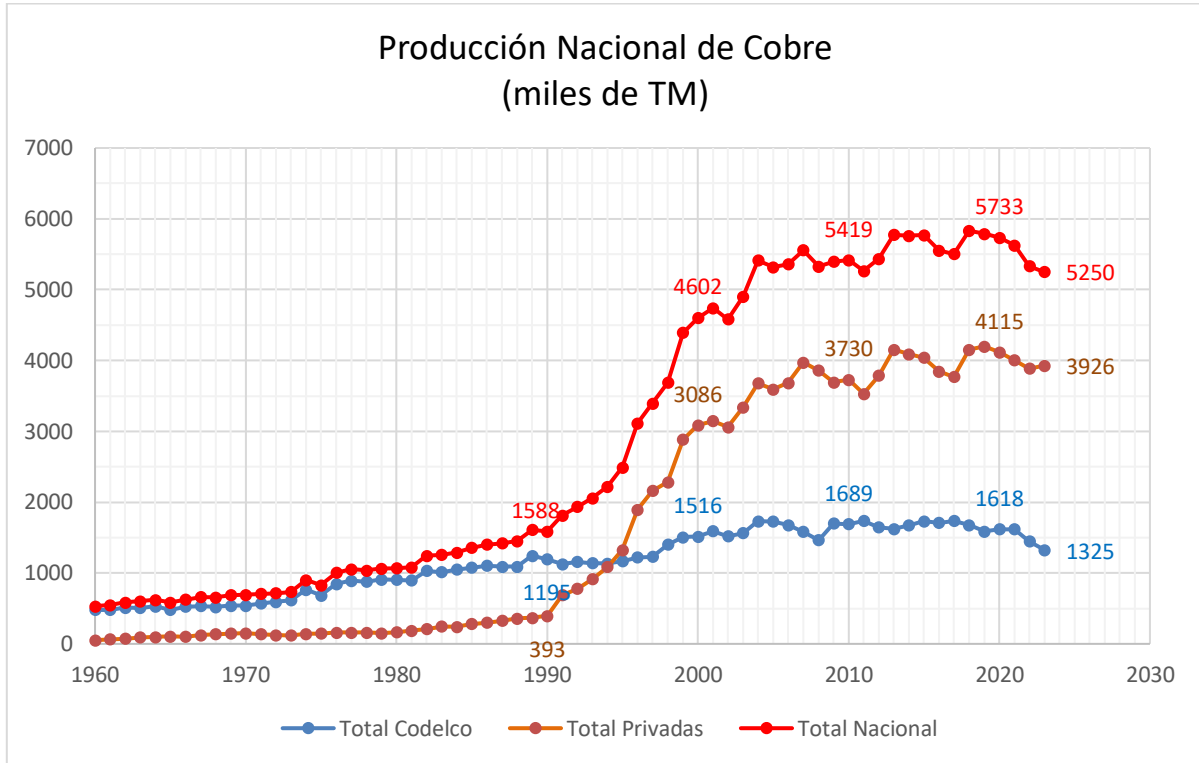
Producción nacional de Cobre (miles de TM)			
año	Total Codelco	Total Privadas	Total Nacional
1960	479	53	532
1961	481	65	546
1962	510	76	586
1963	507	94	601
1964	528	95	622
1965	479	105	585
1966	525	101	625
1967	536	124	660
1968	520	137	657
1969	540	148	688
1970	541	151	692
1971	571	137	708
1972	593	124	717
1973	615	120	735
1974	763	139	902
1975	682	146	828
1976	847	158	1005
1977	893	162	1054
1978	877	158	1034
1979	910	153	1063
1980	905	163	1068
1981	894	188	1081
1982	1033	209	1242
1983	1012	245	1258
1984	1050	241	1291
1985	1077	280	1356
1986	1102	299	1401
1987	1091	328	1418
1988	1091	360	1451
1989	1243	366	1609

Tabla 7 Producción nacional de cobre (continuación)

Producción total de cobre (miles de TM)			
año	Total Codelco	Total Privadas	Total Nacional
1990	1195	393	1588
1991	1126	689	1814
1992	1156	776	1933
1993	1139	916	2055
1994	1134	1086	2220
1995	1165	1324	2489
1996	1221	1895	3116
1997	1231	2161	3392
1998	1403	2284	3687
1999	1508	2884	4391
2000	1516	3086	4602
2001	1592	3147	4739
2002	1520	3061	4581
2003	1563	3342	4904
2004	1733	3679	5413
2005	1728	3593	5321
2006	1676	3685	5361
2007	1583	3974	5557
2008	1466	3861	5328
2009	1702	3692	5394
2010	1689	3730	5419
2011	1735	3528	5263
2012	1647	3787	5434
2013	1622	4154	5776
2014	1672	4089	5761
2015	1732	4040	5772
2016	1708	3845	5553
2017	1734	3770	5504
2018	1678	4154	5832
2019	1588	4199	5787
2020	1618	4115	5733
2021	1618	4005	5624
2022	1446	3885	5330
2023	1325	3926	5250

Fuente: Elaboración propia. Transcripción de datos a partir de informe Cochilco: Producción anual cobre de mina por empresa. (2024)

Figura 7: Producción nacional de cobre



Fuente: Elaboración propia basada en informe Cochilco:
Producción anual cobre de mina por empresa. (2024)

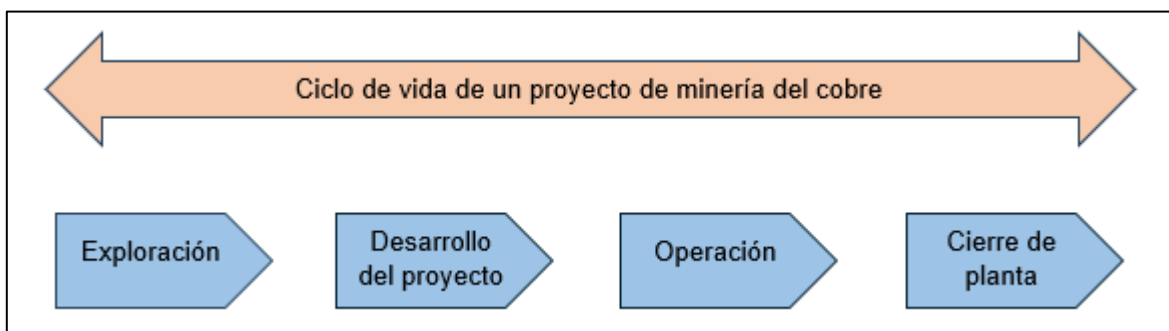
4. DESARROLLO DE UN PROYECTO DE MINERÍA DEL COBRE EN CHILE

4.1. General

Para la realización completa de un proyecto de minería del cobre en Chile se deben desarrollar cuatro etapas, comenzando con la exploración inicial, pasando por desarrollo del proyecto, la operación y finalmente el cierre de la planta. Según Morales, A. L. y Hantke, M. “*Guía metodológica de cierre de minas*” 2020. pp 37,40), las etapas típicas de un proyecto de minería del cobre a lo largo de su vida útil son:

- a) Exploración: Consiste en la identificación y evaluación de yacimientos de cobre. Incluye actividades como la prospección geológica, perforación de exploración, estudios geofísicos y metalúrgicos para determinar si el yacimiento es viable.
- b) Desarrollo del proyecto: Una vez identificado un yacimiento y se ha establecido que es viable prosigue el desarrollo del proyecto propiamente tal que tiene varias fases que se enunciarán a continuación que son materia esencial del presente trabajo.
- c) Operación: Corresponde a la explotación del mineral de cobre del yacimiento y su procesamiento hasta obtener cobre en forma de concentrado de cobre, cobre blister o cátodos de cobre de alta pureza, dependiendo del tipo de mineral y del procesamiento que se aplique. Esta etapa de operación se extiende durante toda la vida útil del yacimiento.
- d) Cierre de la planta y mina: Al finalizar la vida útil de la mina, se realiza el cierre que incluye el desmantelamiento de las instalaciones y la restitución del sitio del proyecto para reducir el impacto ambiental y permitir el uso futuro del terreno.

Figura 8: Ciclo de vida de un proyecto de minería del cobre



Fuente: Elaboración propia basado en Morales y Hantke (2020)

El presente trabajo de título se enmarca en la etapa de “desarrollo del proyecto” indicada anteriormente de una planta procesadora de cobre.

4.2. Gestión de proyectos y metodología FEL

La realización de grandes proyectos ya sean de infraestructura, proyectos para la minería, petróleo, gas o proyectos de energía implican grandes inversiones, grandes riesgos y un nivel importante de incertidumbre durante su desarrollo. Para enfrentar este tipo de proyectos se desarrolló la metodología FEL “Front-End Loading (FEL)”

La publicación “*Metodología FEL*” obtenida del sitio Scribd señala que: Según algunos autores, esta metodología (FEL) fue desarrollada por la compañía Dupont hace unos 20 años; otros mencionan que fue el Independent Project Analysis Institute. Lo que es claro es que existen variaciones de la misma, dependiendo de las compañías que lo adoptaron adecuándolo a sus propias necesidades y cultura de negocios. La metodología FEL es una herramienta para los negocios, que provee un mecanismo que ayuda a las compañías a seleccionar y jerarquizar diferentes oportunidades de proyecto a través de un proceso sistemático, riguroso y analítico

Por su parte, el “Construction Industry Institute [CII]” denomina a la metodología FEL como Front-End Planning (FEP) y la define como el proceso de desarrollo de suficiente información estratégica que permita definir los riesgos del proyecto y decidir cómo asignar los recursos para maximizar las posibilidades de éxito del proyecto.

Según Ingenieros Top en su artículo *¿Qué es la metodología Front-End Loading (FEL) para el desarrollo de grandes proyectos de infraestructura?*. La metodología FEL se sustenta en el siguiente enfoque:

“Desarrollar el proyecto por fases y evaluar cada fase antes de pasar a la siguiente”.

En el desarrollo típico de la metodología FEL se definen 3 fases principales.

Sin embargo, dependiendo del tipo de proyecto (infraestructura, minería, petróleo, etc.), el alcance de lo que se debe desarrollar en cada fase no es del todo común. Esto dio origen a que algunas instituciones y empresas han desarrollado su propia versión de la metodología FEL, pero todas ellas persiguen el mismo fin de tener un grado de certidumbre suficiente antes de pasar a la siguiente etapa y muy especialmente antes de realizar la inversión principal en la construcción.

Se indican a continuación los alcances más usuales de cada una de las 3 fases de la metodología FEL:

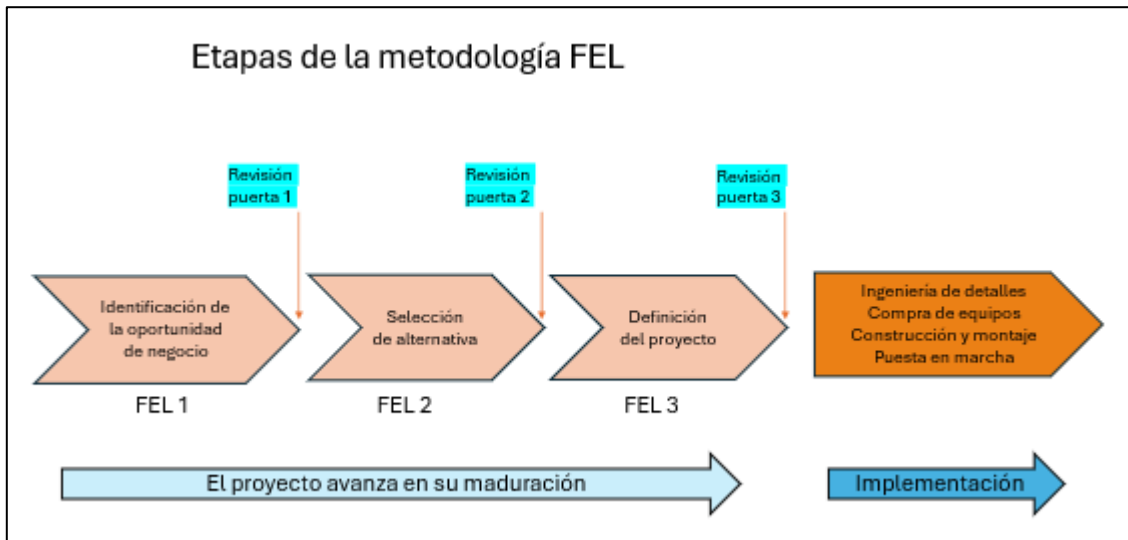
FEL 1: En esta fase se identifica una oportunidad de negocio, la que debe ser sustentada técnica y económicamente.

FEL 2: En esta fase se identifican las alternativas posibles que permitan aprovechar la oportunidad de negocio de la fase anterior. Cada alternativa identificada en esta fase corresponde a una solución posible de implementar y como tal, constituye una propuesta de solución. Todas las soluciones propuestas se evalúan y compiten entre sí para seleccionar la alternativa más conveniente. La alternativa seleccionada avanza para su

desarrollo conceptual. En esta fase se desarrolla la ingeniería conceptual del proyecto, una primera estimación de costos y un cronograma inicial.

FEL 3: En esta fase se desarrolla la ingeniería básica del proyecto, el plan de ejecución del proyecto, se evalúa el presupuesto y el cronograma del proyecto. El presupuesto y cronograma en esta etapa tienen un margen pequeño de error.

Figura 9: Metodología FEL



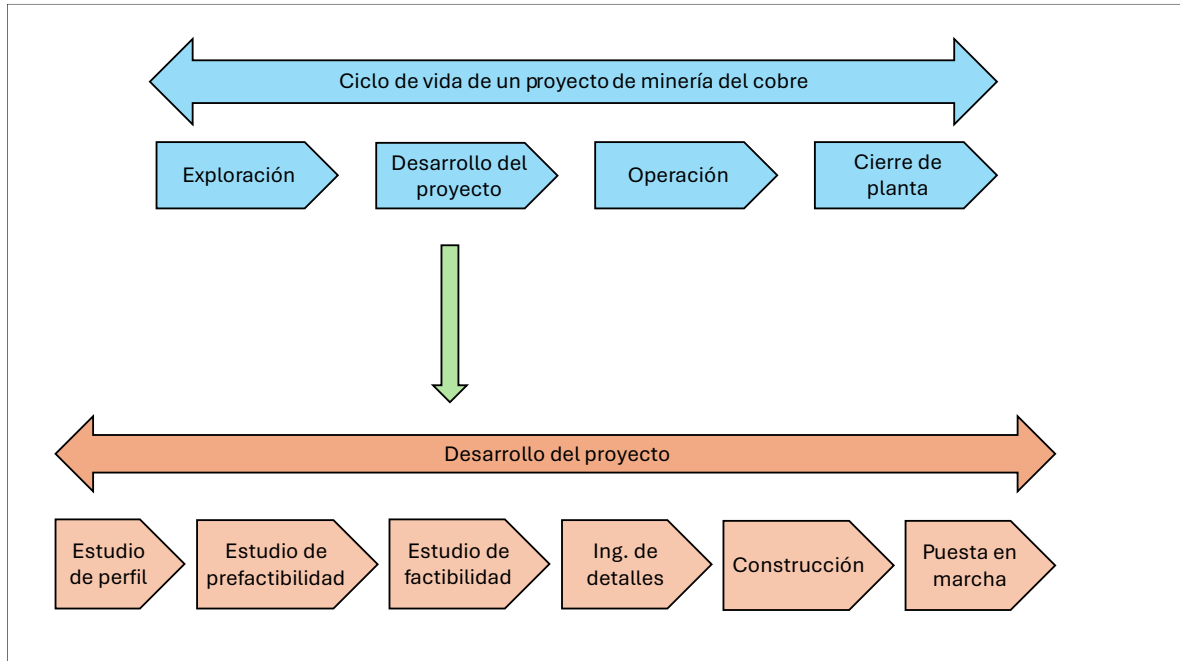
Fuente: Adaptado de Ingenieros Top. ¿Qué es la metodología Front-End Loading (FEL) para el desarrollo de grandes proyectos de infraestructura? (s.f.).

Los nombres y los alcances específicos de cada fase pueden variar según el tipo de proyecto (infraestructura, minería, petróleo, energía) y la empresa u organización que va a implementar la metodología.

4.3. Metodología FEL aplicada a una planta procesadora de cobre

La metodología FEL aplicada al desarrollo de un proyecto de minería, específicamente una planta procesadora de cobre, toma la siguiente estructura:

Figura 10: Metodología FEL aplicada a un proyecto de minería del cobre



Fuente: Elaboración propia basada en esquemas anteriores

El aspecto clave de la metodología FEL es la revisión estructurada que se realiza al término de cada fase antes de pasar a la siguiente. Los revisores al final de cada fase son especialistas de las distintas áreas del proyecto, ellos emiten su calificación y los comentarios correspondientes. Un comité con autoridad en la organización toma la decisión al término de cada fase del proyecto.

Se pueden esperar cuatro tipos de resultados en la evaluación de cada fase:

Aprobación: El proyecto pasa a la fase siguiente

Cancelación: El proyecto se detiene, no avanza a la fase siguiente

Reevaluación: El proyecto debe ser revisado y se deben corregir determinados aspectos específicos para posteriormente ser nuevamente evaluado

Diferir: En este caso el proyecto cumple satisfactoriamente las exigencias de la etapa que acaba de concluir, pero no pasa a la etapa siguiente porque hay impedimentos (de otra índole) y no es posible avanzar a la etapa siguiente inmediatamente, quedando en compás de espera para avanzar a la siguiente etapa en el futuro.

Con la aprobación de la fase evaluada se inicia el desarrollo de la siguiente fase.

La metodología FEL es ampliamente usada en el sector minero y energético. Un ejemplo de esto se tiene en Codelco que aplica sistemáticamente esta metodología para el desarrollo de sus proyectos. La metodología FEL es una buena herramienta de gestión en la dirección de proyectos porque facilita una buena maduración y definición del proyecto antes de realizar la inversión más relevante del proyecto que es la construcción.

Cuando el proyecto ha atravesado las primeras tres fases, es decir el estudio de factibilidad ha concluido de manera exitosa, se considera que está suficientemente maduro para su implementación y se autoriza la siguiente etapa para desarrollar la ingeniería de detalles, la gestión de compra de todos los equipos principales (procurement) de la planta, la construcción y montaje para finalmente realizar la puesta en marcha y entrega al cliente final.

Las fases a desarrollar son: estudio de perfil, estudio de prefactibilidad, estudio de factibilidad, ingeniería de detalles, construcción y puesta en marcha.

Estas fases se llevan a cabo de manera secuencial y tiene por objetivo evaluar la viabilidad del proyecto, planificar la operación (definir los procesos productivos), diseñar la planta y finalmente ejecutar la construcción y puesta en marcha de la misma.

A continuación, se da una descripción general de cada una de estas fases:

4.4. Descripción de las fases de desarrollo del proyecto

Estudio de Perfil: En esta fase inicial, se realiza una evaluación preliminar del proyecto con el fin de identificar si existe potencial de negocio.

Se suelen llevar a cabo estudios geológicos, geotécnicos y de viabilidad económica preliminar. Si los estudios preliminares muestran que el negocio es técnicamente viable y económicamente rentable se avanza a la siguiente fase.

En esta fase no se realizan estudios de constructibilidad.

Estudio de Prefactibilidad: En esta fase, se profundiza en la evaluación técnica, económica y ambiental del proyecto. Se realizan estudios más detallados, como muestreo de minerales, pruebas metalúrgicas y estudios de impacto ambiental preliminares.

Se inicia la definición de la infraestructura necesaria para el proyecto.

El objetivo es establecer que el proyecto es viable desde el punto de vista técnico y que es rentable en términos económicos.

Estudio de Factibilidad: En esta fase se realiza un estudio aún más detallado y exhaustivo del proyecto.

Se desarrolla un plan de negocio completo que incluye un análisis financiero detallado, planificación de infraestructura, estudios de impacto ambiental completos y definición de la estrategia de desarrollo.

En esta fase se realiza la ingeniería básica, se crea el plan de ejecución del proyecto y se obtiene una estimación final de las inversiones.

Al final de esta etapa, se espera tener una comprensión clara y detallada de la viabilidad técnica y una valoración confiable de la rentabilidad del proyecto.

Ingeniería de Detalles: Una vez que se ha establecido la viabilidad del proyecto y se han asegurado los financiamientos necesarios, se procede a la fase de ingeniería de detalles. Aquí, se elaboran planos y diseños específicos para la construcción de la planta de procesamiento, la infraestructura y otros componentes del proyecto.

Se desarrolla el Plan de Ejecución del Proyecto (PEP) en forma detallada.

Construcción: Durante esta etapa, se llevan a cabo todas las actividades necesarias para construir las instalaciones del proyecto, tanto en la mina como en la planta.

Esto incluye la construcción de toda la infraestructura necesaria, la instalación de equipos, la construcción y montaje de la planta de proceso, la construcción de caminos y sistemas de transporte, el suministro de agua y suministro de energía.

Puesta en Marcha (PEM): Una vez que la construcción ha finalizado, se inicia la fase de puesta en marcha. En esta etapa, se verifica que todas las instalaciones y equipos funcionen correctamente y se realizan los ajustes que resulten necesarios.

Se realizan pruebas de producción y se capacita al personal.

La operación comercial de la mina comienza gradualmente.

Cada etapa define determinadas tareas que se deben efectuar y el nivel de detalle al que se debe llegar en cada tarea. Al finalizar una fase (cualquiera) se verifica la completitud de las tareas desarrolladas y que las tareas estén desarrolladas con el nivel de detalle requerido. Así, en la medida que se logran los objetivos establecidos en cada fase, se autoriza pasar a la fase siguiente. Consecuentemente con lo anterior, cuando se observa el inicio de la construcción de un proyecto de minería, es porque se ha avanzado exitosamente a través de las fases previas a la construcción (FEL 1, FEL 2 y FEL 3).

En contraposición a lo anterior, en la práctica, algunos proyectos quedan “atascados” en una determinada fase y no se llegan a materializar.

Teniendo en mente la definición general enunciada para cada fase, en lo que sigue, se amplía con más detalle para una mejor comprensión del proceso completo.

4.4.1. Estudio de perfil

Como se indicó anteriormente, en esta fase se realiza una evaluación preliminar del proyecto con el fin de identificar si el proyecto tiene el potencial de negocio suficiente.

El estudio de perfil debe permitir una visión general de los siguientes aspectos del proyecto:

- Debe entregar las características generales del proyecto
- Se deben identificar los aspectos técnicos del proyecto que requieren mayor análisis, por ejemplo:
 - ✓ sondajes geológicos
 - ✓ análisis mineralógico y ensayos para establecer parámetros de interés
 - ✓ la aplicación de cualquier tecnología nueva o con innovaciones.
- Se debe identificar cualquier posible falla fatal del proyecto, es decir aquello que impida su ejecución por imposibilidad constructiva o por un costo excesivo o por un riesgo elevado que no se pueda controlar.
- Se deben estimar los costos y el plazo necesario para continuar el trabajo hasta finalizar la siguiente etapa que corresponde al estudio de prefactibilidad.

- Debe estimar el orden de magnitud del costo total del proyecto (costos de capital y costo operacional).

Con lo anterior se podrá establecer dentro de un margen de error preestablecido si el proyecto tiene potencial suficiente como para continuar con las siguientes etapas de estudio.

Como parte integral del estudio de perfil, se debe obtener:

- Las posibles alternativas para implementar el proyecto, con el fin de estudiarlas en la siguiente etapa, identificando las diferencias que existen entre ellas.
- El estudio de perfil deberá descartar el proyecto cuando éste no cumpla las expectativas mínimas necesarias para continuar los estudios.
- Análogamente, el estudio de perfil debe recomendar continuar con los estudios cuando las expectativas son favorables.
- Cuando el estudio de perfil recomienda continuar el proceso hacia la siguiente etapa, debe identificar los potenciales riesgos propios del proyecto.

4.4.2. Estudio de prefactibilidad

La etapa de prefactibilidad en un proyecto permite evaluar si el proyecto es viable desde el punto de vista técnico, económico, ambiental y social.

A continuación, se detallan las actividades que se desarrollan en esta etapa:

- Se realizan estudios geológicos y de recursos minerales
- Se realizan estudios metalúrgicos
- Estudios de Infraestructura:
 - ✓ Se definen las necesidades de infraestructura para el proyecto, incluyendo carreteras de acceso, ferrocarril, líneas eléctricas, suministro de agua.
 - ✓ Se evalúa la posibilidad de hacer uso de infraestructura existente que esté disponible.
 - ✓ Se estiman los costos asociados.
- Estudios Ambientales: Se inician los estudios de impacto ambiental (EIA)
- Evaluación Económica Preliminar: Se desarrolla un modelo económico preliminar que incluye los costos de inversión, los costos de operación estimados, los precios del cobre y otros factores económicos de interés.
- Diseño de la planta de procesamiento:
 - ✓ Se inicia el diseño conceptual de la planta de proceso.
 - ✓ Se define el tamaño y capacidad de la planta.
- Estudios de Mercado: Se llevan a cabo estudios de mercado para evaluar la demanda de cobre y la competitividad del proyecto en el mercado global.
- Análisis de Riesgos: El análisis de riesgo se realiza evaluando riesgos técnicos, riesgos económicos, riesgos ambientales y riesgos sociales.

- Se identifican los riesgos potenciales asociados al proyecto (en cada categoría) y se desarrollan estrategias para eliminarlo cuando sea posible. Si no es posible eliminar el riesgo se incorporan medidas de control para reducirlo a valores tolerables.
- Planificación de Permisos: Se inicia la identificación y planificación de los permisos y las gestiones legales y administrativas necesarias para llevar adelante el proyecto, incluyendo autorizaciones ambientales y sociales.
- Evaluación de Alternativas: Se identifican las alternativas posibles de implementar en el proyecto y se analizan para conocer sus ventajas y desventajas. A partir de lo anterior se definen las soluciones para el desarrollo del proyecto tales como: Lugar de emplazamiento de la planta, implementación de diferentes tecnologías en los procesos de la planta, entre otras. Todo lo anterior con el fin de identificar una combinación que se acerque a la solución óptima.
- Informe de Prefactibilidad: Al término de esta etapa se elabora un informe de prefactibilidad que resume los hallazgos y conclusiones de todas las actividades anteriores. La conclusión de este informe es la base para tomar la decisión de avanzar hacia la siguiente fase de factibilidad.

La etapa de prefactibilidad es esencial para determinar si un proyecto tiene el potencial suficiente para ser considerado viable, es decir: que sea rentable, que sea sustentable desde el punto de vista del medio ambiente y que sea robusto en los aspectos legales y relaciones con la comunidad.

De la definición de esta etapa dependen las acciones futuras para comprometer recursos en la siguiente fase.

4.4.3. Estudio de factibilidad

En esta fase se desarrolla la ingeniería básica del proyecto que tiene por objetivo confirmar la viabilidad técnica, económica, ambiental y social del proyecto que se estableció en la etapa anterior.

A continuación, se detallan las actividades que se desarrollan en la etapa de factibilidad:

- Diseño de la Planta de Procesamiento: Se elabora un diseño detallado de la planta de procesamiento
 - ✓ Se define la capacidad
 - ✓ Se definen los métodos con que se realizarán los procesos principales de: chancado, molienda, flotación, espesamiento, filtrado, secado y otros procesos secundarios en una planta concentradora.
En el caso de una planta de lixiviación, serán los procesos de chancado, aglomeración, apilamiento, lixiviación, extracción por solventes, electro obtención, manejo y transporte de cátodos.
 - ✓ Se selecciona la tecnología y los equipos necesarios para efectuar los procesos ya definidos de manera eficiente, rentable y sustentable.

- Estudios de Infraestructura Completa: Se definen en detalle los requerimientos de infraestructura, a saber:
 - ✓ Vías de transporte: Caminos y carreteras, tramos de ferrocarril
 - ✓ Energía: Líneas de alimentación eléctricas en alta tensión (A.T) y media tensión (M.T.)
 - ✓ Suministro de agua
 - ✓ Edificios de infraestructura para la construcción
 - Garita control de acceso
 - Oficinas generales y oficinas en las áreas de trabajo
 - Campamento (dormitorios, sala de recreación)
 - Casino (cocina y comedores)
 - Planta potabilizadora de agua
 - Estanque agua potable
 - Planta tratamiento aguas servidas (para la construcción)
 - Patios de almacenamiento materiales
 - Patio de almacenamiento de equipos
 - Patios de prearmado
 - Talleres
 - Patio manejo de rises (residuos industriales sólidos)
 - ✓ Edificios de infraestructura para operaciones.
 - Garita de acceso y romana de pesaje
 - Campamento de operaciones (dormitorios, sala de recreación, gimnasio)
 - Oficinas en cada área de operaciones
 - Estación de combustibles
 - Patios de almacenamiento
 - Laboratorio metalúrgico
 - Patio de muestras
 - Taller de mantención maquinaria
 - Taller de mantención vehículos livianos
 - Estación de bomberos (carro bomba)
 - Policlínico

En este estudio se elaboran planos detallados de todas las instalaciones de infraestructura requeridas y se obtienen estimaciones presupuestarias en base a cotizaciones reales en el mercado con costos y tarifas actualizadas.

- Evaluación ambiental y social completa: Se realizan estudios de impacto ambiental y social exhaustivos para identificar y mitigar los posibles impactos negativos del proyecto al medio ambiente y las comunidades locales.
- Se trabaja en estrecha colaboración con las autoridades locales y a nivel nacional que regulan estas materias y con las partes interesadas para garantizar el cumplimiento de la normativa legal vigente.

- Modelo Económico Completo:
- Se desarrolla un modelo financiero completo que incluye:
 - ✓ Estimación de los costos operacionales y costos de capital actualizados
 - ✓ Proyecciones de ingreso basadas en los precios del cobre
 - ✓ Se determinan los parámetros financieros. Van, tir, flujo de caja, período de retorno de la inversión y otros indicadores de interés.
- Evaluación detallada de Riesgos: Se identifican y evalúan en detalle todos los riesgos potenciales asociados al proyecto, tanto técnicos como financieros.
- Se elabora un plan integral de gestión de riesgos.
- Permisos: Se trabaja en la obtención de todos los permisos necesarios para la operación del proyecto. Esto puede incluir una revisión más detallada de los aspectos regulatorios y un mayor compromiso con las partes interesadas y las comunidades locales.
- Informe de Factibilidad: A partir de la evaluación de los resultados de todas las actividades antes señaladas, se elabora un informe de factibilidad completo que resume los hallazgos y conclusiones.
- Este informe es el documento principal para tomar la decisión de inversión final.

La etapa de factibilidad es la última oportunidad para evaluar todos los aspectos del proyecto antes de comprometer recursos significativos en la fase de ejecución.

Un estudio de factibilidad bien realizado proporciona una base sólida para tomar decisiones informadas y contribuye al éxito del proyecto.

4.4.4. Ingeniería de detalle

En esta etapa, se realiza una definición detallada y específica de todas las instalaciones y equipos de la planta para convertir los planes y diseños conceptuales (planes y diseños obtenidos en la ingeniería básica) en documentos y planos que permitan materializar la construcción del proyecto y consecuentemente poner en operación la planta.

A continuación, se detallan las actividades que se desarrollan en la etapa de ingeniería de detalles de un proyecto.

- Se elabora un diseño detallado de la planta de procesamiento, incluyendo la disposición de equipos, sistemas de manejo de materiales, diagramas de flujo de procesos y se generan planos detallados de la planta.
- Diseño de Infraestructura Completo: Se completa el diseño detallado de la infraestructura necesaria para el proyecto, como carreteras, ferrocarril, sistemas de energía eléctrica, suministro de agua, drenaje y sistemas de manejo de desechos. Se generan planos detallados y se especifican los materiales y estándares de construcción.
- Especificaciones Técnicas: Se desarrollan especificaciones técnicas detalladas para todos los equipos, materiales y servicios requeridos en el proyecto. Esto incluye la

definición exacta de las características técnicas, normas de calidad y requisitos de desempeño.

- Control de Costos y Presupuesto: Se establece un control de costos detallado que incluye la estimación de costos actualizados para todas las actividades de construcción y operación.
- Evaluación Ambiental y Social Continua: Se continúa con la evaluación y el seguimiento de los aspectos ambientales y sociales del proyecto, asegurando que todas las medidas de mitigación y cumplimiento se implementen según lo planeado.
- Planificación de Adquisiciones y Contrataciones:
 - ✓ Se gestiona la adquisición de equipos y materiales de acuerdo con las especificaciones técnicas.
 - ✓ Se realiza el proceso de licitación y contratación necesario para la construcción del proyecto.
- Gestión de Riesgos Continua: Se realiza una gestión activa de riesgos durante la etapa de ingeniería de detalles para identificar y mitigar cualquier problema potencial que pueda surgir durante la construcción y operación.
- Gestión de Calidad: Se establecen planes de control de calidad para asegurar que todos los componentes y sistemas del proyecto cumplan con los estándares y normativas aplicables.
- Plan de Seguridad: Se desarrolla un plan completo de seguridad y salud ocupacional que cumple con las regulaciones y garantiza la seguridad de los trabajadores durante la construcción y la operación.
- Coordinación con Autoridades y Comunidades: Se mantiene una estrecha coordinación con las autoridades reguladoras y las comunidades locales para asegurar el cumplimiento de regulaciones y normativas, así como para abordar cualquier inquietud o consulta.
- Preparación para la Construcción: Se prepara la fase de construcción del proyecto, lo que incluye la adquisición de permisos de construcción, la movilización de recursos y la planificación detallada del cronograma de construcción.

La ingeniería de detalles es una etapa esencial para garantizar que el proyecto se construya y opere de manera segura, eficiente y en cumplimiento de todos los estándares y regulaciones aplicables. Los documentos y planos generados en esta etapa son la base para la ejecución exitosa del proyecto.

4.4.5. Construcción

La etapa de construcción de un proyecto implica la ejecución de todas las actividades necesarias para materializar los planes y diseños desarrollados en las etapas de ingeniería y planificación. Esta fase requiere una coordinación meticulosa y la adecuada gestión de recursos con enfoque en la seguridad y el cumplimiento ambiental.

A continuación, se detallan las actividades que se desarrollan en la etapa de construcción de un proyecto.

- Preparación del Sitio: Antes de iniciar la construcción, se lleva a cabo la preparación del sitio, que incluye la limpieza, despeje de vegetación, remoción de suelo superficial y nivelación del terreno según lo diseñado.
- Movilización de Equipos y Recursos: Se transportan los equipos de construcción, maquinaria y materiales necesarios al sitio de construcción.
- Esto incluye la llegada de vehículos pesados, grúas, camiones, equipos de excavación y otros equipos especializados.
- Construcción de Infraestructura: Se comienza la construcción de la infraestructura necesaria para el proyecto, como:
 - ✓ carreteras de acceso
 - ✓ caminos internos
 - ✓ sistemas de suministro de energía eléctrica
 - ✓ suministro de agua (planta potabilizadora)
 - ✓ instalación de sistemas de drenaje (red de alcantarillado y planta de tratamiento de aguas servidas)
 - ✓ Manejo de desechos (relleno sanitario, patios de desechos).
- Construcción de la Planta de Procesamiento: Se lleva a cabo la construcción de la planta de procesamiento, que incluye la construcción de cada edificio, la instalación de equipos, sistemas de transporte de mineral, sistemas de molienda, flotación, lixiviación u otros procesos de procesamiento de cobre.
- Instalación de Servicios Auxiliares: Se instalan sistemas de servicios auxiliares, como sistemas de seguridad contra incendios, sistemas de control de polvo, sistemas de monitoreo ambiental y sistemas de comunicaciones.
- Gestión de Residuos y Vertidos: Se implementan sistemas para la gestión de residuos y vertidos, asegurando que los desechos sean manejados y dispuestos de manera segura y cumpliendo con los requisitos ambientales.
- Seguridad en la Construcción: Se establecen y mantienen rigurosas prácticas de seguridad en el sitio de construcción para proteger a los trabajadores y minimizar el riesgo de accidentes.
- Gestión de la Calidad: Se lleva a cabo la inspección y el control de calidad de la construcción para asegurar que todas las instalaciones y componentes cumplan con los estándares y especificaciones técnicas.
- Control de Costos y Cronograma: Se monitorean y controlan los costos de construcción y se asegura que el proyecto se mantenga dentro del presupuesto y el cronograma establecido.
- Gestión Ambiental y Social: Se implementan las medidas de mitigación y cumplimiento ambiental y social según lo planificado en las etapas previas. Se monitorea y se mantiene una comunicación continua con las partes interesadas y las autoridades reguladoras.

