



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

Criterios de diseño para infraestructura interior Mina División El Teniente, Codelco.

Memoria de Título presentada por

Benjamín Agustín Soto Pérez

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Rodrigo Humberto Muñoz Valderrama

Profesor Correferente
Gilberto Leiva

Julio de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Criterios de diseño para infraestructuras interior mina Division El Teniente, Codelco

Nombre del candidato(a): Benjamin Agustin Soto Perez

Carrera / Grado: Ingenieria Civil

Campus: Casa Central Valparaiso ; **Departamento:** De Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Rodrigo Muñoz, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 02/07/2025 ; Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 01/07/2025 ; Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

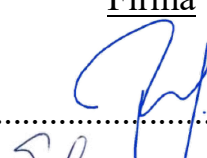
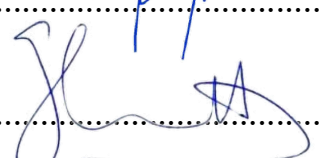
TITULO DE LA TESIS:

Criterios de diseño para infraestructura interior Mina División El Teniente, Codelco.

AUTOR:

Benjamín Agustín Soto Pérez

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	<u>Nombre</u>	<u>Firma</u>
Tutor Guía	Rodrigo Muñoz	 
Prof. Correferente	Gilberto Leiva	 

Valparaíso, Chile, Julio de 2025.



ÍNDICE

1	Introducción.....	11
1.1	Contexto General.....	11
1.2	Objetivos	12
1.2.1	Objetivo general	12
1.2.2	Objetivos específicos.....	12
1.3	Metodología.....	12
1.4	Alcance.....	14
2	Contexto técnico del estudio	15
2.1	Característica de mina el teniente.....	15
2.2	Métodos de explotación.....	16
2.3	Infraestructura interior mina, Sistema de traspaso intermedio	18
2.3.1	Puntos de extracción (Destacado con el N° 1 en la Figura 2.5.).....	19
2.3.2	Carpeta de rodado (Destacado con el N°2 y N°8 en la Figura 2.5.).....	20
2.3.3	Puntos de vaciado (Destacado con el N° 4 en la Figura 2.5.).....	20
2.3.4	Parrilla clasificadora	21
2.3.5	Fundaciones y bases de martillo pica roca semi- estacionario (Destacado con el N° 3 en la figura 2.5.).....	22
2.3.6	Piques de traspaso intermedio (Destacado con el N°5 en la Figura 2.5.).....	22
2.3.7	Tronco pique (Destacado con el N°6 en la Figura 2.5.)	23
2.3.8	Buzones laterales intermedios (Destacado con el N°7 en la Figura 2.5.).....	24
2.4	Solicitaciones estructurales en el diseño de obras mineras	24
2.4.1	Solicitaciones convencionales para estructuras de superficie.....	25
2.4.2	Solicitaciones de infraestructura interior mina	26
2.4.2.1	Condiciones ambientales	26
2.4.2.1.1	Bombeo de Agua- Barro.....	26
2.4.2.1.2	Agua Interior Mina (No estructural).....	27
2.4.2.2	Inestabilidad Geomecánica	28
2.4.2.2.1	Inestabilidad geomecánica por columna de roca.	28
2.4.2.2.2	Desprendimiento por discontinuidades del macizo rocoso.....	29
2.4.2.2.3	Evento sísmico con consecuencia de Estallido de Roca.....	30
2.4.2.2.4	Colapsos.	31
2.4.2.3	Cargas y Condiciones Operacionales.....	32
2.4.2.3.1	Cargas por operación de Equipo Pesado.	32
2.4.2.3.2	Cargas por Manejo de Mineral.	32
2.4.2.3.3	Tronadura y uso general de explosivos.	34



2.4.3	Comentarios Generales Carga Interior mina.	35
3	Comportamiento infraestructura interior mina.	35
3.1	Contextualización inicial.	35
3.2	Consideraciones sobre estructuras de sacrificio en diseño subterráneo.	36
3.3	Puntos de extracción.	37
3.3.1	Marcos de acero.	37
3.3.1.1	Supuestos actuales de diseño.	37
3.3.1.2	Comportamiento real en terreno.	42
3.3.1.3	Mejoras y medidas de mitigación.	53
3.3.2	Muro de fortificación.	55
3.3.2.1	Supuestos actuales de diseño.	55
3.3.2.2	Comportamiento real en terreno.	61
3.3.2.3	Mejoras y medidas de mitigación.	62
3.4	Carpeta de rodado.	62
3.4.1	Supuestos actuales de diseño.	62
3.4.2	Comportamiento real en terreno.	63
3.4.3	Mejoras y medidas de mitigación.	65
3.5	Puntos de vaciado; brocales, parrillas y muro tope.	68
3.5.1	Supuestos actuales de diseño.	68
3.5.2	Comportamiento real en terreno.	68
3.5.3	Mejoras y medida de mitigación.	70
3.6	Fundación y sub base martillo pica roca.	72
3.6.1	Supuestos actuales de diseño.	72
3.6.2	Comportamiento real en terreno.	73
3.6.3	Mejoras y medida de mitigación.	75
3.7	Piques de traspaso intermedio.	78
3.7.1	Supuestos actuales de diseño.	78
3.7.2	Comportamiento real en terreno.	78
3.7.3	Mejoras y medidas de mitigación.	79
3.8	Tronco pique y buzones laterales.	81
3.8.1	Supuestos actuales de diseño.	81
3.8.2	Comportamiento real en terreno.	82
3.8.3	Mejoras y medidas de mitigación.	84
4	Propuestas de criterios de diseño.	86
4.1	Enfoque general.	86
4.2	Criterios de diseño estructura Puntos de extracción.	86
4.3	Criterios de diseño estructura carpeta de rodado.	87
4.4	Criterios de diseño estructura Puntos de vaciado; brocales, parrillas y muros tope.	88



4.5	Criterios de diseño estructura Fundaciones y bases de martillo pica roca	89
4.6	Criterios de diseño estructura Piques	89
4.7	Criterios de diseño estructura Buzón.....	90
5	Conclusiones	91
6	Referencias	92
7	Anexo	94

ÍNDICE FIGURAS

2.1.	Representacion Isometrica Mina el Teniente, Codelco. Ref: Muñoz R.(2020).....	15
2.2.	Esquema manejo de Materiales Mina El Teniente. Ref: Muñoz R. (2020).....	16
2.3.	Esquema de explotación por medio de Panel Caving. Ref: Labbé E. (2021).....	17
2.4.	Panel Caving Convencional con Fracturamiento Hidráulico. Ref: Balboa S. (2019).....	18
2.5.	Representación sistema de Traspaso Intermedio. Ref: Muñoz R (2024).....	19
2.6.	Corte longitudinal de punto de extracción. Ref: Camhi J. (2012).....	19
2.7.	Esquema Carpetas de Rodado NP y NA. Ref: Muñoz R. (2024).....	20
2.8.	Esquema Isométrico Punto da Vaciado Tipo. Ref: Muñoz R. (2024).....	21
2.9.	Esquema Isométrico Punto da Vaciado, enfoque parrilla. Ref: Muñoz R. (2024).....	21
2.10.	Fundación y Sub-Base Martillo Pica Roca Ref: Muñoz R. (2024).....	22
2.11.	Componentes de blindaje de Pique de un Sistema de traspaso. Ref: Muñoz R. (2024).....	23
2.12.	Representación de tronco pique, componentes de blindaje de un Sistema de traspaso. Ref: Muñoz R. (2024).....	23
2.13.	Buzón Lateral Intermedio. Ref: Muñoz R. (2024).....	24
2.14.	Evidencia de eventos de Bombeo Agua Barro, El Teniente. Ref: Muñoz R. (2020).....	27
2.15.	Presencia de agua interior Mina. Ref: Muñoz R. (2020).....	27
2.16.	Metodología empírica de Terzagui, datos. Ref: Terzagui (1946).....	28
2.17.	Ilustración de Metodología empírica de Terzagui. Ref: Terzagui (1946).....	29
2.18.	Representación esquemática de falla en la roca y desprendimiento real en el macizo rocoso. Ref: Muñoz R. (2020).....	29
2.19.	Representación Estallido de Roca. Ref: Jorquiera P. (2014).....	30
2.20.	Daños típicos asociados al estallido de roca. Ref: Muñoz R. & Balboa S. (2011).....	30
2.21.	Representación Colapso interior Mina con daños en Galería. Ref: Balboa (2012).....	31
2.22.	Colapsos reales dentro de la mina. Ref: Muñoz R. (2020).....	31
2.23.	Golpes de equipos a marcos de acero. Ref: Muñoz R. (2024).....	32
2.24.	Ilustración descriptiva de las cargas dinámicas para el caso de Buzones. Ref: Muñoz R. (2024)...	33
2.25.	Representación de cargas de impacto sobre parrilla clasificadora. Ref: Martínez A. & Muñoz R. (2024).....	33



2.26. Ejemplo de tronaduras Panel Caving Convencional. Ref: Balboa S. (2024).....	34
2.27. Reducción secundaria punto de extracción. Ref: Revista El Teniente (2024).....	34
3.1. Simplificación de modelo de análisis en Punto de extracción. Ref: Muñoz R. (2024).....	37
3.2. Cargas aplicadas en marco, SAP2000. Elaboración propia.....	38
3.3. Momento máximo en SAP2000. Elaboración Propia.....	39
3.4. Momento mínimo en SAP2000. Elaboración Propia.....	39
3.5. Diagrama de corte en marco en SAP2000. Elaboración Propia.....	40
3.6. Valores relevantes de corte en marco en SAP2000. Elaboración Propia.....	40
3.7. Diagrama de Fuerza axial en SAP2000. Elaboración Propia.....	41
3.8. Fuerza axial mayor en SAP2000. Elaboración Propia.....	41
3.9. Desplazamientos de cúspide de marco en SAP2000. Elaboración Propia.....	42
3.10. Desplazamiento en la unión del marco con la columna. Elaboración Propia.....	42
3.11. Modelación marco con rotula superior SAP2000. Elaboración Propia.....	43
3.12. Diagrama de momento de marco con rotula superior SAP2000. Elaboración Propia.....	44
3.13. Momento en la cúspide del marco. Elaboración Propia.....	44
3.14. Momento mínimo en la unión del arco con la columna con rotula en la cúspide. Elaboración Propia.....	45
3.15. Corte en la cúspide del marco con rotula en la cúspide. Elaboración Propia.....	45
3.16. Máxima fuerza axial del marco con rotula en la cúspide. Elaboración Propia.....	46
3.17. Desplazamientos del marco con rotula en la cúspide. Elaboración Propia.....	46
3.18. Modelación de marco con rotulas en la unión del arco con la columna en SAP2000. Elaboración Propia.....	47
3.19. Diagrama de momento de marco con rotulas en la unión del arco con la columna SAP2000. Elaboración Propia.....	48
3.20 Momento en la unión del arco con la columna al agregar rotulas. Elaboración Propia.....	48
3.21. Momento máximo en la cúspide del marco con rotulas en la unión del arco con la columna.....	49
2.22. Momento mínimo en la unión del arco con la columna, con rotulas en el mismo sector. Elaboración Propia.....	49
3.23. Corte en la unión del arco con la columna con la rótula en el mismo lugar. Elaboración Propia.....	50
3.24. Máxima fuerza axial del marco con rotulas en la unión del arco con la columna. Elaboración Propia.....	50
3.25. Desplazamiento del marco en la cúspide con rotulas en la unión del arco con la columna. Elaboración Propia.....	51
3.26. Desplazamiento del marco en la unión del arco con la columna, con rotulas en el mismo sector. Elaboración Propia.....	51
3.27. Representación estructural de marco con uniones (izquierda) y fotografía de la conexión real en terreno (derecha). Ref: Muñoz R. (2024).....	53
3.28. Comparación de comportamiento de marco sin atiesadores y con atiesadores frente a cargas dinámicas por estallidos de roca. Ref: Muñoz R (2024).....	54



3.29. Visera de protección en punto de extracción. Ref: Muñoz R. (2024).....	54
3.30. Elevación longitudinal punto de extracción, visualización marcos y muros. Ref: Olivares F. (2016).....	55
3.31. Modelo de análisis de los marcos y muros en punto de extracción. Ref: Olivares F. (2016).....	56
3.32. Modelación de carga vertical en bóveda. Ref: Olivares F. (2016).....	57
3.33. Modelación de cargas horizontales en bóveda. Ref: Olivares F. (2016).....	57
3.34. Momento combinación 2 en dirección longitudinal del muro, vista lateral, en $[kg \cdot cm/cm]$. Ref: Olivares F. (2016).....	58
3.35. Momento combinación 2 en dirección longitudinal del muro, vista planta superior, en $[kg \cdot cm/cm]$. Ref: Olivares F. (2016).....	58
3.36. Momento combinación 2 en dirección transversal del muro, vista lateral, en $[kg \cdot cm/cm]$. Ref: Olivares F. (2016).....	59
3.37. Momento combinación 2 en dirección transversal del muro, vista planta superior, en $[kg \cdot cm/cm]$. Ref: Olivares F. (2016).....	59
3.38. Daños por reducción secundaria y evento sísmico. Ref: Muñoz R. (2024)	62
3.39. Representación modelo elástico basado en la teoría de Westergaard. Ref: Muñoz R. (2024)	63
3.40. Zonas afectadas de la carpeta de rodado por acción del equipo. Ref: Escudero M. (2013)	63
3.41. Daño por ausencia de juntas de dilatación en Nivel de producción. Ref: Muñoz R. (2024)	64
3.42. Agrietamiento tipo “Piel de cocodrilo”. Ref: Muñoz R. (2010)	64
3.43. Daños por condiciones operacionales en el Nivel de acarreo. Ref: Muñoz R. (2010)	65
3.44. Daños por deficiente calidad de la sub-base. Ref: Muñoz R. (2010)	65
3.45. Restitución de carpetas. Ref: Muñoz R. (2010)	66
3.46. Registro de las pruebas realizadas en las carpetas de rodado. Ref: Muñoz R. (2010)	67
3.47. Ilustración de simulación de una descarga de bloque desde el balde del equipo LHD. Ref: Muñoz R. (2010)	68
3.48. Diseño de muro tope considerando una carga de impacto. Ref: Muñoz R. (2010)	68
3.49. Pérdida de blindaje y posterior daño en hormigón de muro tope. Ref: Muñoz R. (2024)	69
3.50. Emparrillamiento en puntos de vaciado. Ref: Muñoz R. (2024).....	70
3.51. Rediseño interno e implementación de apoyos para parrillas. Ref: Gómez J. (2024).....	71
3.52. Reparación muro tope Brocales. Ref: Muñoz R. (2020).....	71
3.53. Reemplazo de parrillas por viga clasificadoras. Ref: Martínez A. & Muñoz R. (2024).....	72
3.54. Diseño de fundación y sub-base de martillo pica roca. Ref: Muñoz R. (2020).....	73
3.55. Representación de pernos en fundación y sub-base de martillo pica roca. Ref: Martínez A. & Muñoz R. (2024).....	73
3.56. Acumulación de mineral entorno a la fundación del martillo. Ref: Muñoz R. (2020).....	74
3.57. Ilustración de posible choque de martillo con la trayectoria proyectada del equipo LHD. Ref: Martínez A. & Muñoz R. (2024).....	75



3.58. Ilustración de las principales mejoras en la ubicación del martillo pica roca. Ref: Muñoz R. (2024).....	77
3.59. Cargas de impacto por el material pasante en el pique. Ref: Constanzo H. & Rojas E. (2001).....	78
3.60. Daño a blindaje y pique por caída del material en pique. Ref: Muñoz R. (2020).....	79
3.61. Comparación de blindaje antiguo y nuevo de piques. Ref: Muñoz R. (2024).....	80
3.62. Ilustración de formación de Llampo. Ref: Martínez A. & Muñoz R. (2024).....	81
3.63. Representación de cargas y estimación de solicitudes en Buzón. Ref: Muñoz R. (2024).....	82
3.64. Representación daño en las consolas. Ref: Reyes J. & Muñoz R.(2024).....	83
3.65. Representación daño en las viseras. Ref: Muñoz R. (2024).....	83
3.66. Representación de colgaduras en piques que afectan a buzón. Ref: Martínez A. & Muñoz R. (2024).....	84
3.67. Daños por estallido de roca en Buzones. Ref: Muñoz R. (2024).....	84
3.68. Representación de instalación de puntales. Ref: Martínez A. & Muñoz R. (2024).....	85
3.69. Reparación de viseras dañadas con HA o planchas de acero. Ref: Martínez A. & Muñoz R. (2024).....	85
3.70. Reforzamiento diseño de viseras. Ref: Muñoz R. (2024).....	86

Índice de tablas

3.1. Datos de sección y especificaciones según tipo de acero. Elaboración Propia.....	37
3.2. Comparación entre casos. Elaboración Propia.....	52
3.3. Dimensiones y especificaciones de los materiales. Elaboración propia.....	60
3.4. Refuerzo mínimo para dirección longitudinal y transversal. Elaboración propia.....	60
3.5. Refuerzo longitudinal y transversal en ambas caras. Elaboración propia.....	61



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia y cercanos por apoyarme en todo este proceso llamado universidad, agradezco a las personas que conocí en el camino que me ayudaron a entender de mejor forma la vida.

Agradezco a la División El Teniente y a mi tutor en particular, Rodrigo Muñoz por darme la oportunidad y la confianza para trabajar en conjunto con él y abordar este tema de memoria.

Agradezco a mi profesor correferente don Gilberto Leiva por guiarme al mundo estructural, la verdad, es y será la área más entretenida y desafiante de la Ingeniería Civil.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

CRITERIOS DE DISEÑO PARA INFRAESTRUCTURA INTERIOR MINA DIVISIÓN EL TENIENTE, CODELCO.

Benjamín Soto¹, Rodrigo Muñoz², Gilberto Leiva¹

¹ Universidad Técnica Federico Santa María.

² División El Teniente, Codelco Chile.

RESUMEN

La presente memoria tuvo como objetivo incorporar los aprendizajes obtenidos en terreno en el diseño de la infraestructura interior mina empleada en el método de explotación por Panel Caving Convencional, con Fracturamiento Hidráulico utilizado actualmente en Codelco, División El Teniente. El estudio se centró en las estructuras y obras civiles que forman los Sistemas de Traspaso Intermedio, principalmente puntos de extracción, puntos de vaciado, piques y buzones, elementos que son fundamentales para la funcionalidad y continuidad operacional de los procesos mineros subterráneos.

Para lograr este propósito, se definieron criterios de diseño ajustados a las condiciones reales del ambiente subterráneo, con el fin de disponer de una infraestructura más eficiente y coherente con las solicitudes observadas en operación, lo que contribuye directamente a optimizar la continuidad operacional y a reducir costos. Asimismo, se elaboró una guía de criterios de diseño basada en el análisis detallado de las problemáticas evidenciadas en terreno, con el objetivo de disponer de un documento técnico de fácil consulta que describa correctamente el comportamiento de las estructuras bajo condiciones de carga reales, identificando puntos críticos en los diseños existentes y proponiendo soluciones efectivas.

La metodología implementada consideró la incorporación de factores de seguridad, durabilidad, adaptabilidad y flexibilidad operacional en los criterios de diseño, así como la validación de las propuestas mediante consultas a operadores y personal de mantenimiento de los sectores productivos, garantizando su aplicabilidad en el contexto real de la mina.

Los resultados obtenidos permitieron identificar mejoras en la eficiencia, seguridad estructural y operacional de las infraestructuras que conforman los Sistemas de Traspaso Intermedio, las cuales se basaron en prácticas empíricas aplicadas en terreno y fueron sistematizadas en esta memoria. Si bien las propuestas no han sido implementadas formalmente, su desarrollo entregó una base técnica sólida para su eventual aplicación.

Palabras claves: Infraestructura subterránea, Criterios de diseño, Sistemas de Traspaso Intermedio.



1 Introducción

1.1 Contexto General

La infraestructura interior mina de la División El Teniente (DET) comprende el conjunto de obras necesarias para otorgar soporte y estabilidad a los equipos empleados en el manejo del mineral extraído mediante el método de Panel Caving. Entre estas obras se incluyen puntos de extracción, puntos de vaciado, fundaciones y bases para martillos pica rocas, piques de traspaso, buzones de carguío lateral y carpetas de rodado.

En la actualidad, estas estructuras se diseñan aplicando criterios estructurales convencionales, desarrollados principalmente para instalaciones en superficie. Dichos criterios consideran como principales solicitaciones el peso propio, sobrecargas de uso y cargas sísmicas. Sin embargo, estas condiciones difieren significativamente de las solicitaciones reales a las que se enfrentan las obras subterráneas, donde intervienen presiones generadas por la columna de roca, eventos sísmicos inducidos por tronaduras, estallidos de roca, cargas por operación de equipos pesados, manejo de mineral y presencia de agua ácida y agua-barro.

Esta disparidad entre el diseño teórico y el comportamiento real del terreno se traduce en daños estructurales recurrentes, fallas prematuras y una vida útil reducida de las obras. Una vez dañadas, estas estructuras resultan complejas y costosas de reparar o reemplazar, generando un impacto considerable en la continuidad operacional y en los costos del negocio minero.

Frente a esta problemática, resulta necesario revisar y ajustar los enfoques de diseño, integrando criterios que contemplen aspectos de seguridad, factores constructivos, operacionales y de mantenimiento, considerando tanto la experiencia empírica del comportamiento real de las estructuras como la retroalimentación del personal operativo. Si bien los análisis teóricos y modelamientos mediante softwares de cálculo estructural constituyen herramientas valiosas, su efectividad depende en gran medida de los supuestos iniciales y la experiencia del diseñador.

Diversos estudios desarrollados en Chile, como los trabajos de Camhi, J. (2012) sobre la optimización de los procesos de desarrollo y construcción en minería de Block Caving, y de Arévalo, F. E. (2022) sobre la metodología Full Potential aplicada a la construcción de sistemas de traspaso en Mina Norte de El Teniente, han contribuido a ampliar el entendimiento de estos desafíos. Asimismo, Labbé E. (2021) identificó, mediante un modelo de simulación aplicado a la construcción de sistemas de traspaso en Mina Reno, que una planificación deficiente de los diseños de la infraestructura interior mina genera interferencias productivas que afectan el funcionamiento de la operación.

La aplicación de criterios de diseño apropiados para infraestructura interior mina requiere, por tanto, un entendimiento integral de la interacción de las estructuras con las distintas disciplinas y áreas involucradas en el método de explotación por Panel Caving. Este enfoque favorece una planificación más precisa durante la etapa de preparación minera, anticipando y minimizando interferencias productivas y asegurando la continuidad operacional.

Si bien el presente trabajo se desarrolla en el contexto particular de la División El Teniente, las condiciones de carga, tipos de solicitaciones y problemáticas estructurales observadas en los



STI son comunes a otras operaciones de minería subterránea, tanto en Chile como a nivel internacional. Por ello, los criterios de análisis y propuestas de diseño presentados en esta memoria pueden ser adaptados a distintas realidades mineras que enfrenten desafíos similares en sus infraestructuras pertenecientes a los STI.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Elaborar criterios de diseño estructural específicos y estandarizados para las infraestructuras que conforman los Sistemas de Traspaso Intermedio (STI) en la mina El Teniente, considerando la disparidad existente entre los criterios teóricos de diseño y el comportamiento real observado en terreno.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Analizar los problemas recurrentes en el diseño de infraestructura interior mina en División El Teniente, Codelco, con foco particular en los Sistemas de Traspaso Intermedio (STI).
2. Evaluar los criterios de diseño actuales utilizados en infraestructura minera subterránea en División El Teniente, identificando sus fortalezas, debilidades y áreas de mejora.
3. Desarrollar nuevos criterios de diseño o mejorar los existentes, asegurando su aplicabilidad y efectividad a través de la recopilación de documentación interna de División El Teniente y consultas con personal técnico-operativo con experiencia en la materia.
4. Incorporar los criterios elaborados en una guía de diseño, orientada a la aplicación tanto en instancias de reparación dentro de sectores productivos como en futuros proyectos, con el propósito de generar soluciones civiles-estructurales más eficientes y adecuadas a las condiciones propias de la minería subterránea.

1.3 Metodología

La presente investigación adoptó un enfoque aplicado y técnico, orientado al análisis y mejoramiento de los criterios de diseño de las infraestructuras que componen los Sistemas de Traspaso Intermedio (STI) en la mina subterránea El Teniente. El desarrollo metodológico se estructuró en cinco etapas secuenciales que permitieron abordar tanto el diagnóstico de las condiciones actuales como la formulación de una propuesta práctica de mejora, en coherencia con los objetivos generales y específicos del estudio.



a) Recopilación de información técnica y contextual.

Se llevó a cabo un levantamiento de información proveniente de fuentes internas de División El Teniente, incluyendo planos estructurales, memorias de cálculo, especificaciones técnicas, informes de daños, y registros de mantenimiento o intervención en infraestructuras STI. Esta etapa también incluye una revisión del método de explotación Panel Caving, para comprender su impacto en los estados de carga que enfrentan las estructuras subterráneas.

b) Identificación y caracterización de la infraestructura.

Se realizó un análisis descriptivo de los elementos que conforman los STI —puntos de extracción, puntos de vaciado, fundaciones y bases de martillo, piques, buzones laterales y carpetas de rodado. Esto permitió definir el universo estructural sobre el cual se aplicará la evaluación.

c) Evaluación del desempeño estructural y análisis de criterios de diseño.

En esta etapa se evaluó los criterios estructurales actualmente utilizados en el diseño de las infraestructuras del STI, analizando su adecuación frente a las solicitudes reales del entorno subterráneo, como presión de roca, eventos sísmicos inducidos, agua-barro, estallidos de roca y cargas asociadas a la operación minera pesada. Paralelamente, se identificó fallas recurrentes, deficiencias estructurales y problemas operativos observados en terreno, apoyándose en documentación técnica, registros históricos y entrevistas con personal técnico-operativo con experiencia directa en estas infraestructuras (principalmente datos empíricos). El objetivo de esta etapa fue establecer una comparación clara entre los diseños existentes y su desempeño real, identificando así las principales brechas y oportunidades de mejora.

d) Propuesta de criterios estructurales mejorados.

A partir del diagnóstico técnico y operativo, se formuló nuevos criterios de diseño o se mejoró los existentes, incorporando consideraciones analíticas y empíricas.

e) Sistematización de resultados y herramienta práctica.

Como resultado final, se desarrolló una propuesta de guía práctica de diseño, con fichas técnicas por tipo de estructura, que sintetizó la información clave respecto a supuestos actuales de diseño, comportamiento real en el terreno y los criterios generados para facilitar su aplicación por parte de equipos de ingeniería, mantenimiento y operación. Esta herramienta está orientada tanto a reparaciones en sectores actualmente en uso, como a futuros proyectos de infraestructura en minería subterránea. La guía se presenta como Anexo del presente trabajo.



1.4 Alcance

El presente documento se ha estructurado de la siguiente forma.

En el Capítulo 2 se presenta el contexto técnico del estudio, incluyendo información relevante sobre la División El Teniente, el método de explotación (Panel Caving), el cual es fundamental para comprender el origen de ciertos estados de carga presentes en una mina subterránea. Además, se describe la infraestructura correspondiente a los STI, junto con sus características y condiciones de solicitud actuales.

En el Capítulo 3 se expone la funcionalidad y rol de las estructuras de sacrificio, junto con el análisis del comportamiento estructural de las infraestructuras del STI bajo el entorno minero, incluyendo los supuestos iniciales de diseño y el comportamiento real en el terreno. Posteriormente, mediante la comparación entre ambos escenarios, se evalúa las discrepancias en los criterios aplicados. Con esta información, se desarrolla propuestas de mejora y medidas de mitigación adecuadas para cada estructura evaluada.

En el Capítulo 4 se formula una propuesta de criterios de diseño, orientada a los requerimientos específicos de cada infraestructura, en base al análisis realizado.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones. Se sintetiza los principales hallazgos del estudio y presenta conclusiones formuladas en función de los objetivos planteados y los resultados obtenidos.

Los anexos de esta memoria recopilan fichas técnicas individuales correspondientes a cada estructura que integra un Sistema de Traspaso Intermedio (STI). Cada ficha presenta, de manera ordenada los supuestos de diseño actuales, el comportamiento real observado en terreno y los criterios de diseño propuestos para la estructura evaluada. A continuación, se enumeran:

- Anexo A: Definiciones e identificación de infraestructura del STI
- Anexo B: Punto de Extracción
- Anexo C: Carpeta de Rodado
- Anexo D: Punto de Vaciado
- Anexo E: Fundaciones y Bases de Martillo Pica Roca
- Anexo F: Pique
- Anexo G: Buzón Lateral

Cada ficha mantiene la misma estructura de contenido, adaptada a las particularidades técnicas de cada infraestructura.

2 Contexto técnico del estudio

2.1 Característica de mina el teniente

La División El Teniente (DET) de Codelco Chile es reconocida como la mina de cobre subterránea más grande del mundo y forma parte del complejo minero de Codelco, la empresa estatal de cobre de Chile. Se encuentra ubicada a 45 km al noreste de la ciudad de Rancagua, en la región del Libertador General Bernardo O'Higgins, a una altitud de aproximadamente 2,300 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).

El yacimiento central de El Teniente se compone de un cuerpo estéril conocido como Pipa Braden, que se distingue por su forma cilíndrica y un diámetro de 1,000 metros en su parte superior. Este cuerpo aflora en la superficie y alrededor de él se encuentran las áreas mineralizadas que son objeto de explotación, representadas con diferentes colores como se muestra en la Figura 2.1. El proceso de extracción genera un cráter superior llamado "cráter de subsidencia", con un perímetro de 10 km y material quebrado en su interior que desciende hacia los puntos de extracción. Además, actualmente se está desarrollando un nuevo nivel mina, un proyecto que busca extender la vida útil de El Teniente en 50 años, garantizando la continuidad de la producción en el futuro.

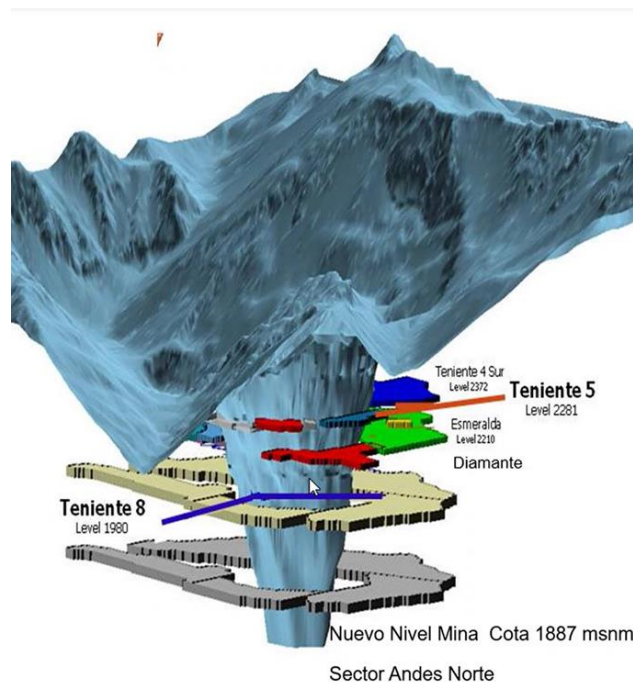


Figura 2.1. Representación Isométrica Mina el Teniente, Codelco. Ref: Muñoz R. (2020).

La cadena de producción del mineral de El Teniente se lleva a cabo actualmente mediante ocho sectores interconectados que utilizan principalmente el método de Hundimiento por Panel Caving Convencional con Fracturamiento Hidráulico y/o Paneles. Las operaciones mecanizadas emplean equipos LHD (Load-Haul-Dump) que recogen y transportan el mineral hacia piques de traspaso, conectados a niveles de transporte subterráneo. El transporte principal incluye una combinación de camiones o trenes, correas transportadoras y el sistema ferroviario

Teniente 8, que lleva el mineral desde los puntos de extracción hasta las plantas de chancado-molienda y flotación en Colón. En el caso del mineral de la mina a rajo abierto, este es transportado en camiones y a través del ferrocarril Teniente 5 Norte hacia la planta de chancado-molienda en Sewell (Labbé 2021), tal como se detalla en la Figura 2.2. en la cual se visualiza el proceso y niveles de producción que tiene la mina esquemáticamente.

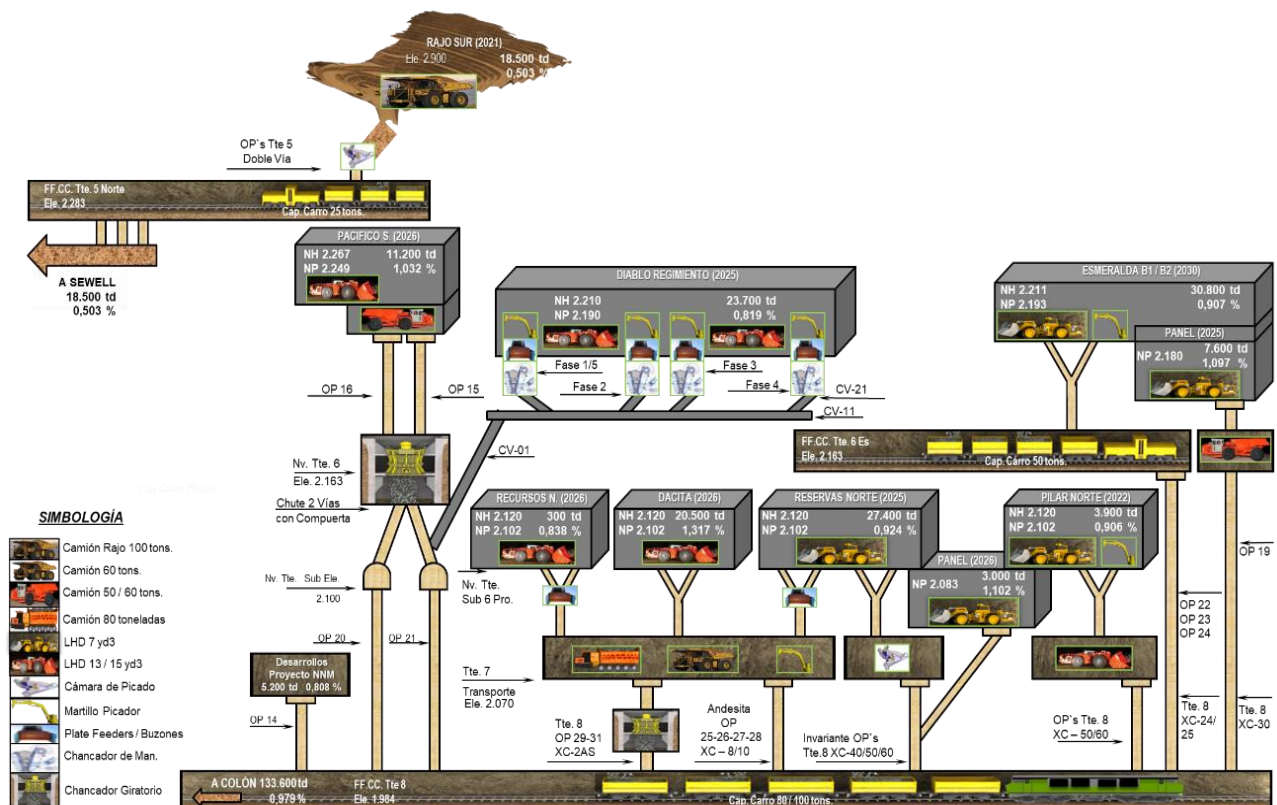


Figura 2.2. Esquema manejo de Materiales Mina El Teniente. Ref: Muñoz R. (2020).

Luego de la salida del mineral por el Nivel de FFCC Teniente 8 y pasar por los procesos planta de Chancado y Molienda, División El Teniente cuenta con una fundición en Caletones y una infraestructura completa para el soporte de las operaciones a gran escala, que incluyen sistemas de suministro de agua, energía eléctrica, logística de transporte de materiales, y manejo de residuos industriales. Todo el complejo cubre un área de aproximadamente 360.000 [m²].

