



FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DEL RELLENO HIDRÁULICO
EN CÁMARAS DE MINAS SUBTERRÁNEAS COMO UN
DEPÓSITO DE RELAVES.**

CASO: MINA CONDESTABLE. MALA, CAÑETE

PRESENTADA POR

ALITHU KAREN ARAUJO FERNÁNDEZ

ANDREA PATIÑO PATRONI MÁRQUEZ

ASESOR

FREDDY EMERSON VELA CÁCERES

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

LIMA – PERÚ

2017



Reconocimiento - No comercial - Sin obra derivada
CC BY-NC-ND

Los autores permiten que se pueda descargar esta obra y compartirla con otras personas, siempre que se reconozca su autoría, pero no se puede cambiar de ninguna manera ni se puede utilizar comercialmente.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



USMP
UNIVERSIDAD DE
SAN MARTIN DE PORRES

**FACULTAD DE
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DEL RELLENO
HIDRÁULICO EN CÁMARAS DE MINAS SUBTERRÁNEAS
COMO UN DEPÓSITO DE RELAVES. CASO: MINA
CONDESTABLE. MALA, CAÑETE**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA CIVIL

PRESENTADA POR

**ARAUJO FERNÁNDEZ, ALITHU KAREN
PATIÑO PATRONI MÁRQUEZ, ANDREA**

LIMA – PERÚ

2017

Dedico la presente tesis a Dios, a mi mamá Carmen Rosa Fernández Pinto y mi hermana Cynthia Paola Araujo Fernández, porque sin su apoyo incondicional no hubiera sido posible afrontar con éxito este arduo camino hacia el título profesional.

Alithu Karen Araujo Fernández

Dedico la presente tesis a mis padres Elsa Márquez Hostos y Alfredo Patiño Patroni Vassallo, por su gran apoyo durante todos estos años. Este logro no sólo es mío sino también de ustedes.

Andrea Patiño Patroni Márquez

Agradecemos a nuestros profesores Ingeniero Alexis Samohod Romero e Ingeniero Juan Manuel Oblitas Santa María por ayudarnos y guiarnos en la elaboración de la tesis.

A la Compañía Minera Condestable S.A. por el apoyo e información técnica para poder desarrollar esta tesis.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	xvi
CAPÍTULO I: PLANEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 Determinación de la Realidad Problemática	1
1.2 Formulación del Problema	2
1.2.1 Problema General	2
1.2.2 Problemas Específicos	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Justificación e Importancia	3
1.4.1 Justificación	4
1.4.2 Importancia	4
1.5 Alcances y Limitaciones	4
1.5.1 Alcances	4
1.5.2 Limitaciones	5
1.6 Viabilidad del Estudio	5

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	6
2.1 Antecedentes de la Investigación	6
2.2 Bases Teóricas	9
2.2.1 Compañía Minera Condestable S.A.	9
2.2.2 Proceso de explotación minera	12
2.2.3 Procesos de Planta	17
2.2.4 Relaves mineros	28
2.2.5 Relleno Hidráulico	31
2.2.6 Componentes	38
2.2.7 Cierre de Mina	56
2.3 Definición de Términos Básicos	59
2.4 Formulación de la Hipótesis	62
2.4.1 Hipótesis General	62
2.4.2 Hipótesis Específicas	62
CAPÍTULO III: MÉTODO	64
3.1 Tipo de Investigación	64
3.2 Nivel de la investigación	64
3.3 Diseño de la investigación	65
3.4 Variables	65
3.4.1 Variable independiente	65
3.4.2 Variable dependiente	65
3.5 Operacionalización de variables	66
3.6 Población y muestra	67
3.6.1 Población	67
3.6.2 Muestra	67
3.7 Técnicas de investigación	67
3.8 Instrumentos de Recolección de Datos	68

3.9	Procesamiento y Análisis Estadístico de los Datos	69
3.10	Cronograma de actividades	69
3.11	Presupuesto	71
	CAPÍTULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS	72
4.1	Componentes técnicos	72
4.1.1	Cámara Subterránea	72
4.1.2	Tubería HDPE de 4 pulgadas	75
4.1.3	Válvulas y Accesorios	79
4.1.4	Tapón de Concreto	79
4.2	Costo	91
4.2.1	Presupuesto de aplicación de relleno hidráulico en cámara subterránea	91
4.2.2	Presupuesto de aplicación de relleno rocoso en cámara subterránea	92
4.3	Cronograma de Ejecución	93
4.4	Vida útil del depósito de relaves superficial	93
	CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y APLICACIONES	95
5.1	Discusión	95
5.1.1	Interpretación	95
5.1.2	Análisis	97
5.2	Aplicación	100
	CONCLUSIONES	101
	RECOMENDACIONES	103
	FUENTES DE INFORMACIÓN	104
	ANEXOS	108

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Circuito de Molienda	21
Tabla 2. Circuito de Flotación	24
Tabla 3. Criterios para el Diseño de Tapones Permanentes (adaptados de Auld, 1983, Chekan 1985 y TSS, 1999)	50
Tabla 4. Resistencia al Corte y Gradientes Hidráulicas de Diseño para Tapones de Túnel (según Benson, 1989)	53
Tabla 5. Requisitos para Concretos Expuestos a Sulfatos	55
Tabla 6. Contenido Máximo de Ión Cloruro para Prevenir la Corrosión	55
Tabla 7. Relaciones Agua/Cemento Máximas para Condiciones Especiales de Exposición	56
Tabla 8. Operacionalización de la Variable Independiente	66
Tabla 9. Operacionalización de la Variable Dependiente	66
Tabla 10. Cronograma de Actividades	70
Tabla 11. Presupuesto	71
Tabla 12. Características de la Cámara Subterránea	74
Tabla 13. Características de la Cámara Subterránea	80
Tabla 14. Características del Macizo Rocoso – Lava Andesítica	80
Tabla 15. Características Adicionales para el Diseño	80

Tabla 16. Resumen de Dimensiones de Tapón Calculado	91
Tabla 17. Presupuesto de Aplicación de Relleno Hidráulico en Cámara en Cámara Subterránea de 24000 m ³ . Ubicación: Mina Condestable, -95 msnm.	92
Tabla 18. Presupuesto de Aplicación de Relleno Rocoso en Cámara Subterránea de 24000 m ³ Utilizando Relleno Rocoso. Ubicación: Mina Condestable, -95 msnm.	93
Tabla 19. Comparativo de Presupuestos para Cámara Subterránea de 24000m ³	96

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Mapa Ubicación Cía. Minera Condestable S.A. – Mala, Cañete	9
Figura 2. Mapa Minera Polimetálica Mala, Cañete, Departamento de Lima	10
Figura 3. Evolución de Tratamiento de Toneladas por Día	11
Figura 4. Ubicación de las Unidades Mineras Condestable y Raúl	11
Figura 5. Método de Minado <i>Sublevel Open Stopping</i>	12
Figura 6. Método de Minado Taladros Largos Paralelos	13
Figura 7. Método de Minado Taladro Largo Abanico o Anillo	13
Figura 8. Método de Minado VCR para Chimeneas	14
Figura 9. Método de Minado Room and Pillar	14
Figura 10. Método de Minado Shrinkage Stopping	15
Figura 11. Método de Minado Corte y Relleno Ascendente	16
Figura 12. Flow Sheet Procesos de Planta Concentradora	17
Figura 13. Zona de Abastecimiento de Mineral Chancado Primario – Rompe Bancos	18
Figura 14. Chancadora Primaria Sandvik – Almacenamiento Chancado Grueso	19
Figura 15. Chancado Secundario	20

Figura 16. Chancado Terciario	20
Figura 17. Zarandas Vibradoras TAYCAN	20
Figura 18. Tolvas de Molinos 6,500 TM	21
Figura 19. Molino de Bolas N° 3 - COMESA	22
Figura 20. Interior del Molino N° 3 – Alimentación de Agua	23
Figura 21. Circuito de Flotación 12 Celdas OK 38 - OUTOKUMPU	25
Figura 22. Flotación de Concentrado de Cu Cabeza	25
Figura 23. Espesador de la Pulpa de Cu Cabeza	26
Figura 24. Tambor de Filtrado – DORR OLIVER	26
Figura 25. Concentrado de Cu para Despachar	27
Figura 26. Transporte de Concentrado 250 Toneladas	27
Figura 27. Cancha de Relave N°4	28
Figura 28. Espesador de Relave	28
Figura 29. Depósito de Relaves Mineros	29
Figura 30. Ciclo de Origen de los Relaves	30
Figura 31. Efecto del Agua en el Relleno Hidráulico	37
Figura 32. Tubería HDPE en Planta de Fabricación	39
Figura 33. Accesorios de Compresión	40
Figura 34. Acople Vitaulic de Hierro	41
Figura 35. Conexiones de HDPE Moldeadas	41
Figura 36. Accesorios de HDPE para Electrofundición	42
Figura 37. Back Up Rings en Hierro Dúctil	43
Figura 38. Back Up Rings en Hierro Acero Inoxidable	43
Figura 39. Hierro Dúctil Encapsulado en Polipropileno	44
Figura 40. Tapones Indentados	45
Figura 41. Tapón de Concreto en Cuña	46
Figura 42. Tapón de Lados Paralelos	46

Figura 43. Tapones Cilíndricos de Concreto, de Lados Paralelos Sin Refuerzo Interior	47
Figura 44. Secuencia de Desarrollo del Proyecto	67
Figura 45. Vista 3D de las Cámaras Subterráneas Localizadas en Mina Condestable	73
Figura 46. Ubicación de la Cámara Subterránea Seleccionada	73
Figura 47. Cámara Subterránea Seleccionada	74
Figura 48. Dimensiones del Ingreso de la Cámara Subterránea	75
Figura 49. Cálculo de un Tubo Parcialmente Lleno	76
Figura 50. Anclaje en roca para tapón indentado	89
Figura 51. Detalle de Tapón Indentado con Sistema de Tuberías	96

ÍNDICE DE ANEXOS

	Página
Anexo N° 1: Matriz de Consistencia	109
Anexo N° 2: Plano General de la Mina Condestable	111
Anexo N° 3: Plano de Ubicación de Cámara Subterránea de 24000 m ³	113
Anexo N° 4: Plano De Bombeo de Agua Recuperada	115
Anexo N° 5: Diagrama Unifilar de Bombeo de Agua	117
Anexo N° 6: Bombeo de Agua Mina Condestable	119
Anexo N° 7: Esquema de Disposición de Relaves	121
Anexo N° 8: Plano de Tapón Hermético de Concreto Armado	123
Anexo N° 9: Información Técnica de Depósito de Relaves Superficial	124
Anexo N° 10: Análisis de Precios Unitarios	125
Anexo N° 11: Cronogramas de Ejecución	131

RESUMEN

Esta investigación es una propuesta para resolver el problema de la falta de aprovechamiento de relaves a beneficio de las empresas mineras. Es de tipo aplicada, de enfoque cuantitativo y diseño observacional, prospectivo y transversal. La variable independiente es la cámara de minas subterráneas como depósito de relaves y la variable dependiente es el beneficio a la mina al usar la cámara subterránea.

Se hallaron los componentes para la aplicación del relleno hidráulico, tales como el tapón de concreto armado y la red de tuberías en interior mina. Se analizó el costo de ejecución que es de menor precio comparado con la aplicación del relleno convencional de uso de relleno rocoso, además que el tiempo de ejecución es más rápido y finalmente se calculó la extensión del depósito de relaves superficial, que maximiza la vida útil.

Como resultado, se encontró que la aplicación del relleno hidráulico en cámaras subterráneas como depósito de relaves genera beneficios en los aspectos técnico, económico y de tiempo a la mina Condestable. Por lo tanto, se aprovecha el relave minero.

Palabras clave: Relleno Hidráulico, Relaves, Cierre de Mina, Tapón de Concreto.

ABSTRACT

This investigation is a proposal to solve the problem of the lack of usage of tailings for the benefit of mining companies. This is an applied type research, of quantitative approach, an observational, prospective and transversal design. The independent variable is the underground mine chamber as a tailings deposit and the dependent variable is the benefit to the mine when using the underground chamber.

As a result, the components for the application of the hydraulic filling were the reinforced concrete plug and the network of pipes in the mine interior. The cost of execution was analyzed to be of lower price compared to the application of the conventional fill of use of rocky fill. In addition, the execution time being faster than the conventional use. Lastly, the extension of the tailings deposit surface, which maximizes the useful life, was calculated.

In conclusion, the application of hydraulic filling in underground chambers as a tailings deposit makes benefits in the technical, economic and time aspects of the Condestable mine. Therefore, the mining tailings are used to the mining companies' advantage.

Keywords: Hydraulic Filling, Tailings, Mine Closure, Concrete Plug.

INTRODUCCIÓN

Es de conocimiento general que la minería en el Perú juega un rol importante en cuanto a la economía, especialmente en las exportaciones. El proceso por el cual los metales preciosos son recuperados genera desechos tóxicos y que la mayoría de empresas mineras los depositan a cielo abierto en presas diseñadas para tal fin.

Cada vez que una minera amplía la capacidad de tratamiento de minerales, se incrementa también el volumen de relaves por dicho proceso. Al suceder esto, uno de sus impactos principales es la reducción de la vida útil de los depósitos de relaves, lo cual genera a las mineras problemas como recrecer los depósitos o diseñar y construir nuevos.

Para tratar de mitigar y evitar estos problemas, se busca soluciones de uso y aprovechamiento de los relaves generados, una de estas es el sistema de relleno hidráulico, que consiste de una red de tuberías que trasladan los relaves hasta las cámaras subterráneas en las cuales ya no se laborarán o profundizarán, sellándolas con tapones de concreto y a la vez cumpliendo con el cierre de mina progresivo.

En esta investigación se analizó los beneficios que la Compañía Minera Condestable S.A. obtendría si implementara este sistema. Es por ello que se definió como objetivo general encontrar los beneficios que la mina

Condestable gana depositando los relaves en las cámaras subterráneas al aplicar el relleno hidráulico.

Es así que en el Capítulo I se presenta el planeamiento del problema lo cual conlleva a la determinación del objetivo general y objetivos específicos. Se justifican la importancia de esta investigación así como también se determinan los alcances y limitaciones

En el Capítulo II se abordan los aspectos teóricos como datos de la Compañía Minera Condestable S.A., su historia, el tipo de minado que posee, su proceso de tratamiento del mineral, entre otros. Además se presenta el marco teórico, dentro de este se encuentran los antecedentes de la investigación, las bases teóricas, el marco conceptual y la hipótesis.

En el Capítulo III se aborda la metodología, se presenta el tipo de la investigación, su enfoque, el tipo de estudio, el nivel, el diseño, las variables, la población y muestra; técnicas de investigación e instrumentos de recolección de datos.

En el Capítulo IV se abordan las pruebas y resultados para cumplir los objetivos determinados. Además, se muestran los resultados obtenidos.

En el Capítulo V la discusión y aplicaciones, se examinan los resultados obtenidos en el capítulo anterior y se definen cómo estos contrastan con las hipótesis formadas.

Finalmente, se tiene las conclusiones y recomendaciones, para determinar si se cumplieron los objetivos y cómo profundizar más la investigación realizada.

CAPÍTULO I: PLANEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Determinación de la Realidad Problemática

La problemática inicia cuando al extraer mineral en una operación minera, se dejan grandes vacíos que son necesarios rellenar con materiales que permitan estabilizar las paredes de los tajos y continuar en otros niveles. Al rellenar estas cámaras subterráneas, generalmente no se aprovechan los recursos existentes en la mina.

Para rellenar las cámaras subterráneas, convencionalmente se usa el relleno rocoso, el cual genera costos elevados, aumenta el tránsito de volquetes en interior de la mina, por lo tanto ocasiona retrasos en el traslado de mineral a la planta concentradora, entre otros.

El tiempo de ejecución del relleno rocoso en cámaras subterráneas es extenso, debido a que tiene un rendimiento bajo, ya que al transportar el material por medio de volquetes, deben adecuarse al tránsito que existe en el interior de la mina, además que el paso de estos desgasta las vías.

Los relaves, desechos generados después de procesar el mineral, son colocados en el depósito superficial de relaves, además estos afectan el medio ambiente cercano debido a ser depositados a cielo abierto. Se deben

tomar las acciones posibles para reducir su disposición en la superficie y así también extender vida útil del depósito superficial.

Es por todo esto mencionado anteriormente que se ha planteado la aplicación de relleno hidráulico en la mina Condestable, la cual se beneficiaría al aminorar sus costos y tiempo de ejecución, además de extender la vida útil a sus depósitos superficiales. Este tipo de relleno está compuesto por componentes que deben ser diseñados y calculados para su buen funcionamiento.

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema General

¿De qué maneras se beneficia la mina Condestable con la aplicación del relleno hidráulico en las cámaras subterráneas como un depósito de relaves?

1.2.2 Problemas Específicos

1. ¿De qué manera se beneficia la mina Condestable con la aplicación del relleno hidráulico, al determinar los componentes técnicos para utilizar las cámaras subterráneas como depósito de relaves?
2. ¿De qué manera se beneficia la mina Condestable con la aplicación del relleno hidráulico, al comparar sus costos de ejecución con los costos de ejecución aplicando relleno rocoso en cámaras subterráneas?
3. ¿De qué manera se beneficia la mina Condestable con la aplicación del relleno hidráulico, al comparar su cronograma de ejecución con cronograma de ejecución utilizando el relleno rocoso en cámaras subterráneas?
4. ¿De qué manera se beneficia la mina Condestable con la aplicación del relleno hidráulico, al calcular la extensión de vida útil del depósito

de relaves superficial con la aplicación del relleno hidráulico en cámaras subterráneas como depósito de relaves?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Encontrar los beneficios que la mina Condestable obtiene depositando los relaves en las cámaras subterráneas al aplicar el relleno hidráulico.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Determinar los componentes técnicos de la aplicación del relleno hidráulico en cámaras subterráneas como depósito de relaves para hallar beneficios a la mina Condestable.
2. Comparar los costos de la aplicación del relleno hidráulico con la aplicación de relleno rocoso en cámaras subterráneas para hallar beneficios a la mina Condestable.
3. Comparar el cronograma de ejecución de la aplicación del relleno hidráulico con la aplicación de relleno rocoso en cámaras subterráneas para hallar beneficios a la mina Condestable.
4. Calcular la extensión de vida útil del depósito de relaves superficial al aplicar relleno hidráulico en cámaras subterráneas como depósito de relaves para hallar beneficios a la mina Condestable.

1.4 Justificación e Importancia

Esta tesis se elaboró con el fin de revelar la importancia del relleno hidráulico en las minas subterráneas, encontrando los diferentes beneficios que aporta dicho relleno:

1.4.1 Justificación

- **Justificación ambiental:** Maximizar la vida útil de los depósitos de relaves, mitigando el impacto ambiental.
- **Justificación económica:** Reducir los costos operativos de la mina, brindando otra alternativa para el llenado de los vacíos de las cámaras subterráneas.

1.4.2 Importancia

- **Importancia Social:** Tiene importancia social debido a que las comunidades cercanas a las unidades mineras exigen que se ejecuten los proyectos con responsabilidad social y ambiental.
- **Importancia Ambiental:** En este caso, aplicando el relleno hidráulico en la mina Condestable se destacarían la disminución del material tóxico que se deposita en la superficie del entorno, mejorando los campos de pastoreo, así como los de cultivo.

1.5 Alcances y Limitaciones

1.5.1 Alcances

- Se llegaron a identificar los diferentes beneficios que conlleva el relleno hidráulico en las cámaras de minas subterráneas como un depósito de relaves. Estos beneficios son técnico, económico y de tiempo.
- Se tomaron en cuenta como referencia otros proyectos de relleno hidráulico realizados en otras mineras del Perú.
- Se determinaron los componentes para el transporte de relleno hidráulico hacia la cámara subterránea y para el cierre de mina progresivo. En este caso, se diseñó el componente

civil, el tapón de concreto, para el cierre de la cámara como depósito de relaves.

1.5.2 Limitaciones

Durante el desarrollo de la presente investigación no se presentaron dificultades significativas en relación al material de información bibliográfica actualizada, y especializada. Las limitaciones teóricas o metodológicas fueron las pocas tesis en existencia con escaso rigor metodológico que se hayan realizado anteriormente.

1.6 Viabilidad del Estudio

- **Viabilidad técnica:** Se obtuvo acceso a información técnica y acceso a tecnología necesaria para poder analizar cada aspecto de beneficio del relleno hidráulico en las cámaras subterráneas. Para el caso de diseño se utilizó la guía de diseño de tapones del Ministerio de Minas y Energía del Perú; para las comparaciones económicas se utilizaron presupuestos existentes y pasados proporcionados por la Compañía Minera Condestable S.A.; para el desarrollo de los cronogramas se usó el programa MS Project y se tuvo la oportunidad de visualizar y analizar la ejecución de una obra similar.
- **Viabilidad económica:** Las autoras financiaron la investigación realizada. La Compañía Minera Condestable S.A. apoyó con los permisos y movilidad para las visitas a campo.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la Investigación

Paucar (2015), realizó el estudio de tesis: “Diseño de tapones herméticos en labores de remediación pasivo ambiental para la mina "Recuperada" - Huancavelica.”

Este estudio fue basado en la interrogante: ¿Cómo diseñar un tapón hermético para la Remediación de Pasivos Ambiental de la Mina Recuperada-Huancavelica?, la problemática básicamente radica en la existencia de diversos componentes de pasivos ambientales - bocaminas con emisión de efluentes no tratados hasta la fecha, los cuales representan un riesgo ambiental; generando consecuencias para el entorno natural, humano y socioeconómico en la zona de influencia. Con el propósito de mantener un alto estándar en el diseño de tapones y compuertas, el Ministerio de Energía y Minas del Perú, solicitó que se desarrolle un enfoque estandarizado que guie los diseños enviados por las compañías mineras, de conformidad con la Ley de Cierre de Minas y su Reglamento.

Finalmente Paucar (2015) concluye que el diseño del tapón hermético propone una estabilidad física, con la reducción del riesgo ambiental a través

de la ubicación óptima del tapón para la remediación del pasivo ambiental y sea saludable y adecuado con la preservación paisajística.