La etapa de construcción es, en opinión de la mayoría, la fase más importante en el desarrollo del proyecto dado que aquí se realiza un desembolso de recursos económicos muy significativo en relación a la inversión total del proyecto.

En esta etapa se materializa la planta con todos sus equipos de proceso y todas las instalaciones de infraestructura necesarias para la operación.

4.4.6. Puesta en marcha

La etapa de puesta en marcha en un proyecto marca la transición desde la construcción a la operación comercial. Durante esta etapa, se llevan a cabo una serie de actividades destinadas a asegurar que todas las instalaciones y sistemas funcionen de manera segura y eficiente. La puesta en marcha se subdivide en sub etapas.

En lo que sigue se entrega una descripción de cada etapa basada en el "Manual de comisionado y puesta en marcha de proyectos" (Beytía, s.f.)

Término de la Construcción: Esta etapa marca el final de la construcción física de las instalaciones y sistemas del proyecto. Durante este proceso, se completan todas las actividades de construcción, incluyendo la instalación de equipos, la construcción de infraestructura y la construcción de la planta de procesamiento según lo diseñado.

En esta etapa se debe asegurar que todos los componentes estén instalados y funcionando según las especificaciones técnicas y de seguridad. Además, se realiza una revisión exhaustiva para garantizar que no queden tareas pendientes de construcción.

Término mecánico: "Mechanical Completion" En esta etapa se verifica que todos los equipos y sistemas estén instalados correctamente y que están listos para operar.

En esta fase, se asegura que los equipos estén correctamente montados, que las conexiones estén hechas y que no existen fugas, defectos o problemas mecánicos.

Se realiza una inspección detallada para confirmar que cada componente esté en su lugar y funcionando como fue diseñado.

Precomisionamiento: "Precomissioning" Es la etapa en la que se realizan pruebas sin carga y comprobaciones iniciales en los equipos y sistemas antes de la operación.

Esto implica la verificación de sistemas eléctricos, de control, de seguridad y de proceso para asegurar que estén instalados correctamente y se puedan encender sin problemas. Durante esta fase, se identifica y corrige cualquier problema o defecto antes de proceder al comisionamiento.

Comisionamiento: "Commissioning" Durante esta fase, se ponen en funcionamiento los equipos y sistemas de manera secuencial y se llevan a cabo pruebas operativas con carga para asegurarse que funcionen de acuerdo con las especificaciones técnicas y los estándares de seguridad. También se verifica que los sistemas de control funcionen correctamente. Cualquier problema o desviación se identifica y se corrige antes de la entrega a la operación.

Traspaso a Operaciones: Se establece la transición a la operación normal de la planta, con la operación continua de la mina, el procesamiento del mineral y todas las actividades relacionadas.

5. PLANTAS DE PROCESAMIENTO DEL MINERAL DE COBRE

A continuación se entrega una breve reseña del mineral que se explota en el yacimiento para luego procesarlo hasta obtener un producto de cobre comercial.

5.1. Mineral de cobre

Según el artículo *Mineral (2024) de Wikipedia*, los minerales son compuestos químicos. Para que una sustancia sea definida como un mineral, debe cumplir las siguientes características: Ser de origen natural, ser estable a temperatura ambiente, estar representado por una fórmula química, no debe ser el resultado de la actividad de organismos vivos y debe tener una disposición atómica ordenada.

En general el cobre está presente en la corteza terrestre en forma de mineral y se encuentra principalmente en dos formas, como sulfuros de cobre y como óxidos de cobre. Esto da origen a dos alternativas de tratamiento principales.

- a) El tratamiento pirometalúrgico se aplica a los minerales en forma de sulfuros, tratamiento que en la minería se realiza en una planta concentradora de cobre.
- b) El tratamiento hidrometalúrgico se aplica a los minerales en forma de óxido, tratamiento que en la minería se realiza en una planta de lixiviación.






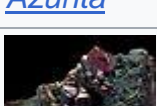
Si el mineral se presenta en forma de sulfuro de cobre, entonces se diseña e implementa una planta concentradora de cobre.

Si el mineral se presenta en forma de óxido de cobre, entonces se diseña e implementa una planta de lixiviación.

Como se indicó antes existen otras formas de tratamiento del mineral, dependiendo de la composición mineralógica y otras variables relevantes. En este trabajo se abordan las dos principales.

A modo ilustrativo se muestran a continuación algunos de los minerales de los que se extrae el cobre.

Tabla 8: Minerales de cobre

Nombre	Fórmula	% de cobre en mineral puro
 <u>Chalcopirita</u>	CuFeS_2	34.63%
 <u>Calcosina</u>	Cu_2S	79.85%
 <u>Covellina</u>	CuS	66.5%
 <u>Bornita</u>	$2\text{Cu}_2\text{S}\cdot\text{CuS}\cdot\text{FeS}$	63.3%
 <u>Malaquita</u>	$\text{CuCO}_3\cdot\text{Cu}(\text{OH})_2$	57.3%
 <u>Azurita</u>	$2\text{CuCO}_3\cdot\text{Cu}(\text{OH})_2$	55.1%
 <u>Cuprita</u>	Cu_2O	88.8%
 <u>Crisocola</u>	$\text{CuO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	37.9%

Fuente: Tomado de Metalurgia del cobre.
Extracción de cobre. (2024).

El desarrollo de la constructibilidad que se presenta en este trabajo se orienta específicamente a estos dos tipos: planta concentradora de cobre y planta de lixiviación de cobre que son las de mayor aplicación en la minería del país.

Para lograr una mejor comprensión de un proyecto para la minería del cobre, se entrega a continuación una descripción de los dos tipos principales de plantas de beneficio de cobre que se construyen y operan en nuestro país.

5.2. Descripción de una planta concentradora

Se denomina Planta Concentradora a un conjunto de instalaciones destinadas al procesamiento de mineral de cobre que tiene como finalidad producir concentrado de cobre, actividad que se realiza en varias etapas.

Los procesos que se desarrollan en una planta concentradora de cobre para convertir las rocas de mineral extraídas de la mina hasta obtener el “concentrado de cobre”, son los siguientes:

Conminución. Corresponde a la reducción de tamaño del mineral que a su vez consta de dos fases chancado y molienda.

Flotación. En este proceso se aplica agua y reactivos al mineral de donde se obtiene el concentrado de cobre en forma de pulpa, esto es, una mezcla de mineral (finamente molido en la etapa anterior) y agua con un contenido de cobre muy superior al que poseía el mineral inicialmente tratado.

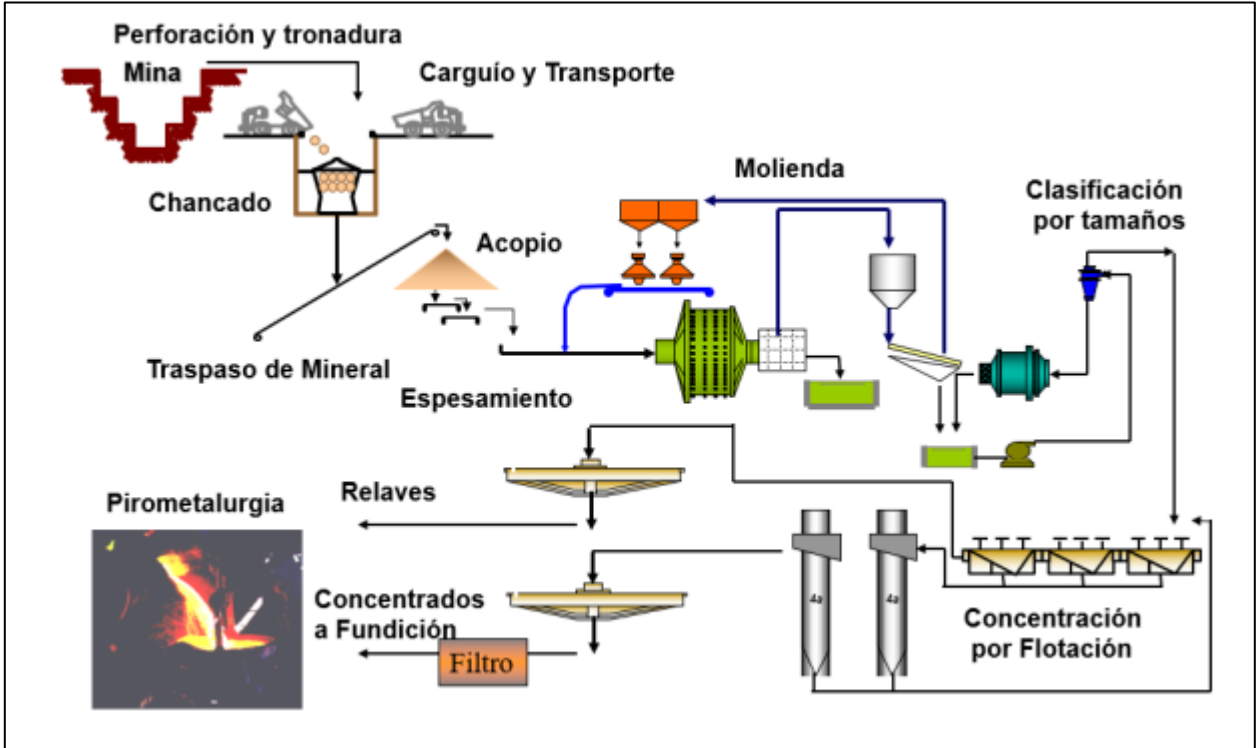
Espesamiento. En este proceso se extrae gran parte del agua de la pulpa.

Filtrado. En esta etapa se extrae el agua residual mediante filtros prensa.

Secado. En esta etapa se elimina la humedad residual del concentrado aplicando calor hasta obtener un producto seco y sólido conocido como “concentrado de cobre”.

El concentrado obtenido es procesado posteriormente en fundiciones o plantas químicas para obtener cobre en la forma de barras o lingotes. Por otro lado, el concentrado de cobre es un producto comercial que se transa en la bolsa de valores .

Figura 11: Diagrama de proceso planta concentradora



Fuente: Tomado de Valdivia (2022, p.7).

Descripción de los procesos enunciados.

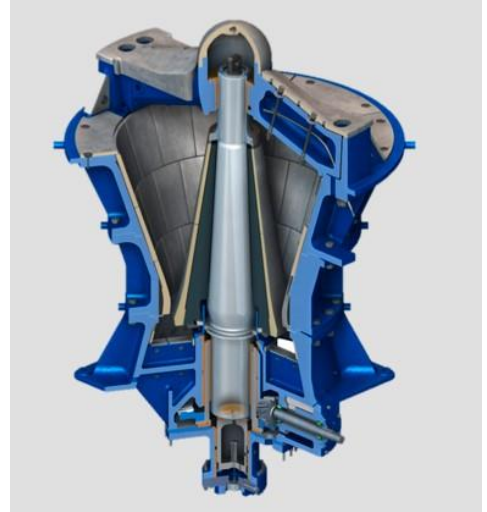
A partir del mineral extraído de la mina, el proceso comienza con la conminución cuyo objetivo es disminuir el tamaño de las rocas de mineral, aplicando fuerzas de impacto por medio de equipos diseñados para esa tarea que se muestran a continuación.

La conminución se logra empleando dos tipos principales de equipos los chancadores y los molinos, lo que da origen a los procesos de chancado y molienda.

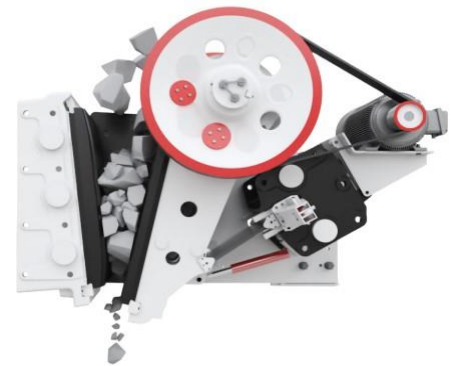
5.2.1. Chancado

Existen varios tipos de chancadores

Chancador giratorio: El chancador giratorio consta de un cuerpo cónico que gira al interior del cuerpo del chancador. La trituración se produce debido al movimiento excéntrico realizado por el eje principal realizado dentro de la cámara de chancado. Así, al ingresar mineral al chancador, el eje en su movimiento rotatorio se acerca y se aleja secuencialmente de las paredes internas del chancador. Existen chancadores giratorios de gran tamaño, capaces de triturar rocas de hasta 1,5 metros de diámetro. Estos chancadores son comúnmente utilizados en la primera etapa de conminución denominada chancado primario. (Metso. 2024. Chancadores.)

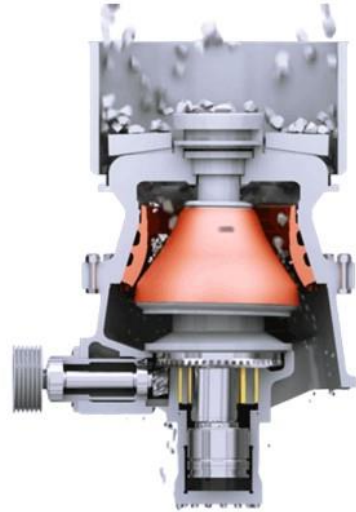


Chancador de mandíbula: El chancador de mandíbula es un equipo de trituración primaria que utiliza dos placas metálicas que operan a manera de mandíbula para comprimir y triturar el material. El material se introduce en la parte superior y se aplasta gradualmente a medida que las mandíbulas se acercan entre sí. Son aptos para materiales duros y abrasivos, como es el caso del mineral de cobre. (Metso. 2024. Chancadores.)



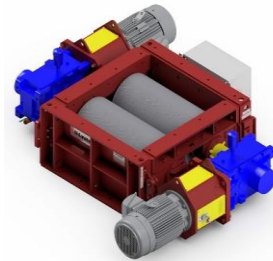
Chancador de cono: El chancador de cono es un chancador de compresión que consta de un cuerpo cónico giratorio dentro de una cámara cóncava. La geometría de ambos elementos genera una abertura mayor en la parte alta del conjunto y esa abertura disminuye hasta un mínimo en la parte inferior. El material se introduce en la parte superior de la cámara y es aplastado contra el cuerpo fijo exterior a medida que el cono gira. De esta forma el mineral va disminuyendo su tamaño. Se fabrican en varios tamaños y son utilizados en una amplia variedad de aplicaciones. Estos chancadores son adecuados para materiales duros y abrasivos y son comúnmente utilizados en la segunda y tercera etapa denominadas chancado secundario y chancado terciario.

(Sribd. 2024. Funcionamiento Chancador.)



Chancador de rodillos: El chancador de rodillos consta de dos rodillos que giran en direcciones opuestas y aplastan el material entre ellos. Son adecuados para materiales frágiles y menos abrasivos y se utilizan comúnmente en la trituración secundaria o terciaria.

(McLanahan s.f. Chancadores de rodillo simple.)



Cada tipo de chancador tiene sus propias ventajas y limitaciones y la elección del chancador adecuado depende de las características del material, el tamaño requerido del producto final y otros factores específicos de la operación minera.

5.2.2. Molienda

Del mismo modo existen diferentes tipos de molinos.

Molino de bolas: El molino de bolas es un cilindro que gira alrededor de su eje horizontal y contiene en su interior bolas de acero que propicia el proceso de molienda. A medida que el molino gira, las bolas caen sobre el material y lo muelen. Son ampliamente utilizados en la molienda de minerales metálicos y no metálicos, así como en la industria del cemento. (EYG Ingeniería y Partes S.A.S. 2024. Principio de funcionamiento del molino de bolas.)



Molino de barras: El molino de barras es similar al molino de bolas, pero utilizan barras de acero en lugar de bolas como medio de molienda. El material se coloca en el molino y las barras giran y caen sobre él para triturarlo. Son comúnmente utilizados en la molienda de minerales y en la preparación de minerales para la flotación. (Codelco educa. s.f. Molienda)



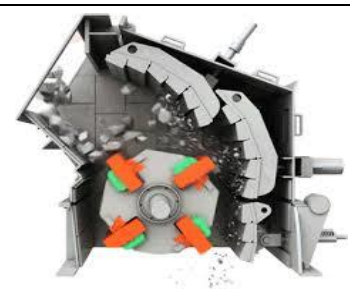
Molino SAG (Semi-Autogenous Grinding): El molino SAG es un molino autógeno que utiliza mineral y medios de molienda (generalmente bolas de acero) para moler el material. La molienda se realiza principalmente por el impacto y la abrasión del material contra sí mismo y contra los medios de molienda (bolas). El molino SAG se utiliza comúnmente en la molienda de minerales de alta dureza y se utiliza como etapa previa al molino de bolas. (Codelco educa. s.f. Molienda)



Molino AG (Autogenous Grinding): EL molino AG es un molino autógeno, es decir, la molienda se produce por el impacto y la abrasión del material contra sí mismo, sin el uso de bolas o barras de acero. Se utiliza en minerales que sean lo suficientemente blandos como para que se verifique la molienda sin medios de molienda (bolas, barras de acero). Esto ocurre con algunos minerales de oro y cobre. (Universidad Politécnica de Cartagena. 2011. Molienda autógena.)



Molino de impacto: En este tipo de molino se utiliza el impacto para triturar el material. El material se introduce en una cámara de molienda donde es golpeado por palas u otros dispositivos de impacto. Se utiliza en la molienda de minerales y en la producción de agregados pétreos. (Retsch. 2024. Molino de impacto de palas)

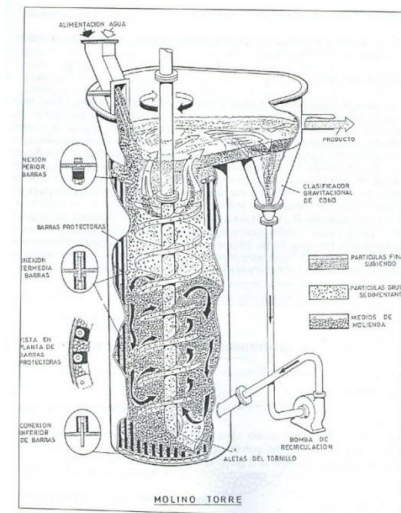


Molino vertical: El molino vertical tiene un eje vertical y el material se muele por la acción de rodillos que giran alrededor de este eje. Son utilizados en la molienda de minerales y en la industria del cemento.

El molino vertical requiere menor espacio para su instalación, consume menos energía que un molino horizontal y es muy eficiente cuando se requiere obtener partículas de tamaño muy fino.

Suele emplearse como complemento de un sistema de molienda establecido para optimizar el proceso.

(Metso. 2024. Vertimill)



Como se ha dicho, el objetivo del proceso de conminución es disminuir el tamaño del mineral proveniente de la mina, lo que se logra a través de un chancador que reduce el tamaño del mineral hasta un tamaño máximo cercano a 4" para ingresar luego a la molienda donde finalmente se obtiene un material fino de entre 0,15 a 0,30 [mm] (150 a 300 micrones). Concluida la molienda se aplican reactivos para pasar a la siguiente etapa de flotación.

5.2.3. Flotación

La flotación es un proceso fisicoquímico que tiene por objeto la separación del cobre mediante la adhesión selectiva de partículas minerales a burbujas de aire. La flotación se realiza al interior de una celda de flotación. (Codelco educa s.f. Flotación)

El funcionamiento de la celda de flotación es el siguiente:

La celda de flotación es un estanque que recibe el material proveniente de la molienda, se le agrega agua y los reactivos. En la mayoría de los casos se inyecta aire desde el fondo para generar burbujas. Debido a la acción de los reactivos, que fueron añadidos después de finalizar la molienda, el cobre que es el mineral que se quiere rescatar, ingresa a estas burbujas y sube a la superficie de la solución. Esta acción de “rescate” del cobre usando como transporte las burbujas de aire, se logra por la acción de los reactivos.

Reactivos

Los principales reactivos empleados son:

Reactivos colectores

Estos reactivos le confieren a las partículas de cobre una propiedad “hidrófoba” (fobia al agua) por lo que las partículas de cobre “rechazan” el agua y así se logra que las partículas de cobre ingresen a las burbujas de aire. Este fenómeno se puede explicar también así: debido a la aplicación del reactivo, el aire inyectado en la base es “capaz de envolver” a las partículas de cobre y le sirve de transporte para llevarlo a la superficie.

Reactivos depresores

La función de estos reactivos es generar el efecto contrario a los reactivos colectores, pero esta vez actuando sobre otros minerales presentes en la pulpa. En palabras simples, se trata de que los minerales que no interesa recolectar, y que están presentes en la pulpa, “prefieran” el agua en vez del aire. Un ejemplo de esto es la pirita que es un sulfuro que no contiene cobre. De este modo los minerales que no contienen cobre se quedan en el agua y dado que su densidad es mayor que el agua, decantan separándose del cobre que sube a la superficie en forma de espuma.

Reactivos espumantes

La misión de los reactivos espumantes es aumentar la tensión superficial del agua generando burbujas “resistentes” que puedan albergar a las partículas de cobre y conducir las a la superficie.

Otros aditivos

Se aplican además otros aditivos cuya tarea principal es estabilizar la acidez de la mezcla a un valor de PH determinado con el fin de inhibir otros procesos fisicoquímicos secundarios que entorpecen el proceso de flotación que se lleva adelante. Un ejemplo de esto es la adición de cal.

Celdas de flotación

Existen varios tipos de celdas de flotación dependiendo de las características mineralógicas del mineral y del proceso específico que se ha definido para realizar la flotación. A continuación se describen los tipos más comunes.

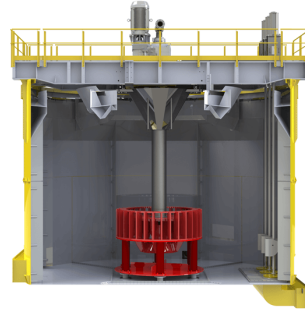
Celda mecánica convencional: Este tipo de celda es la más antigua y básica en el proceso de flotación. Utiliza un dispositivo mecánico para agitar la pulpa y promover la interacción entre las partículas de mineral y las burbujas de aire generadas por difusores o inyectores de aire. La pulpa se introduce en la celda y el agitador crea una turbulencia que facilita la adhesión de las partículas de mineral a las burbujas de aire.

(Slideshare. s.f. Celdas de flotación)



Celda de agitación: Esta celda es similar a las convencionales, pero tiene un sistema de agitación mejorado que logra una mayor dispersión de las burbujas de aire y las partículas de mineral en la pulpa. Esto mejora la eficiencia del proceso de flotación y la recuperación de minerales.

(Slideshare. s.f. Celdas de flotación)

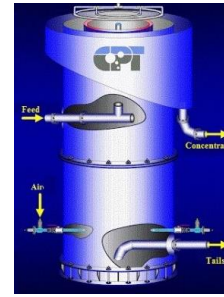


Celda de columna: La celda de columna es un dispositivo vertical de flotación que difiere de la celda convencional en que no tiene agitadores mecánicos. En cambio, utiliza burbujas de aire generadas por un flujo de aire a contracorriente para llevar a cabo la flotación. Las partículas de mineral se adhieren a las burbujas y ascienden a través de la columna, lo que permite una separación más eficiente y selectiva.

(FLSmidth. 2024. Celda de flotación en columna.)



Celda neumática: Esta celda se basa en la generación de burbujas de aire a través de la agitación mecánica o la dispersión de aire comprimido en la pulpa. Las burbujas se adhieren a las partículas de mineral y las hacen flotar hacia la superficie, donde se recogen para su posterior procesamiento. (Slideshare. s.f. Celdas de flotación)



Celdas Jameson: La celda Jameson es una variante de la celda de flotación de columna. Utiliza una mezcla de pulpa y aire descendente en un tubo de descenso que genera burbujas de aire. Las partículas de mineral se adhieren a estas burbujas y ascienden a través de la celda, mientras que las partículas sin valor se hunden y se descargan en la parte inferior. (Slideshare. s.f. Celdas de flotación)



Celda de tanque circular: Esta celda combina características de la celda convencional y de columna. Utiliza un mecanismo de agitación en el fondo del tanque para crear turbulencia y promover la adhesión de las burbujas de aire a las partículas de mineral. (Planet Gold Colombia. 2024. Manual celda de flotación circular)



5.2.4. Espesamiento

Una vez concluida la etapa de flotación, desde la zona alta de la celda se obtiene una pulpa rica en cobre con un contenido de cobre cercano al 30%; a este fluido se le denomina "concentrado de cobre". Por otra parte desde la zona baja de la celda se obtiene una pulpa con bajo contenido de cobre, a este fluido se le denomina "relave". La etapa de separación sólidos y líquidos consiste en el desaguado de los concentrados y se realiza en dos equipos principales: el espesador de concentrado y el filtro de prensa. Estos equipos se basan en dos principios de separación distintos.

El espesador opera por sedimentación gravitacional y el filtro de prensa por la acción mecánica que comprime el concentrado que se confina al interior de una serie de compartimentos expulsando la mayor parte del agua contenida. El proceso es el siguiente: El concentrado de cobre ingresa al espesador de concentrado donde se le extrae una cierta cantidad de agua y posteriormente pasa al filtro de prensa.

Existen varios tipos de espesadores, a continuación se da una reseña de ellos.

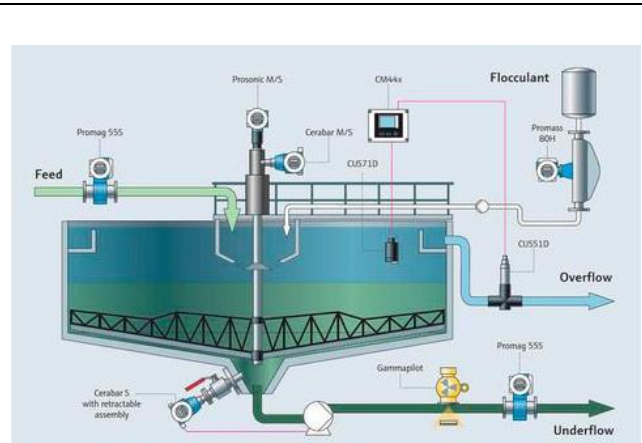
Tipos de espesadores

El proceso de espesamiento tiene por objetivo separar los sólidos de los líquidos. En palabras simples, el proceso de espesamiento busca reducir la cantidad de agua de los fluidos que salen de la celda de flotación. El flujo que sale por la parte superior de la celda de flotación se denomina concentrado de cobre, la separación sólido-líquido se realiza en un equipo denominado “espesador de concentrado”. El flujo que sale por la parte inferior de la celda de flotación se denomina relave, la separación sólido-líquido se realiza en un equipo denominado “espesador de relave”.

El proceso de espesamiento permite recuperar parte del agua adicionada en los procesos previos para su reutilización.

A continuación se describen brevemente algunos tipos de espesadores utilizados en una planta concentradora de cobre.

Espesador convencional: El espesador convencional es un estanque cilíndrico que visto en corte tiene la forma de cono invertido en los que la pulpa entra por el centro y se distribuye uniformemente en la superficie del estanque. A medida que la pulpa se mueve hacia abajo, los sólidos se asientan en el fondo debido a la gravedad, mientras que el agua clarificada se acumula en la parte superior y se retira.



Los sólidos sedimentados se recogen en el fondo y se retiran periódicamente. Estos espesadores son simples en diseño y ampliamente utilizados en la industria minera. El espesador convencional se usa preferentemente para espesar relaves, pero también se usa para concentrado de cobre en menor medida.

(Electro Industria. 2015. Optimización del espesador)

Espesador de alta capacidad:

El espesador de alta capacidad está diseñado para acelerar el proceso de sedimentación y mejorar la eficiencia del espesamiento. Utiliza mecanismos internos para distribuir la pulpa de manera más uniforme y para mejorar la sedimentación de los sólidos. Esto permite lograr concentraciones de sólidos más altas en el lecho sedimentado, lo que reduce el tamaño necesario del equipo y aumenta la capacidad de procesamiento.



Los espesadores de alta capacidad son ampliamente utilizados en el espesamiento de relaves. Su capacidad para lograr una alta concentración de sólidos en el lecho sedimentado es beneficioso para reducir el volumen de agua en los relaves y, por lo tanto, minimizar el impacto ambiental.

Estos espesadores también pueden usarse para espesar concentrado de cobre cuando se busca un producto más denso y concentrado antes de su posterior procesamiento. (Academia.edu Journals. 2024. *Revisión de los equipos de decantación para estériles de mina*)

Espesador de pasta: El espesador de pasta es utilizado para lidiar con suspensiones de alta densidad, como las pastas minerales. Este espesador trabaja con altas concentraciones de sólido, lo que resulta en un bajo contenido de agua en el producto final. El espesador de pasta utiliza tecnologías avanzadas para mantener una suspensión densa y manejar la pulpa de manera eficiente.



Los espesadores de pasta son especialmente adecuados para el espesamiento de relaves, ya que están diseñados para trabajar con suspensiones de alta densidad. Permiten obtener un relave con un alto contenido de sólidos y un bajo contenido de agua, lo que puede facilitar su manejo y disposición.

Los espesadores de pasta también pueden ser utilizados para espesar el concentrado de cobre cuando se busca obtener un producto altamente concentrado antes de su posterior procesamiento. (Metso. 2024. *Espesador de pasta de segunda generación*)

En general cada tipo de espesador tiene sus propias ventajas y desafíos en términos de eficiencia de sedimentación, manejo de materiales, tamaño del equipo y requisitos de mantenimiento. La elección del espesador adecuado depende de las características específicas del mineral, el proceso y los objetivos de operación.

5.2.5. Filtrado

Filtro prensa: El principio de funcionamiento de los filtros a presión, comúnmente llamados “filtro-prensa”, es similar para todos ellos. Se dispone un medio filtrante sobre el bastidor de un recipiente provisto de canales para recibir y conducir el exceso de agua.

El concentrado de cobre (pulpa) es impulsado a presión y obligado a penetrar entre el espacio del medio filtrante y la envoltura exterior del recipiente.

La operación de filtrado se realiza en forma cíclica con varias etapas de “desaguado”.

(Matec Industries. 2024. Qué es y cómo funciona un filtro de prensa de placas)



Primer ciclo: La envoltura de la placa del filtro se encuentra cerrada. La pulpa entra a las cámaras de filtro. La filtración comienza en ambos lados de la cámara. El líquido excedente se drena a través de orificios en cada cámara. Como resultado de esta etapa, se obtiene el concentrado de cobre en forma de un “queque” húmedo.

Segundo ciclo (compresión): Una vez formado el queque, éste se estabiliza extendiendo la membrana de goma de un lado del queque. La dilatación de la membrana se realiza mediante aire comprimido, en algunos casos mediante agua a presión.

Tercer ciclo (desaguado por aire): Se suministra aire comprimido que desplaza el agua libre del queque. Normalmente la membrana se mantiene distendida para conservar la buena estabilidad del queque. Esto disminuye el consumo de aire y asegura que quede una humedad mínima residual en el queque.

Cuarto ciclo: (descarga de queque): Se abre el filtro mediante un accionamiento hidráulico. Las telas se sacuden para liberar todo residuo de queque.

Quinto ciclo (lavado de telas): Con la envoltura de la placa aún en la posición abierta, se enjuagan las telas mediante boquillas que atomizan el agua de lavado. Esta acción se complementa con vibradores que agitan las telas durante el lavado.

Concluido el quinto ciclo de lavado de telas, se da por terminada la secuencia completa de filtrado. Esta secuencia completa se repite indefinidamente, recibiendo concentrado de cobre (pulpa) y entregando un producto desaguado pero húmedo.

Al término de cada ciclo completo, se obtiene el concentrado de cobre con una humedad cercana al 9% y el producto es enviado al proceso de secado.

5.2.6. Secado

En muchos casos, en el norte de Chile, el secado se realiza en canchas de secado donde simplemente se transporta el concentrado húmedo mediante camiones, cintas transportadoras u otro medio. El concentrado se descarga y se extiende en capas uniformes sobre la superficie de la cancha, esto permite una exposición máxima a la radiación solar y al viento, generando el proceso de secado en forma natural gracias a la muy baja humedad ambiente y la fuerte radiación solar que caracteriza al norte de Chile. Estos dos factores propician una evaporación importante y al cabo de un cierto tiempo el concentrado alcanza el nivel de secado requerido.

Al llegar a este punto del proceso, se tiene concentrado de cobre que puede ser enviado a una fundición para obtener lingotes de cobre (cobre blister) que alcanzan una pureza cercana al 98% o bien se envía como producto final al mercado internacional.

5.3. Descripción de una planta de lixiviación

Se denomina Planta de lixiviación a un conjunto de instalaciones destinadas al procesamiento de mineral de cobre en forma de óxidos que obtiene como producto final cátodos de cobre de alta pureza, actividad que se realiza en varias etapas.

Los procesos que se desarrollan en una planta de lixiviación de cobre para convertir el mineral extraído de la mina hasta obtener cobre de alta pureza son los siguientes:

Conminución: Corresponde a la reducción de tamaño del mineral que se realiza mediante el proceso de chancado que a su vez se realiza en tres etapas chancado primario, chancado secundario y chancado terciario, hasta alcanzar el tamaño requerido de las partículas de mineral.

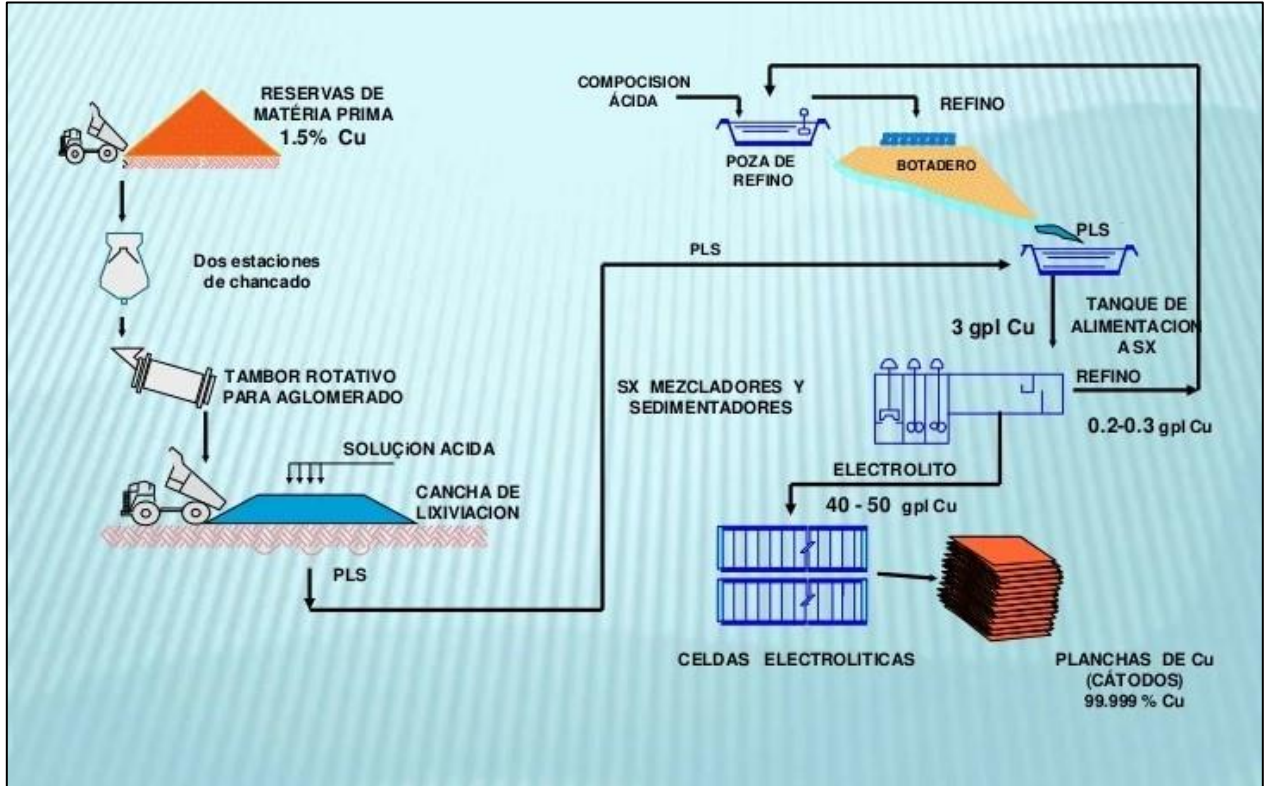
Aglomeración: En esta etapa se aplica una solución de ácido sulfúrico de baja concentración, como preparación para la siguiente fase.