2.2 Métodos de explotación

El método de explotación en la mina subterránea de El Teniente, se basa en el uso de técnicas de hundimiento a gran escala, específicamente Panel Caving con su variante Convencional con Fracturamiento Hidráulico (en la mayoría de sus sectores), estrategia que ha resultado ser eficiente para las condiciones Geotécnicas del Yacimiento. Este método se basa en inducir el colapso controlado del macizo rocoso para fragmentar y liberar el mineral, utilizando la gravedad y la presión interna de la roca. Método especialmente efectivo en yacimientos de gran tamaño y baja ley, ya que permiten la explotación masiva con costos relativamente bajos

comparados con otros métodos subterráneos. El proceso comienza al socavar la base del panel de producción mediante perforación y tronadura, generando lo que se conoce como el frente de hundimiento o socavación. Este frente de hundimiento avanza coordinadamente con el agotamiento del área, permitiendo la progresiva entrada en producción de nuevas secciones del yacimiento. Una de las características particulares del Panel Caving es que se aplica en roca primaria, la cual es menos fracturada y más competente que la roca secundaria. Esto implica que la fragmentación generada es más gruesa, requiriendo de un mayor control y, actualmente, de la aplicación de la técnica de Fracturamiento Hidráulico para ayudar a la fragmentación inicial para asistir al proceso del Caving, además de disminuir el riesgo sísmico de los sectores en explotación. En las figuras 2.3. y 2.4. se muestran esquemas conceptuales del método de explotación descrito.

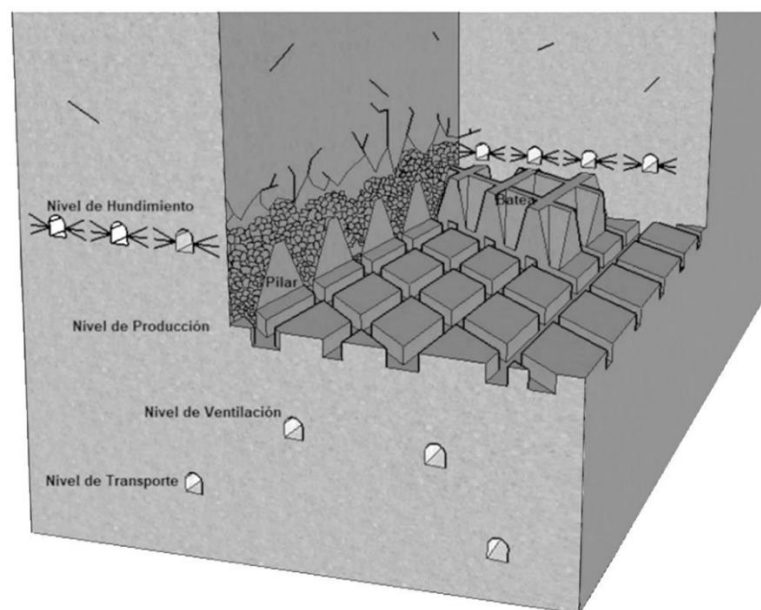


Figura 2.3. Esquema de explotación por medio de Panel Caving. Ref: Labbé E. (2021).

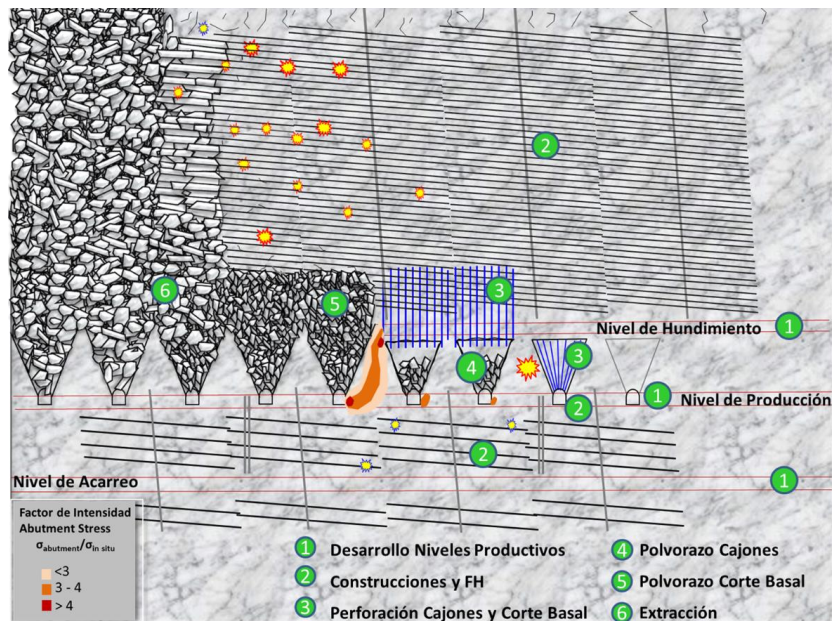


Figura 2.4. Panel Caving Convencional con Fracturamiento Hidráulico. Ref: Balboa S. (2019).

2.3 Infraestructura interior mina, Sistema de traspaso intermedio

Existe una gran variedad de infraestructura interior mina que permite el manejo del mineral, desde que es fragmentado en el nivel de hundimiento, hasta su salida por la línea de ferrocarril Teniente 8 hacia los procesos de Chancado y Molienda. Bajo este contexto, el presente estudio está acotado y se centra en los Sistema de Traspaso Intermedio, que corresponden a una infraestructura fundamental en el proceso de manejo de materiales y que está compuesto principalmente por puntos de extracción, puntos de vaciado, fundaciones y bases de martillo pica rocas, piques de traspaso, buzones de carguío lateral y carpetas de rodado, tal como se observa en la Figura 2.5.

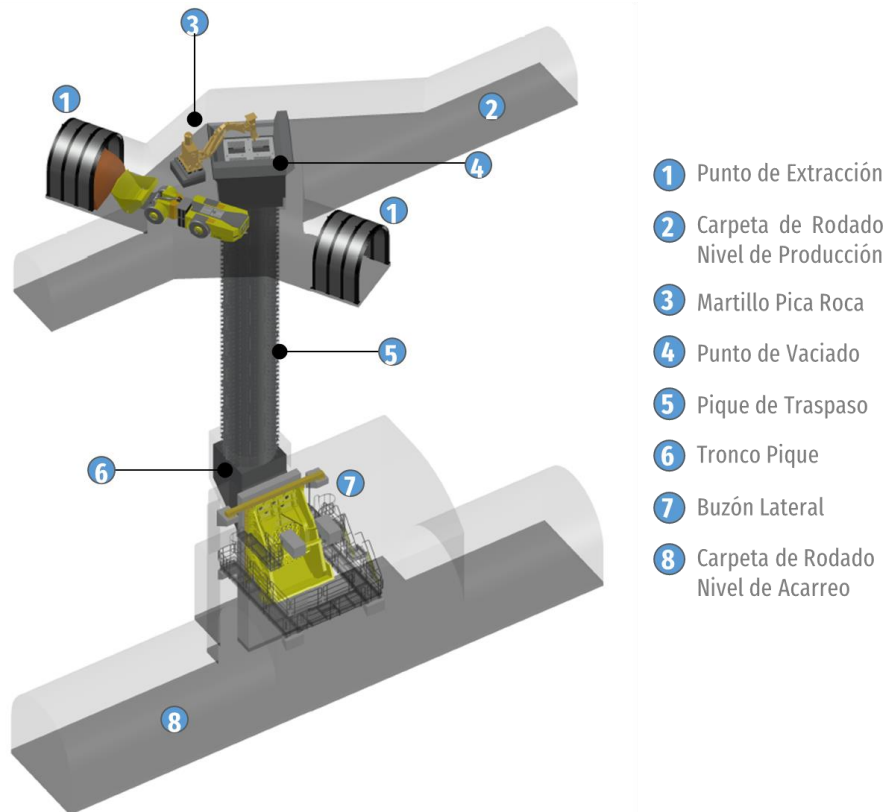


Figura 2.5. Representación sistema de Traspaso Intermedio. Ref: Muñoz R. (2024).

Para un mejor entendimiento de estos STI, se procede a describir con mayor detalle cada una de las infraestructuras que la conforman.

2.3.1 Puntos de extracción (Destacado con el N° 1 en la Figura 2.5.)

Estructuras en forma de arco materializadas con marcos de acero unidos mediante hormigón armado. Estos puntos están estratégicamente ubicados y diseñados para permitir el acceso del mineral quebrado desde las bateas y que es cargado mediante equipos LHD en el nivel de producción (ver Figura 2.6.) para luego ser transportado y descargado en los puntos de vaciado.

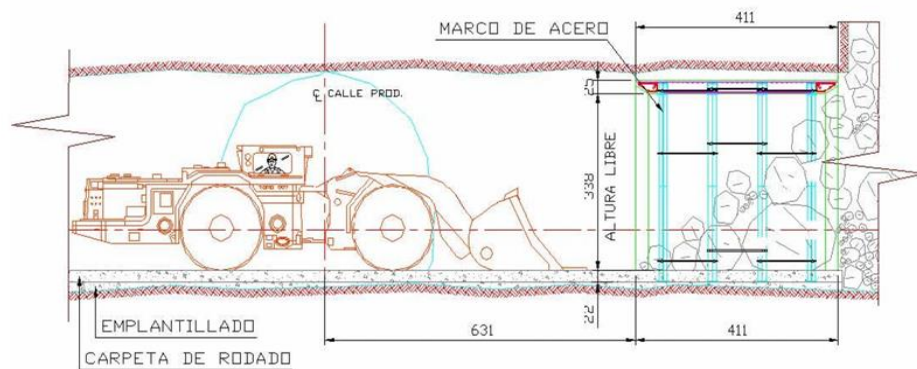


Figura 2.6. Corte longitudinal de punto de extracción. Ref: Camhi J. (2012).

2.3.2 Carpeta de rodado (Destacado con el N°2 y N°8 en la Figura 2.5.)

Corresponden a las superficies de rodadura o pisos en las galerías y túneles por donde circulan los vehículos y equipos de carga. En particular para el caso de los STI, el presente estudio se centra en las carpetas de rodado de las calles del Nivel de Producción (NP) donde circulan los equipos LHD y en las carpetas de rodado de los cruzados del Nivel de Acarreo (NA) donde circulan los camiones de alto tonelaje (existe la variante de nivel de acarreo con circulación de trenes donde las carpetas de rodado se reemplazan por vías férreas). Por las condiciones ambientales y operacionales, actualmente estas carpetas se materializan en hormigón en masa de alta resistencia sin armadura de refuerzo (normalmente G65). (ver Figura 2.7.)

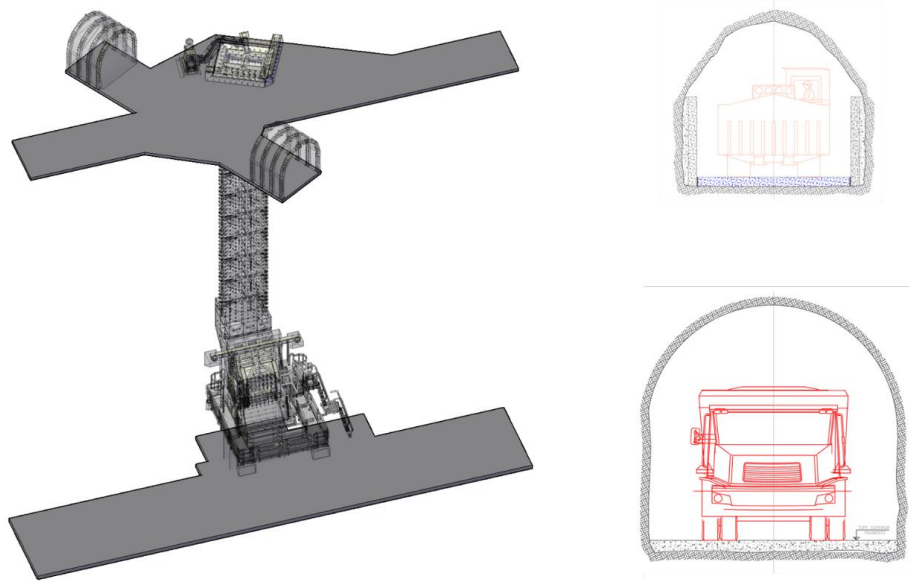


Figura 2.7. Esquema Carpetas de Rodado NP y NA. Ref: Muñoz R. (2024).

2.3.3 Puntos de vaciado (Destacado con el N° 4 en la Figura 2.5.)

Los Puntos de Vaciado corresponden a un sistema compuesto principalmente por un cajón de recepción del mineral definido como brocal, materializado en hormigón armado y revestido con planchas de acero utilizadas como elementos de protección para la abrasión y cargas de impacto producto de la descarga del mineral desde el equipo LHD. (ver Figura 2.8.) Los brocales cuentan además con muros tope como sistema de protección para que los equipos LHD no traspasen el borde del brocal y así evitar caer en su interior.

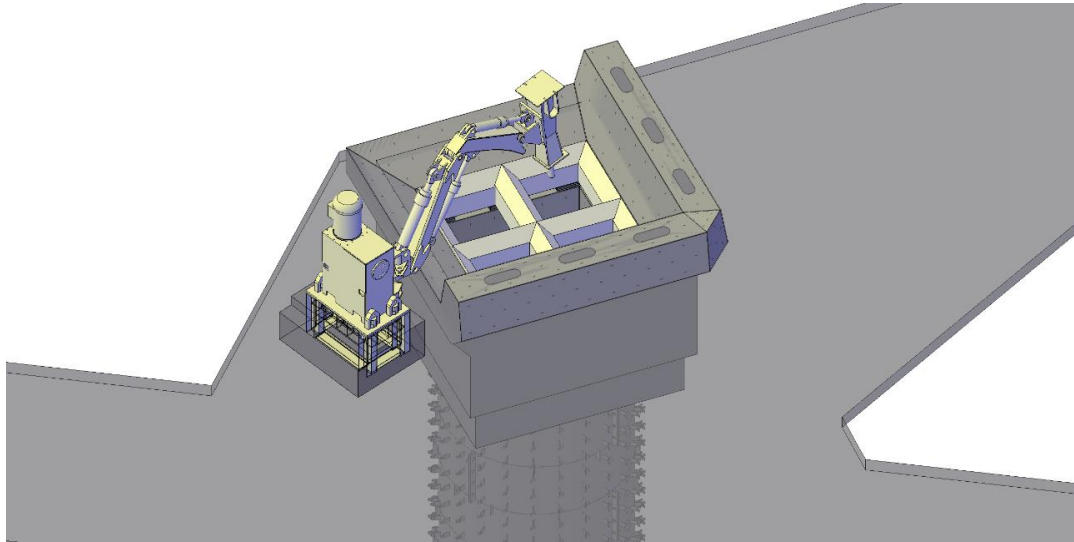


Figura 2.8. Esquema Isométrico Punto da Vaciado Tipo. Ref: Muñoz R. (2024).

2.3.4 Parrilla clasificadora

La parrilla clasificadora corresponde a una estructura utilizada para contener las colpas o rocas de sobre tamaño que, por sus mayores dimensiones, podrían afectar el funcionamiento de la infraestructura y equipos existentes aguas abajo del proceso (ver Figura 2.9.). Para el caso de los STI evaluados en este estudio, las parrillas se materializan mediante placas de acero unidas una sobre otra hasta formar un sistema de cuatro cuadrantes de sección libre $1.0 \times 1.0 \text{ m}^2$.

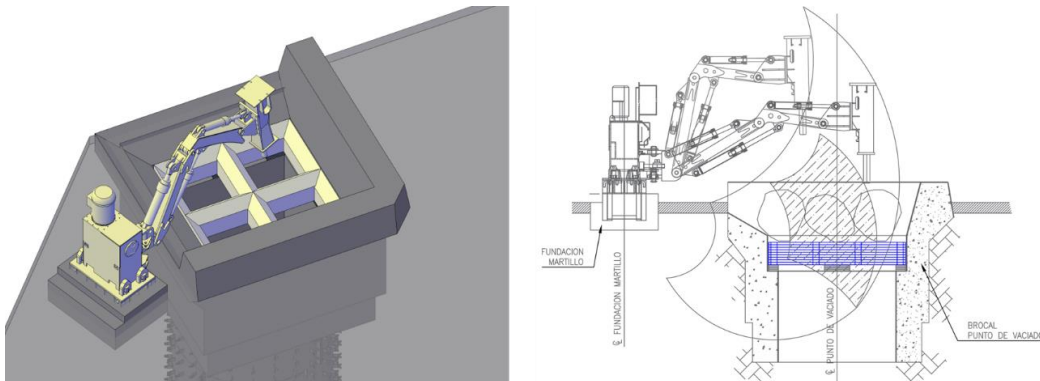


Figura 2.9. Esquema Isométrico Punto da Vaciado, enfoque en parrilla. Ref: Muñoz R. (2024).

En caso de la presencia de bloques de roca con dimensiones mayores a las delimitadas por la parrilla clasificadora, se define operacionalmente la condición de “emparrillamiento” del punto y se procede a poner en funcionamiento el martillo pica rocas para reducir el tamaño de las colpas.

2.3.5 Fundaciones y bases de martillo pica roca semi- estacionario (Destacado con el N° 3 en la figura 2.5.).

Durante el funcionamiento de un martillo pica rocas se generan una serie de fuerzas y momentos solicitantes que podrían desestabilizar y volcar este equipo. Para evitar esta condición, el martillo se conecta a una sub-base de acero que se encuentra embebida a una fundación de hormigón armado, la que a su vez, se conecta al piso mediante pernos de anclaje lechados que se empotran en el sustrato de roca, asegurando de esta manera la estabilidad del equipo durante su operación en el Punto de Vaciado. (Figura 2.10.)

Cabe destacar que el presente estudio se enfoca en martillos pica roca tipo semi- estacionarios que se caracterizan por ser equipos que requieren ser trasladados a los talleres de mantenimiento interior mina en caso de intervenciones mayores, por lo tanto, las sub-bases que se dispongan en estos casos deben permitir la desconexión del martillo de la fundación para su posterior movilización.

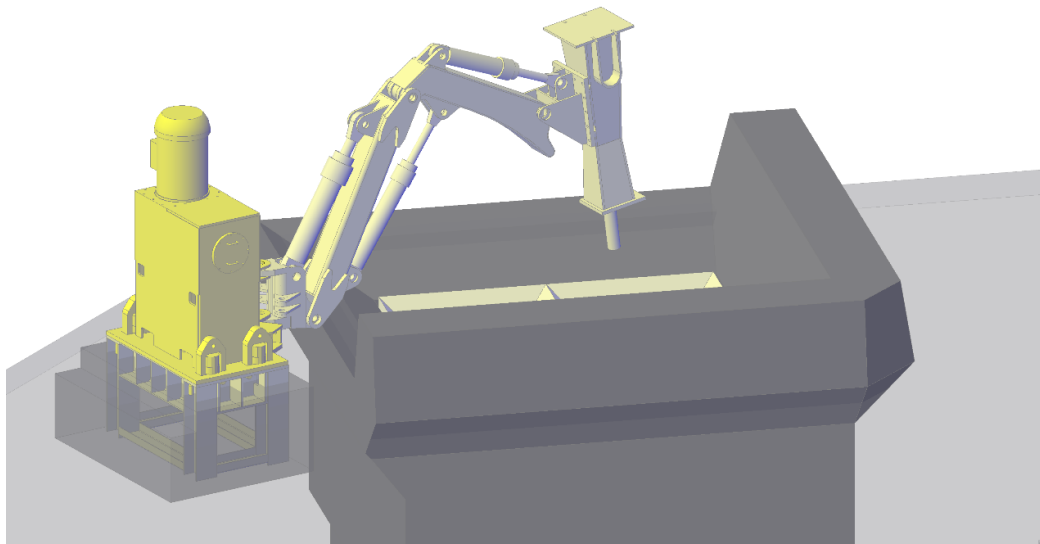


Figura 2.10. Fundación y Sub-Base Martillo Pica Roca. Ref: Muñoz R. (2024).

2.3.6 Piques de traspaso intermedio (Destacado con el N°5 en la Figura 2.5.)

Corresponde a desarrollos verticales o inclinados de alta pendiente de geometría circular que se revisten mediante una protección de anillos de blindaje de acero antiabrasivo (Figura 2.11.). Estos sistemas permiten el flujo del mineral desde el Punto de Vaciado ubicados en el Nivel de Producción hacia los buzones de descarga lateral ubicados en el Nivel de Acarreo. En particular, para el caso de los STI de este estudio, los piques se desarrollan en longitudes del orden de 30 m, con un diámetro excavado de 3.5 [m] y que, al ser revestidos con anillos de blindaje, quedan con una sección libre del 3.0 [m] de diámetro, tal como se observa en la Figura 2.11.

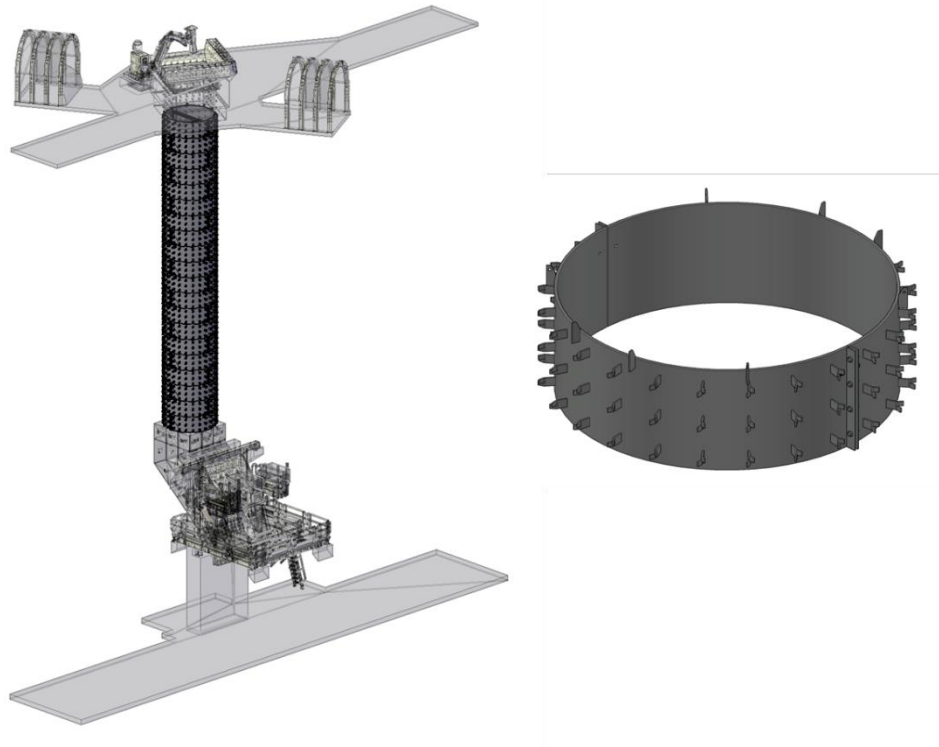


Figura 2.11. Componentes de blindaje de Pique de un Sistema de traspaso. Ref: Muñoz R. (2024).

2.3.7 Tronco pique (Destacado con el N°6 en la Figura 2.5.)

El tronco pique corresponde a una excavación revestida con hormigón armado más planchas anti-abrasivas, de una geometría plana, caracterizada por un tramo inicial vertical y luego quiebre inclinado en su parte posterior (ver Figura 2.12.) lo que permite modificar el flujo inclinado de alta pendiente del mineral proveniente desde pique de traspaso a un flujo sub-horizontal que descarga hacia el buzón de lateral.

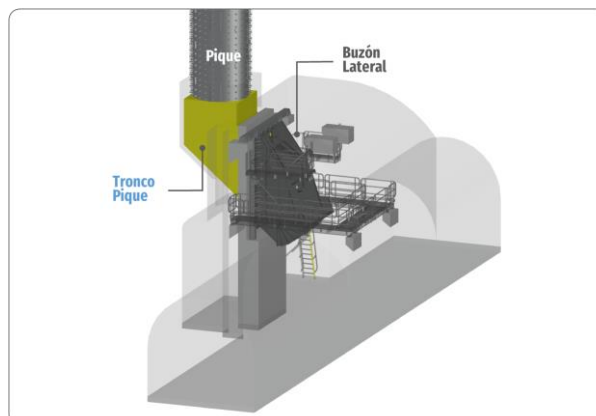


Figura 2.12. Representación de tronco pique, componentes de blindaje de un Sistema de traspaso. Ref: Muñoz R. (2024).

2.3.8 Buzones laterales intermedios (Destacado con el N°7 en la Figura 2.5.)

Estructuras de acero sostenidas mediante muros y consolas de hormigón armado que se utiliza como depósito temporal que almacena el material extraído hasta que pueda ser vaciado mediante un flujo regulado de descarga a equipos de acarreo (camiones y trenes principalmente), para luego ser transportado al resto de los procesos (ver Figura 2.13.). Estos sistemas se ubican a lo largo de las galerías o cruzados, inmediatamente bajo los piques de traspaso y cuentan con una serie de plataformas de acero utilizadas para las actividades de mantención, inspección y operación que se puedan requerir.

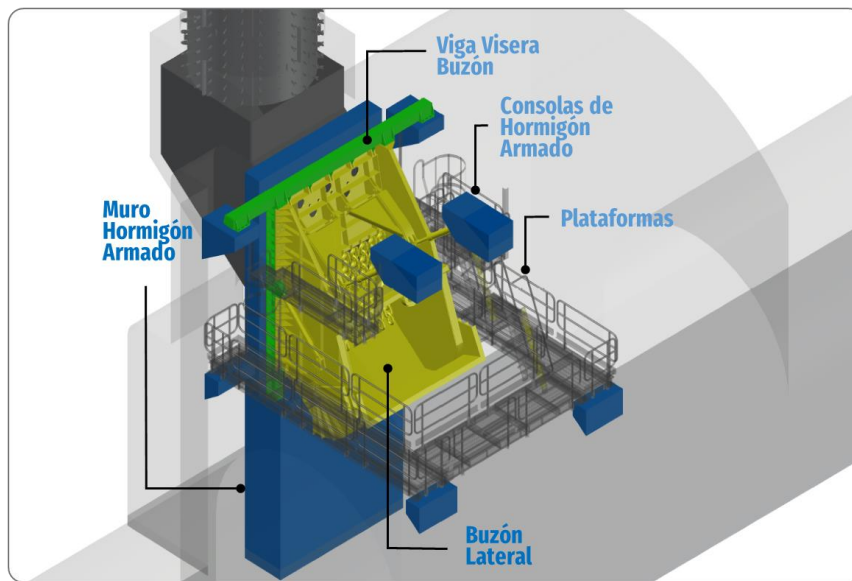


Figura 2.13. Buzón Lateral Intermedio. Ref: Muñoz R. (2024).

2.4 Solicitaciones estructurales en el diseño de obras mineras

Las estructuras interior mina se ven solicitadas por diferentes estados de carga, cuales por lo general son representados por los estados de carga convencionales, tales como las cargas permanentes, de uso, de viento, sísmicas, etc, siendo solo un porcentaje de las solicitaciones existentes. Informes previos señalan que, debido a la variabilidad particular de cada caso, se requiere un estudio específico para identificar la solicitación preponderante. Sin embargo, este análisis no siempre se realiza de manera completa en las etapas iniciales, lo que genera un proceso poco óptimo. Como consecuencia, ciertos estados de carga adicionales, propios del entorno subterráneo, pueden no ser considerados adecuadamente, afectando de forma significativa la estabilidad de las estructuras.

A continuación, se presentan los estados de carga convencionales (exterior mina) generalmente presentados en los documentos y los estados de carga interior mina generalmente no mencionados, con el objetivo de exponerlos, ver sus diferencias y resaltar la importancia de estos últimos en estructuras al interior de una mina subterránea.



2.4.1 Solicitaciones convencionales para estructuras de superficie

En un entorno minero de gran envergadura se necesitan una variedad de estructuras en diferentes ambientes. La consideración de los estados de carga convencionales, tales como peso propio, sobre carga de uso, de techo, cargas de viento, nieve y sísmica son útiles cuando la estructura en cuestión está en la superficie. Para el caso en particular sísmico, El Teniente aplica la norma NCh 2369 “Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales”, norma la cual es referente a nivel mundial en lo que respecta al diseño sísmico.

En las bases de cálculo de cualquier estructura chilena, se define claramente los estados de carga que se debe considerar para el diseño, destacando dentro de este marco las siguientes solicitaciones:

- Cargas permanentes (D):

Se definen como aquellas acciones cuya variación en el tiempo es despreciable respecto de sus valores medios, o bien, cuya variación tiende a un límite. Bajo esta definición se incluyen el peso propio de los elementos estructurales y sus terminaciones, el peso de equipos fijos e instalaciones, el contenido normal de recipientes, tolvas, correas y equipos, así como el peso de ductos sin acumulaciones ni incrustaciones y las aislaciones correspondientes. También se consideran los empujes permanentes como parte de estas acciones constantes en el tiempo (INN, 2003).

- Sobrecargas de Uso (L):

Corresponden a acciones de naturaleza estática y carácter variable en el tiempo, determinadas por la función y uso del edificio o sus instalaciones. Estas acciones presentan variaciones frecuentes o continuas que no son despreciables en relación con su valor medio. Bajo esta categoría se incluyen cargas uniformes asociadas al uso de pisos y plataformas, considerando el tránsito normal de personas, vehículos, equipos móviles menores y la acumulación de materiales. También se consideran las incrustaciones y acumulaciones de polvo en ductos, equipos y estructuras, las cargas asociadas al levante de grúas, presiones de agua o tierra no permanentes, presiones interiores en recipientes, y tensiones en correas o elementos similares (INN, 2003).

-Sobrecargas de techo (Lr):

Cargas variables asociadas al uso funcional del techo de una estructura industrial, incluyendo el tránsito ocasional de personal para mantenimiento, reparación o inspección, así como el peso de materiales o equipos temporales utilizados durante estas actividades. Estas cargas deben considerarse solo si el acceso al techo está previsto.

-Cargas de viento (W):

Cargas o presiones inducidas por la acción del viento sobre las superficies expuestas de una estructura o sus componentes. Se determinan en función de la velocidad básica del viento, las características geométricas de la estructura, su altura, exposición y ubicación geográfica, conforme a lo establecido en la norma NCh432.Of2004. (INN, 2004)

-Cargas de nieve (S):

Cargas verticales que resultan del peso de la nieve acumulada sobre superficies expuestas, tales como cubiertas o techos. Su magnitud depende de factores como la altitud, latitud, topografía del terreno y geometría de la estructura. Estas cargas deben considerarse cuando la localización



del proyecto lo requiera y se pueden considerar como una sobrecarga que puede ser normal o eventual según NCh2369.Of2003.

-Cargas sísmicas (E):

Acciones inerciales inducidas por movimientos sísmicos del terreno, evaluadas en función de la masa de la estructura y su respuesta dinámica. Se determinan de acuerdo con la NCh2369.Of2023.

2.4.2 Solicitaciones de infraestructura interior mina

En la actualidad, las ingenierías para los proyectos de corto, mediano y largo plazo en minería subterránea desarrollada en DET consideran, en la mayoría de los casos, cargas convencionales para el diseño de la infraestructura interior mina. Sin embargo, como se verá durante el desarrollo de este estudio, las solicitudes y condiciones de uso que condicionan el comportamiento de este tipo de estructuras son muy distintas y pocas veces son consideradas. Se podrá constatar, además, que las cargas y condiciones existentes en un ambiente subterráneo son difíciles de estimar numéricamente y que las estructuras que mejor han interpretado las condiciones reales de terreno son las que se han diseñado a partir de un “recetario” práctico proveniente de datos empíricos y de la experiencia de las áreas operativas y sus trabajadores.

En el proceso de investigación del estado del arte se ha podido corroborar que en un método de explotación por Panel Caving Convencional como el aplicado en mina El Teniente, existen una serie de estados de carga distintos a los utilizados normalmente en estructuras emplazadas en superficie y que gobiernan el comportamiento de la infraestructura subterránea, por lo tanto, resulta relevante exponerlas en su totalidad y darles la importancia que requieren ya que es un pilar clave en la justificación de esta memoria. Para tal efecto, se han clasificado estos tipos de carga en tres grandes grupos: condiciones ambientales, inestabilidades geomecánicas y condiciones operacionales. Se describen los estados de carga.

2.4.2.1 Condiciones ambientales

2.4.2.1.1 Bombeo de Agua- Barro.

A medida que se avanza en la explotación de un sector por medio del método de Panel Caving, se van formando áreas que, al estar expuestas por un tiempo prolongado de extracción, evidencian la presencia de material fino en los sistemas de traspaso del entorno y que, al combinarse con la cantidad suficiente de agua, se propicia la ocurrencia de descargas violentas de material fino y húmedo, fenómeno conocido como Bombeo Agua-Barro. Esta condición dinámica que se produce en la zona de influencia del área de extracción puede afectar una serie de estructuras interior mina tales como, puntos de extracción, piques de traspaso de mineral, chimeneas y labores en general, interrumpiendo el proceso operacional (ver Figura 2.14).



Figura 2.14. Evidencia de eventos de Bombeo Agua Barro, El Teniente. Ref: Muñoz R. (2020).

2.4.2.1.2 Agua Interior Mina (No estructural).

El agua presente en la mina El Teniente se caracteriza por ser ácida y particularmente agresiva. Su presencia es común durante todo el año, tanto en las etapas constructivas como en las operacionales de los distintos sectores, y se intensifica durante el periodo de deshielo debido al aumento de los caudales por infiltración de aguas superficiales, como se observa en la Figura 2.15. Esta condición ambiental puede comprometer seriamente la durabilidad de los elementos estructurales, ya que el agua ácida puede corroer sistemas de soporte e infraestructura de acero, además de provocar desgaste y agrietamiento en elementos de hormigón. Si no se controla adecuadamente, especialmente durante la etapa constructiva, puede afectar la calidad de las obras civiles implementadas.

Aunque esta situación no se considera una carga estructural directa, sus efectos deben ser evaluados y considerados en el diseño, selección de materiales, y en las estrategias de protección, con el fin de asegurar la integridad y funcionalidad de la infraestructura durante su vida útil.

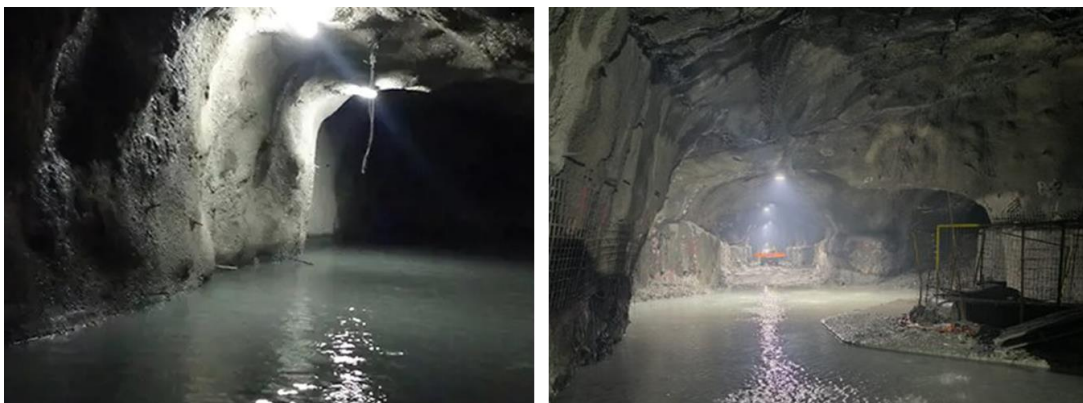


Figura 2.15. Presencia de agua interior Mina. Ref: Muñoz R. (2020).

2.4.2.2 Inestabilidad Geomecánica

2.4.2.2.1 Inestabilidad geomecánica por columna de roca.

Corresponde a los efectos de inestabilidad potencial del macizo rocoso que cubre una excavación subterránea. Esta condición depende de la profundidad de emplazamiento, del tipo y calidad de la roca, y de las dimensiones de la excavación. La evaluación se realiza habitualmente mediante modelos empíricos como el de Terzaghi (Figura 2.16. y Figura 2.17.), que permiten estimar la carga inducida por la caída o desprendimiento de una columna de roca inestable, la cual puede actuar como una sobrecarga sobre las estructuras instaladas en el interior de la excavación.

Condición de la roca	Carga de Roca H_r	Observaciones
I. Dura e Intacta	Cero	Revestimiento ligero, requerido sólo si hay lajamientos o estallidos
II. Dura, estratificada o esquistosa	0 a 0.5 B	Soporte ligero
III. Masiva, estructuras moderadas	0 a 0.25 B	Carga puede cambiar erráticamente de punto a punto
IV. Moderadamente blocosa y agrietada	0.25 B a 0.35 (B+H _r)	Sin presión lateral
V. Muy blocosa y agrietada	(0.35 a 1.10) (B+H _r)	Pequeña o sin presión lateral
VI. Completamente triturada pero químicamente intacta	1.10 (B+H _r)	Presión lateral considerable. Efecto de reblandecimiento de filtraciones hacia el fondo del túnel requiere soporte continuo para extremos inferiores de las costillas o costillas circulares, cualquiera de las dos.
VII. Rocas compresivas, profundidad moderada	(1.10 a 2.10) (B+H _r)	Alta presión lateral, requiere puntales invertidos. Costillas circulares son recomendadas
VIII. Rocas de alta presión, gran profundidad	(2.10 a 4.50) (B+H _r)	
IX. Roca expansiva	Hasta 250 pies (80 m) independiente de los valores de (B+H _r)	Costillas circulares requeridas. En casos extremos utilizar soporte cedente

Clasificación propuesta por Terzaghi, 1946

Figura 2.16. Metodología empírica de Terzagui, datos. Ref: Terzaghi (1946).