Que el riesgo ambiental que presenta el pasivo ambiental para su entorno de ubicación supera la caracterización leve, la ubicación óptima del tapón hermético determina el control de falla por fractura hidráulica o levantamiento hidráulico en la remediación del pasivo ambiental y que la ubicación óptima del tapón hermético determina el control de falla por fractura hidráulica o levantamiento hidráulico en la remediación del pasivo ambiental.

Huamán (2007) realizó el estudio de tesis: "Aplicación de relleno hidráulico en la Mina Jimena de Compañía Minera Poderosa S.A."

Su investigación está enfocada en la pregunta ¿Cómo disminuir el problema de inestabilidad de las labores de explotación de la Veta Jimena originado por los espacios vacíos dejados después de realizar el minado del mineral? Con la finalidad de mantener la estabilidad de la roca en la recuperación de pilares, se han ejecutado una serie de análisis en el macizo rocoso considerando: calidad del macizo rocoso, tipo de sostenimiento, ancho de excavación, perforación y voladura.

La roca presenta diferentes tipos de discontinuidades como son: zonas de corte, diaclasas y fracturas, contactos litológicos, relleno de las discontinuidades, fallas, etc. Estos rasgos estructurales presentan un determinado comportamiento frente a las operaciones de minado.

Se llega a la conclusión que para minimizar los problemas de inestabilidad del macizo rocoso producto de los espacios vacíos dejados por la explotación del yacimiento, es necesario rellenar dichas aberturas, para lo cual se aprovechará como agregado del relleno hidráulico el desmonte proveniente de la mina, consiguiendo al mismo tiempo reducir el impacto ambiental negativo producido por la acumulación de desmonte en superficie.

Vives (2015) realizó el estudio de tesis: "Evaluación técnica y económica de una mina subterránea utilizando relleno cementado".

Su objetivo fue realizar diseño minero comparativo entre una mina subterránea que utilice rellenos cementados y otra que no. Estos diseños tienen que ser geomecánicamente estables, no pueden producir subsidencia en superficie y deben maximizar la recuperación minera.

Debido a que la minería en Chile y en el mundo está sufriendo un agotamiento de sus grandes yacimientos superficiales; esto implica que el uso de métodos de extracción subterráneos se intensifique. Este traslado desde minería de tajo abierto a depósitos subterráneos está sujeto a un aumento de las investigaciones orientadas a mejorar estos métodos, para hacer explotables yacimientos que en el pasado simplemente eran descartados por altos costos de inversión y operacionales o por problemas de estabilidad geomecánica.

Y llega a la conclusión que, evaluando las ventajas y desventajas del uso de relaves cementados como relleno de minas subterráneas, se comprueba que la aplicación de esta tecnología en una mina de cobre chilena es factible, siendo además posible implementarla en yacimientos de otros minerales y en otros lugares de Sudamérica. Esta tecnología provoca que el negocio minero sea más sustentable incrementando los beneficios económicos y la vida útil de la explotación, además de reducir el tonelaje de relaves que debe conducirse y depositarse en tranques de relaves. Esto último implica una disminución en inversión, manejo y cierre de los depósitos de residuos mineros como también una disminución de los riesgos asociados a estos depósitos (como la contaminación directa del suelo, agua y aire por derrames y por el propio tranque).

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Minera Condestable

Compañía Minera Condestable S.A. se encuentra ubicada en el Km 90 de la Antigua Panamericana Sur en el paraje de Bujama Alta, Distrito de Mala, Provincia de Cañete y Departamento de Lima, al sur de la ciudad de Lima y una altitud promedio de 250 msnm. Sus coordenadas WGS84 – 18S son:

- Este 327438
- Norte 8595536

Objetivos 2017:

- Tratamiento: 2'471,000 TM con 0.89% de Cu.
- Producción de Concentrado: 84,524 TM con 23.3% Cu.
- Finos pagables: 18,792 TMF de Cu.

Figura 1. Mapa Ubicación Cía. Minera Condestable S.A. – Mala, Cañete



Fuente: Google Earth (2017)

a) Historia

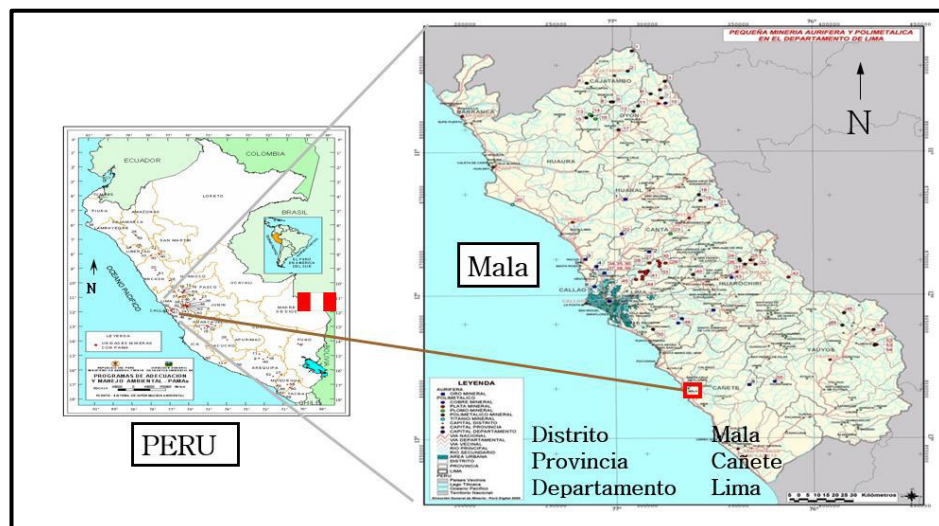
De acuerdo a su cronología de operación, la actividad principal de la Compañía Minera Condestable S.A. es la obtención de concentrado de cobre (sulfuros primarios de cobre), operación que se viene realizando desde inicio su operación en 1962 y producción en 1964 con 600 TMSD (Toneladas

Métricas Secas Diarias) con una Ley de mineral de cabeza de 2.5% Cu con la empresa Nipón Mining Co. Luego fue nacionalizado por el Gobierno Peruano en 1976 en el gobierno de Velasco Alvarado y retornado a la propiedad privada en 1992 con el Grupo SERFIN-CORMIN.

Después, TRAFIGURA inicia la administración de CMC en 1997, iniciando operaciones en Mina Raúl en 1999 en cesión, más adelante esta es comprada a Hochschild Mining en el 2010. La explotación subterránea de sus minas Raúl y Condestable está en una proporción de 85% y 15% respectivamente, la calcopirita representa un 93% de sus sulfuros de Cobre, las menas sin valor económico como los fedespatos, afiboles y cuarzos que tienen valores altos de work index representan el 74% y los minerales con contenido en Fe presentes representan casi 8.5% donde se tiene presencia de Pirita, Pirrotita y Magnetita.

Finalmente, Southern Mining Peaks adquiere el 98.68% de la participación en CMC incrementando la capacidad operativa en forma secuencial tratando en la actualidad 7000 TMSD con una Ley de mineral de cabeza de 0.89% de Cu con contenidos de Oro y Plata.

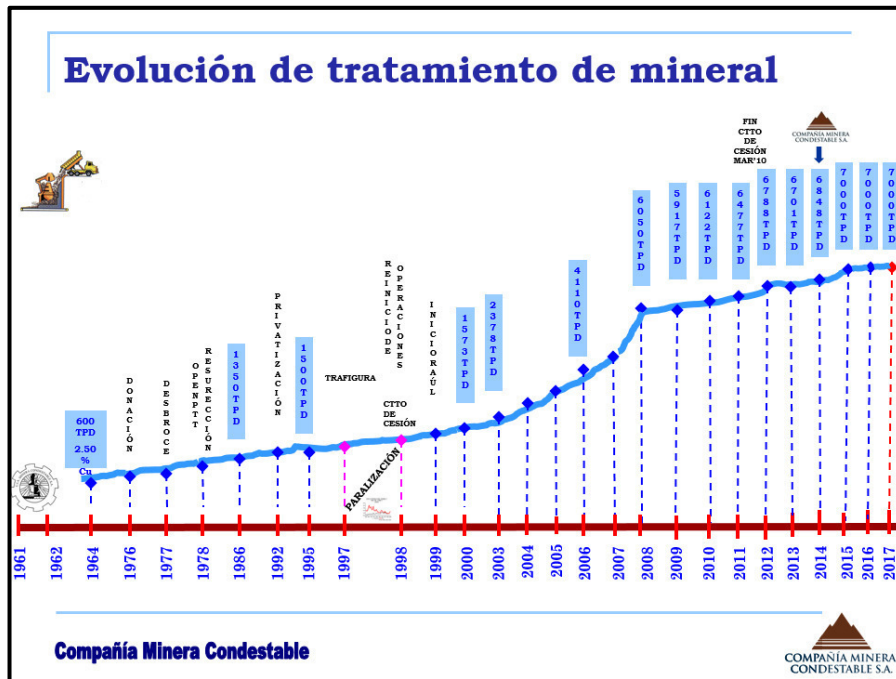
Figura 2 Mapa Minera Polimetálica Mala, Cañete, Departamento de Lima



Fuente: Área de Planeamiento e Ingeniería, Compañía Minera Condestable S.A. (2017)

b) Producción Histórica

Figura 3. Evolución de Tratamiento de Toneladas por Día

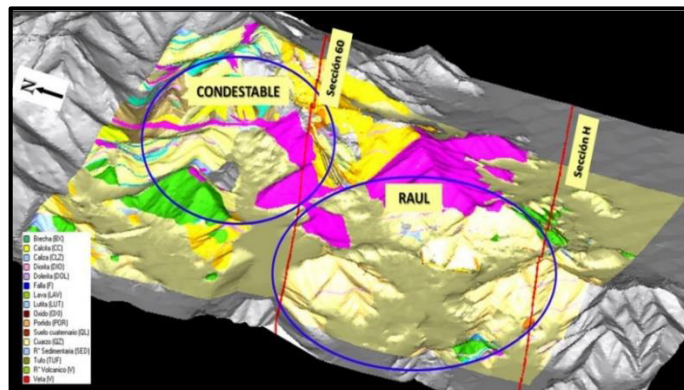


Fuente: Área de Planeamiento e Ingeniería, Compañía Minera Condestable S.A. (2017)

c) Operaciones Subterráneas

Cía. Minera Condestable S.A. tiene a la actualidad dos unidades mineras de las cuales esta conformadas por U.M. Condestable y U.M. Raúl.

Figura 4. Ubicación de las Unidades Mineras Condestable y Raúl



Fuente: Área de Planeamiento e Ingeniería, Compañía Minera Condestable S.A. (2017)

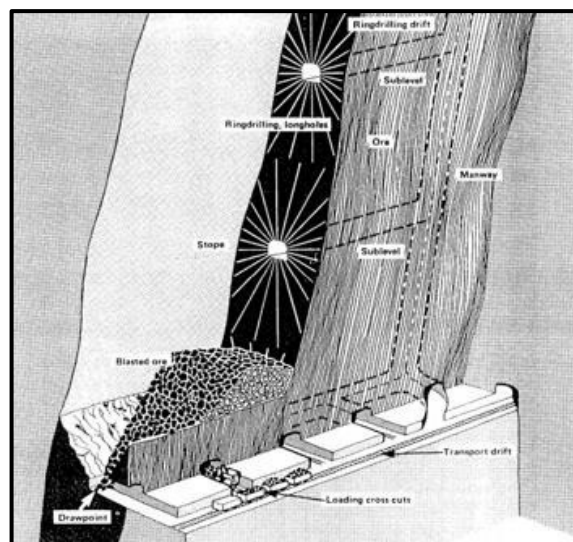
2.2.2 Proceso de explotación minera

Según Villaescuasa (2014), entre los diferentes métodos de minado, tenemos como principales o los más usados los siguientes:

a) *Sublevel Open Stopping*

El método *Sublevel Open Stopping* o Subpaso abierto, método de explotación masiva, para cuerpos de grandes dimensiones, es un método no selectivo, preferentemente en cuerpos con rocas cajas competentes. Se utiliza relleno si hace de forma ascendente. Este método se aplica preferentemente en yacimientos de forma tabular verticales o subverticales de gran espesor, por lo general superior a 10 m. Es deseable que los bordes o contactos del cuerpo mineralizados sean regulares. También es posible aplicarlo en yacimientos masivos o mantos de gran potencia, subdividiendo el macizo mineralizado en caserones separados por pilares, que posteriormente se pueden recuperar. Tanto la roca mineralizada como la roca circundante debe presentar buenas condiciones de estabilidad; vale decir, deben ser suficientemente competentes o autosoportantes.

Figura 5. Método de Minado Sublevel Open Stopping

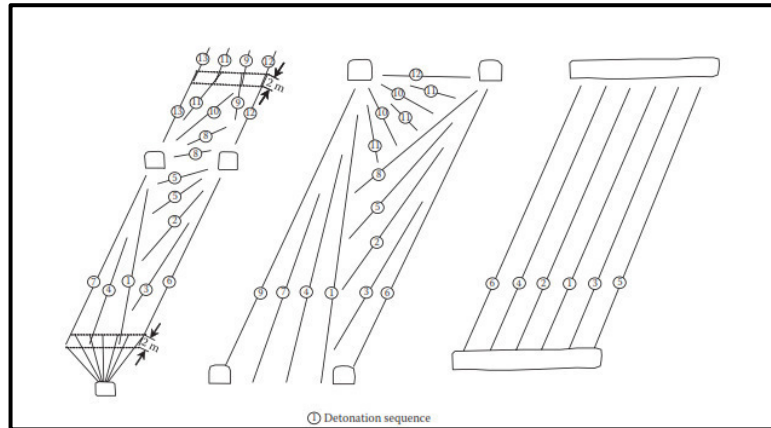


Fuente: Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping

- Taladros Largos Paralelos

Son taladros que se hacen en paralelo a cajas de tajo.

Figura 6. Método de Minado Taladros Largos Paralelos

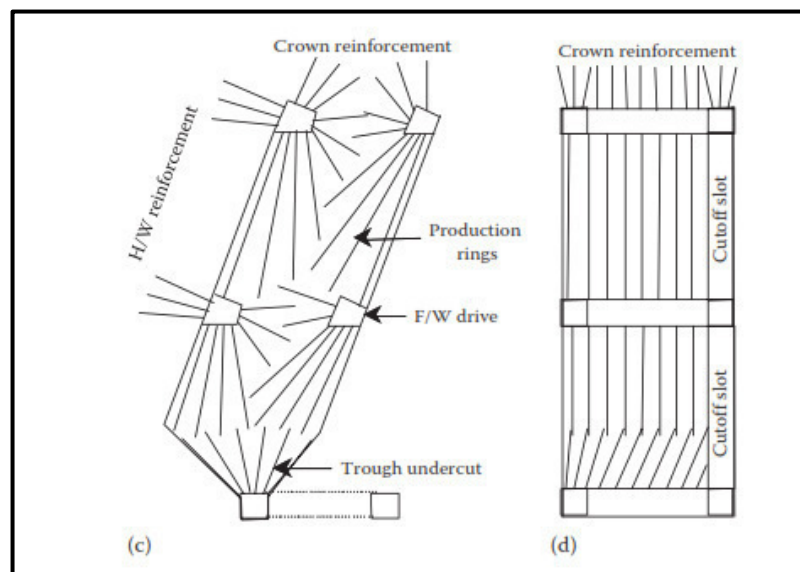


Fuente: Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping

- Taladros Largos Abanico o Anillo

Son de forma radial a la galería de perforación y lo delimitan las cajas del cuerpo mineralizado.

Figura 7. Método de Minado Taladro Largo Abanico o Anillo

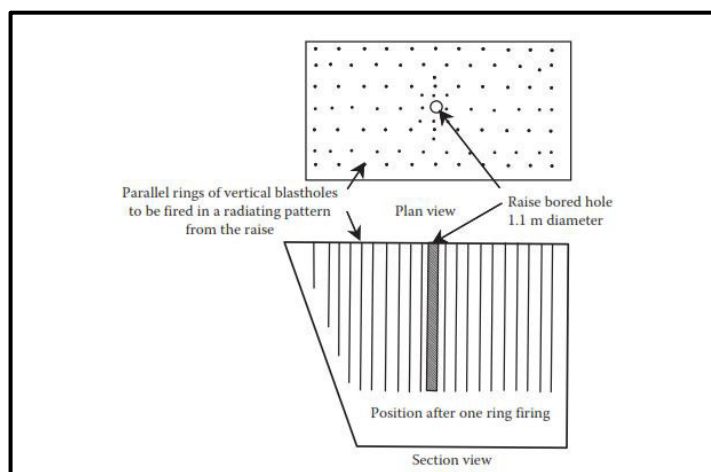


Fuente: Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping

- VCR (*Verticals Crater Retreat*)

El método de *Verticals Crater Retreat* o también más conocido como perforación paralela de taladros de perforación para chimeneas, la voladura se realiza de forma ascendente de arriba hacia abajo siempre.

Figura 8. Método de Minado VCR para Chimeneas

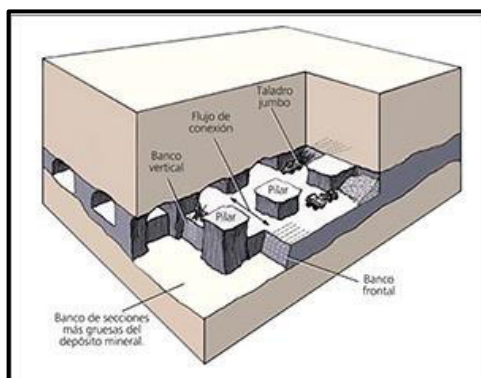


Fuente: Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping

b) *Room and Pillar*

El método de explotación *Room and Pillar* o Cámaras y Pilares consiste, como su nombre lo indica en la explotación de caserones separados por pilares de sostenimiento del techo. Este método es aplicado ampliamente, y en los últimos años se ha desarrollado bastante debido a su bajo costo.

Figura 9. Método de Minado *Room and Pillar*

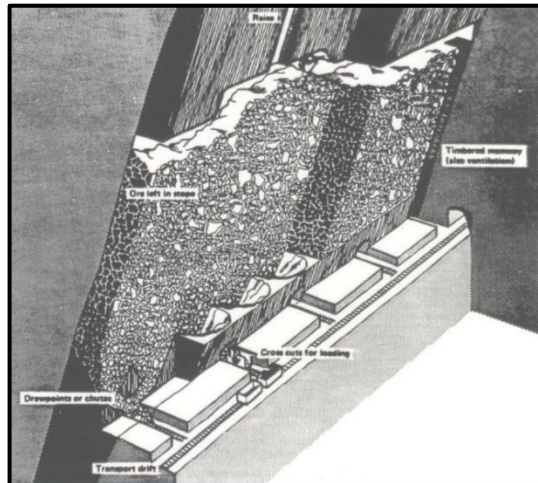


Fuente: Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping

c) *Shrinkage Stopping*

El método de minado para vetas se hace cortes de mineral y se va acumulando la carga hasta que se completa el minado y al final jala toda la carga.

Figura 10. Método de Minado *Shrinkage Stopping*



Fuente: Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping

d) Corte y Relleno Descendente

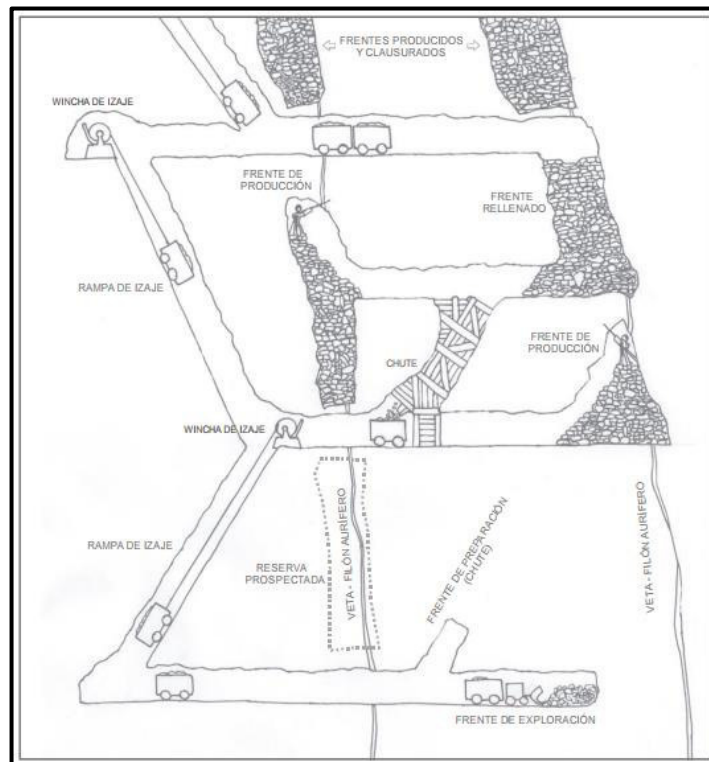
Según Quispe (2013), para aplicar este método se comienza a partir de una galería en la zona inferior del frente de tajeo, se define el cubo de explotación y las caras libres, además, ya que se realizarán tajeos amplios y se dejarán pocos pilares o pilares más delgados, se dispondrá de un plan de relleno inmediato en forma de columnas o “pircas o pircado continuo” para asegurar la estabilidad del techo, por último en el planeamiento mina se dispondrá que al termino de estos tajeos, estas labores deberán ser clausuradas definitivamente por lo que también son diseñadas alejadas de las labores principales.

e) Corte y Relleno Ascendente

Quispe (2013) describe que este método se ejecuta en las zonas profundas de la operación, posteriores a la “caída de los mantos”, en donde

la explotación se realiza en vetas angostas con más de 30° grados de buzamiento, para lo cual nos ceñimos al manual de minería, utilizando dos labores de corte, una inferior y otra superior que definen la veta, estas son tajeadas desde la labor inferior a la superior, dejando la veta de cuarzo aurífero al costado derecho para realizar las “quebras” de mineral, e inmediatamente proceder con el relleno respectivo con desmontes para ascender una cota más para que el grupo de perforación tenga piso para su siguiente faena. En este método se consideran puentes y chutes para el carguío de mineral, el cual es explicado en la siguiente figura.

