

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y
Formales
Escuela Profesional de Ingeniería de Minas



**“TRATAMIENTO DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA PARA PROPUESTA DE
CIERRE DE BOCAMINA EN LOS NIVELES 4500-4800, ZONA CARABAYA-PUNO”**

Tesis presentada por el bachiller

Luque Amado, Sergio René

Para optar el Título Profesional de

Ingeniero de Minas

Asesora:

Dra. Bejarano Meza María Elizabeth

Arequipa-Perú

2021

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR DE TESIS

Arequipa, 18 de Noviembre del 2020

Dictamen: 002230-C-EPIM-2020

Visto el borrador de tesis del expediente 002230, presentado por:

2013110291 - LUQUE AMADO SERGIO RENE

Titulado:

**TRATAMIENTO DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA PARA PROPUESTA DE CIERRE DE BOCAMINA EN
LOS NIVELES 4500-4800, ZONA CARABAYA-PUNO**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**2346 - MOLINA RODRIGUEZ FREDY NICOLAS
DICTAMINADOR**



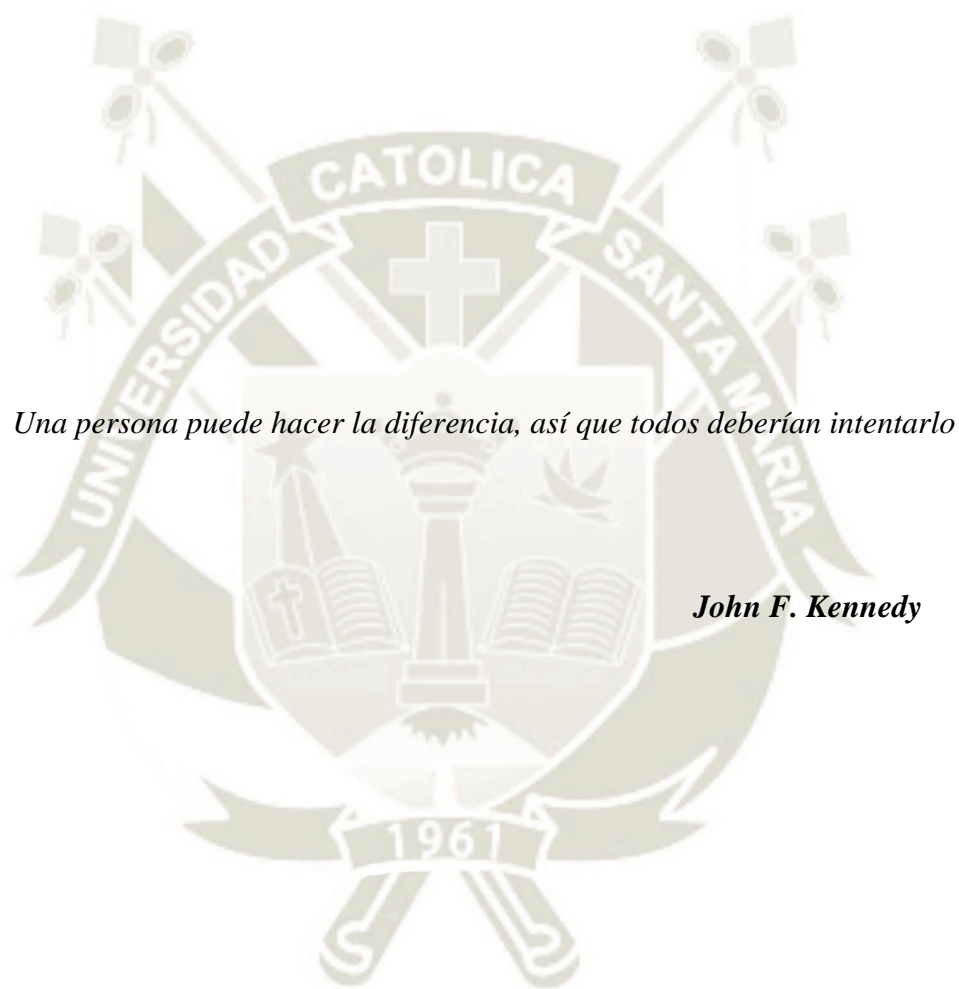
**2872 - LOPEZ CASAPERALTA PATRICIA YANETH
DICTAMINADOR**



**3246 - BEJARANO MEZA MARIA ELIZABETH
DICTAMINADOR**



EPÍGRAFE

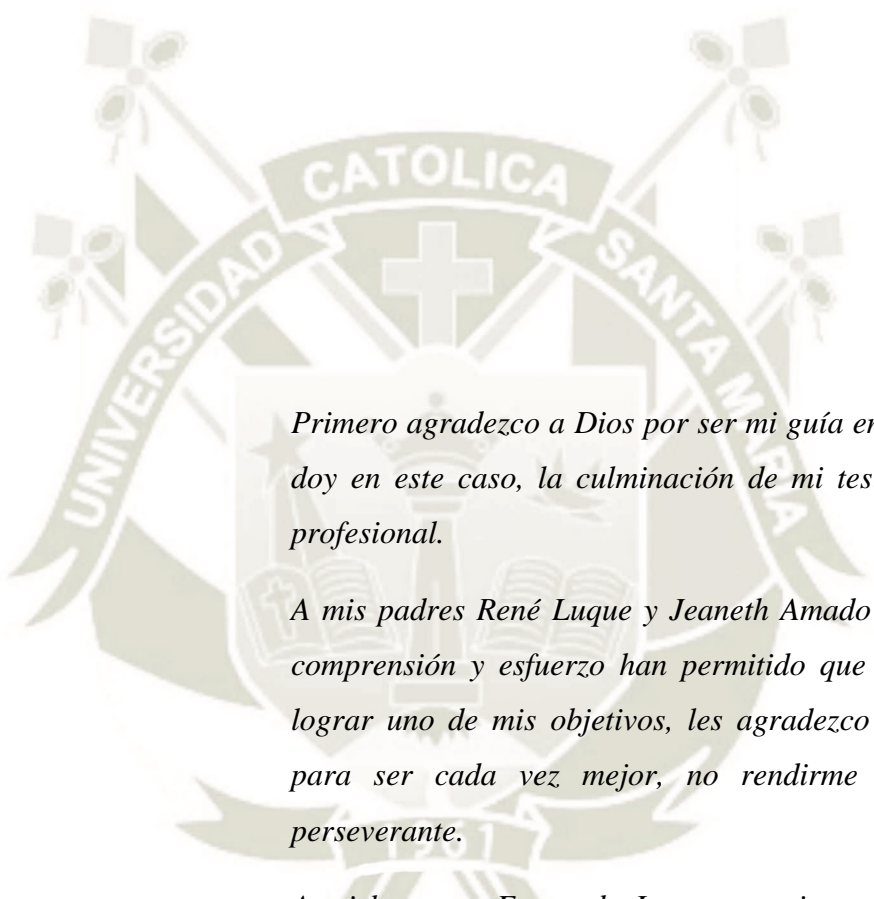


DEDICATORIA

La presente tesis va dedicada a Dios, mis padres y mi hermana por siempre alentarme y apoyarme para lograr cada una de las metas que tengo tanto profesionales como personales.



AGRADECIMIENTO



Primero agradezco a Dios por ser mi guía en cada paso que doy en este caso, la culminación de mi tesis y mi carrera profesional.

A mis padres René Luque y Jeaneth Amado quienes con su comprensión y esfuerzo han permitido que pueda llegar a lograr uno de mis objetivos, les agradezco por motivarme para ser cada vez mejor, no rendirme y siempre ser perseverante.

A mi hermana Fernanda Luque por siempre mostrarme su apoyo y estar pendiente de mis metas y desarrollo como persona.

A la Ing. María Elizabeth Bejarano Meza, quien me instruyó y guío para el desarrollo de mi tesis.

RESUMEN

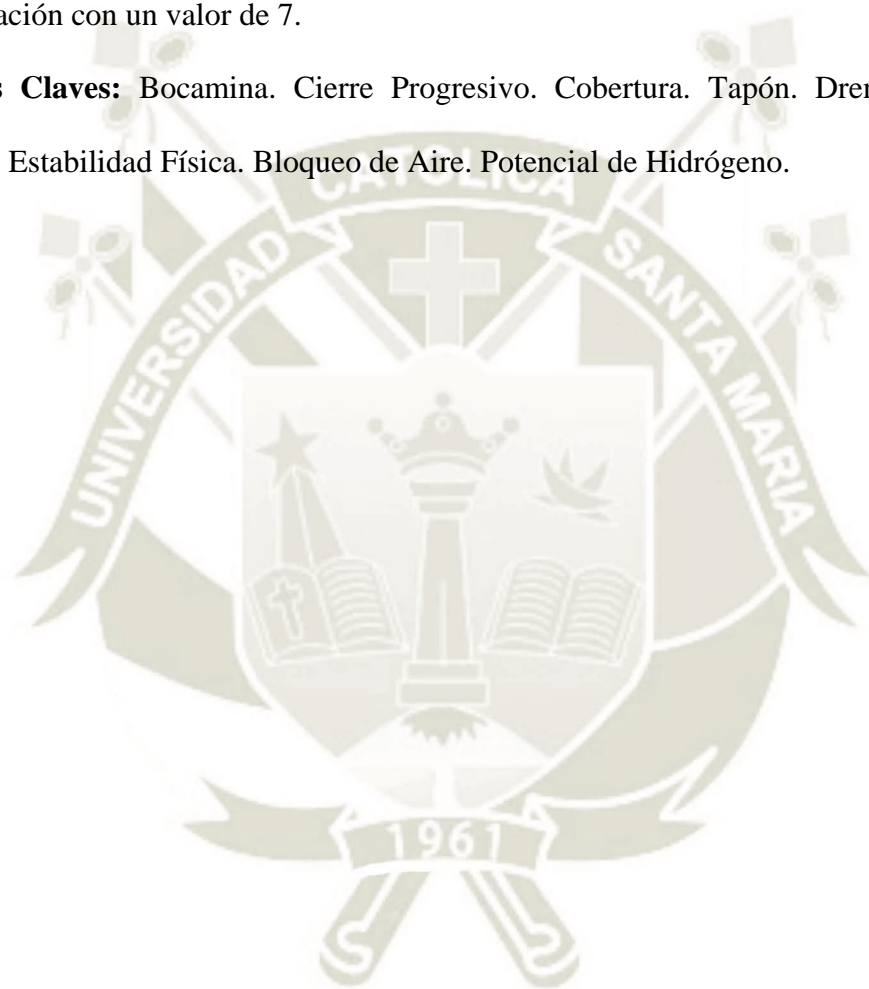
El presente trabajo de investigación propone el tratamiento de drenaje ácido para cierre de bocaminas en el yacimiento minero que está ubicado en el distrito de Macusani, zona de Carabaya, departamento de Puno; con el objetivo de lograr la estabilidad física y estabilidad química, para evitar la contaminación de los ecosistemas y daños en la población.

Las bocaminas se someterán a un cierre progresivo debido a que en otras zonas de la compañía se seguirá desarrollando la actividad minera. Se realizó el diseño de cierre tipo II para bocaminas que consiste en colocar un tapón de concreto con una tubería de drenaje, con relleno de desmonte y cobertura, teniendo los tapones una altura superior a 2.5 metros; también se realizó el diseño de cierre tipo III para bocaminas que no necesitan drenaje teniendo como componente un muro de seguridad de concreto, con relleno de desmonte y cobertura. Se recolectó muestras de material de desmonte de mina las cuales se sometieron a pruebas de laboratorio para determinar la presencia de sulfuros y sulfatos; además se le realizó el test ABA para determinar la presencia de drenaje ácido. El material de desmonte de mina se encuentra con un valor de pH de 6.4, por lo que se encuentra en incertidumbre pudiendo generar o no drenaje ácido, por lo que ya no se necesitará un diseño de tratamiento con humedales y caliza. Respecto a la revegetación, la cobertura propuesta para las bocaminas al tener dimensiones similares y al no existir presencia de drenaje ácido; presenta tres capas en su composición; material de sustrato que viene a ser material glaciar no estratificado, arcilla fina y material orgánico (ichu) que es flora característica de dicha zona. Se realizó una matriz de impactos respecto al drenaje ácido en el caso estuviese presente en la zona.

En conclusión, para que la estabilidad física y química estén relacionadas se propone el método de bloqueo de aire seleccionado mediante una matriz de alternativas, el cual permitirá mediante una trampa o codo que solo pueda circular el agua proveniente del interior de la bocamina, pero

no ingresará el aire, lo cual será factor clave para que no se produzca la oxidación de sulfuros, contribuyendo a que el potencial de Hidrógeno de 6.4 en incertidumbre llegue a la neutralización con un valor de 7.

Palabras Claves: Bocamina. Cierre Progresivo. Cobertura. Tapón. Drenaje. Estabilidad Química. Estabilidad Física. Bloqueo de Aire. Potencial de Hidrógeno.



ABSTRACT

The present research work proposes the acid drainage treatment to close mine openings in the mining deposit that is located in the Macusani district, Carabaya area, Puno department; with the aim of achieving physical stability and chemical stability, to avoid contamination of ecosystems and damage to the population.

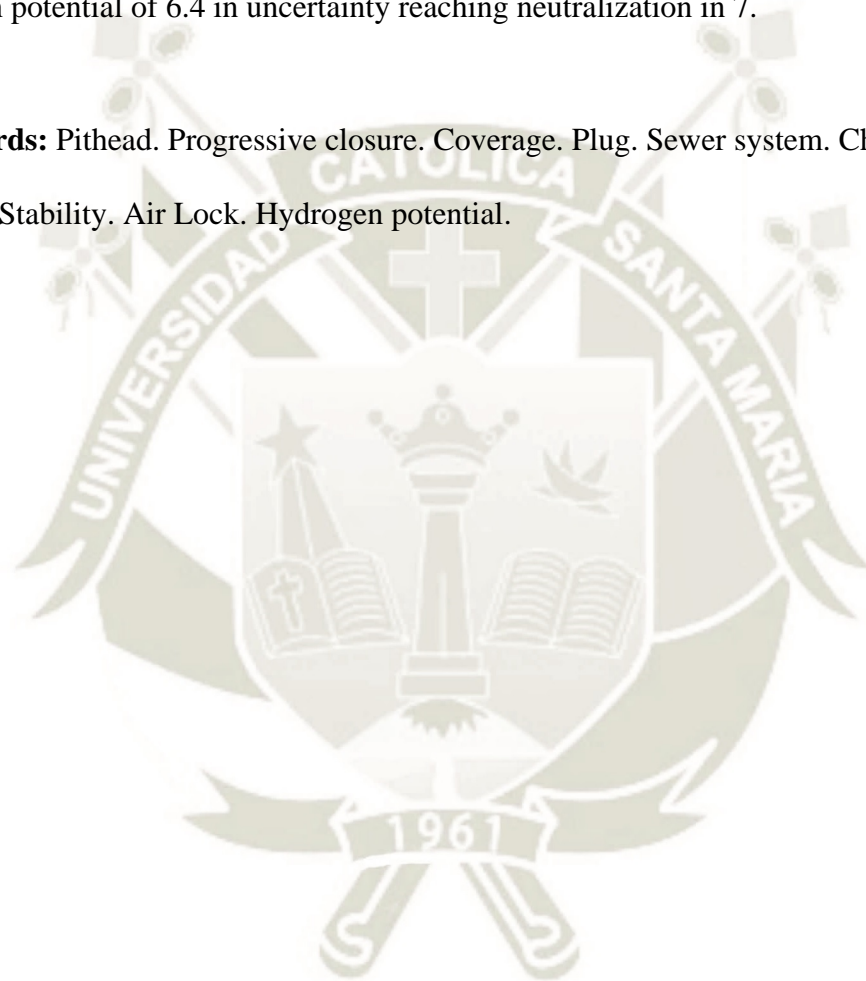
The mine openings will be subject to a progressive closure due to the fact that mining activity will continue to develop in other areas of the company. The type II closure design was made for mining openings, which consists of placing a concrete plug with a drainage pipe, with filling and waste cover, with the plugs having a height greater than 2.5 meters; A type III closure design was also made for mining openings that do not need drainage, having as a component a concrete safety wall, with cut, fill and cover.

Samples of mine waste material were collected which were subjected to laboratory tests to determine the presence of sulfides and sulfates; In addition, the ABA test was performed to determine the presence of acid drainage. The mine waste material has a pH value of 6.4, so it is in uncertainty and may or may not generate acid drainage, so a treatment design with wetlands and limestone will no longer be needed.

Regarding revegetation, the proposed coverage for mine openings as they have similar dimensions and the absence of acid drainage; it presents three layers in its composition; substrate material that is non-stratified glacial material, fine clay and organic material (ichu) that is characteristic flora of that area. An impact matrix was made with respect to acid drainage if it were present in the area.

In conclusion, for the physical and chemical stability to be related, the air blocking method selected by means of a matrix of alternatives is proposed, which will allow by means of a trap or elbow that only the water from the interior of the mouth can circulate, but air will not enter, which will be a key factor so that sulphide oxidation does not occur, contributing to the hydrogen potential of 6.4 in uncertainty reaching neutralization in 7.

Key Words: Pithead. Progressive closure. Coverage. Plug. Sewer system. Chemical Stability. Physical Stability. Air Lock. Hydrogen potential.



INTRODUCCIÓN

El drenaje ácido de mina (DAM) es originado por la oxidación de los sulfuros que principalmente se encuentran en la pirita en el que queda expuesto al ambiente por afloramiento de yacimientos o por aguas subterráneas, también se originan en la recuperación de minerales en relaves o depósitos de minerales, que se producen en la actividad minera para un beneficio económico.

Las bocaminas que no están en actividad son consideradas como pasivos ambientales de acuerdo a la Ley N° 28271, por lo cual deben ser clausuradas por medio de un tapón que es un muro de concreto, en el caso no haya presencia de agua y adosándole una tubería para el drenaje si hay presencia de agua.

Como parte de la actividad minera cada empresa realiza un plan de cierre y la remediación ambiental correspondiente, es decir dejar la zona tal y como era antes de iniciar con la explotación de los recursos, por lo cual se tienen que efectuar una serie de estudios, ensayos, pruebas, análisis; siendo los más importantes la estabilidad física de las bocaminas para poder realizar el diseño del tapón teniendo en cuenta parámetros geo mecánicos y la estabilidad química para aplicar el método adecuado en el tratamiento del drenaje ácido, teniendo como resultado final el aumento del pH.

Por lo tanto, en esta tesis se analiza el drenaje ácido y el cierre de bocaminas de una unidad minera en la zona de Carabaya, tomando en cuenta el grado de acidez, la capacidad de neutralización, el ratio ácido-base; pertenecientes al test ABA y parámetros geotécnicos.

De acuerdo a la metodología la presente investigación está estructurada de la siguiente manera:

El primer capítulo consta de las generalidades de investigación, es decir el planteamiento del problema, incluyendo aspectos como el enunciado del problema, descripción del problema, objetivos, justificación, hipótesis, variables; así como los alcances y límites de la investigación.

El segundo capítulo llamado Marco teórico el cual contiene los antecedentes de investigación; los cuales pueden servir como guía para la elaboración de la presente tesis, marco legal. Por último, las bases teóricas para el desarrollo de la tesis.

El tercer capítulo que abarca la metodología de investigación, desarrollando el tipo de investigación, diseño de investigación, nivel de investigación, población, muestra, técnica de recolección de datos y el procedimiento a seguir para el desarrollo de la propuesta de investigación.

En cuarto capítulo se realiza el análisis e interpretación de resultados en el que se muestra la descripción de la zona de estudio, la línea base que involucra la geomorfología, geología, hidrología y clima. La propuesta de la estabilidad física y química mediante tablas y gráficas; así como el monitoreo post cierre de las bocaminas.

Por último se mostrarán las conclusiones y recomendaciones de la presente tesis, así como el glosario de términos, las referencias bibliográficas y anexos que sustentan la investigación.

ACRÓNIMOS

- AASTHO: Asociación Americana de Diseño y Construcción.
- ABA: Contabilidad ácido base.
- ACI: Instituto Americano de Concreto.
- ALD: Drenaje Anóxico Calizo.
- BM: Bocamina
- CSA: Canadian Standard Association.
- DAM-DAR: Drenaje ácido de mina.
- FS: Factor de Seguridad.
- GSI: Índice Geológico de Resistencia.
- HDPE: Polietileno de alta densidad.
- ICP: Técnica de plasma de acoplamiento inductivo.
- LMP: Límites Máximos Permisibles.
- OES: Espectrometría de emisión atómica.
- PA: Potencial de Acidez.
- pH: Potencial de Hidrógeno.
- PN: Potencial de Neutralización.
- PNN: Potencial Neto de Neutralización.
- Q: Clasificación geo mecánica de Barton.
- RMR: Rock Mass Rating.
- RQD: Índice de Calidad de la Roca.
- WGS: Sistema Geodésico de coordenadas.