Lixiviación en pilas: En esta etapa se realiza un riego con ácido sulfúrico diluido al mineral apilado. El riego puede ser por goteo o mediante aspersores.

Extracción por solventes: En esta etapa se extrae el cobre que está presente en el fluido rico en cobre que se obtuvo en la lixiviación.

Electro obtención: Mediante energía eléctrica se realiza un proceso de electrólisis donde el cobre se deposita en los cátodos.

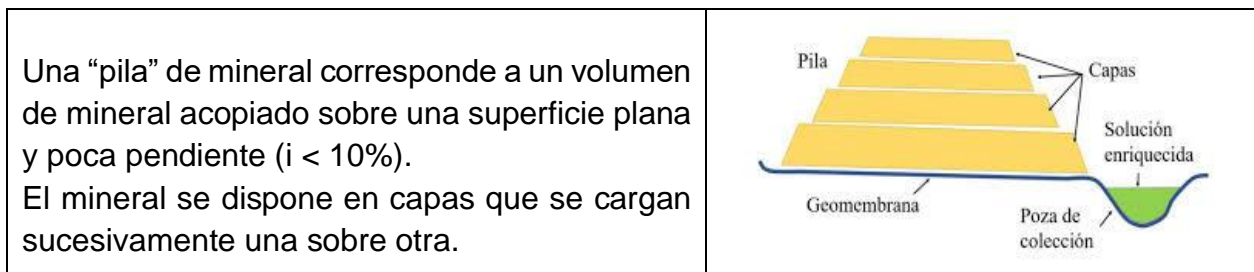
Figura 12: Diagrama de proceso planta de lixiviación



Fuente: Tomado de Planta de extracción por solventes. (2016)

Pilas de lixiviación

La lixiviación en pilas es un proceso hidrometalúrgico de extracción de metales mediante percolación de una solución a través de una pila de mineral. (Codelco educa. Lixiviación de cobre)



Para conformar la pila se usan distintos métodos, entre ellos: sistema de correas de alimentación, apilamiento por volteo directo de camión o mediante apiladores móviles que corresponde a un sistema mecanizado de alto desempeño.

Existen distintos tipos de pilas:

Pilas dinámicas:

Denominadas también de tipo "on-off", en las que el mineral se remueve y se envía a botaderos después de la lixiviación, y la base de la pila se puede reutilizar.

Para las pilas dinámicas, se puede elegir cualquier configuración que sea aceptable para la operación de los equipos de carga y descarga, pero generalmente, se prefiere un rectángulo alargado.

En el caso particular de las operaciones mayores, que presentan cierta rigidez con los equipos de transferencia de minerales, se prefiere una configuración rectangular doble (dos rectángulos paralelos y adyacentes) con semicírculos en los extremos, donde se forma la pista de giro de los equipos de carguío y de descarga.

Pilas permanentes:

En este caso, las nuevas pilas se cargan sobre las anteriores.

La configuración de una pila existente puede tener cualquier geometría según la disponibilidad de espacio de cada lugar, pero cuando no hay restricciones topográficas, normalmente se usa una configuración rectangular, en que una nueva capa sólo se podrá colocar cuando haya concluido la lixiviación de la capa inferior que se debe cubrir.

Los procesos que se desarrollan en una planta de lixiviación de cobre desde el mineral de cobre hasta obtener cátodos de cobre de alta pureza, son los siguientes:

5.3.1. Conminución

El objetivo aquí, al igual que en una planta concentradora, es disminuir el tamaño de las rocas de mineral por medio de equipos diseñados para esta tarea.

En este caso la conminución se logra empleando chancadores primarios, secundarios y terciarios que permiten obtener el tamaño de partícula necesario para el proceso de lixiviación. Para el proceso de lixiviación, no es necesario realizar molienda.

Existen varios tipos de chancadores que obedecen a la misma descripción entregada en 5.2.1 donde se describe la conminución en una planta concentradora, por lo que se omite su descripción.

Para realizar la lixiviación, el proceso de chancado del mineral debe cumplir con tres objetivos:

- a) La reducción del tamaño de las partículas debe ser lo suficientemente pequeño para que la mayoría de las especies metálicas valiosas, en este caso cobre, queden expuestas a la acción de la solución lixivante.
En la práctica este tamaño lo define el estudio mineralógico del mineral y varía entre $\frac{3}{4}$ " (19 mm) y $1\frac{1}{2}$ " (38 mm).
- b) La reducción de tamaño de las partículas no debe producir partículas finas en exceso, esto para lograr la permeabilidad requerida de la pila.
- c) Lograr que todas las partículas estén dentro de un rango de tamaño previamente definido de acuerdo con el estudio específico realizado al mineral que se está tratando. Es decir se pretende lograr un mineral "mono granular" es decir, en donde todas las partículas son aproximadamente del mismo tamaño.

5.3.2. Aglomeración y curado

Durante el proceso anterior de chancado se genera un pequeño porcentaje de partículas finas que disminuye la permeabilidad del mineral cuando posteriormente es dispuesto en la pila. Por esta razón se hace necesario realizar un pre-tratamiento al mineral con el fin de lograr una buena permeabilidad y la solución lixivante pueda percolar a través de toda la pila.

Este tratamiento se denomina aglomeración, que consiste básicamente en lograr la adhesión de las partículas finas a las gruesas mejorando así el escurrimiento del líquido lixivante al interior de la pila. (*Eral-Chile. 2020. Aglomeradores*)

El proceso más simple de aglomeración consiste en humedecer el mineral con líquido, hasta alcanzar un contenido de agua tal que origine una tensión superficial suficiente, para que al entrar en contacto las partículas entre sí, los finos se adhieran a las partículas de mayor tamaño.

Por otra parte, en el mismo proceso, se agrega una dosis de ácido concentrado al mineral. Este ácido se distribuye uniformemente en el mineral en un equipo llamado tambor aglomerador. De esta manera se logra una dosificación a la medida de cada requerimiento dependiendo de las características del mineral que se está tratando. A este proceso de agregar ácido concentrado se lo denomina curado.

El objetivo principal del curado, es propiciar una condición favorable para el proceso posterior de lixiviación, ya que la aplicación anticipada del ácido permite que éste reaccione sobre la mayor parte de las partículas de mineral y eventualmente sobre todas las partículas, logrando una transformación de los compuestos minerales de cobre en sulfato de cobre.

La aglomeración y curado se realiza en un equipo denominado tambor aglomerador.

Tambor aglomerador: Es un cilindro de acero que gira accionado por un conjunto moto-reductor.

El equipo dispone en un extremo una canaleta de alimentación por donde ingresa el mineral a tratar, cañerías para dosificar el ácido y una caja de descarga para la salida del mineral aglomerado y salida de gases. (*Eral-Chile. 2020. Aglomeradores*)



5.3.3. Lixiviación en pilas

Después de concluido el proceso de aglomeración y curado (en el tambor aglomerador), el mineral es transportado mediante un sistema de correas transportadoras o por

camiones al frente de apilamiento, donde se conforma la pila. Una vez cargado el mineral, se somete a riego, que puede ser continuo o intermitente dependiendo del tratamiento seleccionado, durante un intervalo de tiempo determinado que corresponde al ciclo de lixiviación asignado al mineral que se está tratando. La solución lixiviante, en este caso ácido sulfúrico, aplicado en forma de riego en el coronamiento de la pila, escurre por los intersticios de la pila diluyendo los compuestos de cobre que a su vez son arrastrados por la solución hasta llegar a la base de la pila dando lugar a una solución enriquecida en cobre.

Para recolectar el fluido rico en cobre, se dispone una membrana, normalmente de HDPE en la base de la pila. La base de la pila se construye con una cierta pendiente, de modo que el fluido rico en cobre se conduce por gravedad a través de la base de la pila y se concentra en un punto de recepción.

La solución rica que sale de la pila se denomina PLS (Pregnant Leaching Solution - solución de lixiviación cargada) se acumula en una piscina (Pond de PLS) desde donde se bombea a la siguiente etapa de Extracción por Solventes.

Figura 13: Pila de lixiviación



Figura 14: Pond almacenamiento de PLS



5.3.4. Extracción por solventes

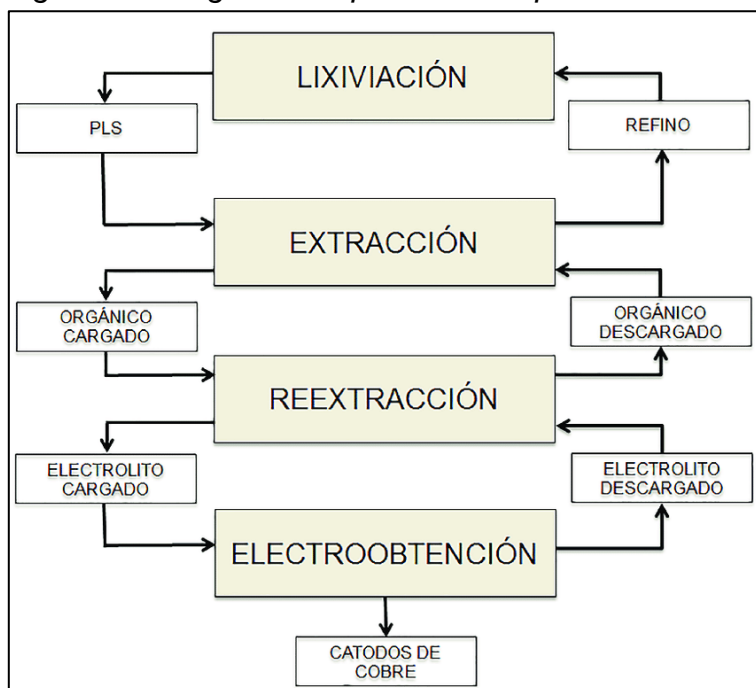
La siguiente descripción se basa en lo indicado en Energía en minería (s.f.) *Extracción por solventes*.

La extracción por solvente consiste en la transferencia del ion de cobre desde la solución rica (PLS) a una molécula orgánica (R) que está disuelta en un solvente que normalmente es kerosene. Durante la extracción, el ion de cobre se intercambia por un ion de hidrógeno. Luego el orgánico cargado (CuR_2) se trata en una solución concentrada de ácido sulfúrico (electrolito), proceso conocido como re - extracción. El electrolito rico así obtenido tiene una concentración de cobre muy superior en relación a la solución de salida de la lixiviación (PLS). Otro beneficio de este proceso es que el electrolito rico queda libre de impurezas. De esta forma, el cobre se transfiere desde la solución de lixiviación (PLS) que salió de la pila al electrolito.

La extracción y re - extracción son procesos de extracción líquido-líquido y ocurren en un equipo mezclador denominado mixer-settlers, donde ambas fases, la orgánica y la acuosa, se ponen en contacto en contracorriente durante el tiempo necesario para llevar a cabo el intercambio.

Al final del proceso, la solución agotada de cobre que sale del proceso de extracción, llamada refino, vuelve a la pilas de lixiviación, cerrando el ciclo de soluciones del proceso.

Figura 15: Diagrama de proceso completo LIX-SX-EW



Fuente: Navarro et al. (2018). *Caracterización de diluyentes usados en extracción por solventes*.

5.3.5. Electro obtención

El proceso de electro-obtención de cobre consiste básicamente en la transformación electroquímica del cobre disuelto en un electrolito en cobre metálico depositado en un cátodo, mediante la utilización de energía eléctrica proveniente de una fuente externa.

El proceso de electro obtención, se lleva a cabo en una celda electrolítica, donde circula continuamente el electrolito acuoso que contiene disuelto Cu SO_4 y H_2SO_4 . En la celda ocurren reacciones electroquímicas de óxido-reducción provocadas por la energía eléctrica.

En el cátodo el ion cúprico es reducido a cobre metálico por los electrones suplidos por la corriente.

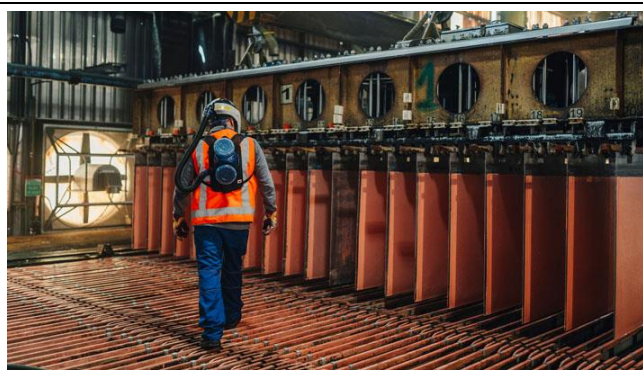
En el ánodo hay un déficit de electrones, por lo que se descompone el agua generando oxígeno y ácido sulfúrico.

La siguiente reacción representa lo ocurrido en este proceso:



(Codelco educa. Electroobtención)

Cátodos recién cosechados de la celda electrolítica.



Fuente: Portal minero

6. CONSTRUCTIBILIDAD

6.1. Definiciones

A continuación se indican algunas definiciones de constructibilidad que han sido establecidas por los organismos internacionales que abordan este tema.

Según el *Construction Industry Institute [CII] (2012)*, la constructibilidad se define como: "La optimización total del diseño de instalaciones, la secuencia de construcción, los recursos y el plan de trabajo en función de la experiencia, las habilidades y la tecnología disponibles en el momento".

El *Construction Management Association of America [CMAA]. (2015)*. describe la constructibilidad como:

"La facilidad y economía con la que se puede construir y operar un proyecto, teniendo en cuenta la disponibilidad de materiales, métodos de construcción y fuerza laboral".

En general, la constructibilidad implica diseñar y planificar un proyecto de manera que se minimicen los problemas y conflictos potenciales durante la construcción, optimizando la eficiencia, reduciendo los costos, asegurando la calidad definida, dando garantías en cuanto a seguridad a las personas, los equipos y el medio ambiente .

También existen algunas definiciones ampliadas de constructibilidad:

El "*Construction Industry Institute*" amplía la definición de constructibilidad como:

"El proceso de desarrollo de una estrategia de construcción y la identificación de los recursos necesarios para ejecutar ese plan. El proceso en cuestión implica la evaluación del diseño del proyecto en términos de practicidad, eficiencia y costos, así como la consideración de la secuencia de construcción, la logística y la experiencia del equipo de construcción".

El "*Construction Management Association of America*" amplía la definición en los siguientes términos:

"La constructibilidad abarca todo el ciclo de vida del proyecto, desde la concepción hasta la operación, pasando por el diseño y la construcción. Implica la creación de un enfoque colaborativo en el que los equipos de diseño y construcción trabajen juntos para optimizar la planificación y la ejecución del proyecto".

El "*Constructability Concepts and Practice*" de Paulson y Aouad. Entrega la siguiente definición:

Constructibilidad: "Es la capacidad de un proyecto de ser construido de manera efectiva, teniendo en cuenta los aspectos técnicos, económicos y logísticos. Involucra la revisión del diseño para identificar posibles problemas de construcción y la planificación de la construcción en una etapa temprana del proyecto".

6.2. Origen de la constructibilidad - Metodología Lean

Para comprender la génesis de la constructibilidad es necesario retroceder un poco en la historia y poner la vista en la industria automotriz que sentó las bases en esta materia. La metodología "Lean" es un enfoque de gestión que se popularizó gracias a Toyota y su sistema de producción conocido como TPS por su sigla en inglés Toyota Production System. (Ingeniería de calidad. 2023. *Historia del Lean Manufacturing – Origen del modelo Toyota Production System.*)

El término "Lean" se refiere a la eliminación de desperdicios y la optimización de procesos para aumentar la eficiencia y la calidad. En este contexto, el desperdicio no es la basura que se genera durante el proceso productivo, sino que desperdicio es todo aquello que se realiza sin que sea indispensable o al menos necesario para obtener el producto final.

El TPS se desarrolló en la década de 1940 y 1950 en Toyota, liderado por Taiichi Ohno y Eiji Toyoda. La filosofía central del sistema de producción toyota (TPS) consiste en identificar y eliminar desperdicios en los procesos de fabricación. Se entiende por desperdicios cualquier cosa que no agregue valor al producto final tales como: el exceso de inventario, tiempos de espera, traslados internos innecesarios, sobreproducción, defectos, etc.

Los principios fundamentales de la metodología Lean son:

- Valor
- Flujo de valor
- Flujo continuo
- Producción justa y oportuna
- Mejora continua.

El enfoque Lean ha sido adoptado por muchas otras industrias además de la industria automotriz debido a su efectividad para reducir costos, mejorar la calidad y aumentar la eficiencia en la producción y los procesos empresariales. En lo que sigue, una breve descripción de estos principios.

Valor

El concepto de Valor en la metodología Lean es fundamental para comprender y mejorar los procesos de una organización.

El "Valor" se refiere a aquello por lo que el cliente está dispuesto a pagar, es aquello que define el beneficio percibido por el cliente en un producto.

Identificar y comprender este valor es esencial para alinear los procesos y actividades de la organización de modo que estén en concordancia con las necesidades y expectativas del cliente.

Para determinar el valor desde la perspectiva del cliente, es necesario realizar un análisis detallado de sus requisitos, preferencias y saber las expectativas que tiene el cliente.

De esa manera es posible definir el producto con el fin de alcanzar las expectativas del cliente. Esto implica comprender cuáles son las características y funcionalidades que son realmente importantes para el cliente, aquellas por las que está dispuesto a pagar. Una vez identificado el valor, el objetivo es maximizarlo mientras se minimizan los procesos que no aportan valor al cliente, es decir se identifican y minimizan los desperdicios.

Flujo de Valor

El Flujo de Valor es otro concepto central en la metodología Lean, y se refiere a la secuencia de actividades necesarias para proporcionar un producto desde el inicio del proceso hasta la entrega al cliente final.

El primer paso para mejorar el flujo de valor es identificar, comprender y documentar todos los pasos necesarios para desarrollar el producto hasta su entrega al cliente final. Como parte de este proceso, se requiere:

- Identificar todas las actividades
- Establecer la duración de las actividades
- Identificar los cuellos de botella que se pueden producir
- Definir una estrategia eficaz para abordar los cuellos de botella y los problemas que se presenten
- Conocer y comprender la interacción que se produce entre las diferentes áreas durante el proceso completo

Una vez que se ha identificado la cadena de actividades necesarias para obtener el producto, se analiza cada paso para determinar si agrega valor desde la perspectiva del cliente.

Aquellas actividades que no agregan valor se consideran “desperdicio” y deben ser reducidas al mínimo posible.

Flujo Continuo

Después de identificar y eliminar los desperdicios, el siguiente paso es diseñar un flujo de trabajo continuo sin interrupciones.

Esto implica organizar las actividades de manera que el proceso productivo fluya de manera continua, coherente y eficiente a través de las diferentes etapas del proceso.

Producción Justa y Oportuna

El objetivo de “producción justa” es lograr que la cantidad producida sea igual a la cantidad requerida.

El objetivo de “producción oportuna” es que la entrega sea “justo a tiempo”.

El concepto de “Producción justa y oportuna” se integra en el flujo de valor para garantizar que cada componente requerido se produzca y se entregue en el momento preciso en que se necesite, ni antes ni después.

Esto ayuda a reducir el inventario, reducir los costos de almacenamiento y reduce los tiempos de espera.

Mejora Continua

A medida que se implementan mejoras y se eliminan los desperdicios, es importante monitorear y medir regularmente el rendimiento del flujo de valor para identificar nuevas oportunidades de mejora y mantener la eficiencia a lo largo del tiempo.

En resumen, la metodología Lean busca optimizar y mejorar el proceso de creación de valor para entregarlo al cliente, eliminando desperdicios, reduciendo tiempos de espera y garantizando un flujo de trabajo continuo y eficiente.

La metodología Lean se ha extendido más allá de la industria automotriz y ha sido adoptada en una amplia variedad de campos industriales y empresariales.

Algunos de estos campos incluyen:

Manufactura:

La metodología Lean se ha implementado con éxito en varios sectores de manufactura, incluyendo electrónica, industria aeroespacial, dispositivos médicos, productos de consumo, alimentos y bebidas, entre otros.

En cada uno de estos sectores, Lean se utiliza para mejorar la eficiencia de la producción, reducir costos y mejorar la calidad de los productos.

Servicios:

La metodología Lean se ha adaptado y aplicado con éxito en una amplia gama de servicios, incluyendo atención médica, servicios financieros, educación, hotelería, servicios de transporte y logística.

En estos campos, Lean se utiliza para optimizar los procesos, mejorar la satisfacción del cliente y eliminar desperdicios en la prestación de servicios.

Salud:

En el sector de la salud, Lean se ha utilizado para mejorar la eficiencia operativa en hospitales, clínicas y sistemas de atención médica.

Se aplican principios Lean para reducir los tiempos de espera, mejorar la calidad de la atención al paciente y optimizar los procesos administrativos y clínicos.

Desarrollo de Software:

En la industria del desarrollo de software, se ha adoptado la metodología Lean para mejorar la eficiencia en la entrega de proyectos, reducir el tiempo de desarrollo y aumentar la calidad del software.

6.3. Evolución de la metodología – Lean construction

La aplicación de la metodología Lean en la industria manufacturera se extendió de manera amplia, desde plantas para producir cemento y plantas para producir papel (papeletras) hasta la fabricación de todo tipo de electrodomésticos. El éxito observado en esta área de la industria motivó su aplicación en la construcción. (1Library. (s.f.). *Lean construction. Antecedentes históricos de la filosofía Lean.*)

La aplicación de la metodología Lean en la construcción de edificios comerciales e industriales comenzó a ganar popularidad en la última década del siglo pasado.

Fue precisamente en la década de 1990 cuando se empezaron a aplicar los principios Lean en la industria de la construcción, adaptando y transfiriendo los conceptos desarrollados en la fabricación de automóviles y la industria manufacturera en general, hacia la gestión de proyectos de construcción.

Los países que iniciaron la implementación del sistema Lean en la construcción fueron principalmente aquellos que poseen una industria de la construcción fuerte y una cultura empresarial orientada hacia la mejora continua y la eficiencia operativa.

Algunos de los países pioneros en la implementación del Lean Construction son: Estados Unidos, Reino Unido, Japón, Australia.

Se considera que Estados Unidos fue uno de los primeros países en adoptar la metodología Lean en la construcción. A finales de la década de 1990, se establecieron varios grupos y organizaciones en Estados Unidos dedicados a promover y aplicar los principios Lean en la industria de la construcción.

El Reino Unido también ha sido un líder en la implementación del Lean Construction. A principios de la década de 2000, varias empresas de construcción británicas empezaron a adoptar los principios Lean en sus operaciones, impulsadas por la necesidad de mejorar la eficiencia y reducir los costos en un mercado altamente competitivo.

Japón: Dado que la metodología Lean tuvo su origen en Japón, el país también ha sido un precursor en la aplicación de estos principios en la construcción. Las empresas japonesas han aplicado los conceptos Lean en la gestión de proyectos de construcción, buscando mejorar la productividad y la calidad en la industria de la construcción.

En Australia, la metodología Lean también ha sido adoptada en la construcción, especialmente en proyectos de infraestructura y edificios comerciales.

Estos países han sido pioneros en la implementación del sistema Lean en la construcción, y desde entonces, la metodología ha sido adoptada en muchos otros países en todo el mundo, con esto la industria de la construcción busca mejorar la eficiencia y la calidad en la ejecución de sus proyectos.

Otros países que han incorporado la metodología Lean en la construcción son: Canadá, Singapur, Alemania, Emiratos Árabes Unidos, China, Francia. En sudamérica la metodología Lean se aplica con cierta intensidad en Brasil y México.

6.4. Constructibilidad

La constructibilidad tiene como objetivo lograr que un proyecto pueda ser construido de manera eficiente, segura, en el plazo establecido y a un costo razonable.

El desarrollo de la constructibilidad implica conocer y evaluar factores importantes tales como la disponibilidad de materiales y equipos para la construcción, disponibilidad de los

equipos de proceso propios de la planta que el proyecto contempla instalar, la logística de transporte tanto a nivel local, nacional e internacional según corresponda, la planificación de la mano de obra, la secuencia constructiva y la optimización en el uso de recursos, entre los factores principales. El análisis de constructibilidad se basa en gran medida en la experiencia y conocimiento que se tenga de la actividad que se quiere realizar.

La constructibilidad es esencial para establecer que un diseño se puede llevar a cabo con éxito, es decir que se han identificado y evaluado las distintas estrategias constructivas, se han identificado los riesgos en cada caso y se tiene un plan para administrarlos. Se tienen los recursos técnicos y económicos necesarios para llevar adelante la construcción. Cuando el estudio del proyecto cubre estos aspectos, en general no se esperan grandes sorpresas ya que las potenciales dificultades que se puedan presentar se han identificado y se han abordado. Por otra parte se tiene un plan a desarrollar y los costos y plazos han sido evaluados.

Para llevar adelante la etapa de construcción de un proyecto minero completo, ya sea una planta concentradora de cobre nueva o una planta de lixiviación nueva, es necesario ejecutar una gran cantidad de actividades de construcción en cada una de las áreas principales de la planta tales como:

- Movimiento de tierras
- Obras civiles
- Montaje de estructuras
- Montaje de equipos mecánicos
- Montaje de cañerías
- Líneas de energía eléctrica

Sin embargo, para realizar estas actividades se requiere contar con una infraestructura mínima necesaria para abordar las obras principales de construcción, tales como:

- Oficinas en las áreas principales del proyecto
- Campamentos
- Casino (comedor y cocina)
- Salas de recreación, gimnasio
- Policlínico
- Talleres de mantención, talleres de fabricación
- Garita control de acceso
- Laboratorio de ensayos para hormigones)
- Bodega de materiales
- Bodega de muestras
- Redes de urbanización (agua potable, alcantarillado)
- Planta de tratamiento de agua potable
- Planta de tratamiento de aguas servidas

- Caminos de acceso, caminos de circulación interior
- Patios de almacenamiento de materiales (cañerías HDPE, cañerías de acero, estructura metálica, prefabricados de hormigón, etc.)
- Patios de almacenamiento para equipos de proceso (celdas de flotación, puentes grúa, bombas, cintas transportadoras, celdas electrolíticas, chancadores, etc.)
- Patios para estacionamiento de maquinaria, estacionamiento de buses, estacionamiento de camionetas.

La ejecución de estos trabajos acarrea un sin número de requerimientos específicos que establece la experiencia práctica, además se hacen presentes una cantidad importante de singularidades que son propias de cada proyecto, singularidades que obedecen a diversos factores tales como la ubicación de la obra, las condiciones de clima, altura geográfica (proyectos emplazados en la cordillera a más de 3.000 msnm), la extensión física de las instalaciones (pueden ser decenas de kilómetros), la cantidad de personas que trabajan en el proyecto (dotación que puede llegar a varios miles), la duración del proyecto (20, 30 o más meses de construcción), las interacciones que se producen entre los contratos de construcción y contratos de servicio con los que se comparten caminos, accesos y otros servicios, con los que suele haber interferencias.

Todo lo anterior y otras causas de variada especie, hacen que un trabajo específico a realizar pueda presentar dificultades de diversa índole.

Si se tiene una actividad determinada y el contratista de construcción sabe cómo ejecutarla, tiene los recursos necesarios para hacerlo, cuenta con el personal idóneo y la supervisión competente para dirigirlo, aún así se pueden presentar dificultades en su desempeño, ya sea a causa de imprevistos, un cambio significativo en las condiciones para ejecutar las obras u otras causas. Algunas serán de poca importancia y en consecuencia de fácil solución, pero otras pueden presentar un alto nivel de dificultad cuya solución puede llegar a ser de gran complejidad y eventualmente de alto impacto en el proyecto. Una causal recurrente de atrasos y dificultad en el desarrollo de una obra es la presencia de riesgos no controlados o que no están suficientemente controlados.

La idea general que se ha bosquejado anteriormente permite visualizar la necesidad de incorporar en las distintas etapas del proyecto una actividad importante que se denomina Constructibilidad.

Como se indicó anteriormente, existe más de una definición para el concepto de constructibilidad, las definiciones varían dependiendo del autor, sin embargo, todas apuntan a un objetivo común que es:

- a) Hacer que la planificación de un proyecto sea realizable, es decir que se pueda ejecutar la construcción en el plazo establecido, con los medios y recursos con los que se dispone. Se debe aclarar aquí que al hablar de los recursos con los que se dispone, evidentemente está asociado al presupuesto disponible, pero no sólo eso, también están involucrados los recursos técnicos tales como:

- ✓ Disponibilidad de especialistas en un área específica del proceso en cuestión.
- ✓ Disponibilidad de instrumentos, maquinaria y equipos especializados para la tarea.
- ✓ Disponibilidad de “experiencia” en un determinado proceso.

La experiencia puede no estar en Chile pero puede traerse desde el extranjero. También puede darse el caso que no haya antecedentes de esa experiencia específica en el mundo de la industria no minera.

- b) Una vez que se ha establecido que el proyecto es construible, la siguiente fase es identificar los puntos críticos y proponer estrategias y metodologías constructivas que faciliten o al menos favorezcan la construcción propiamente tal, aplicando la experiencia que se tiene en la ejecución de esa actividad, por cierto, adecuándose a las condiciones propias del proyecto. Todo lo anterior con miras a lograr un mejor desempeño en plazo, costo, calidad y seguridad durante la fase de construcción.

De manera que, durante la prefactibilidad, la factibilidad (en la que se desarrolla la ingeniería básica) y la ingeniería de detalles, resulta altamente conveniente incorporar un análisis de constructibilidad del proyecto que finalmente se implementará durante la construcción.

El desarrollo de la constructibilidad se justifica plenamente considerando que este análisis, que comienza en las etapas previas a la construcción y que se prolonga durante todo el proyecto hasta su plena aplicación durante la construcción, permite:

- Definir y establecer una metodología constructiva adecuada a las condiciones reales del proyecto como: la topografía del entorno, altura geográfica, condiciones de clima, disponibilidad de mano de obra especializada en la cantidad y calidad requerida, disponibilidad de equipos de construcción, infraestructura disponible (energía, agua, vías de transporte, comunicaciones, etc).
- Puede mejorar la eficacia de las soluciones propuestas y puede mejorar la eficiencia en su materialización.
- También puede optimizar el costo, plazo y la seguridad de las personas e instalaciones.

Como se ha dicho antes, el análisis de constructibilidad es aplicable en las etapas previas a la construcción, donde se desarrolla un análisis conceptual de la constructibilidad. Este análisis progresa conforme avanza el desarrollo del proyecto hasta desembocar en la fase de construcción en que su aplicación concreta aporta grandes beneficios al proyecto. Se puede decir que la mayoría de las ideas de constructibilidad desarrolladas durante las etapas previas a la construcción, nacen, se clasifican, se ordenan y se evalúan convenientemente para luego materializarse en la fase de construcción.

En algunos casos las acciones desembocan en los suministros del proyecto que requieren un proceso de manufactura en maestranzas y en fabricantes de equipos que actúan como proveedores.

En la mayoría de los casos las acciones se aplican durante la ejecución misma, es decir en la construcción.

6.5. Escenarios en que se aplica la constructibilidad

En general se puede decir que el concepto de constructibilidad es de muy amplia aplicación, en consecuencia, la constructibilidad es aplicable en casi la totalidad de trabajos de construcción, al menos desde un punto de vista teórico.

En la práctica la aplicación de la constructibilidad tiene un mayor beneficio en proyectos de mediana a gran envergadura, sin embargo aún en pequeños proyectos se logran beneficios mediante su aplicación.

En el capítulo 7 de este documento se hará referencia a casos reales de proyecto en que se ha realizado un estudio de constructibilidad aplicando los conceptos aquí enunciados.

6.6. Aplicación de la constructibilidad en las distintas fases de un proyecto

Como se indicó anteriormente en la definición de las fases a través de las cuales se desarrolla un proyecto para la minería del cobre en Chile, cada fase tiene objetivos específicos que se deben alcanzar de modo que al completar esos objetivos, es posible pasar a la fase siguiente. Consecuentemente, el análisis de constructibilidad puede y debe realizar su aporte en cada fase.

Con el fin de sistematizar el análisis de constructibilidad, se verá a continuación su aplicación de acuerdo con las actividades propias de cada fase de un proyecto.

6.6.1. Constructibilidad en la fase de prefactibilidad

La fase de prefactibilidad tiene tres tareas principales.

- a) Identificación de alternativas
- b) Evaluación de alternativas
- c) Selección de la alternativa a implementar (alternativa ganadora)

En la identificación de alternativas se proponen las posibles maneras de realizar el trabajo requerido, identificando las actividades a realizar y la secuencia constructiva. Por otra parte está la tarea de evaluar cada una de las alternativas propuestas. Esta evaluación se realiza en términos de plazo, costo, análisis de riesgo, mano de obra requerida, equipos y maquinaria necesaria, disponibilidad de insumos para su implementación, entre las más importantes. Esta evaluación se realiza para cada una de las alternativas de solución propuesta.

Finalmente se debe seleccionar la alternativa que será implementada. En la selección intervienen los aspectos más relevantes como: costo, plazo, riesgo, mano de obra entre otros. A cada concepto se asigna una cierta calificación de 0% a 100% y además a cada concepto se le asigna un cierto peso (nivel de importancia). La suma de los pesos corresponde al 100%. La calificación final de cada alternativa corresponde al promedio ponderado de la calificación de cada concepto por el peso asignado.

De este modo, la alternativa seleccionada (alternativa ganadora) pasa a formar parte integral del proyecto y se puede avanzar a la fase siguiente de factibilidad.

Identificación de alternativas

Para ilustrar la situación, se considera el caso (teórico) en que el problema a resolver tiene tres maneras diferentes de solución, es decir, se tienen tres diseños diferentes con los que se satisface el requerimiento del proyecto. Por otra parte, cada uno de esos tres diseños se pueden implementar de dos maneras diferentes.

Sean D1, D2 y D3 los tres diseños posibles de implementar y sean a1 y b1 las dos opciones posibles para el diseño D1, a2 y b2 las dos opciones posibles para el diseño D2, a3 y b3 las dos opciones posibles para el diseño D3.

Se tiene entonces las siguientes alternativas posibles:

Alternativa 1: Diseño 1 con opción a1 = D1a1

Alternativa 2: Diseño 1 con opción b1 = D1b1

Alternativa 3: Diseño 2 con opción a2 = D2a2

Alternativa 4: Diseño 2 con opción b2 = D2b2

Alternativa 5: Diseño 3 con opción a3 = D3a3

Alternativa 6: Diseño 3 con opción b3 = D3b3

Para cada una de las seis alternativas posibles se debe evaluar su factibilidad técnica, es decir se debe establecer si es o no construible.

En este análisis algunas combinaciones pueden no ser compatibles y en consecuencia no se pueden construir, por lo que serán eliminadas.

Evaluación de alternativas

Con las alternativas que son factibles de implementar, es decir con las que son construibles se pasa a la siguiente etapa que es evaluar cada una de ellas.

Esta evaluación es amplia y se aplican diferentes criterios tales como:

a) Riesgo: Se evalúan los riesgos que implica ejecutar cada combinación.

Se debe discriminar entre:

- Riesgo a las personas
- Riesgo a los equipos
- Riesgo al medio ambiente.