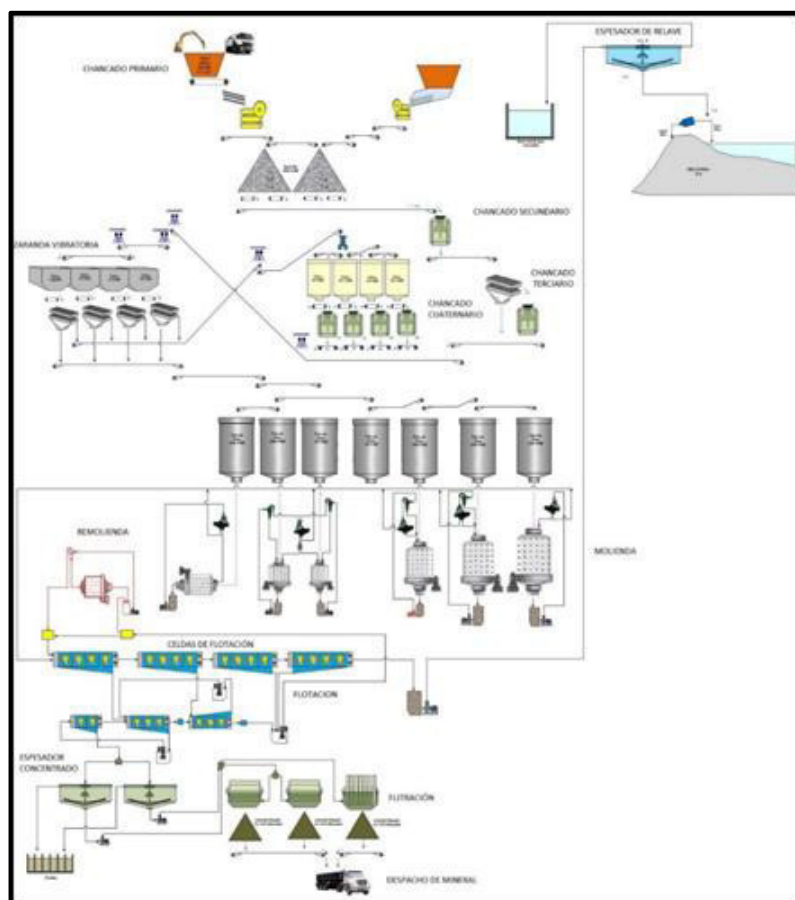
Figura 11. Método de Minado Corte y Relleno Ascendente



Fuente: Avenilo Quispe Aguilar

2.2.3 Procesos de Planta

Figura 12. Flow Sheet Procesos de Planta Concentradora



Fuente: Área de Planeamiento e Ingeniería, Compañía Minera Condestable S.A. (2017)

a) Descripción del proceso Metalúrgico

En el 2009, Venegas describe los procesos de la Planta concentradora de la Compañía Minera Condestable S.A.

- Abastecimiento y Almacenamiento

El mineral es acarreado en volquetes de 30 TM de capacidad, desde las diferentes labores de interior mina hasta el chancado primario haciendo un recorrido que varía de 2 a 3 Kilómetros.

Figura 13. Zona de Abastecimiento de Mineral Chancado Primario – Rompe Bancos



Fuente: Elaboración Propia

- **Chancado Primario y Almacenamiento**

El mineral se descarga en una tolva de 100 toneladas de capacidad que cuenta con una parrilla de 24" de abertura y con un rompe-bancos marca Sandvik modelo BB 7600, el mineral almacenado en la tolva es alimentado mediante una apron feeder marca Kolberg – Pioner hacia un grizzly vibratorio marca Sandvik de 5" de abertura, que alimenta a una chancadora de quijada Sandvik CJ – 615 que opera con un set de 5", se cuenta también con un circuito paralelo que tiene un grizzly vibratorio y una chancadora C - 110 como equipos principales. El producto de chancado primario de tamaño K80 igual a 5" es almacenado en el stock pile de gruesos que tiene una capacidad de TMH.

Figura 14. Chancadora Primaria Sandvik – Almacenamiento Chancado Grueso



Fuente: Elaboración Propia

- **Chancado Fino**

El mineral almacenado en el stock pile se alimenta por medio de fajas transportadoras a la chancadora cónica HP 500 ST (Chancado Secundario) que opera con un set de 35 – 38 mm. El producto de chancado secundario que tienen un tamaño entre 1.0 – 2.0 pulgadas es alimentado por medio de fajas transportadoras a la Zaranda Vibratoria N°5 8' x 20' TYCAN, los finos (partículas menores a 18 mm) son enviados al circuito cuaternario, mientras que las partículas gruesas constituyen la alimentación a la chancadora HP 400 ST (Chancado Terciario) que opera con un rango de set de 17 a 20 mm, el producto de esta etapa se junta con el producto de la etapa cuaternaria y ambos son transportados por medio de fajas al circuito de tamizado cuaternario que consta de 4 zarandas vibratorias de 8' x 20' TYCAN de doble piso, operando en paralelo con tolvas de transferencia de forma independiente. Los finos de las zarandas (partículas de tamaño K80 igual a 3.5 mm) son transportados por medio de fajas a las tolvas de finos de molienda y los gruesos son enviados al chancado cuaternario que consta de 4 chancadoras HP 400 SH que trabajan en paralelo con un set de 14 mm, la descarga es retomada al circuito de tamizado, cerrando de este modo el circuito de chancado.

Figura 15. Chancado Secundario



Fuente: Elaboración Propia

Figura 16. Chancado Terciario



Fuente: Elaboración Propia

El circuito cuenta con un sistema de colectores de polvo que consta de 04 colectores de polvo IAC instalados en el área de zarandas cuaternarias y con 12 filtros insertables marca IAC distribuidos en todo el circuito.

Figura 17. Zarandas Vibradoras TAYCAN



Fuente: Elaboración Propia

- Almacenamiento de Finos

El producto final de chancado ($K_{80} = 3.5 \text{ mm}$) es depositado en las tolvas de finos cuyas capacidades de diseño son de 750 TM la tolva de molino #2, de 1,000 TM la tolva del molino #3 de 1,200 TM la tolva de molino

#4, #5, #6 y #7. La capacidad de almacenamiento de producto chancado es de 6500 TM.

Figura 18. Tolvas de Molinos 6,500 TM



Fuente: Elaboración Propia

- **Circuito de Molienda**

La molienda primaria se efectúa en 6 molinos de bolas (Molinos N°2 al Molino N°7), se tiene una etapa de remolienda es cual está constituido por un molino de bolas (Molino N°1) a continuación, se detalla las especificaciones de cada molino:

Tabla 1. Circuito de Molienda

MOLINO	MARCA	Tamaño (pies)		RPM DE OPERACIÓN
		Diámetro	Longitud	
Molino N°1	Kurimoto	8	7	21.2
Molino N°2	Kurimoto	8	7	21.2
Molino N°3	Comesa	8	10	20.5
Molino N°4	Allis Chalmers	9	12	20
Molino N°5	Allis Chalmers	12	14	16.3
Molino N°6	Norberg	12.5	15.5	15.7
Molino N°7	Fuller	13	17	15.7

Fuente: Área de Planeamiento e Ingeniería, Compañía Minera Condestable S.A. (2017)

El mineral almacenado en las tolvas de finos es alimentado por medio de fajas transportadoras a cada uno de los 6 molinos primarios, el

Molino N°2 y N°3 operan en circuito cerrado directo con hidrociclones D15, D20 y una zaranda de alta frecuencia el Over Flow de los hidrociclones es alimentado a la ZAF, el Under Flow de los hidrociclones D15 y D20 conjuntamente con el sobre tamaño de la clasificación de la ZAF retornan como carga circulante hacia los molinos N°2 y N°3, el Molino N°4 opera en el circuito cerrado directo con una zaranda de alta frecuencia, el sobre tamaño de clasificación de la ZAF retorna al Molino N°4 como carga circulante; los molinos primarios N°5 y N°6 operan independientemente cada uno en circuito cerrado directo con un hidrociclón D20 y una Zaranda de alta frecuencia Satack Sizer de 4' por 5 decks, el Under Flow de los hidrociclones y el tamaño de las zarandas de alta frecuencia retornan a los molinos como carga circulante; El Molino N°7 operan en el circuito cerrado directo con tres Zarandas de alta frecuencia Stack Sizer de 4' por 5 decks. El Sobre tamaño de clasificación de la ZAF retorna al Molino N°7 como carga circulante, el Under Size de todas las zarandas de alta frecuencia constituye el producto final al circuito de flotación ($k_{80} = 190 - 200$ micrones), la pulpa es enviada a flotación con un 35% de sólidos en promedio.

Figura 19. Molino de Bolas N° 3 - COMESA



Fuente: Elaboración Propia

Figura 20. Interior del Molino N° 3 – Alimentación de Agua



Fuente: Elaboración Propia

El mineral que ingresa a los molinos es controlado por medio de balanzas electrónicas instaladas en las fajas de alimentación, estas balanzas registran el peso del mineral que es alimentado a cada molino y están enlazadas al sistema de control distribuido DCS, desde este sistema se puede controlar otro tipo de variables como alimentación de agua a cada molino, densidad de pulpa, flujo de pulpa, operación de bombas, nivel de pulpa en los cajones, etc. La tasa de consumo de bolas forjadas de acero es de 0.37 kg de acero por tonelada molida.

- **Circuito de Flotación**

La pulpa proveniente del circuito de molienda es alimentada al circuito de flotación donde se le adicionan los siguientes reactivos en etapas secuenciales del proceso.

Tabla 2. Circuito de Flotación

DOSIFICACIÓN DE REACTIVOS	gr/TM	PUNTO DE DOSIFICACIÓN
Colector primario (Aerofloat 1404)	11	Alimentación en Molinos Primarios
Colector primario (AR – 1238)	12	Celda Rougher OK38 N°1
Espumante (ER-370)	13	Celda Rougher OK38 N°1
Colector secundario (Xantato Z-6)	20	Celdas SCV OK38 N°5, OK38 N°9
Espumante (ER-370)	7.5	Celdas SCV OK38 N°5, OK38 N°9
Sulfuro de Sodio	1.5	Celda Rougher OK38 N°5

Fuente: Área de Planeamiento e Ingeniería, Compañía Minera Condestable S.A. (2017)

El circuito de flotación esta subdividido en 4 etapas, cumpliendo cada etapa una función específica, así tenemos:

La etapa de concentración de desbaste – Rougher (04 Celdas OK 38) recibe la pulpa fresca de alimentación de molienda en conjunto con los medios del proceso generando un concentrado no limpio que requiere ser tratado en un circuito de limpieza, el relave del desbaste pasa a ser tratado en los bancos de celdas de agotamiento (12 celdas OK 38), el concentrado de estas celdas es enviado para su liberación en remolienda y su relave constituye el relave general del proceso. El aire inyectado a las celdas proviene de un soplador de marca Spencer de 8000 ICFM, Mientras que el aire de Instrumentación es abastecido por un compresor marca KAESER de 64 CFM.

Figura 21. Circuito de Flotación 12 Celdas OK 38 - OUTOKUMPU



Fuente: Elaboración Propia

El concentrado de la etapa de desbaste es alimentado al circuito de limpieza que consta de cinco celdas tipo OK 8 en un arreglo de 2-3 y un banco de tres celdas tipo OK 8 de agotamiento de limpieza. El circuito de limpieza extrae el concentrado final de todo el proceso, Mientras que los relaves de la etapa agotamiento de limpieza se mezclan con las espumas del circuito de agotamiento, ambos conforman los “mixtos o medios” del proceso siendo la carga circulante de flotación, actualmente el 100% de estos medios ingresan al circuito de remolienda (Molino N°1 Kurimoto 8' x 7') que opera en circuito cerrado con un nido de 8 hidrociclones D10B, el Over Flow es enviado a la cabeza de flotación y el Under Flow es retornado al molino.

Figura 22. Flotación de Concentrado de Cu Cabeza



Fuente: Elaboración Propia

- **Espesamiento y Filtrado de concentrado**

La pulpa de concentrado de Cu con aproximadamente 20% de sólidos, ingresa a dos espesadores Denver 25' x 10 ' donde se separa parte del agua contenida en la pulpa, la descarga de los espesadores que contiene la pulpa densa se bombea usando bombas Galigher 3 ½" a un filtro de discos FIMA 9' x 7' a dos filtros de tambor Door Oliver de 8' x 8', estos equipos operan en forma alternada o en simultaneo, su función principal es la eliminación de la mayor cantidad de agua posible contenida en la pulpa de concentrado.

Figura 23. Espesador de la Pulpa de Cu Cabeza



Fuente: Elaboración Propia

Figura 24. Tambor de Filtrado – DORR OLIVER



Fuente: Elaboración Propia

Figura 25. Concentrado de Cu para Despachar



Fuente: Elaboración Propia

El producto de los filtros es un concentrado filtrado que tiene en promedio un 10 – 11% de humedad y una ley aproximada de 23% de Cu, considerando un ratio de concentración de 30.5, diariamente se producen aproximadamente 250 Toneladas de concentrado de cobre que son transportados a los depósitos de Impala en el puerto Callao.

Figura 26. Transporte de Concentrado 250 Toneladas



Fuente: Elaboración Propia

- **Espesamiento y Disposición de Relaves**

El relave general de proceso está constituido está constituido por una pulpa de 25% de sólidos en promedio, esta pulpa es enviada mediante un sistema de bombeo a un espesador Outkumpu High Rate de 25m de diámetro, cuya función principal es separar el agua de los sólidos; en el Over Flow (agua clarificada) es enviado al tanque de agua recuperada para ser reutilizada en el proceso, mientras el Underflow (relave espesado) con 48%

de sólidos es transportado por gravedad mediante tubería HDPE a la cancha de relaves N°4. Para la disposición final de los sólidos previamente clasificado con hidrociclones D20, la fracción fina que contiene la mayor cantidad de agua se deposita al vaso de la relavera, donde se forma un espejo de agua el cual es recuperada en el proceso; mientras que la fracción gruesa es usada para conformar el muro o dique de la presa.

Figura 27. Cancha de Relave N°4



Fuente: Elaboración Propia

Figura 28. Espesador de Relave



Fuente: Elaboración Propia

2.2.4 Relaves mineros

Se definen como el deshecho mineral sólido provenientes del proceso de concentración de minerales que son producidos, transportados o depositados en forma de lodo.

Los relaves también son considerados como material de desecho de una molienda luego de que se ha recuperado los minerales valiosos. Los cambios de precios en los metales preciosos y las mejoras de la tecnología a veces pueden hacer que los relaves adquieran un valor económico y se reprocen en una fecha posterior (Southern Copper, 2017).

De acuerdo al Ministerio de Minería de Chile (2017), se define como relave al residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos, que queda como resultado de haber extraído los minerales sulfurados en el proceso de flotación. Este residuo, también conocido como cola, es transportado mediante canaletas o cañerías hasta lugares especialmente habilitados o tranques, donde el agua es recuperada o evaporada para quedar

dispuesto finalmente como un depósito estratificado de materiales finos (arenas y limos).

Figura 29. Depósito de Relaves Mineros



Fuente: Elaboración Propia

a) Origen de los relaves

De acuerdo a la Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental (2005), el proceso de concentración comienza con el chancado del mineral proveniente de la mina hasta tamaños de partícula generalmente en el rango de centímetros o milímetros. El mineral chancado es luego reducido a tamaños menores de un milímetro en los molinos de bolas, barras y semiautógenos (SAG). Se agrega agua al mineral molido y el material permanece en forma de lodo (pulpa) a través del resto del proceso de extracción. El siguiente paso es la flotación, ésta opera sobre el principio de que partículas individuales que contienen el mineral que se desea extraer son hechas receptivas selectivamente, a pequeñas burbujas de aire que se adhieren a estas partículas y las elevan a la superficie de la celda de flotación. Las espumas que contienen estas partículas valiosas son retiradas de la superficie para denominarse concentrados. Entre tanto las partículas de deshecho que quedan son los denominados relaves, los cuales son derivados al lugar destinado para su almacenamiento.

Figura 30. Ciclo de Origen de los Relaves



Fuente: Elaboración Propia

b) Disposición de relaves

El sistema de eliminación de relaves para un proyecto moderno puede representar una proporción muy importante del coste de capital, a la vez que contribuye de una forma muy significativa a los costos de explotación a largo plazo; por consiguiente durante las fases preliminares del proyecto hay que realizar varios estudios interrelacionados para evaluar las opciones practicas con el objeto de llegar a la que suponga el menor costo a lo largo de la vida de la mina. La localización de la concentradora y su proximidad a la mina son de gran importancia con el fin de reducir al mínimo la distancia a la que debe ser transportado el mineral. Dado que el costo de manejar este material es alto, las compañías mineras intentan localizar los tranques o depósitos de relaves lo más cerca posible a la planta de procesamiento de minerales, minimizando costos de transporte y reutilizando el agua contenida. De la misma manera, la zona de embalse de los relaves debe estar lo más cercana al molino. La naturaleza de los relaves varia ampliamente, ellos son dispuestos habitualmente como pulpas con alto contenido de agua. Con la aparición de operaciones a gran escala en el mundo por explotación de minerales de baja ley se han incrementado los volúmenes de los relaves producidos.

Sin embargo, actualmente, varias minas en el Perú utilizan novedosos métodos de disposición de relaves, tal como el relleno hidráulico, método de descarga espesada y disposición de relaves deshidratados. Estas operaciones demuestran claramente que alternativas a los depósitos de relaves convencionales pueden ser prácticas y posibles en el Perú. (Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental, 2005).

2.2.5 Relleno Hidráulico

En el 2007, Huamán expone, que se define como relleno hidráulico al material que es transportado en forma de pulpa por tuberías. El Relleno Hidráulico es una alternativa para rellenar los tajos explotados por el método de Corte y Relleno; esta alternativa empleada en el Perú desde mediados de la década de los años 60, se introdujo con la finalidad de incrementar la productividad, mas no con fines ecológicos. El Relleno Hidráulico, que es más eficiente que el Relleno Neumático, el Relleno Hidroneumático y el recientemente introducido Relleno en Pasta, fue el que en muchos casos reemplazó al Relleno Detrítico o Relleno Sólido transportado en carros mineros o en camiones, desde las canteras hasta los tajeos y a un costo mucho más elevado que los otros métodos de relleno que se efectúan transportando los sólidos en medios fluidos por tubería e impulsados por bombas.

El relleno hidráulico podría ser parte del relave desechado por la concentradora o cualquier material rocoso, aluvial o coluvial, sometido al proceso de chancado, tamizado, molienda y cicloneo. Debido a la premura con que se deben ejecutar las actividades del ciclo de minado, el relleno debe cumplir ciertos requisitos de granulometría y velocidad de percolación o índice de permeabilidad.

a) Historia

Según Huamán (2007), el relleno hidráulico se aplicó por primera vez el año 1864 en la mina Shenandoah en Pennsylvania, Estados Unidos, como control de la subsidencia, posteriormente se fue mecanizando y optimizando su uso en la explotación en la minería subterránea.

En el Perú se aplicó relleno hidráulico en el año 1937 en la mina Lourdes de Cerro de Pasco con la finalidad de controlar incendios, implementándose luego al ciclo de minado. Se define como relleno hidráulico al material que es transportado en forma de pulpa por tuberías. En su mayoría el material es el relave de planta concentradora, pero también se utiliza arenas glaciares y otros materiales granulares que se encuentra en la naturaleza.

b) Tipos de Relleno

Vives (2015) referencia a Potvin, Thomas y Fourien (2005), los cuales exponen que, en la industria minera, se utilizan distintos tipos de relleno de acuerdo al tipo de sólido (estéril de mina, gravas, relaves), del contenido de agua, y del contenido de aditivos que se agregan para generar el relleno. Se pueden clasificar en:

- Relleno seco

Vives (2015) referencia a Potvin, Thomas y Fourien (2005), los cuales definen que el relleno seco o “Dry fill”, también conocido como “Rock fill”, corresponde a un relleno que no contiene agua, y los materiales son variados, entre los que destacan: el lastre que produce la actividad minera, grava natural de río, ripios producto del proceso de lixiviación, y escoria producto de procesos pirometalúrgicos. Es bastante económico, ya que no requiere ningún aditivo. Su uso es simple, solo se deposita en las cavidades en donde se necesita, generalmente mediante camiones. Su objetivo es soportar las paredes de los caserones (no permite extraer caserón

adyacente), además de reducir la cantidad de estéril en superficie. Este tipo de relleno se observa en casos de banqueo y relleno.

- **Relleno hidráulico**

Vives (2015) referencia a Potvin, Thomas y Fourien (2005), los cuales definen que se denomina relleno hidráulico o “Hydraulic fill” a los rellenos que son transportado como un lodo de alta densidad, a través de perforaciones o tuberías hacia labores subterráneas. El relleno hidráulico es preparado con los relaves espesados y deslamados, en donde el tamaño máximo de partícula es 1 [mm] y el contenido de las partículas finas menores a 10 [μm] no debe ser mayor a un 10% de la masa total del relave. Este relleno requiere un porcentaje de sólidos en peso máximo igual a 70%. Al igual que el relleno seco, es relativamente económico, sin embargo, es necesario tener cuidado al momento de depositarlo, ya que pueden existir problemas de seguridad por su alto contenido de agua, esto con respecto a la permeabilidad, drenaje, licuefacción, etc.

- **Relleno hidráulico cementado**

Vives (2015) referencia a Potvin, Thomas y Fourien (2005), los cuales definen que el relleno hidráulico cementado o “Cemented hydraulic fill” es una variante del relleno anterior, al cual se le agrega cemento portland. Esto permite mejoras en la resistencia a la compresión del relleno, lo cual es importante cuando la cavidad rellena se utiliza como pilar o base de un nivel de explotación. La ventaja con respecto a los costos que tenía el método anterior se pierde al usar cemento.