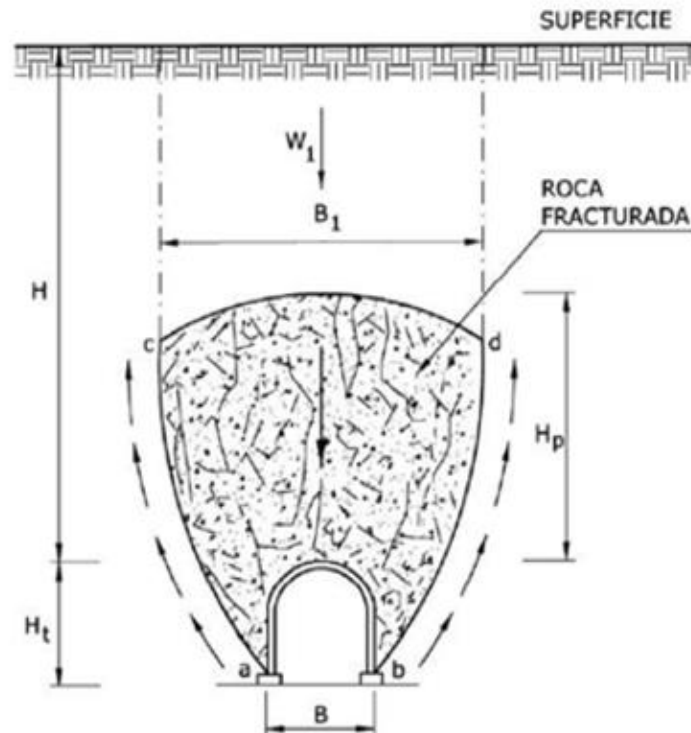


Figura 2.17. Ilustración de Metodología empírica de Terzagui. Ref: Terzaghi (1946).

2.4.2.2.2 Desprendimiento por discontinuidades del macizo rocoso.

La presencia de fallas geológicas, discontinuidades y otros defectos en el macizo rocoso pueden afectar la estabilidad general de las excavaciones ya que pueden actuar como puntos débiles. Estas discontinuidades hacen que el macizo esté propenso a desarmes que se traducen en cargas de impacto sobre la infraestructura y obras civiles existentes en interior de la mina. Un caso común de este tipo de desarmes corresponde a la caída de cuñas y/o los desprendimientos puntuales de rocas (ver Figura 2.18.) que se generan producto de la interacción de estas condiciones con los cambios inducidos por las excavaciones.



Figura 2.18. Representación esquemática de falla en la roca y desprendimiento real en el macizo rocoso. Ref: Muñoz R. (2020).

2.4.2.2.3 Evento sísmico con consecuencia de Estallido de Roca.

Aproximadamente a partir del año 1990, el macizo rocoso explotado en mina El Teniente corresponde a una mena primaria (roca mineralizada original, muy dura y sin alteraciones, que se encuentra en profundidad) emplazada en un ambiente de altos esfuerzos. Este tipo de material se caracteriza por ser competente y altamente resistente, pero debido a la combinación entre la gran presión que existe en profundidad (altos esfuerzos) y la alteración que provoca la actividad minera, pueden ocurrir movimientos internos en la roca que desencadenan una ruptura repentina del macizo, liberando de forma violenta la energía acumulada. Este fenómeno se manifiesta con la proyección violenta de rocas hacia las galerías subterráneas, pudiendo afectar seriamente la fortificación, infraestructura y equipos. En el caso que estos daños generen la detención del proceso productivo, se define entonces que se trata de un evento sísmico con consecuencia de Estallido de Roca.

En la Figura 2.19. se presenta un modelo conceptual de un Estallido de Roca provocado por una ruptura en el macizo posterior a un evento sísmico inducido por la acción minera, mientras que la Figura 2.20. muestra imágenes de daños típicos asociados a este tipo de fenómenos.

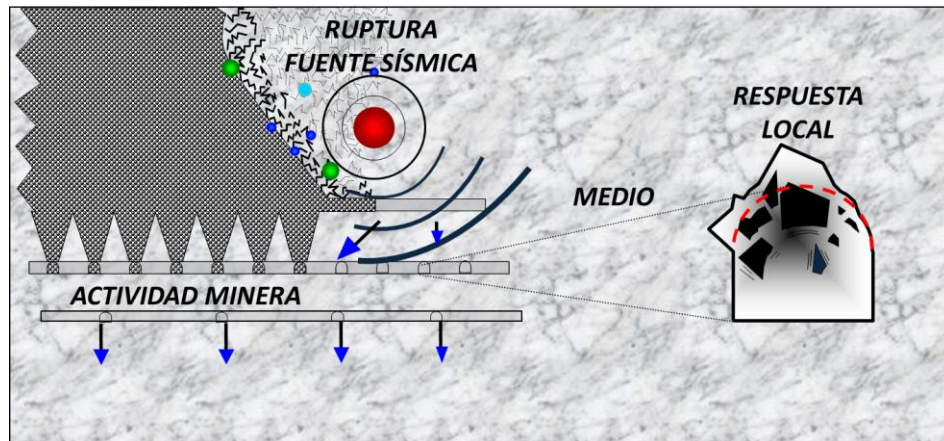


Figura 2.19. Representación Estallido de Roca. Ref: Jorquiera P. (2014).



Figura 2.20. Daños típicos asociados al estallido de roca. Ref: Muñoz R. & Balboa S. (2011).

2.4.2.2.4 Colapsos.

Corresponde a una falla gradual del macizo rocoso que involucra un porcentaje importante del área en explotación. Es un fenómeno caracterizado por una desestabilización gravitacional de un volumen importante de macizo rocoso que tiene como consecuencia el descenso y convergencia gradual de las excavaciones (aproximación progresiva de las paredes o techo y piso de la excavación debido a la deformación del macizo rocoso), comprometiendo de esta manera la estabilidad de las galerías, túneles e infraestructura cercana, hasta que se produce el cierre casi total de las galerías, como se ve representado en las Figuras 2.21. y 2.22. Esto puede llevar a interrupciones prolongadas en la producción y a pérdidas económicas significativas.

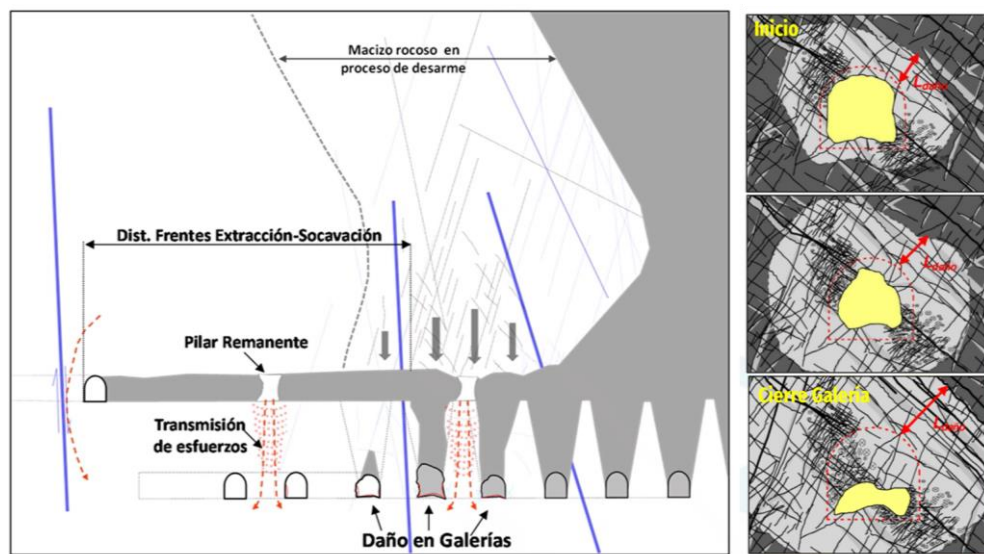


Figura 2.21. Representación Colapso interior Mina con daño en Galerías. Ref: Balboa S. (2012).



Figura 2.22. Colapsos reales dentro de la mina. Ref: Muñoz R. (2020).

2.4.2.3 Cargas y Condiciones Operacionales.

2.4.2.3.1 Cargas por operación de Equipo Pesado.

Los equipos utilizados para el carguío, transporte y vaciado del mineral en los sistemas de traspaso (principalmente LHD, Camiones y Trenes), están en constante movimiento y en espacios reducidos. Este escenario propicia la ocurrencia de eventos asociados a cargas de impacto de estos equipos sobre las estructuras interior mina. Además de lo anterior, existen una serie de otras condiciones de deterioro de la infraestructura producto de la operación de determinados equipos. Para el caso particular de los Sistemas de Traspaso Intermedio que es el foco del presente estudio, destacan los siguientes tipos de solicitaciones:

- Cargas de tránsito en carpetas de rodado por tránsito pesado y constante de equipos LHD en el Nivel de producción y camiones en el Nivel de Acarreo.
- Solicitaciones de desgaste en carpetas de rodado por el arrastre a nivel de piso del balde de equipos LHD o similares que se utilizan como método de remoción de material limpieza de las galerías.
- Cargas de impacto en Puntos de Extracción generadas cuando el equipo LHD ingresa a cargar el mineral y pasa a llevar esta infraestructura.
- Cargas de impacto en OOC y estructuras de acero de los buzones producto del paso de camiones que al transitar muy cerca a esta infraestructura, la pasa a llevar.
- Cargas de impacto en el muro tope del Punto de Vaciado producto de la constante aproximación del equipo LHD hacia el brocal para el vaciado del mineral. Esta carga se acentúa cuando el balde del equipo logra impactar el muro tope.

En la Figura 2.23. adjunta se puede apreciar el caso de marcos de acero dañados por el impacto de equipo LHD.



Figura 2.23. Golpes de equipos a marcos de acero. Ref: Muñoz R. (2024).

2.4.2.3.2 Cargas por Manejo de Mineral.

En la teoría se asume que en un Sistema de Traspaso Intermedio el flujo del mineral es constante y se logra mantener una columna de roca relativamente continua en el interior de los piques. Sin embargo, en un escenario operacional real propio del método de explotación aplicado en DET, muchas veces estas condiciones no se logran generar en su totalidad producto principalmente de la presencia de colpas de sobre tamaño que interrumpen el flujo del mineral

y que por lo general producen cargas de impacto sobre la infraestructura de los STI. Dentro de este tipo de solicitaciones destacan las siguientes:

- Cargas de impacto en parrilla clasificadora generadas por la caída libre de colpas de sobre tamaño vaciadas desde el balde del equipo LHD.
- Cargas de impacto en muro tope y parrilla clasificadora producto de la actividad de picado de martillo pica roca cuando en el Punto de Vaciado se traban las colpas de sobre tamaño.
- Cargas dinámicas sobre los buzones por la caída de mineral desde el Punto de Vaciado ubicado en el Nivel de Producción, producto de que operacionalmente no se ha logrado mantener el pique lleno (columna completa) o por una condición de colgadura generada al interior del pique.

En la Figura 2.24. se muestra una ilustración descriptiva de las cargas dinámicas para el caso de los buzones, mientras que la Figura 2.25. muestra el caso de cargas de impacto sobre la parrilla clasificadora.

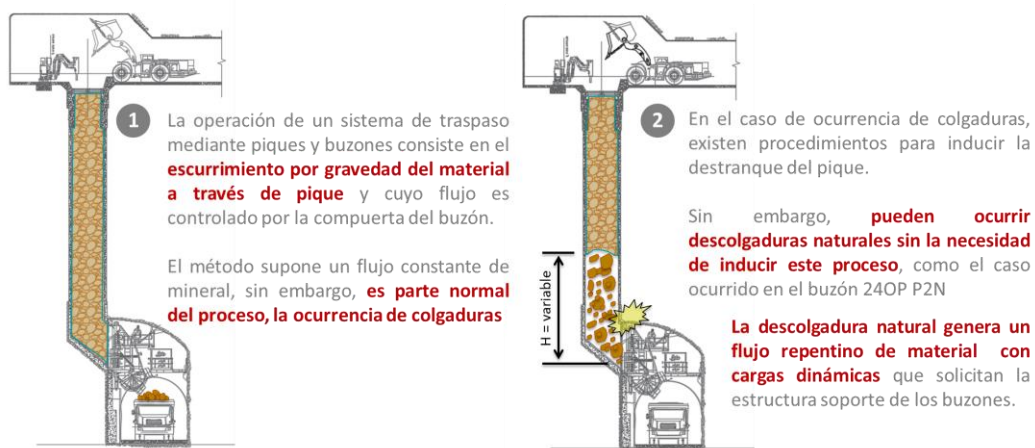


Figura 2.24. Ilustración descriptiva de las cargas dinámicas para el caso de Buzones. Ref: Muñoz R. (2024).

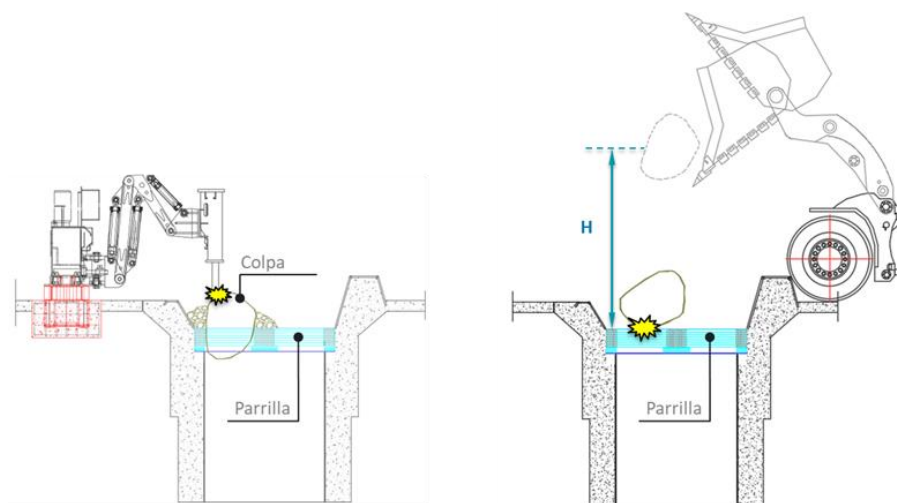


Figura 2.25. Representación de cargas de impacto sobre parrilla clasificadora. Ref: Martínez A. & Muñoz R. (2024).

2.4.2.3.3 Tronadura y uso general de explosivos.

Por definición el método de Panel Caving aplicado en DET tiene como actividad unitaria la fragmentación y corte basal del macizo rocoso mediante tronadura. De esta manera se logra la desestabilización controlada del macizo rocoso y la extracción del mineral que luego continua los procesos aguas abajo. Sin embargo, la tronadura corresponde a un proceso agresivo que requiere de un diseño cuidadoso para minimizar y controlar las vibraciones y ondas expansivas que se generan y que pueden comprometer la integridad de las estructuras. En la Figura 2.26. se detalla un esquema con las tronaduras aplicadas en un método de Panel Caving Convencional.

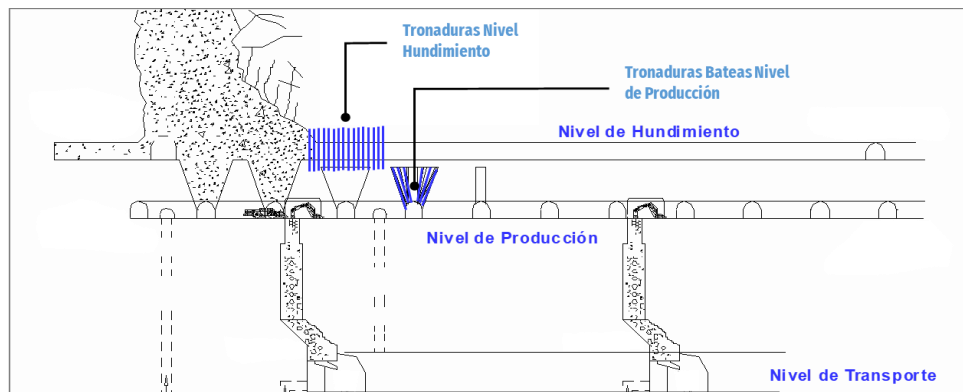


Figura 2.26. Ejemplo de tronaduras Panel Caving Convencional. Ref: Balboa S. (2024).

Existen otras actividades con uso de explosivos que son de menor escala pero que pueden tener un impacto importante en las estructuras del entorno, en particular para el caso de los STI, la reducción secundaria es un proceso que utiliza explosivos para fragmentar colpas de sobre tamaño que se traban en los Punto de Extracción o en los tramos inferiores de los piques (en la cercanía de los buzones y tronco pique). La Figura 2.27. detalla el caso de una reducción secundaria en un Punto de Extracción colgado por la presencia un bloque de gran tamaño.



Figura 2.27. Reducción secundaria punto de extracción. Ref: Revista El Teniente (2024).



2.4.3 Comentarios Generales Carga Interior mina.

Como se ha logrado verificar en los puntos anteriores, las condiciones operacionales y de carga que gobiernan la infraestructura interior mina son bastante agresivas y poco comunes comparadas con las solicitaciones estándares que se aplican en estructuras de superficie convencionales. Por otro lado, dada la cantidad de variables operacionales presentes y las incertidumbres propias de un medio tan heterogéneo como lo es el macizo rocoso, resulta difícil estimar numéricamente el valor de estas cargas y la estrategia más adecuada corresponde a establecer criterios de diseño basados en datos empíricos y experiencia de las áreas operativas.

3 Comportamiento infraestructura interior mina

3.1 Contextualización inicial

Como parte de las estrategias actualmente evaluadas desde el ámbito técnico-operacional, se identificó una alternativa conceptual al diseño estructural tradicional, las estructuras de sacrificio. Este enfoque ha adquirido relevancia en entornos caracterizados por alta incertidumbre estructural y se presenta como una solución potencial frente a las problemáticas observadas en el diseño actual de infraestructura interior mina. Esta consideración servirá como una alternativa de diseño para los puntos a evaluar en este capítulo, especialmente en aquellos sectores donde las condiciones operacionales son altamente variables y difíciles de predecir. Si bien esta alternativa no constituye el eje principal del análisis desarrollado en este capítulo, su incorporación preliminar permite ampliar el marco de referencia sobre posibles soluciones al aportar una perspectiva complementaria útil para entender ciertos comportamientos observados y orientar medidas de mitigación.

En línea con este enfoque se procedió a analizar el comportamiento real de las estructuras que conforman los Sistemas de Traspaso Intermedio (STI), con el propósito de contrastarlo con los supuestos utilizados en los diseños actuales. A partir de esta comparación, se identificaron problemáticas recurrentes que afectaban la funcionalidad, seguridad y durabilidad de la infraestructura interior mina. Para el caso de los puntos de extracción, se desarrolló una modelación estructural en el software SAP2000, junto con una verificación de diseño a flexión y corte, con el objetivo de evidenciar las deficiencias derivadas de simplificaciones estructurales y de la omisión de solicitaciones reales en los criterios de diseño (descritos en el Capítulo 2).

No se consideró necesaria la aplicación de este análisis a otras estructuras del sistema, dado que el uso de modelación con SAP2000 o de cálculos estructurales resulta redundante sin incorporar las solicitaciones reales, las cuales requieren un estudio específico más profundo, limitando así su utilidad comparativa.

Se propusieron medidas de mejora y mitigación basadas en las observaciones realizadas. La información utilizada (supuestos actuales, comportamiento en terreno y medidas de mitigación) se fundamentó en datos empíricos obtenidos mediante observaciones directas, entrevistas con personal de operación y mantenimiento, y en la experiencia profesional del profesor tutor. Este análisis se complementó con una revisión de documentos técnicos internos, lo que permitió contrastar el comportamiento observado de las estructuras con los supuestos considerados en el diseño.

3.2 Consideraciones sobre estructuras de sacrificio en diseño subterráneo

Se aborda brevemente el enfoque de estructuras de sacrificio, con el fin de contextualizar su aplicación como alternativa frente a los desafíos estructurales observados en entornos subterráneos de alta incertidumbre.

Un aspecto crucial al diseñar estructuras en minería subterránea es definir claramente el desempeño esperado de cada estructura. Teniendo en cuenta esta premisa, la discusión que se presenta en este punto es de qué forma se puede mejorar o cambiar el diseño de estructuras con tendencia a ser más robustas, grandes y difíciles de cambiar, a estructuras de sacrificio, prefabricadas y simples de reponer. La problemática de solicitaciones altamente adversas descrita en este estudio para un ambiente de minería subterránea, sumado a la dificultad para estimar con certeza estas cargas que muchas veces son de origen operacional, tienen como consecuencia que las estructuras más robustas resultan ser muy costosas, en conjunto con la evidencia de fallas en cuanto a condiciones que logística y operacionalmente resulta muchas veces inviable de resolver dada la complejidad para reparar o restituir este tipo de estructuras de mayor envergadura. Por estas razones, aunque es una opción válida fortalecer las estructuras mediante materiales avanzados y técnicas de construcción reforzada, estas soluciones pueden no ser efectivas en todos los casos, especialmente cuando se enfrentan cargas dinámicas intensas e impredecibles.

A partir de estos resultados, actualmente el área civil de la Superintendencia de Ingeniería de minas se encuentra impulsando la implementación del concepto de “Estructuras de Sacrificio”, que corresponde a estructuras que si bien, pueden fallar, su principal característica es que sean de elementos simples de fácil reemplazo y rápidas de construir o montar. Bajo este prisma, últimamente ha tomado fuerza la iniciativa del diseño de estructuras prefabricadas que actualmente se encuentran en periodo de pruebas para medir su comportamiento real en terreno, con especial foco en los tiempos de reposición frente a una condición de daño, pudiendo obtener beneficios en los siguientes aspectos:

- Costo-efectividad: Las estructuras de sacrificio podrían reducir los costos a largo plazo, ya que las reparaciones pueden ser focalizadas, en lugar de necesitar una reconstrucción completa de estructuras dañadas.
- Rapidez en la reparación: Las piezas modulares y componentes reemplazables permiten reparaciones rápidas, evitando largos tiempos de inactividad, en beneficio de la continuidad operacional
- Adaptabilidad a cambios en el macizo rocoso: Estas estructuras pueden ser ajustadas según el comportamiento observado en el macizo, permitiendo una flexibilidad que no se tiene en estructuras permanentemente reforzadas.
- Reducción de riesgos operacionales: Con estructuras reemplazables, los trabajadores pueden intervenir en áreas críticas de forma controlada y rápida, minimizando su exposición a zonas de riesgo.

3.3 Puntos de extracción

Para el análisis de los puntos de extracción se consideraron dos estructuras, los marcos de acero y los muros de fortificación.

3.3.1 Marcos de acero

3.3.1.1 Supuestos actuales de diseño

Para el diseño estructural de los marcos de acero de los puntos de extracción, se emplea un modelo simplificado sometido únicamente a cargas verticales y laterales definidas por especialistas geomecánicos, en conjunto con la modelación del contacto del macizo rocoso mediante resortes inelásticos que actúan solo a compresión. Cabe señalar que el resto de las solicitaciones expuestas en el capítulo 2 no se consideran. En este modelo, los marcos de acero, que en terreno están conformados por dos semiarcos unidos en su parte superior o por dos columnas verticales con un arco superior, conectados entre sí mediante placas y pernos, son idealizados como un solo elemento continuo. Esta simplificación asume un comportamiento rígido y monolítico del conjunto, lo que implica que las conexiones reales son consideradas como si transfirieran momento de forma ideal, permitiendo que las cargas aplicadas se distribuyan de manera uniforme a lo largo de toda la estructura. En la Figura 3.1. se puede apreciar la simplificación del modelo.

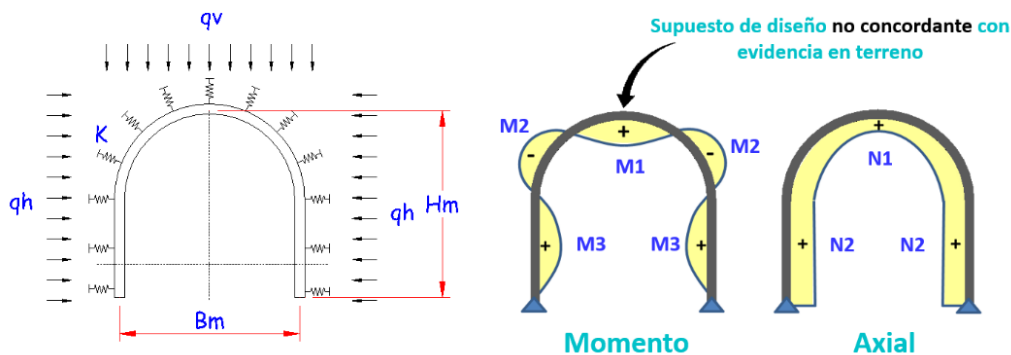


Figura 3.1. Simplificación de modelo de análisis en Punto de extracción. Ref: Muñoz R. (2024).

Para analizar los efectos de esta simplificación, se modeló en el software SAP2000 un marco con especificaciones proveniente de la mina Reno (mina que es parte de la División El Teniente).

La sección transversal ocupada para el marco rígido es HN20x54,8, con un acero AST A36 con las siguientes especificaciones:

Tabla 3.1. Datos de sección y especificaciones según tipo de acero. Elaboración Propia.

Sección	HN20X54,8
E (Modulo de elasticidad)	2100000 [kg/cm^2]

ν (Coef. Poisson)	0,3
F_y	$2500 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$
F_u	$4000 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$

El marco analizado fue sometido a cargas distribuidas horizontales de 8 [T/m] y verticales sobre el arco de 20 [T/m] , en conjunto con la incorporación de resortes inelásticos que actúan únicamente en compresión modelados como line spring (Stiffness/ Length) con coeficiente de rigidez k de 10 [T/m] . Los valores corresponden a magnitudes dentro del rango de referencia comúnmente empleados por el equipo geomecánico de la mina Reno para estudios preliminares de comportamiento estructural. En la Figura 3.2. se presenta las cargas distribuidas aplicadas.

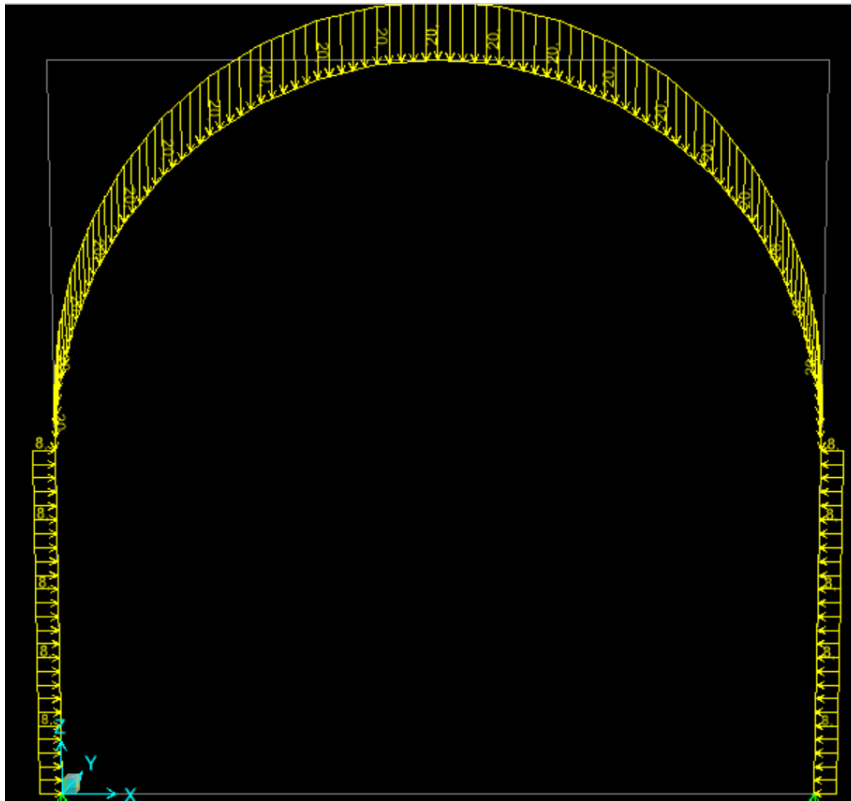


Figura 3.2. Cargas aplicadas en marco, SAP2000. Elaboración propia.

Los resultados del análisis muestran diagramas de momento que concuerdan con la Figura 3.1. En la Figura 3.3. se puede visualizar un momento máximo en la parte superior con un valor de $3,9 \text{ [T-m]}$. En la Figura 3.4 se aprecia un momento mínimo con un valor de $-3,6 \text{ [T-m]}$.

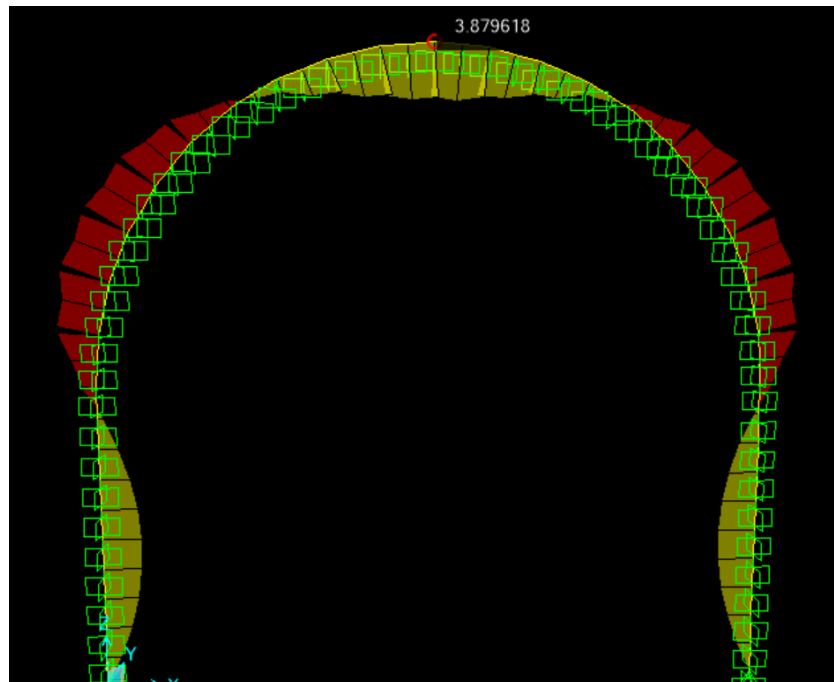


Figura 3.3. Momento máximo en SAP2000. Elaboración Propia.

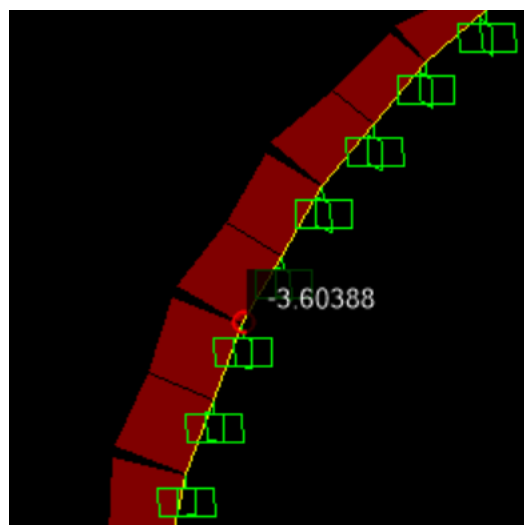


Figura 3.4 Momento mínimo en SAP2000. Elaboración Propia.

En la Figura 3.5 se muestra el diagrama de corte en el marco. En la Figura 3.6. se indica los valores más relevantes para una posterior comparación. Como se aprecia en las figuras, el corte alcanza 2,0 [T] en la parte superior del marco y 5,1 [T] en la unión del arco con la columna. En la Figura 3.7. se muestra el diagrama de fuerza axial. En la Figura 3.8. la fuerza axial máxima ocurre en los apoyos con un valor de 68,1 [T].

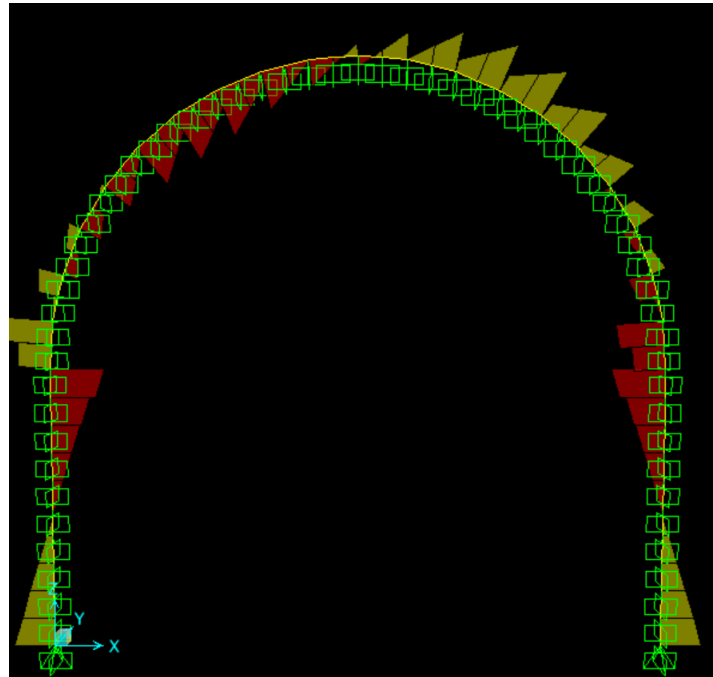


Figura 3.5. Diagrama de corte en marco en SAP2000. Elaboración Propia.

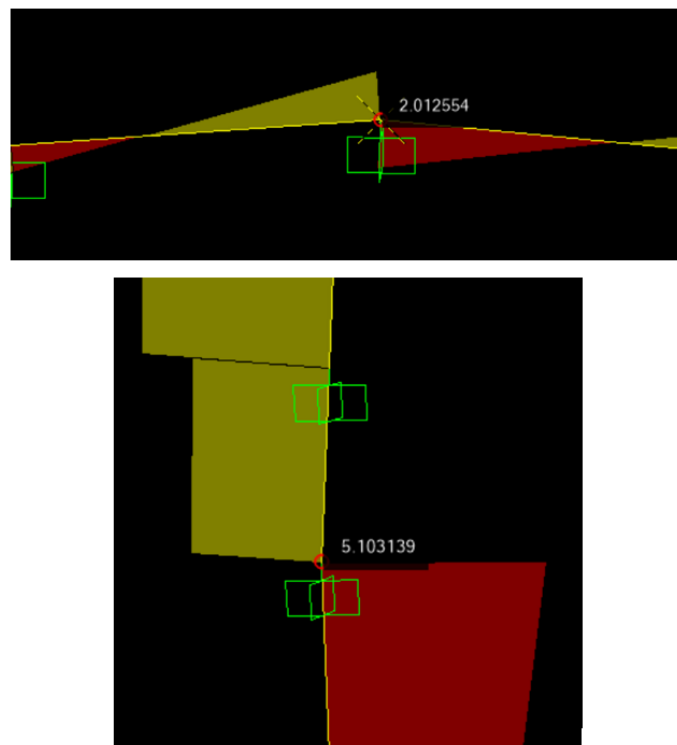


Figura 3.6. Valores relevantes de corte en marco en SAP2000. Elaboración Propia.

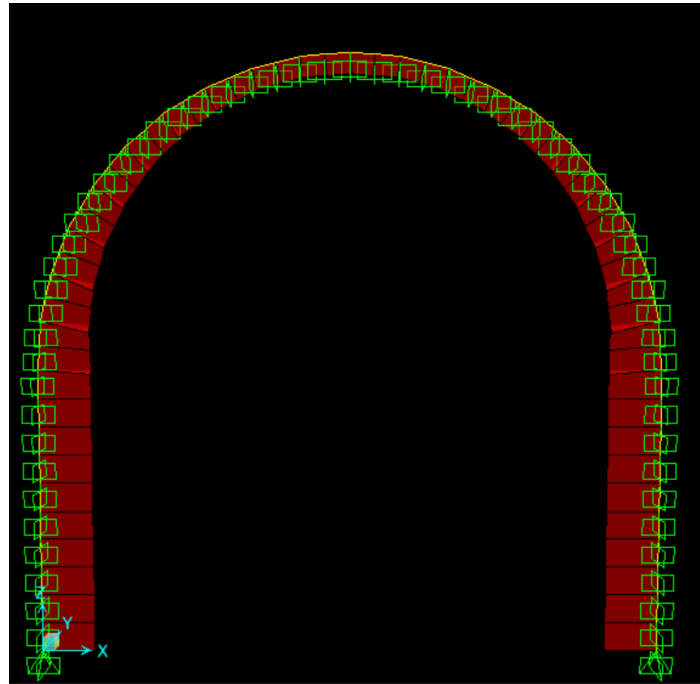


Figura 3.7. Diagrama de Fuerza axial en SAP2000. Elaboración Propia.