Además se debe realizar el análisis de riesgo por separado para:

- Riesgos en la fase de construcción
 - Riesgos asociados a la fase de operación durante la vida útil
 - Riesgos asociados a las tareas de mantenibilidad durante la vida útil
- b) Costo: Se evalúa el costo estimado que puede tener la implementación de cada una de las combinaciones que compiten entre sí.
- c) Plazo: Se analizan las actividades y la secuencia constructiva para establecer la duración que tendría el implementar cada alternativa.
- d) Dificultad constructiva : Se analiza y se evalúa el grado de dificultad que reviste implementar cada alternativa.
- e) Permisos: Se analiza qué permisos se deben tramitar ante las autoridades, la duración del trámite y la disponibilidad que se tiene de la información necesaria para tramitar el o los permisos requeridos.
- Se debe hacer nota aquí que para una determinada alternativa, por ejemplo la alternativa 4, puede ser que no se requiera gestionar permiso alguno. Otras alternativas en cambio pueden requerir uno o más permisos.
- Por otro lado se debe evaluar el tiempo y esfuerzo que implica tramitar el o los permisos en cuestión.
- Existen permisos que requieren muchos meses de tramitación, otros que tardan varias semanas y otros sólo algunos días.
- Por otro lado, algunos permisos requieren realizar previamente estudios amplios, otros requieren una determinada documentación del proyecto.
- Finalmente, se puede decir que los permisos también tienen un costo a evaluar, que viene dado principalmente por la cantidad de horas hombre del profesional encargado de la obtención de esos permisos.
- f) Afectación a la planta: Este criterio aplica a proyectos que se realizan en una planta que está en funcionamiento normal de producción. En este caso, con la planta en operación, se intenta por todos los medios posibles que el trabajo se realice durante las paradas de planta programadas para mantención de la misma. Sin embargo hay trabajos que requieren un plazo de ejecución mayor al tiempo de parada para mantenciones. En estos casos, se trata de establecer cuánto tiempo (horas, días, semanas) estará paralizada la operación de la planta.
- Es decir se trata de establecer el grado de afectación a la producción en base al tiempo perdido por detención de la planta originada por la ejecución de la alternativa de solución que está bajo análisis.

Selección de la alternativa a implementar

Para seleccionar la alternativa ganadora se establece la importancia de cada concepto analizado (costo, plazo, riesgo, etc.), es decir se define una ponderación para cada concepto, de modo que la suma de los pesos de cada criterio con el que se evaluará constituya el 100%.

La asignación de la importancia de cada concepto se logra tras un consenso entre los participantes del estudio. Los participantes del estudio pueden ser:

- Ingeniería, es decir quienes desarrollan el diseño
- Construcción, aquellos que van a ejecutar la construcción y montaje
- Operaciones, aquellos que van a trabajar en el proceso productivo durante la vida útil de la planta
- Mantenibilidad, aquellos que tendrán la responsabilidad de realizar las mantenciones programadas de la planta y las mantenciones o reparaciones que surjan durante la operación (reparaciones no programadas)
- Permisos. Cada alternativa puede acarrear la obtención de uno o más permisos. Ese permiso puede ser fácil o difícil de obtener.
El permiso se puede obtener en un plazo corto o largo.
El permiso puede impactar o no al programa maestro del proyecto.
- Medio ambiente. Una determinada alternativa puede afectar o no al medio ambiente. Si lo hace, se debe evaluar el grado de afectación y se deben establecer los controles necesarios para evitar el impacto al medio ambiente.
- Programación. Se debe estudiar cada alternativa de solución identificando las actividades a realizar, sus rendimientos y duraciones. Así, cada alternativa de solución se presenta con una determinada duración y una determinada interacción con el resto de las actividades. La interacción puede ser simple o compleja y su implementación puede afectar en mayor o menor medida la realización de otras actividades del proyecto.

La ponderación que se asigne a cada concepto es variable y obedece a las condiciones y características específicas de cada caso.

Un punto de partida puede ser asignar el mismo peso a cada concepto, sin embargo, en la mayoría de los casos se observa que ciertos criterios son más gravitantes que otros.

Ejemplos:

- Se tiene un presupuesto muy ajustado para ejecutar el proyecto, luego el concepto costo tendrá mayor importancia.
- Se tiene un presupuesto holgado para la ejecución, luego el concepto costo tendrá menor importancia. Eventualmente el costo podría no ser considerado como criterio de evaluación.
- La ejecución se requiere con urgencia, luego el plazo tendrá mayor importancia.
- El plazo de ejecución tiene mucha holgura, luego el plazo tendrá menor importancia. Eventualmente, el plazo podría no ser incluido como criterio de evaluación.
- Se visualiza un riesgo alto con consecuencia grave a las personas. Ninguna empresa seria puede restar importancia a la seguridad de las personas, luego el concepto de seguridad tendrá mayor importancia. Por otro lado, se deberán tomar las acciones necesarias y suficientes para controlar el riesgo y llevarlo a un nivel tolerable.

- En el estudio de impacto ambiental, que recién comienza, se visualizan complejidades que requieren soluciones robustas en materia de medio ambiente. Luego la o las alternativas de solución en estudio que tengan conflicto con criterios de medio ambiente deberán ser cuidadosamente evaluadas ya que podrían afectar negativamente en el estudio de impacto ambiental (EIA) y con eso poner en peligro la obtención de la Resolución de Calificación Ambiental (RCA). La RCA es un requisito para que el proyecto pueda avanzar a la siguiente etapa de Factibilidad.

Finalmente después de evaluar cada una de las alternativas frente a cada uno de los criterios de evaluación, se obtiene una puntuación y en consecuencia un ranking para cada alternativa antes identificada como construible. Este método permite ordenar las alternativas, de mayor a menor, para dejar las dos o tres mejores alternativas para la decisión final.

En algunos casos de poca complejidad se toma la decisión directamente según el ranking, escogiendo como solución ganadora la primera en el ranking, es decir la que logró mejor puntuación. En otros casos, la opción ganadora se selecciona de entre las tres mejores, entendiendo que cada una de las tres opciones cumple las exigencias y resuelve el problema inicial motivo de este estudio.

Normalmente en estos casos prevalecen criterios que no son técnicos, sino que obedecen a políticas de la empresa o condiciones de mercado o son parte de una negociación para contratar el servicio.

Se da también el caso en que dos opciones (distintas entre sí) poseen el mismo puntaje final, o sus puntajes son muy similares y en consecuencia las dos alternativas son equivalentes según los criterios de evaluación establecidos.

En este caso habrá que buscar un elemento diferenciador para la selección. El elemento diferenciador puede ser:

- Menor cantidad de personal directo requerido dado que así se minimiza la cantidad de HH expuestas a riesgo durante la construcción
- Menor dificultad constructiva (diseño más simple). En este caso se favorece el concepto de seguridad para los trabajadores, ya que se espera que una menor dificultad constructiva disminuya la probabilidad de ocurrencia de un evento no deseado (accidente)
- Uso de equipos de construcción que estén disponibles en el mercado.
- Suministros con menor plazo de entrega.

6.6.2. Constructibilidad en la fase de factibilidad

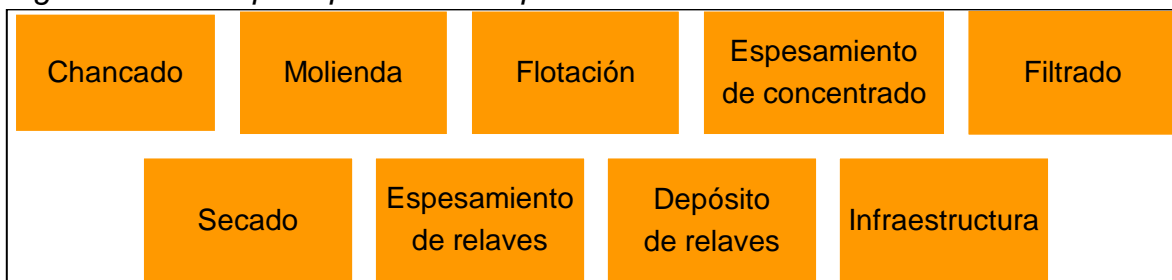
Como se indicó antes, durante el desarrollo de la fase de factibilidad el proyecto debe quedar con un avanzado nivel de definición en todas las actividades relevantes del proyecto. En esta fase se desarrolla la ingeniería básica que define el tamaño y capacidad de las instalaciones de proceso, se definen los equipos de proceso de la planta y la infraestructura necesaria.

Por otra parte durante el desarrollo de esta fase debe quedar definida la estrategia constructiva, las condiciones de transporte y acceso al proyecto, las áreas físicas que serán destinada para establecer la infraestructura y en general todos los planes de acción conducentes a materializar la construcción.

Al final de esta fase deben quedar claramente definidos los límites de las grandes áreas físicas del proyecto y de las sub áreas que las componen.

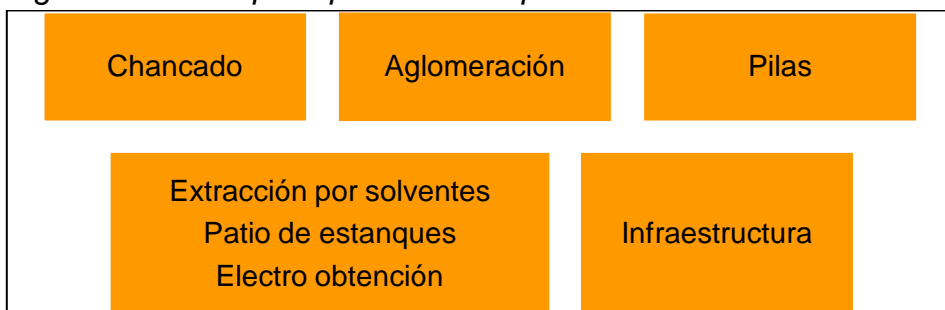
A continuación un ejemplo típico de división de áreas y sub áreas:

Figura 16: Áreas principales de una planta concentradora



Fuente: Elaboración propia

Figura 17: Áreas principales de una planta de lixiviación



Fuente: Elaboración propia

La fase de factibilidad concluye con un informe que acredita el nivel de maduración que ha alcanzado el proyecto. Al finalizar esta fase se tiene un valor estimado de la inversión total del proyecto, se tiene un programa maestro y el programa de construcción ligado a los programas de suministro de equipos y suministro de materiales.

Para abordar conceptualmente la construcción, es decir para planificar su futura ejecución, se debe resolver una gran cantidad de aspectos operativos y funcionales del proyecto, más allá del diseño de ingeniería de la planta propiamente tal. Es aquí donde participa activamente la constructibilidad desarrollando múltiples tareas.

En lo que sigue se enuncian las principales tareas en que colabora la constructibilidad:

- a) Caminos, accesos y transporte
 - Verifica la existencia de caminos de acceso disponibles y aptos para los requerimientos del proyecto.

- Verifica que se ha establecido un control de acceso seguro (garita control de acceso) y un plan de vigilancia en las áreas de trabajo.
 - Verifica que se tiene disponibilidad de transporte para el personal desde los lugares de alojamiento hacia el sitio del proyecto.
 - Verifica la estrategia de transporte de cargas especiales como: equipos con sobre dimensión (carga ancha), equipos con sobrecarga en que se requieran unidades de transporte especiales tales como: Trailers modulares autopropulsados y trailers de ejes múltiples que permiten distribuir la carga en muchos puntos disminuyendo el peso en cada eje para no dañar puentes y carreteras.
- b) Áreas para establecer la infraestructura necesaria
- Verifica la existencia de áreas disponibles para instalación de faenas durante la fase de construcción
 - Verifica que existan áreas disponibles y aptas para el almacenamiento de equipos y materiales, es decir, para establecer patios de almacenamiento de materiales y patios de almacenamiento de equipos.
 - Verifica que existe disponibilidad de alojamiento para el personal que ejecutará las primeras obras (obras tempranas) tales como casas para arriendo, hostales, hoteles, etc.) durante la fase de construcción.
 - A partir de las estimaciones de fuerza laboral, es decir a partir de la curva ocupacional estimada, se dimensiona y planifica el campamento de construcción, cuando el proyecto así lo requiere. Es decir se determina la cantidad y tipo de dormitorios para alojamiento en las distintas categorías. Trabajador, capataz, supervisor, superintendente.
 - Verifica la disponibilidad de áreas para establecer botaderos.
 - Identifica los espacios adecuados para establecer bodegas, talleres, patios, instalaciones de faena de contratistas, campamentos, oficinas, etc.
- c) Solución de interferencias y desarrollo de obras tempranas
- Revisa la estrategia para el desarrollo de las obras tempranas.
 - Identifica las interferencias físicas que existen para la ejecución del proyecto
 - Confirma que existe un plan para eliminar o superar las interferencias identificadas. En caso contrario, colabora para establecer ese plan.
 - En el caso de interferencias que no se pueden eliminar ni superar, gestiona las modificaciones de ingeniería necesarias para superar las interferencias existentes
 - Identifica las interferencias que afecten al traslado de equipos mayores
- d) Desarrollo de la ingeniería del proyecto
- Verifica que existe un plan para llevar adelante la constructibilidad de un proyecto previo a la construcción

- Verifica que el plan de constructibilidad se indica explícitamente en el Plan de Ejecución del Proyecto PEP y que el plan es factible, es decir que es aplicable al proyecto
 - Difunde a todo el proyecto el concepto principal de constructibilidad, entendiéndola como: “La integración del conocimiento en construcción y la experiencia en las fases de planificación, diseño, adquisiciones y construcción del proyecto”. La difusión se realiza a través del PEP (Plan de Ejecución del Proyecto) y a través del Plan de Constructibilidad del proyecto.
 - Verifica que estén disponibles oportunamente las personas idóneas para ejecutar el análisis de constructibilidad en cada caso específico
 - Verifica que el alcance del diseño está claramente definido
 - Revisa los planos de disposición general y layout, y confirma su factibilidad para la construcción
 - Revisa activa y periódicamente los layout del proyecto (planos de disposición)
 - Verifica que se han resuelto todos los temas críticos de ingeniería que pueden poner en riesgo la ruta crítica del proyecto
 - Verifica que los planos de detalles estén completos y que se han resuelto todos los puntos pendientes
 - Revisa y confirma que existe un listado de especificaciones técnicas del proyecto completo
 - Revisa que las especificaciones técnicas estén completamente desarrolladas y se hayan resuelto los puntos pendientes
 - Revisa y confirma que hay plena consistencia entre las especificaciones técnicas en relación a los criterios de constructibilidad
- e) Permisos y procedimientos
- Verifica que la gestión de permisos aborda oportunamente los permisos de construcción e instalación de faenas y que la gestión está bajo control
- f) Programa de construcción
- Revisa que haya consistencia entre el programa de construcción, el programa de suministro de equipos y el programa de suministro de materiales críticos. Paralelamente se revisa la disponibilidad de empresas contratistas especialistas y disponibilidad de mano de obra especializada.
 - Verifica la concordancia del programa de construcción en relación a la eliminación o superación de interferencias
 - Verifica que las duraciones asignadas a las actividades del proyecto son factibles y realistas en función de las condiciones particulares del proyecto tales como:
 - ✓ condiciones climáticas (temperatura, presencia de nieve, viento, humedad relativa del aire, polución, tormenta eléctrica, etc.)
 - ✓ condiciones de altura geográfica

- Revisa los rendimientos utilizados en el programa maestro para las actividades de construcción
 - Verifica que los Hitos de Construcción estén en concordancia con el Plan de Ejecución del Proyecto.
 - Verifica que el desarrollo del Staffing Plan, es decir el equipo de profesionales que va a supervisar los contratos de construcción, esté en concordancia con el programa del proyecto y con el PEP
 - Para el caso de montaje de equipos especiales o de gran complejidad y para actividades de construcción críticas, verifica que existe un plan especialmente dedicado a estas tareas con un líder responsable. Lo anterior con el fin de alcanzar el nivel de desarrollo necesario de planificación y análisis de constructibilidad que permita enfrentar de buena forma la construcción.
 - Confirma que las holguras estimadas para los equipos mayores son aceptables considerando su proceso de fabricación y la criticidad del montaje.
 - Revisa y confirma que las holguras estimadas para la movilización de los contratistas son aceptables en relación a:
 - ✓ Instalación de faenas
 - ✓ Traslado del personal según curva ocupacional
 - ✓ Ejecución de procedimientos de calidad
 - ✓ Implementación de procedimientos de trabajo y procedimientos de seguridad en el trabajo.
 - Colabora en la identificación de los procesos críticos del proyecto
- g) Costos
- Colabora en la revisión de impacto en costo y duración que puedan tener los métodos constructivos especiales que se van a emplear
 - Verifica la adecuada asignación de rendimientos de mano de obra y equipos en las actividades de construcción para conformación de presupuestos
- h) Construcción
- Verifica que se dispone de la organización necesaria para la planificación y ejecución del proyecto en materias de construcción y análisis de constructibilidad
 - Revisa y verifica que se identifiquen los métodos constructivos más adecuados que sean aplicables al proyecto
 - Revisa y confirma que se han realizado los estudios de maniobra necesarios para montajes especiales
 - Analiza y verifica que los métodos constructivos que se proponen tendrán una buena o al menos aceptable productividad
 - Estudia la posibilidad de utilizar prearmados y prefabricados. Cuando corresponde, impulsa su implementación
 - Realiza un análisis de los requerimientos de hormigón en el proyecto completo y establece:

- ✓ Una ubicación de la planta de hormigón que sea conveniente
- ✓ La capacidad de fabricación de la planta (m³/hr), es decir define el tamaño de la planta de hormigón
- ✓ El nivel de automatización requerida de la planta (manual, semi automática, automática)
- ✓ Dimensiona la flota de camiones mixer necesaria para el hormigonado a lo largo de toda la fase de construcción. Programa de camiones
- Colabora en la estimación de las cubicaciones de obra
- Revisa y se asegura que existe una metodología y sus respectivos procedimientos para llevar a cabo las pruebas de construcción.
- Participa en la definición detallada de los requisitos necesarios para establecer que se ha concluido la construcción, lo anterior es necesario para que cada sistema pase a la fase de precomisionamiento

6.6.3. Constructibilidad en la fase de ingeniería de detalles

Dado que en el desarrollo de proyectos mineros en Chile participan empresas norteamericanas, canadienses, australianas y algunas europeas, Chile se ha incorporado al uso de la metodología Lean durante el desarrollo de la ingeniería de detalles para los proyectos de la minería.

Al aplicar los conceptos de la metodología Lean durante el desarrollo de la ingeniería de detalles de un proyecto minero, se desprenden naturalmente algunos lineamientos y recomendaciones como los que se indican a continuación:

Definiciones de Valor

Definición precisa de los objetivos que tiene el cliente

Definición de los requisitos que debe cumplir el proyecto para cumplir los objetivos del cliente

Definición detallada de los resultados que se esperan del proyecto.

Identificación y reducción de desperdicios

Identificar y eliminar actividades que no agregan valor, tales como: duplicar verificaciones de ingeniería, implementación de sistemas redundantes donde no son necesarios, demoras por la espera de aprobaciones y en general, la realización de toda tarea innecesaria.

Optimizar el flujo de trabajo: Se deben diseñar procesos de trabajo eficientes que minimicen los tiempos de espera y maximicen la productividad. Esto implica organizar las actividades de manera secuencial y eliminar cuellos de botella en el flujo de trabajo.

Diseño para la fabricación y la construcción: La metodología Lean recomienda realizar el diseño de productos teniendo en mente el proceso de fabricación y muy especialmente teniendo en mente el proceso constructivo.

Bajo condiciones normales de trabajo, en que no hay grandes dificultades, la ingeniería desarrolla el diseño y la construcción lo ejecuta, es decir, materializa la obra. Cuando la

dificultad constructiva es relevante, y puede llegar a ser muy relevante, lo que se espera es que la ingeniería desarrolle un diseño que facilite lo más posible el proceso constructivo teniendo en cuenta los recursos disponibles.

En otras palabras, es deseable que la ingeniería entregue las mayores facilidades que sea posible otorgar al proceso constructivo. El motivo es bastante poderoso, el costo de la construcción es muy superior al costo de desarrollar ingeniería, luego cualquier mejora realizada en la ingeniería de detalles con miras a favorecer el proceso constructivo, es ampliamente recompensada por el menor costo que tendrá esa actividad de construcción. En consecuencia, se espera que durante la Ingeniería de Detalles, se satisfagan aspectos como: la facilidad de montaje, la disponibilidad de materiales, la eficiencia en la construcción y el adecuado resguardo de los aspectos de seguridad.

Gestión eficiente de la cadena de suministro: Es importante establecer una cadena de suministro eficiente para garantizar la disponibilidad oportuna de materiales y equipos. La metodología Lean enfatiza la colaboración con proveedores confiables y la optimización de los tiempos de entrega.

Enfoque en la calidad y la prevención de errores: La metodología Lean promueve la calidad y la prevención de errores desde el inicio en lugar de la detección y corrección posterior. Durante la Ingeniería de Detalles, se deben establecer controles de calidad efectivos y procesos de revisión para garantizar que el diseño sea acertado y completo.

Gestión de riesgos proactiva: Se deben identificar y gestionar proactivamente los riesgos potenciales del proyecto durante la fase de Ingeniería de Detalles.

La metodología Lean propone abordar los riesgos de manera temprana y establecer planes de contingencia para mitigar su impacto en el proyecto.

Los lineamientos y recomendaciones aquí señalados son algunas de las acciones específicas que se desprenden de la aplicación de la metodología Lean en el desarrollo de un proyecto. Estos lineamientos y recomendaciones contribuyen a mejorar la eficiencia, reducir los costos y aumentar la calidad en el desarrollo y ejecución de proyectos mineros.

Aplicación de conceptos lean en la ingeniería de detalles

Cuando la ingeniería de detalles del proyecto está bastante avanzada es práctica habitual, llevar adelante un proceso de revisión y racionalización del proyecto, cuyo fin específico es quitar todo aquello de lo que se puede prescindir en el proyecto.

Si se considera que cada profesional involucrado en el diseño del proyecto en sus distintas especialidades se toma un cierto nivel de resguardo para garantizar la confiabilidad, duración y eficacia de su diseño en particular.

Al extender esta dinámica a la mayoría de los diseños específicos, es fácil comprender que el proyecto “se robustece” durante su desarrollo, esa robustez es aportada por quienes desarrollan los diseños específicos de cada una de las partes que componen el proyecto.

La práctica muestra que cuando el desarrollo de la ingeniería de detalles está bastante avanzada, se realiza esta revisión, cuyo resultado es la eliminación de algunas instalaciones redundantes, la reducción de otras al nivel realmente necesario. Se simplifican algunos procesos, se optimizan otros diseños, se evita doble verificación cuando es posible hacerlo, buscando la funcionalidad y optimización del proyecto.

Para materializar esta revisión y reducción de todo aquello de lo que se puede prescindir en el proyecto se hace necesario abordar el proyecto en forma integral, con foco en las actividades más relevantes.

En este punto la aplicación de los conceptos Lean puede constituir un aporte significativo para asegurar los objetivos del proyecto, que en términos generales, buscan satisfacer las necesidades que ha establecido el cliente. Así, se pueden materializar los principios de Valor, Flujo de Valor y Mejora continua.

Cuando se aplican estos principios correctamente, es posible esperar un mejor desempeño durante la construcción mejorando plazos de ejecución, en otros casos mejorando costos de construcción, en otros casos mejorando condiciones de seguridad durante la construcción y no pocas veces logrando una mejora en varios aspectos simultáneamente.

6.7. Asignación del contratista para la ejecución

Este análisis consiste en determinar a qué contratista conviene asignarle la tarea.

Esto va a depender de varios aspectos:

- a) El costo de la tarea. Si hay una diferencia significativa de precio y el oferente más barato ofrece condiciones técnicas aceptables para ejecutar la tarea se tiene un criterio de decisión para asignar la tarea, en este caso, al más barato.
- b) El tiempo en que se debe realizar. Si se requiere en forma temprana, se asignará al contratista que entre primero al área de trabajo. Si la fecha de ejecución tiene amplia libertad, se puede tomar el más barato o bien al que es especialista en la materia o elegir otro criterio para asignar esa tarea.
- c) Calidad/Experiencia. En ocasiones un mismo trabajo, aún cuando lo pueden realizar dos contratistas, hay una preferencia por la experiencia y hasta cierto punto por la expectativa que se tiene de la buena ejecución que un contratista experimentado en el trabajo específico puede ofrecer con respecto a otro.
- d) Para mantener la responsabilidad de la buena ejecución y desempeño de un sistema en las manos de un solo contratista y así la responsabilidad no se diluye.
- e) Otros factores. Algunos otros factores pueden ser:
 - i) Existe sólo un contratista idóneo para realizar el trabajo
 - ii) Existe sólo un contratista que está habilitado para una determinada tarea.
Ejemplo: Se requiere realizar excavación masiva en roca y sólo una empresa contratista tiene la autorización vigente para realizar la tronadura.
 - iii) Condiciones o criterios establecidos en el proyecto cuya aplicación conduce a tomar a un determinado contratista.

6.8. Criterios para el análisis de constructibilidad en la ingeniería de detalles

En lo que sigue se proponen algunos criterios de trabajo para realizar el análisis de constructibilidad comenzando con la búsqueda de falencias en un proyecto cuando se está desarrollando la ingeniería de detalles.

Cuando se habla de búsqueda de falencias en un proyecto, lo que se pretende es “encontrar los errores e inconsistencias que tiene el proyecto”. Se refiere a:

- Identificar aspectos mal diseñados
- Identificar diseños que no son suficientemente compatibles con el resto del proyecto
- Identificar diseños demasiado engorrosos
- Identificar diseños poco versátiles que tienen un buen desempeño sólo en casos típicos de operación convencional, pero que en caso de emergencia no operan en forma adecuada o simplemente no operan, generando una falla operacional del sistema o de la planta en cuestión
- Identificar diseños que dificultan en gran manera el proceso constructivo
- Identificar diseños que encarecen demasiado la construcción
- Identificar diseños que durante la construcción arrastran consigo riesgos muy altos y difíciles de controlar

En general no existe una metodología específica para abordar la búsqueda de problemas e inconsistencias del proyecto, dado que cada proyecto tiene sus características y sello propios. En la práctica se asigna esta tarea a profesionales con experiencia en el desarrollo de proyectos, pero que posean también suficiente experiencia en la ejecución de proyectos en terreno.

Pero hay conceptos fundamentales que están presentes en todo proyecto, esto permite establecer algunos criterios generales para abordarlo. A continuación se enuncian algunos de ellos:

6.8.1. Revisión de completitud

Lo primero es revisar que el alcance de trabajo de cada contrato aborda efectivamente las tareas que se deben realizar.

En general la omisión de una parte del alcance de trabajo se da poco, asumiendo que quienes realizan este trabajo son profesionales experimentados en la especialidad de la que se trate. Sin embargo, esto no impide que la búsqueda comience revisando la “completitud” del proyecto, es decir que el proyecto aborda la totalidad de los requerimientos de éste.

Si se considera el proyecto como un todo, ese todo se va a materializar a través de la ejecución de varios contratos. Asimilando los contratos de construcción del proyecto como “las partes del proyecto” entendemos que la suma de las partes debe dar como resultado el proyecto completo.

Permitámonos por un momento considerar el proyecto completo como el todo y ese todo es una maqueta para armar que se divide en muchas partes pequeñas.

En el juego de la maqueta se trata de “armar” la figura que se muestra en la ilustración de la tapa del juego. La tarea es unir las pequeñas partes y hacerlas coincidir para conformar la figura completa.

Pregunta: ¿Es posible aplicar este concepto en el desarrollo de un proyecto de construcción?. En cierto modo sí es aplicable pero no resuelve el problema completo, sino sólo una parte de él.

Es de sentido común pensar que la suma de las partes da como resultado el proyecto completo, pero en la práctica esto no siempre se logra debido a que durante el desarrollo del proyecto las personas que diseñan no han concebido todas las partes necesarias y han quedado partes o aspectos no abordados en el diseño que, al ejecutar la construcción del proyecto, se manifiestan como “faltantes”, acusando la incompletitud del proyecto.

Por lo tanto, un buen criterio es verificar que todas las tareas que se deben hacer forman parte del alcance de trabajo de algún contrato. Si se detecta que un trabajo o una actividad no está incluida en ninguno de los contratos, se agregará esa actividad al contrato correspondiente.

6.8.2. Verificación de no duplicidad

Un segundo nivel de revisión de este mismo concepto es verificar que la actividad no esté duplicada. Se da el caso a veces que una actividad está incluida como alcance de trabajo en dos contratos. Una vez confirmada la duplicidad, se elimina de uno de los contratistas. La decisión de cual contrato debe incorporar esta tarea faltante puede llegar a ser un tema de discusión importante ya que existirán ventajas y desventajas al asignar la actividad a uno u otro contrato y será motivo de otro análisis establecer a qué contrato es más conveniente asignarla.

La decisión se basa en un análisis que contempla varios aspectos:

- Experiencia de la empresa contratista
- Capacidad técnica de la empresa contratista para ejecutar la tarea en cuestión
- Capacidad económica de la empresa que será asignada
- Disponibilidad en el tiempo de la empresa ejecutora

La temporalidad juega un rol importante, ya que un trabajo que se requiere al inicio del proyecto, se tendrá que asignar entre las empresas contratistas que tienen sus contratos activos al inicio de la construcción.

Veamos el siguiente ejemplo:

Se requiere construir un estanque metálico para almacenar agua para la construcción.

Es probable que el contratista más indicado técnicamente para su ejecución no tenga un contrato activo al inicio del proyecto, es decir, no está disponible y entrará en escena

varios meses más tarde. En tal caso, el trabajo se asignará a alguno de los contratistas que estén presentes, con contratos vigentes en esa etapa inicial del proyecto.

6.8.3. Revisión en la frontera de los contratos

Esta revisión consiste en “recorrer la frontera de los contratos”; esto permite identificar una cantidad muy significativa de potenciales problemas.

Resulta interesante comentar aquí que esa “frontera de contratos”, es decir, la línea que divide el término de un contrato y el comienzo de otro contrato; puede tener más de un enfoque para su definición:

a) Frontera física (límite físico de construcción)

Es la más fácil de definir porque, en general, es fácil de visualizar la extensión física del contrato.

Ejemplo: El alcance de trabajo del estanque de almacenamiento de agua termina en la válvula de descarga. A partir de esa válvula existe una tubería que conduce el agua a su próximo destino. En este caso, la tubería forma parte de otro contrato.

Análisis del caso:

Pregunta: ¿La válvula puede quedar a la intemperie o debe quedar resguardada dentro de una cámara?.

Si debe quedar al interior de una cámara. ¿Quién construye la cámara? ¿El contrato del estanque? o ¿el contrato de la cañería que comienza después de la válvula?

Pregunta: ¿A qué contratista conviene asignar la ejecución de la cámara?
¿Al contratista que ejecuta la primera obra? o ¿a otro en particular?

Un criterio razonable puede ser que la cámara la ejecute el contratista que construye el estanque, así la válvula queda resguardada.

Pregunta: Una vez definido quien construye la cámara, en este caso el contratista del estanque, el diseño debe “dejar” una pasada de tubería en la pared de la cámara de hormigón para que el segundo contratista que instala la cañería pueda hacer la acometida y conexión a la válvula sin tener que picar el muro para ingresar a la cámara existente.

Si la ingeniería de detalles logra visualizar estos detalles y los incorpora correctamente en su diseño, la construcción fluye sin problemas.

Por el contrario si no está definida la cámara, ni quien la construye, se deberá abordar como un “trabajo adicional” durante la construcción.

b) Frontera de Ingeniería (límite asociado al diseño)

En general, para el desarrollo del diseño de ingeniería se hace una división por áreas, de modo que en una planta concentradora se tiene, por ejemplo:

Molino SAG, molino de bolas, zona de reactivos, celdas de flotación, espesador de concentrado, espesador de relaves, depósito de relaves, etc.

La búsqueda de incompatibilidades se realiza en la frontera de las áreas, dado que normalmente el desarrollo de cada área lo realizan equipos diferentes y pueden ocurrir discordancias en el punto de encuentro de las respectivas áreas. Esto ocurre muchas veces porque cada equipo se basó en “supuestos” distintos, dando origen a incompatibilidades. De ahí la necesidad de revisar la compatibilidad y completitud del diseño en la frontera de las áreas, específicamente en los puntos de transición de un área a otra.

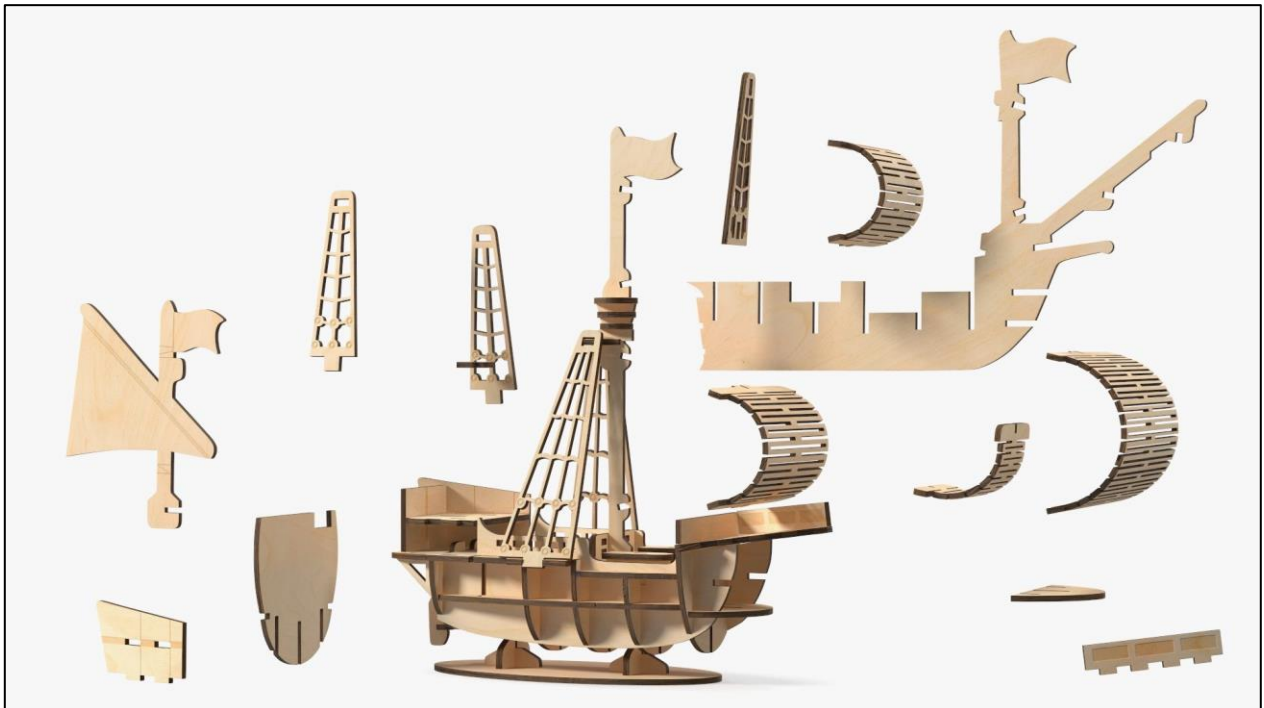
c) Frontera por sistemas

En ocasiones la división se debe realizar en función de “sistemas” que prestan un servicio específico a la planta. En ocasiones el sistema en cuestión pasa a través de las áreas físicas y a través de las áreas de proceso. Un ejemplo de eso es la sala de control de una planta que monitorea con cámaras y sensores de todo tipo, todos los parámetros claves a lo largo de todo el proceso de la planta. La mayor parte de esa información se monitorea en tiempo real y se reporta directamente a la sala de control donde se supervisan todas las etapas del proceso.

Volviendo al símil de la “maqueta para armar” en que una figura o ilustración se corta en muchas partes pequeñas y la tarea consiste en hacer calzar las partes para conformar la figura original.

Si bien la idea es, en principio, la misma, es decir tomar las piezas y hacer que calcen para armar el todo, existe una diferencia fundamental y es que en el juego de la maqueta desde un principio se tiene la figura completa, luego se corta y sólo falta “armarla” porque todas las piezas de la figura “están disponibles” para armarla completamente.

Figura 18: Maqueta para armar



En el desarrollo de un proyecto la situación es algo diferente. La idea básica es construir las partes y hacerlas calzar para armar el todo. La dificultad radica en que cada parte hay que concebirla, desarrollarla, calcularla y llevarla a una forma de proyecto que posteriormente pueda ser construida en terreno.

Pero no tenemos una planta concentradora de cobre terminada que debamos desmantelar para luego volverla a armar. Lo que se debe hacer es diseñar una planta concentradora para luego construirla y finalmente ponerla en operación.