- **Relleno en pasta**

Vives (2015) referencia a Potvina, Thomas y Fourien (2005), los cuales definen que el relleno en pasta o “Paste fill” corresponde a una unión entre relaves y mezclas de cemento con otros agregados, a los cuales

se les añade agua para lograr una consistencia similar al lodo. Debe existir una cantidad suficiente de finos ($< 20 \text{ } [\mu\text{m}]$) en los relaves para que tenga un comportamiento de pasta. Sus propiedades son las mismas que un relleno hidráulico cementado, pero en este caso se debe considerar la reología de pastas, es decir, se incorpora para el análisis de su transporte el comportamiento propio de las pastas.

- Relleno compuesto

Vives (2015) referencia a Potvin, Thomas y Fourien (2005), los cuales definen que los rellenos compuestos o “Composite fills” hacen referencia a la combinación de los distintos tipos de rellenos mencionados previamente, en donde lo que se busca es aprovechar las ventajas que cada uno posee, ya sean económicas, de transporte o resistencia. Los compuestos más utilizados son tres: una combinación entre relleno hidráulico y seco, otra con relleno hidráulico cementado con relleno seco, y por último, relleno en pasta con relleno seco. En estos tres casos los rellenos que contienen agua se emplean para sellar los niveles de transporte o perforación, y el relleno seco se aprovecha para completar la cavidad. (Vives, 2015).

c) Aplicaciones del relleno hidráulico

Huamán (2007) describe las aplicaciones del relleno hidráulico siendo las siguientes:

- Plataforma de trabajo.
- Evitar el deslizamientos y caída de las rocas.
- Facilitar la recuperación de pilares.
- Evitar o minimizar la subsidencia.
- Estabilizar el macizo rocoso en las minas.
- Reducir la posibilidad de estallidos de rocas.
- Minimizar el uso de madera.
- Minimizar la deposición de relaves o material rocoso en superficie ayudando al control ambiental.

d) Ventajas y desventajas del uso del relleno hidráulico

Huamán (2007) describe las ventajas del uso del relleno hidráulico siendo las siguientes:

- Cuando se utiliza relave de una planta concentradora el costo de la obtención del material es cero, ya que la planta cubre los costos de reducción de tamaño del material.
- Cuando se utiliza el material detrítico producto de las labores de preparación y desarrollo se contribuye a maximizar la vida útil de las desmonteras, asimismo se minimiza el impacto ambiental.
- El transporte en tuberías es mucho más económico, eficiente y rápido que con otro tipo de transporte.
- Al depositarse el relleno en el tajo en forma de pulpa tiende a buscar su nivel en forma natural, eliminando así la necesidad de utilizar recursos adicionales para esparcirlo manual o mecánicamente.
- La superficie que deja el relleno hidráulico permite que no haya un desgaste de neumáticos de los equipos que puedan transitar por las labores en relleno.
- El relleno hidráulico por la granulometría del material que es de fácil control permite una alta resistencia al movimiento de las cajas.
- El relleno hidráulico permite aumentar la eficiencia y productividad en los tajos debido a la disminución del consumo de madera y a la reducción del costo de minado por la versatilidad que brinda.

Además, Huamán (2007) describe las desventajas del uso del relleno hidráulico siendo las siguientes:

- El sistema de relleno hidráulico requiere una alta inversión de capital, para lo cual es necesario tener un sustento financiero de aplicabilidad.
- La introducción de agua en el relleno a la mina es un problema si el drenaje se realiza por bombeo.
- Cuando se utiliza material con contenidos altos de pirita o pirrotita, al oxidarse estos sulfuros se produce una reacción exotérmica lo cual eleva la temperatura y produce anhídrido sulfuroso.
- En el agua de drenaje del relleno siempre arrastra cierta cantidad de finos los cuales se depositan en los niveles inferiores de las labores rellenas.

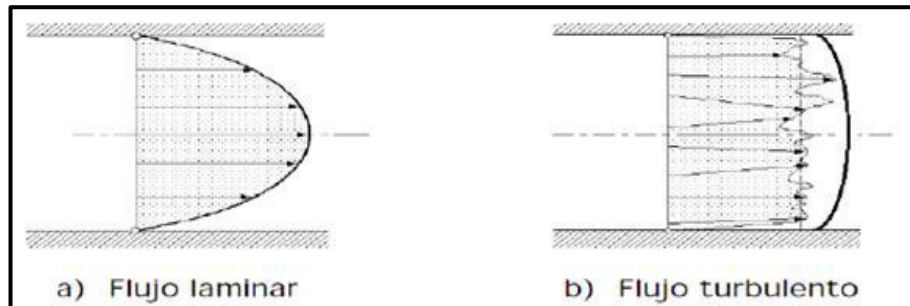
e) Comportamiento mecánico del relleno hidráulico

Según Huamán (2007), para observar el comportamiento mecánico del relleno se debe considerar los siguientes parámetros:

- **Densidad Relativa:** Expresa el estado de compactación de relleno arenoso. La densidad relativa del relleno está en función de tres factores principales: forma de los granos, granulometría y la manera de depositarse.
- **La granulometría:** es el factor de mayor influencia en la densidad relativa, lo ideal es que el material sea bien graduado, de tal manera que se reduzca los vacíos al mínimo. La manera de depositarse el relleno hidráulico influye también en la densidad relativa del mismo. La deposición del relleno en un solo punto permite que a cierta distancia las partículas sólidas se sedimenten en un ambiente calmo y sin perturbación. Una manera de esta sedimentación permite que los granos se acomoden en forma de arcos o bóvedas naturales, los cuales ante una presión o vibración tienden a reordenarse y ocupan más eficientemente los espacios.

- **Efecto del Agua en el relleno hidráulico:** El agua puede presentarse en el relleno hidráulico en dos formas: Flujo laminar y Flujo turbulento.

Figura 31. Efecto del Agua en el Relleno Hidráulico



Fuente: MEM (2007)

- **Consolidación:** Es el cambio de volumen de una carga constante a medida que transcurre el tiempo.
- **Compactación:** Es la densificación artificial de los suelos. Los materiales cohesivos se compactan mejor bajo cargas dinámicas.
- **Cementación:** La cementación de los rellenos hidráulicos pueden tomar muchos años, dependiendo principalmente de la composición química del relleno.
- **Compresibilidad:** Los rellenos hidráulicos son los menos compresibles de todos los rellenos usados como soporte en minería subterránea. Rara vez se comprimen más del 20%, variando generalmente entre 5% y 10%.
- **Gravedad específica de los sólidos:** Es la relación entre el peso específico del sólido y el peso específico del agua.
- **Tamaño máximo de las partículas:** Debido a que las partículas de mayor tamaño tienden a sedimentarse más rápido que las partículas menores, es necesario conocer el tamaño máximo de las partículas sólidas para así determinar la velocidad máxima de sedimentación que tendrán.
- **Dureza de los sólidos:** Esta característica determina el tipo y material del equipo a utilizarse en su transporte.

2.2.6 Componentes

a) Componentes

De acuerdo a CIDELSA (2017), están diseñadas para conducir fluidos a presión. Fabricadas desde 32mm hasta 2,000mm de diámetro, en normas ISO 4427:2008. Y ASTM F-714: 2012. Estos ofrecen una alternativa de solución a problemas tradicionales, minimizando costos de instalación y mantenimiento. En innumerables aplicaciones mineras, las tuberías HDPE han reemplazado a las tuberías de acero recubiertas con goma y las tuberías de acero inoxidable. Su bajo costo y su fácil instalación han hecho que se utilicen cada vez más en las instalaciones modernas. El polietileno de alta densidad resiste prácticamente todos los elementos corrosivos de la industria minera y las tuberías se aplican en rangos de temperatura que van desde los -40°C a 60°C y presiones de hasta 25 bares.

En definitiva, el largo tiempo de duración, el bajo costo, la fácil instalación y la escasa mantención, hacen que las tuberías HDPE tengan ventajas comparativas superiores respecto a los materiales tradicionales, entre ellas están:

- Resistencia a la abrasión.
- Estabilidad ante cambios de temperatura.
- Estabilidad a la intemperie.
- Alta resistencia a la abrasión.
- Propiedades eléctricas.
- Atoxicidad.
- Servicio a largo plazo.
- Resistencia química.

Es por esto que tienen diferentes campos de aplicación:

- a. Minería:
 - Plantas de flotación.

- Plantas de lixiviación.
 - Plantas de biolixiviación.
 - Plantas de extracción por solventes.
 - Conducción de petróleos y gases.
- b. Agricultura:
- Transporte de agua para bebederos de animales y riego menor en zonas áridas.
 - Riego por aspersión: su flexibilidad y facilidad de enrollado permite tener sistemas de riego por aspersión móviles.
- c. Industria química:
- Conducción de soluciones ácidas y alcalinas.
 - Conducción de productos químicos.
 - Sistema contra incendios.
- d. Área sanitaria:
- Transporte de agua potable.
 - Conducción de aguas servidas al fondo del mar (Emisarios Submarinos).
 - Conducciones subacuáticas enterradas.
- e. Industria en general:
- Transporte de gas.
 - Protección de cables eléctricos y telefónicos.
 - Transporte de aire comprimido.

Figura 32. Tubería HDPE en Planta de Fabricación



Fuente: CIDELSA, 2017

b) Accesorios para Tubería HDPE

Siguiendo las definiciones de CIDELSA (2017), las tuberías HDPE tienen los siguientes accesorios:

- Accesorios de compresión de polipropileno (PP)

Junta realizada según las normativas UNI 9561-AS/NZS4129 BRL-K534/03 DIN 8076 ISO 14236. Idónea al contacto con agua potable.

Cuerpo: Polipropileno Copolímero (PP).

Tuerca: Polipropileno Copolímero (PP).

Cono de fijación: Poliacetal (POM).

Cuenta con accesorios en diámetros desde 20mm - 110mm en presiones de 16 bares para tuberías HDPE fabricadas bajo norma ISO. (CIDELSA ,2017).

Figura 33. Accesorios de Compresión



Fuente: CIDELSA, 2017

- Acoples de hierro dúctil

Acoples de hierro dúctil estilo 995, para unir tubería de HDPE. Este diseño permite la unión directa de tuberías de HDPE sin equipo de fusión.

Se cuenta con diámetros desde 2" (63mm) a 12" (315mm) para tuberías HDPE fabricadas bajo norma ISO y ASTM. (CIDELSA ,2017).

Figura 34. Acople Vitaulic de Hierro



Fuente: CIDELSA, 2017

- **Conexiones moldeadas y fabricadas en HDPE**

Entre ellos, los accesorios inyectados o moldeados de polietileno de alta densidad, PE-100, para tuberías fabricadas en norma ISO en diámetros de 32mm hasta 315mm. Pueden tener certificados según las siguientes normativas: UNI EN 12201-3, UNI EN ISO 15494, UNI EN 1555-3 También accesorios de polietileno de alta densidad, PE-4710, para tuberías fabricadas en norma ASTM en diámetros de 2" hasta 24" IPS. Pueden tener certificaciones: AWWA C906 - NSF / ANSI 61. (CIDELSA ,2017).

Figura 35. Conexiones de HDPE Moldeadas



Fuente: CIDELSA, 2017

- **Accesorios en HDPE para electrofusión**

Según CIDELSA (2007), estos son accesorios de polietileno de alta densidad para electrofusión, PE-100, para tubería HDPE en SDR11 y SDR17.

Se fabrican según las normativas:

- UNI EN 1555-3, juntas en polietileno (PE) para sistemas de tubería para la distribución de gas combustible.
- UNI EN 12201-3, juntas en polietileno (PE) para sistemas de tubería para la distribución del agua potable.
- UNI EN ISO 15494, juntas en polietileno (PE) para sistemas de tubería para aplicación industrial.

Figura 36. Accesorios de HDPE para Electrofusión



Fuente: CIDELSA, 2017

- **Back up ring IPP deltaflex**

Según CIDELSA (2007), los Back up ring de hierro dúctil encapsulado en polipropileno son altamente resistente a la corrosión, y son reforzados con fibra de vidrio. Ideales para aplicaciones en ambientes corrosivos propios de la industria minera y pesquera.

Normas de fabricación y tamaños disponibles:

- ANSI B16.5 / B16.47 Clase 150.

- AWWA C-207 Clases B, D y E.
- DIN 2501
- Tamaños desde ½" (16mm) hasta 66" (1600mm)

Entre sus ventajas destacan:

- Más liviano. Menor peso que las bridas de respaldo metálico plano (de plancha) convencionales.
- Facilidad de manipulación e instalación.
- Mejor performance en líneas de HDPE.
- Transmite de manera segura y eficiente las cargas estructurales.
- Reducción de costos de transporte.
- Factor de seguridad de 2.

Figura 37. Back Up Rings en Hierro Dúctil



Fuente: CIDELSA, 2017

Figura 38. Back Up Rings en Hierro Acero Inoxidable



Fuente: CIDELSA, 2017

Figura 39. Hierro Dúctil Encapsulado en Polipropileno



Fuente: CIDELSA, 2017

c) Tapón de concreto

Ministerio de Energía y Minas del Perú, llamado desde ahora, MEM (2007), ha desarrollado una guía de para el diseño de tapones para el cierre de labores mineras, el cuál fue utilizado como referencia en esta investigación.

- Definición

Los tapones se consideran en general estructuras de concreto, tales como las que se usarían para embalsar agua o relaves a presiones que superen significativamente los 100 kPa (es decir, el equivalente a una columna de agua desde 10 m de alto hasta varios cientos). Puesto que se espera que sean permanentes y que permanezcan en ese lugar después del cierre, su diseño tiende a tener factores de seguridad más altos y, lo más importante, cumplen con especificaciones de control de calidad y de aseguramiento de la calidad más rigurosas durante su construcción que lo que sería necesario para un tabique que se pone en la mina por necesidades puramente operacionales. (MEM, 2007).

- Tipos de Tapones herméticos

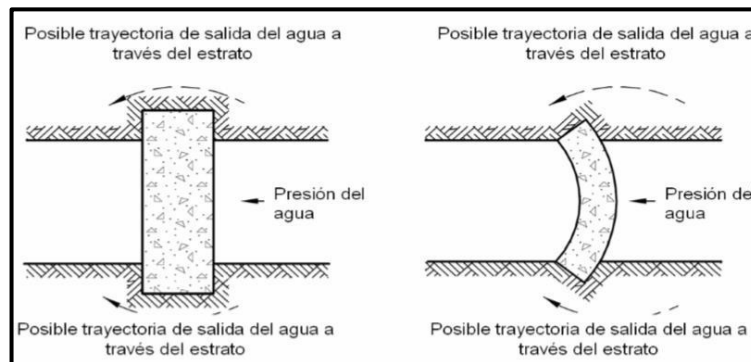
Debido a las necesidades de estabilidad a largo plazo de las estructuras de retención necesarias para las aplicaciones del cierre de mina,

estos lineamientos sólo abordan el diseño de tapones, tal como han sido definidos anteriormente. Por lo tanto, sólo el término tapón (que significa una barrera permanente o estructura de bloqueo para retener fluidos bajo presiones elevadas) será usado en el resto de este documento. De acuerdo al tamaño del túnel, y la posibilidad de acceso de las tuberías usadas para colocar el concreto, los tapones pueden construirse en un sólo vertido de concreto (tapones de concreto monolítico) o pueden formarse de múltiples segmentos vaciados por secciones. (MEM, 2007).

- **Tapones indentados**

Según MEM (2007), son tapones con resistencia estructural adecuada pero por lo general insuficiente resistencia a las fugas.

Figura 40. Tapones Indentados

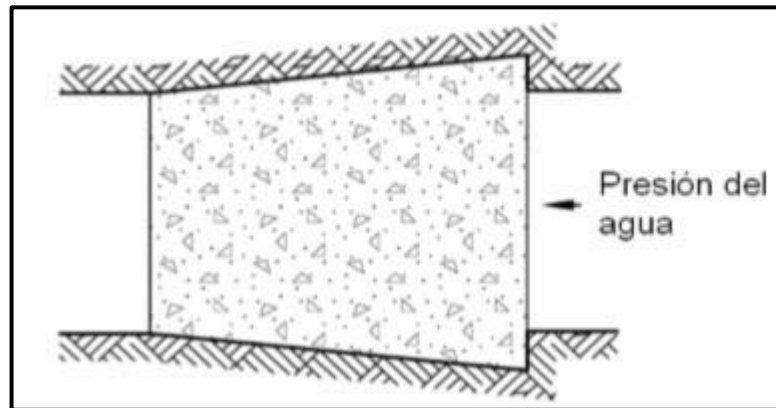


Fuente: MEM, 2007

- **Tapón de concreto en cuña y monolíticos sin refuerzo**

Según MEM (2007), es un tapón con resistencia estructural y resistencia a las fugas adecuada, pero menos económico que otras alternativas.

Figura 41. Tapón de Concreto en Cuña

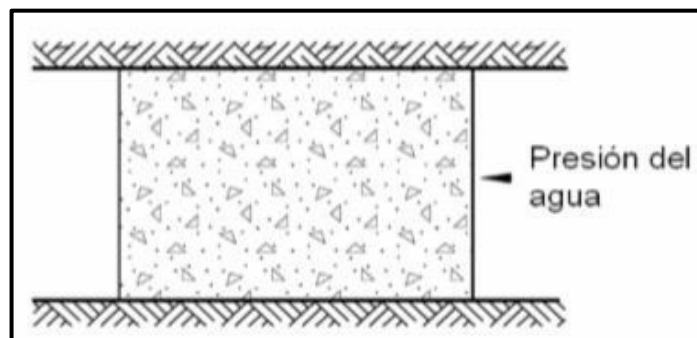


Fuente: MEM (2007)

- **Tapón de lados paralelos y monolítico sin refuerzo**

Según MEM (2007), son por lo general económico con adecuada resistencia estructural y resistencia a las fugas.

Figura 42. Tapón de Lados Paralelos

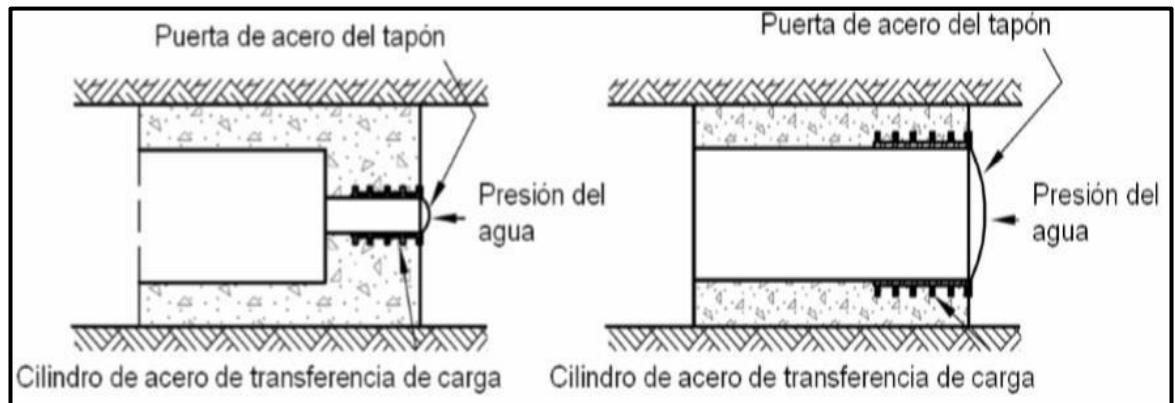


Fuente: MEM (2007)

- **Tapones cilíndricos, de concreto, de lados paralelos sin refuerzo**

Logra una resistencia adecuada y resistencia a la fuga, existe uno con acceso limitado en la vía principal y el otro similar pero con un acceso mayor, con acceso en toda su altura.

Figura 43. Tapones Cilíndricos de Concreto, de Lados Paralelos Sin Refuerzo Interior



Fuente: MEM (2007)

Tanto los tapones monolíticos como los de núcleo hueco pueden tener lados paralelos (de sección casi constante) o en cuña (donde la sección transversal varía con la longitud), o indentados, donde se construye una ampliación de la sección transversal hacia el túnel o pique para aumentar la resistencia al corte. (MEM, 2007).

d) Ubicación del tapón hermético

Según MEM (2007), la ubicación ideal del tapón deberá estar:

- En un área donde la roca sea competente y libre de características geológicas significativas tales como fallas, zonas de corte, etc;
- En un área que no tenga demasiados esfuerzos y que esté lo más alejada posible de otras aberturas de minas;
- Aguas abajo de cualquier fuga, de modo que retenga toda el agua que ingresa;
- En una zona donde la resistencia in situ sea mayor a las que aplicará la presión hidrostática, de otro modo la presión hidráulica abrirá las fracturas y habrá una fuga excesiva;
- En un área donde la permeabilidad general de la roca circundante sea tan baja como sea posible, y

- A una distancia adecuada de cualquier tajo, punto de carga de mineral o zona de minado activo.

e) Diseño y evaluación de tapones herméticos

Según MEM (2007), la decisión de construir un tapón, que por su definición es de naturaleza permanente, debe estar respaldada por información técnica referente a características geológicas, hidráulicas, ambientales, geotécnicas y geomecánicas del lugar donde se construirá. Estas son consideradas como las características mínimas que deberán ser presentadas por el proponente. No obstante, cabe la posibilidad de que haya otros factores que influyan en el diseño, los cuales deben acompañar al estudio de ingeniería de detalle del proyecto.

El personal de la mina debe garantizar que se cumplan las condiciones necesarias para una operación segura de tales estructuras a lo largo del ciclo de vida de la mina. Se han desarrollado diversos enfoques o buenas prácticas en muchos países para abordar estos requerimientos, muchas veces específicamente para asegurar el cumplimiento de requisitos legales sobre salud y seguridad.