ÍNDICE GENERAL

EPÍGRAFE.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	x
ACRÓNIMOS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvii
CAPÍTULO I.....	19
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.1. Enunciado del problema.....	20
1.2. Formulación del Problema.....	20
1.2.1. Formulación del Problema General.....	20
1.2.2. Formulación de los Problemas Específicos.....	20
1.3. Justificación del Problema.....	21
1.4. Objetivos del Proyecto.....	22
1.4.1. Objetivo General.....	22
1.4.2. Objetivos Específicos.....	22
1.5. Alcances y Limitaciones.....	22
1.5.1. Alcances de la Investigación.....	22
1.5.2. Limitaciones de la Investigación.....	22
1.6. Hipótesis.....	23
1.7. Variables independientes y dependientes.....	23
1.7.1. Variable Independiente.....	23
1.7.2. Variable Dependiente.....	23
CAPÍTULO II.....	25
2. MARCO TEÓRICO.....	26
2.1. Antecedentes de la investigación.....	26
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	26
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	28
2.1.3. Antecedentes Locales.....	31

2.2. Marco Legal.....	32
2.3. Bases Teóricas	33
2.3.1. Drenaje Ácido de Minas	33
2.3.2. Cierre de Bocamina.....	41
2.3.3. Monitoreo Post-Cierre	57
CAPÍTULO III.....	60
3. METODOLOGÍA	61
3.1. Tipo de investigación.....	61
3.2. Nivel Investigación.....	61
3.3. Diseño Investigación	61
3.3.1. Fase de campo.....	62
3.3.2. Fase Gabinete.....	62
3.4. Población y muestra.....	63
3.4.1. Población.....	63
3.4.2. Muestra	63
3.5. Técnicas para recolección y procesamiento de datos	63
3.5.1 Técnica para la evaluación del material de mina	64
3.5.2. Técnica para la evaluación geo mecánica	65
3.5.3. Técnica para el diseño del tapón	70
3.7. Instrumentos de la Investigación	75
CAPÍTULO IV.....	77
4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	78
4.1. Caracterización de la Zona de estudio.....	78
4.1.1. Descripción de la zona de trabajo	78
4.1.2. Componentes de cierre	78
4.1.3. Ubicación y Acceso.....	80
4.2. Línea Base	81
4.2.1. Geomorfología.....	81
4.2.2. Geología	84
4.2.3. Hidrografía	86
4.2.4. Clima	87
4.2.5. Flora y Fauna.....	87
4.3. Descripción del proceso de la Empresa minera.....	88
4.4. Resultados de la estabilidad Química.....	92

4.4.1. Análisis de Laboratorio.....	92
4.5. Estabilización Física.....	96
4.5.1. Evaluación geo mecánica.....	96
4.5.2. Indicadores para diseño de tapón.....	111
4.5.3. Diseño estructural del tapón.....	112
4.5.4. Condiciones Estructurales.....	112
4.5.5. Parámetros de Diseño.....	113
4.5.7. Estabilidad de los Tapones.....	114
4.5.8. Resumen de dimensiones del tapón:.....	116
4.5.9. Descripción de obras.....	116
4.6. Revegetación.....	124
4.7. Evaluación de Impactos Ambientales.....	126
4.8. Resultados del Monitoreo.....	128
4.8.1. Resultados del Monitoreo Físico.....	128
4.8.2. Resultados del Monitoreo Geoquímico.....	128
4.9. Propuesta Económica.....	128
CONCLUSIONES.....	130
RECOMENDACIONES.....	132
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	133
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	135
ANEXOS.....	139
ANEXO N° 01 ENSAYOS GEO MECÁNICOS DE MACIZOS ROCOSO DE LA BOCAMINA 1.....	139
ANEXO N° 02 ENSAYOS GEO MECÁNICOS DE MACIZOS ROCOSO DE LA BOCAMINA 2.....	141
ANEXO N° 03 ENSAYOS GEO MECÁNICOS DE MACIZOS ROCOSO DE LA BOCAMINA 3.....	143
ANEXO N° 04 ENSAYOS GEO MECÁNICOS DE MACIZOS ROCOSO DE LA BOCAMINA 7.....	145
ANEXO N° 05 ENSAYOS GEO MECÁNICOS DE MACIZOS ROCOSO DE LA BOCAMINA 9.....	147
ANEXO N° 06 ANÁLISIS DE LABORATORIO DE MATERIAL DE DESMONTE.....	149
ANEXO N° 07 BOCAMINAS PARA CIERRE.....	150

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Etapas en la generación del Drenaje Ácido	34
Figura 2: Proceso de neutralización con cal convencional	36
Figura 3: Disposición de las celdas en un humedal aeróbico.....	37
Figura 4: Disposición de las capas en humedal anaerobio.....	38
Figura 5: Esquema de la sección transversal de un sistema ALD.....	39
Figura 6: Muestra de macizo roco.....	45
Figura 7: Hoja de cálculo del RMR de Bieniawski.....	47
Figura 8: Métodos de taponeo para bocaminas con drenaje	49
Figura 9: Aplicación de Tapones	50
Figura 10: Coberturas de revegetación tipo I.....	56
Figura 11: Cobertura de revegetación tipo II	56
Figura 12: Cobertura de Revegetación tipo III.....	57
Figura 13: Parámetros de clasificación Geo mecánica-Bieniawski	66
Figura 14: Índice Geológico de Resistencia (GSI).....	67
Figura 15: Constante Mi.....	68
Figura 16: Diseño de resistencia y gradiente hidráulica	71
Figura 17: Ubicación de las bocaminas.....	79
Figura 18: Ubicación de la compañía minera.....	80
Figura 19: Columna estratigráfica de Puno.....	86
Figura 20: Esquema de Operaciones Mina: Método de minado, Perforación y Voladura.....	88
Figura 21: Esquema de Operaciones Mina: Transporte, Acarreo y Sostenimiento	89
Figura 22: Esquema de Operaciones Mina: Relleno y Extracción mina.....	90
Figura 23: Esquema de Operaciones Mina: Chancado y Flotación	91
Figura 24: Prueba de laboratorio vs LMP	95
Figura 25: Resultados del Test ABA.....	96
Figura 26: Diseño de tapón de la bocamina 3	118
Figura 27: Diseño de tapón de la bocamina 5	119
Figura 28: Diseño para el muro hermético.....	120
Figura 29: Diseño de tapón	121
Figura 30: Selección de método para el cierre de bocaminas	122
Figura 31: Cobertura para el cierre de bocaminas.....	126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Operacionalización de las variables	24
Tabla 2: Minerales consumidores de acidez	39
Tabla 3: Ratio ácido-base	41
Tabla 4: Información de bocaminas	42
Tabla 5: Resistencia a la compresión de rocas	43
Tabla 6: Índice de calidad de la roca	45
Tabla 7: Factor de seguridad para diseño	54
Tabla 8 : Clasificación RMR	66
Tabla 9: Parámetros de resistencia	69
Tabla 10: Matriz de Alternativas para la selección del método de cierre	74
Tabla 11: Coberturas para revegetación	75
Tabla 12: Información de las bocaminas	79
Tabla 13: Ensayos de laboratorio N° ANA07B20.004517	93
Tabla 14: Prueba de laboratorio vs LMP	94
Tabla 15: Parámetros generales de las bocaminas	97
Tabla 16: Parámetros geo mecánicos de la bocamina 1	98
Tabla 17: Parámetros geo mecánicos de la bocamina 2	99
Tabla 18: Parámetros geo mecánicos de la bocamina 3	100
Tabla 19: Parámetros geo mecánicos de la bocamina 4	101
Tabla 20: Parámetros geo mecánicos de la bocamina 5	102
Tabla 21: Parámetros de la masa rocosa de la bocamina 1	103
Tabla 22: Parámetros de la masa rocosa de la bocamina 2	104
Tabla 23: Parámetros de la masa rocosa de la bocamina 3	105
Tabla 24: Parámetros de la masa rocosa de la bocamina 4	105
Tabla 25: Parámetros de la masa rocosa de la bocamina 5	106
Tabla 26: Deformaciones, esfuerzos, resistencia cortante y capacidad admisible de Bocamina 1	107
Tabla 27: Deformaciones, esfuerzos, resistencia cortante y capacidad admisible de Bocamina 2	108
Tabla 28: Deformaciones, esfuerzos, resistencia cortante y capacidad admisible de Bocamina 3	109
Tabla 29: Deformaciones, esfuerzos, resistencia cortante y capacidad admisible de Bocamina 4	110
Tabla 30: Deformaciones, esfuerzos, resistencia cortante y capacidad admisible de Bocamina 5	111
Tabla 31: Parámetros según corte admisible y gradiente hidráulica	113
Tabla 32: Parámetros de diseño de tapón	114
Tabla 33: Resultados de la longitud del tapón según viga gruesa	114
Tabla 34: Resultados de la longitud del tapón según ariete hidráulico	115
Tabla 35: Falla por levantamiento hidráulico	115

Tabla 36: Longitud de diseño.....	116
Tabla 37: Dosificación de inyecciones.....	117
Tabla 38: Resultados del diseño de tapón para bocaminas 3 y 5	120
Tabla 39: Resultados del diseño de tapón para bocaminas 1,2 y 4	122
Tabla 40: Matriz de impactos de la zona Carabaya	127
Tabla 41: Costos de Supervisión.....	128
Tabla 42: Propuesta económica.....	129





CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Enunciado del problema

El drenaje ácido de mina es un problema común presente en los yacimientos polimetálicos en el Perú, siendo este el caso de la zona Carabaya ubicada en el departamento de Puno. Debido a la descomposición de grandes cantidades de minerales sulfurosos, afectando severamente la ecología en su entorno y principalmente la vida acuática de los ríos, lagunas, etc. Los estudios realizados en la zona por parte de INGEMMET, indica que en el Río Trapiche hay un alto contenido de Manganeso, en las Quebradas de Cañamazo y Cacanuasipala hay valores altos en sulfatos, debido a la actividad minera, Así mismo se presenta un alto contenido de Hierro en el Río Crucero; por lo que la rehabilitación debe ser efectuada por acciones correctivas con el fin de mantener el desarrollo y preservación de paisajes.

El presente estudio es de suma importancia, debido a que en el yacimiento ya no se extrae cobre en los niveles indicados; si es que no se realiza el cierre de bocamina y el tratamiento del drenaje ácido se estaría incumpliendo con la protección del medio ambiente y circularían efluentes que podrían ser contaminantes, por lo que es necesario el cierre progresivo es decir labor terminada labor cerrada.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. *Formulación del Problema General*

¿Cómo se debe tratar el drenaje ácido de mina para elaborar la propuesta de cierre de bocaminas en los niveles 4500 – 4800, Zona Carabaya – Puno?

1.2.2. *Formulación de los Problemas Específicos*

a) ¿Cuáles son las características de la zona de estudio; sus componentes y la línea base?

- b) ¿Cuál será el análisis y la metodología adecuada para elaborar el diseño de tratamiento?
- c) ¿Qué comprende el plan de cierre de las bocaminas?
- d) ¿Cómo se evaluarán los riesgos ambientales del cierre de bocaminas?

1.3. Justificación del Problema

Desde un enfoque técnico, la presente investigación estudiará el método correcto de tratamiento del drenaje ácido y el cierre adecuado para las bocaminas. Esta investigación será de apoyo, consulta, guía para la realización de futuros proyectos de ámbito similar o como respuesta a problemas o a estudios que no han tenido respuesta positiva, además como protección a las especies y personas que habitan cerca de la unidad minera.

Desde un enfoque económico, es importante debido a que al término del ciclo de vida de las labores se cumpla el cronograma de actividades de cierre hasta la entrega del área en óptimas condiciones, por lo tanto, no genere pérdidas y daños ambientales a la población y sanciones que se aplica el incumplimiento en la normatividad.

Desde un enfoque social, las actividades que se propone para el cierre de mina permitirá controlar, eliminar y depurar excedentes de materiales que afecte a la salud y seguridad de los pobladores de las zonas aledañas, evitando conflictos los cuales serían un grave problema en el desarrollo de la actividad de la compañía minera y además que no debe perturbar la calidad de vida.

Desde un enfoque ambiental, la empresa demuestra la responsabilidad en el cumplimiento del cierre de minas evitando los impactos ambientales adversos al aire, agua y suelos, asimismo proteger la zona de Carabaya de la contaminación Ambiental.

1.4.Objetivos del Proyecto

1.4.1.Objetivo General

Realizar el tratamiento de drenaje ácido de mina para elaborar la propuesta del cierre de bocaminas en los niveles 4500 – 4800 en la zona Carabaya en el departamento de Puno.

1.4.2. Objetivos Específicos

- a) Caracterizar la zona de estudio; sus componentes y la línea base.
- b) Analizar el drenaje ácido y proponer el diseño del tratamiento.
- c) Proponer el diseño para el cierre de bocaminas.
- d) Evaluar los riesgos ambientales del cierre de bocaminas.

1.5. Alcances y Limitaciones

1.5.1. Alcances de la Investigación

El presente trabajo pretende realizar un estudio de pre factibilidad para la implementación de medidas ambientales de cierre en bocaminas que presentan drenaje. Para esto, se describen varios métodos de abatimiento de drenaje ácido de minas, así como criterios generalizados, concluyendo con propuestas, que servirán para investigaciones posteriores.

1.5.2. Limitaciones de la Investigación

El proyecto de una mina en específico necesita de la autorización de la compañía minera para el ingreso, la cual requirió de tiempo para el acceso del lugar y de la información. Se optó por generalizar el proyecto de una zona y según documentos, estudios, charlas con ingenieros que trabajan en la zona se pudo contar con datos geológicos y geotécnicos que son importantes como referencia, por el alto costo de ensayos geotécnicos se procedió a realizar cálculos de los mismos.

1.6. Hipótesis

El tratamiento de drenaje ácido de mina permitirá estabilizar el pH, facilitando al correcto cierre de bocaminas y cuidado ambiental de la zona Carabaya-Puno.

1.7. Variables independientes y dependientes

1.7.1. Variable Independiente

La variable independiente es el “Drenaje ácido de mina”.

1.7.2. Variable Dependiente

La variable dependiente es el “Plan de Cierre de bocamina”.

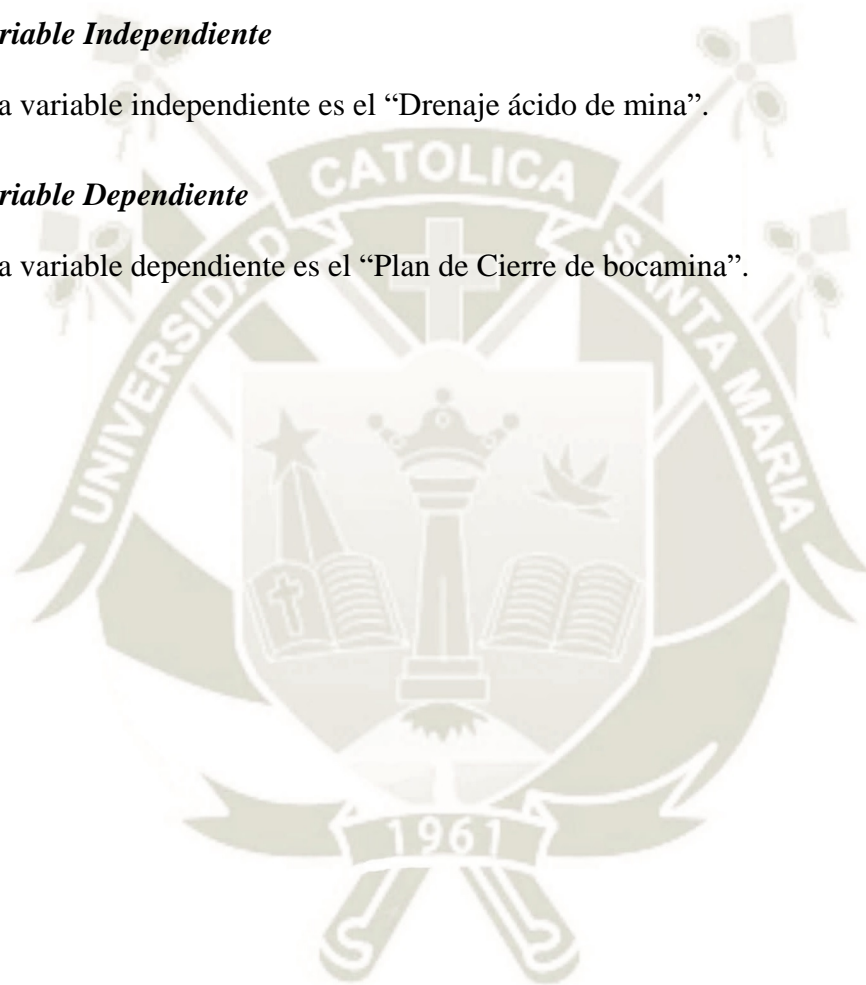


Tabla 1

Operacionalización de las variables

Variab les	Dimensiones	Indicadores	Medida	Instrumento/Método
Independiente Drenaje ácido de mina	Análisis Físicoquímico	Potencial de acidez	pH	Test Estático
		Potencial de neutralización	Kg/TM	
		Ratio ácido Base	Sin medida	
		Índice ABA		
		Sulfuros	Mg/Kg	
Guía de diseño de tapones	Trampa	Sulfatos		Método volumétrico
				Método NTP 335.178
				Método de bloqueo de aire
			Grados	
			Metros	
Dependiente Cierre de Bocamina	Guía de diseño de tapones	Dimensiones		Tapón de concreto
		Resistencia a la compresión	MPa	
		Resistencia al concreto		
		Capacidad admisible	Kg/cm ²	
		RQD	Porcentaje	
		RMR		
		Q	Sin medida	
		GSI		
		Cohesión	KPa	
		Ángulo de Fricción	Grados	
		Revegetación	Sin medida	
		Dimensiones	Metros	
		Resistencia a la compresión	MPa	
		Resistencia al concreto		
		Capacidad admisible	Kg/cm ²	
RQD	Porcentaje			
RMR				
Q	Sin medida			
GSI				
Cohesión	KPa			
Ángulo de Fricción	Grados			
Díámetro de tubería	Pulgadas			
Revegetación	Sin medida			

Fuente: Elaboración Propia.



2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales

• En la tesis “Estudio de la contaminación por drenajes ácidos de mina de las aguas superficiales en la cuenca de Río Odiel (SO España)”; se llega a la siguiente conclusión, que la composición hidroquímica de los arroyos afectados por drenaje ácido de la cuenca del Odiel está influenciada por las variaciones estacionales. En la temporada de lluvias se produce una dilución de los contaminantes, mientras que a lo largo del estiaje los niveles de contaminantes se incrementan, ya que los arroyos no afectados se secan pero las escombreras y galerías siguen generando lixiviados ácidos. Las primeras lluvias después del verano no provocan efectos de dilución, pero se observa un aumento en las concentraciones de elementos tóxicos debido al lavado de sales solubles evaporíticas formadas en los cauces y en las zonas mineras durante el estiaje. (Sarmiento, 2007)

• En la investigación “Tratamiento de drenaje ácido de minas división El Teniente – CODELCO Chile”, se concluye que el agua de mina puede ser tratada pasivamente antes de que entre a un sistema de tratamiento químico para reducir el costo o como una alternativa potencial a un tratamiento químico. En ambas metodologías usadas mucho de los operadores consideran que la recuperación del costo de los sistemas de tratamientos pasivos se logrará en menos de un año, mediante un menos costoso sistema de tratamiento químico y/o mediante la disminución de la cantidad de productos químicos utilizados. (Pérez R. , 2008)

- En el estudio “Diseño de un sistema de tratamiento para el control de drenaje ácido dentro de una mina”, se llega a la conclusión que para elevar el pH de las aguas provenientes de mina se tiene un sistema el cual consiste de una celda que consta de un alimentador de flujo, zona de descarga, canales y rocas neutralizantes, los canales finales se encuentran en sentido horizontal que al mezclarse con los flujos de los otros canales darán la neutralización. (García, 2016)

- En la investigación “Tratamiento de drenaje ácido mediante columnas verticales conformado de arena fina, caliza y biocarbón”; Para la investigación se crearon columnas de percolación donde se realizaron pruebas de agua cercanos a una mina abandonada que produce aguas ácidas.

Para el llenado de las columnas se contó con un 60% de drenaje ácido y un 40% de filtros es decir con arena, carbón y caliza, las columnas se mantuvieron en reposo 12 horas, luego se procede a abrir las llaves para que tenga salida el nuevo líquido tratado. Durante el desarrollo de la prueba se notó que a mayor biocarbón elimina de una forma más rápida el metal. Para realizar la neutralización se tuvo que aplicar una cierta cantidad de carbonato de calcio, lo cual aumento el pH de 2.56 a 7. Se concluye que en la columna que presenta menor caliza el pH aumenta es decir que el biocarbón aparte de disminuir el contenido de iones metálicos ayuda a neutralizar el agua y en apoyo con la caliza logra un pH equilibrado. (Zambrano & Calderón, 2020)

- En el artículo “Tratamiento del drenaje ácido de minas: estudio de reducción de sulfato en mezclas orgánicas”, se aplican las Barreras Permeables Reactivas (BPR), son consideradas como métodos de control del DAR mediante el proceso de tratamiento de aguas subterráneas, consiste en que el material reactivo es colocado como tabique en el que los

sulfatos con presencia de acidez son removidos por proceso metabólico activo de bacterias que disminuyen la presencia de sulfatos (MRS).