La tarea es “definir” las partes con todos los componentes que se requieran para luego “construir” cada una de esas partes.

Figura 19 Maqueta armada



Una breve reflexión con respecto a este proceso de construir las partes para luego hacer que calcen, permite ver lo fácil que es dejar fuera algún elemento necesario.

Dicho de otra manera, es difícil concebir y generar todos los detalles del proyecto con cada una de sus partes de manera completa, compatible y correcta.

La práctica muestra que en la “frontera de los sistemas”, es más difícil establecer los requerimientos en forma precisa y en consecuencia, en esa frontera es más probable tener hallazgos de incompletitud del alcance, de duplicidad de alcance o de una definición imprecisa del alcance tanto en su límite físico (límite de batería) como en la funcionalidad del sistema.

La revisión en la frontera de los contratos permite identificar trabajos específicos, que no se han incluido en ningún contrato. Permite identificar trabajos que están duplicados, es decir se han incluido en dos contratos adyacentes. Permite identificar incompatibilidad de diseño entre una parte y la parte adyacente.

En ocasiones estos hallazgos lucen de poca importancia y en consecuencia no se aborda una solución detallada y completa.

Cuando esto ocurre, el pequeño problema que tiene el proyecto en su etapa de diseño se transforma en un odioso problema que se debe resolver “en terreno” a un costo varias veces superior al que habría tenido si en la etapa de diseño se hubiese abordado correcta y completamente.

6.9. Clasificación, evaluación y ranking de los hallazgos

Después de realizar el proceso antes descrito de revisar el proyecto en la búsqueda de incompatibilidades o incompletitud, se tendrá una lista de hallazgos que deben ser claramente identificados y luego deben ser clasificados de mayor a menor importancia.

Lo de mayor o menor importancia es relativo ya que el hallazgo puede afectar el plazo de ejecución, el costo de construcción, puede afectar la secuencia constructiva, puede modificar diseños ya desarrollados, etc.

En este punto interesa definir un punto de corte, en donde las tareas asociadas a los hallazgos más relevantes se asumen como una obligación del proyecto, es decir, se continuará desarrollando la ingeniería hasta un nivel tal que resuelva la situación.

Las restantes tareas se abordarán en función de los recursos disponibles para su estudio en orden de importancia. En palabras simples, la ingeniería abordará y resolverá el trabajo asociado a todos los hallazgos que sea posible resolver dentro del plazo de la ingeniería y con los recursos disponibles.

Resulta importante recordar que el invertir tiempo y HH en estudiar estas situaciones durante la ingeniería, es un orden de magnitud más económico que analizar y encontrar una solución en terreno durante la construcción.

6.10. Breve discusión de las alternativas de solución

Un determinado problema puede tener más de una solución. Lo que se persigue es encontrar una solución viable, que sea simple o lo más simple posible, pero que dé suficiente garantía de resolver el problema.

En este punto cabe hacer el siguiente comentario:

Encontrar la mejor solución de un problema (el óptimo) no es el objetivo, sino encontrar una solución que sea buena (no necesariamente la mejor) y resuelva el problema.

En el mundo de los proyectos y en la jerga cotidiana se ha acuñado el dicho:

“Lo perfecto es enemigo de lo bueno”. El perfeccionismo que busca la solución óptima le hace un flaco favor al proyecto, el proyecto se alimenta mejor de soluciones que sean suficientemente buenas, realistas y alcanzables con los recursos que se disponen.

Una vez resuelto el problema a nivel teórico, se deben realizar los cambios necesarios para implementar la solución.

Se debe tener presente que una determinada solución a un problema, en ocasiones arrastra un nuevo problema en otra área u otra especialidad.

Se debe tener un razonamiento equilibrado para no caer en el círculo vicioso de “resolver aquí” para luego ver cómo se gatilla otro problema en otro punto del sistema.

Las soluciones deben ser simples y robustas, es decir que resuelvan el problema y que no arrastren nuevos problemas en otras áreas y especialidades.

6.11. Identificación de actividades críticas

En esta parte de análisis es útil ampliar la definición de actividad crítica dentro del contexto de la construcción. Una actividad puede considerarse crítica por varias causas.

Para dar claridad a este enfoque, conviene asimilar la expresión “actividad crítica” como algo que reviste gran importancia y que puede tener consecuencias en diferentes ámbitos, es decir trae asociado riesgos inherentes de distinta índole tales como: Costo, tiempo de ejecución, dificultad técnica para su realización, riesgos legales por posible incumplimiento de una normativa, riesgos al medio ambiente.

A continuación algunos ejemplos de aspectos y características que hacen que una determinada actividad sea considerada crítica desde el punto de vista de la construcción.

- a) La actividad en cuestión está en la ruta crítica del programa maestro del proyecto.
- b) El costo de la actividad es muy elevado
- c) La posición estratégica de la actividad dentro del programa de trabajo del proyecto. Una determinada actividad puede clasificarse como crítica si esa actividad es predecesora de muchas otras actividades (aunque no esté en ruta crítica). Luego un retraso o dificultad en ella impedirá el comienzo de varias actividades en el proyecto. En este escenario, no se podrán abrir oportunamente los frentes de trabajo planeados en perjuicio del avance físico de la obra. Un caso típico de este tipo de “actividad crítica” son los permisos. Si un determinado permiso que se gestiona con las autoridades no se obtiene a tiempo, impide la ejecución de una parte del proyecto y eventualmente puede detener un proyecto.
- d) La complejidad propia de la actividad
Ejemplo un montaje de alto tonelaje como es el caso de los componentes de un molino SAG.
- e) Alto nivel de coordinación
Puede ser una actividad relativamente convencional, pero que requiere la coordinación con muchas personas y departamentos del proyecto (coordinación interna) y coordinación con entidades externas al proyecto (como Sernageomin, Seremi,

Ministerio de OOPP, Comunidades, Organismos de Medio ambiente, Municipalidades, etc.), coordinación con el mandante.

Un caso típico que requiere un nivel importante de coordinación es el transporte de cargas especiales.

- i) Cargas de alto tonelaje. Aquí se puede llegar a la necesidad de reforzar puentes de carretera o establecer rutas alternativas.
 - ii) Carga sobredimensionada. En este caso se debe obtener permisos especiales que están sujetos a restricciones de horario. Además requiere coordinación con carabineros, requiere doble escolta delante y detrás de la carga sobredimensionada.
 - iii) Transporte de explosivos. La legislación que rige para el transporte y almacenamiento de explosivos es bastante rigurosa y requiere experiencia y una adecuada coordinación interna y con las autoridades.
- f) Impacto en la producción
- Muchas veces la actividad requiere desenergizar una línea eléctrica o requiere la intervención temporal de una unidad de producción de la planta de proceso con la consecuente paralización de sus actividades (la pala de carguío camiones, un tramo del circuito de camiones mineros, chancador primario, línea eléctrica, concentrado, sistema de impulsión de agua, chancadores, molinos, correas transportadoras, etc.).
- Esta intervención implica la paralización temporal de una determinada actividad productiva, lo que constituye un fuerte impacto.

Es relevante poner atención a las actividades críticas, en el concepto amplio que se ha enunciado, ya que su desarrollo es de gran importancia, en consecuencia, un mal desempeño en ellas puede afectar significativamente al proyecto.

Finalmente, el análisis de constructibilidad que comenzó desde una perspectiva técnica y orientado a determinadas situaciones específicas, puede tomar una dimensión más amplia con un enfoque general del proyecto.

En la práctica el análisis de constructibilidad navega desde lo específico y puntual hasta una visión panorámica del proyecto, subiendo y bajando en los distintos niveles, pasando por distintas etapas y generando un importante aporte en el desarrollo integral de un proyecto.

7. ANÁLISIS DE CONSTRUCTIBILIDAD EN PROYECTOS REALES

En este capítulo se presenta el análisis de constructibilidad realizado en algunos proyectos reales en los que el autor ha participado.

La ejecución de un determinado trabajo de construcción varía sustancialmente dependiendo del escenario en que éste se realiza. Para fijar ideas, se considera que el “alcance de trabajo”, está definido y se han establecido sus términos y condiciones a través de un contrato de construcción.

En este contexto el trabajo a realizar, establecido en el contrato de construcción se denominará “proyecto”. En donde la empresa que hace la ingeniería “desarrolla el proyecto”, es decir genera los planos de construcción y las especificaciones técnicas necesarias para ejecutar el trabajo. Por otro lado la empresa contratista “ejecuta el proyecto”, es decir construye la obra que la ingeniería a definido.

En el contexto de lo anteriormente expuesto, se puede hacer la siguiente separación para clasificar un proyecto dependiendo de ciertas características.

- Proyectos green field
- Proyectos brown field
- Proyectos black field

7.1. Proyectos green field (proyectos nuevos)

Un proyecto greenfield se refiere a un proyecto que se inicia desde cero en un área previamente no desarrollada ni explotada. En el caso de la minería del cobre en Chile, en la mayoría de los casos se trata del desarrollo de una nueva mina en algún lugar del desierto de atacama donde no hay caminos, no hay servicios de agua, energía ni comunicación telefónica.

En este caso se tiene plena libertad para disponer las instalaciones, sujeto por cierto a las restricciones propias de la topografía y ubicación geográfica del proyecto. Lo anterior es una ventaja importante y un desafío para el diseño de la planta.

Por otro lado, se tiene la total ausencia de los servicios necesarios para construir y poner en servicio la planta. En general un proyecto nuevo requiere una inversión significativa en infraestructura dado que no existen instalaciones de ningún tipo, en consecuencia, se hace necesario proveer:

- Caminos de acceso y caminos interiores
- Líneas de energía eléctrica 13,8 kV, 110 kV, 220 kV según lo establezca el diseño para la operación de la planta y para todos los edificios y servicios de infraestructura
- Suministro de agua potable y agua de proceso. En este caso se deben construir obras de captación de agua tales como: bocatomas si el proyecto así lo contempla, perforación de pozos profundos, obras de captación agua de mar.
- Planta desalinizadora (planta desaladora) cuando sea el caso
- Redes de agua para proceso

- Piscinas (pond) para almacenar agua
- Red de agua potable para la infraestructura del proyecto
- Planta de agua potable (osmosis reversa)
- Red de alcantarillado y planta de tratamiento de aguas servidas
- Garita control de acceso
- Patios de almacenamiento de materiales, almacenamiento para equipos de proceso de la planta y equipos de construcción.
- Servicios de telefonía y comunicaciones
- Servicios de alojamiento. Campamento con dormitorios, salas de recreación, casino, gimnasio, salas de reuniones.
- Oficinas administrativas para la operación (definitivas) y oficinas administrativas para la construcción (construcción temporal)

7.2. Proyectos brown field (proyectos en operación)

Un proyecto brown field se refiere a un proyecto que se lleva a cabo en un sitio que ya ha sido desarrollado en el pasado y se encuentra en operación, es decir el proyecto se desarrolla al interior de una planta en operación.

Un proyecto de este tipo puede ser la expansión de la planta, la modernización de la planta donde se requiere reemplazar equipos de proceso, también puede ser la reactivación de una mina existente o la explotación de recursos de cobre en un área que ha tenido otra actividad minera previa.

Los proyectos brownfield a menudo tienen la ventaja de contar con infraestructura existente, como caminos y carreteras, ferrocarril, energía eléctrica, garita control de acceso, planta potabilizadora de agua con su respectiva red, planta de tratamiento de aguas servidas con su red de alcantarillado, campamento para alojamiento del personal, casino, policlínico, etc.

La existencia de estos servicios permite reducir los plazos y costos asociados a estos servicios dado que están disponibles, lo que evidentemente es un aspecto que favorece el desarrollo del proyecto.

Sin embargo también tiene el inconveniente que el uso de estos servicios queda supeditado a las normas, reglas, horarios y en general a las restricciones que el servicio existente impone, y el nuevo proyecto debe adaptarse a esas restricciones.

Por otro lado, un proyecto brown field enfrenta la dificultad de que su ejecución, en la inmensa mayoría de los casos, interfiere y afecta a la operación de la planta. Esta afectación puede ser baja o de mediana intensidad, pero puede llegar a ser tan gravitante, que toda la evaluación de la estrategia constructiva, el estudio de los costos, la planificación, la programación y en general, todo el quehacer de la obra a ejecutar se define en función de minimizar la detención de la planta, detención que trae asociada una pérdida de producción.

Para fijar ideas: Supongamos que se requiere reemplazar el chancador primario de una planta en operación porque el equipo (chancador) cumplió su vida útil.

Todo el tiempo que transcurre desde que se detiene el chancador existente y se pone en servicio el nuevo chancador implica, en principio, la paralización de la planta de chancado con el correspondiente impacto en la productividad. Interesa en este punto evaluar el costo económico de la detención. Un análisis simple indica que el costo máximo que se tiene por la detención del chancador primario (detención debida al cambio de equipo) corresponde al valor de venta del cobre no producido a causa de esta detención. Este valor corresponde a la cota superior que podría alcanzar el costo a causa de la detención del equipo, en este caso, el chancador primario.

Cabe hacer notar que el valor de venta del cobre no producido, suele ser una cifra muy grande y en algunos casos es una cifra estratosférica en relación al costo de realizar el trabajo requerido.

Como regla general, todo trabajo a realizar en una planta en operación debe ser planeado de tal forma que minimice las interferencias y minimice las detenciones que impliquen pérdida de productividad de la planta.

7.3. Proyectos black field

Los proyectos black field son un caso particular de los proyectos brown field. Se pueden entender como una extensión de los brown field. Se denomina proyecto black field a aquellos proyectos en que el trabajo a realizar presenta varias e importantes limitaciones de diversa índole y la operación normal de la planta se ve afectada causando un nivel de detención importante. Las dificultades y limitaciones típicas a enfrentar son:

- Espacio reducido para ingresar materiales y equipos de construcción
- Espacio reducido para ejecutar el trabajo
- Necesidad de realizar actividades en espacios confinados
- Espacio reducido para realizar maniobras de montaje.
- Limitaciones de ancho en los caminos de acceso. Esto puede ocurrir al ingresar cargas especiales como estanques prearmados, tambor aglomerador o cualquier carga que tenga una trocha (ancho de la carga) mayor al ancho de una pista de circulación (3,5 m)
- Limitación del radio de giro cuando se quiere ingresar una estructura de gran longitud tales como vigas prefabricadas para un puente carretero o vigas de un puente grúa de gran luz.
- Existencia de interferencias que se deben resolver antes de realizar el trabajo propiamente tal.
 - ✓ Cañerías de diferentes flujos. Requiere realizar un by pass
 - ✓ Ductos de aire, gases
 - ✓ Canalizaciones eléctricas de media y baja tensión energizadas
 - ✓ Tendidos eléctricos aéreos energizados

- ✓ Presencia de correas transportadoras en operación
- ✓ Banco de ductos y tuberías enterradas. Muy relevante cuando los trabajos implican excavación.
- ✓ Fundaciones de equipos, fundaciones de edificios, cámaras eléctricas.
- ✓ Pipe rack
- ✓ Estructuras en general. Diagonales de edificio, muros de trabiquería y en ocasiones muros de hormigón.

El común denominador en estos casos es que los trabajos a realizar afectan fuertemente a la operación de los procesos productivos.

Sólo se mostrarán análisis de constructibilidad asociados a casos green field y brown field.

7.4. Análisis de constructibilidad en proyectos green field

7.4.1. Montaje de molino SAG

Resumen ejecutivo:

Este caso ilustra cómo el plazo de entrega de un suministro clave hace peligrar el programa maestro de construcción y cómo una evaluación oportuna permite redefinir parte del proyecto y logra dar un giro para eludir el impacto en la programación y dar cumplimiento a los compromisos de plazo establecidos en el proyecto.

Antecedentes previos

Recordemos una de las definiciones que se tienen de Constructibilidad. El Construction Industry Institute [CII] presenta una definición ampliada de constructibilidad en los siguientes términos:

Constructibilidad es "El proceso de desarrollo de una estrategia de construcción y la identificación de los recursos necesarios para ejecutar ese plan. El proceso en cuestión implica la evaluación del diseño del proyecto en términos de practicidad, eficiencia y costos, así como la consideración de la secuencia de construcción, la logística y la experiencia del equipo de construcción".

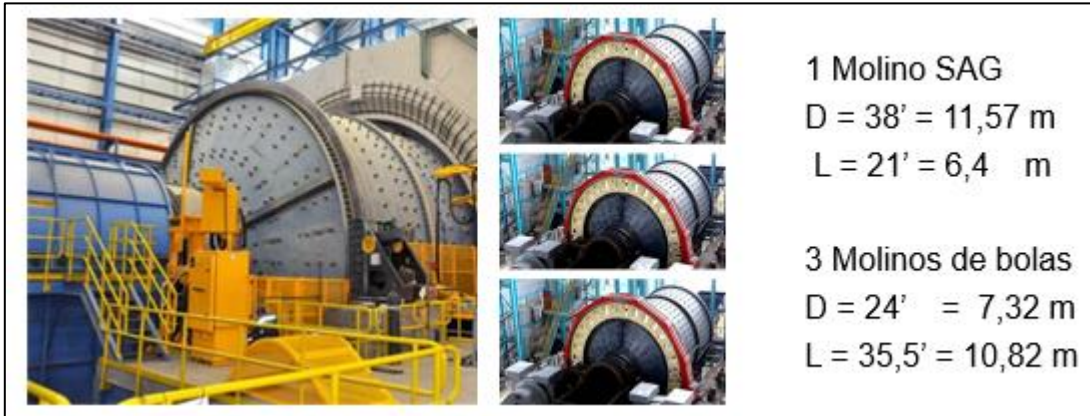
Contexto general del proyecto

Se trata de la ampliación de una planta concentradora en operación que al momento del proyecto tiene una capacidad de proceso de 90 ktpd, esto es, 90 mil toneladas de mineral procesado por día de operación. La planta en cuestión desarrolla un programa de expansión y el proyecto busca incrementar la capacidad de proceso a 130 ktpd. Es decir se deben implementar equipos para procesar 40 mil toneladas diarias de mineral

adicionales. En este caso concreto, se modificará el proceso de molienda existente incorporando equipos adicionales.

El proceso de molienda existente consiste en un molino SAG de 38' x 21'. Esto es 38 pies de diámetro por 21 pies de largo, es decir: 11,57 [m] de diámetro por 6,4 [m] de largo. La molienda secundaria se realiza mediante tres molinos de bolas de 24' x 35,5' esto es 24 pies de diámetro por 35,5 pies de largo, es decir: 7,32 [m] de diámetro por 10,82 [m] de largo.

Figura 20: Configuración existente

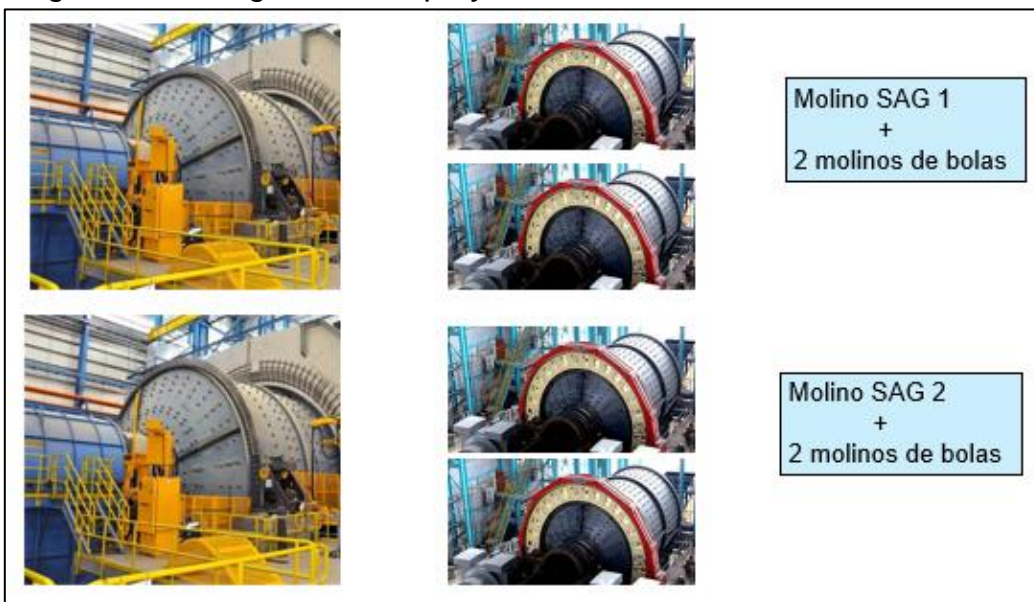


Fuente: Elaboración propia

La expansión contempla instalar un segundo molino SAG de las mismas dimensiones que el existente 38' x 21' y ampliar la molienda secundaria con un cuarto molino de bolas de 24' x 35,5'. Así la nueva configuración de molienda será:

Dos molinos SAG (SAG 1 y SAG 2) trabajando cada uno de ellos con dos molinos de bolas.

Figura 21: Configuración de proyecto



Fuente: Elaboración propia

Contexto de la gestión del proyecto

En este caso la empresa que lleva adelante el proyecto, lo hace en la modalidad de contrato tipo EPCM, es decir la empresa realiza:

E Engineering: Desarrolla la ingeniería básica y la ingeniería de detalles del proyecto.

P Procurement: Desarrolla la gestión de compra de todos los equipos de proceso que requiere la ampliación de la planta. También se encarga de proveer insumos masivos tales como: Estructuras metálicas, fierro de construcción, cañerías de HDPE en diferentes diámetros, conductores y cables eléctricos para todo el proyecto, entre otros.

CM Construction Management: Durante la etapa de ingeniería, planifica la construcción, es decir, realiza la definición de los paquetes de construcción, define los contratos a establecer, licita y adjudica los contratos de construcción, licita y adjudica los contratos de servicio y establece el programa maestro del proyecto.

Durante la construcción, supervisa la ejecución de todos los contratos de construcción, lleva adelante la PEM (puesta en marcha) de la planta realizando las tareas de precomisionamiento y comisionamiento para entregar al cliente (la minera) una planta en condiciones de operar.

Finalmente acompaña al cliente durante el ramp up, esto es el proceso de incremento de carga progresiva de la planta hasta alcanzar la producción de diseño.

Análisis del caso

Como se ha indicado anteriormente, durante la ingeniería básica se definen los equipos de proceso que se deben incorporar a la planta concentradora. Esta definición se refiere específicamente al tipo de equipo, su capacidad de proceso y otras variables técnicas propias del estudio que se realiza al respecto.

Con esta información se debe licitar el suministro del equipo entre las empresas proveedoras que los fabrican. En este caso se trata de un molino SAG de 38'x 21' ya descrito anteriormente.

Durante el proceso de licitación para la fabricación del molino SAG se adjudica el contrato a un proveedor de prestigio y trayectoria reconocida en el mercado. Los plazos habituales para la fabricación de este tipo de equipo minero es de 28 a 30 meses.

En este escenario, el proyecto avanza en el desarrollo de la ingeniería que debe, entre otras cosas, diseñar el edificio que albergará al molino SAG y molino de bolas y todos los equipos y sistemas complementarios que se requieren para su funcionamiento y mantenimiento futuras.

Al poco tiempo de adjudicado el contrato de fabricación del molino SAG a través de la respectiva orden de compra, el proveedor informa que sus plazos de entrega aumentarán debido a la no disponibilidad de algunas materias primas en el mercado internacional y

la menor disponibilidad de servicios de maquinado que el fabricante contrata con terceros.

La situación es que el proveedor hace ver que los plazos de fabricación se verán incrementados por el retraso con que recibirá los suministros y servicios que se requieren habitualmente para esta fabricación.

El proyecto avanza y pocos meses más tarde el proveedor confirma que los plazos de entrega serán mayores y más aún, se estima que continuarán creciendo en el futuro cercano.

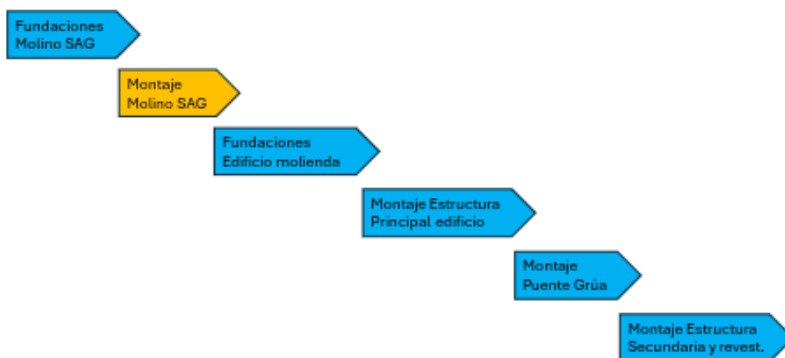
Ante esta situación, el programa de montaje del molino SAG está impactado, dado que, el suministro del molino llegará varios meses más tarde y en consecuencia el inicio del montaje no podrá iniciarse en la fecha programada sino varios meses más tarde y en consecuencia el proyecto global se retrasará.

Como se mencionó antes, la constructibilidad está vinculada a varios aspectos y entre ellos la estrategia de construcción y la secuencia constructiva a seguir. Por otro lado están los asuntos de logística y los suministros.

La secuencia de trabajo habitual para este tipo de montaje es:

- Construcción de las fundaciones del molino SAG, molinos de bolas y otros equipos secundarios.
- Montaje del molino SAG que normalmente se realiza mediante una grúa de alto tonelaje. Posteriormente se montan los molinos de bolas.
Esta secuencia es usada dado que la maniobra de montaje requiere de mucho espacio para posicionar la grúa con que se hará el montaje, recibir las partes que componen el molino SAG y desde esa posición realizar las maniobras de montaje que, en forma sucesiva, se van ensamblando desde la base sobre las fundaciones hasta concluir el montaje.
- Construcción de las fundaciones del edificio
- Montaje de la estructura principal
- Montaje del puente grúa del edificio molienda
- Montaje de estructura secundaria y revestimiento del edificio.

Figura 22: Secuencia de montaje - proyecto base



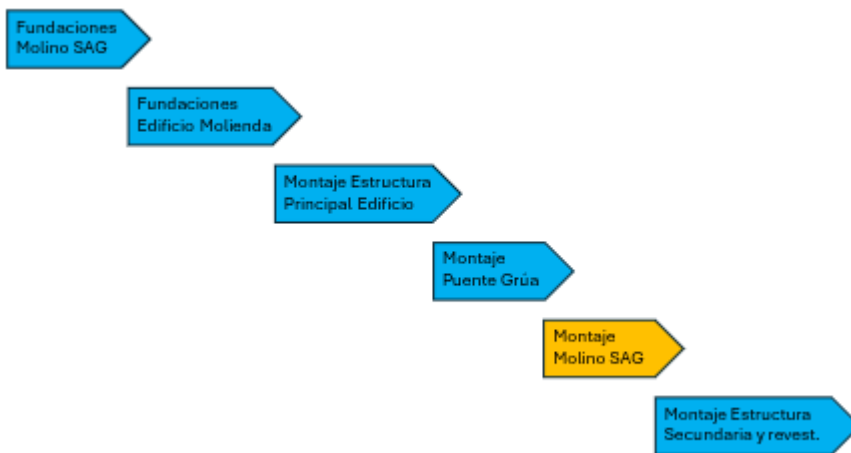
Fuente: Elaboración propia

El conflicto aquí, como se ha indicado, es que los componentes del molino llegarán varios meses más tarde que lo programado.

Para resolver el problema se propone modificar la secuencia constructiva, quedando de la siguiente manera:

- Construcción de fundaciones del molino y todos los equipos auxiliares.
- Construcción de las fundaciones del edificio
- Montaje de la estructura principal del edificio de molienda.
- Montaje del puente grúa de la nave de molienda
- Montaje del molino SAG usando el puente grúa del edificio de molienda
- Montaje de estructura secundaria y revestimientos de la nave de molienda.

Figura 23: Secuencia constructiva propuesta



Fuente: Elaboración propia

De este modo, la nueva secuencia ubica el montaje del molino en una fecha más tardía que es compatible con la fecha de entrega real por parte del proveedor.

Veamos qué impacto tiene este cambio en la secuencia.

- No es necesaria la grúa de alto tonelaje que se tenía considerada para montar los componentes principales del molino SAG.
- Al adelantar la construcción del edificio se debe anticipar su diseño y el suministro de estructura para su montaje. Claramente anticipar el diseño del edificio es una tarea que está en las manos de la ingeniería. Anticipar la fabricación de la estructura es una tarea más fácil y logable que anticipar la fabricación del molino.
- El edificio de molienda posee un puente grúa con capacidad suficiente para realizar la mantención requerida de los molinos. Esta capacidad viene dada por el fabricante del molino que indica cuáles son las piezas que se deben cambiar y sus respectivos pesos. El puente grúa no está pensado para realizar el montaje de los componentes del molino sino sólo manipular componentes que se cambian en las mantenciones programadas. Luego para implementar la estrategia de montar el molino con el

punto grúa propio del edificio, se requiere un punto grúa con capacidad de izar el componente más pesado del molino SAG.

- Por otra parte se solicita al fabricante que diseñe los componentes del molino de modo tal que se reduzca lo más posible el peso del componente mayor.
- Con la confirmación de este dato, se define el punto grúa adecuado y se procede con la redefinición del punto grúa y la gestión de compra.
- Por otro lado, el edificio de molienda ya no es un edificio convencional que alberga al molino SAG, los dos molinos de bolas y todos los sistemas auxiliares, sino que ahora el edificio debe ser capaz de soportar la mayor carga que implica el montaje de los componentes del molino.
- Como consecuencia, el diseño del edificio resulta con fundaciones mayores, la estructura metálica es mucho más robusta, con arriostramientos de techo de mayor dimensión y mayor arriostramiento en los muros.
- Posee una viga porta grúa mucho más alta y robusta para soportar el izaje y transporte del componente más pesado del molino.
- El punto grúa es de mayor capacidad para izar y transportar el elemento más pesado del molino SAG.
- Las vigas porta grúa, donde se desplaza el punto, deben proyectarse más allá del frontón del edificio (el punto grúa debe “salir” de la nave). Los componentes son tomados del camión (fuera de la nave), son izados e ingresados a la nave con el punto grúa para dejarlos en la posición de montaje.

En resumen el diseño del edificio ha cambiado sustancialmente, ahora es mucho más robusto que lo indicado en la ingeniería básica, que consideraba el molino ya montado cuando se construye el edificio de molienda.

Finalmente se implementó esta estrategia cambiando la secuencia constructiva y durante la ingeniería de detalles se abordaron todos los cambios de diseño que la solución implica. Posteriormente durante la construcción se realizó el montaje de la estructura principal del edificio para soportar las cargas adicionales, se realizó el montaje de los componentes de los dos molinos que contempla el proyecto de ampliación (1 molino SAG + 1 molino de bolas), se realizó el montaje de todos los componentes complementarios y sistemas auxiliares de los molinos, se concluyó la construcción del edificio de molienda dentro del programa.

En resumen, un análisis de constructibilidad en el inicio de la ingeniería permitió salvar una situación de retraso importante del proyecto que tenía su origen en factores externos sobre los cuales no era posible ejercer ningún control.

Se reemplazó por una solución alternativa que generó cambios que sí se podían realizar y administrar por la entidad responsable del proyecto que logró dar cumplimiento al programa maestro.

7.4.2. Construcción de caminos interiores de un proyecto

En muchos proyectos ya sea una planta concentradora o una planta de lixiviación de cobre se definen dos trazados de camino diferentes:

- a) Caminos de construcción. Son caminos de uso temporal que prestan servicio durante la fase de construcción del proyecto con una duración de uno a tres años aproximadamente. Estos caminos de construcción normalmente se materializan con un material granular que cumple la especificación técnica para base de camino según el manual de carreteras. Esta capa de material compactado se usa como carpeta de rodado. En consecuencia, son caminos de tierra que requieren mantención frecuente dado que se degradan con el uso ya que se genera la denominada "calamina" en forma natural por la circulación de camiones con carga.
- b) Caminos permanentes. Son caminos de uso definitivo para la minera durante la vida útil del yacimiento de cobre. Estos caminos se materializan de distintas maneras según la necesidad y presupuesto disponible. Los hay de asfalto, doble tratamiento superficial y también se construyen caminos de tierra para uso permanente.

Antecedentes previos de interés – Bischofita

En el norte de Chile y en algunos países en donde el clima es muy seco y caluroso, es decir, en climas desérticos, se emplea una mezcla de agua y sal para hacer caminos.

La sal empleada se denomina bischofita. La bischofita es una sustancia mineral que se encuentra en depósitos naturales y pertenece a la clase de minerales llamados "sales de magnesio". La bischofita es generalmente incolora o tiene un ligero tinte amarillento y es soluble en agua.

La fórmula química de la bischofita es: $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ donde se muestra la presencia de iones de magnesio (Mg^{2+}), iones de cloruro (Cl^-) y seis moléculas de agua (H_2O).

(Química industrial. 2024. *Bischofita*)

Características de la bischofita:

Estructura Molecular:

La bischofita cristaliza y forma cristales prismáticos. Esta estructura implica la disposición ordenada de iones y moléculas de agua en la red cristalina.

Iones de Magnesio (Mg^{2+}):

El magnesio está en un estado de oxidación de +2 en la bischofita. Los iones de magnesio están rodeados por moléculas de agua en una coordinación octaédrica.

Iones de Cloruro (Cl^-):

Los iones de cloruro están presentes en la estructura y están asociados con los iones de magnesio para formar el compuesto de cloruro de magnesio.

Moléculas de Agua (H₂O):

Seis moléculas de agua están asociadas a los iones de cloruro y magnesio. Estas moléculas de agua pueden estar ligadas directamente con los iones de magnesio y también pueden participar en enlaces de hidrógeno con otras moléculas de agua.

Higroscopicidad de la Bischofita:

La bischofita tiene propiedades higroscópicas, esto significa que tiene la capacidad de absorber y retener agua del entorno. Esto permite mantener la humedad incluso en condiciones de baja humedad relativa en el aire.

Uso de la bischofita en climas secos:

Control de Polvo:

En zonas extremadamente secas, como ocurre en el desierto de atacama en el norte de Chile, el riego de agua con bischofita en caminos ayuda a controlar la generación de polvo. La sal actúa como aglutinante, evitando que las partículas finas del suelo se levanten y se dispersen en el aire. (VialActivo. *La bischofita un poderoso aliado en la lucha contra el polvo y el hielo en carreteras.* marzo 2024)

Figura 24: Riego con bischofita



Estabilización de Suelo:

La aplicación de bischofita (agua con sales diluidas) en la mezcla y acondicionamiento del material granular que se usará como carpeta de rodadura permite estabilizar en gran medida el material aumentando su cohesión y resistencia al desgaste.

Retomando el caso de caminos permanentes en un proyecto de minería de cobre en el norte de Chile se tiene que:

Estos caminos definitivos en general se materializan con un material de base de buena calidad, es decir que cumple las exigencias del manual de carreteras en cuanto a CBR y granulometría para base de caminos. Este material se mezcla con bischofita (descrito anteriormente), un compuesto relativamente abundante en el norte de Chile.

La bischofita se prepara en una solución acuosa, es decir es agua con sales diluidas en una concentración adecuada para los fines que se persiguen.

Como se indicó antes, la bischofita está formada por 6 átomos de agua (H₂O) más dos átomos de magnesio (Mg) y dos átomos de cloro (Cl) que conforman la molécula de bischofita. Esta condición atómica hace que sea extremadamente difícil extraer la humedad de la mezcla. En consecuencia, en pleno desierto se puede ver un camino que luce humectado y se comporta adecuadamente ya que la humedad que se le dio al inicio no se ve alterada por el sol, el viento ni la temperatura a lo largo del tiempo. Es así como la carpeta de rodado de un camino bien construido con bischofita tiene un comportamiento similar al de un camino asfaltado, entregando un alto nivel de servicio.

Figura 25: Caminos tratados con bischofita



Estrategia constructiva

La estrategia constructiva que se propuso, la que fue aceptada, durante el desarrollo de la ingeniería y durante la definición de los paquetes de trabajo que se asignan finalmente a un contrato de construcción, fue la siguiente:

Se propuso no construir los caminos temporales (de construcción) al interior del proyecto, que estaban definidos en la ingeniería básica del proyecto, dando como solución la construcción anticipada de los caminos definitivos de la planta.