Con el propósito de mantener un alto estándar en el diseño de compuertas y tapones, el Ministerio de Energía y Minas (MEM) solicitó que se desarrolle un enfoque estandarizado que guíe los diseños enviados por las compañías mineras, de conformidad con la Ley de Cierre de Minas y su Reglamento.

f) Evaluación de estabilidad de tapones herméticos

Según MEM (2007), la evaluación de estabilidad de la geometría del tapón en el lugar seleccionado la realizará un Ingeniero quien la certificará empleando enfoques autorizados por la industria para evaluar, como mínimo, los cinco posibles y principales modos de inestabilidad potencial, principalmente:

- **Falla por corte** – definido como falla de corte a través del concreto, a lo largo del contacto con la roca/concreto o a través del macizo rocoso;
- **Falla por flexión** – generalmente ocurre como falla confinada solamente a través del material del tapón propiamente dicho.
- **Falla debido a filtración excesiva**, que generalmente ocurre a partir de la falta de contacto de la interfase debido principalmente a los efectos de erosión bajo un gradiente hidráulico demasiado alta a lo largo del eje del tapón;
- **Falla debida a levantamiento hidráulico** que ocurre a lo largo de la interfase roca/concreto del tapón o que ocurre en discontinuidades discretas en la roca que circunda el tapón; y/o
- **Falla debida a la disgregación química/física** a largo plazo del concreto del tapón, inyección, o de sello o inclusiones en la roca circundante.

g) Factores de seguridad para taponés

El diseño de los taponés propuestos deberá discutir los factores de seguridad usados en el análisis. La siguiente tabla presenta una lista de factores de seguridad recomendados para el diseño de taponés permanentes. (MEM, 2007).

Tabla 3. Criterios para el Diseño de Tapones Permanentes (adaptados de Auld, 1983, Chekan 1985 y TSS, 1999)

Modo de Falla	Criterios de diseño
<p>1) Corte – Falla por corte a lo largo del contacto roca/concreto, a lo largo del macizo rocoso, o a lo largo de discontinuidades adversamente orientadas.</p>	<p>El esfuerzo de corte total admisible de la roca de acuerdo, por ejemplo, al criterio de falla de Hoek-Brown. El esfuerzo de corte admisible del concreto de acuerdo al ACI (American Concrete Institute), al CSA (Canadian Standard Association) o el equivalente aprobado por normas peruanas.</p> <p>F.S. > 3.0 condiciones normales</p> <p>F.S. > 1.5 condiciones sísmicas y para presiones hidrostáticas de lodo/ relaves (con gravedad específica igual a 2)</p> <p>F.S. > 1.1 para condiciones de huayco (dinámicas) (impacto directo)</p>
<p>2) Falla por flexión de viga gruesa</p>	<p>Esfuerzo a la tracción admisible del concreto de acuerdo con el código ACI.</p> <p>F.S. > 3.0 condiciones normales</p> <p>F.S. > 1.5 condiciones sísmicas</p>
<p>3) Levante hidráulico de la roca que rodea al tapón.</p>	<p>F.S. > 1.3 condiciones normales (análisis de esfuerzos totales)</p> <p>F.S. > 1.1 condiciones sísmicas (análisis de esfuerzos totales)</p>
<p>4) Gradiente Hidráulico y Fugas (o una excesiva filtración) alrededor del tapón para evitar erosión de las paredes del túnel.</p>	<p>a) Máximo gradiente hidráulico sobre la base de métodos empíricos de diseño (como se muestra en la Tabla 4).</p> <p>b) Para condiciones estáticas, un factor de seguridad mínimo de 2.5 deberá usarse para asegurar el gradiente de presión a través del tapón, usando el enfoque sudafricano (es decir, Garrett & Campbell-Pitt, 1958 y 1961).</p> <p>c) Para condiciones de huayco (dinámicas), se</p>

	<p>deberá adoptar un factor de seguridad de 1.5. Adicionalmente, para los tapones construidos para retener drenaje ácido de roca, se deberán revisar los siguientes Criterios de “ejecución”:</p> <p>d) Reducir la conductividad hidráulica del contacto y del macizo rocoso que circunda al tapón a por lo menos 10-7 m/s con inyecciones (si fuera necesario).</p> <p>e) Limitar la filtración a ocasionales goteos en el tapón y menos de 0.5 L/s medidos 20 m aguas abajo del tapón</p>
<p>5) Desintegración del concreto a largo plazo</p>	<p>a) Máximo gradiente hidráulico sobre la base de métodos empíricos de diseño (como se muestra en la Tabla 4).</p> <p>b) Para condiciones estáticas, un factor de seguridad mínimo de 2.5 deberá usarse para asegurar el gradiente de presión a través del tapón, usando el enfoque sudafricano (es decir, Garrett & Campbell-Pitt, 1958 y 1961).</p> <p>c) Para condiciones de huayco (dinámicas), se deberá adoptar un factor de seguridad de 1.5. Adicionalmente, para los tapones construidos para retener drenaje ácido de roca, se deberán revisar los siguientes Criterios de “ejecución”:</p> <p>d) Reducir la conductividad hidráulica del contacto y del macizo rocoso que circunda al tapón a por lo menos 10-7 m/s con inyecciones (si fuera necesario).</p> <p>e) Limitar la filtración a ocasionales goteos en el tapón y menos de 0.5 L/s medidos 20 m aguas abajo del tapón</p>

Fuente: MEM (2007).

h) Diseño de tapones indentados

Según MEM (2007), en varias regiones de Canadá y en Estados Unidos, la práctica del diseño de tapones ha sido “indentado” o excavar una losa guía en el macizo rocoso en el emplazamiento del tapón, que extienda efectivamente el tapón de concreto hacia el macizo rocoso adyacente a la galería o el túnel donde está ubicado.

En la mayoría de minas de Canadá, los muros de separación “indentado” han sido construidos siguiendo directrices estructurales estándares para el diseño de muros de separación / tapones, tipificadas por códigos tales como “Directrices para el Diseño de Muros de Separación y Represas para Minas Subterráneas” – Ministerio de Trabajo de Ontario (Ontario Ministry of Labour 1995). Las directrices canadienses fueron preparadas para agua con un peso unitario de $\gamma_w = 1,000 \text{ kg/m}^3$. Por lo tanto, resulta muy importante, en el caso de tapones indentados excavados en roca con diaclasas o fracturas, realizar un mapeo cuidadoso del macizo rocoso (i.e., el espaciado, la orientación y el tamaño de abertura de las discontinuidades) con la finalidad de evaluar el impacto potencial de tales discontinuidades sobre la capacidad de soporte. Debe ponerse especial cuidado en la ubicación de los tapones en las mejores condiciones de terreno y de inyectar al macizo rocoso alrededor del tapón, ya que los tapones indentados son más susceptibles de presentar filtraciones (debido a sus longitudes menores). (MEM, 2007).

- Diseño por corte

En el caso de tapones paralelos, el enfoque de diseño que el proponente deberá seguir asume que la carga inducida por la presión hidrostática sería transmitida del tapón de concreto a la roca como corte y alrededor del perímetro del tapón y en toda su longitud, según se ilustra en las Ecuaciones 1 y 2. En consecuencia, la longitud de un tapón debe diseñarse para:

- Ser suficiente para mantener el esfuerzo de corte desarrollado en el concreto del tapón debajo de los límites ACI y,
- Ser suficiente para mantener el esfuerzo de corte en la roca adyacente muy por debajo de la resistencia al corte.

Como resultado de ello, la falla por corte debería evaluarse en el concreto, en el contacto roca/concreto y a través del macizo rocoso. (MEM, 2007).

▪ **Resistencia al Corte del Macizo rocoso**

Para el diseño de tapones, la resistencia al corte del macizo rocoso puede por lo general determinarse sobre la base de enfoques empíricos como por ejemplo, usando la Tabla 4, que presenta algunos valores empíricos de máxima resistencia al corte admisible, considerando un factor de seguridad de 3 (valor entre paréntesis). (MEM, 2007).

Tabla 4. Resistencia al Corte y Gradientes Hidráulicas de Diseño para Tapones de Túnel (según Benson, 1989)

Condición general de la roca RMR – Evaluación del macizo rocoso	Resistencia al corte (Máxima resistencia al corte admisible) (kPa)	Máxima gradiente hidráulica admisible m/m	Máxima gradiente de presión admisible kPa/m
Muy Buena Roca Masiva, dura, ampliamente diaclasada 81 < RMR < 100	1500 (500) ³	15 - 30	150 - 300
Buena Roca Dura a moderadamente dura, moderadamente diaclasada 61 < RMR < 80	900 (300)	14-Oct	100 - 140
Roca Moderada a débil, moderadamente diaclasada 41 < RMR < 60	600 (200)	9-Jul	70 - 90
Roca Pobre Débil, cercanamente diaclasada o cortada 21 < RMR < 40	300 (100)	6-May	50 - 60
Roca Muy Pobre Muy débil, probablemente erosionable RMR < 20	150 (50)	4-Mar	30 - 40

Fuente: MEM (2007).

i) Consideraciones para el diseño del concreto contra el Ataque Químico

En la Norma ACI 318 Capítulo 4 se indican las consideraciones a tomar en cuenta cuando se trata de un ataque químico o algún otro tipo de exposición al concreto ya dispuesto en obra. En este caso la resistencia pasa a ser un requisito secundario y el diseño por durabilidad se convierte en el principal objetivo.

Para ataques químicos existen diferentes consideraciones al respecto, dependiendo del grado de agresividad química del medio. Primero se deben analizar las condiciones del entorno y definir qué tipo de sales serán las que atacarán al concreto. Estas serían las condiciones permanentes para el diseño.

Según MEM (2007), los factores que afectan la durabilidad del concreto son aquellos que producen el deterioro del mismo. Estos factores se clasifican en 5 grupos:

- Congelamiento/Descongelamiento
- Ambiente químicamente agresivo
- Abrasión
- Corrosión de metales en el concreto
- Reacciones químicas en los agregados.

Asimismo, a continuación en las Tablas 5, 6 y 7 se muestran los requisitos de durabilidad establecidos en el Código ACI para concretos expuestos a cargas ambientales o ataques químicos externos o internos. Cabe señalar que el cumplimiento de estos requisitos, sumados a un proceso constructivo adecuado, garantiza la vida útil proyectada de la estructura. En el diseño del concreto para el tapón se debe de reportar lo siguiente:

- Tipo y cantidad de sales agresivas a la que estará expuesta el concreto.

- pH de las aguas o sustancias que estarán en contacto con el concreto. Condiciones climáticas y ciclos climáticos.
- Examen completo de los insumos con los cuales se harán las mezclas: agua, agregados y aditivos.
- Carga estructural o hidráulica requerida.

Tabla 5. Requisitos para Concretos Expuestos a Sulfatos

Tipos de Exposición a Sulfatos	Sulfatos (SO ₄) Solubles en Agua Presentes en el Suelo (%)	Sulfatos (SO ₄) en Agua	Tipo de Cemento Recomendado	Relación Agua/Cemento Recomendada (concreto normal)	f'c mínimo (kg/cm ²)
Despreciable	0 a 0.10	0 a 150	-	-	-
Moderada	0.10 a 0.20	150 a 1,500	II, IP(MS) IS(MS) IPM(MS) I(SM)(MS)	0.5	280
Severa	0.20 a 2.00	1,500 a 10,000	V	0.45	315
Muy severa	>2.00	>10,000	V + Puzolana	0.45	315

Fuente: ACI 318-14.

Tabla 6. Contenido Máximo de Ión Cloruro para Prevenir la Corrosión

Tipo de Elemento	Contenido Máximo de Ion Cloruro en Concreto (% en peso de cemento)
Concreto pretensado	0.06
Concreto armado expuesto a cloruros	0.15
Concreto armado protegido de la humedad	1.00
Otros tipos de concreto	0.30

Fuente: ACI 318-14.

Tabla 7. Relaciones Agua/Cemento Máximas para Condiciones Especiales de Exposición

Condición de Exposición	Relación Agua/Cemento Máxima (Concreto Normal)	f'c Mínimo en Concreto Normal y Ligero (kg/cm²)
Concreto con baja permeabilidad al agua	0.5	280
Concreto expuesto al hielo y deshielo en condición húmeda.	0.45	315
Para prevenir corrosión en concreto expuesto a sales para disolver hielo.	0.4	350

Fuente: ACI 318-14.

2.2.7 Cierre de Mina

Según Yanacocha (2017), el cierre de minas es la actividad que busca rehabilitar las áreas utilizadas por la minería una vez concluidas las operaciones, para que el terreno tenga condiciones similares a las que existían antes del desarrollo de la actividad minera.

El proceso de Cierre de Minas puede tomar muchos años, ya que se estiman períodos de por lo menos 5 años para la observación de las áreas restauradas después del cierre (monitoreo post cierre). En algunos casos estos periodos de observación pueden ser permanentes hasta asegurar la estabilidad física y química de estas áreas.

Luego de este periodo de observación, se determina si el cierre tuvo éxito. Esto se da cuando las áreas restauradas o cerradas pueden mantenerse estables en el tiempo sin necesidad de acción humana alguna y

si se dan las condiciones necesarias para mantener la armonía y equilibrio con el ambiente natural y social del lugar.

Si no se realiza el cierre de mina ocurrirá lo siguiente:

- Se podrían generar problemas de erosión y formación de sedimentos.
- Se producirían aguas ácidas.
- Existen penalidades por parte de las autoridades competentes.
- No habría recuperación de la topografía y aprovechamiento de las áreas.
- No se puede usar la tierra de acuerdo a las condiciones encontradas originalmente.
- Las áreas intervenidas no se pueden incorporar con éxito al ecosistema.

Las etapas del cierre de mina son las siguientes:

1. **Cierre temporal:** Son actividades que se realizan ante situaciones que puedan presentarse como riesgos inminentes o casos fortuitos de paralización de los trabajos a desarrollarse por situaciones externas. Para ello se cuenta con un Plan de Manejo y Mantenimiento de cada uno de los Componentes. En concordancia con lo anteriormente mencionado se recomienda desarrollar un plan de cuidado y mantenimiento que se pueda aplicar encaso ocurra una suspensión temporal o paralización imprevista.
2. **Cierre progresivo:** Es un conjunto de actividades relacionadas con el cierre que se pueden implementar de manera simultánea al desarrollo de las operaciones mineras de explotación, las cuales pueden abarcar mina, componentes de la actividad minera o parte de ellas, cuando dejan de ser útiles o se encuentran ya evaluadas de manera

integral. Estas medidas de Cierre resultan beneficiosas para el ambiente, en vista que permite una recuperación rápida del terreno y controla la futura degradación ambiental. Una de las ventajas de la aplicación de esta etapa es que al titular minero se le reducen los costos de las actividades del cierre final debido a la disponibilidad de recursos humanos y equipos durante las operaciones, adicionalmente mejora su imagen pública y asimismo, de acuerdo al reglamento le permite descontar lo gastado en el cierre progresivo del monto de la garantía financiera que tiene que dar para las actividades de cierre final. Los componentes en los cuales se llevará a cabo el cierre progresivo serán las áreas de mina que hayan sido explotadas y depósitos de desmonte que hayan llegado a su capacidad de almacenamiento.

3. **Cierre final:** Las actividades en esta etapa corresponden al cierre o clausura de instalaciones que no sean consideradas en el cierre temporal y progresivo o que ya no serán utilizadas más, ya que se considera el término de la vida útil de las mismas o de la mina por agotamiento del recurso mineral.

a) Actividades de cierre de mina

Compañía Minera Chaspaya S.A.C (2016) En general, las principales actividades relacionadas con el cierre de componentes de mina, e instalaciones auxiliares son:

- Desmantelamiento
- Demolición, salvamento y disposición
- Estabilidad física
- Estabilidad geoquímica
- Estabilidad hidrológica
- Establecimiento de la forma del terreno y rehabilitación de hábitats

- Revegetación
- Programas sociales

b) Mantenimiento y monitoreo Post cierre

Compañía Minera Chaspaya S.A.C (2016) describe que para el cierre de los componentes, se tomara en cuenta el cierre final de las operaciones, con el fin de desarrollar el monitoreo de los programas sociales implementados durante las operaciones o el cierre progresivo. Las actividades de monitoreo suelen ser las siguientes:

- Mantenimiento físico
- Mantenimiento geoquímico
- Mantenimiento hidrológico
- Mantenimiento biológico
- Actividades de monitoreo post cierre

2.3 Definición de Términos Básicos

Según el glosario de Southern Copper Corporation (2017), se recuperan los siguientes términos.

- a) Chancadora (primaria, secundaria y terciaria):** Una máquina para chancar roca, mineral u otro material.
- b) Chimenea:** Una excavación vertical o inclinada en la roca para propósitos de proporcionar acceso a un cuerpo de mineral. Generalmente está equipada con un huinche en la parte superior que se hace descender y que eleva algún aparato para transportar a los trabajadores y los materiales.
- c) Cobre:** Metal rojo muy maleable y dúctil que es un buen conductor de la electricidad.
- d) Concentración:** El proceso por el cual el mineral se separa en concentrados de metal y material de desecho a través de

procesos como el chancado, la molienda y la flotación. Los concentrados se envían a una fundición.

- e) **Concentrado:** Un producto intermedio fino y polvoriento del proceso de molienda formado por la separación de un metal valioso del desperdicio.
- f) **Concentradora:** Las instalaciones en las que se procesa el mineral para separar los minerales de la roca madre.
- g) **Concentrados de cobre:** Un producto de la concentradora que contiene usualmente 20 a 30% de cobre. Es la materia prima para la fundición.
- h) **Corte y relleno:** Un método de excavación de material y mineral en un escalón y su reemplazo con material de desecho o relaves provenientes de una concentradora.
- i) **Depósito:** Un cuerpo mineralizado que se ha delimitado físicamente con suficiente perforación, excavación de zanjas y/o trabajos subterráneos y que se ha encontrado contiene una ley promedio suficiente de metal o metales para garantizar la exploración y/o los gastos de desarrollo. Un depósito como éste no califica como un cuerpo de mineral comercialmente minable, ni como uno que contenga reservas de mineral, hasta que se hayan resuelto los factores legales, técnicos y económicos finales.
- j) **Desecho:** Roca que no tiene suficiente ley ni otras características de mineral a minarse económicamente.
- k) **Exploración:** Prospección, muestreo, manejo, perforación diamantina y otros trabajos comprendidos en la búsqueda de mineral.
- l) **Explotación:** Actividades relacionadas con un depósito mineral que empiezan en el punto en que se puede estimar de manera razonable que existen reservas económicamente recuperables y que, en general, continúan hasta que la producción comercial empieza.
- m) **Extracción:** Proceso de tratamiento que comprende el molido fino del mineral seguido de la extracción de minerales.

- n) **Flotación:** Proceso para concentrar materiales en base a la adhesión selectiva de ciertos minerales a las burbujas de aire en una mezcla de agua con mineral molido. Cuando se agregan los químicos correctos al baño de agua espumosa de mineral que ha sido molido a un polvo fino, los minerales flotan a la superficie. El concentrado de la flotación rico en metales se desprende posteriormente de la superficie.
- o) **Minas:** Las minas son las fuentes de material que contiene mineral y que se encuentra cerca de la superficie o en el subsuelo.
- p) **Mina de tajo abierto:** Una mina que está enteramente en la superficie. También se le llama de corte abierto o a cielo abierto.
- q) **Mineral:** Una sustancia homogénea que ocurre naturalmente y tiene propiedades físicas y composición química definidas y que, si se forma en condiciones favorables, tiene una forma de cristal definida.
- r) **Mineralización:** Un depósito de roca que contiene uno o más minerales para los cuales todavía no se ha determinado la economía de la recuperación.
- s) **Molienda:** Manera de reducir el mineral en partículas muy pequeñas por medio de presión o impacto. Se usan distintos tipos de molidoras en las plantas de procesamiento para obtener la dimensión deseada.
- t) **Molino:** Una planta en la que se trata el mineral y se recupera los metales o se los prepara para la fundición, también un tambor rotatorio que se utiliza para la molienda de minerales en tratamiento de preparación.
- u) **Relaves:** Material de desecho de una molienda luego de que se ha recuperado los minerales valiosos. Los cambios de precios en los metales preciosos y las mejoras de la tecnología a veces pueden hacer que los relaves adquieran un valor económico y se reprocesen en una fecha posterior.
- v) **Represas (estanques) de relaves:** Una depresión a un nivel inferior que se utiliza para confinar los relaves, la función

primaria de la cual es permitir suficiente tiempo para que los metales pesados se sedimenten o para que el cianuro se destruya antes de descargar el agua en los cursos de agua locales.

- w) **Rescate o recuperación:** La restauración de un sitio luego que se ha concluido con la actividad de minado o de exploración.
- x) **Reserva:** Esa parte de un depósito mineral que se puede extraer o producir de manera económica y legal en el momento de la determinación de la reserva.
- y) **Roca:** Una masa que contiene una combinación de minerales.
- z) **Voladura:** Técnica para romper mineral en una mina subterránea o de tajo abierto.

2.4 Formulación de la Hipótesis

2.4.1 Hipótesis General

Al aplicar el relleno hidráulico para depositar relaves en las cámaras subterráneas, la mina Condestable encuentra beneficios.

2.4.2 Hipótesis Específicas

1. Al determinar los componentes técnicos para la aplicación del relleno hidráulico en cierre de cámara subterránea, la mina Condestable encuentra beneficios al aprovechar espacios vacíos y equipos existentes para el transporte y depósito de relaves.
2. Al comparar los costos para la aplicación del relleno hidráulico con el método de relleno rocoso en cierre de cámara subterránea, la mina Condestable encuentra beneficios debido a que el costo de aplicación de relleno hidráulico es menor que el costo de relleno rocoso.
3. Al comparar el cronograma de ejecución para la aplicación del relleno hidráulico con el método de relleno rocoso en cierre de

cámara subterránea, la mina Condestable encuentra beneficios debido que el tiempo de ejecución de la aplicación del relleno hidráulico es menor que el tiempo de ejecución del relleno rocoso.

4. Al calcular la extensión de vida útil del depósito de relaves superficial debido a la aplicación del relleno hidráulico cámaras subterráneas como depósito de relaves, la mina Condestable encuentra beneficios ya que el depósito de relaves superficial tendrá más durabilidad que lo diseñado.

CAPÍTULO III: MÉTODO

3.1 Tipo de Investigación

- La investigación es de tipo aplicada, porque se utilizaron conocimientos aprendidos para verificar los diferentes beneficios del relleno hidráulico en cámara subterránea como depósito de relaves.
- La investigación es de enfoque cuantitativo, porque se cuantificaron, se estimaron y se calcularon datos para determinar los beneficios para la mina Condestable en valores numéricos.
- El tipo de estudio de la investigación es de tipo descriptiva, porque se especificaron, analizaron y caracterizaron los diferentes beneficios del relleno hidráulico en cámara subterránea como depósito de relaves de acuerdo a los objetivos específicos descriptos anteriormente.