Las bacterias reductoras de sulfatos deben ser económicas por lo que en esta investigación se aplicó ensayos reactores de operación continua que se realiza a diez mezclas derivadas de plantas de tratamiento de aguas residuales, tejido óseo de especies marinas, hierro cero valente y compost de corteza es decir pedazos de madera, cascarás de fruta, verdura. Dichas mezclas han sido incubadas en un periodo de 47 días a una temperatura de 30°C, dando a conocer como parte de reducción de los sulfatos valores de acidez, ácido sulfhídrico. Como resultados se tuvo que mientras más proporción de materia orgánica más efectivo será el tratamiento del drenaje ácido, notándose cuando en todas las muestras el pH, Se concluye que dichos tratamientos son aplicados cuando las aguas o material presentan un alto contenido de hierro, alto contenido de sulfato, y baja acidez. (Pérez, Schwarz, & Urrutia, 2017)

2.1.2. Antecedentes Nacionales

- En la investigación “Propuesta de Mejoramiento de la Calidad de las Aguas Ácidas que drenan del Pasivo Ambiental de la Mina Nuncia mediante el Uso de Bacterias Sulfato Reductoras – Ataquero – Carhuaz – Ancash”, se concluye que, los resultados de los análisis de agua ácida del pasivo ambiental de la mina Nuncia demuestran que existe presencia de metales en disolución como el cobre (Cu), provenientes de las infiltraciones que se dan en la parte alta de la mina producto de las intensas lluvias, formando drenajes ácidos en la parte baja. Para remediar, se seleccionó tres materiales la turba (50%), paja (25%) y bosta de la vaca (25%). Los cuales usados en el sistema de bacterias reductoras de sulfato resultaron efectivas por cierto tiempo, mejorando la calidad de las aguas ácidas del pasivo ambiental. (Cadillo, 2018)

- En el estudio “Estabilización del drenaje ácido de mina de la empresa Paraíso Perdido APATA”; Para la estabilidad química para el tratamiento del drenaje ácido, se ha tenido que determinar el pH mediante papel indicador, mostrando la presencia de agua ácida empleando también el método ABA, seleccionando el tratamiento pasivo, para lo cual se realiza una construcción de una piscina de recojo de aguas que vienen de las minas, actúan como filtros reduciendo la presencia de metales pesados, después neutralizando por medio de caliza garantizando el aumento de pH. Se concluye que al construir la piscina realizando el proceso de neutralización y por consiguiente aumentar el pH disminuyendo la acidez de las aguas provenientes de la mina. (Zeballos, 2016)

- En la tesis “Tratamiento anaeróbico de aguas ácidas de mina con travertino y compost a escala de laboratorio”, se puede apreciar la siguiente conclusión que al realizar la neutralización de las aguas ácidas mediante un tratamiento pasivo de DAM empleando el travertino y estiércol bovino se ahorra costos reduciendo el potencial redox, la concentración de hierro, al concentración de cobre. (Lopez, 2011)

- En el artículo “Desarrollo del sistema pasivo sustrato alcalino disperso (DAS) para el tratamiento de drenaje ácido de mina”, Desarrolla un sistema de tratamiento pasivo mediante un sustrato alcalino disperso, el cual consiste en formar una fuente de oxidación mediante microorganismos, formado por dos partes una mezcla de sustrato alcalino disperso con caliza teniendo en sus componentes viruta de madera y caliza; el segundo una mezcla de sustrato alcalino disperso con magnesio formado por viruta de madera y óxido de magnesio, apoyado de un embudo para la precipitación de los metales. Dicho tratamiento consta de un período de tiempo de 8 horas en el que aumenta el pH de 2 a 7, por lo que el método muestra la disminución de contenidos metálicos, aumento del pH. (Sanchez Castillo & Sanchez Espinoza, 2018)

• En el proyecto “Evaluación del drenaje anóxico calizo, como técnica complementaria al cierre de la bocamina de Colquirrumi”, La investigación tiene como objetivo aplicar el método drenaje anóxico calizo, para verificar si es posible neutralizar el pH y precipitar los metales presentes en las aguas ácidas, el método consiste en una zanja que es rellenada con caliza sellada por una capa arcillosa y una geo membrana la cual es impermeable, esto logra expandir la disolución de la caliza; eliminando el oxígeno presente, el agua ácida de hace circular por dentro de la zanja logrando una disolución de la caliza, neutralizando y aumentando el pH, este tipo de proceso es adecuado en drenajes con poco oxígeno disuelto, presencia de hierro y aluminio, y como conclusión de la propuesta es viable que aplicando dicho tratamiento pasivo el pH aumente y disminuya el contenido metálico. (Bermejo & LLanos Rimarachin, 2019)

• En el estudio “Propuesta de tratamiento de drenes anóxico calizo combinado con humedal en la mina Michiquillay”, La investigación tiene como objetivo combinar el drenaje anóxico calizo con humedales, para una muestra de 120 litros de agua ácida, empleando caliza y material orgánico para el tratamiento de las aguas ácidas, desarrollada en un período de tiempo de 3 días, logrando un periodo de descarga por medio del método anóxico calizo a 7 de pH, y para el tratamiento de humedal empleando material orgánico y agua del método anóxico calizo teniendo 10 días de monitoreo y logrando 9 de pH, concluyendo que los métodos aplicados son eficaces para las aguas ácidas del lugar. (Bejarano & Estacio, 2019)

2.1.3. Antecedentes Locales

- El proyecto “Diseño del cierre en pasivos ambientales de labores mineras a menor costo y minimización de impactos de mina Ishihuinca Caravelí. Arequipa Perú”, para realizar la estabilidad física, de acuerdo al tamaño y la galería y ubicación de tuberías, se utilizó un tapón de concreto monolítico de tipo de lado paralelo reforzándolo con relleno de desmonte. se puede concluir que el diseño y costo de dicho tapón para la bocamina fue de bajo costo por las características de la mina, lo cual fue de impacto leve, sin presencia de agua; al igual que la rehabilitación de angostura fue considerada de bajo costo, debido a que se ubica en una zona árida la mina Ishihuinca. (Chura, 2013)

- En el estudio “Impermeabilización mediante inyección de resina líquida poliuretano y construcción de un tapón de cierre NV.5000 U.E.A. Shila Paula- CIA. De minas Buenaventura S.A.A.”; Para la estabilidad física se emplea un tapón de concreto al cual se le tiene que colocar resina de poliuretano por los bordes y fracturas, para lo cual es necesario un estudio geo mecánico tomando en cuenta el RMR, RQD, Q de Barton y el ángulo de fricción, esté tapón debe ser reforzado por acero. La estabilidad geoquímica se realizó mediante coberturas, es decir el tipo I en zonas donde no hay una vegetación con material inerte de 0.20 y con un relleno variable, Tipo II con material orgánico de 0.20 y con relleno variable para mantener especies vegetales existentes, la revegetación se dará con material ya mencionado e irrigado por técnicas de goteo, aspersion mediante cisternas y mangueras. Se puede apreciar la siguiente conclusión, en la actividad minera se generan diversos impactos ambientales los cuales deben ser detectados, controlados y mitigados como en este caso las filtraciones de aguas ácidas, por lo que es necesario una evaluación geológica, geo mecánica e hidrológica.

Por lo que también es importante la integración social entre los pobladores de la zona y los trabajadores de la empresa para que con un solo objetivo la salud humana y la conservación del ambiente en la participación del cierre de mina. (Huayhua Rojas, 2016)

- En la investigación “Evaluación del funcionamiento de un biorreactor pasivo utilizando bacterias sulfato-reductoras para el tratamiento de drenajes ácidos de mina; se empleará un biodigestor que presenta una barrera reactiva impermeable, sistema de producción de alcalinidad, la mezcla consta de una capa de gravilla de piedra caliza, agua ácida de bocamina, se cierra herméticamente, se deja reposando por un tiempo de semana y media, al final llegando a un proceso de neutralización, se concluye que el uso de tratamiento pasivo, es una herramienta que no genera elevado costo, ni gasto eléctrico ni uso de reactivos. (Palma, 2018)

2.2. Marco Legal

- LEY N°28271; La siguiente ley se encarga de regular la identificación de pasivos ambientales presentes en la actividad minera, así como la inversión para la remediación de las áreas que son dañadas por dicha actividad es decir para mitigar los impactos negativos que puedan perjudicar a la población, ecosistemas y propiedad.

- Ley General del Ambiente N° 28611; Comprende instrumentos y medidas que establece el nivel de concentración de elementos o sustancias que están presentes en el aire, agua o suelo que no debe tener ningún riesgo para la salud tanto de las personas como del ambiente, no sobrepasando los límites máximos permisibles.

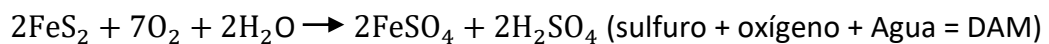
- LEY N°28090 Regulación del Cierre de Minas; La siguiente ley se encarga de regular las obligaciones que deben acatar los titulares de la actividad minera para la presentación del plan de cierre de minas, presenta una modificatoria la ley N°28507.
- D.S. N°010-2010-MINAM; La liberación de efluentes líquidos de actividades minero y metalúrgicas son controladas basándose en los Límites Máximos Permisibles (LMP) y con un monitoreo periódico para evitar la contaminación a los recursos hídricos.

2.3. Bases Teóricas

2.3.1. Drenaje Ácido de Minas

El drenaje ácido de mina se origina cuando un mineral sulfuroso entra en contacto con el oxígeno y la humedad de la atmósfera (Grande, 2016).

Comenzando en el mineral un mecanismo de oxidación de los sulfuros, transformándolos en sulfatos con producción de ácido. Esta transición de oxidación es a paso muy lento, pudiendo aumentar su velocidad por la presencia de ion férrico y por la actuación de bacterias catalizadoras, junto a la oxidación de la pirita, ocasionando reacciones secundarias y teniendo como resultado final un conjunto de contaminantes solubles depositados sobre el mineral, que posteriormente son disueltos y arrastrados por el agua, produciendo un caudal de contaminación. Se caracteriza por valores que oscilan entre 1.5 a 6.



Según Ferguson y Erickson (1987) la generación de drenaje ácido pasa por tres etapas, explicadas a continuación:

Etapa 1. Tiene una duración de varios años, el pH está cerca a la neutralidad, la oxidación del mineral da forma a la presencia de sulfatos y ácido, debido a los agentes de consumo de ácido de la roca son neutralizados, cuando dichos agentes como carbonatos, silicatos se reducen el pH empieza a disminuir.

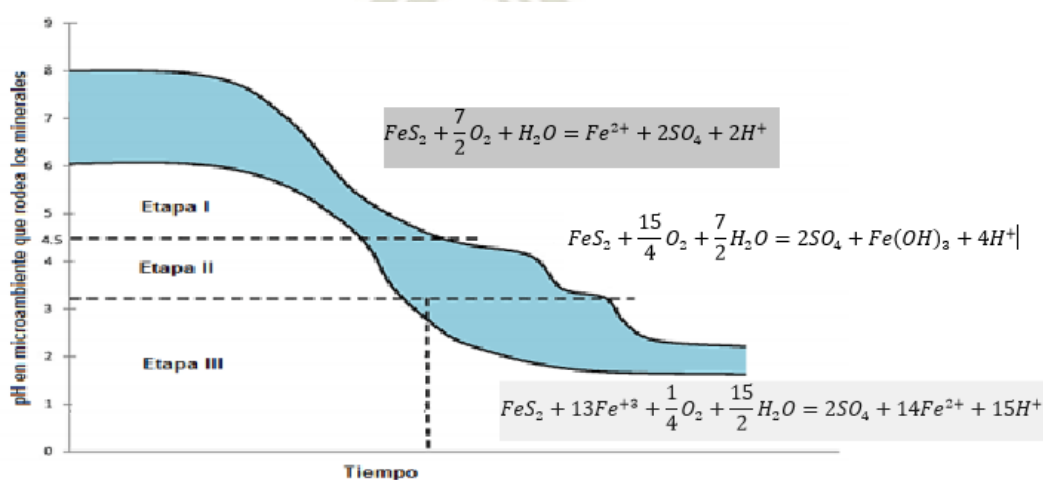
Etapa 2. El pH en esta etapa ya está en un valor de 4, aparte de la oxidación química de la primera etapa originada por el oxígeno de la atmósfera también presenta bacterias acidófilas que aceleran la acidez, aumentando el valor a los sulfatos y concentración de metales.

Etapa 3. En esta etapa la velocidad de oxidación aumenta notablemente oxidando los minerales sulfurados, acelerando 10^6 veces el proceso.

En la figura 1 se puede apreciar como el pH disminuye a medida que avanzan las etapas en el tiempo como efecto de la oxidación de los minerales sulfurados, cada etapa muestra la reacción química en la que se ve involucrada.

Figura 1

Etapas en la generación del Drenaje Ácido



Fuente: Zeballos, J. (2016). Estabilización del drenaje ácido de mina de la empresa Paraiso Perdido APATA. Huancayo.

2.3.1.1. Factores del proceso de oxidación. Según Nordstrom & Alpers (2011) detallan el proceso de oxidación de la pirita como el principal responsable de la formación de aguas ácidas; dicha oxidación se ve favorecida en áreas mineras debido a la facilidad con la que el aire entra en contacto con los sulfuros a través de las labores mineras, los poros existentes en las pilas de estériles y residuos, como también el incremento de la superficie de contacto de las partículas. Dichos autores consideran que los factores mas importantes son el volumen, la concentración, el tamaño de grano y la distribución espacial de la pirita. (Nordstrom & Alpers, 2011)

Se debe considerar que para la formación de aguas ácidas deben existir ciertas condiciones mínimas como Aduvire (2006):

- Presencia de agua, oxígeno y hierro en cantidad suficiente
- Presencia de cierto tipo de bacterias
- Tiempo

La presencia de materiales que contienen sulfuros es la condición necesaria para la formación de aguas ácidas. Ya que a mayor contenido de sulfuro mayor es el potencial de formación de aguas ácidas.

Por lo tanto, la generación de ácido se debe a una serie de reacciones químicas complejas e interrelacionadas. Dichos factores que controlan la velocidad, la magnitud y la calidad del agua han sido estudiadas durante los últimos 30 años. Llegando a la comprensión de que estos componentes constituyen la clave para la predicción del potencial de generación de ácido en una obra minera.

2.3.1.2. Tratamiento de Drenaje ácido. El tratamiento para el drenaje ácido de mina (DAM) se clasifica en activo y pasivo. Teniendo como diferencia principal en la primera el suministro de energía y en la segunda el costo de tratamiento. Así como para lograr la estabilidad química es necesario el control de la calidad del agua, así como restaurar el flujo del agua y el paisaje para que se recuperen las propiedades iniciales del ambiente.

a) Tratamiento Activo: Básicamente es una planta que regula el pH del agua a través de diferentes reactivos como la cal, óxido de calcio, hidróxido de sodio, etc. Este tipo de tratamientos requieren de la adición continua de los reactivos y de dispositivos mecánicos para mezclarlos con el agua, además del mantenimiento y monitoreo. (Aduvire, 2006)

La figura 2 Muestra el proceso que se lleva a cabo que va desde de bombeo de la mina, a una cuenca de retención que aloja al drenaje ácido proveniente de la actividad minera para después entrar a mezcla con un sistema de cal para lograr la neutralización.

Figura 2

Proceso de neutralización con cal convencional



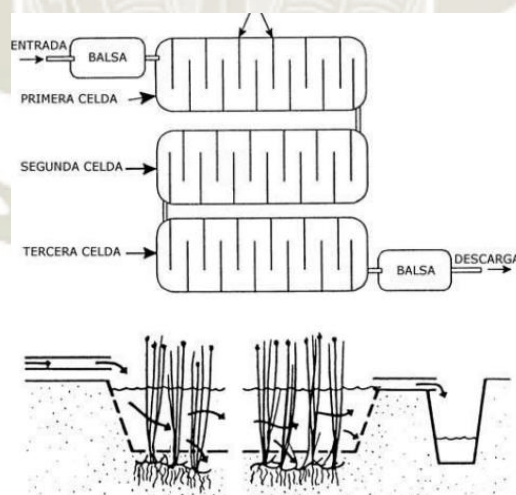
Fuente: EPA (1983). Recuperado de <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/4587/Zevallos%20S.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

b) Tratamiento pasivo: Los sistemas de tratamiento pasivos como los humedales se caracterizan por utilizar elementos naturales que permiten regular el pH, además de procesos químicos y biológicos para retener los elementos metálicos en solución. Se basan en la energía suministrada por la luz solar y/o el medio ambiente. Teniendo dentro de los tratamientos más importantes:

Humedales Aerobios: Se pretende mostrar procesos de los humedales naturales (pantanos, marismas, turberas, etc.), creando un ambiente propicio para el desarrollo de ciertas plantas (Típha, Equisetum, carrizo, juncos, etc.), comunidades de organismos (algas, protozoos y bacterias) y musgos (Sphagnum), los cuales participan en la depuración del agua. **(Ver figura 3).**

Figura 3

Disposición de las celdas en un humedal aeróbico

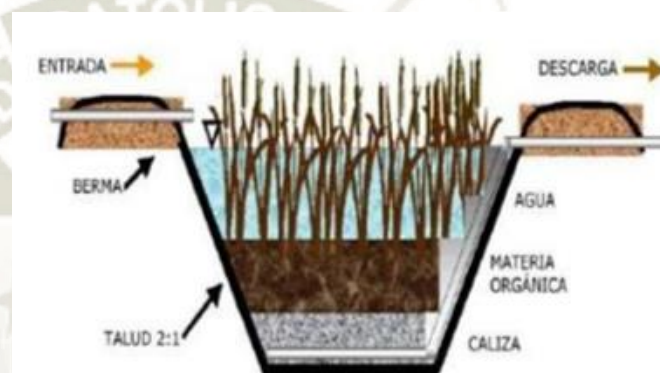


Fuente: Aduvire, O. (2006). Drenaje Ácido de Mina: Generación y Tratamiento. Tratamiento de Aguas Ácidas de Mina, Madrid.

Humedales Anaerobios o balsas orgánicas: Se caracterizan por inhibir el contacto del agua contaminada con el aire atmosférico, creando las condiciones anóxicas requeridas para reducir el Fe y generar alcalinidad mediante intervención de los microorganismos. (Ver figura 4).

Figura 4

Disposición de las capas en humedal anaerobio

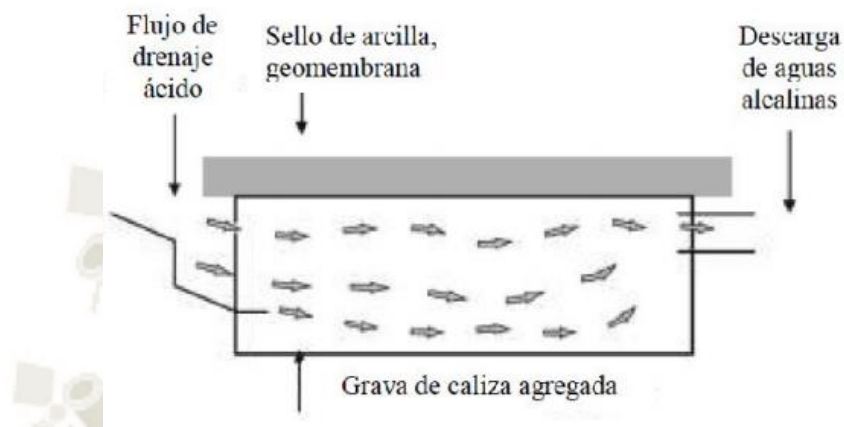


Fuente: Aduvire, O. (2006). Drenaje Ácido de Mina: Generación y Tratamiento. Tratamiento de Aguas Ácidas de Mina, Madrid.

Drenaje Anóxico Calizo (ALD): Este sistema de tratamiento pasivo conocido por sus siglas en inglés como ALD, tiene como objetivo llevar a cabo el proceso de neutralización del drenaje ácido formando capas de óxidos de hierro en la caliza, el procedimiento es el siguiente. Consiste en elaborar zanjas a cierta profundidad (1-2 metros) con el fin de mantener condiciones anóxicas). Las zanjas se rellenan con grava de caliza u otro material calcáreo, y se tapa con una capa de tierra arcillosa y/o una geo membrana impermeable. El drenaje ácido de mina se hace circular por el interior de la zanja provocando la disolución de la caliza, lo que induce la alcalinidad ($\text{HCO}_3 + \text{OH}$) y eleva el pH del agua, (Ver figura 5). (Lottermoser, 2007)

Figura 5

Esquema de la sección transversal de un sistema ALD



Fuente: Lottermoser (2007). Recuperado de <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/4587/Zevallos%20S.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Los tratamientos activos y pasivos permiten la neutralización mediante minerales consumidores de la acidez. Cuando los minerales son expuestos a procesos de meteorización algunos como los sulfuros se oxidan generando un medio ácido y otros que son de procedencia alcalina se neutralizan.

En la tabla 2 se muestran minerales consumidores de acidez y el contenido de pH que cada uno posee, siendo los carbonatos los minerales son más efectivos para neutralizar un ácido.

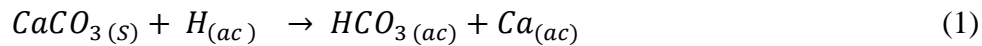
Tabla 2

Minerales consumidores de acidez

Mineral	Rango (PH)
Carbonatos	5-7
Óxidos	1.7-4.3
Aluminosilicatos	0.5-1.5

Fuente: Elaboración propia

Los minerales que neutralizan de una manera más eficaz son los que tienen en su composición carbonato de calcio, (**Ver ecuación 1**) (Lapakko, Wessels, & Antonson, 1995).



2.3.1.3. Análisis de metales. Sirven para indicar la cantidad y los metales presentes en la muestra, ya sea que produzcan ácido o que neutralicen, además permiten reconocer la presencia de aleaciones que impedirán la oxidación de sulfuros (AMIRA, 2002).

2.3.1.4. Método Volumétrico. Los sulfuros son compuestos de azufre con número de oxidación -2, algunos son solubles en ácido clorhídrico, en sulfuro de zinc, en ácido nítrico y otros en agua como los sulfuros de metales alcalinos, dicho método consiste en que el yodo oxida al sulfuro en un medio ácido es factible para la determinación de sulfuros en concentraciones por encima de 1 mg/l. Es aplicable para analizar aguas subterráneas.

2.3.1.5. Método NTP 335.178. Es la Norma Técnica Peruana que se establece para encontrar el contenido del ión sulfato presente en el suelo o aguas subterráneas, teniendo en cuenta métodos gravimétricos (elevado contenido de sulfato) y métodos turbidimétricos (bajo contenido de sulfato).