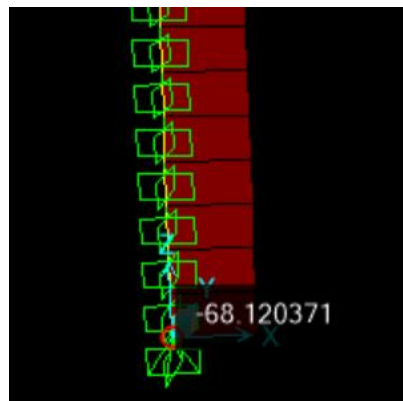


Figura 3.8. Fuerza axial mayor en SAP2000. Elaboración Propia.

El desplazamiento es un aspecto relevante de analizar. Los puntos clave seleccionados para su evaluación y posterior comparación corresponden a la cúspide del marco y a la unión del arco con la columna. En la Figura 3.9. se puede observar una deflexión de 5[mm] en la cúspide, lo cual es aceptable. En la Figura 3.10. se muestra los desplazamientos en la unión del arco con la columna cuales son despreciables.

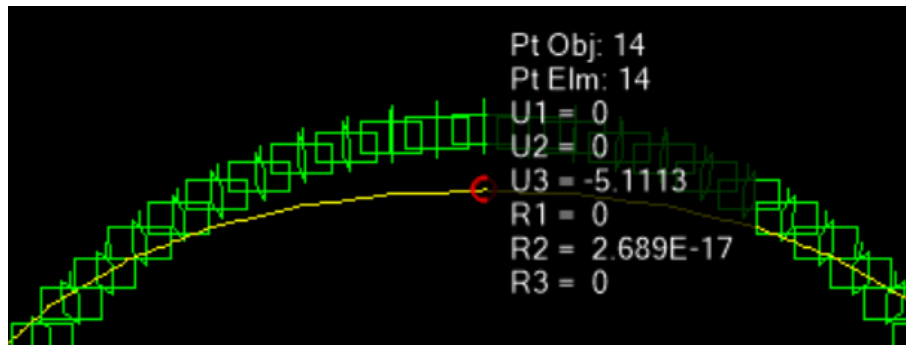


Figura 3.9. Desplazamientos de cúspide de marco en SAP2000. Elaboración Propia.

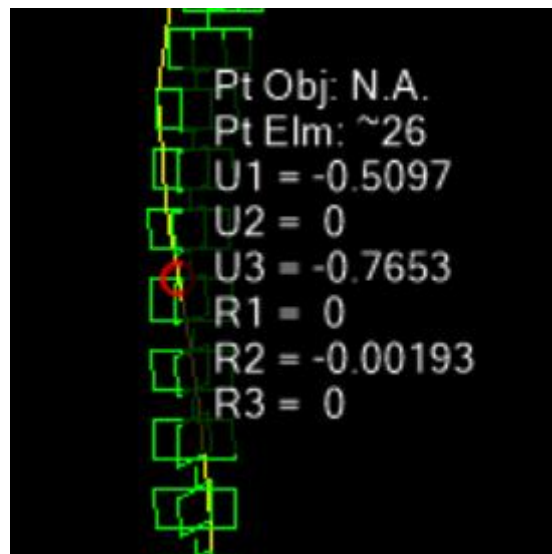


Figura 3.10. Desplazamientos en la unión del arco con la columna. Elaboración Propia.

3.3.1.2 Comportamiento real en terreno

En la práctica, los marcos de acero utilizados en los puntos de extracción no presentan un comportamiento estructural completamente rígido, como se supone en los modelos de diseño simplificados. Esto se debe a que estas estructuras están conformadas por varias piezas, dos semiarcos unidos en la parte superior o dos columnas y un semiarco superior, que se ensamblan mediante conexiones mecánicas como pernos y placas. En terreno, estas uniones no logran una transferencia eficiente de momentos flectores, ya sea por el tipo de conexión empleado o por las dificultades constructivas asociadas a las condiciones subterráneas, lo que implica que el marco funciona en muchos casos más como un sistema articulado (que tiene uniones representadas por rótulas) que como uno rígido.

Para analizar las variaciones respecto al diseño, se modelaron dos casos diferentes del marco estructural. En el primer caso, el marco se representó con una rótula en la cúspide, mientras que en el segundo caso se incorporaron rótulas en los costados, simulando las uniones de las piezas que conforman el marco. En ambos modelos, el marco mantuvo el mismo material, sección transversal y fue sometido a las mismas fuerzas definidas en el punto anterior. No se consideraron la mayoría de las solicitaciones detalladas en el Capítulo 2.

Marco con Rotula en la cúspide:

En la Figura 3.11. se muestra la modelación del marco estructural. Al tratarse de elementos tipo frame, al incorporar una rótula en la parte superior, el software SAP2000 representa visualmente dos rótulas; sin embargo, esto corresponde únicamente a una representación gráfica, siendo en realidad una sola rótula.

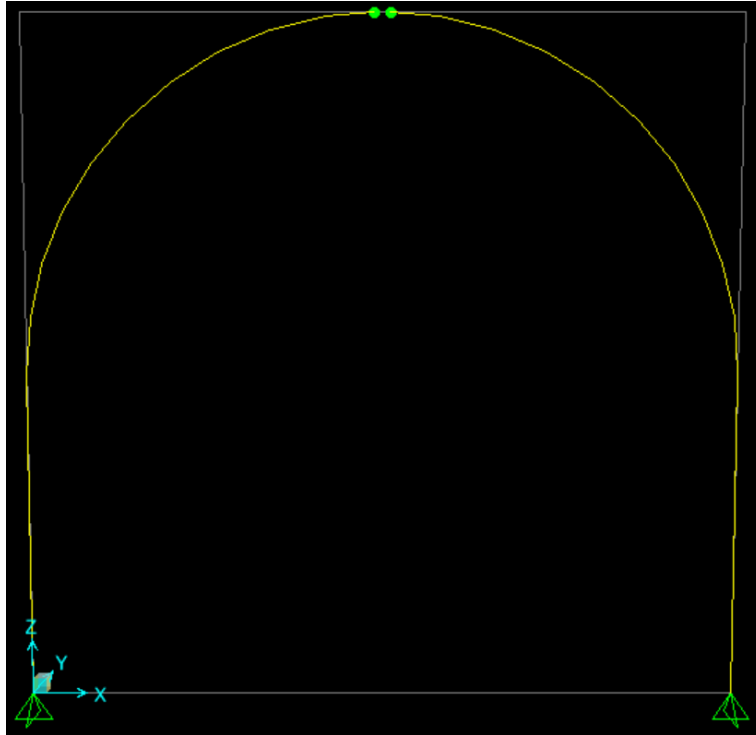


Figura 3.11. Modelación marco con rotula superior SAP2000. Elaboración Propia.

Se genera el diagrama de momento, cual se muestra en la Figura 3.12.

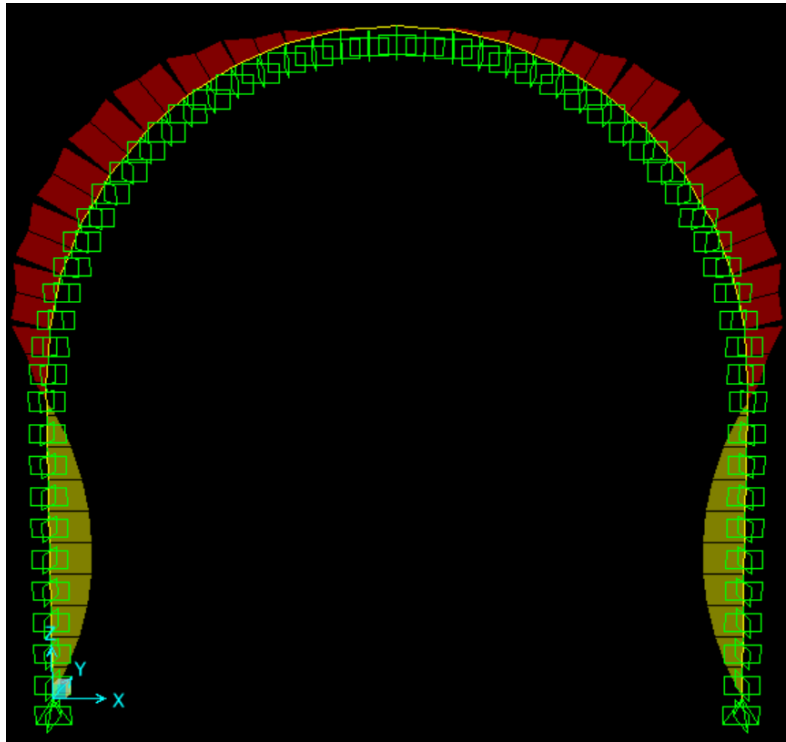


Figura 3.12. Diagrama de momento de marco con rótula superior SAP2000. Elaboración Propia.

En la Figura 3.13. se muestra la imagen ampliada del valor del momento flector cuando se agrega la rótula. El valor es 0 [T-m].

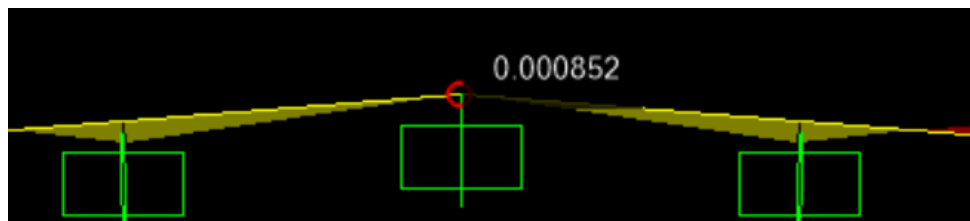


Figura 3.13. Momento en la cúspide del marco. Elaboración Propia.

En la Figura 3.14. se muestra el momento flector mínimo, ubicado en el mismo sector indicado en la simplificación del punto anterior, con valor de -3,8[T-m], valor mayor al de diseño.

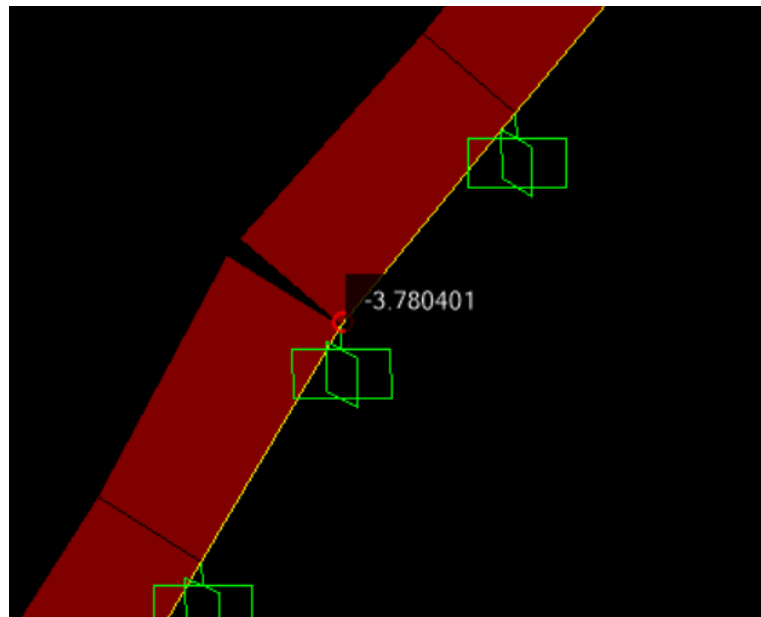


Figura 3.14. Momento mínimo en la unión del arco con la columna con rotula en la cúspide.
Elaboración Propia.

En la Figura 3.15 se muestra el corte en la cúspide del marco, el valor es 2,3 [T], valor mayor al de diseño.

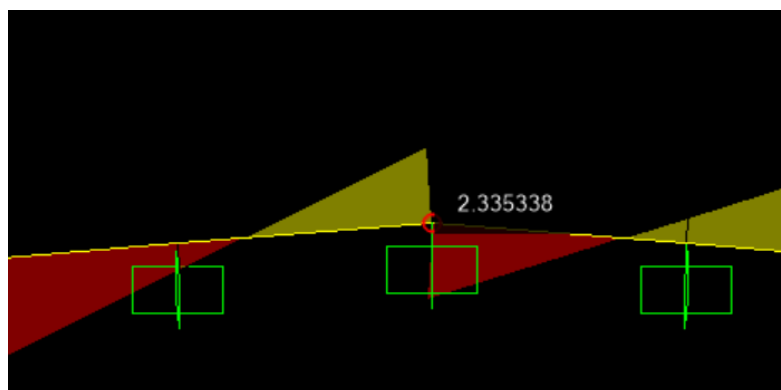


Figura 3.15. Corte en la cúspide del marco con rotula en la cúspide. Elaboración Propia.

En la Figura 3.16. Se muestra que la máxima fuerza axial se da en los apoyos con un valor de -70,3 [T], mayor a la de diseño.

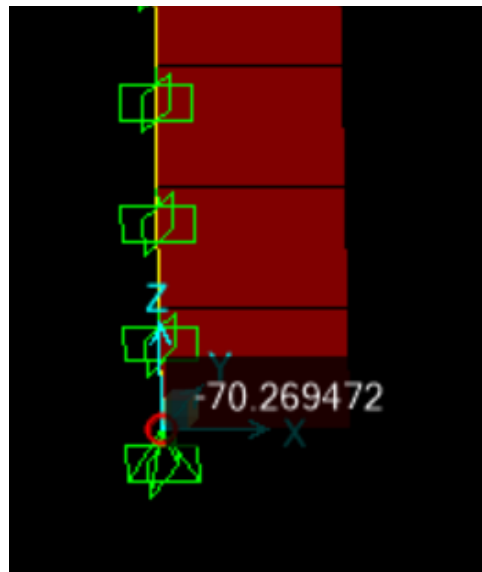


Figura 3.16. Máxima fuerza axial del marco con rotula en la cúspide. Elaboración Propia.

El desplazamiento también es un factor importante para analizar en la cúspide del marco. Se obtiene una deflexión levemente superior a la considerada en el punto anterior, con un valor de 7 [mm] en la vertical (ver Figura 3.17).

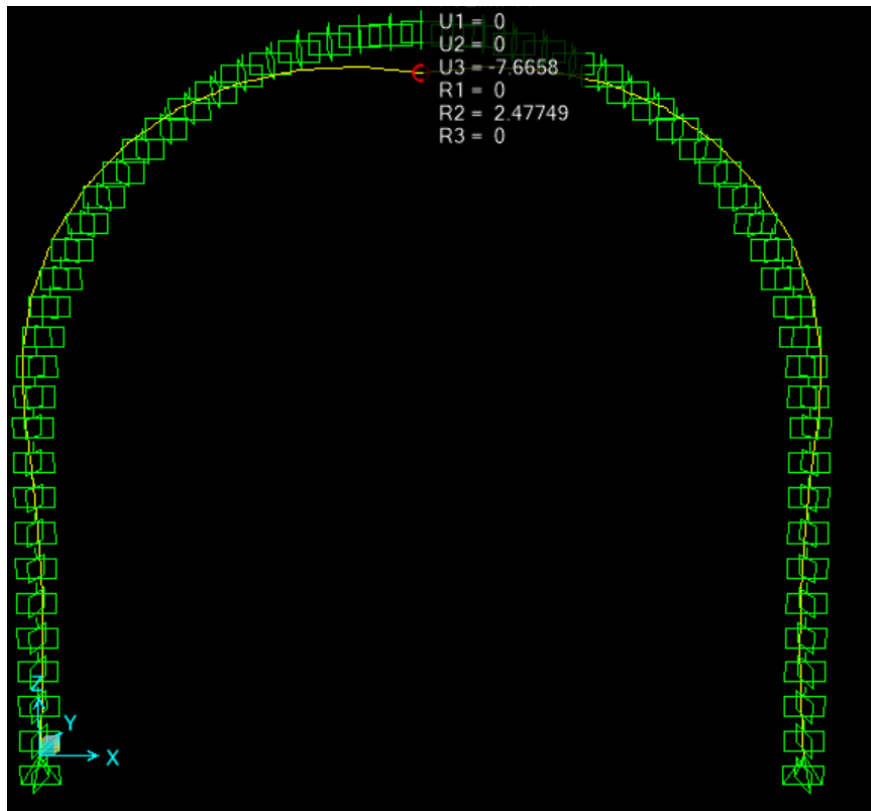


Figura 3.17. Desplazamientos del marco con rotula en la cúspide. Elaboración Propia.

Marco con rótula a los costados:

En la Figura 3.18. se muestra la modelación del marco estructural. Al tratarse de elementos tipo frame, al incorporar una rótula en cada lado en la unión del arco con la columna, el software SAP2000 representa visualmente dos rótulas en cada lado; sin embargo, esto corresponde únicamente a una representación gráfica, siendo en realidad una sola rótula por lado.

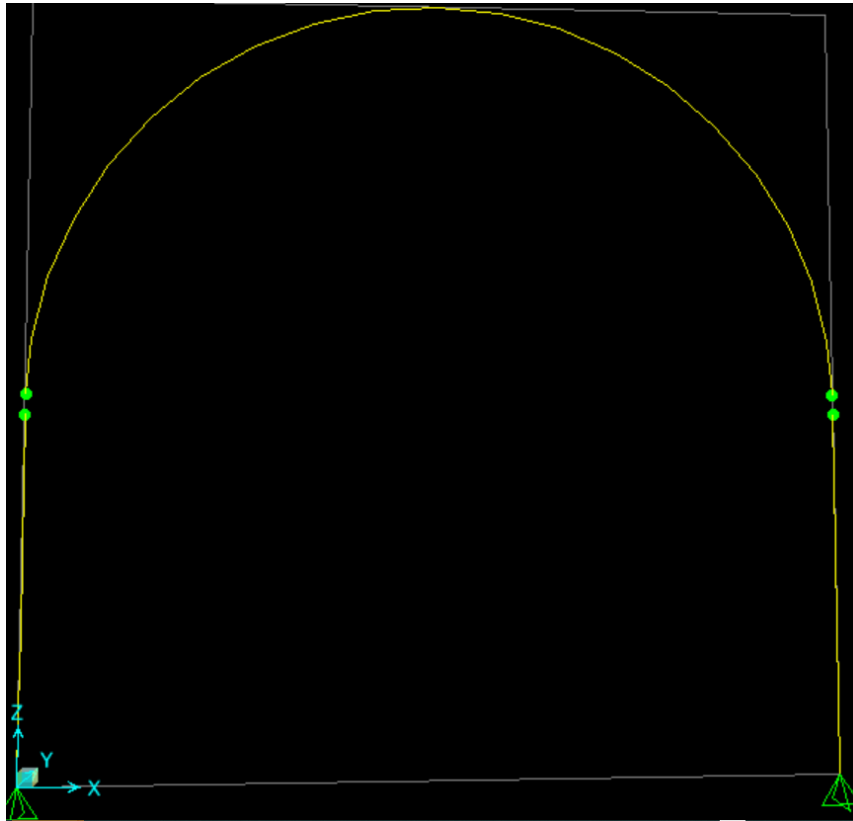


Figura 3.18. Modelación de marco con rotulas en la unión del arco con la columna en SAP2000. Elaboración Propia.

Se genera el diagrama de momento, cual se muestra en la Figura 3.19.

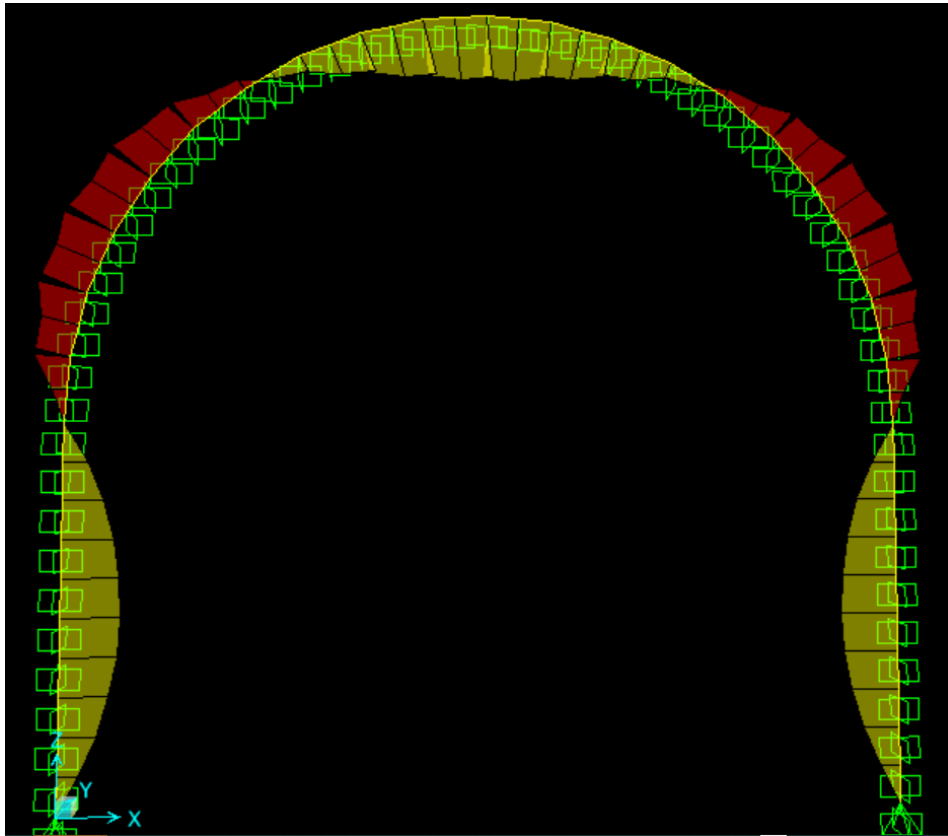


Figura 3.19. Diagrama de momento de marco con rotulas en la unión del arco con la columna SAP2000. Elaboración Propia.

En la Figura 3.20. se muestra la imagen ampliada del valor del momento flector en la unión del arco con la columna al agregar rotulas. El valor es 0 [T-m].

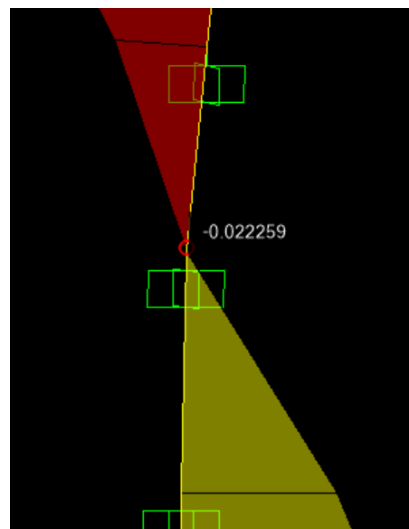


Figura 3.20. Momento en la unión del arco con la columna al agregar rotulas. Elaboración Propia.

En la Figura 3.21. se muestra el momento flector máximo, ubicado en el mismo sector indicado en la simplificación de diseño del punto anterior, con valor de 3,8 [T-m], valor menor al de

diseño. En la Figura 3.22. se muestra el momento flector mínimo en la unión del arco con la columna con valor de $-3,2$ [T-m].

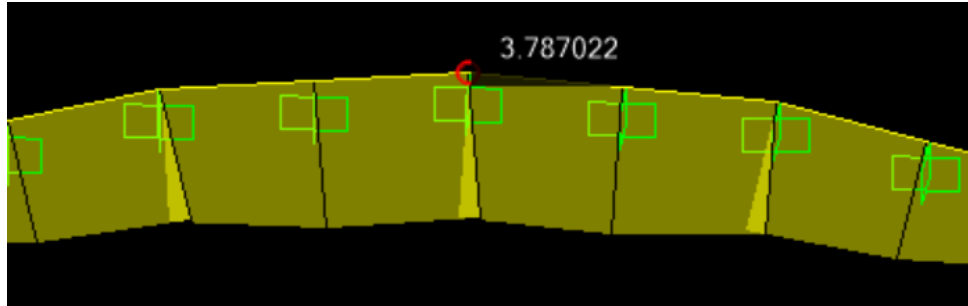


Figura 3.21. Momento máximo en la cúspide del marco con rotulas en la unión del arco con la columna. Elaboración Propia.

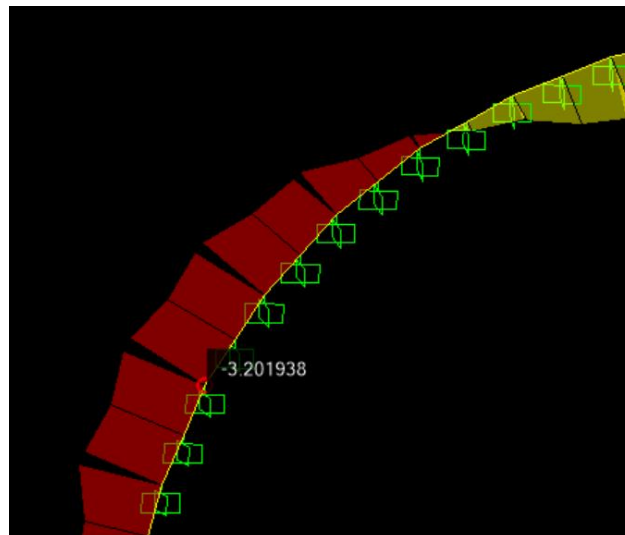


Figura 3.22. Momento mínimo en la unión del arco con la columna, con rotulas en el mismo sector. Elaboración Propia.

En la Figura 3.23. se muestra el corte en la unión del arco con la columna, el valor es $-8,6$ [T], valor mayor al de diseño.

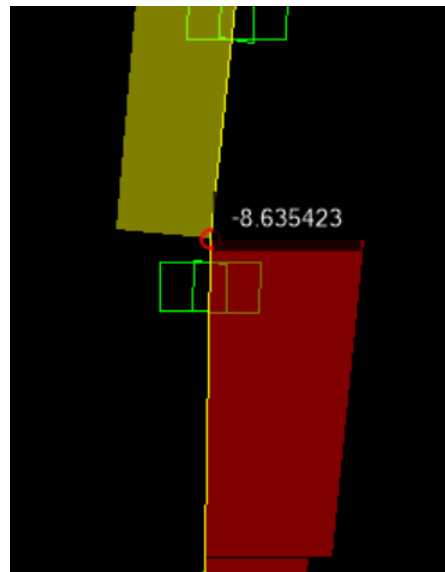


Figura 3.23. Corte en la unión del arco con la columna con rotula en el mismo lugar.
Elaboración Propia.

En la figura 3.24. Se muestra que la máxima fuerza axial se da en los apoyos con un valor de -67,9 [T].

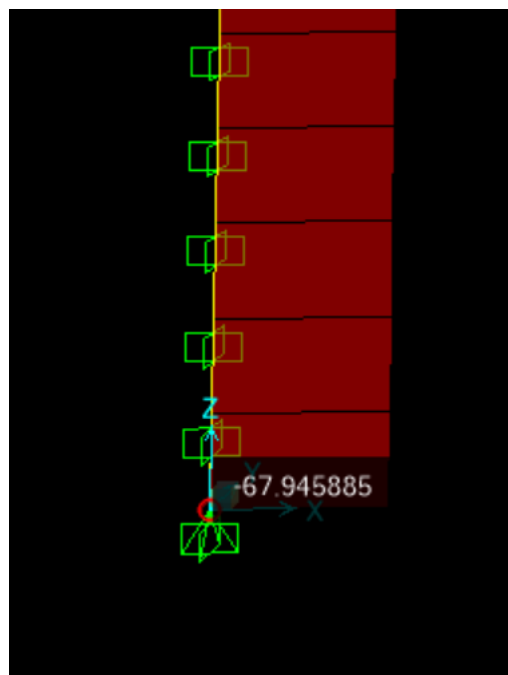


Figura 3.24. Máxima fuerza axial del marco con rotulas en la unión del arco con la columna.
Elaboración Propia.

El desplazamiento también es un factor importante para analizar en la cúspide del marco y en la unión del arco con la columna. Se obtiene una deflexión igual a la considerada en la simplificación del modelo, con un valor de 5[mm] en la vertical (ver Figura 3.25.).

La Figura 3.26. muestra el desplazamiento lateral de magnitud despreciable en la horizontal en la ubicación de la unión del arco con la columna.



Figura 3.25. Desplazamiento del marco en la cúspide con rotulas en la unión del arco con la columna. Elaboración Propia.

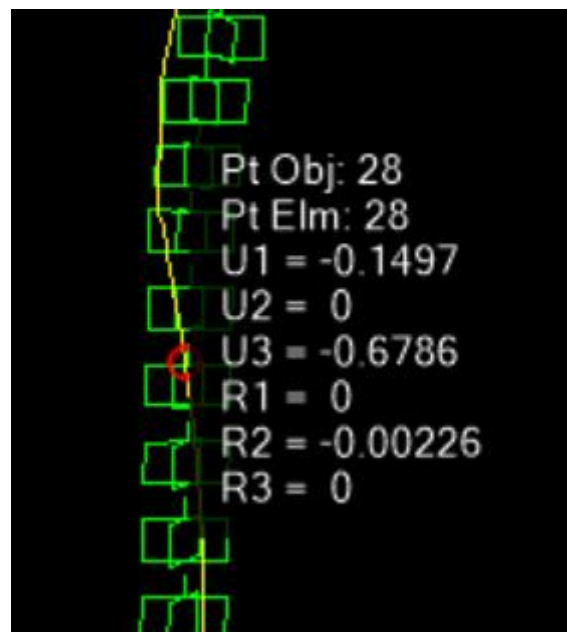


Figura 3.26. Desplazamiento del marco en la unión del arco con la columna, con rotulas en el mismo sector. Elaboración Propia.

Los resultados de las diferencias entre cada caso, se presenta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Comparación entre casos. Elaboración propia.

Fuerzas internas/Modelo	Simplificado	Con rotula cuspide	Con rotula en la union del arco con la columna
Momento Maximo[T-m] (Arriba)	3,9	0,0	3,8
Momento Minimo [T-m]	-3,6	-3,8	-3,2
Corte arriba [T]	2,0	2,3	[-]
Corte en el costado [T]	5,1	[-]	-8,6
Fuerza axial maxima [T]	-68,1	-70,3	-67,9
Desplazamiento arriba [mm]	5	7	5

El modelo simplificado es diseñado por solicitaciones menores en todos los puntos de comparación con respecto al caso con una rotula en la cúspide del marco.

El modelo simplificado genera una deflexión de 5 [mm], menor a la deflexión del caso con rotula en la cúspide con valor de 7 [mm]. El momento mínimo del modelo simplificado es -3,6 [T-m], menor en valor absoluto al momento mínimo del caso con rotula en la cúspide con valor -3,8 [T-m]. El corte en la cúspide del modelo simplificado de valor 2,0 [T] es menor que la solicitación del modelo con rotula en la cúspide con valor de 2,3 [T]. La fuerza axial máxima del modelo simplificado con valor de -68,12 [T] es menor en valor absoluto a la fuerza axial máxima del caso con rotula en la cúspide con valor de -70,3 [T]. La fuerza axial debe ser la misma, la diferencia observada se atribuye a variaciones locales en la redistribución de esfuerzos generada por SAP2000, en función de las condiciones de borde. Estas variaciones no afectan de forma significativa el equilibrio axial global, el cual está determinado por las cargas externas aplicadas.

El modelo simplificado tiene solicitaciones máximas mayores que el caso de las rotulas en la unión del arco con la columna, en cuanto a momento máximo y momento mínimo, pero falla en los cortes de las uniones del arco con la columna, con un corte de 5,1 [T] menor en valor absoluto al de -8,6 [T] generado en el caso de las rotulas en las uniones del arco con la columna, caso relevante dado que el corte es importante en el diseño de uniones apernadas. El modelo simplificado genera una deflexión de 5 [mm] igual a la deflexión del caso de rotulas en la unión del arco con la columna.

A partir de los resultados obtenidos, se evidencia que el modelo simplificado presenta deficiencias al compararse con configuraciones más reales, como aquellas que incorporan rótulas. Se pone énfasis que la comparación considera una fracción limitada de las solicitaciones existentes.

Se puede anticipar que, si falla el diseño con una parte de las solicitaciones reales, falle, colapse o no alcance la vida útil esperada cuando se le someta a todas las solicitaciones características de un entorno minero subterráneo, descritas en el Capítulo 2.

Un ejemplo concreto de esta diferencia entre el modelo teórico y el comportamiento estructural real se manifiesta en la deficiencia de sus uniones, aspecto evidenciado en la modelación y representado en la Figura 3.27.

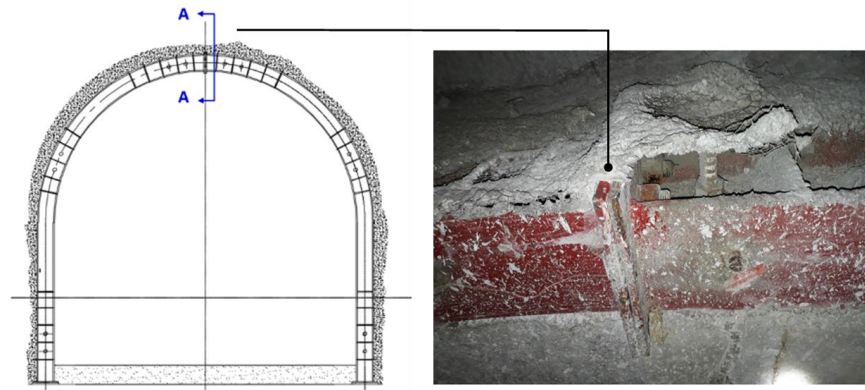


Figura 3.27. Representación estructural de marco con uniones (izquierda) y fotografía de la conexión real en terreno (derecha). Ref: Muñoz R. (2024).

3.3.1.3 Mejoras y medidas de mitigación

Una de las principales mejoras en el diseño para el modelamiento de los marcos de acero ocupados en los puntos de extracción consiste en considerar conexiones rotuladas en las uniones, las cuales no transmiten momento. Esta condición permite representar con mayor certeza el comportamiento mecánico de los elementos que componen al marco (dos semiarcos unidos en la parte superior o dos columnas y un semiarco superior), lo que contribuye a un diseño más representativo de las condiciones reales. Esta medida debe ser complementada con una modelación más amplia respecto a las solicitaciones expuestas en el Capítulo 2, correspondientes a las condiciones reales al interior de una mina. (Clasificación propuesta: Estructural – Análisis y Diseño).

Considerando las condiciones agresivas a las que se encuentra expuesto un punto de extracción y con el propósito de aumentar su vida útil, DET ha implementado una serie de medidas de mitigación, tales como:

- **Refuerzo Marcos de Acero:** Durante la etapa de reparaciones de la mina Pilar Norte producto del daño sufrido en la infraestructura de este sector que estuvo sometida a una serie de estallidos de roca, Muñoz R. (2011) propuso la incorporación de atiesadores a los perfiles HN que conforman los marcos de acero, para así aumentar la resistencia y rigidez de estos elementos frente a cargas dinámicas concentradas e irregulares, mejorando la respuesta al pandeo local y global de estas estructuras en sus zonas críticas (ver Figura 3.28.). (Clasificación propuesta: Estructural – Cargas y Diseño).

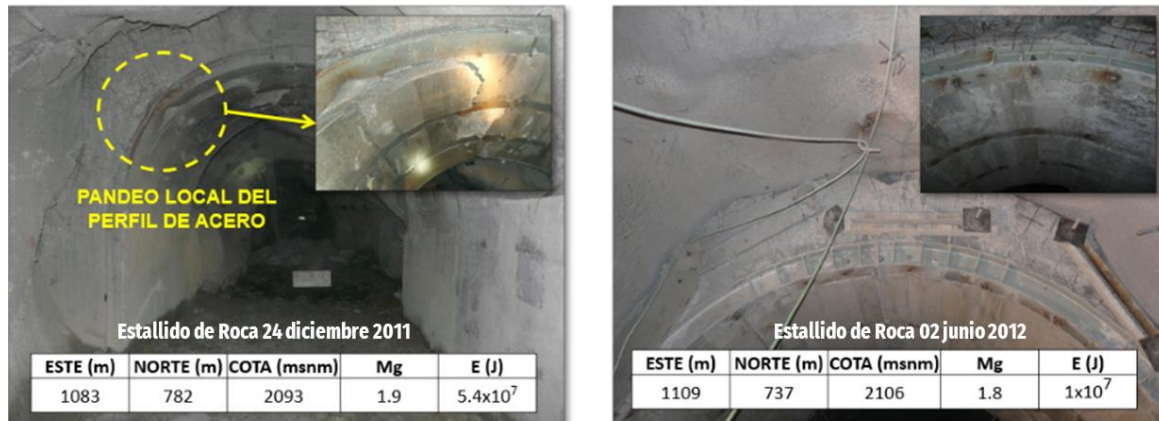


Figura 3.28. Comparación de comportamiento de marco sin atiesadores y con atiesados frente a cargas dinámicas por estallidos de roca. Ref: Muñoz R. (2024).