3.2 Nivel de la investigación

La investigación es de nivel descriptivo, porque la profundidad de la investigación es poder describir los diferentes beneficios del relleno hidráulico en cámara subterránea como depósito de relaves.

3.3 Diseño de la investigación

- Según el propósito del estudio, la investigación es de diseño observacional porque no se manipulan los datos obtenidos, sólo se usan los datos obtenidos para encontrar los beneficios que la mina Condestable gana depositando los relaves en las cámaras subterráneas al aplicar el relleno hidráulico.
- Según la cronología de las observaciones, la investigación es de diseño prospectivo, porque los datos obtenidos son actuales para poder calcular, analizar y determinar los diferentes beneficios que la mina Condestable gana al depositar relaves and cámaras subterráneas al aplicar relleno hidráulico. Por ejemplo, se están usando datos actuales para poder elaborar los análisis de costos unitarios para el desarrollo del presupuesto y se usan parámetros actuales para el correcto diseño del tapón de concreto para el cierre de cámara subterránea.
- Según el número de mediciones, la investigación es de diseño transversal, porque se toman datos una vez para poder verificar los diferentes beneficios que gana la mina Condestable.

3.4 Variables

3.4.1 Variable independiente

La variable independiente en este caso son las cámaras de minas subterráneas como depósito de relaves. Esta variable es de tipo cuantitativa y continua debido a que sus características fueron cuantificadas para poder determinar los beneficios a la mina Condestable.

3.4.2 Variable dependiente

La variable dependiente en este caso son los beneficios a la mina Condestable. Esta variable es de tipo cuantitativa y continua a que los

beneficios se midieron en valores numéricos y en distintos intervalos dependiendo de su aspecto.

3.5 Operacionalización de variables

La operacionalización de las variables se puede demostrar en las siguientes tablas:

Tabla 8. Operacionalización de la Variable Independiente

Variable	Indicadores	Índices	Dimensión
Cámaras de minas subterráneas como depósito de relaves	Características de las cámaras de minas subterráneas	<ul style="list-style-type: none"> • Ubicación de la cámara subterránea. • Capacidad volumétrica de la cámara subterránea • Dimensiones de la cámara subterránea. 	<ul style="list-style-type: none"> • msnm • m³ • m
	Parámetros del Macizo Rocoso	<ul style="list-style-type: none"> • Clasificación del macizo rocoso • Densidad de la roca • Ángulo de fricción interna • Cohesión 	<ul style="list-style-type: none"> • RMR (und.) • Ton/m³ • ° • kPa

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9. Operacionalización de la Variable Dependiente

Variable	Sub-VARIABLES	Indicadores	Índices	Medición
Beneficios a la mina Condestable	Componentes Técnicos	Componentes Técnicos	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara subterránea • Tuberías HDPE • Válvulas y accesorios • Tapón de concreto 	<ul style="list-style-type: none"> • m, m³ • m • Und • m, pulgadas
	Costo	Presupuestos	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de Precios Unitarios • Presupuesto usando relleno hidráulico en cámara subterránea • Presupuesto usando relleno rocoso en cámara subterránea 	<ul style="list-style-type: none"> • \$./m, \$./m², \$./m³, \$./kg, \$./und • \$./ • \$./
	Cronograma de Ejecución	Cronogramas de Ejecución	<ul style="list-style-type: none"> • Metrado de materiales • Rendimiento • Tiempo 	<ul style="list-style-type: none"> • m, m², m³, kg, und • Rendimiento • Semanas
	Vida Útil del Depósito de Relaves Superficial	Extensión de Vida Útil del Depósito de Relaves Superficial	<ul style="list-style-type: none"> • Producción diaria de relave • Capacidad de la cámara subterránea • Densidad del relave • Tiempo 	<ul style="list-style-type: none"> • Ton/día • m³ • Ton/m³ • días

Fuente: Elaboración propia

3.6 Población y muestra

3.6.1 Población

La población de este proyecto es la mina en la zona de la Costa del Perú, para poder mostrar cómo se puede beneficiar este tipo de mineras al usar relleno hidráulico en una cámara subterránea como depósito de relaves.

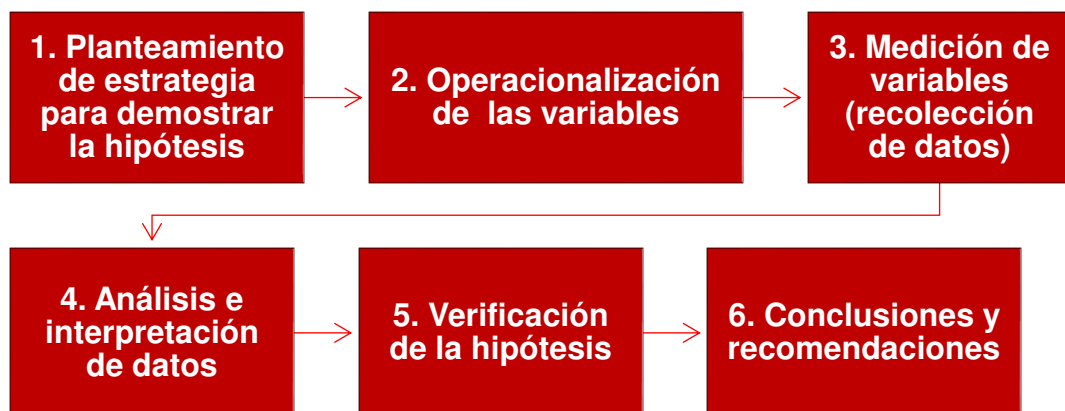
3.6.2 Muestra

La muestra de este proyecto es la mina Condestable, la cual se encuentra en Chota, Cañete. Esta ciudad se encuentra en la zona de la Costa del Perú y se ha tomado interés debido a que usa el método tradicional de depósito de relave superficial y no tiene otro método de uso para sus relaves. Además, otro punto importante fue la accesibilidad de información de la mina para la investigación.

3.7 Técnicas de investigación

Para la contrastación de la hipótesis se siguió la siguiente secuencia lógica:

Figura 44. Secuencia de Desarrollo del Proyecto



Fuente: Elaboración Propia

1. Para el planteamiento de la estrategia, se decidió utilizar una cámara subterránea como depósito de relaves para determinar los beneficios técnicos, económicos y de tiempo a la mina Condestable.

2. Se definieron las variables involucradas:

- Variable dependiente (Y) = Beneficios a la mina Condestable
- Variable independiente (X) = Cámaras de minas subterráneas como depósito de relaves

3. Para la medición de variables, la información necesaria fue recolectada dependiendo al tipo de variable. Para la variable independiente se recolectó información de las características de la cámara subterránea y los parámetros del rocoso macizo. Para la variable dependiente, se recolectó información para encontrar los beneficios que la mina Condestable gana depositando los relaves en las cámaras subterráneas al aplicar el relleno hidráulico. Estos beneficios son descritos en el siguiente capítulo.

4. Los análisis e interpretación de datos fueron divididos en cuatro partes basados a la cantidad de objetivos específicos elaborados:

- Componentes técnicos
- Costo
- Cronograma
- Vida útil del depósito superficial

Estos son descritos en el siguiente capítulo.

5. Se verificó la hipótesis propuesta con la interpretación de datos.

6. Al verificar la hipótesis propuesta, finalmente se elaboran las conclusiones y recomendaciones de esta tesis.

3.8 Instrumentos de Recolección de Datos

Para la recolección de datos se utilizó la información brindada por la Compañía Minera Condestable S.A. y se realizaron visitas a campo para tomas fotográficas como también medidas in situ.

3.9 Procesamiento y Análisis Estadístico de los Datos

El procesamiento y análisis estadístico de los datos para la ejecución del caso en estudio se realizó dependiendo al tipo de aspecto que se estaba analizando:

- Componentes Técnicos: se utilizó la información de oficina técnica para el desarrollo de hojas de cálculos en Microsoft Excel para los diseños de tapones de concreto y planos elaborados en AutoCAD para las dimensiones resultantes de estos tapones diseñados y trazo del sistema de tuberías que trasportará el relleno hidráulico hacia la cámara subterránea.
- Costos: se utilizó la información de oficina técnica para el desarrollo de hojas elaboradas en Microsoft Excel para análisis de precios unitarios y presupuestos.
- Cronogramas: elaboración del cronograma utilizando el programa Microsoft Project y extensión de tiempo de depósito superficial utilizando hojas de cálculo de Microsoft Excel.
- Vida útil del depósito superficial: se calculó la extensión de vida útil del depósito superficial con la información brindada por la Compañía Minera Condestable S.A.

3.10 Cronograma de actividades

El cronograma de actividades se desarrolló de acuerdo al sílabo del taller de tesis. Se muestra el cronograma de actividades en la siguiente tabla:

Tabla 10. Cronograma de Actividades

		CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES																	
Item.	Descripción	Sem 1 5-Aug	Sem 2 12-Aug	Sem 3 19-Aug	Sem 4 26-Aug	Sem 5 2-Sep	Sem 6 9-Sep	Sem 7 16-Sep	Sem 8 23-Sep	Sem 9 30-Sep	Sem 10 7-Oct	Sem 11 14-Oct	Sem 12 21-Oct	Sem 13 28-Oct	Sem 14 4-Nov	Sem 15 11-Nov	Sem 16 17-Nov	Sem 17 24-Nov	Sem 18 25-Nov
1.00	Trabajos preliminares																		
1.01	Planteamiento de la tesis																		
1.02	Recopilación de información																		
1.02.01	Recopilación información mina																		
1.02.02	Recopilación información planta																		
1.02.03	Visitas a unidad minera - socavón																		
1.03	Desarrollo marco teórico																		
1.03.01	Desarrollo y revisiones de marco teórico																		
1.04	Desarrollo resultados																		
1.04.01	Diseño de componentes																		
1.04.02	Análisis de precios unitarios																		
1.04.03	Comparativos de presupuestos																		
1.04.04	Cálculo de extensión de vida de depósito superficial																		
1.04.05	Elaboración de cronograma																		
1.05	Interpretación de Resultados																		
1.05.01	Conclusiones																		
1.05.02	Recomendaciones																		
1.06	Exposición para asesores																		
1.07	Preparación para sustentaciones																		
1.07.01	Revisión y corrección de tesis																		
1.07.02	Preparación de diapositivas																		
1.07.03	Ensayos para sustentar																		
1.08	Sustentación de tesis																		

Fuente: Elaboración Propia

3.11 Presupuesto

Se muestra el presupuesto utilizado para la elaboración de esta tesis en la siguiente tabla:

Tabla 11. Presupuesto

Actividades	Costo (S/.)
Taller de Tesis	S/. 5,000.00
Impresiones	S/. 1,000.00
Movilidad	S/. 500.00
TOTAL	S/. 6,500.00

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS

Las pruebas y resultados fueron desarrolladas basados en los cuatro indicadores, los cuales son los siguientes:

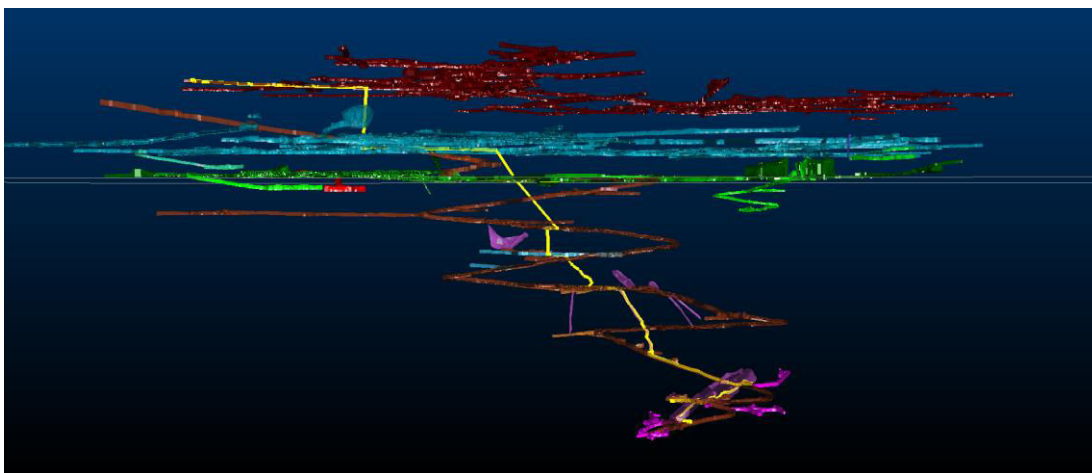
4.1 Componentes técnicos

Se identificaron los componentes de la aplicación del relleno hidráulico para cámaras subterráneas. Partes de estos componentes fueron utilizados para transferir el relave a la cámara subterránea, por lo cual esta cámara también está siendo utilizada como depósito de relaves. Los componentes son los siguientes:

4.1.1 Cámara Subterránea

La zona de investigación fue una cámara subterránea en la mina Condestable. Es importante conocer las características y ubicación de la cámara subterránea ya que esta información es necesaria para obtener el trazo de longitud de tubería, capacidad total de relleno en la cámara y para obtener las dimensiones del tapón de concreto. Del modelo mostrado a continuación, se eligió una cámara subterránea.

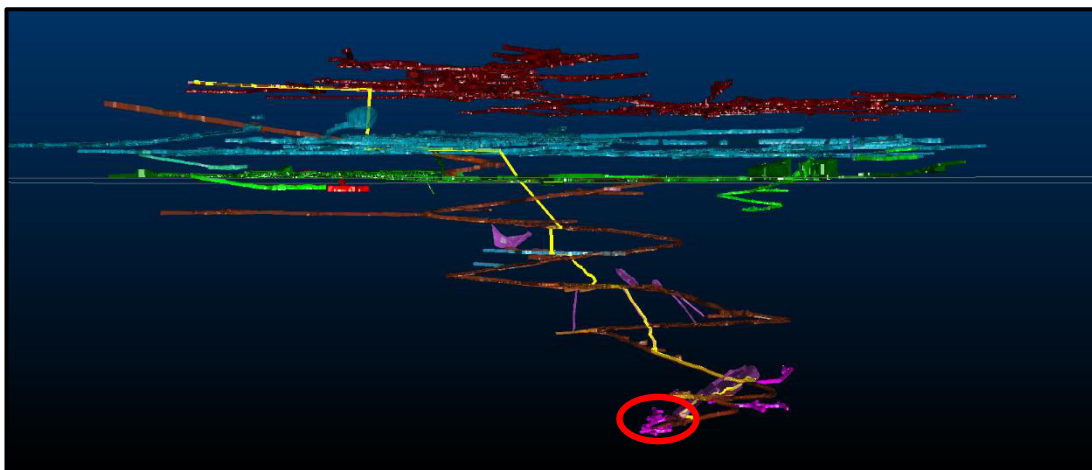
Figura 45. Vista 3D de las Cámaras Subterráneas Localizadas en la Mina Condestable



Fuente: Área de Planeamiento e Ingeniería, Compañía Minera Condestable S.A. (2017)

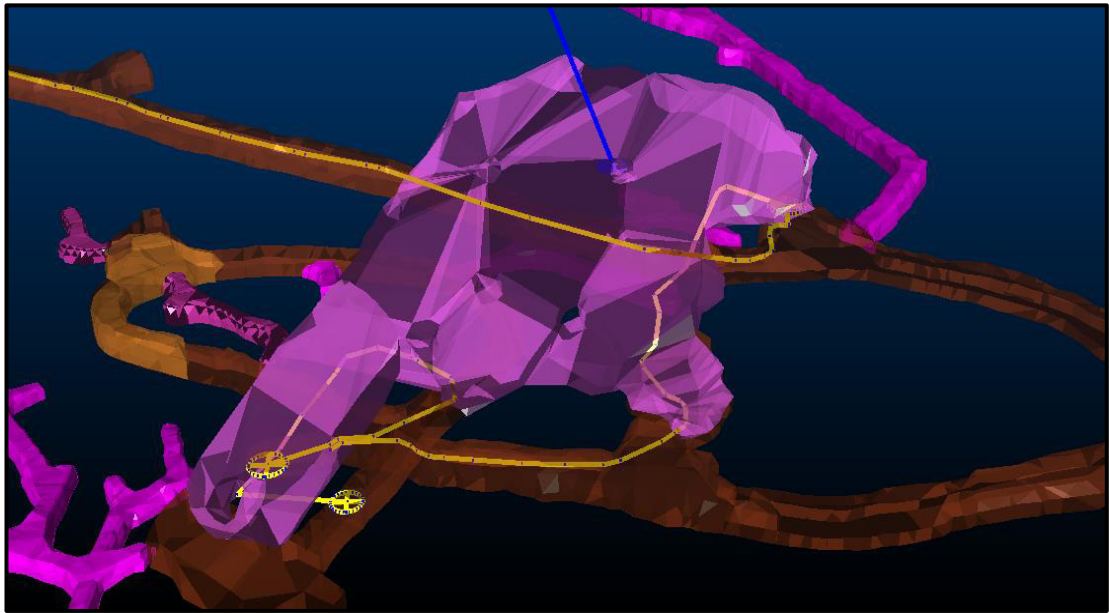
Se muestra la ubicación de la cámara subterránea usada como depósito en la siguiente figura:

Figura 46. Ubicación de la Cámara Subterránea Seleccionada



Fuente: Área de Planeamiento e Ingeniería, Compañía Minera Condestable S.A. (2017)

Figura 47. Cámara Subterránea Seleccionada



Fuente: Área de Planeamiento e Ingeniería, Compañía Minera Condestable S.A. (2017)

Se decidió utilizar la cámara subterránea en la parte más profunda de la mina, ya que el método de minado de esta mina es de forma ascendente, de abajo para arriba, y se debe empezar desde la parte más profunda de esta. Además, esta ubicación se encuentra en una parte crítica debido a su gran distancia desde la superficie. Las medidas de la cámara subterránea son las siguientes:

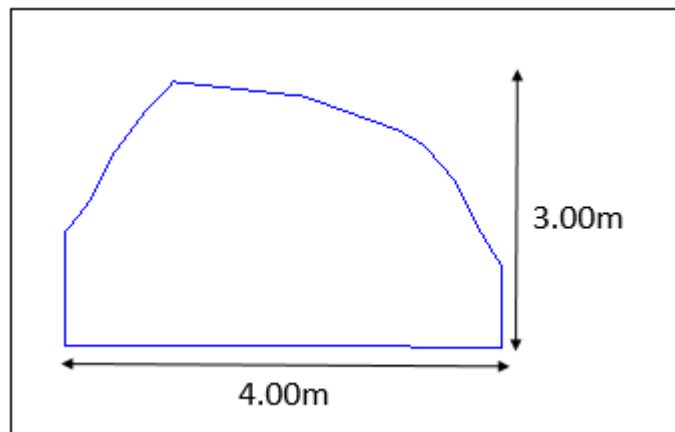
Tabla 12. Características de la Cámara Subterránea

Niveles (msnm)		Capacidad de Volumen (m3)
Inferior	Superior	
-95	-40	24000.00

Fuente: Elaboración Propia

Para el diseño del tapón de concreto, se necesitan las medidas del ingreso de esta cámara, las cuales son 4.00 metros de ancho y 3.00 metros de alto. Como se puede apreciar en la figura a continuación:

Figura 48. Dimensiones del Ingreso de la Cámara Subterránea



Fuente: Área de Planeamiento e Ingeniería, Compañía Minera Condestable S.A. (2017)

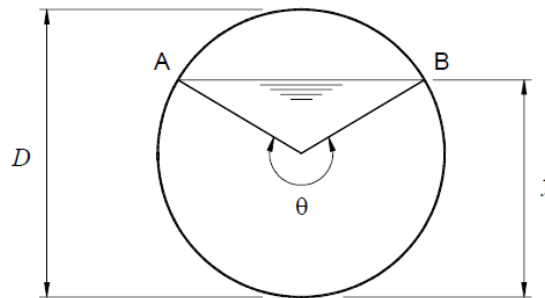
4.1.2 Tubería HDPE de 4 pulgadas

Las tuberías HDPE son los elementos usados para el transporte de relleno hidráulico hacia la cámara subterránea. Se decidió usar el diámetro de 4 pulgadas debido a que este es el diámetro usado para transportar el relave desde el espesador de relaves hacia el depósito de relaves superficial. Debido a que el relave es el mismo que se usa como relleno hidráulico, entonces se pueden usar las mismas tuberías para su transporte hacia la cámara subterránea.

Otra razón para usar el mismo diámetro es para aprovechar las bombas existentes ubicadas en el espesador de relaves y en el socavón. De tal manera de no necesitar hacer cálculos adicionales si se hubiera elegido usar nuevos diámetros.

Se hizo una pequeña verificación para el diámetro de 4 pulgadas:

Figura 49. Cálculo de un Tubo Parcialmente Lleno



Fuente: Rocha, A. Hidráulica de Tuberías y Canales.

De acuerdo a Rocha (2007), la tubería que trabaja parcialmente llena se caracteriza por la posibilidad de tener una velocidad media y un gasto mayores a los que corresponderían a un tubo lleno. También, Rocha (2007) recomienda que usualmente se diseña para un tirante $y = 0.75D$, siendo D el diámetro interno de la tubería.

Así se pudo determinar que el diámetro de tubería cumpla su función de acuerdo al caudal. Al considerar este factor de 75%, se puede calcular que el ángulo interno tiene un valor de $\theta = 240^\circ$. Para poder utilizar este ángulo, se debe convertir a radianes:

$$\theta = 240^\circ \times \frac{\pi}{180^\circ} = 4.189 \text{ radianes}$$

Se utilizaron las siguientes fórmulas:

1. $A = \frac{r^2}{2}(\theta - \text{sen } \theta)$, fórmula para calcular el área del tubo parcialmente lleno.
2. $R = \frac{r}{2\theta}(\theta - \text{sen } \theta)$, fórmula para calcular el radio hidráulico del tubo parcialmente lleno.
3. $Q = \frac{AR^{2/3}S^{1/2}}{n}$, fórmula de Manning para calcular el caudal que pasa por el tubo parcialmente lleno.