2.3.1.6. Test ABA. Se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- a) Potencial de Acidez (PA):** Es la capacidad que tiene un material para genera ácido, este depende fundamentalmente del contenido de azufre (Zevallos, 2010).
- b) Potencial de Neutralización (PN):** Es la capacidad que tiene un material para neutralizar un ácido, depende fundamentalmente del contenido de consumidores de ácido como los carbonatos, este se obtiene por el ácido añadido a la muestra y la cantidad de ácido consumido (Zevallos, 2010).

c) **Potencial Neto de Neutralización (PNN):** Es la capacidad que tiene un material de neutralizar o generar un ácido (Zevallos, 2010).

d) **Determinación del Índice ABA:** Es uno de los ensayos más empleados para determinar el drenaje ácido de roca (DAR), consiste en determinar la acidez, el potencial de neutralización, el potencial neto de neutralización y el ratio ácido base.

En la tabla 3 se puede observar los valores de potencial de neutralización neto y la relación entre el potencial de neutralización y el potencial de acidez que viene a ser el ratio ácido-base.

Tabla 3

Ratio ácido-base

PNN	PN/PA	Interpretación
>20	>3	Bajo o nulo potencial de generación de ácido
<20	1-3	Potencial marginal de generación de ácido
negativo	<1	Alto potencial de generación de ácido
-20 y 20 (interpretación difícil)	>3 Entre 1-3	Bajo riesgo de generar ácido Zona de incertidumbre

Fuente: Aduvire, O. (2006). Drenaje Ácido de Mina: Generación y Tratamiento. Tratamiento de Aguas Ácidas de Mina, Madrid.

2.3.2. Cierre de Bocamina

Para el diseño de la estructura de la bocamina fue de suma importancia tratar temas geomecánicos, por tal motivo se debe considerar si la bocamina es húmeda necesita un tapón con drenaje y si es seca solo bastará un tapón en base a concreto.

Por tal motivo se emplearán tapones para cubrir la bocamina y tuberías de drenaje para la salida de los líquidos retenidos por el tapón, este cierre se realiza por las siguientes situaciones:

- a) Proteger las aberturas de la mina subterránea del ingreso de flujos de cobertura debido a la falla de un pilar corona.
- b) Limitar la ampliación de inundaciones durante las labores de cierre de mina para evitar por ejemplo el drenaje ácido.
- c) Sellar obras inactivas y/o para prevenir el ingreso de una mina adyacente. (MINEM, 2007, pág. 3)

En la tabla 4 se pueden observar datos importantes para poder realizar el cierre de las bocaminas teniendo en cuenta la ubicación, dimensiones, litología y la condición en la que se encuentran dichos componentes.

Tabla 4

Información de bocaminas

Bocamina	Ubicación		Dimensiones		Litología	Condición
	Norte	Este	Base (m)	Altura (m)		
BM1	8428225.6	355282.7	2	3	Andesita	Húmeda
BM2	8428306.5	355249.5	2.6	2.3	Filita	Húmeda
BM3	8428981.9	356889.3	2	2	Cuarcita	Seca
BM4	8429361.4	356046.6	2	2.7	Filita	Húmeda
BM5	8428916.3	356293.6	2	1.8	Cuarcita	Seca

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.1. Propiedades Mecánicas de las Rocas.

a) **Resistencia a la compresión simple:** Se define como el esfuerzo máximo a la que aguanta la roca cuando se le somete a compresión uniaxial, mediante pruebas de compresión uniaxial, pruebas de carga puntual, martillo de Schmidt (Belandría, 2016, pág. 15).

En la tabla 5 se muestran datos técnicos de las rocas presentes en las bocaminas pertenecientes al proyecto de cierre teniendo como resistencia a la compresión los siguientes valores.

Tabla 5

Resistencia a la compresión de rocas

Nombre de la Roca	Resistencia a la compresión (MPa)
Filita	220
Pizarra	220
Arenisca	102
Cuarcita	274
Andesita	196

Fuente: Elaboración propia

b) **Resistencia a la Tracción:** Se define como el esfuerzo máximo a la que aguanta la roca por medio de rotura por tracción, se obtiene cuando se realizan pruebas de fuerzas traccionales (Belandría, 2016, pág. 15).

c) **Resistencia de la roca:** Para determinarla es necesario someter a pruebas de compresión triaxial, determinando los parámetros de ángulo de fricción que varían entre 15° a 55° y cohesión entre 3 MPa a 100 MPa (Belandría, 2016, pág. 18).

d) **Deformación:** Es la propiedad en la que la roca altera su forma debido a la acción de diversas fuerzas, éstas son determinadas por sus constantes elásticas el módulo de Young y el módulo de Poisson (Belandría, 2016, pág. 22).

- Módulo de Young (E); Es la proporción que se da entre los esfuerzos y la deformación producida (Belandría, 2016, pág. 23).
- Módulo de Poisson (V); Es la relación entre la deformación perpendicular y central (Belandría, 2016, pág. 23).

e) **Capacidad Admisible:** En base a la capacidad admisible se puede definir como la resistencia del terreno a diversas cargas aplicadas sobre él (Rodríguez B. , 2000).

2.3.2.2. Parámetros Geo mecánicos.

a) **Índice de calidad de la Roca (RQD):** Fue dado por Deere y otros en 1967 para estimar cuantitativamente la roca de calidad existente en un registro de perforación es decir en un sondeo (testigo diamantino), para la muestra se debe considerar longitud entera mayor o igual a 10 centímetros. Es muy utilizada en clasificaciones como el RMR de Bieniawski (1989), Q de Barton (1974) utilizados en minería agregando el carácter geológico en este caso siendo el macizo rocoso. (Hoek, 2006, pág. 3)

Para hallar el RQD (índice de calidad de la roca) se consideran dos métodos:

Directo: Se calculan por el testigo extraído mediante una perforación diamantina en la cual la broca debe tener un tamaño mínimo de 54.7 milímetros El cálculo se realiza mediante la siguiente fórmula.

$$RQD = 100\% * \frac{\sum Longitud\ de\ pieza\ de\ testigo > 10cm}{Longitud\ total} \quad (2)$$

En la figura 6, se muestra un sondeo de un macizo rocoso, el cual es un testigo que ha sido extraído para hallar el índice de calidad de la roca.

Figura 6

Muestra de macizo roco



Fuente: Hoek, E. (2006). *Practical Rock Engineering*. Vancouver. Obtenido de <https://www.diccionario.geotecnia.online/palabra/indice-de-calidad-de-roca/>.

Indirectos: Palmstron (1982) indica que el RQD puede ser por medio de la siguiente fórmula, aplicada sin perforación diamantina.

$$RQD = 115 - 3.3(\# \text{ de juntas}) \quad (3)$$

En la tabla 6, se muestran la clasificación del RQD según la calidad del macizo.

Tabla 6

Índice de calidad de la roca

RQD (%)	Calidad
<25	Muy pobre
25-50	Pobre
50-75	Aceptable
75-90	Buena
90-100	Muy buena

Fuente: Hoek, E. (2006). *Practical Rock Engineering*. Vancouver. Obtenido de Geotecnia fácil: <http://geotecniafacil.com/formula-rqd-sondeos/>.

b) Clasificación Geo mecánica Bieniawski (RMR): El RMR (Rock Mass Rating) permite clasificar las rocas “in situ”. Esta clasificación se basa en cinco parámetros sumamente importantes:

- Resistencia a la compresión simple (UCS)
- Índice de calidad de la roca (RQD)
- Distancia entre las discontinuidades
- Condición de las discontinuidades
- Flujo de agua subterránea (Hoek, 2006, pág. 8)

Para definir el Rock Mass Rating según Bieniawski y la clasificación Q según Barton se presentan las siguientes fórmulas:

$$RMR = 9 \ln Q + 44 \quad (4) \qquad Q = e^{\frac{RMR-44}{9}} \quad (5)$$

$$RMR = 15 \log Q + 50 \quad (6) \qquad Q = 10^{\frac{RMR-55}{15}} \quad (7)$$

c) Índice Geológico de Resistencia (GSI): Fue planteado por Hoek, Káiser y Bawden, muestra un sistema para calcular la disminución de la resistencia que tendría un macizo rocoso de diferentes condiciones geológicas (Hoek, 2006, pág. 11).

A diferencia de las clasificaciones geo mecánicas de Bieniawski (Rock Mass Rating) y Q de Barton las anteriores se basan en una evaluación cuantitativa; la del índice geológico de resistencia presentará una evaluación cualitativa.

En la figura 7, se observa una hoja de cálculo en la cual se muestran todos los componentes de la clasificación geo mecánica de Bieniawski para el desarrollo de la evaluación del macizo rocoso.

Figura 7

Hoja de cálculo del RMR de Bieniawski

CÁLCULO DEL RMR											
(Bieniawski, 1989)											
Proyecto :											
Cliente :											
Tipo de Roca :											
Ubicación :											
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE											
MATRIZ ROCOSA	Valor de resistencia a la compresión simple :		[] Mpa		VALOR Y/O RESISTENCIA ADOPTADO			PUNTAJE			
	Este valor se ha determinado usando:				RESISTENCIA	CALIDAD	PUNTAJE				
	Ensayo de laboratorio (compresión simple)				> 250 Mpa	Muy alta	15				
	Ensayo de laboratorio (carga puntual)				250 - 100	Alta	12				
Martillo Schmidt sobre testigo				100 - 50	Media	7					
Martillo Schmidt sobre afloramiento rocoso				50 - 25	Baja	4					
Tablas (*)				25 - 5	Muy baja	2					
				5 - 1		1					
				< 1 Mpa		0					
VALORIZACIÓN DE PARÁMETROS Q (según Barton, Lien y Lunden)											
RQD	DESCRIPCIÓN	VALOR	PUNTAJE	Observación Cuando RQD se reporta o es medido como menor a 10, se le otorga un valor nominal de 10						PUNTAJE	
	Muy mala	0 a 25	3								
	Mala	25 a 50	8								
	Regular	50 a 75	13								
	Buena	75 a 90	17								
Excelente	90 a 100	20									
VALORIZACIÓN DE PARAMETROS (LF)											
SEPARACIÓN DE DIACLASAS	DESCRIPCIÓN	VALOR (m)	PUNTAJE							PUNTAJE	
	Muy separadas	> 2.00	20								
	Separadas	2.00 - 0.60	15								
	Medianamente separadas	0.60 - 0.20	10								
	Próximas	0.20 - 0.06	8								
Muy próximas	< 0.06	5									
VALORIZACIÓN DE PARAMETROS											
ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES	Longitud de la discontinuidad		Abertura (mm)		Rugosidad		Relleno		Alteración		PUNTAJE
	< 1 m	6	Nada	6	Muy rugosa	6	Ninguno	6	Inalterada	6	
	1 - 3 m	4	< 0.10	5	Rugosa	5	Duro (< 5 mm)	4	Ligeramente alterada	5	
	3 - 10 m	2	0.10 - 1	3	Ligeramente rugosa	3	Duro (> 5 mm)	2	Moderadamente alterada	3	
	10 - 20 m	1	1 - 5	1	Ondulada	1	Blando (<5mm)	2	Muy alterada	1	
	> 20 m	0	> 5	0	Suave	0	Blando (>5mm)	0	Descompuesta	0	
VALORIZACIÓN DE PARAMETROS											
FLUJO DE AGUA	DESCRIPCIÓN	RELACIÓN: PRESIÓN DE AGUA/TENSIÓN PRINCIPAL MAYOR	CAUDAL POR 10 m DE TÚNEL	ESTADO GENERAL		PUNTAJE					
	SECO	0	Nulo	SECO		15					
	LIGERAMENTE HÚMEDO	0 - 0.1	< 10 lt/min	LIGERAMENTE HÚMEDO		10					
	HÚMEDO	0.1 - 0.2	10-25 lt/min	HÚMEDO		7					
	GOTEANDO	0.2 - 0.5	25-125lt/min	GOTEANDO		4					
FLUYENDO	> 0.5	>125 lt/min	AGUA FLUYENDO		0						
CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES (F)											
DIRECCIÓN Y BUZAMIENTO		<input checked="" type="checkbox"/> Túneles		<input type="checkbox"/> Cimentaciones		<input type="checkbox"/> Taludes				PUNTAJE	
		VERDADERO		FALSO		FALSO					
Muy favorables		0		0		0					
Favorables		-2		-2		-2					
Medias		-5		-7		-25					
Desfavorables		-10		-15		-50					
Muy desfavorables		-12		-25		-60					
		#N/A		#N/A		#N/A					
CLASIFICACIÓN RMR OBTENIDA EN CAMPO											
CLASE		I		II		III		IV		V	
CALIDAD		MUY BUENA		BUENA		MEDIA		MALA		MUY MALA	
PUNTAJACIÓN		100-81		80-61		60-41		40-21		< 20	
COHESIÓN (Kg/cm ²)		>		4		3		- 4		2	
FRICCIÓN (φ)		>		45		35		- 45		25	
		3		- 4		2		- 3		1	
		- 45		25		- 35		15		- 25	
		- 25		- 15		- 10		- 5		0	
		- 10		- 5		0		0		0	
		- 5		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
		0		0							

d) Esfuerzos In situ: Para los esfuerzos se tienen valores mediante la constante k que se valora de acuerdo a la situación en la que se presenta el macizo, Para rocas fracturadas se le da un valor de 1, para rocas no alteradas un valor de 1.50 y en medios homogéneos e isotrópicos.

e) Parámetros de resistencia Cortante: Para los parámetros de resistencia cortante están involucrados la cohesión y el ángulo de fricción modificados a los datos brindados antes del estudio, según Bieniawski (1979).

2.3.2.3. Métodos de cierre de bocaminas que presentan drenaje. La selección de uno u otro método depende de las características de la mina. Entre ellas, el tipo y calidad de la roca, presencia de fallas o fracturas, el nivel freático, número de niveles y la profundidad de las labores mineras.

a) Método Hermético: Permite la construcción de un tapón hermético de concreto que almacena el agua en el interior de la mina, dicho método hace que los sulfuros, al estar sumergidos en agua, paren de oxidarse y halla un control en la generación del drenaje ácido. (MINEM, 2007)

b) Método del rebose: Permite taponear la galería inferior mediante una trampa, permitiendo la salida de agua por una bocamina localizada en el nivel superior. El caudal disminuye, así como el contenido de ácido y metales en el drenaje. Es de suma importancia para realizar este método haya una galería en un nivel superior. (MINEM, 2007)

c) Método de bloqueo de aire: Permite mediante una trampa, la salida de agua, pero impide el acceso del aire al interior de la galería. Lo cual, al impedir el ingreso del aire, el oxígeno se agota al interior de las labores mineras, evitando la oxidación de

sulfuros, y por lo tanto se paralice la generación de drenaje ácido y el pH de las aguas gradualmente, reduciendo de esta manera el contenido de metales disueltos y totales.

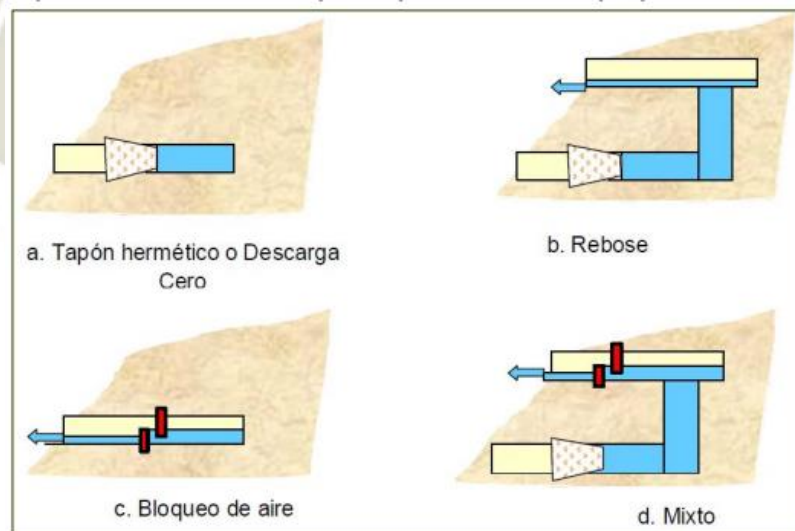
(MINEM, 2007)

d) Método Mixto: Consiste en la combinación del método de rebose y bloqueo de aire, es decir un cierre hermético del nivel inferior y un bloqueo de aire en el nivel superior (MINEM, 2007).

En la figura 8 se muestran los métodos empleados para el cierre de bocamina más utilizados, así como los componentes que tiene cada diseño a emplear en este caso con presencia de drenaje.

Figura 8

Métodos de taponeo para bocaminas con drenaje



Fuente: Guía para el diseño de tapones para cierre de minas (2007).

2.3.2.4. Métodos de cierre de bocaminas que no necesitan drenaje.

a) Acumulación de Desmonte: El material de desmonte se almacena que no es generador de desmonte en la bocamina, impidiendo el ingreso de persona y de animales, se debe aplicar de acuerdo a la topografía de la zona (MINEM, 2007).

b) Muro Hermético: Se edifica un muro que impide el ingreso de personas y animales (MINEM, 2007).

c) Colocación de Reja: Una reja de metal es colocada para evitar el acceso de persona y animales (MINEM, 2007).

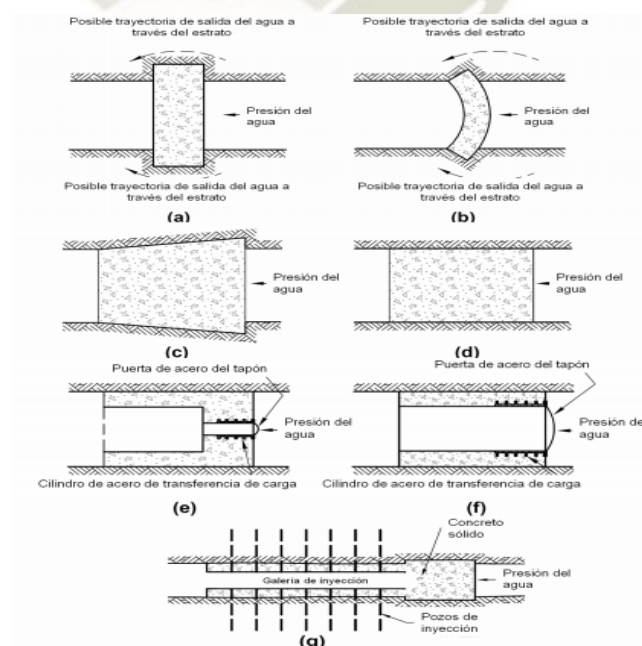
2.3.2.5. Diseño de Tapones. Para el diseño la selección es de acuerdo al tamaño del túnel (dimensiones) y la posibilidad de acceso de las tuberías usadas para colocar el concreto es decir de un solo vertido (concreto monolítico) o de múltiples segmentos por secciones, (Ver **figura 9**). (MINEM, 2007, pág. 5)

a) Concreto Monolítico: Se construyen de uno o múltiples vertidos de concreto, sin refuerzo de acero al interior de la geometría del tapón.

b) Concreto con Drenaje: El tapón debe ir adyacente a una tubería de drenaje que impida el ingreso de aire y drenar los líquidos (MINEM, 2007, pág. 5)

Figura 9

Aplicación de Tapones



Fuente: Guía para el diseño de tapones para cierre de minas (2007).

Se debe tener información técnica tomando en cuenta los siguientes aspectos geológicos, hidráulicos, ambientales, geotécnicos:

- Desarrollados por ingenieros geotécnicos y estructurales.
- Razón o motivo de construcción
- Tipo de excavación horizontal o vertical
- Medidas de la sección del túnel en las que se verán incluidas área y perímetro
- Infraestructura de la mina
- Tipo de tapón
- Impactos ambientales que se pueden producir antes y después
- Tipo de fluido que es retenido por el tapón (drenaje ácido, relaves, combinación de agua y lodo)
- Geología
- Calidad del macizo rocoso
- Resistencia y los esfuerzos al material del tapón
- Técnica de construcción del tapón. (MINEM, 2007, págs. 5-6)

Para un buen trabajo se necesita de una correcta ubicación para que no se genere estabilidad y el tapón este firme, tomando en cuenta lo siguiente:

- Área donde la roca sea competente y libre de fallas, etc.
- Aguas bajo cualquier fuga
- Resistencia in situ > presión hidrostática
- Permeabilidad de la roca sea baja (MINEM, 2007, pág. 6).

Los parámetros para tomar en cuenta son de suma importancia para la construcción del tapón.

a) Condiciones de la superficie:

- Topografía
- Presencia o ausencia de ríos
- Área afectada en caso de un pilar corona (MINEM, 2007, pág. 7).

b) Caracterización del macizo rocoso.

- Geología local: Litología, estructuras como fallas, cortes, discontinuidades.
- Orientación, espaciamiento de discontinuidades que se supone que están presentes en el área donde se colocará el tapón (MINEM, 2007, pág. 7).