De esta manera, los caminos definitivos prestarían servicio durante la construcción aportando un alto nivel de servicio, disminuyendo tiempos de traslado, disminuyendo la polución de polvo que es muy significativa en caminos de construcción.

Con esta propuesta se logró:

- Eliminar o al menos disminuir significativamente el costo del contrato de riego y mantenimiento de caminos de construcción (de tierra) contrato que es ineludible dada la alta polución que genera el tránsito de todo tipo de vehículos en los caminos de construcción.
- Se disminuyó una fracción del tránsito vehicular al interior del proyecto ya que el camión regador circula durante toda la jornada, todos los días en su tarea de humectar los caminos del proyecto.

Una ventaja importante es que los caminos definitivos aportan un alto valor a la seguridad, reduciendo los accidentes de tránsito.

Con todo, se incluyó un contrato menor para realizar la reparación y mantención de los daños menores que sufrió el camino durante el período de construcción.

De esta manera, se logró el beneficio de utilizar caminos de buena calidad durante la construcción, con un alto estándar de servicio

- Se ganó en tiempo de viaje durante el periodo de construcción
- Se ganó en seguridad de tránsito, al disminuir fallas mecánicas producto de un camino en mal estado.
- Se logró un gran beneficio al disminuir notoriamente la polución que afecta a todas las personas e instalaciones durante la construcción.
- Se eliminó el contrato “Caminos temporales de construcción” lo que implicó no sólo la disminución de costo del contrato, sino la reducción de personal que requiere alimentación, alojamiento, transporte interno y externo, entre otros.

Terminada la construcción se reparó lo necesario para entregar al cliente el camino definitivo en óptimas condiciones.

Como se puede apreciar, el análisis de constructibilidad realizado durante la ingeniería de detalles, permitió elaborar una estrategia que se implementó posteriormente en la fase de construcción teniendo como resultado:

- Una disminución de costos. Se eliminó el contrato de “Caminos de construcción”
- Un aumento en la calidad del servicio. La carpeta de rodadura se comporta similar a un camino asfaltado.
- Se disminuyó en gran medida la polución. El tránsito vehicular no genera polvo en suspensión.
- Se aumentó sensiblemente la seguridad en el tránsito. Ausencia de calamina y camino sin daños.
- Se disminuyó el tiempo de viaje interno. El tiempo de viaje diario de todo el personal desde el campamento hacia el punto de trabajo, el tiempo de viaje ida y regreso para almorzar y el retorno desde el punto de trabajo a campamento al final de la jornada.

Los minutos “ganados” en el transporte de un día se deben multiplicar por los 30 días laborales del mes y por todo el personal directo, que en un proyecto grande son algunos miles de personas. Finalmente la disminución de tiempo perdido por transporte a lo largo de toda la fase de construcción llega a ser una cantidad de HH bastante significativa, cantidad que se puede destinar a actividades productivas de la construcción, lo que constituye un beneficio para el proyecto.

7.5. Análisis de constructibilidad en proyectos brown field

7.5.1. Montaje puente grúa

A continuación se analizará el reemplazo de un puente grúa en edificio de molienda SAG. La planta de molienda SAG consiste en una nave (edificio) donde operan dos líneas de molienda compuesta por un molino SAG (molino semi autógeno) y 2 molinos de bolas cada una. Es decir se tiene:

Molino SAG 1 + 2 molinos de bola

Molino SAG 2 + 2 molinos de bola

El trabajo motivo de este análisis se refiere al cambio de puente grúa en la línea de molienda SAG 1.

Justificación del requerimiento

La normativa internacional de diseño europea “Federación Europea de Mantenición” FEM en su acápite 9.511 define la vida útil de un puente grúa en 10 años.

En la actualidad el equipo de levante (puente grúa) se encuentran operando por sobre su vida útil. El proyecto contempla realizar el cambio del puente grúa asociado al molino SAG 1 y realizar además un refuerzo estructural del edificio.

El puente grúa cumple una función de apoyo en la mantenibilidad de las instalaciones interiores de la nave de molienda SAG, cuyas principales cargas corresponden al traslado de los componentes del molino que requieren ser cambiados por desgaste de los mismos, de acuerdo con el programa de mantención establecido.

Además el puente grúa presta servicio de apoyo a otros trabajos de mantención general al interior de la nave de molienda, tales como cambio de bombas, equipamiento menor, transporte de materiales para la mantención.

Descripción general

La nave de molienda SAG es un edificio cerrado de 30 [m] de ancho por 78 [m] de largo. La estructura del edificio se divide en 14 ejes transversales que enmarcan 13 vanos de 6 [m] de ancho cada uno. Cuenta con acceso vehicular por el sur, este y oeste.

La figura 26 muestra una vista desde el sector Noroeste y la figura 27 una vista en planta de la nave de molienda SAG.

Figura 26: Molienda SAG - Vista frontis Noroeste



Fuente: Tomado del estudio de proyecto montaje puente grúa

Figura 27: Molienda SAG - Vista en planta



Fuente: Tomado del estudio de proyecto montaje puente grúa

La figura 28 muestra el interior de la nave donde se aloja el molino SAG 1. En el fondo se aprecia su Puente Grúa.

Figura 28: Puente grúa en nave molienda SAG

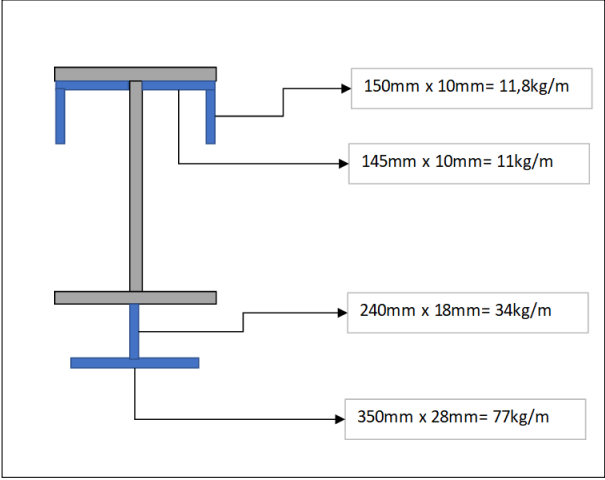
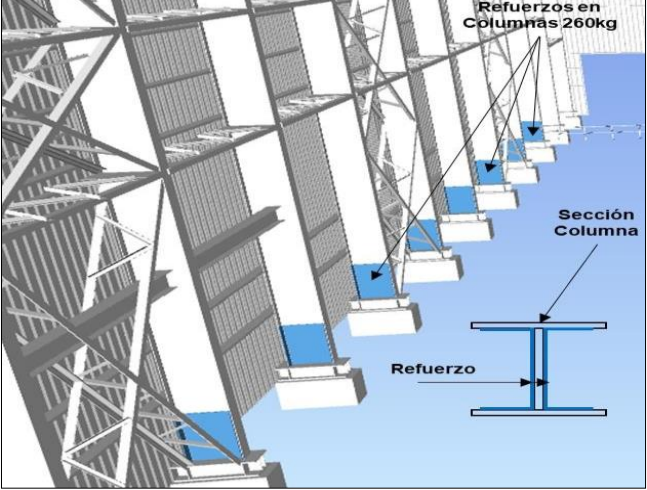


Fuente: Tomado del estudio de proyecto montaje puente grúa

Alcance de trabajo

El trabajo consiste en reemplazar el puente grúa existente asociado al molino SAG 1 por un puente grúa nuevo de mayor capacidad. El alcance de trabajo incluye:

- Refuerzo en vigas porta grúa (vigas carrileras)
- Refuerzo en la base de las columnas.
- Desmontaje del PG existente.
- Montaje del nuevo PG.

<p>Refuerzo de vigas porta grúa</p> <p>Sección de la viga portagrúa con sus perfiles de refuerzo</p> <p>(en azul los elementos de refuerzo proyectados)</p>	 <p>150mm x 10mm = 11,8kg/m</p> <p>145mm x 10mm = 11kg/m</p> <p>240mm x 18mm = 34kg/m</p> <p>350mm x 28mm = 77kg/m</p>
<p>Refuerzo en la base de las columnas del edificio.</p> <p>El refuerzo se instala por ambos lados de las columnas.</p>	 <p>Refuerzos en Columnas 260kg</p> <p>Sección Columna</p> <p>Refuerzo</p>

Características de los puentes grúa

Tabla 9: Características de los puentes grúa

Antecedentes	PG existente	PG nuevo
Tipo	Doble viga con plataforma de mantenimiento	Doble viga con doble plataforma de mantenimiento
Luz	21,6 [m]	21,6 [m]
Altura	18 [m]	18 [m]
Peso	52 [t]	46,3 [t]
Capacidad	40 [t] gancho principal y 10 [t] auxiliar	86 [t] gancho principal y 10 [t] auxiliar
Largo de boggies	7,1 [m]	8,3 [m]
Alimentación eléctrica	Por barras troller	Por barras troller

Fuente: Tomado del estudio de proyecto montaje puente grúa

Análisis de constructibilidad

La primera actividad del análisis de constructibilidad está orientada a identificar los aspectos principales del trabajo a realizar y las particularidades del mismo. Es decir se debe precisar qué se debe hacer y las condiciones específicas en que se realizará el trabajo. Con ese antecedente se debe elaborar una estrategia de ejecución para luego establecer una metodología constructiva en función de las restricciones que se tengan y de los recursos que se puedan destinar para la ejecución.

- 1.- Identificar los aspectos principales del trabajo y sus particularidades
- 2.- Elaborar una estrategia para abordar la ejecución
- 3.- Establecer una metodología identificando la secuencia de actividades

Identificación de las tareas a realizar

Esto se realiza a través de la información existente del proyecto, es decir, los antecedentes técnicos desarrollados para la construcción de la nave de molienda.

- Planos de estructura del edificio
- Listado de equipos existentes al interior de la nave
- Listado de cañerías y planos P&ID
- Listado de circuitos eléctricos, entre otros

Con estos antecedentes, se programan visitas al lugar para conocer el funcionamiento del proceso y confirmar las restricciones existentes.

En este punto es importante conocer y estudiar el programa de mantención de la planta de molienda SAG, lo anterior para evaluar la posibilidad de realizar los trabajos dentro de las detenciones programadas para mantenimiento de la planta.

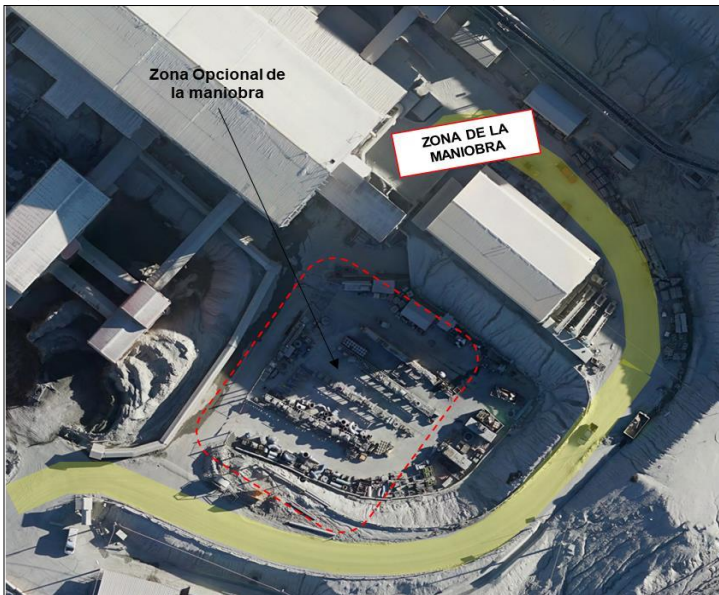
Si estos intervalos de tiempo no son suficientes para realizar el trabajo, la detención se prolongará más allá de lo programado para mantenimiento con el correspondiente impacto en la producción.

Es claro que la estrategia y metodología de trabajo tienen como premisa realizar todos los trabajos en el mínimo de tiempo posible y dentro de las detenciones programadas. En caso de no ser posible, se procura disminuir al mínimo posible la detención.

Identificación de alternativas de solución

Como puede apreciarse en la vista en planta de la nave de molinera SAG, hay dos alternativas para posicionar una grúa y realizar la maniobra de izaje.

Figura 29: Alternativas para emplazar grúa



Fuente: Tomado del estudio de proyecto montaje puente grúa

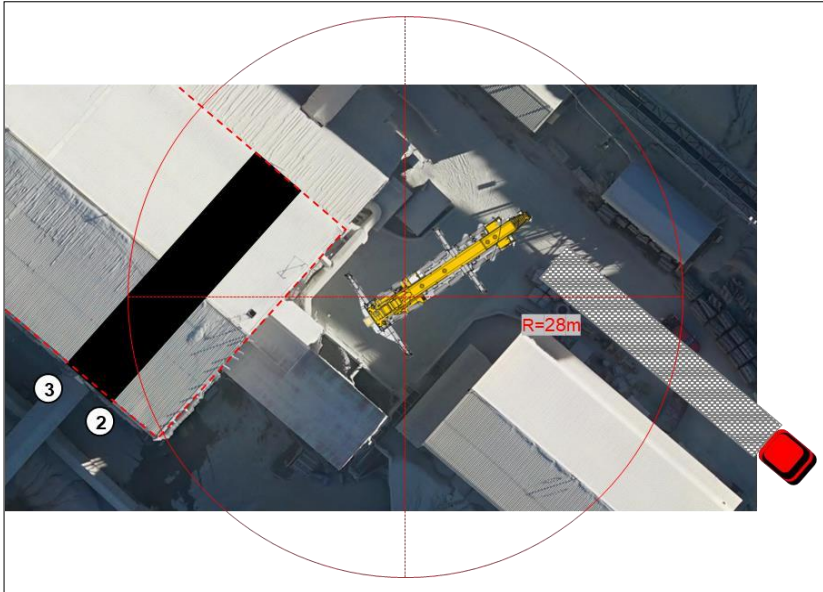
Alternativa 1 – Posición lejana

Una grúa de gran capacidad, ubicada en el patio de materiales que se encuentra en un nivel de 6 metros por debajo de las fundaciones del edificio molinera SAG y a un radio de giro de 50 metros. En la figura se muestra como “zona opcional de maniobra”
Dado el radio de giro de 50 metros, se requiere una grúa de una capacidad mayor o igual a las 1.000 [t].

Alternativa 2 – Posición cercana

La grúa de izaje se ubica en la plataforma que se indica en la figura como “zona de la maniobra” y desde esa posición se realiza el izaje del puente grúa.
Tanto para la posición cercana como para la posición lejana de la grúa, existen dos alternativas para ingresar el puente grúa a la nave de molinera SAG

Figura 30: Ingreso puente grúa por 2° vano



Fuente: Tomado del estudio de proyecto montaje puente grúa

Alternativa ingreso 1:

Ingresar el puente grúa por el segundo vano del edificio entre los ejes 2 y 3 como se muestra en la figura 30.

Alternativa ingreso 2:

Construir una prolongación de las vigas porta grúa del edificio y proyectarlas fuera del edificio sobre una estructura de acero que será diseñada y construida especialmente para ingresar el puente grúa a la nave de molienda SAG.

Dado que se tienen dos alternativas para posicionar la grúa y dos alternativas para ingresar el puente grúa a la nave, entonces:

Tabla 10: Alternativas de ubicación grúa y de ingreso PG

	Ingreso de puente a la nave	
Posición lejana en patio de materiales	por 2° vano de techo	por la extensión de vigas porta grúa
Posición cercana en plataforma adyacente al eje 1 nave SAG	por 2° vano de techo	por la extensión de vigas porta grúa

Fuente: Elaboración propia

Se tienen 4 alternativas posibles de solución:

Caso 1: Posición de grúa lejana e ingreso del puente por 2° vano

Caso 2: Posición de grúa lejana e ingreso del puente por la extensión de las vigas portagrúa

Caso 3: Posición de grúa cercana e ingreso del puente por 2° vano

Caso 4: Posición de grúa cercana e ingreso del puente por la extensión de las vigas portagrúa

Evaluación de alternativas

En lo que sigue se analizarán las ventajas y desventajas que presenta cada una de las cuatro alternativas posibles de solución.

Tabla 11: Ventajas y desventajas caso 1

Caso 1: Posición de grúa lejana e ingreso del puente por 2° vano	
Ventajas	Desventajas
1. Es factible hacerlo 2. No requiere estructura adicional	1. Mucha distancia entre operador y la maniobra 2. Dificultad para hacer maniobras finas para posicionamiento final de los componentes 3. Operador no tiene visión directa, sólo apoyo con video cámara y radio 4. Requiere grúa de gran capacidad (cercana a 1.000 [t]) 5. Requiere tiempo adicional para armar y desarmar la grúa de 1000 [t] 6. Mayor costo de arriendo (grúa 1.000 [t] es más cara) 7. Mayor costo por mayor plazo de arriendo 8. Requiere grúa adicional (100 [t]) para armado y desarme de la grúa 1.000 [t] 9. Dado que el radio de giro es muy grande ($R=50$ [m]), el montaje se realiza por partes: Viga principal 1, luego viga principal 2, luego vigas de amarre entre vigas principales. 10. El ensamble de las partes del puente grúa se realiza a 18 metros de altura

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12: Ventajas y desventajas caso 2

Caso 2: Posición de grúa lejana e ingreso del puente por la extensión de las vigas portagrúa	
Ventajas	Desventajas
<p>1. Es factible hacerlo</p> <p>2. Una vez montado se puede probar y comisionar en forma independiente de la nave sin afectar a la operación.</p>	<p>1. Mucha distancia entre operador y la maniobra</p> <p>2. Dificultad para hacer maniobras finas para posicionamiento final de los componentes</p> <p>3. Operador no tiene visión directa, sólo apoyo con video cámara y radio</p> <p>4. Requiere grúa de gran capacidad (1.000 [t])</p> <p>5. Requiere tiempo adicional para armar y desarmar la grúa 1.000 [t]</p> <p>6. Mayor costo diario por arriendo de grúa (grúa más cara)</p> <p>7. Mayor costo por mayor plazo de arriendo</p> <p>8. Requiere grúa adicional (100 [t]) para armado y desarme de grúa 1.000 [t]</p> <p>9. Requiere diseño, fabricación y montaje de estructura adicional (prolongación de las vigas porta grúa)</p> <p>10. Requiere más tiempo para desarrollar la ingeniería y la fabricación de la estructura adicional</p> <p>11. Requiere más tiempo de construcción. Fundaciones y montaje de la estructura adicional de vigas porta grúa</p> <p>12. Mayor costo de ingeniería (diseño de estructura adicional)</p> <p>13. Mayor costo por fabricación de estructura adicional</p> <p>14. Mayor costo por construcción de fundaciones y montaje de estructura adicional.</p> <p>15. Dado que el radio de giro es muy grande ($R=50$ m), el montaje se realiza por partes: Viga principal 1, luego viga principal 2, luego vigas de amarre entre vigas principales.</p> <p>16. El ensamble de las partes del puente grúa se realiza a 18 metros de altura</p>

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 13: Ventajas y desventajas caso 3

Caso 3: Posición de grúa cercana e ingreso del puente por 2° vano	
Ventajas	Desventajas
<ol style="list-style-type: none"> 1. Es factible hacerlo 2. Una vez montado se puede probar y comisionar con poca afectación a la operación 3. Menor distancia desde operador a la maniobra 4. Mejor visibilidad del operador a la maniobra de montaje. 5. No existe estructura adicional 6. Requiere una grúa más convencional de menor capacidad (350 [t]) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. El montaje es por partes: Viga principal 1, luego viga principal 2, luego vigas de amarre entre vigas principales. 2. El ensamble de las partes del puente grúa se realiza a 18 metros de altura

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14: Ventajas y desventajas caso 4

Caso 4: Posición de grúa cercana e ingreso del puente por la extensión de las vigas portagrúa	
Ventajas	Desventajas
<ol style="list-style-type: none"> 1. Es factible hacerlo 2. El puente grúa se arma a nivel de piso 3. El izaje se realiza con el puente grúa completamente armado. 3. Una vez montado sobre la extensión de las vigas portagrúas, se puede probar y comisionar en forma independiente de la nave sin afectar a la operación 4. Menor distancia desde operador a la maniobra 5. Requiere una grúa más convencional de menor capacidad (350 [t]) 6. Visión directa del operador a la maniobra de montaje. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Requiere diseño, fabricación y montaje de estructura adicional (prolongación de las vigas porta grúa) 2. Requiere más tiempo para desarrollar la ingeniería y la fabricación de estructura 3. Requiere más tiempo de construcción. Fundaciones y montaje de la estructura adicional de vigas porta grúa 4. Mayor costo de ingeniería (diseño de estructura adicional) 5. Mayor costo por fabricación de estructura adicional 6. Mayor costo por construcción de fundaciones y montaje de estructura adicional.

Fuente: Elaboración propia

Como es fácil ver, las dos grandes desventajas son:

- a) Uso de una grúa de gran capacidad (1.000 [t])
 - ✓ Requiere un plazo adicional para armar al inicio y desmontar al finalizar la maniobra
 - ✓ Requiere una grúa adicional para armado y desarme de la grúa 1.000 [t]
 - ✓ Mayor costo diario arriendo (grúa mayor es más cara + arriendo de una 2ª grúa)

- ✓ Mayor costo por mayor tiempo de arriendo para armado y desarme de grúa
 - ✓ Mayor lejanía del operador a la maniobra
- b) Implementación de una extensión de las vigas portagrúa
- ✓ Mayor plazo de ingeniería
 - ✓ Mayor plazo de fabricación de estructura
 - ✓ Mayor plazo para construcción de fundaciones
 - ✓ Mayor plazo para montaje de estructura auxiliar
 - ✓ Mayor costo de ingeniería
 - ✓ Mayor costo de fabricación de estructura
 - ✓ Mayor costo para construcción de fundaciones
 - ✓ Mayor costo para montaje de estructura auxiliar

Selección de la alternativa ganadora

Para establecer una jerarquía entre las alternativas de solución, se debe establecer un criterio de selección, que básicamente consiste en definir:

- 1.- Los aspectos más relevantes que serán evaluados:
 - a) Seguridad a las personas, a los equipos y al medio ambiente
 - b) Impacto de la construcción en la operación, es decir el tiempo que permanecerá detenida la operación más allá de las detenciones programadas por la planta para mantenimiento.
 - c) Costo de implementar la solución
 - d) Plazo para implementar la solución
 - e) Dificultad constructiva para implementar la solución.
- 2.- El rango en que se evaluará cada concepto (normalmente se mide en una escala de 0 a 100%)
- 3.- El peso o importancia que tendrá cada concepto. Esto se logra en un consenso entre los especialistas considerando la opinión de:
 - a) El equipo que va a ejecutar la obra (construcción)
 - b) El equipo que va a operar las instalaciones cuando entre en servicio (operaciones)
 - c) El equipo que va a realizar la mantención programada de los equipos (mantención)

Después de realizar la evaluación de los riesgos, los costos y plazo se llegó a establecer que el caso 3 que corresponde a la posición de grúa cercana e ingreso del puente por 2° vano, es el más favorable ya que requiere una grúa más convencional disponible en el mercado, ubicada en la plataforma cercana al eje 1 de la nave con izaje del puente grúa por partes y su ingreso por el 2° vano (entre ejes 2 y 3 de la nave).

Esta alternativa satisface los requerimientos y disminuye los costos adicionales en forma significativa.

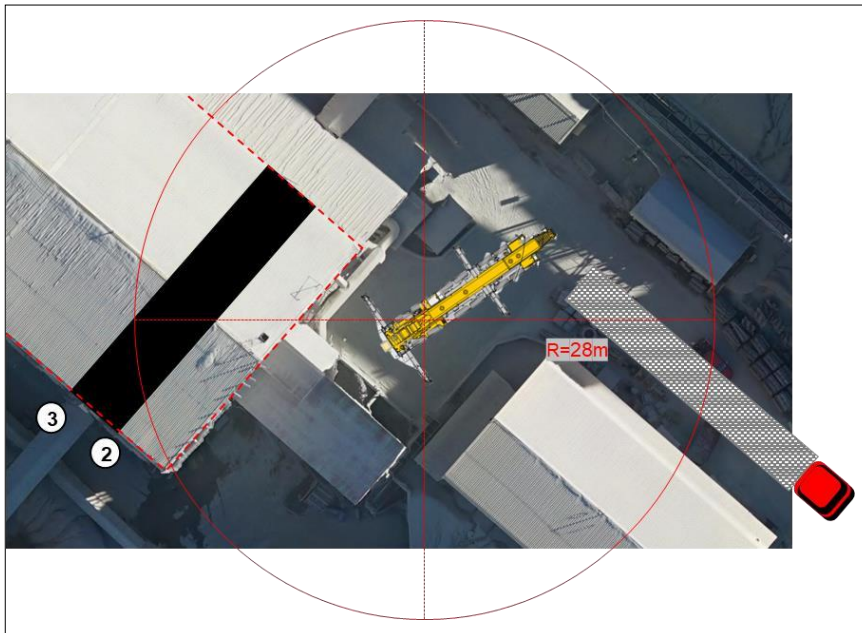
Layout de la maniobra

La maniobra se realizará por el frontis Sureste de la nave. El trabajo consiste en liberar parte de la cubierta del edificio, específicamente el segundo vano entre marcos estructurales y a través de este espacio ingresar el nuevo PG y retirar el existente.

Para esta maniobra se requiere lo siguiente:

- Retiro y posterior reposición de cubierta y sus costaneras en el 2º vano, entre los ejes 2 y 3.
- Restricción de acceso a la zona sur este del edificio donde se posicionará la grúa.

Figura 31: Layout de la maniobra (vista aérea)



Fuente: Tomado del estudio de proyecto montaje puente grúa

Esquema de la maniobra

La información y datos para la maniobra son los siguientes:

- Ubicación de la maniobra: Sur este.
- Carga Crítica: 20 [t], con un radio de 28 [m].
- Largo rampa: 22 [m]. (plataforma del camión)
- Equipo de Levante: Grúa Telescópica Móvil de 350 [t].

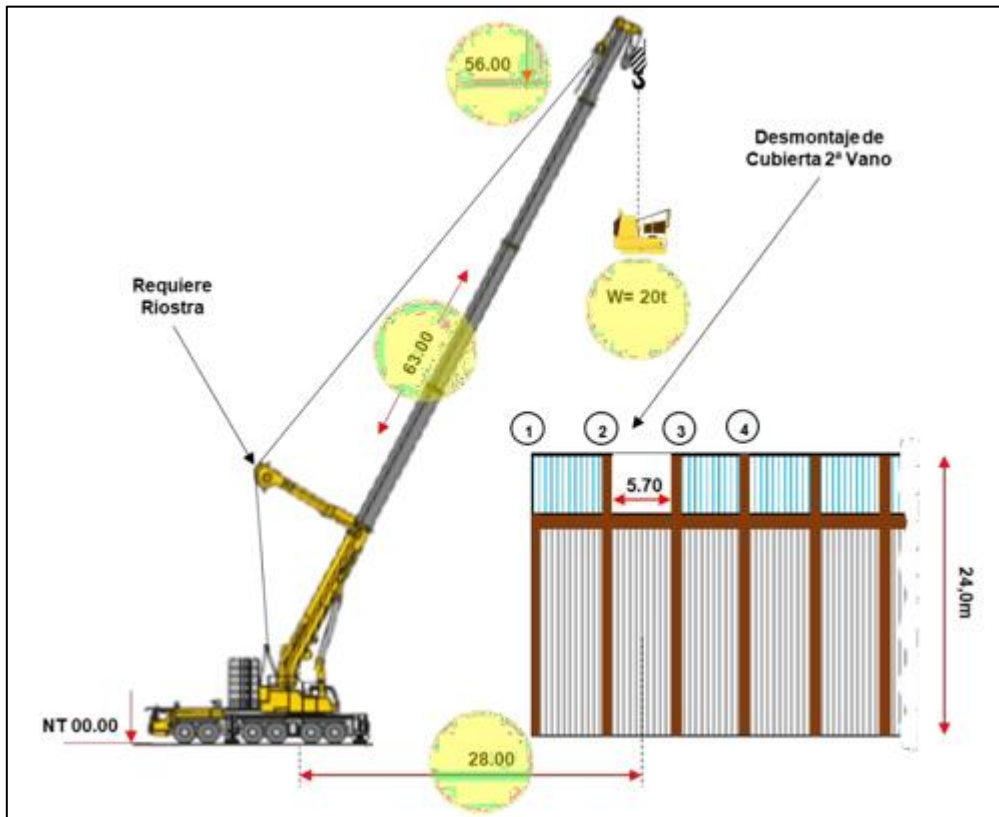
Cabe destacar que por las características dimensionales y pesos de los PG (nuevo y existente), el montaje se hará por partes.

- Parte 1: Viga 1 + plataforma 1.
- Parte 2: Viga 2 + plataforma 2.
- Parte 3 y 4: Vigas de amarre testera.
- Parte 4: Carro polipasto.

Polipasto: También llamado aparejo es la unidad que permite enrollar en un tambor el cable que sostiene al gancho de izaje. De ese modo eleva y desciende la carga mediante un comando eléctrico.

La figura 32 muestra el esquema de la maniobra, en el que se identifica la ubicación de la grúa móvil, las distancias y pesos requeridos para el cálculo de la capacidad de la grúa para la maniobra de montaje.

Figura 32: Esquema de la maniobra



Fuente: Tomado del estudio de proyecto montaje puente grúa

En este esquema se muestran las medidas principales y el peso de la carga crítica, con estos datos se selecciona la grúa para el montaje.


Selección de la grúa de montaje

Con la información obtenida del esquema de montaje, se entra en la tabla de carga de la grúa a emplear, verificando que cumpla con la capacidad de carga.

Es requisito habitual en una maniobra de montaje que el factor de utilización de la grúa sea menor al 75% de su capacidad máxima para el radio de trabajo que se tenga.

La tabla 15 muestra la capacidad de carga de la grúa telescópica móvil Liebherr LTM 1350/6.1, cuya capacidad nominal es de 350 [t].

Tabla 15: Tabla de carga grúa Liebherr LTM 1350/6.1

 TABLA DE CARGA GRÚA 350t												
	30,1 m	35,2 m	40,2 m	45,3 m	50,4 m	55,5 m	59 m	60,5 m	64 m	65,6 m	69,1 m	70 m
8	106,8	96,1										
9	98,7	94,9	80,6									
10	90,1	87,9	83,2	71,9								
11	83,4	81,7	78,5	72,3								
12	76,9	76,3	74,9	70,5	62,6							
13	71,2	71,7	70,7	67,1	61,3	53,8	48,8	45,8		40,5		34,7
14	66,1	66,7	66,3	63,6	59,4	53,1	48,4	45,5	41,6	40,2	35,3	34,4
16	57,6	58,2	58,9	58,2	54,2	50	46	44,5	40,4	39,1	33,9	33,8
18	50,7	51,4	52,1	52,1	50,7	47	43,4	42,7	38,7	37	32,1	32,7
20	45,1	45,7	46,4	46,5	46,3	44,2	41	40,7	36,8	35,1	30,5	31,3
22	40	40,9	41,6	41,7	41,8	40,9	38,8	38,6	34,9	33,3	29	29,8
24	35,6	36,5	37,2	37,4	37,5	37,2	36,4	36,2	33,2	31,7	27,7	28,4
26	30,5	32,7	33,5	33,6	33,8	33,6	33,5	33,1	31,6	30,2	26,6	27,2
28	16,5	29,6	30,3	30,5	30,6	30,5	30,6	30,3	29,8	28,7	25,5	26
30		26,4	27,5	27,7	27,8	27,7	27,8	27,6	27,5	26,6	24,4	24,8
32		19,4	25,1	25,3	25,4	25,2	25,4	25,2	25,3	24,4	23,3	23,8
34			22,9	23,1	23,3	23,1	23,3	23,1	23,2	22,5	22,2	22,3
36			18,5	21,2	21,4	21,2	21,4	21,2	21,3	20,6	20,7	20,7
38			10	19,4	19,7	19,5	19,7	19,4	19,6	18,9	19,1	19,1
40				16,5	18,1	18	18,2	17,9	18,1	17,4	17,6	17,6

Fuente: Tomado del estudio de proyecto montaje puente grúa

En la tabla se aprecia que para un radio de 28 [m], un largo de pluma de 64 [m], esta grúa es capaz de cargar 29,8 [t].

Determinación del factor de utilización F.U.

$$F.U. = 21.100 / 29.800 = 71\% < 75\%$$

La grúa cumple con el F.U., su principales dimensiones son:

Grúa Liebher LTM 1350/6.1

Capacidad nominal: 350 [t]

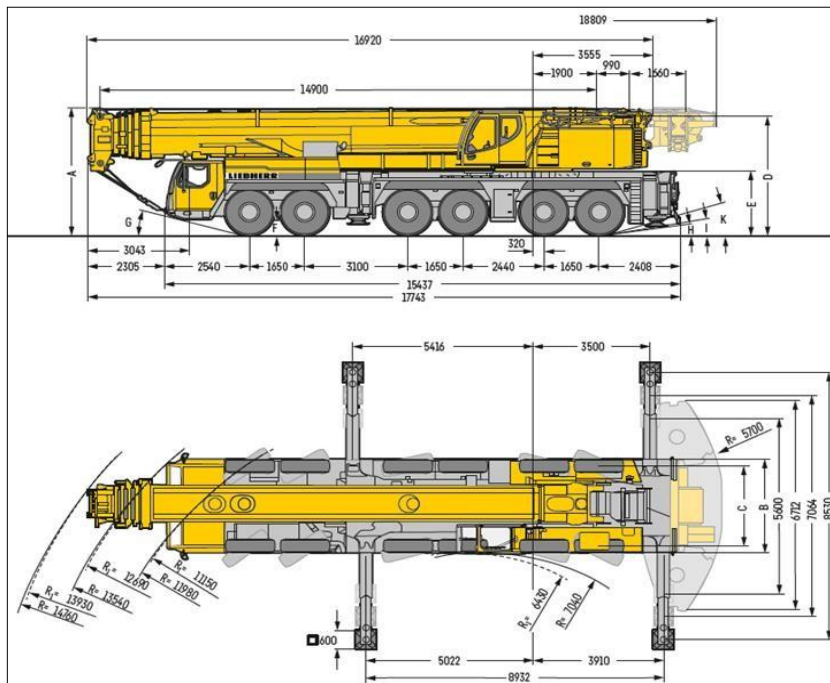
Dimensiones : 19 [m] x 8.5 [m]

Ancho de trocha : 3,05 [m]

La tabla de carga corresponde a la configuración TY, requiere arriostrado.

La figura siguiente muestra un esquema en elevación y planta, con las principales dimensiones de esta grúa.

Figura 33: Grúa Liebherr LTM 1350/6.1



Fuente: Tomado del estudio del proyecto montaje puente grúa

Secuencia de montaje

La secuencia de tareas será:

1. Desmontaje de cubierta en 2º vano de la nave.
2. Montaje viga 1 + plataforma 1.
3. Montaje viga 2 + plataforma 2.
4. Montaje y acoplamiento vigas de amarre (entre vigas principales).
5. Montaje carro con polipasto.
6. Conexión eléctrico a barras troller.
7. Pruebas funcionales nuevo PG con pesos patrones.
8. Una vez probado el nuevo PG, se retiran los pesos patrones y se traslada el nuevo PG hacia el primer vano (ejes 1- 2).
9. Desconexión eléctrico del PG existente.
10. Retiro carro PG existente.
11. Desacople y retiro vigas de amarre PG existente.
12. Retiro viga 1 PG, retiro viga 2, retiro de plataforma de mantenimiento del PG existente.
13. Instalación nuevos topes de carrera para nuevo PG.

7.5.2. Montaje cañería de reactivos (lechada de cal)

El análisis de constructibilidad de este caso pretende mostrar y evaluar de manera conceptual el impacto que se puede tener en un proyecto, en términos de costo y plazo, debido a un análisis de constructibilidad incompleto o que simplemente no se realizó en la etapa anterior.