- **Construcción de Viseras de Protección:** Si bien se trata de una medida reactiva, la construcción de viseras ha demostrado ser una metodología eficiente para aumentar la vida útil de puntos de extracción con daños severos que han perdido casi la totalidad de sus marcos de acero. Estas viseras corresponden a obras civiles de hormigón armado que permiten restituir el ingreso del punto de extracción y evitan que el talud natural del mineral ingrese a la calle del nivel de producción (ver Figura 3.29.), entorpeciendo el tránsito y carguío de los equipos LHD. (Clasificación propuesta: Constructiva – Obras civiles de protección)



Figura 3.29 Visera de protección en punto de extracción. Ref: Muñoz R. (2024).

3.3.2 Muro de fortificación

3.3.2.1 Supuestos actuales de diseño

En los puntos de extracción existe otra estructura, llamada muro de fortificación, cuyo diseño tiene la finalidad de dar soporte a los marcos. Son cuatro marcos de acero instalados cada un metro, unidos por los muros de hormigón, como se muestra en la Figura 3.30. en una elevación longitudinal del punto de extracción.

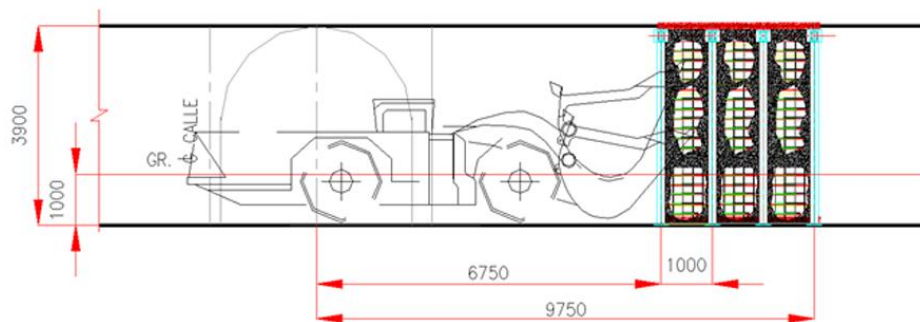


Figura 3.30. Elevación longitudinal punto de extracción, visualización marcos y muros. Ref: Olivares F. (2016).

Para los muros de fortificación se verifico el diseño preparado por Olivares F. (2016) , en el cual se emplearon ciertas simplificaciones, como la utilización de estados de carga convencionales, tales como peso propio y sobrecarga de uso (representadas por las fuerzas verticales y horizontales generadas por la presión de roca), sin considerar la mayoría de las solicitaciones expuestas en el Capítulo 2. A continuación se presenta la información utilizada por Olivares F. (2016) la cual permite comprender el diseño realizado.

El hormigón es H-30, con resistencia (f'_c) de $250 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$ y módulo de elasticidad de $253.456 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$.

Las combinaciones de carga que se ocupan son:

- 1) 1,4 PP
- 2) 1,2 PP + 1,6 SC

En la Figura 3.31. se muestra el modelo de análisis de muro y marco propuesto por Olivares F. (2016). El modelo es una coraza compuesta por marcos de acero y muros de hormigón.

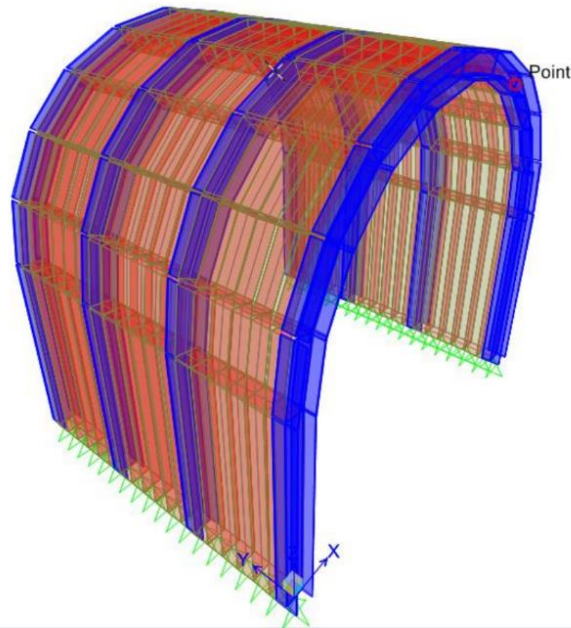


Figura 3.31. Modelo de análisis de los marcos y muros en punto de extracción. Ref: Olivares F. (2016).

A efectos de cálculo, se considera un muro continuo de hormigón con dimensiones de 0,3 [m] de espesor, 1[m] de ancho (distancia entre marcos), 3,9 [m] de alto y profundidad total de 3 [m].

Las cargas horizontales y verticales que representan la presión de roca, que en la memoria de Olivares R. (2016) se las ubica como sobrecargas de uso, son de $15 \left[\frac{T}{m^2} \right]$ aplicada en proyección vertical sobre la estructura, como se muestra en la Figura 3.32. y $7,5 \left[\frac{T}{m^2} \right]$ actuando en los bordes laterales hacia el interior de la bóveda, como se muestra en la Figura 3.33.

A estas cargas se agrega el peso propio, que por unidad de área es $2,4 \left[\frac{T}{m^3} \right] \cdot 0,3 [m] \approx 0,72 \left[\frac{T}{m^2} \right]$.

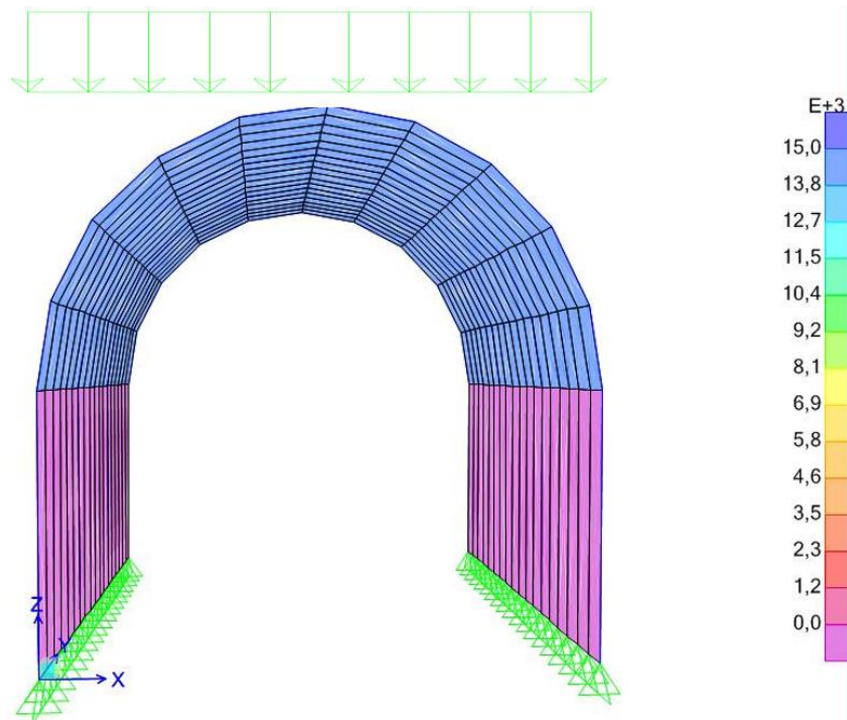


Figura 3.32. Modelación de carga vertical en bóveda. Ref: Olivares F. (2016).

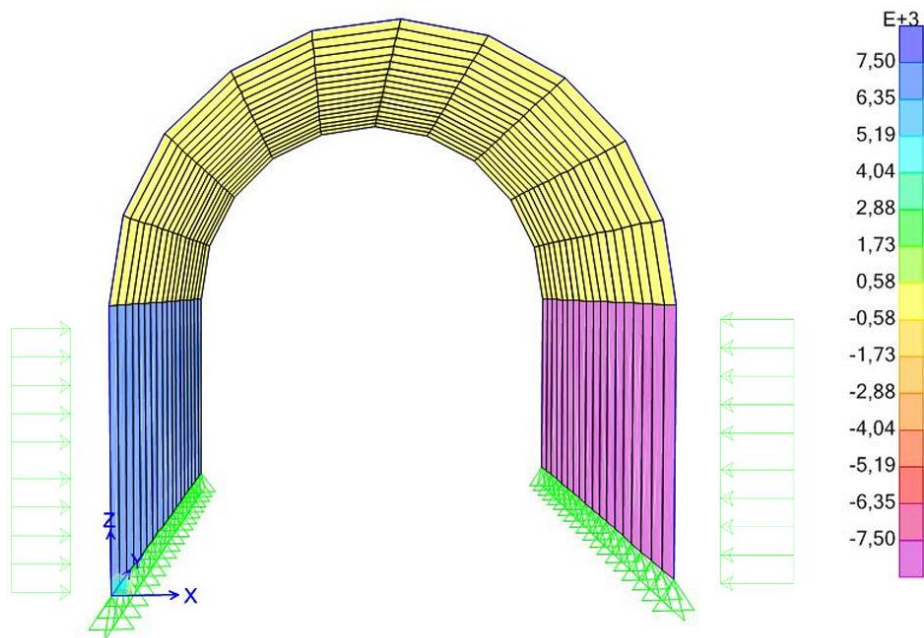


Figura 3.33. Modelación de cargas horizontales en bóveda. Ref: Olivares F. (2016).

A partir del análisis realizado por Olivares F., se obtuvieron los diagramas de momento correspondientes al diseño del muro, tanto en vista lateral como en planta superior. En la Figura

3.34. se muestra el diagrama de momento flector para la combinación 2 en los muros de hormigón armado, en dirección longitudinal del muro, en una vista lateral. La Figura 3.35. muestra el mismo resultado en planta superior. En la Figura 3.36. se indica el diagrama de momento flector en dirección transversal del muro para la misma combinación de carga, en vista en planta. La Figura 3.37. se representa el mismo resultado en vista planta superior.

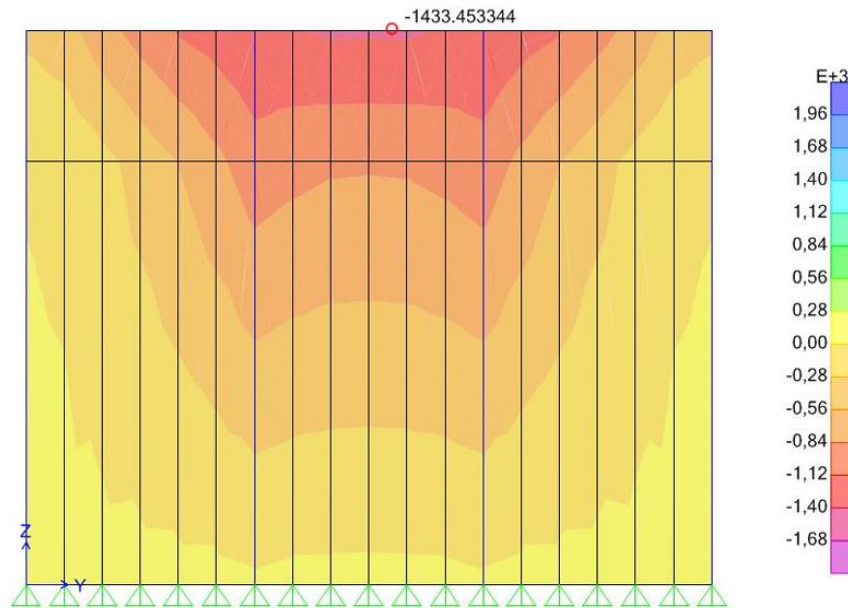


Figura 3.34. Momento combinación 2 en dirección longitudinal del muro, vista lateral, en $[kg \cdot cm/cm]$. Ref: Olivares F. (2016).

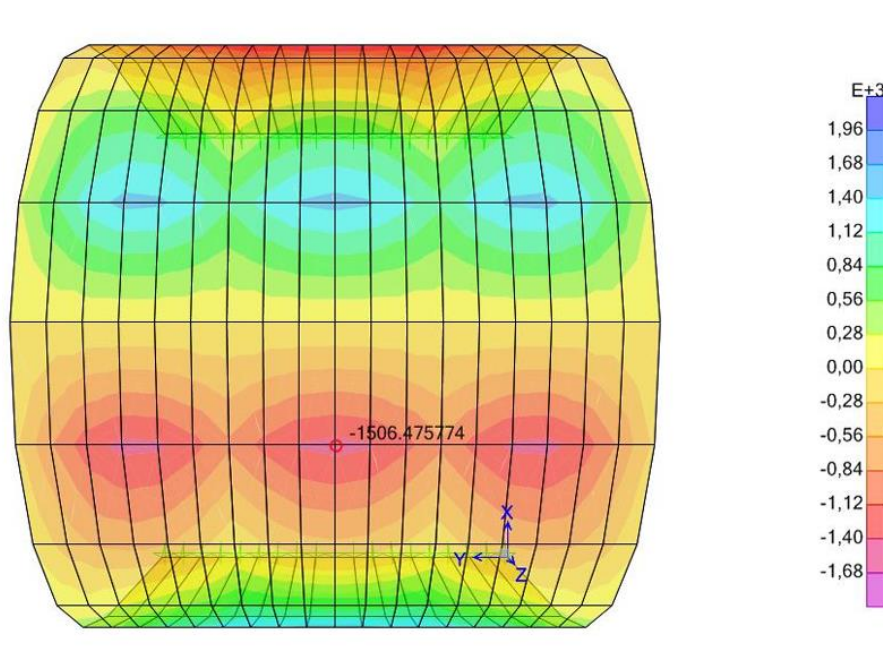


Figura 3.35. Momento combinación 2 en dirección longitudinal del muro, vista planta superior, en $[kg \cdot cm/cm]$. Ref: Olivares F. (2016).

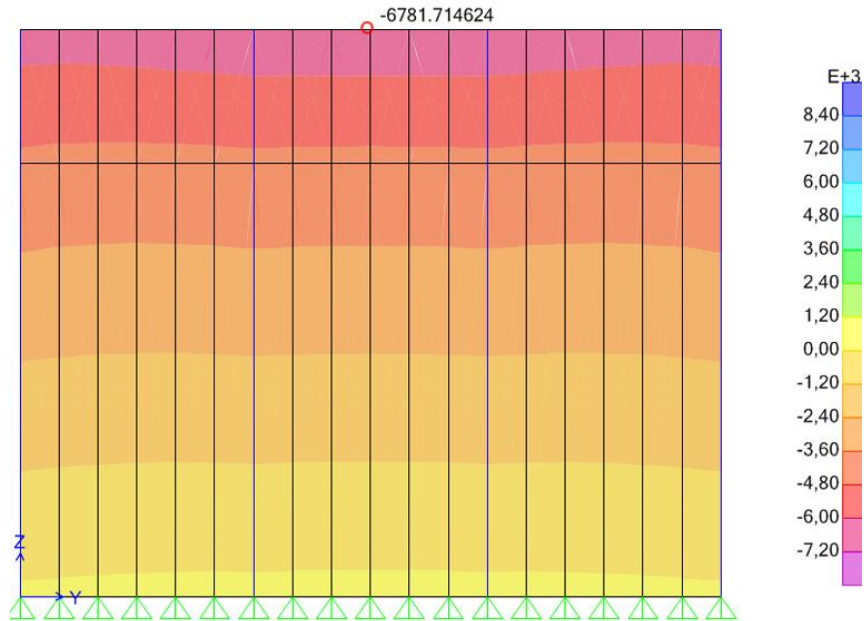


Figura 3.36. Momento combinación 2 en dirección transversal del muro, vista lateral, en $[kg \cdot cm/cm]$. Ref: Olivares F. (2016).

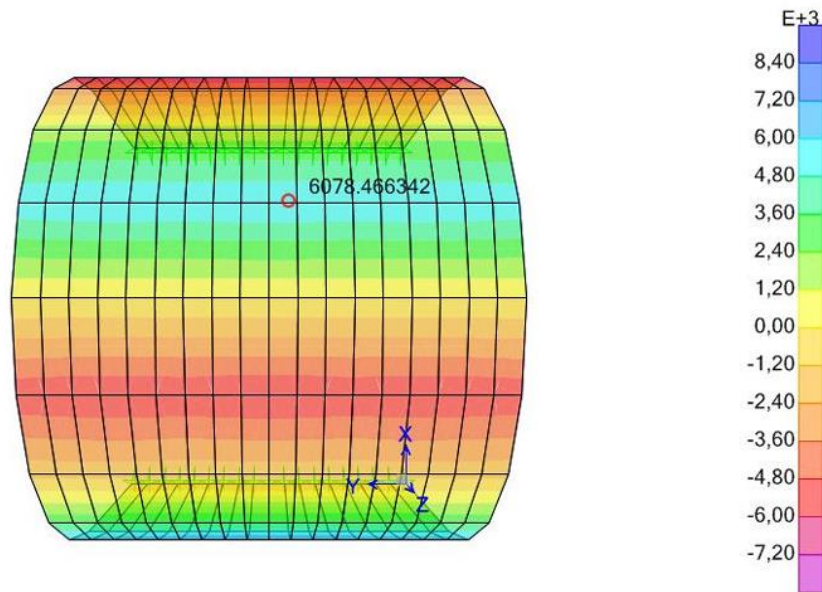


Figura 3.37. Momento combinación 2 en dirección transversal del muro, vista planta superior, en $[kg \cdot cm/cm]$. Ref: Olivares F. (2016).

Los momentos últimos obtenidos fueron:

$M_{u1} = 1,5 [T \cdot m]$ en dirección longitudinal del muro.

$M_{u2} = 6,8 [T \cdot m]$ en dirección transversal del muro.

El diseño a flexión del muro entre marcos propuesto por Olivares F. (2016) determina una armadura de $\emptyset 16@20$ con un $A_s = 12,1[cm^2]$, sin especificar la dirección estructural considerada, se asumirá que corresponde a la dirección transversal, dado que esta presenta mayor momento flector. La sollicitación en la dirección longitudinal es significativamente menor, por lo que suele ser cubierta mediante una malla de refuerzo secundario o por el mismo refuerzo principal.

El diseño se verifica según el ACI-318-19 (American Concrete Institute. (2019)). En la Tabla 3.3. se presentan las dimensiones y especificaciones de los materiales.

Tabla 3.3. Dimensiones y especificaciones de los materiales. Elaboración propia.

f'_c	250	[kg/cm ²]
ε_{cu}	0,003	
f_y	4200	[kg/cm ²]
E_s	2,1E+06	[kg/cm ²]
ε_y	0,002	
b	100	[cm]
h	30	[cm]
d	25	[cm]
d_c	5	[cm]
M_{u1}	1,5	[T]
M_{u2}	6,8	[T]

Cuantía mínima exigida por normativa para muros: 1,8% del área bruta por cara, para control de fisuración.

$$A_{s,min,muro} = 0,0018 \cdot b \cdot h = 5,4 [cm^2/m]$$

Cuantía mínima por flexión para refuerzo longitudinal y transversal:

$$A_{s,min} = 0,8 \frac{\sqrt{f'_c}}{f_y} b_w d \geq \frac{14}{f_y} b_w d = 8,33 [cm^2/m]$$

Refuerzo mínimo para dirección longitudinal y transversal:

Tabla 3.4. Refuerzo mínimo para dirección longitudinal y transversal. Elaboración propia.

N	6	Número de barras por metro
d	16	diámetro [mm]
$A's$	12,06	Área de refuerzo [cm ²]

Refuerzo longitudinal y transversal en ambas caras:

Tabla 3.5. Refuerzo longitudinal y transversal en ambas caras. Elaboración propia.

N	6	Número de barras por metro
d	16	diámetro [mm]
$A's$	12,06	Área de refuerzo [cm ²]

Se verifica la sección doblemente armada con refuerzo $\emptyset 16@20$, lo que satisface la cuantía requerida y un momento resistente de $\emptyset \cdot M_n = 10,84 [T \cdot m]$ considerando un factor de reducción $\emptyset = 0,9$. Este valor satisface las condiciones $\emptyset \cdot M_n > M_{u1}$ y $\emptyset \cdot M_n > M_{u2}$, por lo que el refuerzo propuesto es acorde a la solicitud, cumple el diseño.

En cuanto a la resistencia al corte, Olivares F. (2016) indica un valor de $V_u = 8,4 [T]$, sin especificar el tipo de corte considerado. Para efectos de verificación, se consideró que dicho corte corresponde al perpendicular al plano, dado que la presión de roca actúa lateralmente sobre el muro.

El corte se compara con el aporte de resistencia del hormigón. Con un $\lambda = 1, f_c = 250 [kgf/cm^2]$, $b = 100 [cm]$, $d = 25 [cm]$ y $\emptyset_c = 0,75$.

$$V_c = (0,53 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c}) \cdot b \cdot d = 20.950 [kgf] = 20,9 [T]$$

Se verifica que basta con la resistencia que aporta el hormigón.

$$V_u < \emptyset_c \cdot V_c$$

En concordancia con lo planteado por Olivares F. (2016) en su memoria de cálculo, donde se indica que la resistencia proporcionada por el hormigón es suficiente, se verificó, conforme a los criterios y fórmulas para muros estructurales establecidos en la normativa ACI 318-19 (American Concrete Institute, 2019), los cuales, en este caso, consideran el comportamiento plano similar al de una losa con cargas perpendiculares predominantes, que el diseño cumple con los requisitos establecidos. Se recalca que el diseño considera una fracción limitada de las solicitudes existentes.

El autor propone la incorporación de estribos; sin embargo, en muros con las dimensiones analizadas, dicha solución no resulta viable.

3.3.2.2 Comportamiento real en terreno

El comportamiento real en terreno de los muros de fortificación utilizados en los puntos de extracción se basa en que estos elementos son construidos con un carácter de estructura de sacrificio. Su función principal es absorber las deformaciones generadas en el marco más próximo a la zona de extracción, producto de la caída de material, con el objetivo de evitar que dichas solicitudes afecten al siguiente marco en la secuencia constructiva. Este tipo de muro no es diseñado en la realidad para aportar resistencia estructural al marco al que está asociado.

Las solicitudes reales más determinantes en este tipo de estructuras (muro y marco) corresponden a los efectos abrasivos y cargas de impacto generadas por el paso del mineral, las

cargas sísmicas por estallidos de roca, las solicitaciones dinámicas de explosivos por aplicación de reducciones secundarias y las cargas de impacto de los equipos LHD cuando colisionan algún elemento. La Figura 3.38. adjunta muestra casos típicos de daños en puntos de extracción por condiciones operacionales.



Figura 3.38. Daños por reducción secundaria y evento sísmico. Ref: Muñoz R. (2024).

A partir de los resultados obtenidos, se constató que el diseño simplificado cumple con los requisitos estructurales bajo solicitaciones menores, tales como peso propio y sobrecargas de uso, sin embargo, no considera adecuadamente las solicitaciones más determinantes ni responde de forma coherente con la finalidad real de la estructura.

Por lo tanto, se prevé que, de mantenerse este diseño sin contemplar la totalidad de solicitaciones reales características de un entorno minero subterráneo (descritas en el Capítulo 2) la estructura podría fallar, colapsar o no alcanzar la vida útil esperada.

3.3.2.3 Mejoras y medidas de mitigación

Las mejoras y medidas de mitigación propuestas son claras y precisas. La estructura debe ser diseñada conforme a la finalidad real que se le asigna; en este caso, como una estructura de sacrificio, compuesta por módulos prefabricados y un sistema de reposición debidamente estudiado, que cumpla su función principal: detener la deformación del primer marco cercano a la zona de extracción, evitando así que esta afecte a los siguientes marcos. El diseño debe considerar las solicitaciones reales a las que la estructura está expuesta. (Clasificación propuesta: Estructural – Diseño Funcional y Operacional).

3.4 Carpetas de rodado

3.4.1 Supuestos actuales de diseño

El diseño actual de las carpetas de rodado en División El Teniente considera como principal variable los esfuerzos de tracción y compresión que se generan en el hormigón producto de las cargas de tránsito de los equipos pesados, principalmente camiones de alto tonelaje en el nivel de acarreo y equipos LHD en el nivel de producción. La metodología más utilizada para la estimación de estos esfuerzos corresponde al modelamiento numérico de elementos finitos o a través de modelos elásticos como la teoría de Westergaard (ver Figura 3.39. adjunta).

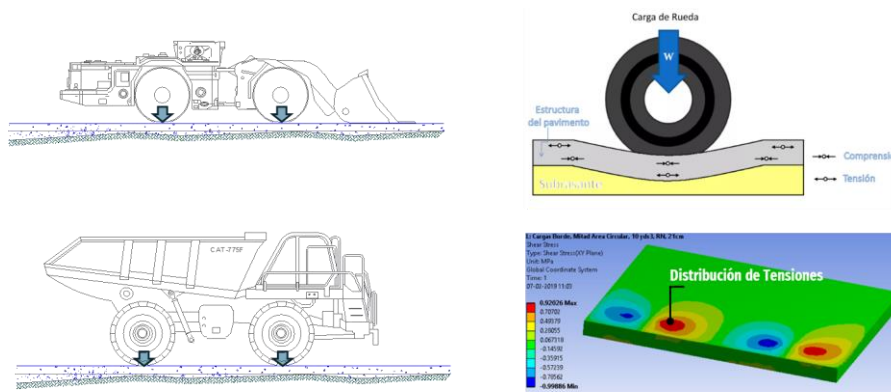


Figura 3.39. Representación modelo elástico basado en la teoría de Westergaard. Ref: Muñoz R. (2024).

3.4.2 Comportamiento real en terreno

La metodología de diseño se centra exclusivamente en las solicitaciones estructurales directas por tránsito y no consideran otras condiciones operacionales y ambientales que afectan significativamente el comportamiento y durabilidad de las carpetas en terreno. Entre estas se encuentran la presencia y escurrimiento de aguas sulfatadas, esfuerzos inducidos por la deformación de las galerías, desgaste por tránsito de los equipos, desgaste por el arrastre del balde del equipo LHD durante la actividad de carguío en el punto de extracción. Incluso labores cotidianas como la limpieza de las calles en el nivel de producción generan abrasión de las carpetas debido que esta labor también se realiza arrastrando el balde del equipo LHD, condición que acelera el deterioro de estos sistemas de rodado (ver Figura 3.40.). Dado lo anterior, en la práctica, las condiciones de operación presentan desafíos mayores a los considerados en los diseños teóricos.

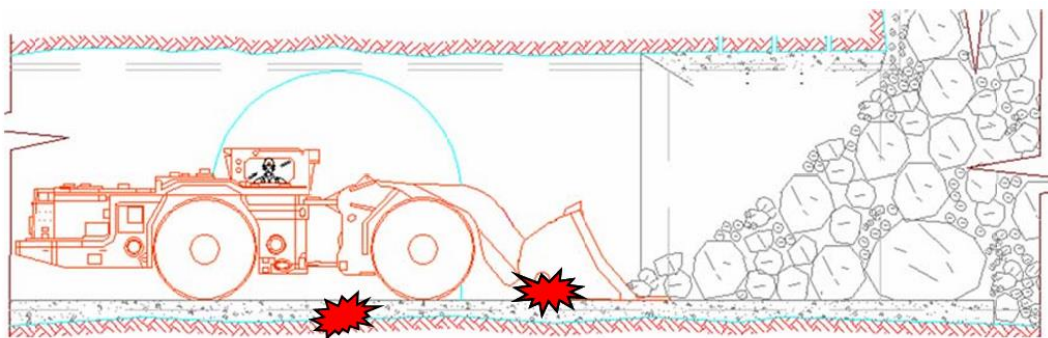


Figura 3.40. Zonas afectadas de la carpeta de rodado por acción del equipo. Ref: Escudero M. (2013).

Dentro de estas condiciones, la de mayor frecuencia son las siguientes:

- **Daño por ausencia de Juntas de Dilatación en Nivel de Producción:** La ausencia de juntas de dilatación entre las carpetas de rodado y los muros de refuerzo continuo verticales en los niveles de producción tiene como consecuencia que, en el caso de deformación de las galerías,

se genere una presión entre los muros y las carpetas favoreciendo el agrietamiento de estas últimas (por su falta de armaduras), incluso con evidencia de desintegración y formación de bloques de concreto como se ve representado en la Figura 3.41.



Figura 3.41. Daño por ausencia de juntas de dilatación en Nivel de producción. Ref: Muñoz R. (2024).

- **Daño por condiciones operacionales Nivel de Producción:** En los niveles de producción la presencia habitual de humedad y agua sulfatada/ácida, sumado al constante tránsito de los equipos LHD en las labores de extracción y carguío del mineral, genera daños de agrietamiento tipo “piel de cocodrilo” y desgaste en las carpetas de rodado (ver Figura 3.42). La vida útil de estas obras civiles es variable dependiendo de la frecuencia con que estos factores operacionales y ambientales intervienen en un determinado sector.



Figura 3.42. Agrietamiento tipo “Piel de cocodrilo”. Ref: Muñoz R. (2010).

- **Daño por condiciones operacionales Nivel de Acarreo:** Para el caso del Nivel de Acarreo, las problemáticas y daños observados en las carpetas de rodado por condiciones ambientales y operacionales son muy similares a las evidenciadas en el Nivel de Producción. Dada la menor cantidad de galerías en este nivel (comparado con las calles del Nivel de Producción), la extensión del daño en términos de área es menor, sin embargo, el nivel y agresividad del deterioro es mayor dado el nivel de carga al que están sometidos estos sistemas de rodado

(camiones cargados con un peso total del orden de 100 a 110 ton), lo que se muestra en la Figura 3.43.



Figura 3.43. Daños por condiciones operacionales en el Nivel de acarreo. Ref: Muñoz R. (2010).

- **Baches por deficiente calidad de la Sub-Base:** Otro daño típico evidenciado en las carpetas de rodado, independiente del nivel que se trate, corresponde a la presencia de baches producto de una mala calidad de la sub-base de soporte, condición que propicia la acumulación de agua con su consecuente aceleración de daño en el hormigón (ver Figura 3.44.).



Figura 3.44. Daños por deficiente calidad de la sub-base. Ref: Muñoz R. (2010).

3.4.3 Mejoras y medidas de mitigación

Considerando las condiciones adversas que afectan a las carpetas de rodado y que generan su deterioro prematuro, en DET se han implementado distintas medidas de mitigación, algunas de las cuales han implicado ajustes en los criterios de diseño y selección de materiales.

- **Restitución de Carpetas:** Actualmente, la estrategia principal consiste en restituir la carpeta con un diseño basado en hormigón en masa de alta resistencia, de calidad G65 (H70) o superior. Esta intervención se realiza mediante el picado del paño deteriorado, la remoción del material

suelto hasta alcanzar roca sana, y la posterior aplicación del hormigón de diseño (ver Figura 3.45). (Clasificación propuesta: Constructiva – Reparación estructural por restitución)



Figura 3.45. Restitución de carpetas. Ref: Muñoz R. (2010).

Esta estrategia ha demostrado ser estructuralmente eficaz; sin embargo, su implementación presenta limitaciones operacionales, ya que requiere demoler completamente paños de 3,0 m, aun cuando el daño sea puntual, y además involucra tiempos de espera asociados al fraguado del hormigón.

Para enfrentar esta problemática, una mejora reciente en el diseño ha sido la incorporación de aditivos especiales en la mezcla de hormigón, los cuales permiten alcanzar una resistencia adecuada en un plazo de 3 días, lo que habilita el tránsito de equipos en menor tiempo, en comparación con los 28 días requeridos por mezclas convencionales. (Clasificación propuesta: Estructural – Optimización del diseño de mezcla para resistencia temprana).

- **Pruebas con Materiales Alternativos:** El deterioro temprano de las carpetas de rodado ha sido una condición evidenciada desde los inicios de su utilización como infraestructura subterránea, es por esta razón que desde hace varios años se han desarrollado pruebas y estudios enfocadas principalmente en la utilización de materiales alternativos para la reparación y refuerzo de estos sistemas de rodado, separándolas en dos grupos.
- Mejoras en el diseño de las carpetas de rodado:
 - Hormigón fragüe rápido cuya prueba fue exitosa y actualmente es la partida más solicitada por las áreas operativas.
 - Asfalto especial de alto módulo reforzado con geogrilla, caracterizado por una puesta en operación rápida y buenos resultados operacionales, aunque costoso y limitado en su aplicación.

- Aplicación de morteros pre-dosificados, actualmente en evaluación tras su prueba en el nivel de acarreo de Teniente 7.
(Clasificación propuesta: Estructural – Diseño de materiales para carpetas de rodado)
- Soluciones de mantención o reparación puntual:
 - Parches con mortero de fragüe rápido, que se dañaron al segundo día de instalados.
 - Bacheado con asfalto frío, que se deterioró en menos de 48 horas por efecto del agua y baja adherencia.
 - Emulsión asfáltica, que sufrió erosión pocos días después de su instalación.
 (Clasificación propuesta: Operacional – Mantención reactiva puntual de carpetas de rodado)

En la figura adjunta (Figura 3.46.) se muestra un registro de las pruebas realizadas en las carpetas de rodado.



Figura 3.46. Registro de las pruebas realizadas en las carpetas de rodado. Ref: Muñoz R. (2010).

3.5 Puntos de vaciado; brocales, parrillas y muro tope

3.5.1 Supuestos actuales de diseño

Para el caso de los puntos de vaciado, los diseños teóricos se enfocan principalmente en verificar la resistencia mecánica de la parrilla clasificadora, brocal de hormigón armado y el muro tope. Para el caso particular de las parrillas y brocales, se considera como carga solicitante la fuerza de impacto central generada por la caída libre de una masa que desciende desde una determinada altura, condición que simula la descarga de un bloque de roca desde el balde del equipo LHD (ver Figura 3.47.). Por otra parte, para el diseño del muro tope, se considera una carga de impacto generada por las ruedas delanteras del equipo LHD que golpean esta obra civil durante las labores de vaciado en el punto de vaciado (ver Figura 3.48.)

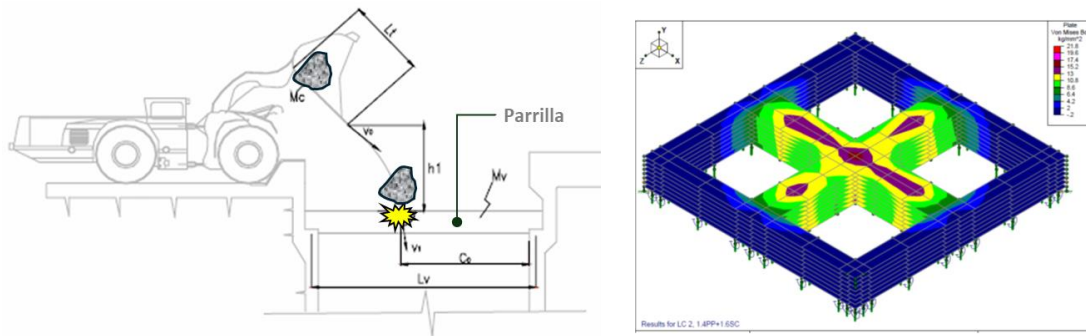


Figura 3.47. Ilustración de simulación de una descarga de bloque desde el balde del equipo LHD. Ref: Muñoz R. (2010).

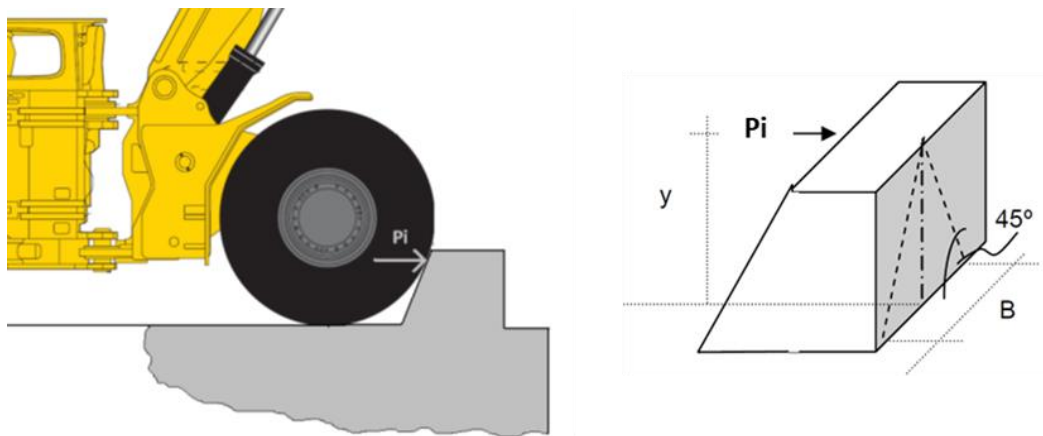


Figura 3.48. Diseño de muro tope considerando una carga de impacto. Ref: Muñoz R. (2010).