Al diseñar el tapón, es necesario realizar un registro de la composición básica del fluido que será retenido, para ello también es necesario el cálculo de pH (MINEM, 2007, pág. 7).

a) Propiedades del suelo y de la roca intacta:

- Análisis en campo del macizo rocoso
 - Perforación diamantina
 - Dureza de la roca
 - Pruebas de laboratorio de muestras que no estén alteradas
- (MINEM, 2007, pág. 9).

b) Suelos:

- Análisis Granulométrico
- Pruebas triaxiales de resistencia a la compresión (MINEM, 2007).

c) Roca:

- Resistencia a la compresión de roca intacta teniendo en cuenta la resistencia a la compresión simple, el módulo de Young, módulo de poisson, se pueden emplear pruebas de resistencia uniaxial, triaxial o ensayos de carga puntual.
- Calidad del agua, análisis químicos del fluido retenidos por el tapón.
- Gradiente Hidráulico, longitud del tapón debe ser larga para evitar erosiones en las paredes del túnel. (MINEM, 2007, págs. 9-12)

2.3.2.6. Estimación de Estabilidad.

- a) Falla por corte:** Es aquella que atraviesa el concreto es decir el contacto de la roca con el concreto. Se aplicará el método sudafricano es decir al interfaz de la roca con el concreto.
- b) Falla por flexión de viga gruesa:** Ocurre como una falla aprisionada es decir por el mismo tapón. La relación del ancho del túnel y longitud del tapón debe ser mayor igual a 1.25 para que no necesite refuerzo de acero.
- c) Falla por filtración excesiva:** La causa principal es la erosión, que quiere decir desgaste del material, debido al gradiente hidráulico elevado. Para evitar dicha fractura es necesario:
- Espesor de la cubierta de roca sobre el tapón
 - Carga de presión en el túnel
- d) Falla por levantamiento:** Cuando el espesor de la cobertura de la roca en el tapón no es adecuado para la presión de diseño. Se aplican dos métodos el normal y el noruego.

e) **Falla por descomposición Química:** Se da dentro de la roca circundante o del concreto del tapón. Para evitar dicha fractura es necesario:

- Composición química del agua subterránea (MINEM, 2007, págs. 13-14-15-16).

f) **Factor de Seguridad:** Es necesario estimar los factores de seguridad en el caso que se presenten las fallas, para reforzar más el cuidado de las obras.

En la tabla 7, se muestra los factores de seguridad mínimos para los diferentes parámetros en la estimación de la estabilidad física de las bocaminas.

Tabla 7

Factor de seguridad para diseño

Factor de Seguridad		
Corte	Flexión Viga	Levante Hidráulico
F.S > 3 condiciones normales	F.S > 3 condiciones normales	F.S > 1.33 condiciones normales
F.S > 1.5 condiciones sísmicas	F.S > 1.5 condiciones sísmicas	F.S > 1.33 condiciones normales
F.S > 1.1 condiciones dinámicas		

Fuente: Guía para diseño de tapones para cierre de minas (2007).

2.2.3.7. Ventajas de Tapones empleados.

a) **Tapón de concreto con drenaje:**

- Cargas estáticas (esfuerzos normales)
- Cargas dinámicas (esfuerzos sísmicos)
- Diseño de un tapón monolítico con bloqueo de aire (tapón de concreto acompañado de una tubería que permitirá el drenaje)

- Son estructuras permanentes, no requieren monitoreo diario
- Soporta altas presiones (MINEM, 2007).

b) Tapón de concreto:

- Cargas estáticas (esfuerzos normales)
- Cargas dinámicas (esfuerzos sísmicos)
- Cargas ponderadas
- Muros de mampostería o separación, proporcionan seguridad no soporta presión hidrostática (MINEM, 2007).

2.3.2.8. Revegetación. Los factores climatológicos son un punto importante en la clase de plantas a emplear en la revegetación, otro factor viene a ser la cobertura adecuada, es decir el material que será depositado; debido a que dicho material puede presentar dificultades para el crecimiento de la vegetación. Por lo que es necesario seleccionar plantas del lugar que se adapten con facilidad a las condiciones de la Puna. Las especies vegetales deben cumplir las siguientes condiciones:

- Crecimiento y desarrollo rápido
- Resistencia a suelos pobres (pocos nutrientes)
- Soportar el clima desfavorable
- Especies de pastos con un color verde constante
- Facilidad para la obtención de materiales de vegetación

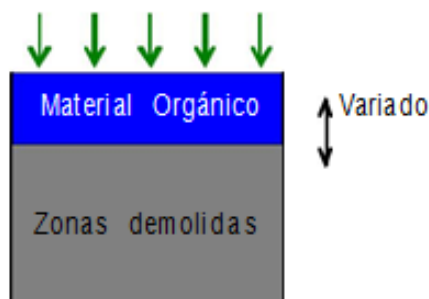
Respecto a las coberturas se muestran las siguientes:

- Tipo I, consta de la aplicación de una capa de suelo de material orgánico de manera directa a la zona a rehabilitar, se coloca cuando el material es seco y no presenta drenaje ácido, es empleada en zonas generalmente planas.

(Ver figura 10).

Figura 10

Coberturas de revegetación tipo I

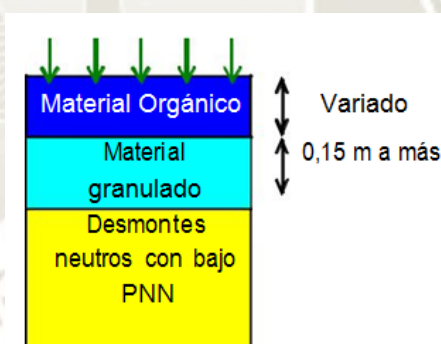


Fuente: Elaboración propia.

- Tipo II, consta de la aplicación de una capa de suelo de material que permita el drenaje, y con una capa superior de material orgánico. (Ver figura 11).

Figura 11

Cobertura de revegetación tipo II

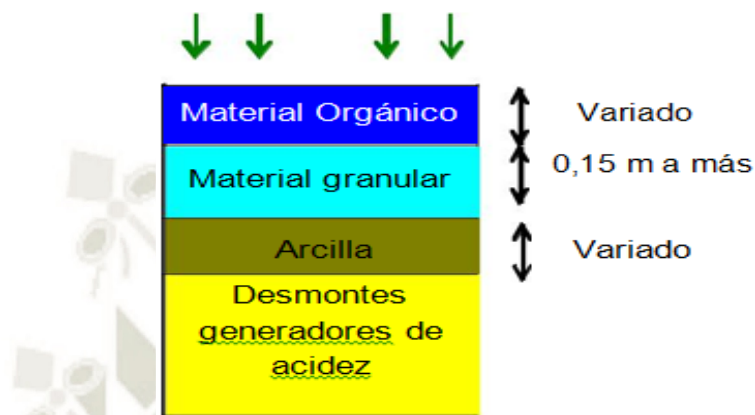


Fuente: Elaboración propia.

- Tipo III, consta de la aplicación de un material que es impermeable como la arcilla, es sumamente efectiva en los trabajos de remediación, las variaciones de espesor van de acuerdo a la zona a cubrir, luego con un material de drenaje y una capa en la parte superior de material orgánico que varía de acuerdo al diseño (Ver figura 12).

Figura 12

Cobertura de Revegetación tipo III



Fuente: Elaboración propia.

2.3.3. Monitoreo Post-Cierre

2.3.3.1. Frecuencia de Monitoreo. Dicho monitoreo es una actividad que se realiza en tiempo a mediano plazo y se emplea para representar el estado de las áreas rehabilitadas incluyendo el tratamiento del drenaje ácido.

2.3.3.2. Monitoreo Físico. Tiene relación con desarrollar una serie de inspecciones para realizar las actividades de mantenimiento siempre y cuando sean necesarias. Es importante debido a que permite identificar grietas producidos por esfuerzos y posibles problemas en las obras de cierre. La frecuencia con que se realizará durante los dos primeros años trimestral y en los siguientes dos años semestral.

2.3.3.3. Monitoreo Geoquímico. Tiene relación con el control de la calidad del agua, con una frecuencia durante los dos primeros años de forma trimestral y en los siguientes dos años de forma semestral.

2.3.3.4. Monitoreo Hidrológico. Tiene relación con el drenaje empleado con una frecuencia durante los dos primeros años de forma trimestral y en los siguientes dos años de forma semestral.

2.3.3.5. Indicadores de monitoreo. Son aquellos parámetros empleados para estudiar el monitoreo de post-cierre.

a) Estabilidad Física: Los indicadores son los siguientes:

- Estado de concreto, analiza si en la estructura no hay filtraciones o agrietamientos que dañen las obras.
- Estado de la roca, se emplea para bocaminas; analizando el estado de la misma.
- Asentamientos, se realiza el estudio para ver si en las bocaminas no hay ninguno, ya que en dichos trabajos puede haber descensos de la estructura a medida que este se va consolidando.
- Agrietamientos, se realiza generalmente en tapones de bocamina debido a que son obras de restauración de terreno y se pueden presentar fallas o problemas.
- Filtraciones, Se realiza generalmente en tapones de bocamina donde estén presentes y circulen efluentes.
- Derrumbes, Estudios en componentes donde generalmente existan accesos, debido a que dichos trabajos de movimiento de tierras pueden producir derrumbes.

b) Estabilidad Química: Los indicadores son los siguientes:

- **Tipo de cuerpo receptor;** manantial, riachuelo, río.
- **Efluentes;** caudal, temperatura, conductividad eléctrica, pH, y metales disueltos (As, Cu, Fe, Pb y Zn).
- **Aguas superficiales;** caudal, temperatura, conductividad eléctrica, Oxígeno disuelto, pH, y metales totales (As, Cu, Fe, Pb y Zn).

c) **Estabilidad Hidrológica:** Las estructuras consideradas a monitorear son las tuberías, el indicador es el siguiente:

- **Grado de colmatación,** en el fondo o base de las estructuras hidráulicas.

Pudiendo ser, presencia o ausencia de sedimentos, para luego realizar la limpieza.





CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación se basará en un enfoque cuantitativo, debido a que se medirá variables sujetas a estudio (Fidias, 2012).

Por otra parte, también la presente investigación será de tipo aplicativo, de causa y efecto donde la causa será el drenaje, los efectos serán los resultados que se obtendrían después de la propuesta del tratamiento de DAR y el diseño del tapón esto con el fin de determinar si lo planteado es aceptable y con esto establecer el proceso para el cierre de las bocaminas.

3.2. Nivel Investigación

El presente trabajo de investigación se realizará teniendo en cuenta el tipo descriptivo, la cual consiste en tomar características de un hecho, fenómeno investigado, así como de una estructura o estructuras, que permiten precisar el fin, además de establecer el comportamiento de éstos. (Fidias, 2012)

Por otra parte, tiene como objetivo describir al fenómeno tal y como es y cómo se manifestará en el momento del estudio, es decir mediante la observación que será el método descriptivo para precisar y determinar cuál será la propuesta para el tratamiento del drenaje y qué tipo de tapón se empleará para el cierre de bocamina. (Rodriguez F. , 2008)

3.3. Diseño Investigación

El diseño de investigación es no experimental debido a que presentan propuestas de tratamientos y/o diseños, debido a que no se tendrá una manipulación de las variables, perteneciendo al grupo transversal descriptivo debido a que se centra en analizar las variables

en un momento dado y se reportan los resultados que se obtienen. (Sampieri, Fernández, & Baptista, 2007)

La investigación comprende el siguiente procedimiento:

3.3.1. Fase de campo

- a) Caracterización de la zona de estudio, Es necesario determinar el lugar de trabajo para evaluar y planificar el método adecuado para el desarrollo del proyecto con el objetivo de adquirir los datos adecuados. Se procedió a mencionar los componentes de mina que serán objeto de estudio, teniendo en cuenta las dimensiones, litología y condiciones de presencia o ausencia de humedad.
- b) Georreferenciación de los componentes, Las coordenadas de las bocaminas para tener la correcta ubicación del estudio.
- c) Muestreo de minerales
- d) Medición del pH del material proveniente de mina

3.3.2. Fase Gabinete

- a) Determinación de metales
- b) Determinar la presencia de sulfatos
- c) Determinar la presencia de sulfuros
- d) Determinar el pH en laboratorio del material proveniente de mina.
- e) Hallar el índice ABA.
- f) Análisis geo mecánico del macizo rocoso que forma las bocaminas teniendo en cuenta el RQD, RMR, Q, GSI, esfuerzos, deformaciones, capacidad admisible, para seleccionar el método adecuado de cierre de bocamina.

g) Diseño del tapón para cierre de bocamina teniendo en cuenta la guía de tapones del ministerio de energía y minas.

h) Diseño de tratamiento del drenaje ácido.

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

El estudio de investigación se ubica en la Zona Carabaya en el distrito de Macusani-Puno.

3.4.2. Muestra

La muestra será no probabilística dirigida, debido a que se realiza en la una unidad de explotación en los niveles 4500 – 4800, en las bocaminas 1,2,3,4 y 5, que serán evaluadas para el cierre y material de desmonte de acuerdo a las características de la investigación.

3.5. Técnicas para recolección y procesamiento de datos

Se considera los datos de campo como la observación, análisis de muestras, mediciones, guías del cierre de minas para determinar los resultados de la operación en labores de preparación, desarrollo e infraestructura para el cierre de la bocamina, cumpliendo así con los reglamentos del cierre de las bocaminas en la zona, minera Carabaya.

Los datos acumulados u obtenidos, serán monitoreados, procesadas por medio de estadísticas usando el software Excel calculando los valores adecuados para lograr un correcto cierre de bocamina y el tratamiento de drenaje ácido de mina, que se harán durante la investigación, así como pruebas de laboratorio las cuales se proyectarán en cuadros comparativos de los resultados de los métodos implementados como estándar de trabajo.

3.5.1 Técnica para la evaluación del material de mina

- a) **Muestreo de material:** El procedimiento para tomar las muestras se realizó seleccionando material de las bocaminas, contando con un promedio de 12 kg, el cual fue enviado a laboratorio para su posterior análisis.
- b) **Determinación de metales:** La determinación total de metales fue analizada por la técnica de plasma acoplamiento inductivo (ICP) o espectrometría de emisión atómica (OES), teniendo en cuenta lo siguiente:
- Se utiliza para analizar una cantidad de elementos en niveles bajos como partes por millón.
 - Empleando argón en el que se coloca una muestra atomizada, dicha muestra es ionizada en el plasma de argón, emitiendo luces de diferentes longitudes las cuales son medidas.
- c) **Determinación de sulfatos:** La determinación de sulfatos se realizó por medio de la NTP 339.178, es una normativa para la determinación cuantitativa de sulfatos en suelos y aguas subterráneas, que presenta la técnica gravimétrica que consistió en la medida del ión sulfato aplicada en muestras entre 20 mg/kg y 250 mg/kg.
- d) **Determinación de sulfuros:** Para la determinación de sulfuros se aplicó el método volumétrico que consiste en la aplicación de la fórmula. **(Ver ecuación 8).**

$$mg \frac{S}{L} = \frac{((A*B)-(C*D))*16000}{ML \text{ de muestra}} \quad (8)$$

Donde:

A: MI de solución de yodo

B: Normalidad de la Solución de Yodo

C: MI de solución de tiosulfato de sodio

D: Normalidad de la solución de tiosulfato de sodio

e) **Cálculo del potencial de acidez:** Se empleó la siguiente fórmula para calcular el potencial de acidez:

$$PA = \%S * 31.25 \quad (9)$$

Donde:

%S: Porcentaje de sulfuro

f) **Cálculo del potencial de neutralización;** Se colocó una solución de NaOH a la muestra que viene a ser el material de mina.

g) **Cálculo del potencial neto de neutralización:** Se calculó de la diferencia entre el potencial de acidez y el potencial de neutralización como se aprecia en la siguiente fórmula:

$$PNN = PN - PA \quad (10)$$

h) **Cálculo del ratio ácido-base:** Se obtuvo del cociente entre el potencial de neutralización y el potencial de acidez como se aprecia a continuación:

$$Ratio = PN/PA \quad (11)$$

3.5.2. Técnica para la evaluación geo mecánica

a) **Cálculo del RMR de Bieniawski:** Consistió en darle una ponderación a la resistencia a la comprensión del macizo rocoso, el índice de calidad de la roca, el espaciamiento de las discontinuidades, la condición de las discontinuidades y la presencia de humedad, para calcular el RMR se suman los cinco parámetros mencionados. (Ver figura 13).

Figura 13

Parámetros de clasificación Geo mecánica-Bieniawski

Parameter		Range of values						
1	Strength of intact rock material	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
	Point-load strength index	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
	Uniaxial comp. strength					2	1	0
	Rating	15	12	7	4			
2	Drill core Quality RQD	90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating	20	17	13	8	3		
3	Spacing of	> 2 m	0.6 - 2 . m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating	20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)	Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Stickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating	30	25	20	10	0		
5	Groundwater	Inflow per 10 m tunnel length (litm)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125	
		(Joint water press)/ (Major principal σ)	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5	
	General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating	15	10	7	4	0		

Fuente: Hoek, E. (2006). Practical Rock Engineering. Vancouver. Obtenido de Geotecnia fácil: <http://geotecniafacil.com/formula-rqd-sondeos/>.

Luego de calcular el RMR se le da una descripción al macizo que va desde una roca muy buena la cual no necesita sostenimiento hasta una roca muy mala la cual es muy fracturada y necesitará un sostenimiento adecuado para dichas condiciones. **(Ver tabla 8).**

Tabla 8

Clasificación RMR

No. Clase	I	II	III	IV	V
Descripción de clase	Roca muy buena	Roca buena	Roca regular	Roca mala	Roca muy mala
Valor total	100 - 90	90 - 70	70 - 50	50 - 25	< 25

Fuente: Hoek, E. (2006). Practical Rock Engineering. Vancouver. Obtenido de Geotecnia fácil: <http://geotecniafacil.com/formula-rqd-sondeos/>.

b) Cálculo de los parámetros del macizo rocoso: Se calculó el GSI teniendo en cuenta una tabla que muestra la relación entre la estructura del macizo rocoso y la condición de las discontinuidades e ingresando a la tabla por dos puntos distintos uno por la horizontal y otro por la vertical. **(Ver figura 14).**

Se calcularon los parámetros que indican las características de resistencia del macizo rocoso, con las fórmulas que se muestran a continuación:

$$M_b = m_i * \exp\left(\frac{GSI-100}{28}\right) \quad (12)$$

Para un GSI mayor igual de 25 se aplicó el criterio original de Hoek-Brown:

$$S = \exp\left(\frac{GSI-100}{9}\right) \quad a= 0.5 \quad (13)$$

Para un GSI < 25 se aplicó el criterio modificado de Hoek-Brown:

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad s=0 \quad (14)$$

Figura 14

Índice Geológico de Resistencia (GSI)

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000) From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.		SURFACE CONDITIONS				
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Sticksided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Sticksided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	90	80	70	N/A	N/A
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40		
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				30	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes					20
						10
		N/A	N/A			

Fuente: Hoek, E. (2006). Practical Rock Engineering. Vancouver. Obtenido de Geotecnia fácil: <http://geotecniafacil.com/formula-rqd-sondeos/>.

En la figura 15, se muestran los valores de la constante m_i , los cuales varían de acuerdo al tipo de roca y su textura, fue un parámetro importante para encontrar la constante de roca intacta (m_b) como se muestra en la ecuación 12.

Figura 15

Constante M_i

Tipo de Roca	Clase	Grupo	Textura			
			Gruesa	Media	Fina	Muy Fina
Sedimentaria	Clásica		Conglomerado (22)	Arenisca 19	Limolita 9	Argilita 4
			← Grauvaca (18) →			
	No clásica	Orgánica	← Carbón (8-21) →			
		Carbonatadas	Brecha (20)	Caliza (10)	Dolomita 8	
	Químicas		Gipsonita 16	Anhidrita 13		
Metamórfica	No foliadas		Mármol 9	Hornfels (19)	Cuarcita 24	
	Levemente foliadas		Migmatita (30)	Anfibolita 31	Milonita (6)	
	Foliadas*		Gneiss 33	Esquistos (10)	Filita (10)	Pizarra 9
Ígneas	Claras		Granito 33		Riolita (16)	Obsidiana (19)
			Granodiorita (30)		Dacita (17)	
	Oscuras		Diorita (28)		Andesita 19	
			Gabro 27	Dolerita (19)	Basalto (17)	
	Norito 22					
	Piroclásticas extrusivas		Aglomerado (20)	Brecha (18)	Tufo (15)	

Fuente: Hoek, E. (2006). Practical Rock Engineering. Vancouver. Obtenido de http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/XXV_Tapones.pdf Cálculo de deformaciones y esfuerzos in situ.

Se halló el módulo de deformación por la fórmula de Serafín Pereira; para la constante de esfuerzos k se le dio una ponderación de 1 debido a que se trabajó con rocas alteradas, los esfuerzos se encontraron por la fórmula 15 que se muestra a continuación:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_1}{\sigma_3} + s \right)^a \quad (15)$$

Donde:

σ_1 y σ_3 : Esfuerzos

σ_{ci} : Resistencia a la compresión

m_b : Parámetro de resistencia del macizo rocoso

s y a : Constantes del macizo

c) Cálculo de parámetros de esfuerzos cortantes: En la tabla 9, se muestran parámetros de resistencia cortante como la cohesión y el ángulo de fricción, que para ser calculados nos basamos en el RMR, y en los casos en los que el valor no se encontraba en la tabla se tuvo que realizar la operación de interpolar o extrapolar.

Tabla 9

Parámetros de resistencia

RMR	Cohesión (KPa)	Fricción (°)	Condición del macizo	Clase
81-100	>400	>45	Muy bueno	I
61-80	300-400	35-45	Bueno	II
41-60	200-300	25-35	Medio	III
21-40	100-200	15-25	Malo	IV
1-20	<100	<15	Muy Malo	V

Fuente: Hoek, E. (2006). Practical Rock Engineering. Vancouver. Obtenido de Geotecnia fácil: <http://geotecniafacil.com/formula-rqd-sondeos/>.

d) Cálculo de parámetros de esfuerzos cortantes. Para el cálculo de la capacidad admisible se tomó en cuenta el estudio de Hoek mediante las siguientes fórmulas:

$$q_{ult} = \sqrt{s} * \sigma_c \quad (16)$$

Donde:

q_{ult} : Capacidad de soporte

σ_c : Resistencia a la compresión

s : Constante del macizo

y por último la aplicación de la siguiente fórmula:

$$q_{adm} = q_{ult} / F_s \quad (17)$$

Donde:

q_{adm} : Capacidad admisible

q_{ult} : Capacidad de soporte

F_s : Factor de seguridad

Para la aplicación de la anterior fórmula el autor recomienda emplear un factor de seguridad de 3 por temas técnicos según la normativa de la Asociación Americana de Diseño y Construcción (AASHTO).