Al despejar la fórmula 3 para obtener el radio interno de la tubería y al reemplazar las fórmulas 1 y 2 en la fórmula 3, se obtiene la siguiente fórmula para corroborar si el diámetro usado es el correcto.

4. $r = \left[\frac{2xQxn(2\theta)^{\frac{2}{3}}}{\frac{1}{S^2x(\theta - \text{sen } \theta)^{\frac{5}{3}}} \right]^{\frac{3}{8}}$, fórmula obtenida para calcular radio de la tubería.

5. $D = 2r$, fórmula para calcular el diámetro de la tubería.

Rocha (2007) explica las variables para verificar el diámetro de tubería:

- Q = Caudal que pasa por la tubería
- n = Coeficiente de rugosidad de Manning
- S = Pendiente de tubería, se eligió el tramo más crítico
- θ = ángulo en centro de tubería
- r = radio interno de tubería
- R = radio hidráulico de tubería
- D = diámetro interno de tubería
- A = área de tubo parcialmente lleno
- V = velocidad del fluido
- y = tirante de tubería

El caudal que pasa por la tubería es un dato dado por el área de Planeamiento e Ingeniería de la Compañía Minera Condestable S.A., este caudal es el mismo usado para depositar relave en el depósito de relaves superficial. El caudal de dato fue $Q = 9,839 \text{ m}^3/\text{día}$ el cuál se convirtió de la siguiente manera:

$$Q = \frac{9839 \text{ m}^3}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ día} \times 1 \text{ hora} \times 1 \text{ minuto}}{24 \text{ horas} \times 60 \text{ minutos} \times 60 \text{ segundos}}$$

$$Q = 0.11 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para obtener el coeficiente de rugosidad de la tubería, n , se utilizaron las tablas de Manning, las cuales se obtuvieron del The Engineering ToolBox (2017). El rango de valores para polietileno corrugado con paredes interiores lisas es de 0.009-0.0015. Se eligió el coeficiente de rugosidad de $n = 0.015$ debido a que es el más crítico en este rango.

Se consideró la pendiente más crítica para el tramo de tubería. El cálculo es el siguiente:

- Longitud de tramo total: 250 metros.
- Altura: Nivel +315 msnm. – Nivel +235 msnm. = 80 metros.

Cálculo de la pendiente:

$$S = \frac{\text{Altura}}{\text{Longitud}} = \frac{80 \text{ m.}}{250 \text{ m.}} = 0.32$$

Teniendo estos datos, se reemplazaron en la fórmula 4 para hallar el radio:

$$r = \left[\frac{2xQxn(2\theta)^{\frac{2}{3}}}{S^{\frac{1}{2}}x(\theta - \text{sen } \theta)^{\frac{5}{3}}} \right]^{\frac{3}{8}} = \left[\frac{2x0.11\text{m}^3x0.015x(2x4.189 \text{ rad.})^{\frac{2}{3}}}{0.32^{\frac{1}{2}}x(4.189 \text{ rad.} - \text{sen } 4.189 \text{ rad.})^{\frac{5}{3}}} \right]^{\frac{3}{8}}$$

$$r = 0.044 \text{ m.} \rightarrow 1.57 \text{ pulg.}$$

$$D = 2r = 2 \times 0.044 \text{ m.} = 0.088 \text{ m.} \rightarrow 3.46 \text{ pulg.} \leq \text{Tubería de 4 pulg. OK}$$

Con esta verificación se confirmó de que se pueden usar las tuberías de HDPE de 4 pulgadas para el transporte del relleno hidráulico hacia la cámara subterránea.

La longitud total de tubería que se obtiene desde el espesor hasta la cámara subterránea es de 760 metros. El trazo fue decidido aprovechando que hay un sistema de tuberías existente el cuál transporta agua de la bocamina hacia la planta. Se decidió seguir un trazo paralelo a estas tuberías para mejor facilidad de instalación. El trazo de tubería existente en la mina se puede apreciar en el plano anexo.

4.1.3 Válvulas y Accesorios

Las válvulas y los accesorios fueron elegidos basados al diámetro de tubería, por lo tanto estos deben acomodarse a la tubería de 4 pulgadas utilizada. A la tubería de succión se le envolverá con tela arpillera en la parte final. Esta tela servirá como filtro para que los residuos en el agua no lleguen al tanque de agua para uso minero.

4.1.4 Tapón de Concreto

Para el diseño del tapón de concreto, se usó la Guía para el Diseño de Tapones para el Cierre de Labores Mineras, elaborado por el Ministerio de Energía y Minas del Perú (2006).

Se decidió utilizar el tapón tipo indentado debido a su resistencia estructural adecuada para el relleno hidráulico. Para el diseño del tapón indentado, se utilizaron los lineamientos de la Guía para el diseño de tapones y presas para minas subterráneas publicados por la oficina de Salud y Seguridad Ocupacional del Ministerio de Trabajo de Ontario de 1995, los cuales son explicados en la Guía de diseño del MEM (2006).

a) Requisitos del Diseño del Tapón

MEM (2006) cita que La Guía para el Diseño de Tapones preparada por el Ministerio de Trabajo de Ontario (1995), para el diseño de tapón indentado, se deben tomar en cuenta los siguientes componentes:

- Cargas ponderadas
- Cargas de corte ponderadas
- Momentos ponderados (y requisitos de esfuerzo)
- Separación de barras y espesor de la losa
- Anclaje en la roca
- Carga en el concreto

b) Información de Inicio

La información de inicio fue dada por el área de Planeamiento e Ingeniería de la Compañía Minera Condestable S.A., en esta investigación se asume que el macizo rocoso es impermeable:

Tabla 13. Características de la Cámara Subterránea

Características de la entrada de cámara subterránea				
Abertura		Elevación		
Ancho	Alto	Nivel 1	Nivel 2	Presión Hidrostática
lb (m)	la (m)	(msnm)	(msnm)	H (m)
4	3	-95	-40	50

Fuente: Área de Planeamiento e Ingeniería, Compañía Minera Condestable S.A. (2017)

Tabla 14. Características del Macizo Rocosó – Lava Andesítica

Densidad de Roca	Ángulo de fricción interna φ	Cohesión c
(T/m³)	(°)	(kPa)
2.75	33	100

Fuente: Área de Planeamiento e Ingeniería, Compañía Minera Condestable S.A. (2017)

Tabla 15. Características Adicionales para el Diseño

f'c	f'y	g	Densidad de Relave
(Mpa)	(Mpa)	(m/s²)	(kg/m³)
28	420	9.81	1450

Fuente: Área de Planeamiento e Ingeniería, Compañía Minera Condestable S.A. (2017)

c) Calidad del Agua

De acuerdo a la Oficina Técnica de CMC, es recomendable usar un cemento tipo V debido a la exposición de sulfatos por el relleno hidráulico hecho de relave y agua, por lo tanto se decidió utilizar un cemento tipo V y una resistencia a la compresión de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ (28MPa).

d) Capacidad de Carga de la Roca

De la guía del MEM (2007), se utilizó la siguiente fórmula:

$$q_b = \frac{1}{2} \gamma W N_\gamma + c N_c$$

Donde:

$$\gamma = \text{peso unitario de la roca} = 2.75 \text{ ton/m}^3 = 26.98 \text{ kN/m}^3$$

$$c = \text{cohesión de la roca} = 100 = \text{kPa}$$

$$\phi = \text{ángulo de fricción interna} = 33^\circ$$

N_γ y N_c son factores de la capacidad de carga, calculados con estas fórmulas:

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) = 26.09$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi = 38.64$$

$$N_\gamma = 1.5 (N_q - 1) \tan \phi = 24.44$$

Al reemplazar estos datos, se obtuvo la capacidad de carga de la roca de:

$q_b = 5182.62 \text{ kPa}$, usando un factor de seguridad de 3, se obtiene:

$q_b = 1727.54 \text{ kPa}$

e) Peligro Sísmico

El informe de peligro sísmico brindado por la Oficina Técnica de CMC indicó que el peligro sísmico es de 0.4g. Este factor se utilizó para amplificar las cargas ponderadas.

f) Cargas Estáticas

Para el cálculo de la carga viva debido a la presión hidrostática, se utilizó la siguiente fórmula de acuerdo a la guía del MEM (2007):

$$w = H \times \rho_w \times g$$

Donde:

H = presión hidrostática = 55 m

ρ_w = densidad del relleno hidráulico = 1450 kg/m³

g = 9.81 m/s²

Por lo tanto, la carga viva debido a la presión hidrostática es igual a:

$$w = 782.35 \text{ kN/m}^2$$

g) Cargas Dinámicas

Para el cálculo dinámico, se multiplicó el factor de peligro sísmico de 0.4g al cálculo de la carga viva y también se añadió un factor de seguridad de 1.1 de acuerdo a los criterios de diseño indicados.

$$Q = 0.4 \times 1.1 \times w$$

Donde:

Q = carga dinámica calculada

w = carga viva debido a la presión hidrostática

Por lo tanto, la carga dinámica calculada es:

$$Q = 344.23 \text{ kN/m}^2$$

h) Coeficiente de Diseño

De acuerdo a MEM (2007), para calcular los coeficientes de momento de diseño relativos a los requerimientos geométricos del tapón y la configuración del diseño son los siguientes:

$$\beta_c = \frac{\text{lado mayor}}{\text{lado menor}} = \frac{l_b}{l_a} \quad \text{y} \quad m = \frac{\text{lado menor}}{\text{lado mayor}} = \frac{l_a}{l_b}$$

Siendo $l_b = 4$ metros y $l_a = 3$ metros, se obtuvieron los datos:

$$\beta_c = 1.33 \text{ y } m = 0.75$$

Estos valores fueron usados para interpolar basado a la Tabla E-2 Caso 1, y así conseguir el coeficiente de momento C_{al} y C_{bl} . Al interpolar se hallaron los valores:

$$C_{al} = 0.0610 \text{ y } C_{bl} = 0.0190$$

i) Carga Total Ponderada W_f

Las siguientes fórmulas de combinaciones de cargas fueron basadas al Canadian Standards Association (2014), desde este momento se le nombrará CSA como se le nombra en la guía del MEM (2007).

$$W_f = \alpha_D D + \gamma \chi (\alpha_L L + \alpha_Q Q + \alpha_T T)$$

Donde:

W_f = Carga total ponderada

D = Carga muerta = 0 kN/m², debido a ser un tapón indentado vertical

L = Carga viva = 782.35 kN/m²

Q = Carga de viento, sismo = 344.23 kN/m², en este caso es una carga de sismo.

T = temperatura = 0 kN/m²

Se usaron los factores de carga $\alpha_D = 1.25$, $\alpha_L = 1.50$, $\alpha_Q = 1.50$, $\alpha_T = 1.25$

Se utilizó el factor de combinación de carga de $\chi = 0.7$ debido a que se tienen dos factores a combinar y un factor $\gamma = 1.0$ de importancia.

Por lo tanto, $W_f = 1182.90$ kN/m²

j) Resistencia al Corte Ponderada, V_c

Se utilizaron las fórmulas dadas por el CSA (2014):

$$V_c = (1 + 2 / \beta_c) 0.2 \lambda \phi_c (f'_c)^{0.5} b_o d, \text{ pero no mayor que } V_c = 0.4 \lambda \phi_c (f'_c)^{0.5} b_o d$$

Donde:

$\beta_c = 1.088$, coeficiente de diseño

$\phi_c = 0.60$, factor de resistencia

$\lambda = 1$, factor de importancia

$f'_c = 28$ Mpa, Resistencia del concreto

b_o = perímetro de la sección crítica, también expresado como:

$$b_o = 2 (l_a + l_b - 2d)$$

d = profundidad efectiva en mm

Al reemplazar datos y verificar que la primera ecuación no sea mayor que la segunda fórmula, se llegó a la siguiente ecuación:

$$V_c = 17.7794 d - 0.005079 d^2 \text{ (kN)}$$

k) Resistencia al Corte Ponderada, V_f

De acuerdo al MEM (2007), la carga de corte ponderada es la siguiente:

$$V_f = W_f (l_a - d) (l_b - d)$$

Donde:

V_f = carga de corte ponderada

W_f = carga ponderada total = 1182.9 kN/m²

l_a = 3 m, espacio libre en la dirección corta de la losa

l_b = 4 m, espacio libre en la dirección larga de la losa

d = profundidad efectiva en mm

Al reemplazar datos, se obtiene la siguiente ecuación:

$$V_f = 0.001182 d^2 - 8.2804 d + 14194.91 \text{ (kN)}$$

l) Espesor Ponderado del Tapón, D

De acuerdo al MEM (2007), se asume que $V_c = V_f$ para obtener el valor d , por lo tanto se obtienen los siguientes valores:

$d_1 = 644.54$ mm

$d_2 = 3516.54$ mm

Se utiliza el mayor, $d_2 = 3516.54$ mm

Por lo tanto:

$d = 3600.00$ mm, espesor a usar.

m) Momento Ponderado (Lado Corto), M_f

De acuerdo al CSA (2014), la siguiente ecuación considera el momento que actúa a lo largo del lado corto del tapón:

$$M_f = M_{al} + M_{ad} + M_{aq} + M_{at}$$

Donde el cálculo de momento para cada tipo de carga es:

$$M_a = C_{al} \times W_f(\text{tipo de carga}) \times l_a^2$$

$M_{al} = 450.98$ kN.m, momento positivo de carga viva

$M_{ad} = 0$ kN.m, Momento positivo de carga muerta

$M_{aq} = 198.43$ kN.m, Momento positivo de sismo

$M_{at} = 0$ kN.m, Momento positivo de temperatura

Por lo tanto, $M_f = 649.42$ kN.m por metro de ancho.

n) Área de refuerzo de acero para los cálculos preliminares (Lado Corto)

De acuerdo al CSA (2014), la siguiente ecuación se utilizó para el cálculo de acero:

$$A_s = (M_f \times 10^6) / (0.90 \phi_s f_y d)$$

Siendo:

$M_f = 649.42$ kN.m por metro de ancho.

$d = 3600$ mm

Para $\phi_s = 0.85$, $f_y = 420$ MPa

Se calculó un $A_s = 561.45$ mm²/m

Se utilizó una capa de acero de 5/8" cada 250 mm, calculando una nueva área de acero de $A_s = 792.00$ mm²/m

La cuantía fue calculada con la siguiente fórmula:

$$\rho = A_s / (b d)$$

Donde $b = 1000$ mm por unidad de ancho

$$p = 0.00022$$

o) Resistencia del Momento Ponderado (Lado Corto), Mr

De acuerdo al MEM (2007), se debe verificar que el momento resistente es mayor que el momento ponderado. La siguiente ecuación se utilizó para el cálculo de momento ponderado:

$$M_r = \rho \phi_s f_y [1 - (\rho \phi_s f_y) / (1.7 \phi_c f'_c)] b d^2$$

$$M_r = 1015.08 \text{ kN.m} \quad > \quad M_f = 649.42 \text{ kN.m} \quad \text{OK}$$

p) Proporción del Refuerzo de Tensión (Lado Corto), p

De acuerdo al MEM (2007), se debe verificar que la cuantía calculada cumpla con los cálculos de cuantía mínima y máxima, por lo tanto se deberá corregir al no cumplir.

Cuantía calculada:

$$p = 0.00022$$

a. Refuerzo de temperatura y contracción

$p_{\min} = 0.002 \quad > \quad p = 0.00022$ **MAL**, se utiliza cuantía mínima de $p_{\min} = 0.002$, por lo tanto la nueva cuantía $p = 0.002$

b. Proporción máxima de acero admisible para asegurar la falla dúctil

$$\rho_{\max} = (\phi_c / \phi_s) [(0.85 \times f'_c \times \beta_1 \times 600) / f_y (600 + f_y)]$$

Siendo $\phi_c = 0.60$, $\phi_s = 0.85$ y $\beta_1 = 0.85$

$$p_{\max} = 0.02000 \quad < \quad p = 0.002 \quad \text{OK}$$

c. Refuerzo mínimo para flexión

$$\rho_{\min} = 1.4 / f_y$$

$P_{\min} = 0.00333 \quad > \quad p = 0.002$ **MAL**, se utiliza cuantía

mínima de $p_{\min} = 0.00333$, por lo tanto la nueva cuantía $p = 0.00333$

Al terminar las verificaciones, se obtiene la nueva cuantía de $p = 0.00333$ y con esta se calculó el área de acero.

$$A_s = 12000 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Se decidió utilizar 2 capas de acero de 1 3/8" cada 150 mm, calculando una nueva área de acero de $A_s=13413.33 \text{ mm}^2/\text{m}$

q) Momento Ponderado (Lado Largo), M_f

De acuerdo al CSA (2014), la siguiente ecuación considera el momento que actúa a lo largo del lado corto del tapón:

$$M_f = M_{bl} + M_{bd} + M_{bq} + M_{bt}$$

Donde el cálculo de momento para cada tipo de carga es:

$$M_b = C_{b1} \times W_f(\text{tipo de carga}) \times l_b^2$$

$M_{bl} = 249.73 \text{ kN.m}$, momento positivo de carga viva

$M_{bd} = 0 \text{ kN.m}$, Momento positivo de carga muerta

$M_{bq} = 109.88 \text{ kN.m}$, Momento positivo de sismo

$M_{bt} = 0 \text{ kN.m}$, Momento positivo de temperatura

Por lo tanto, $M_f = 359.60 \text{ kN.m}$ por metro de ancho.

r) Área de refuerzo de acero para los cálculos preliminares (Lado Largo)

De acuerdo al CSA (2014), la siguiente ecuación se utilizó para el cálculo de acero:

$$A_s = (M_f \times 10^6) / (0.90 \phi_s f_y d)$$

Siendo:

$M_f = 359.60 \text{ kN.m}$ por metro de ancho.

$d = 3600 \text{ mm}$

Para $\phi_s = 0.85$, $f_y = 420 \text{ MPa}$

Se calculó un $A_s=310.89 \text{ mm}^2/\text{m}$

Se utilizó una capa de acero de 1/2" cada 250 mm, calculando una nueva área de acero de $A_s=508.00 \text{ mm}^2/\text{m}$

La cuantía fue calculada con la siguiente fórmula:

$$\rho = A_s / (b d)$$

Donde $b = 1000 \text{ mm}$ por unidad de ancho

$\rho = 0.000141$

s) Resistencia del Momento Ponderado (Lado Largo), Mr

De acuerdo al MEM (2007), se debe verificar que el momento resistente es mayor que el momento ponderado. La siguiente ecuación se utilizó para el cálculo de momento ponderado:

$$M_r = \rho \phi_s f_y [1 - (\rho \phi_s f_y) / (1.7 \phi_c f'_c)] b d^2$$

$$M_r = 651.73 \text{ kN.m} \quad > \quad M_f = 359.60 \text{ kN.m} \quad \mathbf{OK}$$

t) Proporción del Refuerzo de Tensión (Lado Largo), p

De acuerdo al MEM (2007), se debe verificar que la cuantía calculada cumpla con los cálculos de cuantía mínima y máxima, por lo tanto se deberá corregir al no cumplir.

Cuantía calculada:

$$p = 0.000141$$

a. Refuerzo de temperatura y contracción

$$p_{\min} = 0.002 \quad > \quad p = 0.000141 \quad \mathbf{MAL}, \text{ se utiliza cuantía mínima de } p_{\min} = 0.002, \text{ por lo tanto la nueva cuantía } p = 0.002$$

b. Proporción máxima de acero admisible para asegurar la falla dúctil

$$p_{\max} = (\phi_c / \phi_s) [(0.85 \times f'_c \times \beta_1 \times 600) / f_y (600 + f_y)]$$

$$\text{Siendo } \phi_c = 0.60, \phi_s = 0.85 \text{ y } \beta_1 = 0.85$$

$$p_{\max} = 0.02000 \quad < \quad p = 0.002 \quad \mathbf{OK}$$

c. Refuerzo mínimo para flexión

$$p_{\min} = 1.4 / f_y$$

$$p_{\min} = 0.00333 \quad > \quad p = 0.002 \quad \mathbf{MAL}, \text{ se utiliza cuantía mínima de } p_{\min} = 0.00333, \text{ por lo tanto la nueva cuantía } p = 0.00333$$

Al terminar las verificaciones, se obtiene la nueva cuantía de $p = 0.00333$ y con esta se calculó el área de acero.

$$A_s = 12000 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Se decidió utilizar 2 capas de acero de 1 3/8" cada 150 mm, calculando una nueva área de acero de $A_s = 13413.33 \text{ mm}^2/\text{m}$

u) Espaciamiento de la Capa de Barras y Espesor de la Losa

De acuerdo al MEM (2007), se debe verificar que la cuantía calculada cumpla con los cálculos de cuantía mínima y máxima, por lo tanto se deberá corregir al no cumplir.

$$s = d_b + 1.33 \times 35 \text{ mm (tamaño máximo del agregado)}$$

Donde:

d_b = diámetro de la barra de refuerzo en mm

$S = 81.48 \text{ mm}$, por lo tanto se usó una separación entre capas de:

$$S = 85 \text{ mm}$$

Con este espesor calculado, se determinó el espesor de la losa con la siguiente fórmula:

$$h = d + s / 2 + d_c + d_b / 2$$

Donde:

$d = 3600 \text{ mm}$, profundidad efectiva

$d_c = 75 \text{ mm}$, recubrimiento de concreto de la barra.

$$h = 3734.96 \text{ mm}$$

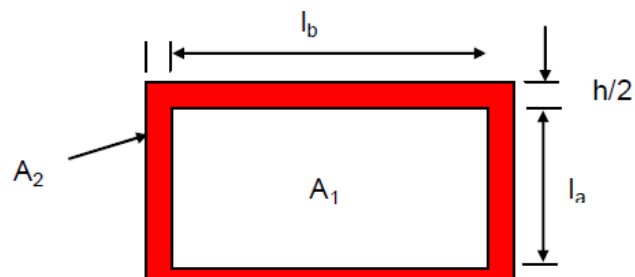
Se determinó el espesor de la losa como:

$$h = 3750 \text{ mm}$$

v) Anclaje en Roca

Se consideró la siguiente figura como referencia:

Figura 50. Anclaje en roca para tapón indentado



Fuente: MEM (2007).