Para ilustrar esta situación se mostrará el caso de un proyecto relativamente simple.

El proyecto consiste en instalar y poner en servicio una nueva línea de lechada de cal desde la planta de reactivos hasta la molienda. La cañería existente es de acero con un diámetro de 4" y conexiones tipo victaulic. Tiene varios años en servicio y actualmente no cumple con los estándares establecidos para la conducción de agentes químicos y, en consecuencia, existe un riesgo potencial de contaminar el ambiente en caso de filtración en las uniones de la tubería.

Figura 34: Cañería lechada de cal existente



Fuente: Elaboración propia

Figura 35: Unión victaulic



La nueva cañería definida en la etapa de factibilidad contempla una cañería de acero dispuesta al interior de una trinchera de hormigón. La trinchera tiene por objeto contener una eventual filtración de lechada de cal, evitando su infiltración al terreno y controlando así una contaminación al medio ambiente.

Como se indicó antes, el mineral sale del molino y se conduce a través de una canaleta a la etapa de flotación. La práctica habitual es que a la salida de la molienda, se añada un agente químico con un PH básico para equilibrar la acidez que tendrá la pulpa cuando se le apliquen los reactivos durante la flotación. Los reactivos que se usan en la flotación, son de aplicación específica y permiten obtener las características adecuadas para el proceso de flotación. Se usan reactivos colectores, depresores y espumantes entre los principales, además de otros reactivos de uso secundario.

Al aplicar los reactivos en la etapa de flotación, la pulpa quedaría más ácida, situación que no es favorable para ciertos procesos físico-químicos que se deben realizar. Esta es la razón por la cual se aplica óxido de calcio (Ca O) en forma de lechada a la salida de molienda para que la pulpa llegue con PH básico y los reactivos ácidos nivelen el PH al rango requerido.

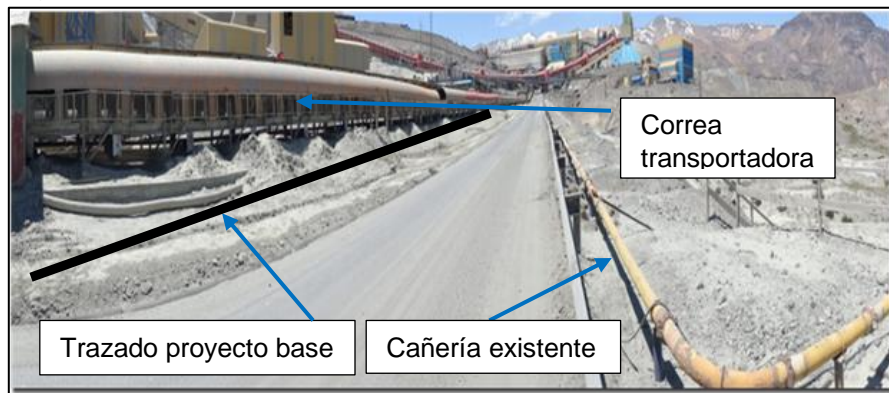
En este caso, se realizó el estudio de factibilidad sin un análisis profundo y detallado de la constructibilidad.

El estudio de factibilidad realizado definió un trazado para la nueva línea lechada de cal adyacente a la correa transportadora e identificó dos interferencias importantes.

1.- La presencia de una línea eléctrica de media tensión 13,8 kV que va enterrada en forma paralela a la cañería de lechada de cal y muy cercana a ella. El estudio de factibilidad no identificó el origen de la línea eléctrica, es decir no se sabe qué servicios se alimentan de esta línea, ni estableció si está o no energizada.

2.- La presencia de una tubería de HDPE D = 500 [mm] que cruza transversalmente al trazado de la cañería de lechada. Esta tubería conduce agua a la mina.

Figura 36: Cañería existente y trazado propuesto en la etapa anterior



Fuente: Elaboración propia

El trazado según proyecto base (en café) es paralelo a la correa transportadora y se ubica entre la correa y el camino de servicio.

Figura 37: Interferencia - Línea eléctrica 13,8 kV



Fuente: Tomado del estudio de proyecto lechada de cal

Figura 38: Interferencia - Ducto HDPE D=500 mm agua mina



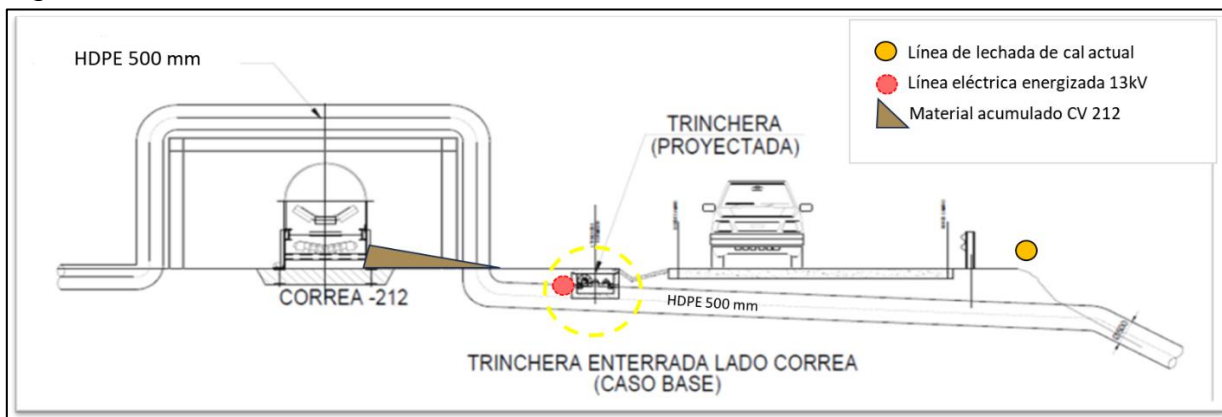
Fuente: Tomado del estudio de proyecto lechada de cal

El estudio de factibilidad identificó las interferencias pero no aportó soluciones a ellas razón por la cual se hizo necesario un desarrollo complementario de ingeniería y realizar además un estudio de constructibilidad para el proyecto.

Análisis de constructibilidad

El análisis de constructibilidad identificó un riesgo importante. El trazado propuesto por la ingeniería básica se dispone paralelamente a una correa de alimentación de mineral en operación y muy cercana a ella, dos a cinco metros de distancia como se muestra en la figura siguiente.

Figura 39: Ubicación inicial trinchera – vista en corte



Fuente: Tomado del análisis de constructibilidad del proyecto

Es fácil ver que la realización de trabajos de excavación de trinchera, montaje de trinchera prefabricada y montaje de la cañería para lechada de cal involucra la presencia de personal y equipos de construcción (excavadora, camión de izaje) que van a trabajar muy cerca de una correa en movimiento que transporta mineral.

En lo que sigue se describen los riesgos más relevantes de este caso:

Riesgo a las personas

La cercanía de los trabajos de montaje de la cañería con la correa en operación genera una condición de riesgo evidente. La probabilidad de que un trabajador haga contacto con la correa en movimiento es alta, a pesar que la correa dispone de guardas, es decir protecciones o barreras físicas que resguardan a la correa misma. Sin embargo las protecciones se basan en mallas metálicas y rejas que no impiden que una persona haga contacto con una mano, brazo, alguna herramienta e incluso parte de sus ropas.

El sentido común indica que si una persona hace contacto con la correa en movimiento, puede verificarse un accidente de consecuencia grave o muy grave, pudiendo incluso ser fatal. Este nivel de riesgo a las personas es inaceptable.

Riesgo a los equipos

Por otra parte, un análisis simple muestra que la probabilidad de que un equipo de construcción (excavadora o camión de izaje) haga contacto físico con la correa en operación durante la ejecución de los trabajos de excavación de trinchera, montaje de trinchera prefabricada y montaje de cañería, es bastante probable. Bastaría una distracción del operador para que el brazo de la excavadora o la pluma del camión de izaje se mueva en sentido opuesto al deseado para que haga contacto físico con la correa en movimiento. Continuando con el análisis, si se da el hecho, es decir, que hay contacto físico, esto va a ocasionar un daño potencialmente alto al equipo de construcción y puede provocar daño a la correa con la consecuente detención de la misma, afectando el proceso de producción.

Evaluación del riesgo

Para una mejor comprensión del riesgo presente y su análisis, se exponen a continuación algunos conceptos básicos asociados a la gestión de riesgos. Para evaluar el riesgo se deben identificar dos parámetros principales:

- a) Probabilidad de ocurrencia (P). Se analiza y se estima qué tan probable es que ocurra el evento que implica riesgo.
- b) Impacto (I). Se analiza y se determina el nivel de daño que se produce cuando se verifica el evento en cuestión.

La magnitud del riesgo (MR) corresponde al producto entre la probabilidad de ocurrencia (P) y el impacto (I). $MR = P \times I$

Para establecer la probabilidad de ocurrencia, se usa la siguiente tabla:

Tabla 16: Categorías de probabilidad

Categorías de probabilidad (de ocurrencia)		
Categoría	Valor	Descripción
Ocurre casi siempre	5	Riesgo cuya probabilidad de ocurrencia es muy alta, es decir, se tiene entre 80% a 100% de seguridad que éste se presente en el año en curso.
Muy probable	4	Riesgo cuya probabilidad de ocurrencia es alta, es decir, se tiene entre 60% a 80% de seguridad que éste se presente en el año en curso.
Probable	3	Riesgo cuya probabilidad de ocurrencia es media, es decir, se tiene entre 41% a 60% de seguridad que éste se presente en el año en curso.
Poco probable	2	Riesgo cuya probabilidad de ocurrencia es baja, es decir, se tiene entre 21% a 40% de seguridad que éste se presente en el año en curso.
Ocurre casi nunca	1	Riesgo cuya probabilidad de ocurrencia es muy baja, es decir, se tiene entre 0% a 20% de seguridad que éste se presente en el año en curso.

Fuente: Elaboración propia basado en NCH 31010. 2013

Para establecer el impacto, se usa la siguiente tabla:

Tabla 17: Categorías de impacto

Categoría	Valor	Descripción
Catastróficas	5	Riesgo cuya materialización puede generar pérdidas financieras (\$) que tendrán un impacto catastrófico en el presupuesto y/o comprometen totalmente la imagen pública de la organización. Su materialización dañaría gravemente el desarrollo del proceso y el cumplimiento de los objetivos, impidiendo finalmente que éstos se logren en el año en curso.
Mayores	4	Riesgo cuya materialización puede generar pérdidas financieras (\$) que tendrán un impacto importante en el presupuesto y/o comprometen fuertemente la imagen pública de la organización. Su materialización dañaría significativamente el desarrollo del proceso y el cumplimiento de los objetivos, impidiendo que se desarrollen total o parcialmente en forma normal en el año en curso.
Moderadas	3	Riesgo cuya materialización puede generar pérdidas financieras (\$) que tendrán un impacto moderado en el presupuesto y/o comprometen moderadamente la imagen pública de la organización. Su materialización causaría un deterioro en el desarrollo del proceso dificultando o retrasando el cumplimiento de sus objetivos, impidiendo parcialmente que se desarrolle en forma normal en el año en curso.
Menores	2	Riesgo cuya materialización puede generar pérdidas financieras (\$) que tendrán un impacto menor en el presupuesto y/o comprometen de forma menor la imagen pública de la organización. Su materialización causaría un daño menor en el desarrollo del proceso y no afectaría el cumplimiento de los objetivos en el año en curso.
Insignificantes	1	Riesgo cuya materialización no genera pérdidas financieras (\$) ni compromete de ninguna forma la imagen pública de la organización. Su materialización puede tener un efecto nulo o pequeño en el desarrollo del proceso y no afectaría el cumplimiento de los objetivos en el año en curso.

Fuente: Elaboración propia basado en NCh 31010. 2013

Nota: Existen diferentes modalidades para aplicar la evaluación de riesgos basado en probabilidad y consecuencia. En general cada empresa adopta su propio estilo dando cumplimiento a los principios establecidos en la norma. Los términos usados para definir los rangos de probabilidad y las categorías de impacto varían de una modalidad a otra, pero el objetivo final es el mismo. De modo que para una determinada acción que se quiere evaluar, se determina la probabilidad de ocurrencia, se establece el impacto que provoca la acción en cuestión y se evalúa la magnitud del riesgo como el producto de la probabilidad por la consecuencia.

Con estos antecedentes, se construye la matriz de riesgo.

Tabla 18: Matriz de riesgo

		Valor	Impacto				
			Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Probabilidad			1	2	3	4	5
Ocorre casi siempre	81% a 100%	5	5	10	15	20	25
Muy probable	61% a 80%	4	4	8	12	16	20
Probable	41% a 60%	3	3	6	9	12	15
Poco probable	21% a 40%	2	2	4	6	8	10
Ocorre casi nunca	0% a 20%	1	1	2	3	4	5

Fuente: Elaboración propia. Adaptación de SafetyCulture. 2024. Matriz de riesgo

De la matriz de riesgo se distinguen cuatro niveles de importancia:

- 1.- Poco relevante con magnitud del riesgo entre 1 y 5 .Se muestra en color verde
- 2.- Tolerable con magnitud entre 6 y 10. Se muestra en color amarillo
- 3.- Importante con magnitud entre 11 y 15. Se muestra en color café
- 4.- Muy importante con magnitud entre 16 y 25. Se muestra en color rojo.

Al evaluar el riesgo potencial de esta situación, se tiene que la probabilidad de ocurrencia del incidente se evalúa como *muy probable*. En cuanto al daño que se pueda producir al equipo de construcción, la evaluación indica que si ocurre el evento, se espera que el daño al equipo de construcción sea *alto*.

Por otro lado si ocurre el incidente, que se sabe es *muy probable*, el daño a la correa puede ser *muy alto*.

La magnitud del Riesgo se evalúa como: Probabilidad de ocurrencia x Consecuencia.

Luego se tiene:

- Daño al equipo de construcción (excavadora y camión pluma)
Probabilidad : muy probable
Impacto : Alto
Magnitud del riesgo : 16 calificado como muy importante
- Daño a la correa
Probabilidad : muy probable
Impacto : Muy alto
Magnitud del riesgo : 20 calificado como muy importante

Considerando sólo la consecuencia económica por daño al equipo de construcción, sin considerar la pérdida de disponibilidad del mismo y la gestión necesaria para su reposición, el costo de reparación es significativo. Pero si se analiza el costo potencial de la correa, se tiene:

Costo por reparación de la correa que puede ser bastante significativo.

Costo por detención de la correa que puede ser extremadamente alto ya que el costo se asocia directamente con la pérdida de productividad de la planta.

El riesgo resultante es extremo y en consecuencia es inaceptable.

Por otra parte, se tiene el riesgo a las personas que, como se indicó, un trabajador podría entrar en contacto con la correa en operación y producirse un accidente de consecuencia grave e incluso fatal. Ante este escenario, la situación de riesgo es inaceptable y no se puede autorizar el trabajo.

Para poder ejecutar el trabajo con este trazado cercano a la correa, se hace necesario establecer barreras duras, es decir barreras sólidas que impidan que una persona o equipo entre en contacto con la correa. Lo anterior claramente impacta en el costo del proyecto ya que se requiere suministrar e instalar la barrera e impacta en el plazo ya que este trabajo no estaba contemplado en la programación inicial del proyecto.

Los impactos se deben medir:

- a) en tiempo, es decir, establecer el retraso que origina
- b) en dinero, establecer cuál será el costo adicional que significará resolver el problema en terreno
- c) Identificar si tiene efectos colaterales, es decir que este atraso impacte a una actividad crítica o genere algún problema específico en otra u otras actividades (se debe definir en forma clara y precisa)
- d) Evaluar el grado de interferencia que producirá la implementación de recursos adicionales para resolver el problema.

Por otra parte existe una línea de energía eléctrica de media tensión de 13,8 kV y se pudo comprobar que está energizada. La línea eléctrica va enterrada a poca profundidad en un trazado que es paralelo y muy cercano a la trinchera proyectada. Ver fig. 39

La cercanía de la excavación a realizar con la línea energizada existente implica que es *muy probable* que la excavadora haga contacto con la línea eléctrica durante la excavación de la trinchera.

Por otro lado, en caso de producirse el contacto entre el balde de la excavadora y el conductor eléctrico, el daño potencial al operador producto de la descarga eléctrica (13.800 [v]) es *muy alto* incluso puede llegar a ser fatal para el operador de la excavadora. No se requiere más análisis para establecer que este riesgo es inaceptable.

Solución propuesta

Con base en el análisis anterior, se propone reubicar la cañería para evitar las interferencias detectadas.

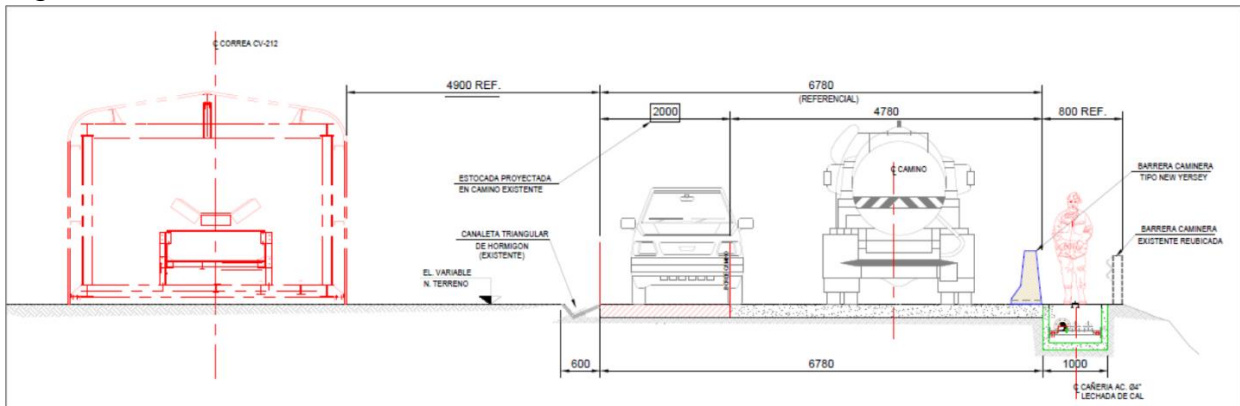
Figura 40: Nueva ubicación de la trinchera



Fuente: Elaboración propia

La nueva posición propuesta para la trinchera con su tubería es al costado derecho del camino, paralelo a la cañería existente.

Figura 41: Nueva ubicación de trinchera - vista en corte



Fuente: Tomado del análisis de constructibilidad del proyecto

Para la solución propuesta se puede ver que resuelve de buena forma las dificultades planteadas y principalmente los riesgos detectados.

- Contacto con la línea eléctrica energizada: Prácticamente se elimina ese riesgo ya que la excavación estará a más de 10 metros de distancia.
- Contacto entre equipo de construcción (excavadora y camión pluma o grúa) con la correa en operación: En la práctica queda eliminado el riesgo ya que los trabajos se realizarán distantes al otro lado del camino.

Sin embargo la solución propuesta acarrea otras dificultades como la estrechez en el camino de servicio. Esto se solucionó generando dos estocadas que permitan a un vehículo quedar en espera mientras transita un vehículo en sentido contrario.

Finalmente, se logró no solo reducir los riesgos principales detectados sino que en la práctica fueron eliminados al reubicar el trazado de la trinchera a suficiente distancia para no tener interacción alguna con la correa en operación y con la línea energizada.

7.6. Montaje

Durante la fase de construcción y montaje de cualquier proyecto, se realizarán necesariamente maniobras de montaje. Estas maniobras se realizan con un equipo de izaje especialmente diseñado para esta tarea, que en forma genérica se denomina grúa.

La grúa es un equipo de izaje y su uso es fundamental en la construcción y montaje. Se utilizan para levantar y mover cargas pesadas de manera eficiente y segura. Estos equipos de construcción constan de una estructura que sostiene un brazo o pluma, un sistema de contrapeso, un mecanismo de elevación (por polea y cable) y una base que puede ser fija o móvil.

A continuación una descripción general de los tipos de grúas de izaje más comunes y sus características principales:

Grúa Torre: Son las más utilizadas en la construcción de edificios en altura.

Tienen una gran altura de elevación y un alcance horizontal considerable.

Su pluma reticulada puede girar 360° y posee un carro que se desplaza a lo largo de toda la extensión de la pluma.

Se emplaza en una posición fija en la obra y puede ser desmontada y trasladada a otra ubicación según se requiera.

(Elesgru. s.f. Grúas Torre)



Grúa Móvil:

Una grúa móvil se puede desplazar fácilmente de un lugar a otro en el sitio de construcción. Posee una pluma telescópica que puede ajustar su longitud.

Tienen estabilizadores retráctiles para una mayor estabilidad durante el izaje de cargas.

Hay varios tipos de grúas móviles, cada una diseñada para aplicaciones específicas.

Aquí están los tipos más comunes:

Grúa sobre camión: La unidad consiste en una grúa telescópica que está montada sobre un camión permitiendo su desplazamiento en caminos y carreteras.

Es muy versátil en terreno firme y llano.

(Grúas & Equipos García. 2024)



Grúa todo terreno: Es una grúa móvil diseñada para operar en diferentes tipos de terreno, incluidos terrenos irregulares y difíciles. Tiene un sistema de dirección que actúa en las 4 ruedas que le proporciona una gran capacidad de maniobra, facilitando su posicionamiento en zonas estrechas y de difícil acceso. Posee una pluma telescópica que puede ser desplegada y recogida para ajustar la altura de elevación según sea necesario. (Grúas & Equipos García. 2024)



Grúa Sobre Orugas: Este tipo de grúa está montada sobre una base de orugas que le proporciona una gran estabilidad y capacidad para trabajar en terrenos irregulares. En general este tipo de grúa posee gran capacidad de carga. Su pluma puede ser telescópica o bien de estructura reticulada fija y puede girar 360 grados. (Grúas & Equipos García. 2024)



Grúa Articulada: Comunmente llamada “Camión Pluma”. Tiene un brazo que se articula en varias partes lo que permite flexibilidad y gran maniobrabilidad. Es muy útil para trabajar en espacios reducidos o en áreas donde el acceso es limitado. Puede ser montada sobre camión o remolque para facilitar su transporte. Su capacidad de carga es menor en comparación con otras grúas, pero es muy usada en una amplia gama de actividades. (Grúas & Equipos García. 2024)



Grúa Horquilla (montacarga): Es una máquina pequeña y maniobrable, diseñada para levantar cargas en bodegas, fábricas, patios y sitios de construcción. Tienen una capacidad de carga menor pero son esenciales para el manejo de materiales en patios y bodegas. Las hay eléctricas y de combustión interna (diesel, bencina o gas), dependiendo del requerimiento y el entorno de trabajo. (Grúas & Equipos García. 2024)



Puente grúa: Es un tipo de grúa que se instala al interior de un edificio industrial y permite elevar cargas (materiales o equipos) para transportarlas a otro punto al interior de la nave.

Se compone de una o dos vigas principales dispuestas sobre dos carros que se apoyan y se desplazan en vigas carrileras instaladas en la estructura del edificio. Consta de un carro con un mecanismo de izaje llamado polipasto o aparejo que permite enrollar en un tambor el cable que sostiene al gancho de izaje.

(Grúas & Equipos García. 2024)



7.6.1. Maniobras de izaje

La carga, descarga y manipulación de equipos y materiales es una actividad habitual durante la construcción. En estas maniobras se movilizan materiales de construcción, estructuras metálicas, elementos de hormigón prefabricado, cañerías y equipos de diversa índole (bombas de impulsión, motores, transformadores, estanques, filtros, celdas de flotación, componentes de chancadores, molinos, etc.).

Para realizar una maniobra de izaje existen procedimientos específicos que regulan los aspectos principales que se deben cumplir:

- La preparación del área de trabajo para una maniobra de montaje
- La documentación que se debe presentar para realizar una maniobra
- Las condiciones que se deben cumplir para realizar la maniobra
- La definición y revisión de los elementos de izaje (gancho de la grúa, estrobos, grilletes, yugo, eslingas y otros elementos de uso específico según el elemento a izar)
- El cálculo de la maniobra propiamente tal (cuando se requiere)
- La capacitación del personal, entre otras.

Aún cuando es una actividad muy frecuente durante la etapa de construcción y montaje, esta actividad se fiscaliza fuertemente y tiene una gran cantidad de requisitos dado que los riesgos presentes en su ejecución son de gran relevancia.

Por otra parte existen actividades de izaje que revisten gran importancia como es el caso del montaje de los equipos de proceso de la planta.

Dependiendo de una serie de factores, la maniobra se califica como maniobra normal o maniobra crítica. En general, se califica como maniobra “normal” todas aquellas que no revisten grandes dificultades, se realizan en un lugar plano, firme, sin interferencias, el peso a izar está ampliamente cubierto por la grúa a emplear. En general todas las condiciones son favorables.

En contraposición a lo anterior, existen maniobras que presentan mayores dificultades y se clasifican como maniobras críticas. En lo que sigue se entrega una visión general de una maniobra crítica.

Maniobras críticas

Se considera maniobra crítica cuando concurren una o más de las siguientes condiciones:

1. Maniobra de alto tonelaje $P > 30$ [t].
2. Maniobras de gran altura H (gancho) > 20 [m].
3. Maniobras con carga de gran volumen.
Se considera gran volumen si:
 - La longitud sobrepasa los 20 [m].
 - La superficie sobrepasa los 20 [m²].
 - La carga es asimétrica y no puede ser contenida en una caja de 12x3x3 [m].
4. Maniobras realizadas a una distancia mayor al 75% del radio admisible indicado en la tabla de carga de la grúa, para el peso a izar.
5. Maniobras realizadas con una carga que excede el 75% de la capacidad indicada en la tabla de carga de la grúa, para el radio de trabajo que se tiene.
6. Maniobras en condiciones de clima adverso: viento, lluvia, nieve, humo, polvo, iluminación deficiente, frío extremo con temperatura menor a -5 °C).
7. Maniobras con interferencias físicas en su trayectoria.
 - Montaje por sobre edificios o estructuras.
 - Montaje sobre tendidos eléctricos (líneas desenergizadas).
 - Montaje en las cercanías de líneas eléctricas energizadas.
 - Montaje al interior de edificios.
 - Maniobras en que el operador no tiene visual y depende de las indicaciones del rigger, aún cuando tenga apoyo de una cámara y pantalla en la cabina.
 - Montaje en las cercanías de equipos en operación (ejemplo: correas en funcionamiento).
8. Maniobras realizadas en terrenos difíciles.
 - Terreno accidentado.
 - Terreno inclinado.
 - Terreno blando o con barro.
 - Terreno resbaloso.
 - Terrenos con capacidad de soporte insuficiente (inestable). En este caso se debe mejorar el suelo mediante compactación y confirmar con ensayos de densidad que el mejoramiento realizado es suficiente.
9. Maniobras realizadas a dos grúas de igual capacidad (montaje simétrico).
10. Maniobras realizadas a dos grúas de distinta capacidad (montaje asimétrico).

A modo ilustrativo, se muestran a continuación ejemplos de maniobras de montaje

Figura 42: Montaje de estructura - maniobra simétrica



Figura 43: Montaje de tolva camión minero - maniobra simétrica



Figura 44: Camión pluma al interior de edificio



Figura 45: Montaje a dos grúas



Figura 46: Maniobra con puente grúa



Figura 47: Montaje de alto tonelaje – base turbina



Documentos requeridos para la maniobra

Toda vez que el Contratista considere realizar una maniobra calificada como crítica, deberá presentar un procedimiento de montaje, que puede ser genérico de la empresa, más el análisis detallado de la maniobra específica a realizar.

Este análisis detallado debe desarrollar al menos los siguientes aspectos:

1. Descripción de la maniobra a realizar firmada por el supervisor a cargo de la maniobra y por el operador que la ejecutará.
2. Planos (o sketch) a escala que muestren toda la geometría de la maniobra.
 - Vista en planta que muestre el radio de giro (de trabajo) y el radio máximo que soporta la grúa para la carga en cuestión.
 - Vista en elevación que muestre el ángulo de la pluma, elevación máxima de la carga y elevación máxima del gancho. En caso de haber interferencia con otro elemento (poste, estructura, etc.) debe mostrarse explícitamente.
 - En el plano de planta se debe indicar la ubicación exacta de las patas de la grúa, el eje de giro (tornamesa), posición inicial de la carga, posición final de la carga, trayectoria de la carga durante la maniobra y todos los elementos que puedan interferir durante la maniobra (ejemplo pilar de estructura, etc.).
 - Cada plano o sketch debe consignar claramente los siguientes datos:
 - ✓ Identificación de la grúa (marca, modelo y capacidad máxima nominal).
 - ✓ Indicar el peso de la carga a mover (incluidos el gancho, yugo, estrobos, etc.)
 - ✓ Nombre y firma del supervisor responsable de la maniobra y del jefe de terreno.
3. Esquema a escala de los elementos de izaje (yugo, estrobos o eslingas, grilletes, etc.) y la carga a mover, verificando longitud y ángulo de los elementos. Se debe indicar explícitamente la posición del centro de gravedad de la carga a levantar.
4. Memoria de cálculo que verifique para cada elemento de izaje el esfuerzo al que estará sometido durante la maniobra, la capacidad máxima nominal y el factor de seguridad resultante. Este documento debe presentarse firmado por el supervisor responsable.
5. Simulación de la maniobra en maqueta virtual “Smart Plant” o algún software que permita esta simulación. En caso de elementos asimétricos que requieren una maniobra particularmente compleja se recomienda fabricar una maqueta a escala para verificar el “comportamiento” de la maniobra.
6. Replanteo topográfico en terreno de la ubicación precisa de la grúa (sus patas) y de la carga en su posición inicial y final.

Presentación de la maniobra

Antes de la ejecución de cualquier maniobra calificada como crítica, el contratista deberá realizar una presentación de ella al superintendente de maniobras y al superintendente del área, con todos los elementos indicados en los puntos anteriores, más los que estime necesarios para mostrar la maniobra y demostrar su correcta ejecución. La presentación debe ser realizada por el supervisor a cargo y debe contar con la presencia del operador que ejecutará la maniobra, quien debe manifestar que:

- Comprende la maniobra.
- Está capacitado para realizarla.
- Está de acuerdo con el procedimiento.

Evaluación previa a la maniobra

Será obligación del supervisor a cargo de la maniobra al momento de su realización, evaluar y confirmar el buen estado anímico y físico de los involucrados directos de la actividad (operador de la grúa, rigger). Se deberá detectar y evaluar por ejemplo jaqueca, malestar estomacal o de otra índole, problema familiar, etc. que le impida una total concentración. El supervisor a cargo tomará la decisión después de su evaluación.

8. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

El objetivo general del presente Trabajo de Título es mostrar las ventajas que tiene introducir un análisis de constructibilidad en las fases tempranas previas a la construcción, es decir en la etapa de ingeniería.

En base a lo desarrollado en el presente trabajo, se puede confirmar que la constructibilidad se enfoca en resolver, de manera anticipada, dificultades y conflictos durante la ingeniería con miras a facilitar la construcción que se realizará posteriormente.

Como se ha indicado anteriormente el análisis de constructibilidad se aplica a todas o al menos la mayoría de las especialidades que se ejecutarán durante la construcción, a saber:

- Movimiento de tierras
- Construcción de caminos
- Obras civiles
- Montaje de estructuras
- Montaje electro mecánico de equipos
- Montaje de piping
- Montaje de líneas eléctricas
- Instrumentación y control
- Servicios de comunicaciones.

No menos importantes son las actividades de construcción asociadas a la infraestructura tales como:

- Construcción de campamentos con sus respectivos dormitorios, casino comedor, gimnasio, entre otros.
- Montaje de planta potabilizadora de agua
- Montaje de planta de tratamiento de aguas servidas
- Montaje de estanques para almacenamiento de agua
- Montaje de estación de combustible
- Construcción y puesta en servicio de policlínico
- Talleres de mantención
- Garita control de acceso
- Oficinas administrativas
- Estación de bomberos
- etc.

8.1. Participación de constructibilidad en otras disciplinas

La constructibilidad no solo participa en la revisión del diseño de ingeniería de la planta propiamente tal y la infraestructura de apoyo, sino que también lo hace de manera significativa en otras disciplinas dentro del ámbito del desarrollo integral del proyecto.

A continuación se resume la participación de constructibilidad en las principales disciplinas o áreas funcionales del proyecto:

- **Compras:** Esta disciplina gestiona la adquisición de materiales, la adquisición de los equipos de proceso de la planta y gestiona algunos servicios específicos necesarios para el proyecto.
El equipo de constructibilidad mantiene una relación estrecha con el equipo de compras, esto debido a dos acciones que se desarrollan después de que se han puesto las órdenes de compra de los equipos principales.
Por una parte se monitorea que las fechas de entrega de los equipos principales se mantenga según el calendario establecido. Por otra parte, cualquier desviación de las fechas debe ser evaluada para tomar las acciones correspondientes.
 - a) Si el suministro de un equipo se retrasa se debe evaluar el impacto y las posibles acciones mitigadoras en forma oportuna
 - b) Análogamente, cuando es posible anticipar un suministro, también resulta de interés evaluar si es posible y si conviene anticipar su montaje.
- **Programación:** Esta disciplina lleva adelante la planificación y el seguimiento del programa global del proyecto.
Sin embargo, el programa de construcción se basa en la secuencia constructiva que el análisis de constructibilidad ha revisado y validado. El especialista en constructibilidad colabora en la elaboración del programa de construcción y en la estimación de rendimientos.
- **Costos:** Esta disciplina tiene la responsabilidad de estimar los costos durante las fases previas a la construcción y controla los costos durante la construcción del proyecto, es decir, monitorea que durante la construcción, los costos se mantengan dentro del presupuesto establecido.
Durante la fase de prefactibilidad la constructibilidad identifica las alternativas de construcción, para cada trabajo específico a realizar, evalúa esas alternativas y selecciona la “alternativa ganadora” que se implementará en el proyecto. La alternativa seleccionada es una que establece un adecuado equilibrio entre costo, rendimiento y seguridad. En consecuencia, la constructibilidad participa en aspectos de costo.
- **Contratos:** En la fase previa a la construcción, esta disciplina licita los contratos de construcción y los contratos de servicio. Durante la fase de construcción administra los contratos de construcción y los contratos de servicio.
Antes que el administrador de contrato inicie la licitación de los contratos, hay una participación de constructibilidad para definir los paquetes de trabajo. Teniendo definidas las grandes áreas físicas del proyecto (Chancado, aglomeración, pilas,

extracción por solventes y electro obtención si se trata de una planta de lixiviación), se elabora la estrategia de contratos y como parte de esta estrategia se definen los paquetes de trabajo y la división de los contratos de construcción, tarea en que la constructibilidad colabora de manera significativa junto al equipo de proyecto.

- Calidad: Esta especialidad realiza el aseguramiento de la calidad de los materiales y de los trabajos realizados en cada contrato de construcción.

No pocas veces la calidad del trabajo que realice el contratista de construcción, depende del método constructivo con que se ejecute la obra. En ocasiones, el análisis de constructibilidad establece un método constructivo específico para ejecutar un trabajo en particular. En este caso la constructibilidad realiza su aporte en base a la experiencia que se tiene en la materia y esto tiene o puede llegar a tener incidencia en la calidad del trabajo.

- Prevención de riesgos: Esta especialidad asesora y gestiona la seguridad y salud ocupacional de todos los trabajadores durante la fase de construcción.

El análisis de constructibilidad desarrollado en las fases previas a la construcción establece el método constructivo a implementar o al menos entrega lineamientos que orientan la manera en que se debe ejecutar el trabajo. Uno de los conceptos principales que se evalúan para la elección del método constructivo es la seguridad para las personas y para los equipos. En consecuencia la constructibilidad tiene una participación activa en relación a la prevención de riesgos.

- Medio ambiente: Esta especialidad resguarda que las acciones que se realizan durante el proceso de construcción no tenga un impacto negativo en el medio ambiente. El análisis de constructibilidad desarrollado en las fases previas a la construcción establece el método constructivo a implementar. Otro de los conceptos principales que se evalúan para la elección del método constructivo es la protección al medio ambiente y cumplimiento de la normativa correspondiente. Luego la constructibilidad tiene una participación activa en relación al medio ambiente.