3.5.3. Técnica para el diseño del tapón

a) **Falla por corte:** Para encontrar la longitud de diseño en una falla por corte se empleó la siguiente fórmula:

$$L = \frac{P_F * A}{P_e * F'S} \quad (18)$$

Donde:

L : Longitud de diseño (m)

P_F : Presión del fluido (Pa) = ρ (kg/m³) * g (m/s²) * H (m)

H : Altura del fluido en el tapón (m)

A : Área (m) = $B * h$

P_e : Perímetro (m) = $2(b+h)$

$F'S$: Esfuerzo permisible (Pa)

En la figura 16 puede apreciar según la condición del macizo rocoso, el esfuerzo permisible cuyas unidades se encuentran en kilo pascales para poder desarrollar la fórmula de la ecuación 15.

Figura 16

Diseño de resistencia y gradiente hidráulica

Condición general de la roca RMR – Evaluación del macizo rocoso	Resistencia al corte (Máxima resistencia al corte admisible) ¹ (kPa)	Máxima gradiente hidráulica admisible ² 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)	10 - 14	100 - 140
Roca Moderada a débil, meradamente diaclasada 41<RMR<60	600 (200)	7 - 9	70 - 90
Roca Pobre Débil, cercanamente diaclasada o cortada 21<RMR<40	300 (100)	5 - 6	50 - 60
Roca Muy Pobre Muy débil, probablemente erosionable RMR < 20	150 (50)	3 - 4	30 - 40

Fuente: *Guía para el diseño de tapones para cierre de minas (2007).*

b) Falla por flexión de viga gruesa: Para encontrar la longitud de diseño en una falla por flexión de viga gruesa se empleó la siguiente formula:

$$L = \sqrt{\frac{6M_u}{bF_t}} \quad (19)$$

Donde:

M_u : Momento de flexión (KN*m) = $((w(I^2)) / 8) / 0.65$

W : Carga por metro (KN) = $((Hp\alpha) * 9.81) / 1000$

H : Altura del fluido (m) α : Factor de carga (1.4)

b : Peso unitario de viga (2400 kg/m³)

f_t : Resistencia permisible a la tensión y flexión (Kpa)

$F'c$: Resistencia a la compresión del concreto (Mpa) = $415.2\sqrt{F'c}$

c) Falla por levantamiento: Para encontrar la longitud de diseño en una falla por levantamiento se emplearon dos métodos los cuales se muestran a continuación por las siguientes fórmulas:

- **Normal**

$$H_r = \frac{1.3H_w - H_s\gamma_s}{\gamma_r} \quad (20)$$

Donde:

H_r : Altura de la roca sobre el túnel (m)

H_w : Altura estática máxima (m)

H_s : Altura del suelo sobre el túnel (m)

γ_s y γ_r : Densidad de la roca y el suelo (g/cm^3)

- **Noruego**

$$C_{RM} = \frac{\gamma_w H_s FS}{\gamma_r \cos\beta} \quad (21)$$

Donde:

γ_w y γ_r : Densidad de la roca y el suelo (MN/m^3)

H_s : Altura del suelo sobre el túnel (m)

FS : Factor de seguridad (1.3) β : Inclinación de cobertura

d) Falla por Ariete Hidráulico: Para encontrar la longitud de diseño según el ariete hidráulica se realizaron sondeos de cargas dinámicas (sísmicas) empleando una

aceleración de diseño de 0.28 g siendo recomendada a emplear el 70% de la aceleración de diseño.

por lo que la aceleración efectiva será 0.12g, para el cálculo del ariete hidráulico se emplearon las siguientes fórmulas:

$$P_h = c * v * \gamma \quad (22)$$

$$Ariete = \frac{h+H}{Gradiente} \quad (23)$$

Donde:

Donde:

C : Velocidad acústica del agua (m/s)

h: Aumento de altura de presión

v : velocidad (m/s)

H: Carga estática (m)

γ : densidad ($\frac{kg}{m^3}$)

Fueron cuatro tipos de cierre en los que nos basamos para el diseño del tapón:

- Cierre Tipo I: Son bocaminas con tapón de concreto, las cuales presentan tuberías de drenaje, con relleno de desmante, los tapones como máximo deben tener una altura de 2.5 metros.
- Cierre Tipo II: Son bocaminas con tapón de concreto, las cuales presentan tuberías de drenaje, con relleno de desmante y cobertura, los tapones tienen una altura superior a 2.5 metros.
- Cierre Tipo III: Son bocaminas con tapón de concreto, no presentan drenaje, con relleno de desmante y cobertura.
- Cierre Tipo IV: Son bocaminas con tapón de mampostería, no presentan drenaje, con relleno de desmante y cobertura.

En la tabla 10 se puede observar una matriz de alternativas en la que cada método se somete a una evaluación para saber cuál es el más factible, analizando características ubicadas en sentido horizontal como el costo, construcción, garantía ambiental, control, tiempo de

ejecución, riesgo de falla, impacto visual, aporte social, seguridad y garantía de perpetuidad relacionándose con los métodos que se encuentran en sentido vertical.

Tabla 10

Matriz de Alternativas para la selección del método de cierre

MATRIZ DE ALTERNATIVAS	MÉTODO HERMÉTICO	MÉTODO DE REBOSE	MÉTODO DE BLOQUEO DE AIRE	MÉTODO MIXTO
Costo	4	3	5	3
Construcción	4	4	5	4
Garantía Ambiental	5	5	5	5
Control	4	3	4	3
Tiempo de Ejecución	3	3	4	3
Riesgo de Falla	4	3	4	3
Impacto Visual	5	3	4	3
Aporte Social	3	3	4	3
Seguridad	4	5	5	5
Garantía de Perpetuidad	4	5	5	5
TOTAL	40	37	45	37
Precio (\$)	24262	22500	26429	23700

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 11 se describe el tipo de cobertura, la condición a la que será aplicada y el material necesario para realizar la revegetación en la zona a rehabilitar.

Tabla 11

Coberturas para revegetación

Cobertura de Revegetación		
Tipo	Condición	Material
I	Seca	Orgánico
II	Húmeda	Orgánico y granular
III	Húmeda	Orgánico, granular y arcilla

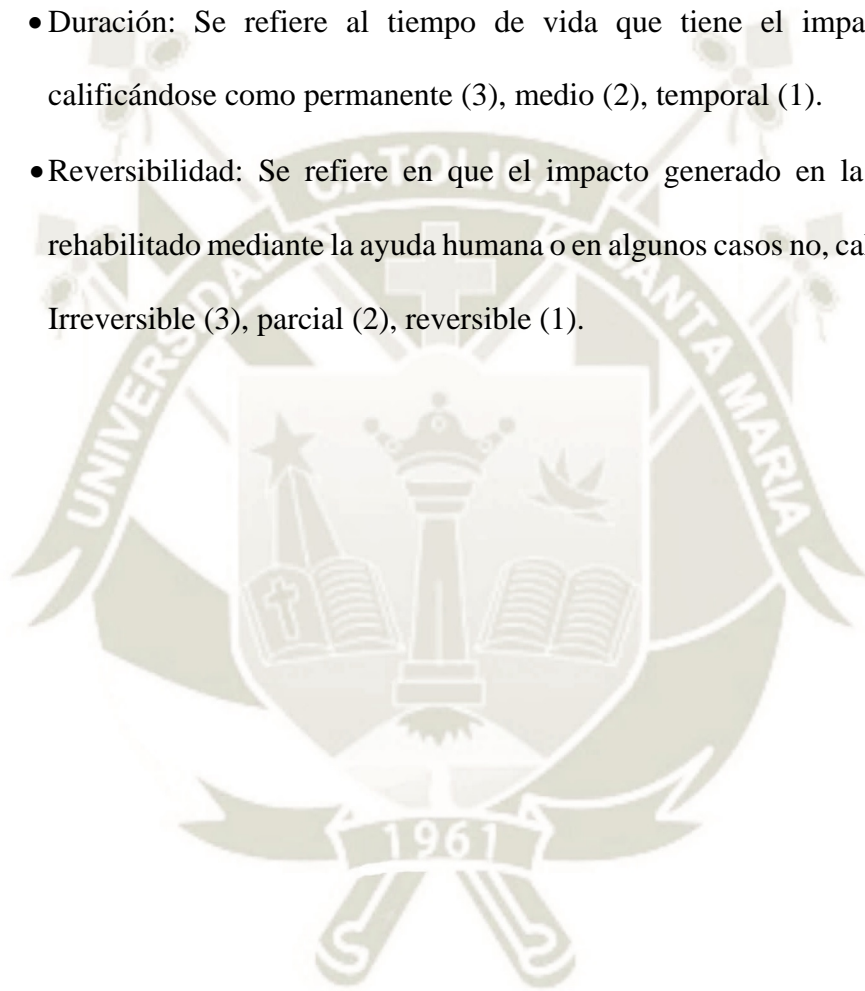
Fuente: Elaboración propia.

3.7. Instrumentos de la Investigación

Los instrumentos para la presente investigación son los siguientes:

- a) Ficha de observación: Donde se registrarán todos los cálculos empleados para el desarrollo tanto del cierre de bocaminas (variable dependiente) como el tratamiento del drenaje ácido (variable independiente).
- b) Matriz de Alternativas: Utilizada para seleccionar el método más adecuado para el cierre de bocamina y tratamiento de drenaje ácido.
- c) Matriz de Evaluación de Impactos: Utilizada para evaluar las consecuencias que puede ocasionar el material de mina analizado, teniendo en cuenta los siguientes criterios.
 - **Carácter:** Se refiere al tipo de impacto que se genera calificándose como positivo (+) o negativo (-).
 - **Perturbación:** Se refiere a la revolución que causa en el medio ambiente, calificándose como importante (3), regular (2), escasa (1).
 - **Importancia:** Se refiere al elevado valor que pueda tomar el impacto en la zona, calificándose como alto (3), medio (2), bajo (1).

- **Ocurrencia:** Se refiere a la probabilidad que dichos impactos se puedan presentar, calificándose como muy probable (3), probable (2), poco probable (1).
- **Extensión:** Se refiere a la ubicación a la que puede llegar el impacto, calificándose como regional (3), local (2), puntual (1).
- **Duración:** Se refiere al tiempo de vida que tiene el impacto en la zona, calificándose como permanente (3), medio (2), temporal (1).
- **Reversibilidad:** Se refiere en que el impacto generado en la zona puede ser rehabilitado mediante la ayuda humana o en algunos casos no, calificándose como Irreversible (3), parcial (2), reversible (1).





4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se expone el análisis e interpretación de resultados obtenidos de los estudios de estabilidad física, estabilidad química y el monitoreo postcierre que las cinco bocaminas necesitarán.

4.1. Caracterización de la Zona de estudio

4.1.1. Descripción de la zona de trabajo

La mina del sector de Carabaya está dividida en tres zonas, de los cuales se realizaron las labores de cierre en tres zonas denominadas:

En la zona I se encuentran las bocaminas BM-01 y BM-02 se encuentran localizadas cerca de la laguna Aciruni a 4705 y 4652 msnm respectivamente. Dichas bocaminas se ubican sobre un talud de material rocoso que presente elevada pendiente, el material de relleno presente son gravas, la bocamina 1 es seca; el macizo rocoso está compuesto por andesita y la bocamina 2 es húmeda; el macizo rocoso está compuesto por filita.

En la Zona II se encuentran localizadas la bocamina BM-03 Y BM-04, están situadas sobre un depósito glaciario, con presencia de gravas arcillosas, la zona es húmeda; el macizo rocoso está compuesto por filitas y cuarcitas respectivamente.

En la Zona III se encuentra localizada la bocamina BM-05, están situadas sobre un depósito glaciario, con presencia de gravas arcillosas, la zona es seca; el macizo rocoso en la bocamina 5 está compuesta por cuarcita.

4.1.2. Componentes de cierre

Los componentes de la mina de la zona Carabaya fueron formados por las exploraciones y explotación del yacimiento, para la presente investigación se tomó en cuenta las bocaminas;

se pueden apreciar las coordenadas, las dimensiones, la litología y condición para el diseño del tapón y el tratamiento del drenaje ácido en caso sea necesario. (Ver tabla 12).

Tabla 12

Información de las bocaminas

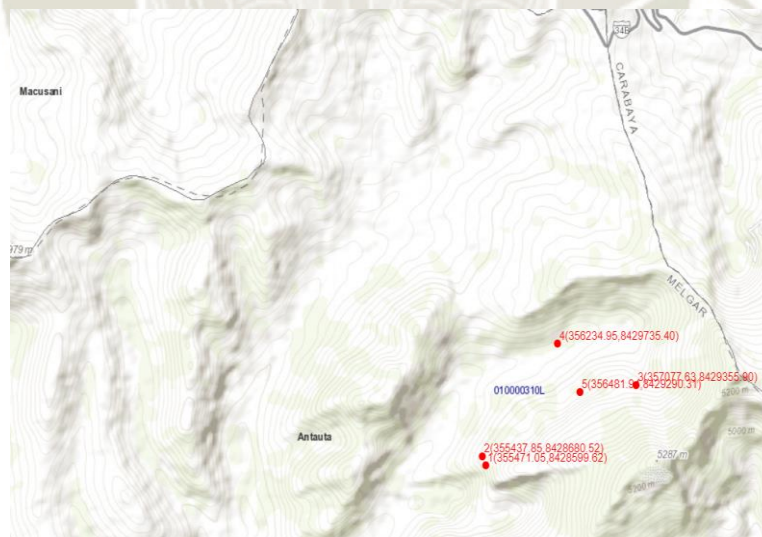
Bocamina	Ubicación		Dimensiones		Litología	Condición
	Norte	Este	Base (m)	Altura (m)		
BM 1	8428225.6	355282.7	2	3.2	Andesita	Húmeda
BM 2	8428306.5	355249.5	2.6	2.3	Filita	Húmeda
BM 3	8428981.9	356889.3	2	2	Cuarcita	Seca
BM 4	8429361.4	356046.6	2	2.7	Filita	Húmeda
BM 5	8428916.3	356293.6	2	1.8	Cuarcita	Seca

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 17 se muestra la ubicación de las cinco bocaminas situadas en la zona Carabaya, según el sistema WGS84 (Word Geodetic System) UTM en la zona 19 sur.

Figura 17

Ubicación de las bocaminas



Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Ubicación y Acceso

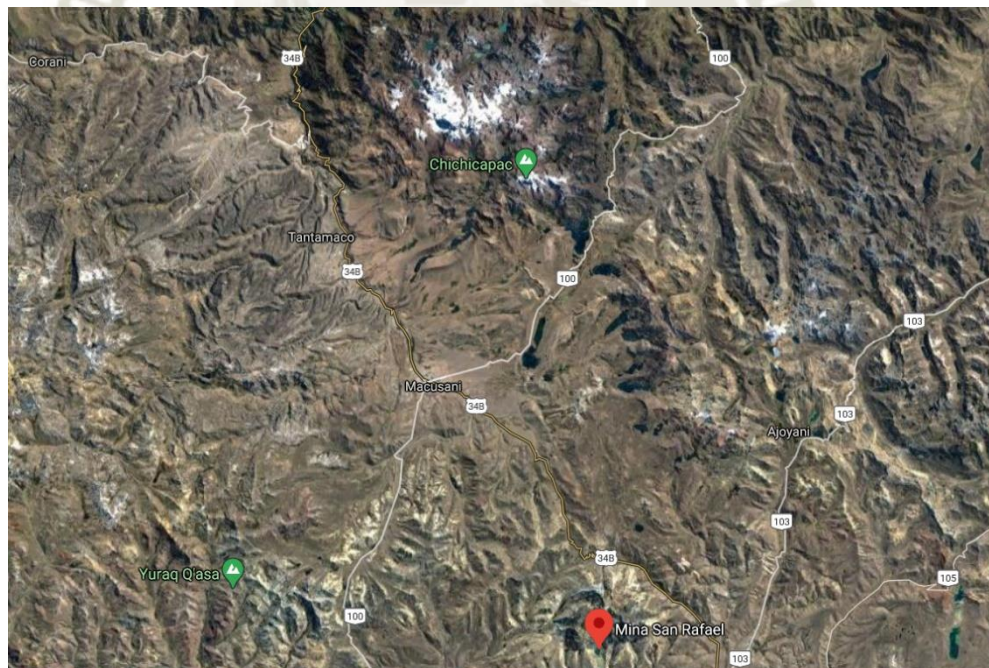
El proyecto de estudio se encuentra en las estribaciones occidentales de la cordillera oriental de los Andes del Perú, en el departamento de Puno, Provincia de Carabaya y distrito de Macusani a una altitud de 4500 m.s.n.m.

El acceso desde la ciudad de Lima es por vía aérea a Juliaca, con un tiempo aproximado de una hora de viaje, de Juliaca al campamento minero, la distancia es de 210 km con un tiempo de duración de viaje de dos horas y media por la carretera Interoceánica.

En la figura 18 se muestra la ubicación de la compañía minera cuyas bocaminas y material de mina serán los objetos de estudio para el cierre progresivo.

Figura 18

Ubicación de la compañía minera



Fuente: Elaboración propia.

4.2. Línea Base

4.2.1. Geomorfología

Se describen las unidades geomorfológicas presentes en el cuadrángulo de Macusani:

a) Relieve Cordillerano: Se encuentra localizada en el sector central norte corresponde a los nevados que presentan alta pendiente.

La glaciación cuaternaria es uno de los agentes principales en el diseño de todo el cuadrángulo, ahí es donde se mantiene debido a que se observa la acción del hielo en la roca, manteniendo los glaciares y que estos forman nevados: Queroni, Toldoqueri, Balansani, Ravelinas, entre otros; los cuales delinear todo el cuadrángulo de Macusani. La litología presente son rocas ígneas como plutones y rocas sedimentarias pertenecientes al Paleozoico Superior formado por los grupos Ambo, Tarma y Mitu que presentan areniscas y calizas.

b) Laderas Cordilleranas: Se encuentran localizadas en la parte central y oriental del cuadrángulo y bordea el relieve cordillerano, las pendientes presentes no son muy pronunciadas, tiene perfiles asimétricos con quebradas profundas, forma un enlace con el relieve cordillerano y la peneplanicie andina. La glaciación cuaternaria es un agente principal debido a que forma un grupo de cerros de altura media.

La litología está formada por rocas pertenecientes al Paleozoico Superior conformados por areniscas, calizas y conglomerados, ubicados al norte de lo que es denominado Depresión Ananea- Crucero-Cojata.

c) Peneplanicie Andina: Se encuentra localizada en la parte central y septentrional del cuadrángulo, compuesta por superficies planas, ligeramente onduladas con cerros de pequeña altura, rodeados por ríos que forman pequeños ríos y bofedales.

Son antiguas llanuras de origen glaciario, las cuales han sido sometidas a procesos de meteorización, erosión y remoción en la masa; causada principalmente por aguas de escorrentía es decir arroyos, ríos, bofedales. Formando estas peneplanicies que son conocidas como pampas, como la pampa de Traypampa en la parte central-occidental, y las pampas Lacca y Ccaluyo, a los alrededores de Macusani. La peneplanicie está forrada por depósitos glaciofluviales.

- d) **Lomas:** Se encuentran localizadas en la parte central y noroccidental del cuadrángulo, bordeando las peneplanicies, formando pequeñas elevaciones de terreno con bordes redondos y alargados, se encuentran localizados en la parte central y noroccidental del cuadrángulo, bordeando las peneplanicies, formando pequeñas elevaciones de terreno con bordes redondos y alargados.
- e) **Colinas Intracordilleranas:** Se encuentran localizadas en el sur de las peneplanicies centrales formando unas colinas que se elevan progresivamente de las peneplanicies centrales hasta los bordes de las zonas grandes llamadas cumbres intracordilleranas. La litología está formada por rocas del Paleozoico Superior y de afloramientos del Cenozoico que presentan elevaciones moderadas.
- f) **Cumbres Intracordilleranas:** Se encuentran localizadas en la parte suroccidental del cuadrángulo, forman las partes más sobresalientes de la cordillera de Carabaya que viene a ser un macizo rocoso Paleozoico, caracterizado por una topografía de montañas cortadas por ríos profundos. La litología está formada por afloramientos de areniscas y calizas pertenecientes al Paleozoico Superior que conforman los grupos Ambato, Tarma y Copacabana.

- g) Sinclinorio de Putina:** Se encuentra localizado en la parte del extremo suroeste del cuadrángulo, compuesto por colinas y cerros de cresta, se encuentran cortados por ríos y quebradas, posee un relieve con altitudes de 4000 a 4800 m.s.n.m. Se encuentra localizado en la parte del extremo suroeste del cuadrángulo, compuesto por colinas y cerros de cresta, se encuentran cortados por ríos y quebradas, posee un relieve con altitudes de 4000 a 4800 m.s.n.m. La litología está formada por areniscas y calizas cretáceas pertenecientes a las formaciones Muni, Huancané, grupo Moho y formación Ausangate.
- h) Plataforma Volcánica:** Se encuentra localizada en el extremo noroccidental del cuadrángulo, compuesto de una superficie plana y ligeramente ondulada, presenta drenaje dendrítico de quebradas y barrancos.
- i) Valles Fluviales:** Se encuentran localizados en la parte central y meridional de cuadrángulo, al sur de las peneplanicies, pertenecen a los cursos inferiores de los ríos. Se encuentran localizados en la parte central y meridional de cuadrángulo, al sur de las peneplanicies, pertenecen a los cursos inferiores de los ríos. Su sección transversal es en forma de V, con poca pendiente y con un fondo plano relleno por depósitos fluviales que poseen limos, arenas y gravas.
- j) Valles Glaciares:** Se encuentran localizados en la parte central y nororiental del cuadrángulo de Macusani, formando los cursos superiores de los ríos, constituyen el enlace entre los nevados del lugar y los cursos medios de los ríos, así como peneplanicies. Se encuentran localizados en la parte central y nororiental del cuadrángulo de Macusani, formando los cursos superiores de los ríos, constituyen el enlace entre los nevados del lugar y los cursos de los ríos.

k) Valles Encañados: Se encuentran localizados al nororiente del cuadrángulo, se presentan como valles profundos y con pendientes verticales, normalmente tienen un fondo en forma de V, en el que destacan sus extensos acantilados.

l) Circos Glaciares: Se encuentran localizados al nororiente y centro del cuadrángulo, ubicándose en la cabecera de los ríos. Su sección transversal es de forma de U con cabeceras empinadas y de forma circular, están separadas de los valles glaciares por umbrales, se encuentran forrados por depósitos morrénicos.