3.5.2 Comportamiento real en terreno

Las cargas de impacto estimadas teóricamente se acercan a las condiciones de terreno, exceptuando la diferencia que se presenta en la parrilla clasificadora donde el material descargado no se distribuye de manera uniforme provocando cargas excéntricas no contempladas en el diseño.

En conjunto a las cargas de impacto hay una serie de otros factores operacionales que inciden en el comportamiento estructural de los puntos de vaciado y sus componentes. Dentro de los más recurrentes, destacan los siguientes.

- **Pérdida de blindaje y posterior daño en hormigón de muro tope:** Existen casos en que el balde del equipo LHD impacta el muro tope y si el revestimiento de acero no está debidamente empotrado al piso, este se desprende y comienza a deformarse y soltarse completamente. La pérdida de esta protección propicia un daño acelerado del hormigón del muro tope hasta generar la exposición y deformación de la armadura de refuerzo (ver figura 3.49. adjunta).



Figura 3.49. Pérdida de blindaje y posterior daño en hormigón de muro tope. Ref: Muñoz R. (2024).

- **Cargas en parrilla por labores de picado:** Cuando se genera “emparrillamiento” en los puntos de vaciado por presencia de colpas de sobre tamaño, el martillo pica roca inicia su función de picado, generando una carga de impacto repetitiva aplicada a la roca que también se transmite a la parrilla, condición que acelera el deterioro y deformaciones de esta estructura de acero y que no es considerada en los diseños teóricos, esto se ve representado en la Figura 3.50.

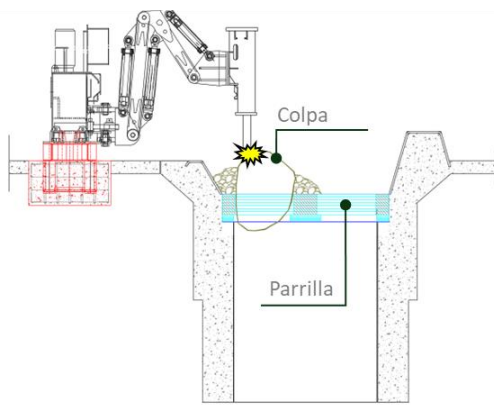


Figura 3.50. Emparrillamiento en puntos de vaciado. Ref: Muñoz R. (2024).

- **Pérdida de soporte parrillas:** La carga de impacto repetitiva de picado aplicada en los puntos de vaciado también se traduce en solicitaciones de impacto a los apoyos de la parrilla clasificadora y que posteriormente genera la pérdida de los revestimientos de acero en el interior del brocal con el consecuente daño del hormigón expuesto a los golpes y abrasión del material.

3.5.3 Mejoras y medida de mitigación

Para el caso de los puntos de vaciado, el enfoque es principalmente de mitigación basado en la reparación de los elementos dañados mediante prácticas de terreno que resulten rápidas de implementar. Dentro de estas medidas, destacan las siguientes.

-Rediseño e implementación de nuevos apoyos estructurales para parrilla clasificadora:

A partir del deterioro observado en la estructura interna del brocal, se desarrolló una intervención que no solo considera la reparación del hormigón y planchas de revestimiento dañadas, sino que también incorpora un rediseño del sistema de apoyos de la parrilla. Este nuevo diseño busca mejorar la estabilidad y eficiencia del montaje de la parrilla clasificadora, asegurando una mejor transmisión de cargas y facilitando su reemplazo en futuras operaciones de mantenimiento. Esta acción se representa en la Figura 3.51. (Clasificación propuesta: Estructural – Diseño y detallamiento de sistema de apoyo estructural)



Figura 3.51. Rediseño interno e implementación de apoyos para parrillas. Ref: Gómez J. (2024).

- **Reparación muro tope:** Para el caso de muros tope dañados la medida corresponde principalmente a la restitución integral de esta obra civil con su armadura de refuerzo, hormigón y plancha de revestimiento. En el caso particular de la plancha de revestimiento, se ha definido una mejora del diseño que asegura el empotramiento de este elemento bajo el piso para evitar que sea levantada por el balde del equipo LHD. Esta mejora se puede visualizar en la Figura 3.52. Adicionalmente, las mejoras propuestas para el muro tope se alinean con el concepto de estructura de sacrificio, proponiendo el uso de bloques prefabricados que permitan una rápida reposición en terreno, facilitando el recambio ante daño estructural sin comprometer la continuidad operativa. (Clasificación propuesta: Constructiva – Obras civiles de contención con mejora de diseño local / Estructural)

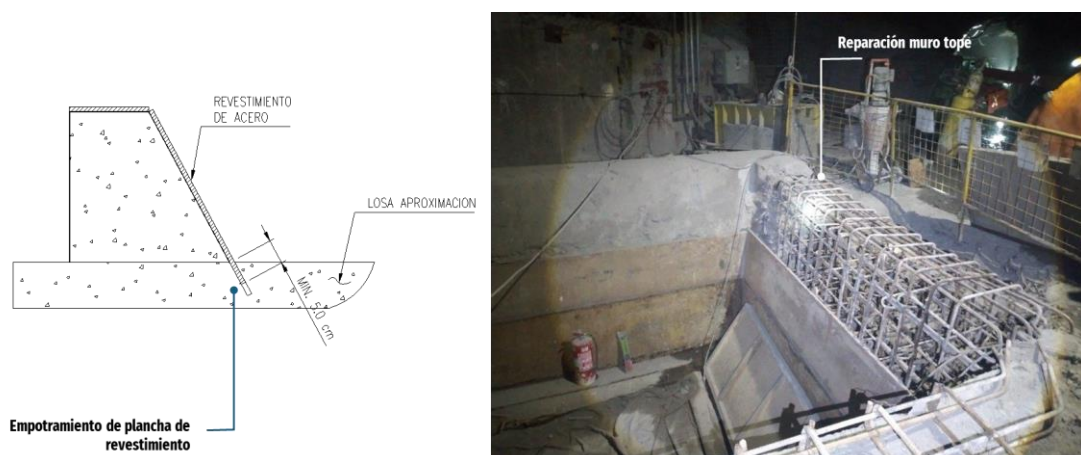


Figura 3.52. Reparación muro tope Brocales. Fuente: Muñoz R. (2020).

- **Reemplazo de parrillas por viga clasificadoras:** En el caso de sectores donde ya se ha generado una explotación considerable de los puntos de extracción y los puntos de vaciado están sometidos a una menor demanda operacional, se ha implementado el reemplazo de las parrillas clasificadoras por vigas de acero compuestas debidamente evaluadas (ver Figura

3.53.). (Clasificación propuesta: Estructural – Diseño funcional adaptado a condiciones operativas)

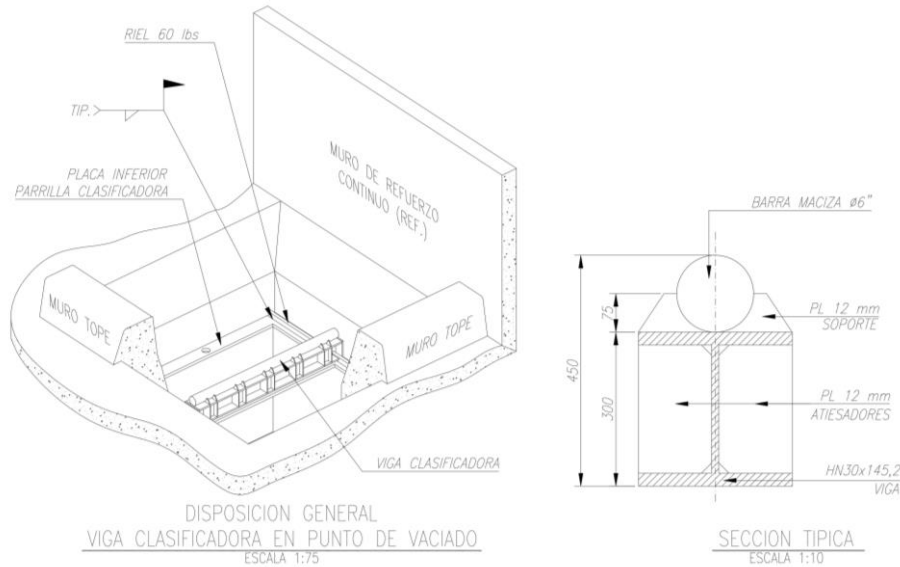


Figura 3.53. Reemplazo de parrillas por viga clasificadoras. Ref: Martínez A. & Muñoz R. (2024).

3.6 Fundación y sub base martillo pica roca

3.6.1 Supuestos actuales de diseño

En la actividad de vaciado de mineral, el martillo pica rocas desempeñan un rol fundamental en el proceso de reducción de las colpas de sobre tamaño que se traban en la parrilla clasificadora. Para asegurar la estabilidad de este equipo durante su funcionamiento, se realiza el diseño de su fundación y sub-base considerando las cargas estáticas y dinámicas operacionales indicadas por el fabricante (ver Figura 3.54.). Mediante estas cargas se verifica la resistencia de la fundación y sub-base, además de los pernos de anclaje necesarios para evitar el volcamiento del martillo (ver Figura 3.55).

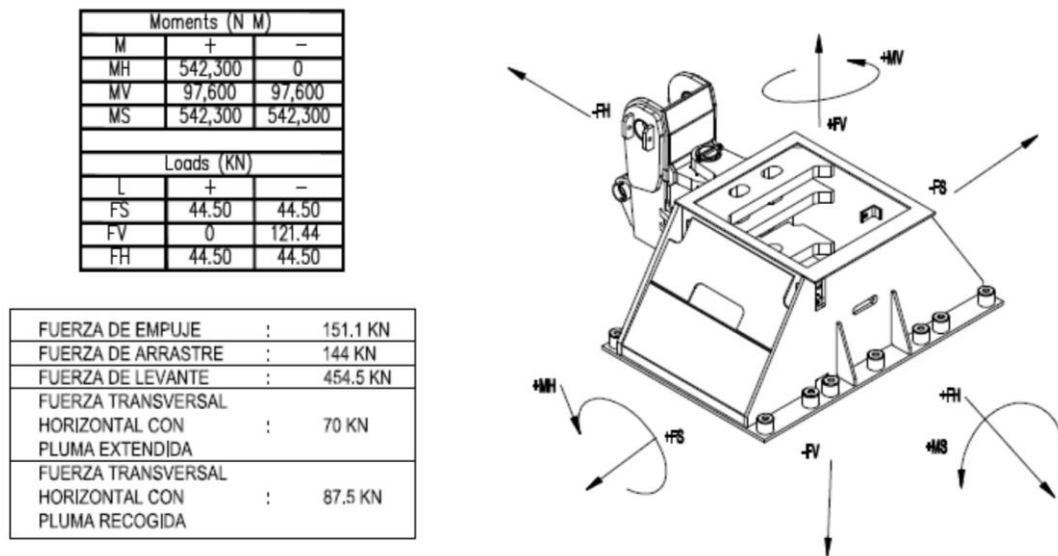


Figura 3.54. Diseño de fundación y sub-base de martillo pica roca. Ref: Muñoz R.(2020).

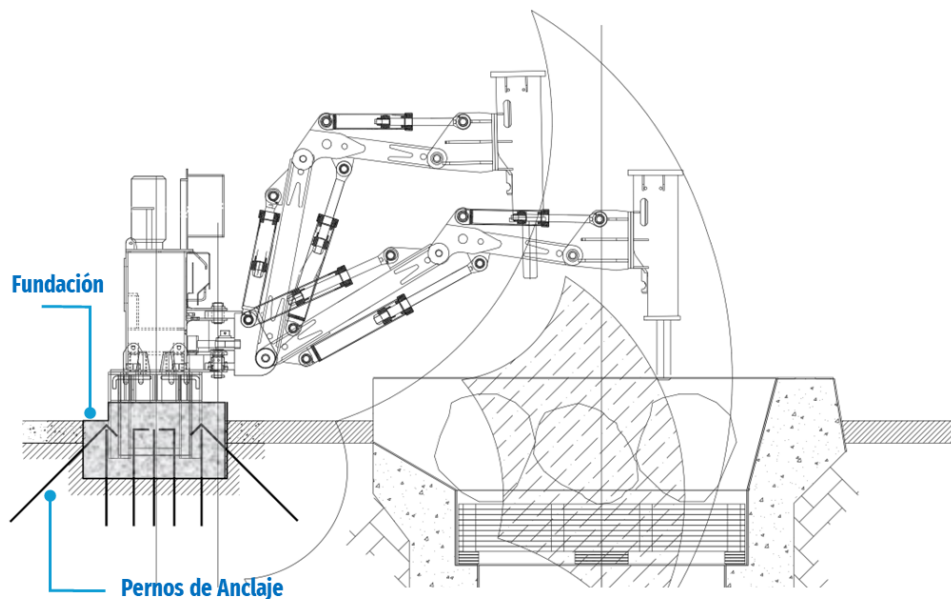


Figura 3.55. Representación de pernos en fundación y sub-base de martillo pica roca. Ref: Martínez A. & Muñoz R. (2024).

3.6.2 Comportamiento real en terreno

Para el caso de la fundación y sub-base de los martillos semi-estacionarios estudiados en este trabajo, el comportamiento estructural ha sido en general satisfactorio. No obstante, se han evidenciado fallas recurrentes en el funcionamiento del martillo pica roca asociadas a problemas de diseño geométrico de la fundación. En particular, la configuración actual presenta

espacios o desniveles que permiten la acumulación de mineral en el entorno inmediato de la base, producto de las propias labores de reducción secundaria. Esta acumulación interfiere con el desplazamiento o posicionamiento del equipo, afectando directamente su operatividad y mantención. La Figura 3.56 ilustra dos casos en que se observa esta condición.



Figura 3.56. Acumulación de mineral entorno a la fundación del martillo. Ref: Muñoz R. (2020).

Otro factor relevante para considerar en el diseño de la fundación de un martillo pica rocas, corresponde a su punto de ubicación tanto en planta como en cota, dado que el sitio donde se posicione esta obra civil debe asegurar la cobertura óptima de picado del martillo en el punto de vaciado y a la vez generar los espacios necesarios para las labores de mantenimiento in situ del martillo, así como el montaje y desmontaje de este mismo en caso de ser necesario su traslado a los talleres interior mina. Además, la ubicación del martillo debe evitar la interferencia con el tránsito de equipos, con especial foco en la interacción que se genera cuando el equipo LHD ingresa al punto de extracción, con el riesgo de impactar la fundación en caso de estar cerca de su trayectoria (ver Figura 3.57.).

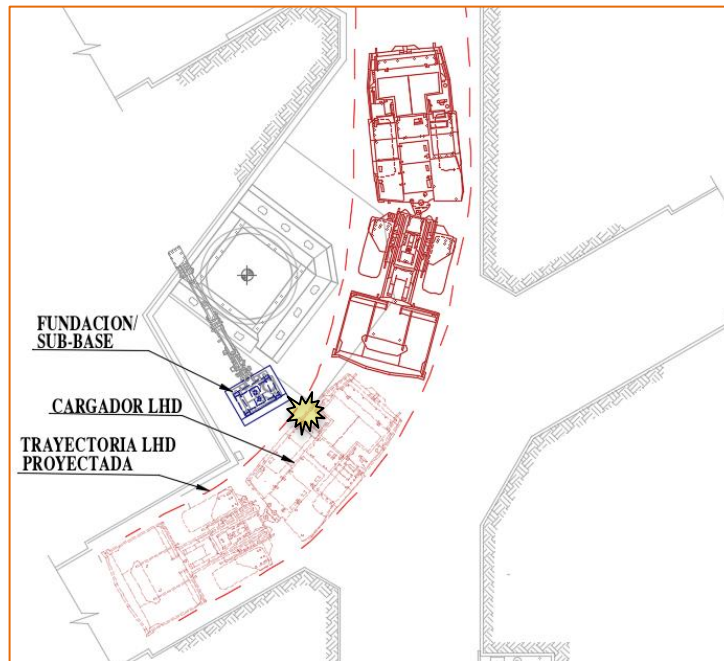


Figura 3.57. Ilustración de posible choque de martillo con la trayectoria proyectada del equipo LHD. Ref: Martínez A. & Muñoz R. (2024).

3.6.3 Mejoras y medida de mitigación

Dado que el comportamiento desde el punto de vista civil-estructural de la sub-base y fundación de martillos pica roca semi-estacionarios ha sido favorable, las medidas implementadas para este caso se enfocan en definir una ubicación del martillo pica que permita mejorar sus condiciones operacionales y de mantenimiento. Bajo este contexto, las principales mejoras implementadas son las siguientes:

- Ubicación en planta del martillo pica rocas de manera tal que se maximice su cobertura de picado sobre los cuatro cuadrantes de la parrilla clasificadora con la cuña operando de manera vertical.
- El martillo picador debe ser posicionado de manera que su cuña pueda descansar fuera del brocal hacia la calle del Nivel de Producción para poder realizar mantenimientos oportunos y rápidos en la cuña.
- La altura de la fundación y sub-base deben permitir una adecuada cobertura vertical de del martillo, asegurando que el picado de equipo alcance la profundidad donde se encuentra la parrilla clasificadora.
- Altura suficiente de la fundación y sub-base (no muy baja) de manera de evitar que la acumulación de colpas por debajo de los cilindros del martillo genere daños en estos componentes mecánicos.
- Contar con una distancia suficiente entre el muro de confinamiento y el borde de la fundación para proporcionar el espacio adecuado para que el personal de mantenimiento pueda realizar tareas e inspecciones de manera eficiente y segura.



- f) Contar con una altura H desde la fundación hasta el muñón de la sub-base adecuada (no excesiva) a fin de garantizar un montaje y desmontaje seguro del martillo mediante equipo montacarga. Una altura excesiva genera inestabilidades en el equipo montacargas al momento de levantar el martillo.
- g) Disponer de una longitud libre en línea recta suficiente para permitir el montaje y desmontaje del martillo en la sub - base mediante equipo montacarga acondicionado para esta labor.
- h) Ubicación en planta de la fundación que no sobrepase la trayectoria proyectada del equipo LHD ingresando al punto de extracción con el fin evitar colisiones de este equipo con la fundación, sub-base y martillo pica rocas.

Cabe destacar que estos factores están interrelacionados entre sí y la modificación de cualquiera de ellos puede tener incidencia en la eficiencia o funcionamiento de otro, por lo tanto, al momento de definir la ubicación de la fundación con su sub-base, es necesario un análisis integral que considere todas estas variables y las adicionales que pudieran surgir de las condiciones particulares del lugar. (Clasificación propuesta: Estructural – Diseño geométrico funcional de fundaciones y equipamiento)

En la Figura 3.58. se muestran imágenes esquemáticas de los factores anteriormente mencionados.

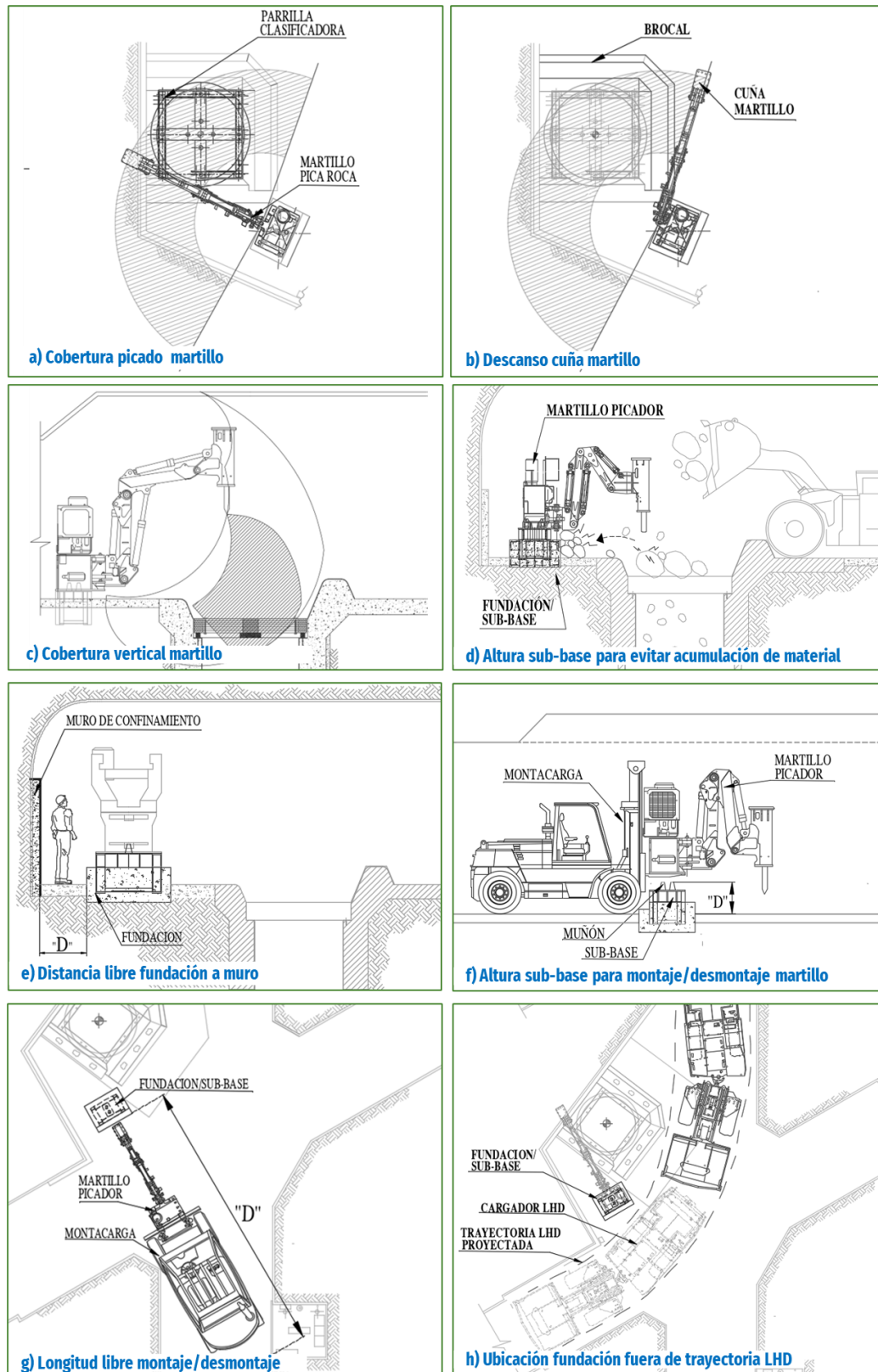


Figura 3.58. Ilustración de principales mejoras en la ubicación del martillo pica roca. Ref: Muñoz R. (2024).

3.7 Piques de traspaso intermedio

3.7.1 Supuestos actuales de diseño

Como ya se ha mencionado, los piques son una infraestructura relevante diseñada para comunicar distintos niveles y permitir el traspaso de mineral desde cotas superiores a inferiores en el caso de sistemas de traspaso intermedio, conectan el Nivel de Producción con los Niveles de Traspaso Intermedio (o niveles de acarreo). Dada la complejidad de las condiciones de uso y variables físicas, como las cargas de impacto y abrasión presentes durante la operación de un pique, no existe una metodología muy precisa para estimar los esfuerzos teóricos que se generan en el interior de estos sistemas traspaso y su diseño actual se basa más bien en consideraciones geomecánicas y mineras, donde se recomienda principalmente una inclinación de alta pendiente de los piques (de 60° a 90°) y protección de estos mediante anillos de acero anti abrasivos.

Desde el punto de vista teórico, uno de los antecedentes que sustenta los supuestos actuales de diseño en piques de traspaso es el modelo conceptual planteado por Constanzo H. & Rojas E. (2001), donde se describen las principales solicitaciones y mecanismos de daño esperables en esta infraestructura. Según su planteamiento, el deterioro comienza debido a las cargas de impacto generadas por el material pasante inicial, que progresivamente desgastan y dañan el blindaje. Una vez que se pierden los anillos de protección, el daño se propaga debido al aumento del flujo de mineral y a condiciones geotécnicas desfavorables (como la presencia de fallas o agua). En la Figura 3.59 se muestra en detalle el modelo conceptual desarrollado por los autores.

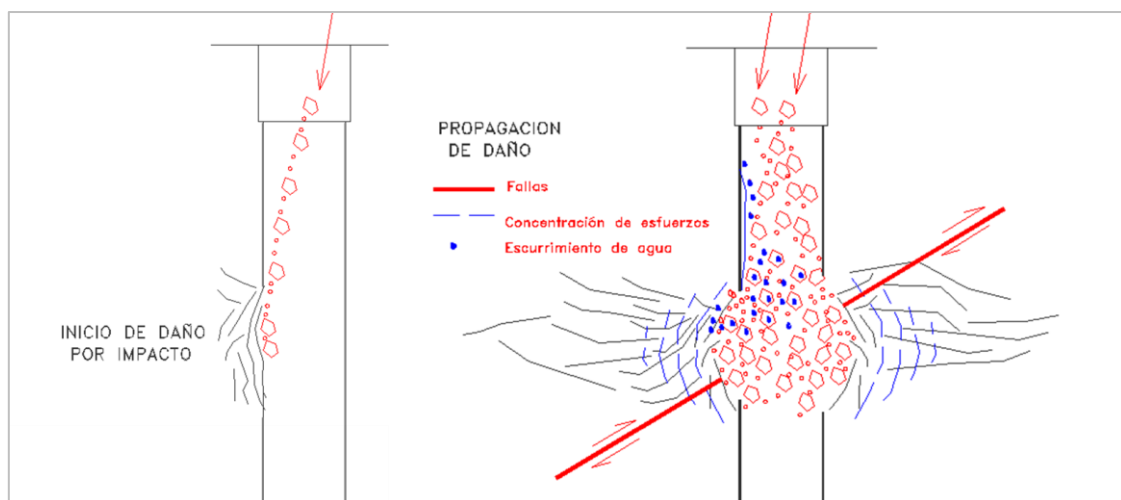


Figura 3.59. Cargas de impacto por el material pasante en el pique. Ref: Constanzo H. & Rojas E. (2001).

3.7.2 Comportamiento real en terreno

La condición de daños observada en terreno es congruente con el modelo conceptual planteado en el punto anterior. Esto se ha logrado constatar a través de inspecciones al interior de los piques mediante drones e instrumentos como el Optech o Calls, cuyos resultados muestran los daños incipientes de los blindajes al inicio de la vida útil de estos sistemas de traspaso y la posterior propagación del daño (ver Figura 3.60.) con resultados de sobre excavaciones relevantes producto de la pérdida de la protección con los anillos de blindaje.

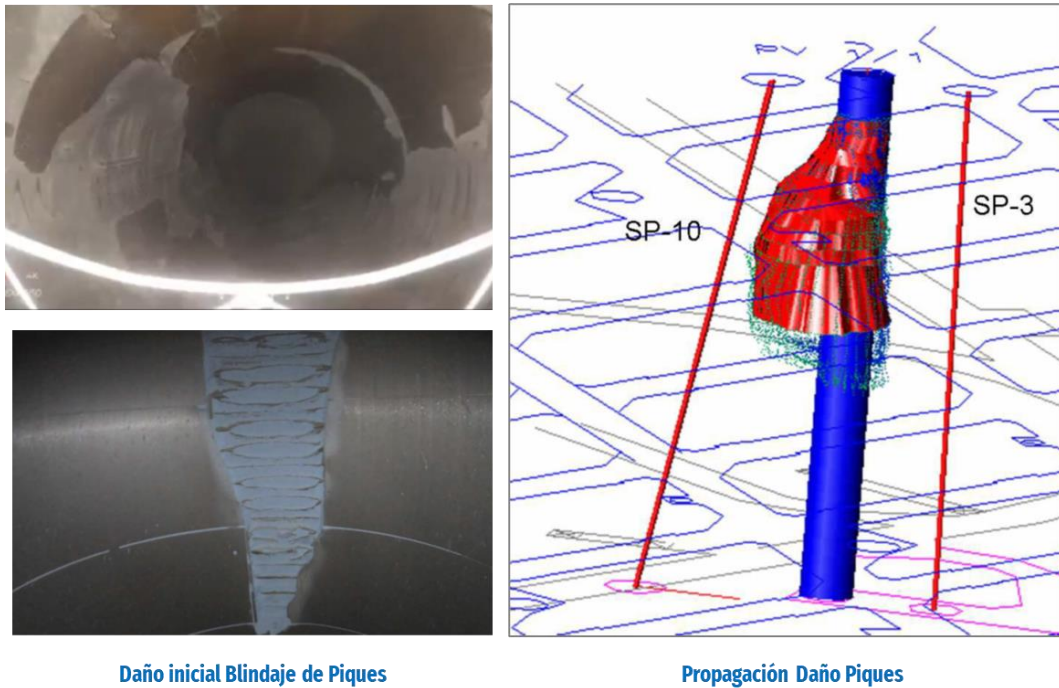


Figura 3.60. Daño a blindaje y pique por caída del material en pique. Ref: Muñoz R. (2020).

3.7.3 Mejoras y medidas de mitigación

- **Blindaje de Piques:** El blindaje de piques es una práctica generalizada actualmente. Sin embargo, el gran cambio realizado respecto a los diseños antiguos corresponde a la definición de blindar completamente estos sistemas de traspaso, condición que en los primeros diseños de la mina no se realizaba. En la Figura 3.61. adjunta se muestra una comparación entre el diseño de piques intermedios antiguos y los construidos en los sectores más nuevos. (Clasificación propuesta: Estructural – Detallamiento de elementos de protección de pique)

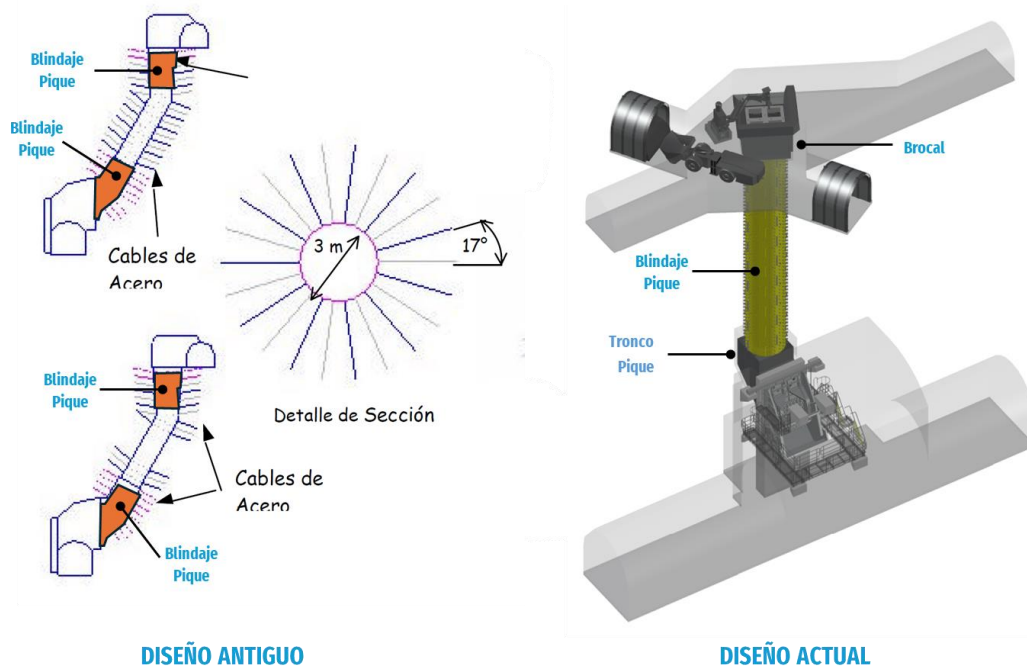


Figura 3.61. Comparación de blindaje antiguo y nuevo de piques. Ref: Muñoz R. (2024).

- **Inclinación:** Para asegurar el adecuado flujo del material dentro de los piques es necesario una adecuada inclinación. En la práctica, los piques intermedios en mina El Teniente se han diseñado con inclinaciones de 60 a 90°, sin embargo, la presencia de humedad y material fino en los sistemas de traspaso genera la formación de un material fangoso denominado Llampo que se adhiere a las paredes y se endurece disminuyendo la sección libre del pique y generando trancaduras (ilustrado en la Figura 3.62). Dado lo anterior, la tendencia actual en el diseño de piques de traspaso en mina El Teniente es dar preferencia a una orientación vertical en 90° para estos sistemas. (Clasificación propuesta: Constructiva - Diseño).

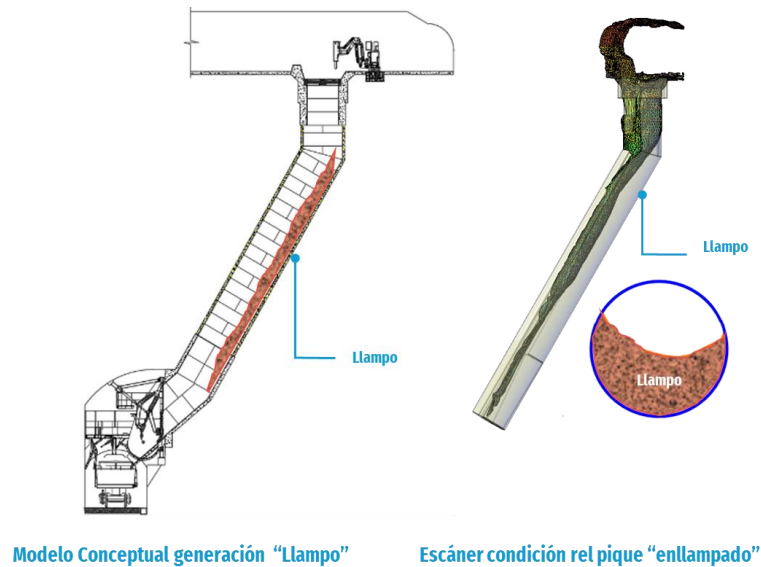


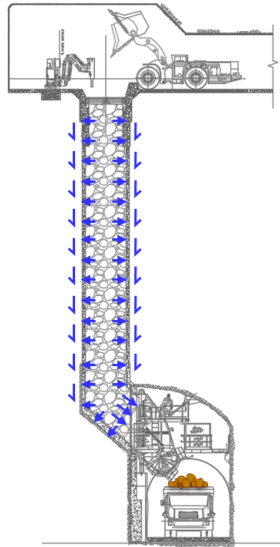
Figura 3.62. Ilustración de formación de Llampe. Ref: Martínez A. & Muñoz R. (2024).

3.8 Tronco pique y buzones laterales

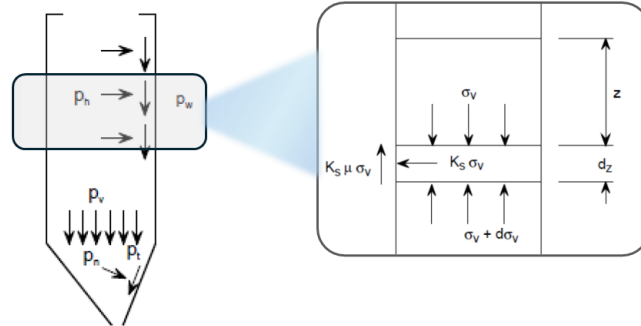
3.8.1 Supuestos actuales de diseño

El diseño tradicional de los buzones en la minería subterránea se basa en la premisa de que el pique conectado al buzón está completamente lleno de material. Este supuesto implica que las cargas generadas tienen una distribución progresiva y uniforme desde el nivel superior del material hasta el fondo del pique. Además, se asume que las presiones generadas por el material son casi constantes a lo largo del pique y en la puerta del buzón, simplificando así el análisis estructural y el cálculo de las cargas. Este enfoque, aunque eficiente en términos de modelación inicial, no considera variaciones significativas en el comportamiento dinámico del sistema durante su operación real. En la Figura 3.63. adjunta se muestra un esquema de los supuestos típicos utilizados para la estimación de cargas en buzones mediante la teoría de Silos y la teoría de Janssen para materiales granulares (Nedderman, 1992).