Se consideró la siguiente fórmula para el cálculo dada por MEM (2007):

$$A = A_2 - A_1$$

Donde:

A_2 = área exterior del tapón

A_1 = área interior del tapón

$h / 2$ = anclaje en roca

Presión hidrostática = 782.35 kN/m²

Presión de resistencia admisible de roca = 1727.54 kN/m²

Se reemplazaron valores en la fórmula:

$$782.35 A_1 = 1727A \text{ considerando que } A = (l_a + h) (l_b + h) - (l_a \times l_b)$$

Se llegó a la ecuación cuadrática:

$$h^2 + 7h - 5.434 = 0$$

$$h_1 = 0.705 \text{ m}$$

$$h_2 = -7.705 \text{ m}$$

Se seleccionó en mayor $h = 0.71 \text{ m}$.

Anclaje calculado $h = 0.80 \text{ m}$, por lo tanto el anclaje para la roca será:

$$h / 2 = 0.40 \text{ m}.$$

w) Carga en el Concreto

De acuerdo al MEM (2007), se utilizaron las siguientes fórmulas:

Carga en el apoyo:

$$\text{Presión} = 1727.54 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Presión} = 1727.54 \times 1.5 \text{ (factor de carga viva)}$$

$$\text{Presión} = 2591.31 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Presión} = 2.59 \text{ MPa}$$

Presión de carga admisible sobre el concreto = $0.85 \phi_c f'_c$, siendo $\phi_c=60$

Presión de carga admisible sobre el concreto = 14.28 Mpa > 2.59 Mpa **OK**

x) Resumen de Diseño de Tapón Indentado

Los resultados calculados se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 16. Resumen de Dimensiones de Tapón Calculado

Ancho	Alto	Espesor	Anclaje en Roca	Refuerzo en el tapón
(m)	(m)	(m)	(m)	
4.8	3.8	3.75	0.4	1 3/8" cada 0.15m

Fuente: Elaboración propia

4.2 Costo

Se realizaron dos presupuestos de comparación. Es necesario comparar los presupuestos con la misma cámara para poder obtener un beneficio económico. Se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- El primer presupuesto fue desarrollado aplicando relleno hidráulico en la cámara subterránea.
- El segundo presupuesto fue desarrollado aplicando el relleno convencional el cual es el relleno rocoso en la cámara subterránea.
- La cámara subterránea fue la misma cámara que se describió en el aspecto técnico de este capítulo, la cual se encuentra en la mina Condestable a una altura de -95 msnm.
- Los precios unitarios fueron desarrollados utilizando costos referenciales y actualizados de la revista Costos edición 283 (2017). Se encuentran colocados como anexos.

4.2.1 Presupuesto de aplicación de relleno hidráulico en cámara subterránea

Para este presupuesto, se consideraron los metrados de los componentes definidos anteriormente en este capítulo.

Tabla 17. Presupuesto de Aplicación de Relleno Hidráulico en Cámara Subterránea de 24000 m³. Ubicación: Mina Condestable, -95 msnm.

ITEM	DESCRIPCIÓN	UND.	METRADO	PU (S/.)	TOTAL (S/.)
1.00.00	TAPÓN DE CONCRETO ARMADO				
1.01.00	OBRAS PRELIMINARES				
1.01.01	Trazo y replanteo de la obra de tapón	m2	18.00	2.34	42.08
1.01.02	Acondicionamiento del área para depositar materiales	m2	50.00	2.11	105.57
1.01.03	Traslado de material de depósito hasta la bocamina	m3	68.40	6.88	470.75
1.01.04	Acarreo de material en interior mina con Cargador Frontal	m3	68.40	2.94	201.09
1.01.05	Movilización y desmovilización de equipos y personal	glb	1.00	4,875.00	4,875.00
1.02.00	OBRAS DE CONCRETO ARMADO				
1.02.01	Concreto f _c = 280 kg/cm ²	m3	68.40	416.35	28,478.33
1.02.02	Encofrado y desencofrado para tapón	m2	36.48	57.50	2,097.55
1.02.03	Encofrado perdido para tapón	m2	18.24	23.42	427.10
1.02.04	Acero de refuerzo f _y =4200 kg/cm ²	kg	442.96	6.39	2,830.61
1.02.05	Aplicación de resina epóxica para unir roca y concreto	m2	64.50	59.19	3,818.05
1.02.06	Aplicación de resina epóxica para unir concreto y concreto	m2	72.00	59.19	4,262.01
1.03.00	TUBERIAS Y ACCESORIOS				
1.03.01	Suministro e instalación de tubería HDPE Ø 4"	ml	54.00	87.35	4,717.10
1.03.02	Suministro e Instalación de Válvula de bola Ø 4"	und	4.00	250.27	1,001.08
1.03.03	Suministro e Instalación de stub ends para válvula Ø 4"	und	4.00	20.31	81.22
1.03.04	Instalación de bridas tipo slip on Ø 4"	und	4.00	63.24	252.95
1.03.05	Colocación de Tela Arpillera en tuberías	m2	7.60	20.04	152.31
1.04.00	OTROS				
1.04.01	Plastificante para evitar cangrejeras en concreto	glb	1.00	1,885.00	1,885.00
2.00.00	LÍNEA DE TUBERÍA PARA RELAVES				
2.01.01	Suministro e instalación de tubería HDPE 4"	ml	760.00	87.35	66,388.77
2.01.02	Acoples de unión tipo victaulic para tubería HDPE 4"	und	10.00	89.06	890.58
COSTO DIRECTO					122,977.17
GASTOS GENERALES 10.00%					12,297.72
UTILIDAD 10.00%					12,297.72
SUBTOTAL EN SOLES					147,572.60
IGV 18.00%					26,563.07
COSTO TOTAL EN SOLES					174,135.67

Fuente: Elaboración Propia

Al tener un costo total de S/.174,135.67 para una cámara subterránea de capacidad de 24000 m³, se puede concluir que existe un ratio de S/. 7.26/m³, por lo que por cada metro cúbico llenado de la cámara se gasta S/. 7.26.

4.2.2 Presupuesto de aplicación de relleno rocoso en cámara subterránea

Para este presupuesto, se consideró el la aplicación tradicional que se usa en la mina Condestable.

Tabla 18. Presupuesto de Aplicación de Relleno Rocoso en Cámara Subterránea de 24000 m³ Utilizando Relleno Rocoso. Ubicación: Mina Condestable, -95 msnm.

ITEM	DESCRIPCIÓN	UND.	METRADO	PU (S/.)	TOTAL (S/.)
1.00.00	MOVIMIENTO DE TIERRA				
1.01.00	Traslado de material de depósito hasta la bocamina	m3	24,000.00	6.88	165,177.07
1.02.00	Acarreo de material en interior mina con Cargador Frontal	m3	24,000.00	2.94	70,556.16
2.00.00	OTROS				
2.01.00	Barricada para cierre de cámara subterránea	Glb	1.00	975.00	975.00
COSTO DIRECTO					236,708.23
GASTOS GENERALES 10.00%					23,670.82
UTILIDAD 10.00%					23,670.82
SUBTOTAL EN SOLES					284,049.87
IGV 18.00%					51,128.98
COSTO TOTAL EN SOLES					335,178.85

Fuente: Elaboración Propia

Al tener un costo total de S/.335,178.85 para una cámara subterránea de capacidad de 24000 m³, se puede concluir que existe un ratio de S/. 13.97/m³, por lo que por cada metro cúbico llenado de la cámara se gasta S/. 13.97.

4.3 Cronograma de Ejecución

Se desarrollaron los dos cronogramas utilizando rendimientos para mina y bocamina, los cuales son menores a rendimientos normalmente usados. Los resultados fueron los siguientes:

- Tiempo de ejecución de la aplicación del relleno hidráulico en una cámara subterránea: 3.5 semanas.
- Tiempo de ejecución de la aplicación del relleno rocoso en una cámara subterránea: casi 7 semanas.
- Los cronogramas han sido adjuntados como anexos.

4.4 Vida útil del depósito de relaves superficial

Para el cálculo de extensión de vida del depósito de relaves superficial, se tomó el informe técnico de Anddes (2016) para tener datos de la producción nominal de relaves. Además, el área de Planeamiento e Ingeniería de la

Compañía Minera Condestable S.A. nos brindó información de la disposición de relaves para obtener información del contenido de agua que contiene el relleno hidráulico. Así se obtuvo la siguiente información:

- Producción nominal de relaves diaria: 6696 t/día
- Peso unitario del relleno hidráulico: 1.45 t/m³

Al tener una cámara subterránea de capacidad de 24000m³, se concluye que se puede llenar un total de 34800 toneladas de relleno hidráulico, lo que equivale a 5.20 días de extensión de vida al depósito superficial.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y APLICACIONES

5.1 Discusión

5.1.1 Interpretación

A continuación se presenta la interpretación de los resultados obtenidos con cada aspecto de beneficio:

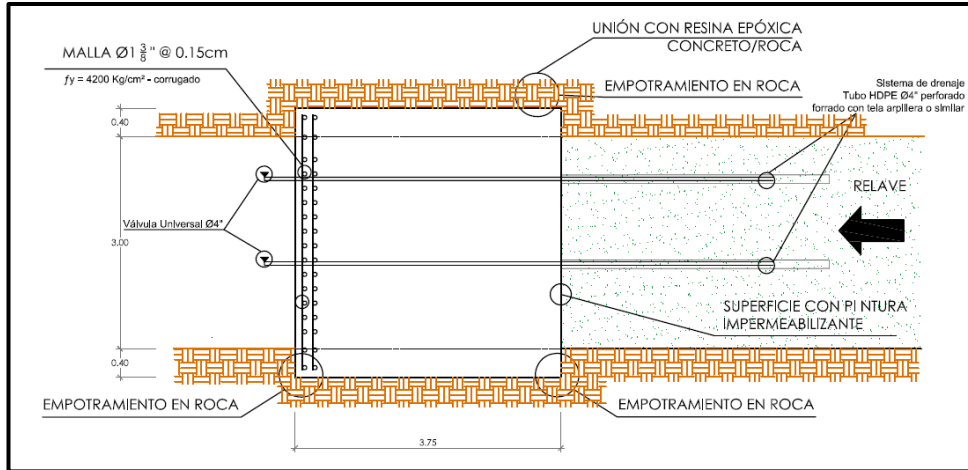
a) Componentes Técnicos

Se elaboró un método de cierre de cámara subterránea utilizando relleno hidráulico. En este método se identificaron componentes para este cierre de cámara, los cuales son los siguientes:

- Cámara subterránea de 24000 m³ de capacidad, con una entra de 4 metros de ancho y 3 metros de altura.
- Tubería HDPE de 4", incluyendo accesorios, válvulas y acoples, de trazo de longitud total de 760 metros.
- Tapón de concreto para retener el relleno hidráulico en la cámara subterránea, sus dimensiones calculadas siendo 4.8m de ancho, 3.8m de alto y 3.75m de espesor.

Una mejor visualización de los resultados y del método de cierre de cámara se muestra en la figura:

Figura 51. Detalle de Tapón Indentado con Sistema de Tuberías



Fuente: Elaboración Propia

El detalle completo del tapón indentado diseñado se puede ver en el plano de anexo.

b) Costo

Se compararon dos tipos de cierre de cámaras subterráneas, los resultados siendo los siguientes:

Tabla 19. Comparativo de Presupuestos para Cámara Subterránea de 24000m³

Comparativo de Presupuestos para Cámara Subterránea de 24000m ³	
Relleno Hidráulico	Relleno Rocoso
Total Gasto: S/. 174,135.67	Total Gasto: S/. 335,178.85
Ratio: S/.7.26/m ³	Ratio: S/.13.97/m ³

Fuente: Elaboración Propia

Al comparar estos dos presupuestos, se interpretó que el presupuesto de ejecución usando relleno hidráulico es mucho más barato que usando el relleno rocoso.

c) Cronograma

En el aspecto de tiempo se compararon cronogramas de ejecución siendo el tiempo de ejecución de los dos métodos de cierre casi igual de 7 semanas.

d) Vida útil del depósito superficial

El factor de tiempo de extensión de vida útil del relave superficial fue calculado como 5.20 días por lo cual si se obtuvo un beneficio de tiempo.

5.1.2 Análisis

Se analizaron las interpretaciones de los resultados profundamente para validar las hipótesis propuestas.

a) Componentes Técnicos

Al analizar el aspecto técnico, se logró lo siguiente:

- El cierre de cámaras subterráneas con uso de relleno hidráulico, es un gran aprovechamiento de espacios vacíos para depositar relaves.
- Se está aprovechando los trazos existentes de tuberías, como referencia de trazo para nuevas tuberías, y las bombas para poder desarrollar un sistema de transporte de relleno hidráulico.
- Las tuberías son reusables, por lo tanto se pueden utilizar para llenar varias cámaras subterráneas.
- Ya que es obligatorio hacer los cierres de mina, se está aprovechando usar este sistema de cierre.
- Se evitan problemas con vecinos por impacto ambiental.

- El agua que sobresale luego de que se sedimente el relleno hidráulico en la cámara subterránea será reutilizado para labores de planta. Por lo tanto no se desperdicia ningún componente de este sistema.
- Se utilizó el método de diseño Canadiense en comparación con el diseño de tapón elaborado por Paucar (2015), el cual utilizó el método dado por ACI-14. En comparación, el método del ACI se utiliza para tapones tipos paralelos los cuales dan una longitud de espesor más larga que los tapones indentados.

Basado en este análisis, se concluye que al determinar los componentes técnicos para la aplicación del relleno hidráulico en cierre de cámara subterránea, la mina Condestable encuentra beneficios al aprovechar espacios vacíos y equipos existentes para el transporte y depósito de relaves, por lo tanto validando la hipótesis secundaria elaborada.

b) Costo

Al analizar el aspecto económico, se logró lo siguiente:

- Aunque se tiene más partidas la aplicación de relleno hidráulico, su costo total es mucho menor que el costo total usando relleno rocoso.
- La aplicación del relleno hidráulico en cámaras subterráneas cuesta 51.97% del costo utilizado en la aplicación del relleno rocoso.
- Con la diferencia entre cantidades de dinero de los dos presupuestos, se puede ejecutar otro cierre usando relleno hidráulico a una cámara subterránea con las mismas o similares características a la cual se comparó.

Basado en este análisis, se concluye que al comparar los costos para la aplicación del relleno hidráulico con el método de relleno rocoso en

cierre de cámara subterránea, la mina Condestable encuentra beneficios debido a que el costo de aplicación de relleno hidráulico es menor que el costo de relleno rocoso, por lo tanto validando la hipótesis secundaria elaborada.

c) Cronograma

Al analizar el aspecto de tiempo, se logró lo siguiente:

- El tiempo de ejecución de la aplicación del relleno hidráulico en cámaras subterráneas es menor que la aplicación del relleno rocoso.
- Con la diferencia entre tiempos de los dos cronogramas, se puede ejecutar otro cierre usando relleno hidráulico a una cámara subterránea con las mismas o similares características a la cual se comparó.

Basado en este análisis, se concluye que al comparar el cronograma de ejecución para la aplicación del relleno hidráulico con el método de relleno rocoso en cierre de cámara subterránea, la mina Condestable encuentra beneficios debido que el tiempo de ejecución de la aplicación del relleno hidráulico es menor que el tiempo de ejecución del relleno rocoso, por lo tanto validando la hipótesis secundaria elaborada.

d) Vida útil del depósito superficial

- Al utilizar relleno hidráulico en la cámara subterránea, el depósito superficial extiende su vida útil.
- Los días de extensión de vida útil se pueden aprovechar en utilizar en los días donde no se encuentra personal en el depósito superficial.
- Basado en este análisis, se concluye que al calcular la extensión de vida útil del depósito de relaves superficial debido a la aplicación del relleno hidráulico cámaras subterráneas como depósito de relaves, la mina

Condestable encuentra beneficios ya que el depósito de relaves superficial tendrá más durabilidad que lo diseñado, por lo tanto validando la hipótesis secundaria elaborada.

5.2 Aplicación

Con los resultados obtenidos, se concluye que el relleno hidráulico en cámaras subterráneas como depósito de relaves beneficia a la mina Condestable en los aspectos técnico, económico y de tiempo, de esta manera se valida la hipótesis general.

CONCLUSIONES

1. Se identificaron los componentes del depósito de relaves subterráneo, siendo estos: la cámara subterránea de capacidad de 24000m³, la red tuberías de HDPE de 4" de longitud total de 760 metros para el transporte de relleno hidráulico y un tapón de concreto de dimensiones de 4.80 metros de ancho, 3.80 metros de alto y 3.75 metros de espesor.
2. La mina Condestable se beneficia al identificar los componentes técnicos debido a que se están aprovechando espacios subterráneos vacíos para usarlos como depósitos de relaves y así no usar el depósito superficial. A la vez, se está cumpliendo el deber de cierre de mina progresiva.
3. El presupuesto usando relleno hidráulico en cámaras subterráneas fue S/.174,135.67 y el presupuesto usando relleno rocoso fue S/.335,178.85. Lo cual arroja una diferencia de S/.161,043.18. Debido a su menor costo, la mina Condestable se beneficia económicamente al usar el relleno hidráulico.
4. El tiempo de ejecución usando relleno hidráulico en cámaras subterráneas fue de 3.5 semanas en comparación con el tiempo de ejecución utilizando relleno rocoso el cual fue de casi 7 semanas.

Debido a su menor tiempo de ejecución, la mina Condestable se beneficia en un factor de tiempo.

5. Al usar el relleno hidráulico en cámaras subterráneas como depósito de relaves, la mina Condestable está extendiendo la vida útil del depósito superficial en 5.20 días, los cuales se aprovechan para los días en los cuales no hay personal en el depósito superficial.

RECOMENDACIONES

1. Implementar este método de depósito para minas que tienen un diferente tratamiento para sus relaves. Por ejemplo, minas que tienen relaves tipo pasta.
2. Determinar si el relleno debe ser cementado. Para próximas investigaciones se recomienda hacer los ensayos de laboratorio si el relleno requiere usar cemento.
3. Considerar que al sedimentarse el relleno hidráulico, el agua que queda en el tope se utilizará para labores mineros, por lo tanto se recomienda un reservorio, ya sea diseñado o prefabricado, para almacenar esta agua.
4. Proponer usar otro tipo de tapón de concreto.
5. Continuar la investigación de usos del relleno hidráulico para beneficio ambiental, social y económico.

FUENTES DE INFORMACIÓN

Bibliográficas:

American Concrete Institute (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. Michigan, Estados Unidos: ACI 318-14.

Anddes. (2016). Informe técnico: Ingeniería de Detalle Depósito de Relaves N°4. Lima, Perú.

Benson, R.P. (1989). *Design of Unlined and Lined Pressure Tunnels. Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 4 # 2. Richmond, Canadá: El Sevier, pp. 155-170.

Canadian Standards Association (2014). *Concrete Materials and Methods of Concrete Construction/Methods of Test for Concrete*. Ontario, Canadá: CSA International, A23.1-00/A23.2-00.

Chekan, G.I. (1985). *Design of Bulkheads for Controlling Water in Underground Mines* Pittsburgh, Estados Unidos: Departamento del Interior de los Estados Unidos, 36 pp.

Compañía Minera Condestable S.A., Área de Planeamiento e Ingeniería. (2017). *Información técnica*, 15-20 pp.

Grupo S10 (2017). *Revista Costos*. Edición 283. Lima, Perú.

Huamán Montes, L. W. (2007). *Aplicación de relleno hidráulico en la Mina Jimena de Compañía Minera Poderosa S.A.* (tesis de pregrado). Universidad Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Ontario, Canadá, Ministerio de Trabajo (1995). *Bulkhead and Dams for Underground Mines – Design Guidelines*.

Paucar, F. (2015). *Diseño de tapones herméticos en labores de remediación pasivo ambiental a la mina “Recuperada” – Huancavelica*. (tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.

Potvin, Y., Thomas, E., Fourie A., (2005). *Handbook on Mine Fill*. Nedlands, Australia: Australian Centre for Geomechanics.

Quispe Aguilar, A. (2013). *Plan de Minado Subterráneo Aplicado en la Corporación Minera Ananea S.A.* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Rocha, A. (2007). *Hidráulica de Tuberías y Canales*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.

Venegas Flores, P. (2009). *Ampliación de Producción de Mina Condestable*. (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Villaescusa, E. (2014). *Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping*. Boca Raton, Estados Unidos: Taylor & Francis Group.

Vives Ávila, A. R. (2015). *Evaluación técnica económica de una mina subterránea utilizando relleno cementado* (tesis de pregrado). Universidad Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Electrónicas:

Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible (2005). *Guía Ambiental para el Manejo de Relaves Mineros*. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd27/compendio-manejo.pdf>

Cidelsa (2017). *Tubería Lisa de HDPE*. Recuperado de: http://www.cidelsa.com/media/prod_brochure_2/Tuberia_Lisa_de_HDPE.pdf

Compañía Minera Chaspaya S.A.C. (2016) *Estudio de Impacto Ambiental Semidetallado Proyecto “El Nuevo Sureño”* Recuperado de: http://www.energiayminasmoquegua.gob.pe/web13/files/ambiental/EIASd_Nuevo_Sureno/9_Plan_Cierre.pdf

Engineering Tool Box (2017) *Tabla de coeficiente de rugosidad de Manning*. Recuperado de: https://www.engineeringtoolbox.com/mannings-roughness-d_799.html

Grouting technology. (2010). *Tratamiento de Fundaciones - Inyecciones*. Recuperado de: <http://www.ing.unlp.edu.ar/constr/g3/Tratamiento%20de%20fundaciones-inyeccionesapunte-2008.pdf>

Ministerio de Energía y Minas del Perú (2007). *Guía para el diseño de tapones para el cierre de labores mineras*. Recuperado de: <http://www.minem.gob.pe/>

Ministerio de Minería de Chile (2017). *Glosario Minero*. Recuperado de: <http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-r/relave/>

Southern Copper (2017). *Glosario de términos*. Recuperado de: <http://www.southernperu.com/ESP/opinte/Pages/PGGlosario.aspx>

Yanacocha (2017). *Plan de cierre de minas*. Recuperado de:
<http://www.yanacocha.com/plan-de-cierre-de-minas/>