4.2.2. Geología

En el área del proyecto se muestra la presencia de rocas que van desde el Paleozoico Inferior hasta el cenozoico. (Acosta, Valencia, Flores, & Rodriguez, 2011)

Rocas Metamórficas

Formación Ananea: Formada litológicamente según Laubacher (1975) describió una serie de lutitas negras, finalmente estratificadas que afloran por la zona de Ananea, en el valle, así como en la cordillera oriental y que concuerdan con la formación sandía; también la presencia de filitas y pizarras de color gris oscuro, presenta espesores delgados agrupados en paquetes de 20 a 80 centímetros.

Formación Sandía: Formada litológicamente por una secuencia de filitas grises oscuras, con intercalaciones de cuarcitas. Localmente entre las filitas afloran metaandesitas, que muestran la evidencia de actividad volcánica contemporánea con la sedimentación. Las condiciones de esta formación son características de un ambiente marino poco profundo. También la presencia de capas de areniscas de grano fino, dichas rocas dan indicios de yacimientos de oro con un elevado valor económico.

Rocas Intrusivas: En la cordillera oriental se presentan de manera localizada en forma de plutones y stocks, en su mayoría formados por monzogranitos que es una roca plutónica acida, constituida por cuarzo, feldespatos y plagioclasas junto con biotita como único mineral máfico. Este último es minoritario y se encuentra en posiciones intersticiales entre el resto de los minerales y tiene textura que está formada por agregados de cuarzo y feldespato.

Depósitos Cuaternarios: Presentan espesores muy variables, se puede observar las áreas con cierta pendiente moderada.

Depósitos Glaciares: Se encuentra de manera no continua en el área del yacimiento. Los depósitos más antiguos están formados por una mezcla de trozos de roca de distintas formas y tamaños de arcillas y arenas, generalmente son una maza compacta y sellada; con espesores que varían.

Depósitos Fluvio-Glaciares: Se encuentran en los bordes de las quebradas de procedencia glaciar, así como algunas áreas cercanas a las lagunas, en su mayoría formados por una mezcla de limos con arenas y gravas, generalmente son compactas.

Depósitos Coluviales: Se encuentran formados por fragmentos de diferentes tamaños y ángulos, estos materiales se encuentran acumulados en la parte baja de las laderas.

(Ver figura 19).

Figura 19

Columna estratigráfica de Puno

UNIDADES ESTRATIGRAFICAS DE TIEMPO			UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS		
ERA	SISTEMA	SERIE	NOMBRE	SIMBOLO	LITOLOGIA
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	DEPOSITO	Q-al	Grava y arena
			ALUVIAL	Q-fg	Grava y arena
			FLUVIO-GLACIAL	Q-g	Grava, arena y finos
	TERCIARIO	PLIOCENO	DEPOSITO GLACIAL	Np-aj	Lutita y conglomerado
			FORMACIÓN PICOTANI	Np-pic	Tufos
PALEOZOICO	PERMICO	INFERIOR	GRUPO COPACABANA	Pi-c	Cliza y arenisca
	CARBONIFERO	PENSILVANIANO	GRUPO TARMA	Cs-t	Arenisca cuarzosa
		MISISSIPIANO	GRUPO AMBO	Ci-a	Conglomerado, arenisca y lutita
	SILURICO DEVONICO		FORMACION ANANEA	SD-a	Pizarra negra
	ORDOVICICO	SUPERIOR	FORMACIÓN SANDIA	Os-s	Cuarcita con pizarra
		INFERIOR	FORMACIÓN SAN JOSE	Oj-sj	Lutita pizarrosa

Fuente: Acosta, Valencia, Flores, & Rodriguez. (2011). Memoria sobre la geología económica de la región Puno. Puno.

4.2.3. Hidrografía

El drenaje septentrional que corresponde a las cuencas del río Inambari y las subcuencas del río Macusani, Achisiri, Condoriquiña y Sajosa, que involucra drenaje dendrítico donde los afluentes se originan en el deshielo de los nevados y en las partes altas de la cordillera oriental, que inicia en el río Antauta y desemboca en el Carabaya. El drenaje meridional que es esencialmente subparalelo formado por dos subcuencas del río crucero y Condoriri.

4.2.4. *Clima*

La siguiente clasificación climática se aplica al año 2020; Según Koeppen (1931) se han diferenciado cuatro tipos de climas en la Puna:

- El clima templado lluvioso, es seco en invierno con temperaturas que promedian entre los 3 y 18°C. Entre los meses de diciembre y marzo, ocurren fuertes precipitaciones fluviales.
- El clima frío, la temperatura es superior a los 10°C en la temporada de lluvias y en el período de heladas llega por debajo de los 0°C. Entre abril y mayo hasta los 22°C, En los meses de junio, julio y agosto ocurren las heladas a temperaturas que oscilan entre los 2 a -15°C y En los meses de setiembre y octubre, se presentan fuertes vientos y granizo.
- El clima de tundra seco de alta montaña, se caracteriza por una fuerte variación térmica, en meses de mayo y agosto entre grados de -9 y -25°C; y entre abril y setiembre hasta 22°C. Las precipitaciones presentes son de lluvia, nieve y granizo.
- El clima de nieves perpetuas de alta montaña, se caracteriza por una fuerte variación térmica, las temperaturas van hasta menos 25°C.

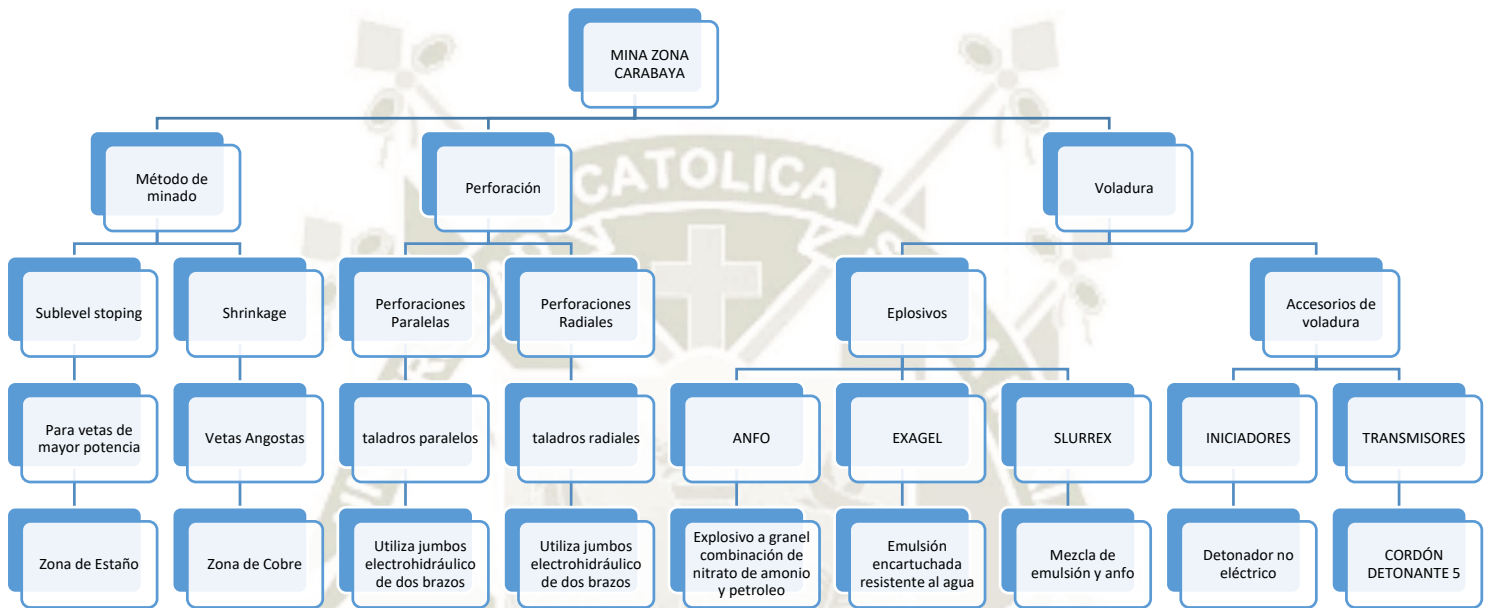
4.2.5. *Flora y Fauna*

La vegetación es pobre, la característica principal es la presencia de ichu ya que sirve como alimento para el ganado y auquénidos de la zona. La agricultura no está presente debido al clima excesivamente frío del lugar. Existen lagunas secas que reciben el nombre de bofedal, en sí la vegetación en la puna está compuesta en su mayoría por ichu y pasto silvestre.

4.3. Descripción del proceso de la Empresa minera

Figura 20

Esquema de Operaciones Mina: Método de minado, Perforación y Voladura



Fuente: Elaboración propia.

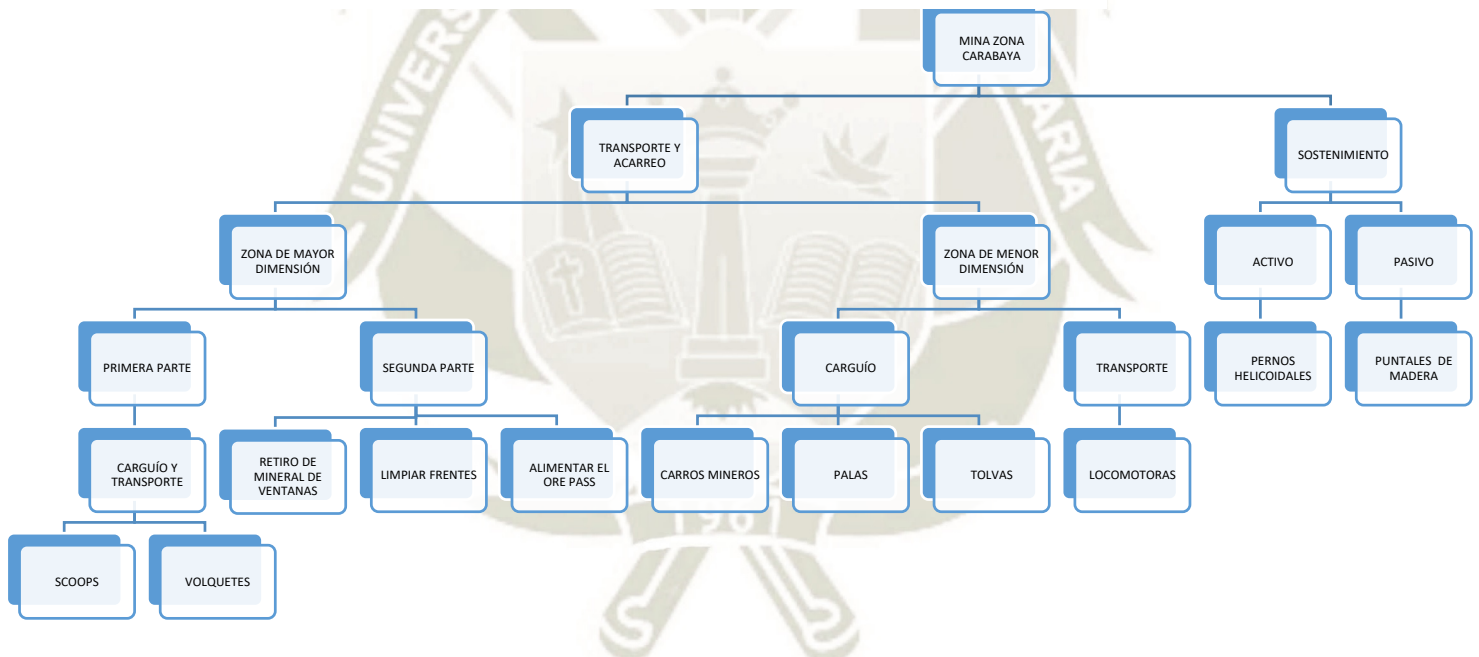
El método de minado sublevel stoping es de sostenimiento natural que es empleado en vetas de una mayor potencia, en la zona de estaño empleando taladros largos, en la zona de cobre se emplea el almacenamiento temporal en vetas de pequeña potencia. Para la perforación se realizan taladros paralelos y radiales teniendo en cuenta la estructura y potencia de las vetas, los equipos empleados son jumbos electrohidráulicos de dos brazos que usan en áreas de amplia dimensión, en dimensiones pequeñas se emplean perforadoras manuales.

En la voladura Se emplean explosivos como ANFO para zonas secas, Exagel E-65 (encartuchado), slurrex AP-80 (Heavy Anfo) para zonas donde hay presencia de humedad;

como iniciadores se emplean detonadores no eléctricos temporizados es decir con micro retardos, cordón detonante 5P, detonadores con presencia de fulminante n°6 que no tienen retardo y se activan con la transmisión del cordón.

Figura 21

Esquema de Operaciones Mina: Transporte, Acarreo y Sostenimiento



Fuente: Elaboración Propia.

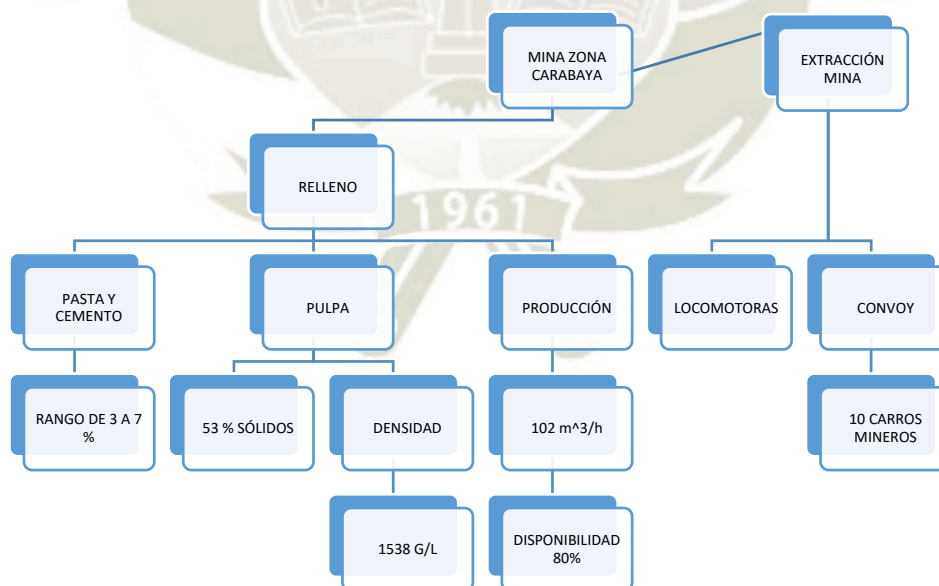
En la parte baja, donde se encuentra el área de explotación y en frentes de secciones de mayor dimensión, se emplea el método trackless en dos partes la primera es el carguío de scoops con los volquetes y la segunda parte en que el scoop retira el mineral de las ventanas (drow points) o también para limpiar los frentes de avance y alimentar el ore pass.

En los frentes de menor dimensión y en tajos convencionales es decir en la zona baja en estaño, el retiro de mineral se efectúa con carros mineros cargados por medio de una pala neumática y en tolvas convencionales, después el convoy es llevado por locomotoras eléctricas, las que descargan en el ore pass, para que luego los volquetes transporten el mineral al exterior. En la zona alta de cobre la extracción se efectúa con carros mineros que se cargan en las tolvas de madera y llevados por locomotoras eléctricas que llevan el mineral a la superficie.

Se emplea un sostenimiento activo mediante el uso de pernos helicoidales en forma sistemática en labores permanentes y rampa principal dependiendo de la estabilidad que se tiene después de la voladura. En la explotación de vetas angostas se aplica un sostenimiento pasivo con puntales de seguridad de acuerdo a lo que se necesite en cada labor.

Figura 22

Esquema de Operaciones Mina: Relleno y Extracción mina



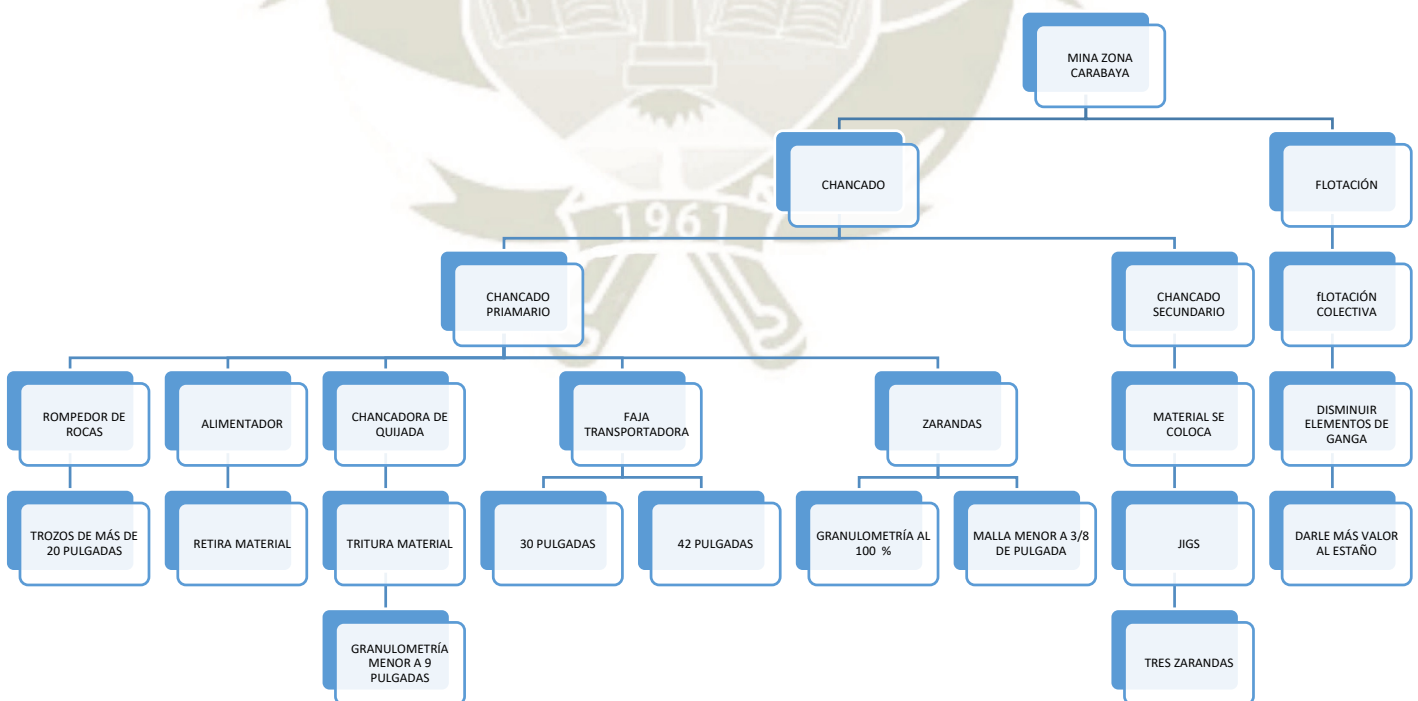
Fuente: Elaboración Propia.

El relleno empleado es en pasta con presencia de porcentajes de cemento de acuerdo a lo que se necesite operacionalmente van en rangos de 3 a 7%, la pulpa presenta aproximadamente 53% de sólidos con una densidad 1538 g/l. La producción de la planta de relleno es de 102 m³/h con una disponibilidad del 80%.

En extracción del material, se aplica el método de shrinkage en la zona baja de estaño con el empleo de locomotoras y convoy de 10 carros mineros desde los frentes de avance hasta los echaderos de los ore-pass. En la zona alta de cobre se emplean locomotoras y convoy de 10 carros mineros que se encargan de la extracción del mineral desde los tajos a la planta.

Figura 23

Esquema de Operaciones Mina: Chancado y Flotación



Fuente: Elaboración Propia.

En el chancado primario, el mineral es colocado en una cancha de la mina, luego una pala alimenta la tolva de paso los trozos superan las 20 pulgadas partidos con ayuda de rompedor de rocas. Un alimentador es el encargado de retirar el material de la tolva y coloca dicho material en las dos chancadoras de quijadas, el paso de material a las chancadoras se realiza por dos fajas transportadoras de 30 y 42 pulgadas. Dicho material es colocado en una chancadora de quijadas el material tendrá una granulometría menor o igual a 9 pulgadas.

El material que proviene de tres chancadoras cónicas será transportado a una tolva de regulación por medio de otra faja de transportadora de 30 pulgadas y de ahí a las vibradoras mediante fajas de 24 pulgadas. Los trozos de mayor de tamaños de las zarandas serán de alimentación de las chancadoras cónicas para terminar con el proceso y obtener una granulometría de 100 % menor a una malla de 3/8 de pulgada.