Cargas Estáticas Sistema de Traspaso



Presiones Teoría de Janssen



$$p_v = \frac{\gamma A}{U_\mu K_s} \left[1 - e^{\left(-Z K_s \frac{\mu U}{A} \right)} \right] \quad p_h = K_s p_v \quad p_w = \mu p_h$$

Figura 3.63. Representación de cargas y estimación de solicitaciones en Buzón ocupando la Teoría de Janssen. Ref: Muñoz R. (2024).

3.8.2 Comportamiento real en terreno

En la práctica, hay ocasiones en que el pique opera con bajos niveles de material. Esto genera cargas de impacto significativas en la zona de conexión entre el pique y el buzón, dado que los materiales caen libremente desde una mayor altura antes de impactar con la estructura. Este comportamiento, no contemplado en los diseños iniciales, provoca una serie de problemas estructurales, tales como:

- **Daños en las consolas:** Las cargas de empuje e impacto repetitivas a las que se encuentra sometida la estructura del buzón genera distintos tipos de solicitaciones en los elementos que lo componen. En este contexto, las cargas transmitidas a la viga visera han generado una serie de daños en las consolas de apoyo (ver Figura 3.64.). Por otro lado, las consolas pierden capacidad de apoyo sobre el macizo rocoso debido a la sobre excavación.

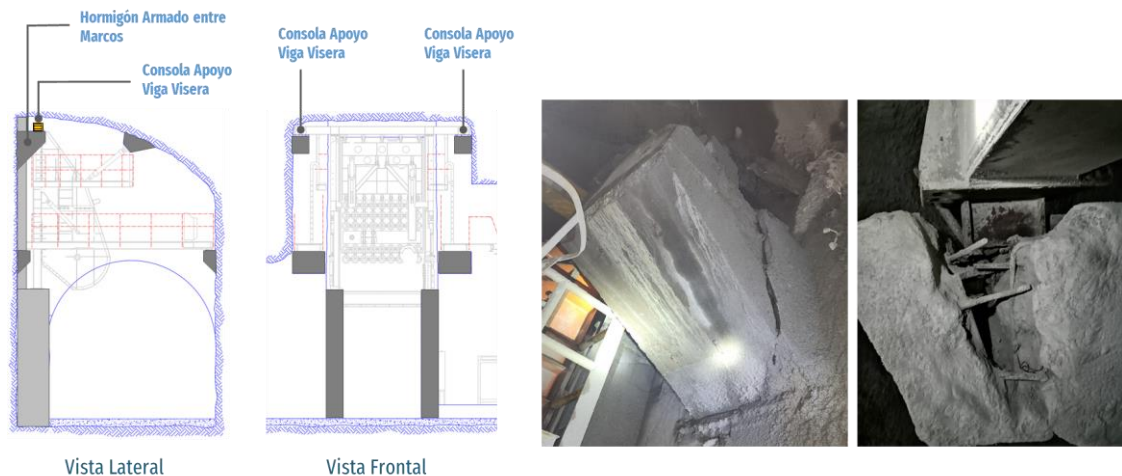


Figura 3.64. Representación daño en las consolas. Ref: Reyes J. & Muñoz R. (2024).

- **Deterioro de las viseras:** La visera de protección sufre daños debido a las cargas dinámicas y a la sobre excavación. Es común que los diseños teóricos no consideren la sobre excavación que se genera en el levante del buzón. Esta omisión genera que la visera se construya como un muro de hormigón armado tradicional, sin un diseño específico que atienda las solicitaciones del sistema de traspaso (ver Figura 3.65.)

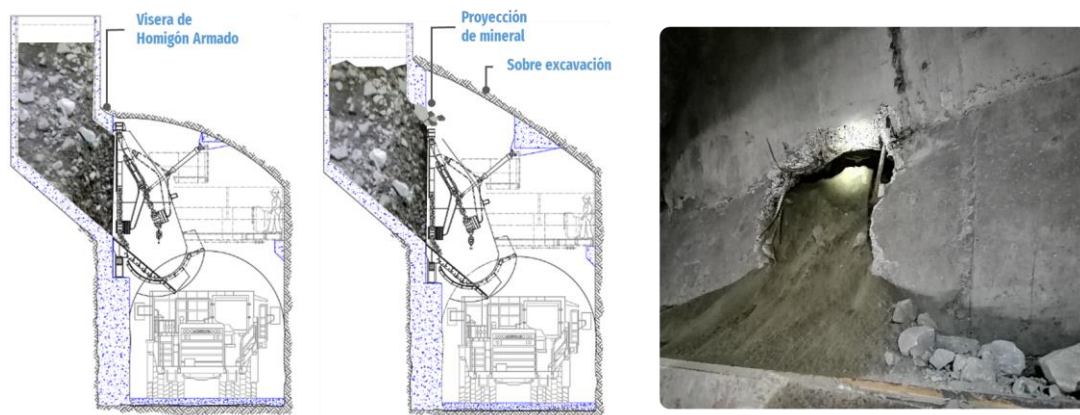


Figura 3.65. Representación daño en las viseras. Ref: Muñoz R. (2024).

Po otro lado durante el proceso de escurrimiento por gravedad del mineral a través de estos sistemas de traspaso es común la ocurrencia de colgaduras o la operación con los piques no necesariamente llenos, lo que se traduce en cargas dinámicas que solicitan la estructura soporte de los buzones por efecto de la descolgadura (natural o inducida) o por la caída libre del material desde altura, situación representada en la Figura 3.66.

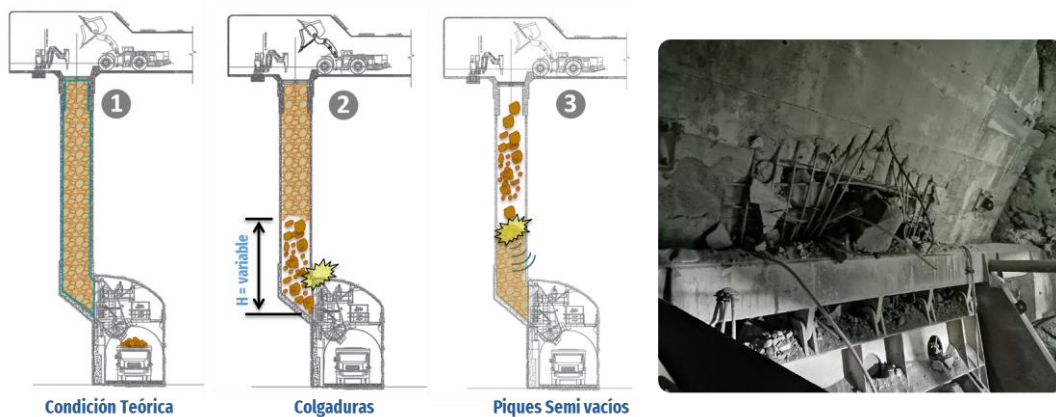


Figura 3.66. Representación de colgaduras en piques que afectan a Buzón. Ref: Martínez A. & Muñoz R. (2024).

- **Daños por Estallidos de roca (ER):** Los eventos sísmicos asociados a los estallidos de roca generan deformaciones importantes en las excavaciones y ocasionan proyecciones de roca. Estos fenómenos impactan negativamente en la fortificación y las infraestructuras, incluyendo los buzones tal cual se ve en la Figura 3.67.



Figura 3.67. Daños por estallido de roca en Buzones. Ref: Muñoz R. (2024).

3.8.3 Mejoras y medidas de mitigación

Las medidas de mitigación y mejoras más relevantes tienen como objetivo proteger las zonas con mayor frecuencia de daños en este tipo de buzones, por lo tanto, el foco de estas medidas corresponde a la zona de la visera, tal como se detalla en los siguientes párrafos.

- **Instalación de Puntales:** Como medida de refuerzo de la viga de la visera que soporta la compuerta, actualmente se han dispuesto de puntales mediante perfiles HN o IN que aportan rigidez sostenimiento frente a deformaciones laterales de este sector (ver Figura 3.68.). (Clasificación propuesta: Estructural - Detallamiento)

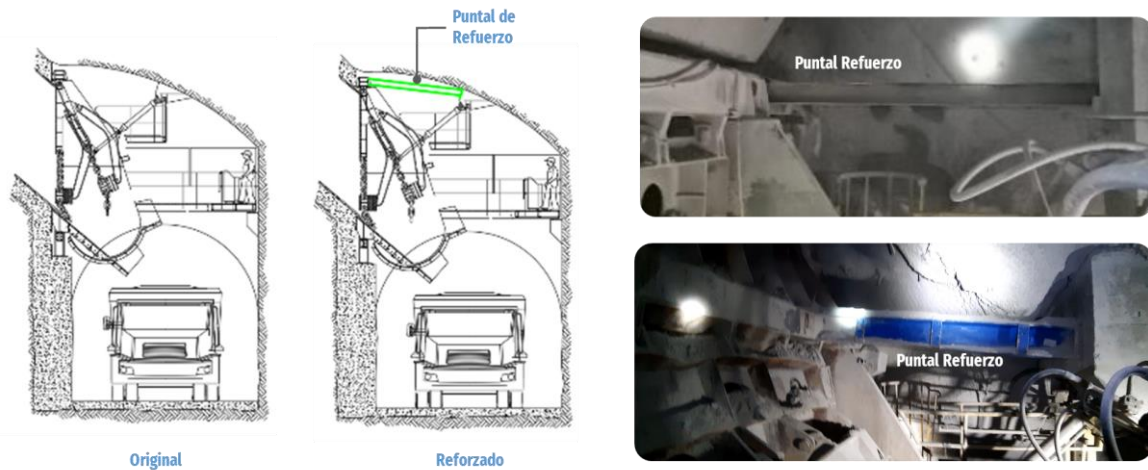


Figura 3.68. Representación de instalación de puntales. Ref: Martínez A. & Muñoz R. (2024).

- **Diseño de Reparación de Viseras:** Una mejora implementada ante el daño recurrente en viseras ha sido el diseño de soluciones reforzadas mediante obras civiles de hormigón armado o estructuras de acero atiesadas (ver Figura 3.69). Estas reparaciones no solo buscan restituir la funcionalidad original, sino también mejorar la resistencia de la visera frente a nuevas cargas de impacto y abrasión. Sin embargo, el diseño de estas soluciones debe considerar las restricciones espaciales y las interferencias operacionales del sector, ya que se ha evidenciado que su ejecución puede ser compleja y lenta en terreno. (Clasificación propuesta: Estructural - Diseño)



Figura 3.69. Reparación de viseras dañadas con HA o planchas de acero. Ref: Martínez A. & Muñoz R. (2024).

- **Mejoramiento diseño original viseras:** Actualmente para el caso de condiciones de sobre excavación importante, los diseños incorporan una visera de hormigón armado reforzada como se muestra en la Figura 3.70., más robusta que se ajusta a la geometría real resultante. (Clasificación propuesta: Estructural - Diseño)

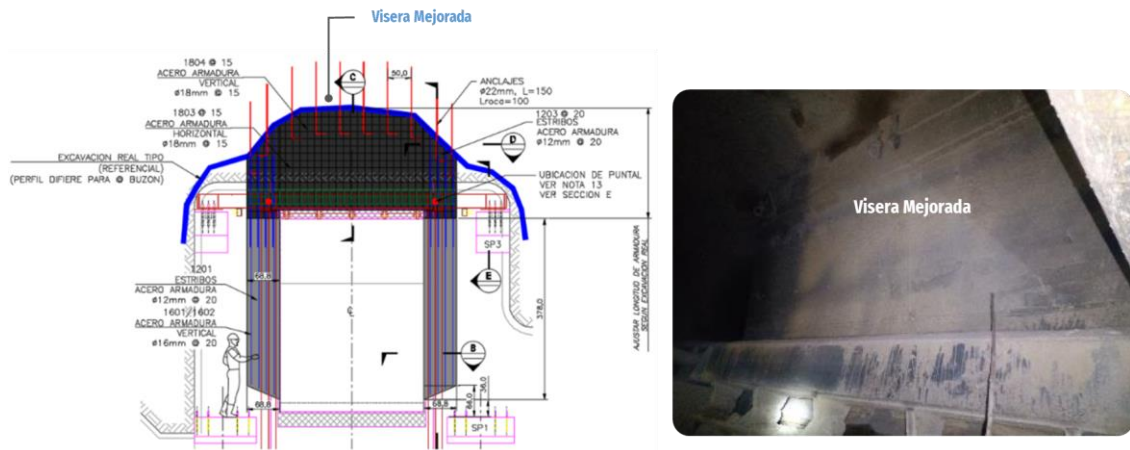


Figura 3.70. Reforzamiento diseño de visera. Ref: Muñoz R. (2024).

4 Propuestas de criterios de diseño.

4.1 Enfoque general

En este capítulo se presentan los criterios de diseño propuestos por el autor, elaborados a partir del análisis desarrollado en el Capítulo 3, donde se contrastó el comportamiento real de las estructuras que conforman los Sistemas de Traspaso Intermedio (STI) con los supuestos empleados en sus diseños actuales. A partir de dicha comparación, se identificaron problemáticas recurrentes en cada tipo de estructura, lo que permitió generar medidas de mitigación y mejoras orientadas a condiciones reales de operación en minería subterránea.

Como resultado de este estudio, y considerando tanto los antecedentes técnicos como la experiencia recopilada en terreno, se elaboró una lista de criterios que recoge directamente las conclusiones del trabajo propio del autor, integrando también aportes derivados de entrevistas con personal de operación y mantenimiento, así como la supervisión técnica del profesor tutor. Esta lista de criterios en conjunto con la información relevante del Capítulo 3 se encuentra disponible en el Anexo en formato de ficha técnica para facilitar su consulta y aplicación.

Los criterios desarrollados buscan orientar al diseñador hacia soluciones más ajustadas a las condiciones reales que enfrentan las estructuras subterráneas, superando las limitaciones detectadas en los enfoques actuales.

4.2 Criterios de diseño estructura Puntos de extracción

- Las conexiones deben modelarse con rotulas en la cúspide del marco o en las uniones del arco con la columna según sea el caso, con el fin de representar de manera más precisa el comportamiento estructural. Esto se fundamenta con lo señalado en el Capítulo 3, sección 3.3. donde se compara el comportamiento del marco con y sin rotulas por medio del software SAP2000. El comportamiento no lineal del contacto entre la estructura y el macizo rocoso, condicionado por la rigidez del terreno, su estado tensional y posibles mecanismos de



fracturamiento, debe representarse de forma simplificada y realista mediante una modelación de resortes inelásticos que trabajen a compresión.

- Se deben tomar en cuenta las solicitaciones que predominan en un ambiente subterráneo, expuestas en el Capítulo 2, sección 2.4.2, junto con desarrollar una investigación más detallada de como cuantificar los daños que generan estas solicitaciones en la estructura. No diseñar más puntos de extracción únicamente con solicitaciones de peso propio y cargas de uso.
- Todos los marcos de los puntos de extracción deben contar con atiesadores de refuerzo para aumentar la rigidez de las estructuras en zonas críticas susceptibles al pandeo local. Estos atiesadores deben suplir esta inestabilidad local y colocarse preferentemente donde el marco sea solicitado por cargas puntuales, como impactos de roca, el empuje del macizo o cargas desbalanceadas. Según lo concluido en el Capítulo 3, sección 3.3 los atiesadores deben ubicarse en la unión del arco con la columna y en la cúspide del marco, aunque la ubicación puede variar entre marcos, considerando que la estructura está sometida a las solicitaciones expuestas en el Capítulo 2, sección 2.4.2, como, por ejemplo, un estallido de roca. El detalle de los atiesadores dependerá de cada solicitud y caso particular.
- Los puntos de extracción deben contar con al menos cuatro marcos de acero espaciados como máximo a 1 [m] de distancia, para proporcionar un soporte estable al punto de extracción. Entre los marcos debe haber muros de fortificación (estructura de sacrificio) que eviten la transmisión de deformaciones del marco más cercano al punto extractivo hacia el que le sigue en la línea estructural. Estos muros deben diseñarse bajo las solicitaciones expuestas en el Capítulo 2, sección 2.4.2. y construirse en hormigón armado evitando el uso de malla electrosoldada y aplicando armadura de refuerzo vertical reforzada con estribos de confinamiento.

4.3 Criterios de diseño estructura carpeta de rodado

- Abordar el diseño de manera integral, considerando tanto las solicitaciones estructurales directas como las condiciones operacionales y ambientales. En primer lugar, se sugiere incorporar las solicitaciones asociadas al tránsito de equipos pesados, tales como las cargas específicas por eje y rueda, de modo de definir un espesor y resistencia óptimos para el tráfico vehicular, conforme a lo indicado en el Capítulo 3, sección 3.4. En segundo lugar, se debe diseñar en función de las condiciones reales de operación y entorno, tomando en cuenta las solicitaciones descritas en el Capítulo 2, sección 2.4.2. Esta estrategia de diseño busca asegurar la funcionalidad y durabilidad de las estructuras ante las condiciones exigentes de la minería subterránea.
- Utilizar hormigones de alta resistencia de calidad G65 (H-70) o superior para contrarrestar el ambiente hostil en que se encuentra la carpeta de rodado conforme lo indicado en el Capítulo 3, sección 3.4. Considerar para el Nivel de Producción un espesor mínimo de 22 [cm], mientras que para el caso del Nivel de Acarreo un espesor mínimo de 30 [cm]. Cualquier cambio de espesor debe estar debidamente respaldado.



- Para el caso de reparaciones implementar hormigones de fraguado rápido que permitan habilitar el tránsito en el menor tiempo posible, reduciendo las interrupciones operativas conforme el Capítulo 3, sección 3.4. Asegurar que las carpetas de rodado constructivamente cuenten con las juntas de retracción selladas y cumplan con las especificaciones que entregan los planos de diseño.

4.4 Criterios de diseño estructura Puntos de vaciado; brocales, parrillas y muros tope

- Diseñar parrillas clasificadoras y los muros topes para resistir las cargas dinámicas generadas por los impactos de la caída libre de una colpa (roca) de sobre tamaño. Tener en cuenta que la colpa puede caer en cualquier lugar de la parrilla por maniobras subóptimas del operador, lo que genera excentricidades de carga no contempladas y tensiones extras por una distribución desigual del material. Aplicar un factor de seguridad para esta solicitud debido a su incertidumbre o hacer un estudio detallado del problema teniendo en cuenta las solicitudes descritas en el Capítulo 2, sección 2.4.2. Utilizar aceros de alta dureza (Astralloy V o similar) en las parrillas y revestimientos de los muros topes para minimizar el desgaste por fricción y abrasión del material y los equipos.
- Incorporar amortiguadores en las parrillas y reforzar los anclajes de los muros topes desde la base para resistir impactos repetidos y prevenir el levantamiento producidos principalmente por la reducción secundaria proveniente del uso del martillo pica roca. Hacer un estudio de cómo afecta localmente los impactos repetidos en diferentes partes de la parrilla.
- Para los muros tope considerar los impactos generados por las fuerzas transmitidas por los neumáticos de los equipos LHD en las labores de acercamiento para descargar al punto de vaciado. Tener en cuenta que la velocidad promedio del equipo no siempre se cumple y que el peso adicional cuando este cargado puede afectar de mayor forma la estructura. Considerar un diseño como estructura de sacrificio de fácil remplazo.
- Diseñar los muros topes con planchas de revestimiento y anclajes reforzados para protegerlos contra daños por impactos directos de los equipos según el Capítulo 3, sección 3.5.2. Asegurar un empotramiento al piso de al menos 5 cm de las placas de refuerzo para evitar levantamiento de este elemento cuando el balde del equipo LHD se arrastre. Tomar en cuenta la existencia de las solicitudes expuestas en el Capítulo 2, sección 2.4.2.
- Diseñar espacialmente de forma correcta la distancia entre el brocal, el muro tope y la calle de producción para evitar colisiones con los equipos. Es importante evitar esta solicitud dado la magnitud de la fuerza de los choques.



4.5 Criterios de diseño estructura Fundaciones y bases de martillo pica roca

- Diseñar la fundación para que resista las cargas de peso del equipo y las cargas operacionales inducidas por el martillo como vibraciones y golpes repetitivos. Considerar las solicitaciones propias de una minería subterránea explotadas en el Capítulo 2, sección 2.4.2. como por ejemplo los movimientos del macizo (estallidos de roca) en los diseños de anclajes y fundaciones, para mitigar desplazamientos o desestabilización.
- Mejorar la operación, diseño geométrico y mantenimiento de la estructura (ver Capítulo 3, sección 3.6.). Tener en cuenta:
- La ubicación en planta del martillo pica rocas de manera tal que se maximice su cobertura de picado sobre los cuatro cuadrantes de la parrilla clasificadora con la cuña operando de manera vertical.
- El martillo picador debe ser posicionado de manera que su cuña pueda descansar fuera del brocal hacia la calle del Nivel de Producción para poder realizar mantenimientos oportunos y rápidos en la cuña.
- La altura de la fundación y sub-base deben permitir una adecuada cobertura vertical de del martillo, asegurando que el picado de equipo alcance la profundidad donde se encuentra la parrilla clasificadora.
- Altura suficiente de la fundación y sub-base (no muy baja) de manera de evitar que la acumulación de colpas por debajo de los cilindros del martillo genere daños en estos componentes mecánicos.
- Contar con una distancia suficiente entre el muro de confinamiento y el borde de la fundación para proporcionar el espacio adecuado para que el personal de mantenimiento pueda realizar tareas e inspecciones de manera eficiente y segura.
- Contar con una altura H desde la fundación hasta el muñón de la sub-base adecuada (no excesiva) a fin de garantizar un montaje y desmontaje seguro del martillo mediante equipo montacarga. Una altura excesiva genera inestabilidades en el equipo montacargas al momento de levantar el martillo.
- Disponer de una longitud libre en línea recta suficiente para permitir el montaje y desmontaje del martillo en la sub - base mediante equipo montacarga acondicionado para esta labor.
- Ubicación en planta de la fundación que no sobrepase la trayectoria proyectada del equipo LHD ingresando al punto de extracción con el fin evitar colisiones de este equipo con la fundación, sub-base y martillo pica rocas.

4.6 Criterios de diseño estructura Piques

- Considerar un factor de seguridad mayor para tener en cuenta la influencia de las cargas dinámicas y fuerzas irregulares derivadas de impactos del material en los escenarios de trabajo con piques no necesariamente llenos. Implementar medidas para operar piques llenos



reduciendo el impacto. Disponer de blindaje en toda la longitud del pique para prevenir la relajación de esfuerzos y desprendimientos de bloques que afecten las paredes. Revestir con anillos de acero resistentes a la abrasión. Tener en cuenta el modelo de daño planteado por Contanzo H. & Rojas E. (2001) en conjunto con las solicitaciones expuestas en el Capítulo 2, sección 2.4.2.

- Se debe considerar una inclinación mínima de 75° para los piques, preferentemente diseñarlos a 90° para evitar la formación del llampo (ver Capítulo 3, sección 3.7.3.).

4.7 Criterios de diseño estructura Buzón

- Operar el pique con alto nivel de material para evitar cargas dinámicas y fuerzas irregulares derivadas de impactos del material en los escenarios de trabajo con piques no necesariamente llenos. Se debe considera un factor de seguridad mayor en la solicitud de diseño relacionada con la caída de material, dado que es un factor importante en el daño pique-buzón.
- Tener en cuenta las solicitaciones expuestas en el Capítulo 2, especialmente las relacionadas con el macizo rocoso, tales como desprendimiento por discontinuidades del macizo rocoso (sección 2.4.2.2.2.), eventos sísmicos con consecuencia de estallido de roca (sección 2.4.2.2.3.) y colapsos (sección 2.4.2.2.4.).
- Implementar viseras de protección reforzadas para minimizar los daños en la zona de conexión entre el pique y el buzón, en conjunto con la incorporación de puntales de perfiles HN o IN a la altura de la visera para dar mayor soporte lateral a la compuerta del buzón. Las dimensiones tanto de la visera como del puntal son parte del estudio de cada caso ya que dependen del daño provocado y su locación.
- Disponer de plataformas seguras que el diseño permita el acceso seguro al personal de operaciones durante las labores de reducción y reparación.



5 Conclusiones

El objetivo principal de esta memoria fue alcanzado, cual consistió en elaborar criterios de diseño para las infraestructuras que componen los Sistemas de Traspaso Intermedio (STI) en la mina El Teniente. Estos surgieron del análisis comparativo entre diseños teóricos y el comportamiento real observado en terreno. Esta formulación se apoyó en una revisión exhaustiva de documentación técnica interna y entrevistas con personal operativo, lo que permitió identificar discrepancias críticas entre los diseños y las solicitudes reales del entorno subterráneo.

Se logró analizar los problemas estructurales recurrentes en las infraestructuras de los STI. El análisis permitió establecer que muchas fallas provienen de una subestimación sistemática de las solicitudes reales en la mina subterránea, tales como presión de roca, estallidos, discontinuidades geológicas, efectos hidráulicos y tránsito de maquinaria. Esta omisión en los diseños originales ha generado estructuras poco eficientes en condiciones reales de operación. La recopilación de información documental y empírica fue clave para identificar estas brechas y dio pie a una evaluación crítica de los criterios vigentes, sentando la base técnica para su posterior reformulación.

Se cumplió el objetivo de evaluar los criterios de diseño actualmente utilizados, identificando fortalezas y diversas debilidades. Las estructuras analizadas evidenciaron problemas asociados al uso inadecuado de estados de carga, escasa consideración de factores operacionales y deficiencias en la adaptabilidad frente al entorno minero. Casos como el uso incorrecto de piques, fallas en parrillas de vaciado y pandeo en marcos estructurales ilustraron estas falencias. La evaluación permitió proponer medidas de mitigación específicas por estructura y fundamentar técnicamente el listado de criterios incluidos en la guía final.

Fueron desarrollados nuevos criterios de diseño, asegurando su aplicabilidad mediante el análisis técnico y la validación empírica en terreno. Estos criterios consideran tanto principios estructurales clásicos como variables particulares de la minería subterránea, incluyendo eventos dinámicos, estados de carga complejos y la interacción con equipos. Se propuso incorporar el concepto de estructuras de sacrificio como solución eficiente frente a daños imprevistos, priorizando la continuidad operativa del sistema. La guía elaborada proporciona herramientas concretas para que futuros profesionales aborden el diseño estructural con una visión más integral, resiliente y contextualizada.

Los criterios elaborados fueron organizados e incorporados en una guía de diseño estructurada en formato de ficha técnica, orientada a su aplicación en reparaciones dentro de sectores productivos y en futuros proyectos. Esta guía busca estandarizar soluciones civiles-estructurales, optimizando el desempeño y la funcionalidad de las infraestructuras de los STI, y constituye un aporte concreto al mejoramiento continuo del proceso minero en la División El Teniente.



6 Referencias

- American Concrete Institute. (2019). *ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. ACI.
- Arévalo, F. E. (2022). *Metodología Full Potential aplicada a la construcción de sistemas de traspaso en Mina Norte, División El Teniente CODELCO (Memoria de título)*. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/194377>
- Balboa, S. (2012). *Presentaciones Institucionales*. Documento institucional Codelco.
- Balboa, S. (2019). *Presentaciones Institucionales*. Documento institucional Codelco.
- Balboa, S. (2024). *Presentaciones Institucionales*. Documento institucional Codelco.
- Camhi, J. (2012). *Optimización de los procesos de desarrollo y construcción en minería de block caving: Caso estudio Mina El Teniente Codelco Chile (Tesis de maestría)*. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114467>
- Constanzo, H. (2005). *Presentaciones Institucionales*. Documento institucional Codelco.
- Constanzo, H. & Rojas, E. (2001). *Modelo de daño estructural en buzones y piques*. Codelco.
- Escudero, M. (2013). *Criterios de diseño para obras civiles interior mina*. Documento institucional Codelco.
- Gómez, J. (2024). *Presentaciones Institucionales*. Documento institucional Codelco.
- Instituto Nacional de Normalización. (2003). *NCh2369.Of2003: Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales*. INN.
- Instituto Nacional de Normalización. (2004). *NCh432.Of2004: Cálculo de cargas de viento en edificios*. INN.
- Jorquiera, P. (2014). *Presentaciones Institucionales*. Documento institucional Codelco.
- Labbé, E. (2021). *Aplicación de un modelo de simulación en la construcción de sistemas de traspaso en Mina Reno, División El Teniente, Codelco (Memoria)*. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180295>
- Martínez, A. & Muñoz, R. (2024). *Presentaciones Institucionales*. Documento institucional Codelco.
- Muñoz, R. & Balboa, S. (2011). *Presentaciones Institucionales*. Documento institucional Codelco.
- Muñoz, R. (2024). *Presentaciones Institucionales*. Documento institucional Codelco.
- Muñoz, R. (2020). *Presentaciones institucionales*. Documento institucional, Codelco.
- Nedderman, R. M. (1992). *Statics and kinematics of granular materials*. Cambridge University Press.
- Olivares, F. (2016). *Memoria de cálculo: Verificación punto de extracción para una capacidad de 15 [T/m²] nivel de producción panel 2, Mina Esmeralda*. Codelco.
- Revista El Teniente (2024). *Presentaciones Institucionales*. Documento institucional Codelco.
- Reyes J. & Muñoz R. (2024). *Presentaciones Institucionales*. Documento institucional Codelco.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Terzaghi, K. (1946). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

7 Anexo

Se adjuntan Propuesta de fichas creadas por el autor.



CRITERIOS DE DISEÑO CIVIL PARA DISEÑO DE SISTEMAS DE TRASPASO INTERMEDIOS



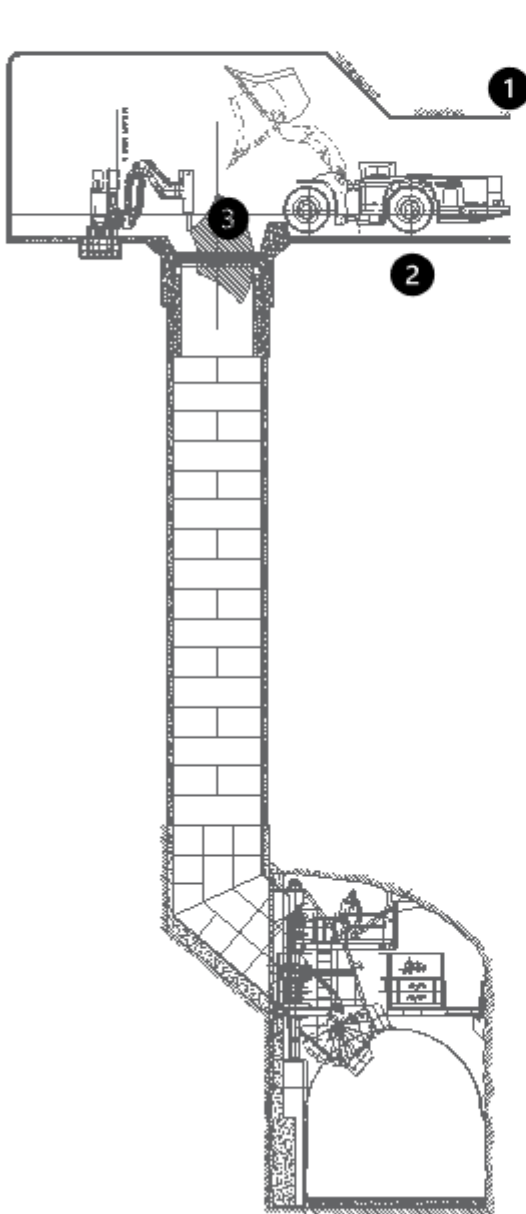
Anexo A-Ficha técnica: Definiciones e identificación de infraestructura del STI



CRITERIOS DE DISEÑO CIVIL PARA DISEÑO DE SISTEMAS DE TRASPASO INTERMEDIOS



DEFINICIONES



- 1**

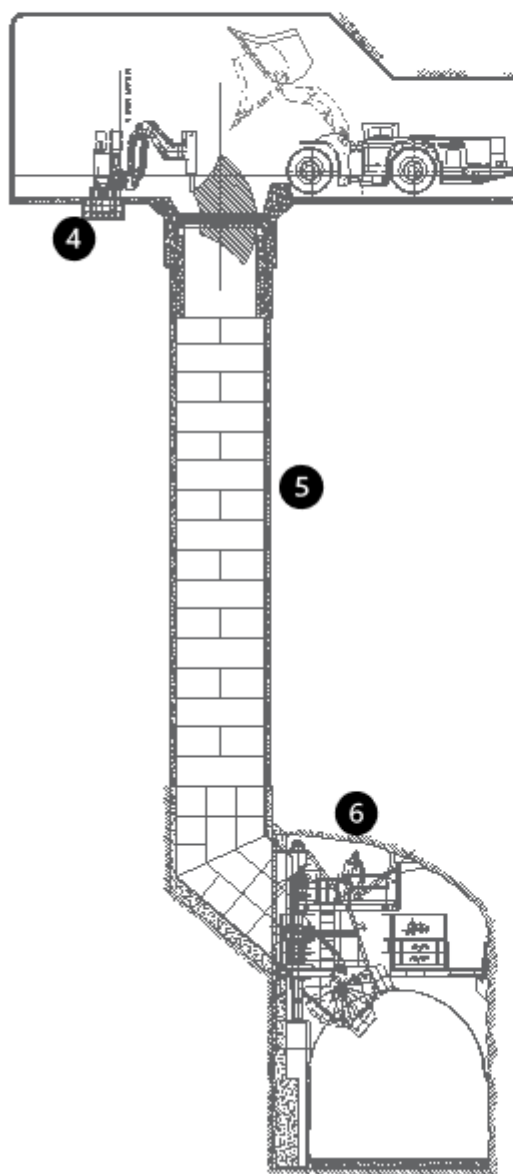
▪ Puntos de extracción: Estructuras en forma de arco materializadas con marcos de acero unidos mediante hormigón armado. Estos puntos están estratégicamente ubicados y diseñados para permitir el acceso del mineral quebrado desde las bateas y que es cargado mediante equipos LHD en el nivel de producción para luego ser transportado y descargado en los puntos de vaciado.
- 2**

▪ Carpeta de Rodado: Son superficies resistentes diseñadas para la circulación de vehículos y equipos mineros, reduciendo el desgaste y garantizando seguridad y eficiencia. En minería subterránea, incluyen las calles del Nivel de Producción (NP) para LHD y los cruzados del Nivel de Acarreo (NA) para camiones de alto tonelaje, usualmente construidas en hormigón de alta resistencia (G65).
- 3**

▪ Punto de Vaciado; brocales, parrillas y muros tope: Los puntos de vaciado en minería subterránea son sistemas diseñados para recibir y descargar el mineral extraído de manera segura y eficiente. Están compuestos por brocales de hormigón armado revestidos en acero para resistir abrasión e impactos, muros tope que protegen contra caídas de los equipos LHD y parrillas clasificadoras que retienen rocas de sobre- tamaño, evitando daños en los procesos posteriores. Las parrillas, formadas por placas de acero, se estructuran en cuadrantes de sección libre de 1.0 x 1.0 m² para contener colpas y optimizar la operación.

RIESGOS CRÍTICOS | EXCELENCIA OPERACIONAL | LIDERAZGO | APRENDIZAJE | INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA

DEFINICIONES



4 Fundaciones y bases de martillo pica roca: Las fundaciones y bases de martillo pica roca son estructuras diseñadas para garantizar la estabilidad y seguridad durante su operación. Estas bases, hechas de hormigón armado y ancladas al sustrato de roca mediante pernos lechados, soportan las fuerzas y vibraciones generadas, evitando desestabilización o vuelcos. Los martillos semi- estacionarios se conectan a sub- bases de acero desmontables, permitiendo su traslado a talleres para mantenimiento mayor. Este diseño asegura su funcionalidad en puntos de vaciado y facilita su movilización cuando sea necesario.

5 Piques: Los piques son desarrollos verticales o sub-verticales, generalmente de geometría circular, que conectan distintos niveles de una mina y permiten el flujo de mineral, equipos y personas. En minería subterránea, estos piques están revestidos con anillos de blindaje de acero antiabrasivo o hormigón armado para garantizar su resistencia y seguridad. Con diámetros de sección libre de 3.0 m y longitudes cercanas a 30 m, transportan el mineral desde los puntos de vaciado en el Nivel de Producción hacia buzones de descarga lateral en el Nivel de Acarreo.

6 Buzones: Los buzones son estructuras subterráneas utilizadas como depósitos temporales para almacenar el material extraído antes de su transporte. Ubicados bajo los piques de traspaso en galerías o cruzados, están contruidos con acero y sostenidos por muros y consolas de hormigón armado, garantizando estabilidad y resistencia. Permiten un flujo regulado de descarga hacia equipos de acarreo como camiones o trenes. Además, cuentan con plataformas de acero para facilitar la mantención, inspección y operación, asegurando su funcionalidad en el proceso minero.