- Recursos humanos: Esta especialidad administra aspectos administrativos de los trabajadores y gestiona servicios tales como: Transporte, alojamiento en campamento, uso de casino, salas de recreación, gimnasio y otros al personal involucrado en el proyecto.

La dotación de personal que labora en el proyecto es parte de un análisis en el que participa la constructibilidad. La primera estimación de la dotación del proyecto, es decir la curva ocupacional del proyecto, se desprende de los volúmenes de obra que resultan de la cubicación del proyecto, aplicando luego los rendimientos de construcción asociadas a las diferentes actividades del proyecto. A partir del volumen de obra y los rendimientos asociados se obtiene una primera estimación de la dotación de personal requerido. Estos rendimientos son analizados y confirmados como parte del análisis de constructibilidad. Lo anterior corresponde a la mano de obra directa de las actividades de construcción.

Para una estimación completa de la dotación en el proyectos se requiere estimar la dotación de personal indirecto (supervisión) que dirija a la mano de obra directa que ejecuta las obras. Esa estimación forma parte del análisis de constructibilidad.

- Gestión de riesgos: Esta especialidad (que es distinta a Prevención de riesgos) tiene por objetivo identificar, evaluar y mitigar los riesgos potenciales en el proyecto. Esta disciplina organiza los “Talleres de análisis de riesgo del proyecto” y cita a todas las especialidades involucradas para realizar dichos análisis que apuntan no solo al riesgo a las personas, los equipos y el medio ambiente. Aquí la perspectiva es más amplia y aborda riesgos económicos, riesgos que puedan causar pérdida de prestigio a la empresa, riesgos legales y riesgos asociados a problemas con las comunidades. La constructibilidad también participa en la identificación, evaluación y mitigación de estos riesgos.

8.2. Otras tareas que desarrolla la constructibilidad durante la ingeniería

8.2.1. Dimensionamiento de servicios para la construcción

Esta actividad es muy relevante y se debe desarrollar antes de la fase de construcción. Con la información de la dotación de personal en sus distintas categorías (trabajadores, supervisores, superintendentes), es decir con la curva ocupacional obtenida de los análisis previos, se trabaja en el dimensionamiento de los servicios principales que va a necesitar el proyecto durante la construcción, a saber:

- Estimación de la demanda de agua potable durante la construcción
- Estimación de la demanda de agua para construcción.
- Dimensionamiento del campamento de construcción, esto es definir la cantidad de dormitorios en cada categoría de acuerdo con la curva ocupacional del proyecto.
- Dimensionamiento del casino y comedor, esto es, definir la cantidad de servicios de desayuno, almuerzo y cena que se deben entregar diariamente durante la construcción.
- Dimensionamiento de la flota de buses para los viajes diarios del personal a los puntos de trabajo. Dimensionamiento de la flota de buses para la bajada y subida de personal cuando ocurre el cambio de turno.
- Dimensionamiento de las áreas de estacionamiento de buses, camionetas y maquinaria pesada. Todos ellos en forma segregada.
- Dimensionamiento de los centros de acopio de desechos de basura
- Estimación de las áreas de almacenamiento, patios de materiales, patios para recibir equipos de proceso de la planta.
- Dimensionamiento de la planta de hormigones (m³/hr) y dimensionamiento de la flota de camiones mixer para su distribución al interior del proyecto.

El listado anterior corresponde a los principales análisis que se deben desarrollar durante la ingeniería para posteriormente materializar estos servicios a través de los respectivos contratos de servicio.

8.2.2. Gestión de los contratos de servicio

Para que la fase de construcción se pueda desarrollar adecuadamente se hace necesario definir varios contratos de servicio que darán apoyo durante la fase de construcción.

Para establecer estos contratos de servicio la constructibilidad participa en el proceso de licitación de ellos, colaborando en la preparación de bases técnicas y evaluación de ofertas.

Algunos de los principales contratos de servicio requeridos son:

- Administración de campamento que incluye atención de casino, servicio de cocina, administración hotelera en campamento.
- Servicios de transporte, a saber:
- Arriendo de camionetas
- Arriendo de buses para transporte interno y transporte fuera del proyecto en los cambios de turno.
- Servicio de retiro y disposición final de basura generada durante la construcción.
- Servicio de arriendo y mantención de baños químicos.
- Suministro de hormigón. Este servicio incluye:
- La instalación y operación de una planta de hormigón.
- Servicio de distribución de hormigón al interior de la planta mediante una flota de camiones mixer
- Servicio de laboratorio de autocontrol de hormigones.
- Arriendo de mobiliario de oficina
- Arriendo de equipamiento de oficina: computadores, impresoras, ploter.
- Servicio de aseo en dormitorios y dependencias del campamento como así también en oficinas administrativas.

Considerando la activa participación de la constructibilidad en el desarrollo del proyecto indicada anteriormente, es evidente la ventaja de realizar un estudio de constructibilidad en las fases tempranas. Más aún, en la actualidad no solo es una ventaja sino que llega a ser un requerimiento importante y en algunos casos una exigencia para el desarrollo de un proyecto.

El análisis de constructibilidad comenzó buscando la mejor manera de ejecutar la construcción basado en la experiencia, los materiales y los recursos técnicos disponibles de mano de obra, equipos y maquinaria. Todo con el objetivo de facilitar la construcción y evitar o al menos anticiparse a los problemas constructivos.

Con la visión de facilitar la construcción y anticiparse a los problemas, la constructibilidad gradualmente incursiona en los métodos constructivos y la secuencia constructiva dando

un mayor respaldo al programa de construcción. Continúa avanzando con la evaluación de rendimientos en base a la experiencia y también con la evaluación de los riesgos. Dado que la constructibilidad realiza diversos análisis a lo largo del desarrollo del proyecto, en forma natural alcanza un nivel de conocimiento y comprensión del proyecto bastante amplio. Esto le permite trabajar en el dimensionamiento de los servicios necesarios para la construcción y consecuentemente colabora activamente en el proceso de licitación de los contratos de servicio.

Finalmente se puede ver que la constructibilidad participa en una gran cantidad de actividades que son absolutamente necesarias para llevar adelante un proyecto para la minería del cobre.

8.3. Resumen del análisis de constructibilidad en los casos presentados

A continuación se resumen las ventajas y beneficios obtenidos por la aplicación de un estudio de constructibilidad en los casos reales presentados.

8.3.1. Montaje molino SAG

En este caso el problema surge del atraso en la entrega por parte del proveedor (fabricante) del molino SAG que al poco tiempo de formalizar la orden de compra para la fabricación del molino SAG, es decir después de terminada la ingeniería básica, informó que tendría un atraso importante en la entrega a causa de la no disponibilidad de algunos insumos y servicio de maquinado necesario para la fabricación del equipo. El fabricante del equipo finalmente hizo la entrega aproximadamente cuatro meses después de la fecha programada.

El análisis de constructibilidad realizado durante la ingeniería de detalles permitió establecer otra secuencia constructiva en que la fecha de montaje del molino SAG se desplazó aproximadamente seis meses más tarde con respecto a la fecha original de proyecto, quedando la fecha real de suministro compatible con la nueva fecha de montaje.

Esta nueva secuencia obligó a realizar cambios sustanciales en el diseño del edificio. El edificio debió ser mucho más robusto y con un puente grúa de mayor capacidad que, además se proyecta fuera de la nave.

Se realizaron gestiones con el fabricante para reducir el peso del componente mayor del molino. Esto básicamente consiste en un cambio del diseño en que el componente mayor se divide en dos o más partes que se ensamblan en vez de ser un solo cuerpo.

El puente grúa debió redefinirse para una carga superior que permita realizar el montaje de los componentes del molino.

Finalmente la fecha de término para el montaje completo del molino SAG, edificio y todos los sistemas auxiliares se cumplió con éxito.

8.3.2. Caminos interiores

En muchos proyectos ya sea una planta concentradora o una planta de lixiviación se definen dos trazados de camino diferentes:

- a) Caminos de construcción. Son caminos de uso temporal que prestan servicio durante la fase de construcción del proyecto con una duración de uno a tres años aproximadamente. Estos caminos de construcción se materializan con una capa de material granular compactado que se usa como carpeta de rodado.
- b) Caminos permanentes. Son caminos de uso definitivo para la minera durante la vida útil de la planta. Estos caminos se materializan de distintas maneras según la necesidad y presupuesto disponible. Los hay de asfalto, doble tratamiento superficial y también se construyen caminos de tierra para uso permanente.

En este caso el análisis de constructibilidad realizado durante la ingeniería de detalles propuso no construir los caminos de construcción (caminos temporales al interior del proyecto) que estaban definidos en la ingeniería básica, dando como solución la construcción anticipada de los caminos definitivos de la planta para su uso durante la fase de construcción.

De esta manera los caminos definitivos prestaron servicio durante la construcción aportando un alto nivel de servicio con las siguientes ventajas.

- Se redujo el tiempo de viaje diario a los puntos de trabajo durante todo el periodo de construcción
- Se ganó en seguridad de tránsito, al disminuir fallas mecánicas que se producen en un camino de construcción en mal estado.
- Se logró disminuir notoriamente la polución que afecta a todas las personas e instalaciones cuando se circula por caminos de construcción
- Se eliminó el contrato “Caminos temporales de construcción” lo que implicó no sólo la disminución de costo del contrato, sino la reducción de personal que requiere alimentación, alojamiento, transporte interno y externo, entre otros.
- Se disminuyó significativamente el costo del contrato de riego y mantención de caminos de construcción (de tierra) contrato que es ineludible dada la alta polución que genera el tránsito de todo tipo de vehículos en los caminos de construcción.

8.3.3. Reemplazo de puente grúa

El trabajo se realiza en un proyecto brown field, es decir en una planta en operación. Este trabajo se origina en la necesidad de dar cumplimiento a la normativa internacional de diseño europea que define la vida útil de un puente grúa en 10 años. El puente grúa en cuestión, aún cuando no ha presentado fallas, se encuentra por sobre la vida útil, es decir, tiene más de 10 años en servicio en la línea de molienda SAG 1 de la planta.

Las principales dificultades que presenta este trabajo son: Encontrar un área apta para emplazar la grúa con que se realizará el montaje y por otra parte, la altura, peso y distancia a la que se debe instalar el nuevo puente grúa.

Todo lo anterior sujeto a la condición de no afectar la operación por lo que los trabajos se deben realizar dentro de los tiempos establecidos para las paradas de planta que se realizan para mantenimiento preventiva.

El análisis de constructibilidad permitió identificar cuatro alternativas viables para realizar el montaje, analizó la estrategia constructiva que se debe implementar para realizar el montaje en cada una, evaluó las cuatro alternativas y determinó cuál de ellas será la solución a implementar.

Finalmente se presenta un estudio detallado de cómo se realizará el montaje, define el equipo de izaje a emplear (grúa Liebherr LTM 1320/6.1) de 350 toneladas de capacidad. Más que una ventaja, este análisis de constructibilidad resulta ser absolutamente necesario para establecer la viabilidad de realizar el cambio del puente grúa.

En otras palabras, se trata de encontrar la mejor manera de realizar el cambio de puente grúa que no solo es un deseo sino una necesidad para dar cumplimiento la normativa.

8.3.4. Montaje de cañería de reactivos

En este caso se trata de montar una cañería de 4" de diámetro para conducir lechada de cal, un reactivo que se debe aplicar a la pulpa antes del proceso de flotación.

Al analizar el proyecto se pudo constatar que no se hizo un análisis de constructibilidad completo y robusto dejando sin abordar aspectos de seguridad de gran importancia que impactan en el proceso constructivo.

El problema radica en la necesidad de construir una trinchera de hormigón prefabricado cuyo trazado se ubica muy cercano a una línea eléctrica enterrada de media tensión (13,8 kV) que está energizada. Por otra parte la trinchera se ubica cercana a una correa que transporta mineral.

El análisis de constructibilidad estableció que no es admisible el trazado definido en base al análisis de riesgo realizado.

El análisis de constructibilidad definió un nuevo trazado con el que se eliminó el riesgo de entrar en contacto con la línea energizada y eliminó el riesgo de entrar en contacto con la correa en operación.

El nuevo trazado acarreó otras dificultades que fueron abordadas y subsanadas en la ingeniería de detalles.

Finalmente se puede concluir que:

En un proyecto de gran envergadura como los actuales proyectos de la minería del cobre en Chile, el análisis de constructibilidad es un requisito indispensable para el desarrollo completo de un proyecto.

En un proyecto de menor envergadura, como es el caso de el cambio de un determinado equipo de proceso (puente grúa, celda de flotación, correa transportadora, etc.) el análisis de constructibilidad es necesario dado que se trata de un trabajo en un proyecto brown field donde es necesario identificar las condiciones del entorno, las interferencias existentes y se debe garantizar la no afectación a la planta que está en operación.

En un proyecto cualquiera, no necesariamente ligado a la minería, como puede ser la construcción de un edificio, puente, tramo de carretera, obras de infraestructura u otro, el análisis de constructibilidad es recomendable y deberá extenderse en la medida de lo necesario.

8.4. Objetivos específicos alcanzados

Con base en lo anteriormente expuesto, los ejemplos citados en el capítulo 7 y en general toda la información desarrollada en este documento, se puede decir que el objetivo general de mostrar las ventajas que tiene introducir un análisis de constructibilidad en las fases tempranas previas a la construcción, fue alcanzado con éxito.

En relación a los objetivos específicos enunciados al inicio de este trabajo, también se lograron, ya que:

- a) Se ha logrado entregar una visión amplia de la constructibilidad, más allá de la definición académica que se tiene de ella.
- b) Se presentaron y describieron cuatro casos concretos en que el autor aplicó conceptos de constructibilidad y se muestran los resultados obtenidos.
- c) En los capítulos 4 y 6 de este documento se enlistan las tareas específicas en donde tiene participación la constructibilidad durante el desarrollo de un proyecto de minería en Chile. El enfoque mostrado es transversal a cualquier proyecto asociado a plantas de lixiviación y a plantas concentradoras de cobre.

Finalmente se entregan recomendaciones generales para abordar la constructibilidad en proyectos para la minería del cobre en Chile, basado en la experiencia.

8.5. Recomendaciones

Los diversos problemas que surgen en la etapa de construcción en la mayoría de los casos implican un retraso de los trabajos con el correspondiente impacto en el programa de construcción.

A continuación algunas recomendaciones de orden general para anticiparse a los problemas.

1. Durante la ingeniería: En muchas ocasiones el ingeniero que diseña no tiene experiencia en la construcción de terreno y por otro lado no siempre tiene información confiable y completa respecto de las interferencias y limitaciones físicas que se pueden tener en el frente de trabajo. Esto puede dar origen a diseños aparentemente

lógicos y perfectamente construibles cuando se mira el plano, pero llegado el momento de la construcción se presentan dificultades. Una primera recomendación es indagar las condiciones y limitaciones del sitio del proyecto y transmitir esa información al equipo de ingeniería para que las considere en el diseño.

2. Durante la construcción: Para lograr un buen desempeño en la construcción, es necesario que las diferentes especialidades que participan estén adecuadamente coordinadas. Esto es bastante obvio, sin embargo no resulta fácil lograr esa adecuada coordinación en terreno. El equipo que dirige las acciones en terreno debe hacer un esfuerzo orientado específicamente a transmitir la información y trabajar en la coordinación interdisciplinaria en forma permanente ya que es fundamental para evitar tiempos muertos y así mejorar el rendimiento.
3. Durante la ingeniería: Difundir formalmente los hallazgos y los resultados de los análisis de constructibilidad que se realizan. No es útil que el equipo de constructibilidad tenga estudiado el proyecto de buena forma si la información no se difunde a los involucrados. Se recomienda realizar reuniones informativas regulares para que todo el equipo esté al corriente de los problemas existentes, la estrategia a seguir y la manera de implementar las soluciones.
4. Durante la ingeniería: Propiciar el empleo de elementos prefabricados de hormigón en el proyecto. La idea es reemplazar las actividades de enfierradura, moldaje, hormigonado, curado e instalación de pernos de anclaje en una actividad de montaje de hormigón prefabricado. Esto aplica principalmente para las fundaciones, pero también se aplica a otros elementos tales como: pilares, muros, vigas, losas, canaletas, cámaras, etc.
Lo anterior es ventajoso dado que el costo de la HH directa en el proyecto es más cara y menos eficiente que la misma HH realizada por un operario que trabaja en una planta de prefabricados en la ciudad.
5. Durante la ingeniería: Simplificación de los detalles constructivos. Promover en el equipo que realiza el diseño de ingeniería que los detalles constructivos sean claros, fáciles de interpretar y sencillos de ejecutar, en la medida de lo posible. Lo anterior con el fin de reducir los errores durante la construcción. Lo anterior está en consonancia con lo indicado en el ítem 6.9 de este documento donde se dice que el proyecto se alimenta mejor de soluciones buenas y no necesariamente con la solución óptima que puede demandar tiempo y recursos significativos.
6. Un aspecto que no siempre es analizado en detalle es el tiempo efectivo que un trabajador dispone para realizar los trabajos encomendados en terreno.
Si el proyecto opera en un sistema de turnos con su jornada establecida, por ejemplo turno diurno de 14 días laborales continuos seguidos de 7 días de descanso, con jornada de 12 horas diarias. Este turno se denomina 14x7.

Resulta de gran interés realizar un análisis de los tiempos en que se realizan otras actividades complementarias. Se deben identificar todas las actividades “no productivas” y medir o estimar los tiempos que se emplean:

Algunas de las actividades típicas son:

Tabla 19: Actividades no productivas

Actividad no productiva	Tiempo estimado [hr]
Traslado (ida almuerzo)	0,25
Traslado (regreso almuerzo)	0,25
Casa de Cambio Mañana	0,25
Casa de Cambio Tarde	0,25
Almuerzo	1
Orden y aseo	0,33
Charla Diaria	0,25
ART y firmas	0,5
Inicio de turno y preparación de herramientas	0,33
Charla de liderazgo (una vez/semana)	0,05
Total	3,46

Fuente: Elaboración propia

Los tiempos aquí indicados son un mero ejemplo, en ocasiones el tiempo de traslado hacia y desde el casino para almorzar es muy superior a 15 minutos.

ART es el análisis de riesgo de la tarea. Es práctica obligada la realización de un análisis de riesgo del trabajo que se va a ejecutar. Este análisis se realiza antes de iniciar el trabajo y en él participan todos los trabajadores involucrados en la actividad. El análisis queda registrado en un documento (ART) que una vez concluido, debe ser firmado por el supervisor a cargo del trabajo.

Luego de las 12 horas de la jornada, se gastan 3.46 hr. en actividades que son necesarias pero no son productivas, en consecuencia el tiempo efectivo de la jornada será:

T efec. = 8.54 hr

En ocasiones por no realizar este análisis de tiempo efectivo o por una estimación muy “optimista” se observa un menor avance de las obras lo que se atribuye a una baja en el rendimiento, cuando la causa no es un bajo rendimiento sino una disminución del tiempo efectivo para trabajar. La correcta determinación del tiempo efectivo en faena es relevante al momento de la planificación y programación de las obras.

9. BIBLIOGRAFÍA

1Library. (2024). *Lean construction: Antecedentes históricos de la filosofía Lean*, p1. <https://1library.co/article/lean-construction-antecedentes-hist%C3%B3ricos-filosof%C3%ADa-lean.yngler1z>

Academia.edu Journals. (2024). *Revisión de los equipos de decantación para estériles de mina*. https://www.academia.edu/95298720/Revisi%C3%B3n_De_Los_Equipos_De_Decantaci%C3%B3n_Para_Est%C3%A9riles_De_Mina_Del_Espesador_Convencional_Al_De_Cono_Profundo_Para_La_Producci%C3%B3n_De_Pasta

Base de Datos Estadísticos (BDE). (2024). *Producto interno bruto por clase de actividad económica*. Banco Central. https://si3.bcentral.cl/Siete/ES/Siete/Cuadro/CAP_CCNN/MN_CCNN76/CCNN2018_P1/637801087677220267

Braun, J., Braun, M., Briones, I., Díaz, J., Lüders, R. Wagner, G. (2000). *Economía Chilena 1810-1995. Estadísticas Históricas* (p.42-45). Instituto de Economía. Pontificia Universidad Católica de Chile. <https://www.bibliotecanacionaldigital.gob.cl/visor/BND:9044>

Cardemil, M (2023). *Informe N° 04-23 Impactos socioeconómicos de la minería en Chile*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/34140/1/Informe_N_04_23_Impactos_socioeconomicos_de_la_mineria_en_Chile.pdf

Codelco educa. (s.f.). *Electroobtención* <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/electroobtencion.html>

Codelco educa. (s.f.). *Flotación* https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005132/flotacion_media_t_cnico_060119.pdf

Codelco educa. (s.f.). *Lixiviación de cobre* https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109001332/escolares_lixiviaci_n.pdf

Codelco educa. (s.f.). *Molienda* https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005343/molienda_media_t_cnico_060119.pdf

Colegio de ingenieros civiles de México. (17 jul 2022). *La Metodología FEL aplicada a la gerencia de proyectos*.

<https://www.eluniversal.com.mx/opinion/colegio-de-ingenieros-civiles-de-mexico/la-metodologia-fel-aplicada-la-gerencia-de-proyectos/>

Comisión Chilena del cobre [Cochilco] (2024). *Producción minera. Producción cobre de mina por empresa*.

<https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases%20de%20Datos/Produccion%20de%20Cobre%20de%20Mina.aspx>

Construction Industry Institute (CII). (2020). *Guidelines for constructibility implementation*.

Construction Management Association of America (CMAA). (2021). *Standards and practices for constructibility reviews*.

Desnacionalización del cobre. (26 jun 2024). Sección: *El fenómeno de la desnacionalización del cobre*. En wikipedia.

https://es.wikipedia.org/wiki/Desnacionalizaci%C3%B3n_del_cobre

Diagrama de proceso planta de lixiviación (s.f.)

<https://image.slidesharecdn.com/hidrometalurgiadecu-110224101711-phpapp02/95/hidrometalurgia-del-cu-29-728.jpg?cb=1298542720>

Electro Industria (abr 2015). *Optimización del espesador*

<https://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2491&ni=optimizacion-del-espesador-para-reducir-los-costos-de-produccion>

Elesgru. (s.f.). *Grúas Torre*

<https://elesgru.com/gruas-torre/>

Energía en minería. (s.f.). *Extracción por solventes*. Ministerio de energía. Gobierno de Chile

<https://www.energiaenmineria.cl/procesos/extraccion-por-solventes/>

Eral-Chile. (2020). *Aglomeradores*

<https://eralchile.com/equipo/aglomeradores#:~:text=Los%20Cilindros%20Aglomeradores%20fabricados%20por,de%20cobre%20y%20oro%20y%20uranio.>

EYG Ingeniería y Partes S.A.S. (2024). *Principio de funcionamiento del molino de bolas*

<https://eygingeneria.com.co/producto/molino-de-bolas-para-minerales/>

FLSmidth. (21 feb 2024). *Celda de flotación en columna*. Ficha de producto.

https://www.flsmidth.com/-/media/brochures/brochures-products/flotation/fls-column-flotation-cell_datasheet_es.pdf

Grúas & Equipos García. (2024). *Clasificación, tipo y características de las grúas*
<https://www.gruasyequiposgarcia.com/clasificacion-tipo-y-caracteristicas-de-las-gruas/>

Imagen: *Aglomerador*

https://eralchile.com/storage/app/uploads/public/0cf/df0/543/thumb_1155_650_0_0_crop.jpg

Imagen: *Caminos tratados con bischofita*

https://www.metalia.cl/data/img_noticias/1503.jpg

Imagen: *Camión pluma al interior de edificio*

<https://www.gruasberenguer.com/wp-content/uploads/2022/10/almacenaje-y-distribucion.jpg>

Imagen: *Celda de agitación*

<https://www.911metallurgist.com/metallurgia/wp-content/uploads/2018/06/Diferentes-Tipos-de-Celdas-de-Flotaci%C3%B3n-Equipment.png>

Imagen: *Celda de flotación circular*

<https://image.made-in-china.com/202f0j00lmWEQcnGhKuq/Mining-Equipment-Pneumatic-Circular-Flotation-Cell-of-Mineral-Processing-Plant.webp>

Imagen: *Celda de flotación en columna*

https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTwtcD_vWK6Js-OnBydRIISq-4z9LJEKZOVpq&s

Imagen: *Celda Jameson*

https://media.licdn.com/dms/image/v2/C4D12AQF-nWuNWVRDHw/article-inline_image-shrink_400_744/article-inline_image-shrink_400_744/0/1520142777291?e=1729728000&v=beta&t=dESA-qpqBBQfZrod_2jxbdMJTuArRTiaWj75a7JiAmM

Imagen: *Celda mecánica convencional*

<https://servingsa.com/images/services/celdasConvencionales-5.jpg>

Imagen: *Celda neumática*

https://image.slidesharecdn.com/tema10-flotacinppt-220828231324-db38be57/85/Tema-10-Flotacion_PPT-pdf-42-320.jpg

Imagen: *Chancador de mandíbula*

<https://carpai.cl/wp-content/uploads/mandibula.png>

Imagen: *Chancador de rodillo*

https://s3.us-east-1.amazonaws.com/mclanahan.com/prod/images/Products/Dry/DDC-Sizer/Fine-Grinding-Sizer/McLanahan_Sampling_Sizers.jpg

Imagen: *Chancador giratorio*

<https://www.crushersparts.cl/es/chancador-giratorio.php>

Imagen: *Diagrama de proceso LIX-SX-EW*

<https://www.researchgate.net/profile/Cristian-Vargas-17/publication/323498614/figure/fig1/AS:631321424568320@1527530165736/Figura-1-Esquema-proceso-hidrometalurgico-LIX-SX-EO-para-el-cobre.png>

Imagen: *Espesador*

<https://empiricaconsultores.cl/wp-content/uploads/2022/05/espesador-para-reducir-costos-1.jpg>

Imagen: *Espesador de alta capacidad*

<https://www.emb.cl/electroindustria/picarti/201504/art2.jpg>

Imagen: *Espesador de pasta*

https://www.metso.com/contentassets/b42dd5bfd48a480e8bb6cbb70a47e38e/hct-water.3020e_forscreenusedpi150.jpg?preset=preset_700x700_no-crop

Imagen: *Filtro prensa*

<https://www.thprocess.com/gestor/recursos/uploads/imagenes/productos/filtro%20apn/filtro%20APN%20resized/filtro-de-prensa-apn-th-10.jpg>

Imagen: *Grúa articulada*

https://trainingmaq.cl/wp-content/uploads/2022/05/grua-pluma-para-camion_0437c44_3-540x360.jpg

Imagen: *Grúa horquilla*

https://fotos.encuentra24.com/t_or_fh_l/f_auto/v1/cl/26/40/25/37/26402537_8b0954

Imagen: *Grúa sobre camión*

<https://media.istockphoto.com/id/476840682/es/foto/gr%C3%BAa-m%C3%B3vil.jpg?s=612x612&w=0&k=20&c=e9UA3FRk4rg44lytE-LuHxpd3qOmV0FbP7mcfyRfbcA=>

Imagen: *Grúa sobre orugas*

<https://colgruas.com.co/wp-content/uploads/2021/09/GHC30.png>

Imagen: Grúa todo terreno

<https://gruasyaparejos.com/wp-content/uploads/2020/12/Partes-de-una-grua-telescopica-logo.jpg>

Imagen: Grúa torre

<https://victoryepes.blogs.upv.es/files/2014/03/DRUMf6mWsAEuNib.jpg>

Imagen: *Maniobra con puente grúa*

https://www.conductix.us/sites/default/files/styles/hundred_percent_narrow/public/Quick-Bridge-Radio-Remote-Crane-Bridge-electrification-1.jpg?itok=-Pof8nAe

Imagen: *Maqueta*

https://ae-pic-a1.aliexpress-media.com/kf/S55fde18468774b6386d7e26f10dbb6eeV.jpg_300x300Q70.jpg_.webp

Imagen: *Molienda autógena*

https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRLHlrOT8Vn1_PYSPmAw-FQcGFUDs0amYX7X9xb9gbwZ-92t4JEEaa4BhQ9co6VYh4jfRho&usqp=CAU

Imagen: *Molino de barras*

https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSO5_KqpgKyy9Hkx8Ec0Y3WFBbAUzn81jNVBQ&s

Imagen: *Molino de bolas*

<https://es.cicemech.com/uploads/image/20210819/15/wet-grid-ball-mill.jpg>

Imagen: *Molino de impacto*

<https://www.jxscmachine.com/wp-content/uploads/2022/12/impact-crusher-structure-1.png>

Imagen: *Molino SAG*

<https://intermetperu.com/wp-content/uploads/2023/05/curso-molienda-sag-y-bolas-analisis-de-variables-operativas-1024x501.jpg>

Imagen: *Montaje a dos grúas*

<https://gruasymaniobras.com/wp-content/uploads/2019/05/izaje-de-cargas-entre-dos-gruas.jpg>

Imagen: *Montaje de alto tonelaje – base turbina*

https://www.gruasyequiposgarcia.com/wp-content/uploads/2013/08/10_Grua-izaje-de-base-para-turbina-eolica-640x400.jpg

Imagen: *Montaje de estructura – maniobra simétrica*

<https://constructivo.com/imgPosts/1556906270VYTUL8Tb.jpg>

Imagen: *Montaje de tolva camión minero – maniobra simétrica*

https://media.licdn.com/dms/image/v2/C5612AQHSAgBh6ZHj9A/article-cover_image-shrink_600_2000/article-cover_image-shrink_600_2000/0/1520140160694?e=2147483647&v=beta&t=HO5g3kPPim8xD-Ov7PKhV27d1HjLTYIEHDKg8NrZwkY

Imagen: *Pila*

<https://revistamineria.com.pe/archivos/img/m536-20211213-104403-aa9.jpg>

Imagen: *Pila real*

<https://www.energiaenmineria.cl/wp-content/uploads/2020/11/lixiviacion-oxido-descrip.jpg>

Imagen: *Puente grúa*

<http://cdn.globalso.com/hyportalcrane/Double-Girder-Overhead-Crane1-300x225.jpg>

Imagen: *Riego con bischofita*

https://vialactivo.cl/wp-content/uploads/2024/03/Uso-de-Bischofita_tictactep_vialactivo.png

Imagen: *Unión victaulic*

<https://gasairca.com/wp-content/uploads/2019/12/victaulic-producto-02.jpg>

Imagen: *Vertimill*

<https://procesaminerales.blogspot.com/2012/09/molienda-torre-verti-mill.html>

Ingeniería de calidad. (2023). *Historia del Lean Manufacturing. Origen del modelo Toyota Production System.*

https://www.ingenieriadecalidad.com/2018/09/historia-del-lean-manufacturing.html#google_vignette

Ingenieros Top. (2019). *¿Qué es la metodología Front-End Loading (FEL) para el desarrollo de grandes proyectos de infraestructura?*

<https://ingenierostop.com/newsletter/18>

Matec Industries (7 mar 2024). *Qué es y cómo funciona un filtro de prensa de placas*

<https://www.matecindustries.com/es/como-funciona-un-filtro-prensa-de-placas/>

McLanahan (s.f.). *Los chancadores de rodillo simple*

<https://www.mclanahan.com/es/productos/los-chancadores-de-rodillo-simple>

Memoria Chilena (2024). *Origen de la gran minería del cobre 1904 -1930*. Biblioteca Nacional de Chile.

<https://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-3632.html>

Metalurgia del cobre (3 may 2024). *Sección: Extracción de cobre*. En Wikipedia.

https://es.wikipedia.org/wiki/Metalurgia_del_cobre

Metso (2024). *Chancadores*

<https://www.metso.com/es/agregados/productos/chancadores/>

Metso (2024). *Espesador de pasta de segunda generación*

<https://www.metso.com/es/portafolio/espesador-de-pasta/>

Metso (2024). *Vertimill. Sección: Cómo funciona el vertimill?*

<https://www.metso.com/es/portafolio/vertimill/>

Mineral. (2 jun 2024). *Sección: Definición*. En Wikipedia.

<https://es.wikipedia.org/wiki/Mineral>

Morales, A. L. y Hantke, M. (2020). *Guía metodológica de cierre de minas*. Documentos de Proyectos (LC/TS.2020/166), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (p. 40).

<https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/766a85c7-5ac4-4cd4-874a-f06c6c2060c6/content>

Navarro, P., Espinoza, D., Vargas, C. (feb 2018). *Caracterización de diluyentes usados en extracción por solventes*. *KnE Engineering*.

https://www.researchgate.net/publication/323498614_Caracterizacion_de_Diluyentes_Usados_en_Extraccion_por_Solventes

NCh-ISO 31010 (2013). *Gestión del riesgo. Técnicas de evaluación del riesgo* Primera edición. (27 mar 2013).

https://www.academia.edu/30072740/NORMA_CHILENA_NCh_ISO_31010_Gesti%C3%B3n_del_riesgo_T%C3%A9cnicas_de_evaluaci%C3%B3n_del_riesgo_Risk_management_Risk_assessment_techniques

Paulson, L. y Aouad, G. (1986). *Constructability Concepts and Practice*. Ed. American Society of Civil Engineers (ASCE)

Planet Gold Colombia (3 jun 2024). *Manual 9 - Celda de flotación circular*

<https://www.planetgold.org/sites/default/files/Manual%209%20-%20Celda%20de%20flotacion%20circular.pdf>

Planta de extracción por solventes. (30 oct 2016)

<https://plantaesdetodo.blogspot.com/2016/10/>

Portal minero (s.f.). *Cosecha de cátodos*

<https://pm.portalminero.com/images/noticias/6697e5ed181ef.jpg>

Química industrial (2024). *Bischofita*

<https://quimicaindustrial.cl/bischofita/?srsltid=Afm-BOopBBG396aaInYIJ780tPuAx8Us7jNS-E8esfeCUHUqXZmG9rdy4>

Retsch (2024). *Molino de impacto de palas. Principio de funcionamiento*

<https://www.retsch.es/es/productos/molienda/molinos-de-rotor/sk-300/>

Rincón educativo. (s.f.). *Edison patentó la lámpara incandescente*

<https://rinconeducativo.org/es/efemerides/27-de-enero-de-1880-edison-patenta-la-lampara-incandescente/>

SafetyCulture (2024). *Matriz de riesgo*

<https://safetyculture.com/es/temas/evaluacion-de-riesgos/matriz-de-riesgo/>

Scribd (2024). *Funcionamiento Chancador*

<https://es.scribd.com/document/373656466/FUNCIONAMIENTO-CHANCADOR>

Imagen: <https://carpai.cl/wp-content/uploads/cono.png>

Sertec. (s.f.). *Manual de comisionado.*

https://sertecsa.net/sertec/documentos/MANUAL_DE_Comisionamiento%20 BRIEF.pdf

Slideshare (s.f.). *Celdas de flotación (mecánica, de agitación, neumática y Jameson)*

<https://es.slideshare.net/slideshow/05celdasdeflotacion/27535932>

Statista Research Department (Enero 2024). *Ranking de los países con mayores reservas de cobre en 2023.*

<https://es.statista.com/estadisticas/635670/reservas-mundiales-de-cobre-por-paises/>

Statista Research Department (22 may 2024). *Reservas de cobre de Chile de 2010 a 2023.*

<https://es.statista.com/estadisticas/1317827/chile-reservas-de-cobre/#:~:text=Durante%20el%20periodo%20analizado%2C%20el,los%20210%20millones%20de%20toneladas>

Universidad Politécnica de Cartagena (18 nov 2011). *Molienda autógena*

https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5549/mod_resource/content/1/Tema_5_-_Molienda_II_.pdf

Valdivia, M. (2022). *Metodología de análisis de impacto económico asociado a la incertidumbre de parámetros operacionales en planta concentradora de minerales de cobre.*

Memoria de título. [FCFM] Universidad de Chile.

<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/187119/Metodologia-de-analisis-de-impacto-economico-asociado-a-la-incertidumbre-de.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

VialActivo (7 mar 2024). *La bischofita un poderoso aliado en la lucha contra el polvo y el hielo en carreteras.*

<https://vialactivo.cl/la-bischofita-un-poderoso-aliado-en-la-lucha-contra-el-polvo-y-el-hielo-en-las-carreteras/>