Anexo B-Ficha técnica: Punto de extracción



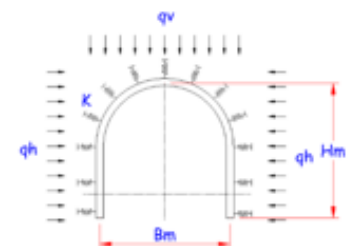
CRITERIOS DE DISEÑO CIVIL PARA DISEÑO DE SISTEMAS DE TRASPASO INTERMEDIOS

DAMOS
TODO
POR
CHILE

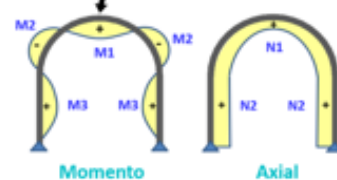
CRITERIOS DE DISEÑO PUNTOS DE EXTRACCIÓN.

SUPUESTOS ACUTALES DE DISEÑO.

Para el diseño de los puntos de extracción, actualmente se considera un modelo simplificado sometido a cargas verticales y laterales definidas por especialistas geomecánicos y cuyos marcos de acero se apoyan en un medio elástico representado por resortes inelásticos que trabajan sólo a compresión y que simulan la rigidez del macizo rocoso. El arco conformado por las piezas de acero se considera como un medio continuo y rígido, lo que implica que las conexiones transfieren momentos, permitiendo que la estructura distribuya las cargas de manera uniforme, suponiendo una mayor estabilidad teórica de la estructura.

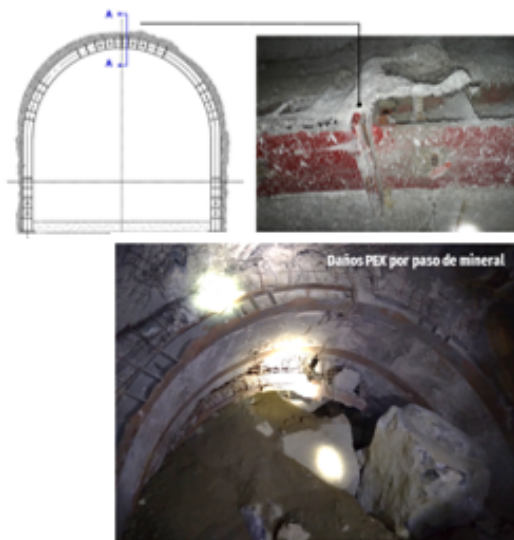


Supuesto de diseño no concordante con evidencia en terreno



COMPORTAMIENTO REAL EN TERRENO.

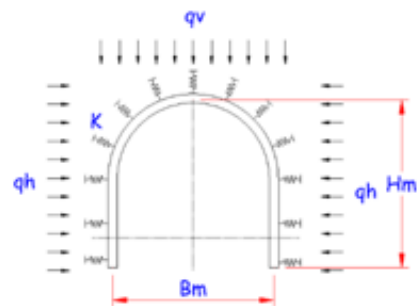
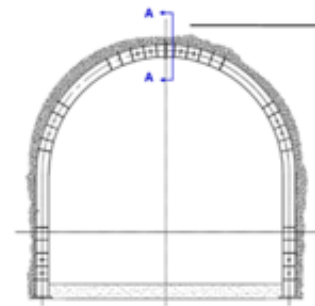
En la práctica, los marcos de acero en los puntos de extracción no actúan como estructuras rígidas debido a que están formados por piezas conectadas cuyas uniones no transmiten momento, ya sea por el tipo de conexión o la complejidad en su instalación. Por ello, el modelamiento debe considerar conexiones rotuladas para representar con mayor precisión su comportamiento. Además de la carga geomecánica, estas estructuras enfrentan impactos significativos por abrasión, colisión de equipos LHD, cargas sísmicas, efectos de explosivos y el paso del mineral, como lo evidencian los daños típicos mostrados en la figura adjunta.



CRITERIOS DE DISEÑO PUNTOS DE EXTRACCIÓN.

Criterio n°1: Modelación de conexiones con rotulas y representación del contacto estructura macizo-rocoso.

Las conexiones deben modelarse con rotulas en la cúspide del marco o en las uniones del arco con la columna según sea el caso, con el fin de representar de manera más precisa el comportamiento estructural. Esto se fundamenta con lo señalado en el Capítulo 3, sección 3.3. donde se compara el comportamiento del marco con y sin rotulas por medio del software SAP2000. El comportamiento no lineal del contacto entre la estructura y el macizo rocoso, condicionado por la rigidez del terreno, su estado tensional y posibles mecanismos de fracturamiento, debe representarse de forma simplificada y realista mediante una modelación de resortes inelásticos que trabajen a compresión.



Criterio n°2: Consideración de solicitaciones subterráneas reales.

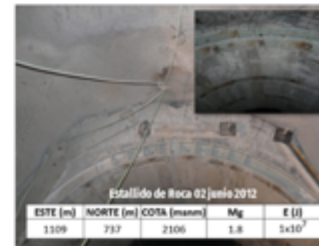
Se deben tomar en cuenta las solicitaciones que predominan en un ambiente subterráneo, expuestas en el Capítulo 2, sección 2.4.2, junto con desarrollar una investigación más detallada de como cuantificar los daños que generan estas solicitaciones en la estructura. No diseñar más puntos de extracción únicamente con solicitaciones de peso propio y cargas de uso.



CRITERIOS DE DISEÑO PUNTOS DE EXTRACCION.

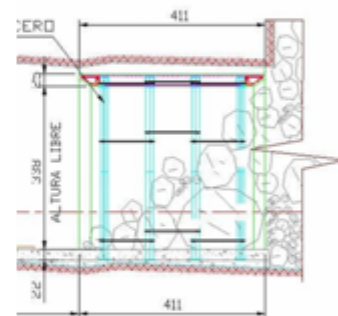
Criterio n°3: Incorporación de atiesadores como refuerzo.

Todos los marcos de los puntos de extracción deben contar con atiesadores de refuerzo para aumentar la rigidez de las estructuras en zonas críticas susceptibles al pandeo local. Estos atiesadores deben suplir esta inestabilidad local y colocarse preferentemente donde el marco sea solicitado por cargas puntuales, como impactos de roca, el empuje del macizo o cargas desbalanceadas. Según lo concluido en el Capítulo 3, sección 3.3 los atiesadores deben ubicarse en la unión del arco con la columna y en la cúspide del marco, aunque la ubicación puede variar entre marcos, considerando que la estructura está sometida a las solicitaciones expuestas en el Capítulo 2, sección 2.4.2, como, por ejemplo, un estallido de roca. El detalle de los atiesadores dependerá de cada solicitud y caso particular.



Criterio n°4: Configuración estructural mínima y fortificación entre marcos.

Los puntos de extracción deben contar con al menos cuatro marcos de acero espaciados como máximo a 1 [m] de distancia, para proporcionar un soporte estable al punto de extracción. Entre los marcos debe haber muros de fortificación (estructura de sacrificio) que eviten la transmisión de deformaciones del marco más cercano al punto extractivo hacia el que le sigue en la línea estructural. Estos muros deben diseñarse bajo las solicitaciones expuestas en el Capítulo 2, sección 2.4.2. y construirse en hormigón armado evitando el uso de malla electrosoldada y aplicando armadura de refuerzo vertical reforzada con estribos de confinamiento.



Anexo C-Ficha técnica: Carpetas de rodado



CRITERIOS DE DISEÑO CIVIL PARA DISEÑO DE SISTEMAS DE TRASPASO INTERMEDIOS



CRITERIOS DE DISEÑO CARPETAS DE RODADO.

SUPUESTOS ACTUALES DE DISEÑO.

El diseño actual de las carpetas de rodado en la División El Teniente se basa en el análisis de esfuerzos de tracción y compresión generados por el tránsito de equipos pesados, como camiones de alto tonelaje en el nivel de acarreo y equipos LHD en el nivel de producción. Este análisis utiliza principalmente modelamientos numéricos de elementos finitos o la teoría elástica de Westergaard. Sin embargo, no contempla factores ambientales y operacionales adversos, como el escurrimiento de aguas sulfatadas, deformaciones de galerías, desgaste por tránsito, arrastre de baldes de LHD durante el carguío y la limpieza, que aceleran el deterioro. En la práctica, estas condiciones plantean desafíos mayores a los previstos en los diseños teóricos.

COMPORTAMIENTO REAL EN TERRENO.

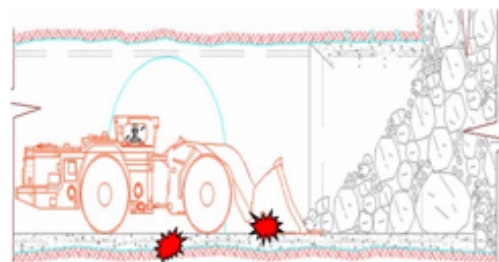
En la práctica, las carpetas de rodado presentan deterioros más asociados a condiciones operacionales y ambientales que a las cargas teóricas de tránsito. Los principales problemas son:

Daños por ausencia de juntas de dilatación en el Nivel de Producción: La falta de juntas entre las carpetas y los muros de refuerzo provoca presiones por deformación de galerías, generando agrietamientos, desintegración y bloques de concreto debido a la ausencia de armaduras.

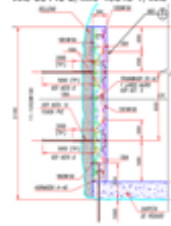
Daños operacionales en el Nivel de Producción: La humedad, agua sulfatada/ácida y el constante tránsito de equipos LHD causan agrietamientos tipo "piel de cocodrilo" y desgaste, reduciendo la vida útil según la intensidad de estas condiciones.

Daños operacionales en el Nivel de Acarreo: Similares al nivel de producción, pero con mayor agresividad debido al tránsito de camiones cargados (100-110 toneladas), aunque en menor área debido a la menor cantidad de galerías.

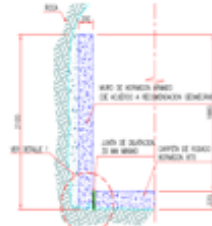
Baches por deficiente calidad de la sub-base: La mala calidad de la sub-base provoca baches, acumulación de agua y aceleración del daño en el hormigón, afectando tanto al nivel de producción como al de acarreo.



Plano muros de refuerzo continuo
IM9-29611-4, IM9-34782-1-2, IM9-35442-2,
IM9-35443-2, IM9-49645-1, IM9-49646-1



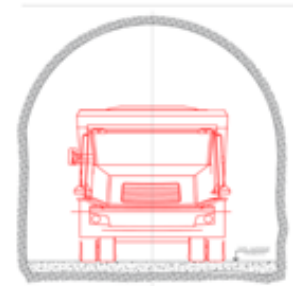
Plano Carpeta de Rodado
IM9-42095-1



CRITERIOS DE DISEÑO CARPETAS DE RODADO.

Criterio n°1: Diseño integral considerando solicitaciones estructurales y operacionales.

Abordar el diseño de manera integral, considerando tanto las solicitaciones estructurales directas como las condiciones operacionales y ambientales. En primer lugar, se sugiere incorporar las solicitaciones asociadas al tránsito de equipos pesados, tales como las cargas específicas por eje y rueda, de modo de definir un espesor y resistencia óptimos para el tráfico vehicular, conforme a lo indicado en el Capítulo 3, sección 3.4. En segundo lugar, se debe diseñar en función de las condiciones reales de operación y entorno, tomando en cuenta las solicitaciones descritas en el Capítulo 2, sección 2.4.2. Esta estrategia de diseño busca asegurar la funcionalidad y durabilidad de las estructuras ante las condiciones exigentes de la minería subterránea.



Criterio n°2: Utilización de hormigón de alta resistencia.

Utilizar hormigones de alta resistencia de calidad G65 (H-70) o superior para contrarrestar el ambiente hostil en que se encuentra la carpeta de rodado conforme lo indicado en el Capítulo 3, sección 3.4. Considerar para el Nivel de Producción un espesor mínimo de 22 [cm], mientras que para el caso del Nivel de Acarreo un espesor mínimo de 30 [cm]. Cualquier cambio de espesor debe estar debidamente respaldado.



Criterio n°3: Uso de hormigones de fraguado rápido y control de juntas en reparaciones.

Para el caso de reparaciones implementar hormigones de fraguado rápido que permitan habilitar el tránsito en el menor tiempo posible, reduciendo las interrupciones operativas conforme el Capítulo 3, sección 3.4. Asegurar que las carpetas de rodado constructivamente cuenten con las juntas de retracción selladas y cumplan con las especificaciones que entregan los planos de diseño.



Anexo D-Ficha técnica: Puntos de vaciado, brocales, parrillas y muro tope



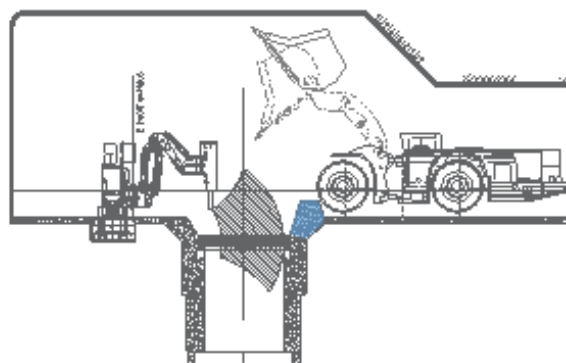
CRITERIOS DE DISEÑO CIVIL PARA DISEÑO DE SISTEMAS DE TRASPASO INTERMEDIOS



CRITERIOS DE DISEÑO PUNTOS DE VACIADO, BROCALES, PARRILLAS Y MURO TOPE.

SUPUESTOS ACTUALES DE DISEÑO.

En los puntos de vaciado, los diseños teóricos se centran en verificar la resistencia mecánica de la parrilla clasificadora, el brocal de hormigón armado y el muro tope. Para las parrillas y brocales, se considera como carga principal el impacto central de una masa caída desde el balde del equipo LHD. Sin embargo, en la práctica, el material no se distribuye uniformemente, generando cargas excéntricas no previstas. En el caso del muro tope, el diseño contempla el impacto de las ruedas delanteras del equipo LHD durante las labores de vaciado.



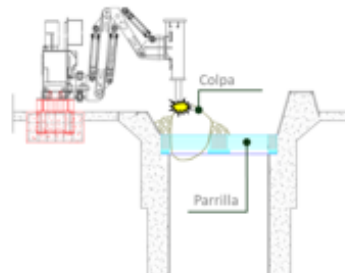
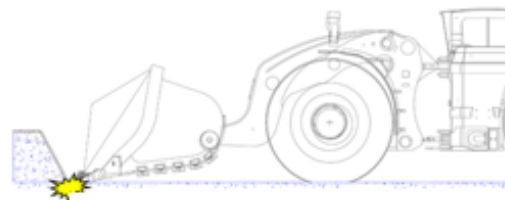
COMPORTAMIENTO REAL EN TERRENO.

Aunque las cargas de impacto teóricas se aproximan a las condiciones reales, diversos factores operacionales afectan el comportamiento estructural de los puntos de vaciado:

Pérdida de blindaje en muro tope: El impacto del balde del equipo LHD puede desprender el revestimiento de acero mal empotrado, dejando el hormigón expuesto y causando daños acelerados, incluso en la armadura de refuerzo.

Cargas por labores de picado: Al romper colpas de sobre tamaño, el martillo pica roca genera impactos repetitivos que deterioran y deforman la parrilla clasificadora, una condición no prevista en los diseños teóricos.

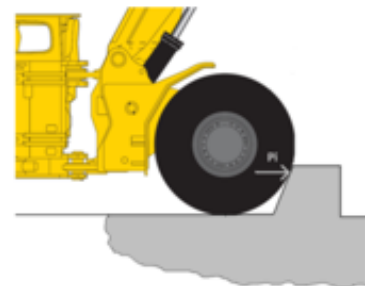
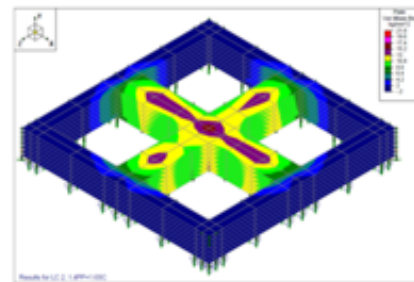
Pérdida de soporte de la parrilla: Los impactos repetitivos también dañan los apoyos de la parrilla y provocan la pérdida de los revestimientos de acero en el brocal, dejando el hormigón vulnerable a golpes y abrasión.



CRITERIOS DE DISEÑO PUNTOS DE VACIADO; BROCALES, PARRILLAS Y MUROS TOPE.

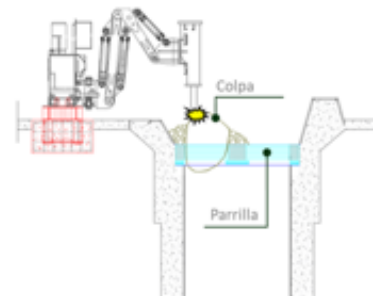
Criterio n°1: Diseño reforzado de parrillas clasificadoras y muros topes para impacto de colpas.

Diseñar parrillas clasificadoras y los muros topes para resistir las cargas dinámicas generadas por los impactos de la caída libre de una colpa (roca) de sobre tamaño. Tener en cuenta que la colpa puede caer en cualquier lugar de la parrilla por maniobras sub-óptimas del operador, lo que genera excentricidades de carga no contempladas y tensiones extras por una distribución desigual del material. Aplicar un factor de seguridad para esta sollicitación debido a su incertidumbre o hacer un estudio detallado del problema teniendo en cuenta las sollicitaciones descritas en el Capítulo 2, sección 2.4.2. Utilizar aceros de alta dureza (Astralloy V o similar) en las parrillas y revestimientos de los muros topes para minimizar el desgaste por fricción y abrasión del material y los equipos.



Criterio n°2: Incorporación de amortiguadores y refuerzo de anclajes en parrillas y muros tope.

Incorporar amortiguadores en las parrillas y reforzar los anclajes de los muros topes desde la base para resistir impactos repetidos y prevenir el levantamiento producidos principalmente por la reducción secundaria proveniente del uso del martillo pica roca. Hacer un estudio de cómo afecta localmente los impactos repetidos en diferentes partes de la parrilla.



CRITERIOS DE DISEÑO PUNTOS DE VACIADO; BROCALES, PARRILLAS Y MUROS TOPE.

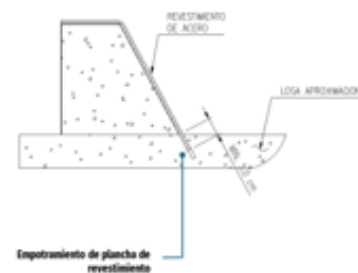
Criterio n°3: Diseño de muros tope para impactos de equipos LHD y reposición rápida.

Para los muros tope considerar los impactos generados por las fuerzas transmitidas por los neumáticos de los equipos LHD en las labores de acercamiento para descargar al punto de vaciado. Tener en cuenta que la velocidad promedio del equipo no siempre se cumple y que el peso adicional cuando este cargado puede afectar de mayor forma la estructura. Considerar un diseño como estructura de sacrificio de fácil remplazo.



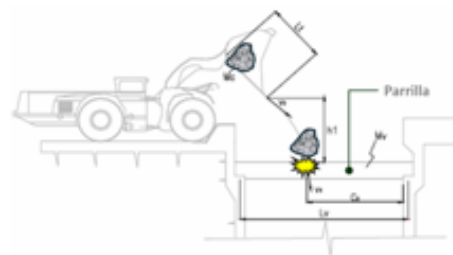
Criterio n°4: Revestimiento y anclaje reforzado de muros tope.

Diseñar los muros tope con planchas de revestimiento y anclajes reforzados para protegerlos contra daños por impactos directos de los equipos según el Capítulo 3, sección 3.5.2 Asegurar un empotramiento al piso de al menos 5 cm de las placas de refuerzo para evitar levantamiento de este elemento cuando el balde del equipo LHD se arrastre. Tomar en cuenta la existencia de las solicitaciones expuestas en el Capítulo 2, sección 2.4.2.



Criterio n°5: Diseño Espacial adecuado para prevenir colisiones de equipos.

Diseñar espacialmente de forma correcta la distancia entre el brocal, el muro tope y la calle de producción para evitar colisiones con los equipos. Es importante evitar esta sollicitación dado la magnitud de la fuerza de los choques.



Anexo E-Ficha técnica: Fundaciones y bases martillo pica roca



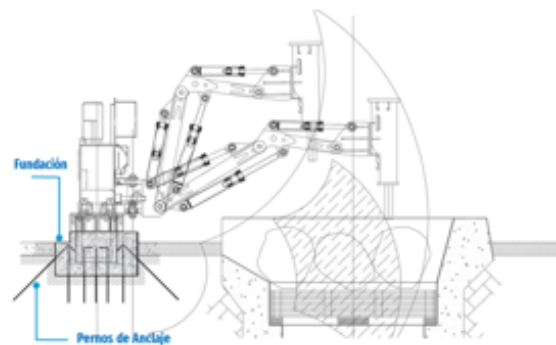
CRITERIOS DE DISEÑO CIVIL PARA DISEÑO DE SISTEMAS DE TRASPASO INTERMEDIOS



CRITERIOS DE DISEÑO FUNDACIONES Y BASES MARTILLO PICA ROCA.

SUPUESTOS ACTUALES DE DISEÑO.

En la actividad de vaciado de mineral, el martillo pica rocas desempeñan un rol fundamental en el proceso de reducción de las colpas de sobre tamaño que se traban en la parrilla clasificadora. Para asegurar la estabilidad de este equipo durante su funcionamiento, se realiza el diseño de su fundación y sub-base considerando las cargas estáticas y dinámicas operacionales indicadas por el fabricante. Mediante estas cargas se verifica la resistencia de la fundación y sub-base, además de los pernos de anclaje necesarios para evitar el volcamiento de martillo.



COMPORTAMIENTO REAL EN TERRENO.

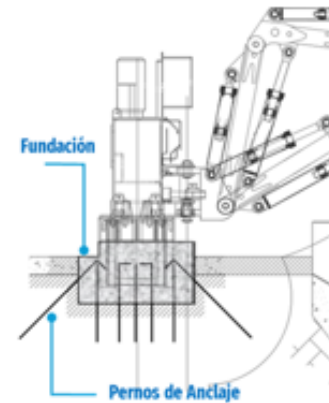
El comportamiento estructural de la fundación y sub-base de los martillos semi-estacionarios ha sido satisfactorio, pero estos equipos presentan fallas recurrentes por acumulación de mineral, afectando sus componentes mecánicos. Para su diseño, es clave determinar su ubicación en planta y cota, garantizando una cobertura óptima de picado en el punto de vaciado y suficiente espacio para mantenimiento, montaje y desmontaje. Además, la posición del martillo debe minimizar interferencias con el tránsito de equipos, especialmente evitando colisiones con los LHD al ingresar al punto de extracción.



CRITERIOS DE DISEÑO FUNDACIONES Y BASES DE MARTILLO PICA ROCA.

Criterio n°1: Diseño de fundación y anclajes para cargas operacionales y vibraciones.

Diseñar la fundación para que resista las cargas de peso del equipo y las cargas operacionales inducidas por el martillo como vibraciones y golpes repetitivos. Considerar las sollicitaciones propias de una minería subterránea expuestas en el Capítulo 2, sección 2.4.2. como por ejemplo los movimientos del macizo (estallidos de roca) en los diseños de anclajes y fundaciones, para mitigar desplazamientos o desestabilización.



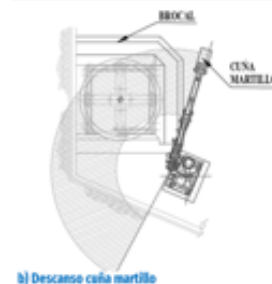
Criterio n°2: Maximización de cobertura de picado.

Ubicación en planta del martillo pica rocas de manera tal que se maximice su cobertura de picado sobre los cuatro cuadrantes de la parrilla clasificadora con la cuña operando de manera vertical.



Criterio n°3: Descanso de la cuña fuera del brocal.

El martillo picador debe ser posicionado de manera que su cuña pueda descansar fuera del brocal hacia la calle del Nivel de Producción para poder realizar mantenimientos oportunos y rápidos en la cuña.



CRITERIOS DE DISEÑO FUNDACIONES Y BASES DE MARTILLO PICA ROCA.

Criterio n°4: Adecuada cobertura vertical.

La altura de la fundación y sub-base deben permitir una adecuada cobertura vertical de del martillo, asegurando que el picado de equipo alcance la profundidad donde se encuentra la parrilla clasificadora.

Criterio n°5: Evitar la acumulación de colpas por debajo d ellos cilindros.

Altura suficiente de la fundación y sub-base (no muy baja) de manera de evitar que la acumulación de colpas por debajo de los cilindros del martillo genere daños en estos componentes mecánicos.

Criterio n°6: Espacio adecuado para personal de mantenimiento.

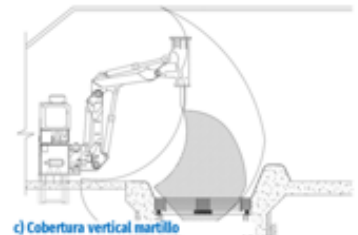
Contar con una distancia suficiente entre el muro de confinamiento y el borde de la fundación para proporcionar el espacio adecuado para que el personal de mantenimiento pueda realizar tareas e inspecciones de manera eficiente y segura.

Criterio n°7: Garantizar un montaje y desmontaje seguro.

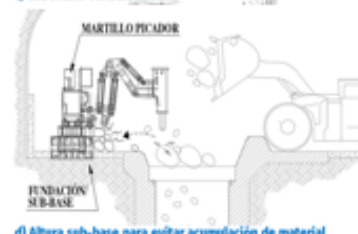
Contar con una altura H desde la fundación hasta el muñón de la sub-base adecuada (no excesiva) a fin de garantizar un montaje y desmontaje seguro del martillo mediante equipo montacarga. Una altura excesiva genera inestabilidades en el equipo montacargas al momento de levantar el martillo.

Criterio n°8: Longitud adecuada para que equipo funcione bien.

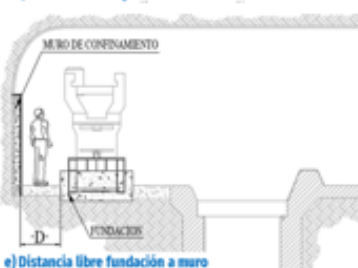
Disponer de una longitud libre en línea recta suficiente para permitir el montaje y desmontaje del martillo en la sub - base mediante equipo montacarga acondicionado para esta labor.



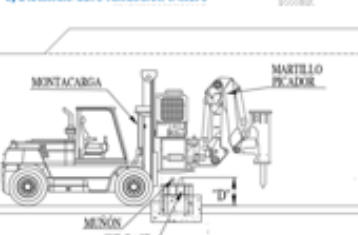
c) Cobertura vertical martillo



d) Altura sub-base para evitar acumulación de material



e) Distancia libre fundación a muro



f) Altura sub-base para montaje/desmontaje martillo



g) Longitud libre montaje/desmontaje

CRITERIOS DE DISEÑO FUNDACIONES Y BASES DE MARTILLO PICA ROCA.

Criterio n°9: Ubicación adecuada respecto a la trayectoria del equipo.

Ubicación en planta de la fundación que no sobrepase la trayectoria proyectada del equipo LHD ingresando al punto de extracción con el fin evitar colisiones de este equipo con la fundación, sub-base y martillo pica rocas.

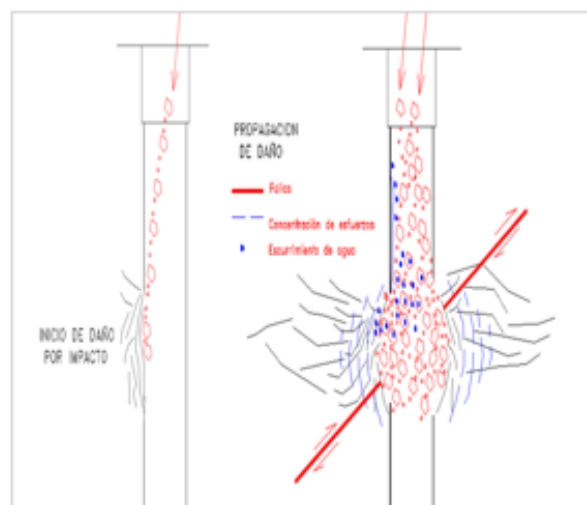


Anexo F-Ficha técnica: Piques

CRITERIOS DE DISEÑO DE PIQUES.

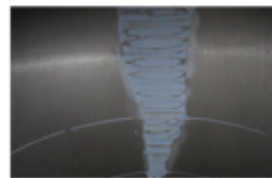
SUPUESTOS ACTUALES DE DISEÑO.

Los piques son infraestructuras clave para el traspaso de mineral entre niveles, especialmente en sistemas de traspaso intermedio que conectan el Nivel de Producción con los Niveles de Acarreo. Su diseño se basa en criterios geomecánicos y mineros, recomendando inclinaciones sub-verticales (60° - 90°) y protección con anillos de acero antiabrasivo. No existe una metodología precisa para estimar los esfuerzos teóricos dentro de estos sistemas, debido a las complejas cargas de impacto y abrasión. Según Contanzo y Rojas (2001), el deterioro comienza con la pérdida del blindaje por impacto del material, propagándose luego por mayor flujo de mineral y condiciones geotécnicas adversas.

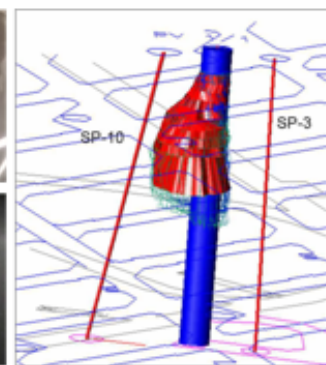


COMPORTAMIENTO REAL EN TERRENO.

La condición de daños observada en terreno es congruente con el modelo conceptual planteado en el capítulo anterior. Esto se ha logrado constatar a través de inspecciones al interior de los piques mediante drones e instrumentos como el Optech o Calls, cuyos resultados muestran los daños incipientes de los blindajes al inicio de la vida útil de estos sistemas de traspaso y la posterior propagación del daño con resultados de sobre excavaciones relevantes producto de la pérdida de la protección con los anillos de blindaje.



Daño inicial Blindaje de Piques

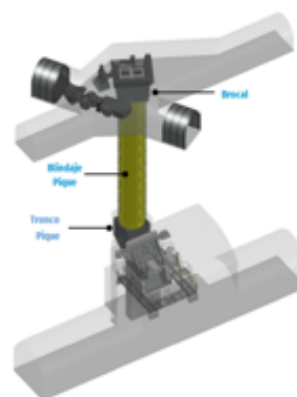


Propagación Daño Piques

CRITERIOS DE DISEÑO DE PIQUES.

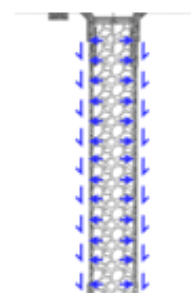
Criterio n°1: Factor de seguridad aumentado y blindaje integral en piques.

Considerar un factor de seguridad mayor para tener en cuenta la influencia de las cargas dinámicas y fuerzas irregulares derivadas de impactos del material en los escenarios de trabajo con piques no necesariamente llenos. Implementar medidas para operar piques llenos reduciendo el impacto. Disponer de blindaje en toda la longitud del pique para prevenir la relajación de esfuerzos y desprendimientos de bloques que afecten las paredes. Revestir con anillos de acero resistentes a la abrasión. Tener en cuenta el modelo de daño planteado por Contanzo H. & Rojas E. (2001) en conjunto con las solicitaciones expuestas en el Capítulo 2, sección 2.4.2.



Criterio n°2: Inclinación Mínima.

Se debe considerar una inclinación mínima de 75° para los piques, preferentemente diseñarlos a 90° para evitar la formación del llampo (ver Capítulo 3, sección 3.7.3.).



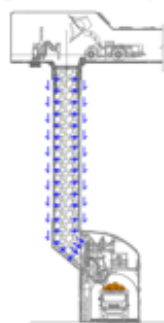
Anexo G- Ficha técnica: Buzón Lateral

CRITERIOS DE DISEÑO BUZÓN LATERAL.

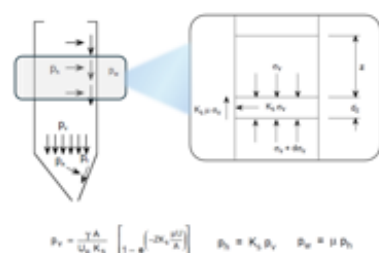
SUPUESTOS ACTUALES DE DISEÑO.

El diseño tradicional de los buzones en minería subterránea asume que el pique conectado está completamente lleno de material, lo que permite considerar una distribución progresiva y uniforme de las cargas. Se presume que las presiones a lo largo del pique y en la puerta del buzón son constantes, facilitando el análisis estructural. Este enfoque, basado en la teoría de Silos y los formulismos de Janssen, simplifica el cálculo de cargas, pero no contempla variaciones dinámicas que pueden presentarse durante la operación real del sistema.

Cargas Estáticas Sistema de Traspaso



Presiones Teoría de Janssen



COMPORTAMIENTO REAL EN TERRENO.

En la práctica, el pique suele operar con bajos niveles de material o incluso vacío. Esto genera cargas de impacto significativas en la zona de conexión entre el pique y el buzón, dado que los materiales caen libremente desde una mayor altura antes de impactar con la estructura. Este comportamiento, no contemplado en los diseños iniciales, provoca una serie de problemas estructurales, tales como:

Pérdida de la visera de protección: La visera de protección, diseñada para amortiguar impactos y proteger el buzón, sufre daños severos debido a las cargas de impacto y a la sobre excavación en la zona de conexión.

Pérdida de apoyo de las consolas: Las consolas, que son elementos clave para la estabilidad del buzón, pierden su apoyo en el macizo rocoso debido a la sobre excavación. Esta condición se agrava por los impactos repetitivos y las actividades mineras cercanas que debilitan la zona.

Daños por Estallidos de roca (ER): Los eventos sísmicos asociados a los estallidos de roca generan deformaciones importantes en las excavaciones y ocasionan proyecciones de roca. Estos fenómenos impactan negativamente en la fortificación y las infraestructuras, incluyendo los buzones.



1 Pérdida de Visera de Protección

Tipo de daño observado



Tipo de daño observado



2 3 Pérdida de apoyo para consolas



CRITERIOS DE DISEÑO ESTRUCTURA BUZON LATERAL

Criterio n°1: Operación de piques con alto nivel de material y factor de seguridad.

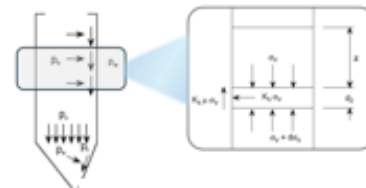
Operar el pique con alto nivel de material para evitar cargas dinámicas y fuerzas irregulares derivadas de impactos del material en los escenarios de trabajo con piques no necesariamente a llenos. Se debe considerar un factor de seguridad mayor en la solicitud de diseño relacionada con la caída de material, dado que es un factor importante en el daño pique-buzón.

Criterio n°2: Consideraciones de solicitaciones geotécnicas críticas del macizo rocoso.

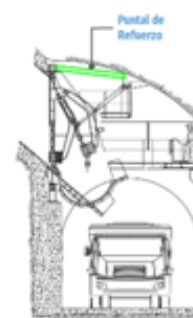
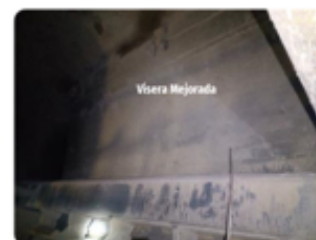
Tener en cuenta las solicitaciones expuestas en el Capítulo 2, especialmente las relacionadas con el macizo rocoso, tales como desprendimiento por discontinuidades del macizo rocoso (sección 2.4.2.2.2.), eventos sísmicos con consecuencia de estallido de roca (sección 2.4.2.2.3.) y colapsos (sección 2.4.2.2.4.).

Criterio n°3: Viseras de protección reforzadas.

Implementar viseras de protección reforzadas para minimizar los daños en la zona de conexión entre el pique y el buzón, en conjunto con la incorporación de puntales de perfiles HN o IN a la altura de la visera para dar mayor soporte lateral a la compuerta del buzón. Las dimensiones tanto de la visera como del puntal son parte del estudio de cada caso ya que dependen del daño provocado y su locación.



Piques Semi vacíos



Reforzado

CRITERIOS DE DISEÑO ESTRUCTURA BUZÓN LATERAL

Criterio nº4: Disposición de plataformas seguras.

Disponer de plataformas seguras que el diseño permita el acceso seguro al personal de operaciones durante las labores de reducción y reparación.