En el chancado secundario El material que está en la tolva de finos tendrá una granulometría de 100% menor a malla 3/8 de pulgada, con humedad de 4.5 a 5%, la carga será llevada por fajas transportadoras de clasificación, previa a ser colocada en jigs que poseen tres zarandas con aspersores de agua y poliuretano con aberturas de 4 mm x 15 mm.

4.4. Resultados de la estabilidad Química

4.4.1. Análisis de Laboratorio

En la tabla 13 se puede observar datos de prueba de laboratorio basados en un análisis físico químico, determinación de sulfatos, determinación de sulfuros, el potencial de acidez, la capacidad de neutralización, la capacidad de acidez, el índice ABA y el pH.

Tabla 13

Ensayos de laboratorio N° ANA07B20.004517

Análisis Fisicoquímico		Determinación de sulfatos Metodología NTP 335.178
Fe	0.82%	230 mg/kg
Al	6.31%	Determinación de sulfuros Método Volumétrico
Cu	0.5 %	No detectable
N	0	
Ca	0.09%	Determinación de Capacidad de Neutralización
Na	0.08%	
Zn	0.20%	
B	18.69%	0.05 Kg/TM
Ti	0.28%	Determinación de acidez Método volumétrico
K	2.14%	0.32 Kg/TM
Si	7.97%	
P	0.02%	Determinación del índice ABA
S	0.12%	
Cr	0	-0.27
Co	0	Determinación de ratio ácido/base
Ni	0	
Se	0	
Mg	0.27%	6.4

Fuente: Laboratorio de ensayo y calidad de la UCSM.

En la tabla 14 se muestra el análisis de laboratorio en el cual se ven involucradas cantidades expresadas en mg/Kg de Fe, Al, Cu, Ca, Na, Zn, B, Ti, K, Si, P, S, Mg, dichos resultados fueron transformados al Sistema Internacional de Unidades ya que se encontraban en porcentaje y partiendo de un total de muestra de 5000 g, realizando conversiones por el factor común en los que se relacionaba g, kg, mg y los LMP.

Respecto a la presencia de sulfatos fueron expresadas en mg/Kg según el laboratorio de la Universidad Católica de Santa María, no hay presencia de sulfuros y cabe resaltar que el potencial de hidrógenos es adimensional.

Tabla 14

Prueba de laboratorio vs LMP

Elementos	Prueba de laboratorio (mg/Kg)	LMP (mg/Kg)
Fe	0.016	2
Al	0.012	0.2
Cu	0.025	1
Ca	0.0018	0.2
Na	0.0012	0.14
Zn	0.024	1.2
B	0.8	4
Ti	0.0028	0.1
K	0.0642	3
Si	0.3	4
P	0.0004	2
S	0.06	5
Mg	0.0045	1.7
Sulfato	230.21	500
Sulfuro	0	5
pH	6.4	7

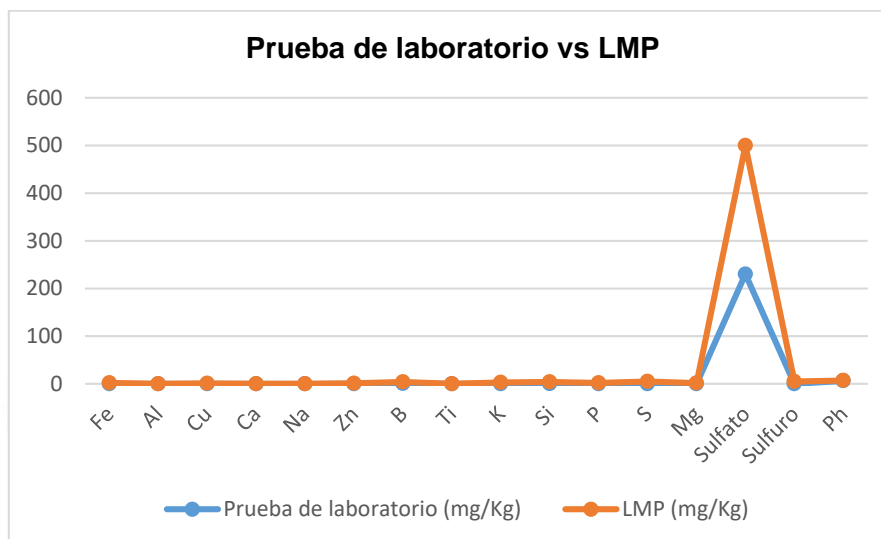
Fuente: Elaboración Propia.

Comparando los resultados de laboratorio del material de desmonte respecto a los límites máximos permisibles, todos los elementos se encuentran dentro de los límites máximos permisibles.

Respecto a la presencia de sulfatos se encuentra dentro de los límites máximos permisibles, no hay presencia de sulfuros por lo que es probable que el pH este en neutralización o cerca a dicho rango; el pH se encuentra dentro de los límites permisibles. (**Ver figura 24**).

Figura 24

Prueba de laboratorio vs LMP

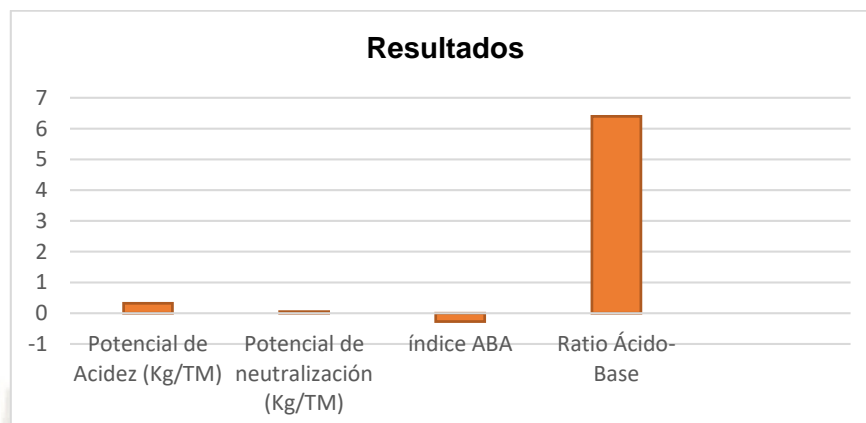


Fuente: Elaboración Propia.

El potencial de acidez es de 0.32 Kg/TM, El potencial de neutralización es 0.05 Kg/TM, El índice ABA que viene a ser la diferencia entre el potencial de neutralización y el potencial de acidez es de -0.27. Al ser el resultado mayor a -20 y menor a 20 el material está en la incertidumbre de ser o no generador de ácido. La relación entre el potencial de acidez de 0.32 y el potencial de neutralización de 0.05 nos da el ratio ácido base de 6.4 que vendría a ser el potencial de hidrógeno, por lo que se confirma que es una incertidumbre; por lo que se propone el método de bloqueo mixto el cual consiste en colocarle una trampa o codo, el cual al impedir el ingreso de aire evitará que se produzca la oxidación de sulfuros, por lo tanto ya no habrá la generación de drenaje ácido, se reducirá el contenido de metales y el pH llegará a 7 habiendo llegado a la neutralización del material. (Ver figura 25).

Figura 25

Resultados del Test ABA



Fuente: Elaboración Propia.

4.5. Estabilización Física

4.5.1. Evaluación geo mecánica

El Rock Mass Rating (RMR) e Índice de Calidad de la Roca (RQD) tienen una valoración baja y según información preliminar el valor de resistencia a la compresión es de 130, 200, 85, 165, 130 MPa respectivamente concluyendo que son rocas duras, el RMR muestra una puntuación de 33 a 38 lo que corresponde al rango de roca **Tipo IV** (Calidad mala) y de puntuación 43 correspondiendo al rango de roca de **TIPO III** (calidad regular), se toman muestras representativas de roca, las que se derivaron a Lima para sus ensayos respectivos. **(Ver tabla 15).**

Tabla 15

Parámetros generales de las bocaminas

Bocamina	Calidad de roca	RMR	RQD	Q	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)
BM-01	IV	38	48	0.513	189.47	23.95
BM-02	IV	35	34	0.368	173.68	22.37
BM-03	IV	33	43	0.295	163.16	21.32
BM-04	IV	35	32	0.368	173.68	22.37
BM-05	III	43	43	0.895	210.53	26.05

Fuente: Elaboración propia.

- a) **Estudio Geo mecánico -Bocamina 1:** Según el estudio a la roca intacta mediante ensayos realizados por el laboratorio CESEL INGENIEROS como el peso específico, el módulo de Young teniendo en cuenta el comportamiento elástico de la andesita ante los incrementos de tensión y deformación, la relación de Poisson teniendo en cuenta los esfuerzos centrales y perpendiculares. La cimentación de 0.5 m fue elegida para mejor el contacto de la roca con el material aplicado que será el cemento explicado posteriormente.

Se demostró los ensayos de laboratorio realizando la clasificación geo mecánica de Bieniawski analizando que la resistencia a la compresión del macizo rocoso es media a alta otorgándole una ponderación de 12, después se tiene que el índice de calidad de la roca es de regular a malo por lo que se le dio una ponderación de 8, el espaciamiento de las juntas es de 0.10 m por lo que se obtuvo una ponderación de 8, la condición de las juntas incluyendo la apertura, el relleno y la meteorización tuvo una ponderación de 10, al ser la condición húmeda de la bocamina se le dio una ponderación de 10, el Rock Mass Rating (RMR) inicial es de 48. Por la orientación de las juntas al ser desfavorable al de la bocamina recibió una ponderación de 10 por lo que el Rock Mass

Rating (RMR) corregido es de 38 indicando que es una roca mala por lo que se necesitará sostenimiento con pernos en los hastiales acompañado de hormigón proyectado y cimbras metálicas. El parámetro Q de Barton se encontró de acuerdo a la ecuación 5 estando categorizada en muy pobre guardando relación con el RMR de Bieniawski. (Ver tabla 16).

Tabla 16

Parámetros geo mecánicos de la bocamina 1

Bocamina 1		Zona 1
Roca intacta		
Roca	Andesita	
Peso específico (KN/m ³)	27	
Módulo de elasticidad (MPa)	41000	
Relación de Poisson	0.25	
Profundidad de cimentación (m)	0.5	
Macizo Rocoso		
Barton		
Q	0.513	
Bieniawski		
UCS	12	130
RQD	8	39%
Espaciamiento de juntas	8	0.10 m
Condiciones de juntas	10	
Agua subterránea	10	Húmedo
RMR	48	
Orientación de juntas	10	Desfavorable
RMR (CORREGIDO)	38	

Fuente: Elaboración propia.

- b) **Estudio Geo mecánico - Bocamina 2:** La resistencia a la compresión del macizo rocoso es media a alta otorgándole una ponderación de 12, el índice de calidad de la roca es de regular a malo por lo que se le dio una ponderación de 8, el espaciamiento de las juntas es de 0.05 m por lo que se obtuvo una ponderación de 5, la condición de las juntas tuvo una ponderación de 10, al ser la condición húmeda de la bocamina se

le dio una ponderación de 10, el RMR inicial es de 45. Por la orientación de las juntas al ser desfavorable al de la bocamina recibió una ponderación de 10 por lo que el RMR corregido es de 35 indicando que es una roca mala por lo que se necesitará sostenimiento con pernos en los hastiales acompañado de hormigón proyectado y cimbras metálicas. La Q de Barton está categorizada en muy pobre. (Ver tabla 17).

Tabla 17

Parámetros geo mecánicos de la bocamina 2

Bocamina 2		Zona 1
Roca intacta		
Roca	Filita	
Peso específico (KN/m ³)	25	
Módulo de elasticidad (MPa)	64000	
Relación de Poisson	0.25	
Profundidad de cimentación (m)	0.5	
Macizo Rocoso		
Barton		
Q	0.368	
Bieniawski		
UCS	12	200
RQD	8	34%
Espaciamiento de juntas	5	0.05 m
Condiciones de juntas	10	
Agua subterránea	10	húmedo
RMR	45	
Orientación de juntas	10	desfavorable
RMR (CORREGIDO)	35	

Fuente: Elaboración propia.

- c) **Estudio Geo mecánico - Bocamina 3:** La resistencia a la compresión del macizo rocoso es media otorgándole una ponderación de 7, el índice de calidad de la roca es de regular a mala por lo que se le dio una ponderación de 8, el espaciamiento de las juntas es de 0.10 m por lo que se obtuvo una ponderación de 8, la condición de las juntas tuvo una ponderación de 10, al ser la condición húmeda de la bocamina se le dio una ponderación de 10, el RMR inicial es de 43.

Por la orientación de las juntas al ser desfavorable al de la bocamina recibió una ponderación de 10 por lo que el RMR corregido es de 33 indicando que es una roca mala por lo que se necesitará sostenimiento con pernos en los hastiales acompañado de hormigón proyectado y cimbras metálicas La Q de Barton está categorizada en muy pobre. (Ver tabla 18).

Tabla 18

Parámetros geo mecánicos de la bocamina 3

Bocamina 3		Zona 2
Roca intacta		
Roca	Cuarcita	
Peso específico (KN/m ³)	25	
Módulo de elasticidad (MPa)	27000	
Relación de Poisson	0.25	
Profundidad de cimentación (m)	0.5	
Macizo Rocoso		
Barton		
Q	0.295	
Bieniawski		
UCS (MPa)	7	85
RQD	8	43%
Espaciamiento de juntas	8	0.1 m
Condiciones de juntas	10	
Agua subterránea	10	húmedo
RMR	43	
Orientación de juntas	10	desfavorable
RMR (CORREGIDO)	33	

Fuente: Elaboración propia.

- d) Estudio Geo mecánico - Bocamina 4:** La resistencia a la compresión del macizo rocoso es media a alta otorgándole una ponderación de 12, el índice de calidad de la roca es de regular a malo por lo que se le dio una ponderación de 8, el espaciamiento de las juntas es de 0.05 m por lo que se obtuvo una ponderación de 5, la condición de las juntas tuvo una ponderación de 10, al ser la condición húmeda de la bocamina se

le dio una ponderación de 10, el RMR inicial es de 45. Por la orientación de las juntas al ser desfavorable al de la bocamina recibió una ponderación de 10 por lo que el RMR corregido es de 35 indicando que es una roca mala por lo que se necesitará sostenimiento con pernos en los hastiales acompañado de hormigón proyectado y cimbras metálicas. La Q de Barton está categorizada en muy pobre. **(Ver tabla 19).**

Tabla 19

Parámetros geo mecánicos de la bocamina 4

Bocamina 4		Zona 2
Roca intacta		
Roca	Filita	
Peso específico (KN/m ³)	27	
Módulo de elasticidad (MPa)	53000	
Relación de Poisson	0.25	
Profundidad de cimentación (m)	0.5	
Macizo Rocoso		
Barton		
Q	0.368	
Bieniawski		
UCS (MPa)	12	165
RQD (%)	8	32%
Espaciamiento de juntas (m)	5	0.05
Condiciones de juntas	10	
Agua subterránea	15	seco
RMR	50	
Orientación de juntas	10	desfavorable
RMR (CORREGIDO)	40	

Fuente: Elaboración propia.

- e) **Estudio Geo mecánico - Bocamina 5:** La resistencia a la compresión del macizo rocoso es media a alta otorgándole una ponderación de 12, el índice de calidad de la roca es de regular a malo por lo que se le dio una ponderación de 8, el espaciamiento de las juntas es de 0.10 m por lo que se obtuvo una ponderación de 8,

la condición de las juntas tuvo una ponderación de 10, al ser la condición seca de la bocamina se le dio una ponderación de 15, el RMR inicial es de 53. Por la orientación de las juntas al ser desfavorable al de la bocamina recibió una ponderación de 10 por lo que el RMR corregido es de 43 indicando que es una roca regular por lo que se necesitará sostenimiento con pernos en los hastiales acompañado de hormigón proyectado no es necesario el empleo de cimbras metálicas. La Q de Barton está categorizada en muy pobre. (Ver tabla 20).

Tabla 20

Parámetros geo mecánicos de la bocamina 5

Bocamina 5	Zona 3	
Roca intacta		
Roca	Cuarcita	
Peso específico (KN/m ³)	26	
Módulo de elasticidad (MPa)	41000	
Relación de Poisson	0.25	
Profundidad de cimentación (m)	0.5	
Macizo Rocoso		
Barton		
Q	0.895	
Bieniawski		
UCS (MPa)	12	130
RQD (%)	8	33%
Espaciamiento de juntas (m)	8	0.1
Condiciones de juntas	10	
Agua subterránea	15	seco
RMR	53	
Orientación de juntas	10	Desfavorable
RMR (CORREGIDO)	43	

Fuente: Elaboración propia.

Se muestran los resultados de la evaluación del parámetro de la masa rocosa, así como su respectiva interpretación.

- a) **Análisis del Índice Geológico de Resistencia - Bocamina 1:** El índice geológico de resistencia es bajo con un valor 30 producto de la relación entre las condiciones de las discontinuidades que fueron categorizadas como malas y la estructura del macizo rocoso que es fracturado; respecto a la estimación de los parámetros del macizo rocoso, el valor del m_i se tomó de la figura 15, que depende del tipo y textura de la roca, como se muestra es un valor característico que se le impone a la andesita por lo que se le dio el valor de 19, al tener un índice geológico de resistencia bajo el m_b nos dará un valor de 1.56, respecto a las constantes a y s como el índice geológico de resistencia es mayor a 25 presenta valores de 0.00042 y 0.5. **(Ver tabla 21).**

Tabla 21

Parámetros de la masa rocosa de la bocamina 1

Parámetros de la masa rocosa	Ponderación
GSI	30
m_i	19
m_b	1.56
s	0.00042
a	0.5

Fuente: Elaboración propia.

- b) **Análisis del Índice Geológico de Resistencia - Bocamina 2:** El índice geológico de resistencia tiene un valor de 27 producto de la relación entre las condiciones de las discontinuidades que fueron designadas como malas y la estructura del macizo rocoso que es fracturado; respecto a la estimación de los parámetros del macizo rocoso, el valor del m_i se tomó de la figura 15, como se muestra es un valor característico que

se le impone a la filita por lo que se le dio el valor de 10, al tener un índice geológico de resistencia bajo el mb nos dará un valor de 0.74, respecto a las constantes a y s como el índice geológico de resistencia es mayor a 25 presenta valores de 0.00030 y 0.5. (Ver tabla 22).

Tabla 22

Parámetros de la masa rocosa de la bocamina 2

Parámetros de la masa rocosa	Ponderación
GSI	27
mi	10
mb	0.74
s	0.00030
a	0.5

Fuente: Elaboración propia.

- c) **Análisis del Índice Geológico de Resistencia – Bocamina 3:** El índice geológico de resistencia es de 27 producto de la concordancia entre las condiciones de las discontinuidades que fueron evaluadas como malas y la estructura del macizo rocoso que es fracturado; respecto a la estimación de los parámetros del macizo rocoso, el valor del mi se tomó de la figura 15, como se muestra es un valor característico que se le impone a la cuarcita por lo que se le dio el valor de 24, al tener un índice geológico de resistencia bajo el mb nos dará un valor de 2.19, respecto a las constantes a y s como el índice geológico de resistencia es mayor a 25 presenta valores de 0.00058 y 0.5. (Ver tabla 23).

Tabla 23

Parámetros de la masa rocosa de la bocamina 3

Parámetros de la masa rocosa	Ponderación
GSI	33
mi	24
mb	2.19
s	0.00058
a	0.5

Fuente: Elaboración propia.

- d) Análisis del Índice Geológico de Resistencia – Bocamina 4:** Se muestra un índice geológico de resistencia bajo de valor 26 producto de la relación entre las condiciones de las discontinuidades que fueron categorizadas como malas y la estructura del macizo rocoso que es fracturado; respecto a la estimación de los parámetros del macizo rocoso, el valor del mi se tomó de la figura 15, como se muestra es un valor característico que se le impone a la filita por lo que se le dio el valor de 10, al tener un índice geológico de resistencia bajo el mb nos dará un valor de 0.71, respecto a las constantes a y s como el índice geológico de resistencia es mayor a 25 presenta valores de 0.00027 y 0.5. **(Ver tabla 24).**

Tabla 24

Parámetros de la masa rocosa de la bocamina 4

Parámetros de la masa rocosa	Ponderación
GSI	26
mi	10
mb	0.71
s	0.00027
a	0.5

Fuente: Elaboración propia.

- e) **Análisis del Índice Geológico de Resistencia – Bocamina 5:** El índice geológico de resistencia bajo de valor 26 producto de la relación entre las condiciones de las discontinuidades que fueron designadas como malas y la estructura del macizo rocoso que es fracturado; respecto a la estimación de los parámetros del macizo rocoso se el valor del m_i se tomó de la figura 15, que depende del tipo y textura de la roca como se muestra es un valor característico que se le impone a la cuarcita por lo que se le dio el valor de 24, al tener un índice geológico de resistencia bajo el m_b nos dará un valor de 1.71, respecto a las constantes a y s como el índice geológico de resistencia es mayor a 25 presenta valores de 0.00027 y 0.5. (Ver tabla 25).

Tabla 25

Parámetros de la masa rocosa de la bocamina 5

Parámetros de la masa rocosa	Ponderación
GSI	26
m_i	24
m_b	1.71
s	0.00027
a	0.5

Fuente: Elaboración propia.

Se muestra el módulo de deformación, los esfuerzos, los parámetros de resistencia cortante para cada una de las bocaminas estudiadas.

- a) **Evaluación de Parámetros de Deformación y Resistencia – Bocamina 1:** El esfuerzo mayor se obtuvo de la aplicación de la ecuación 15 en la que se aplicaron las constantes de la masa rocosa (m_b , s , a) teniendo un esfuerzo principal mayor (σ_1) de 2.661. Respecto a la constante k se le colocó un valor de 1 por lo que se trata de un macizo no está en buenas condiciones y se le puede considerar fracturado. Los parámetros de resistencia cortante fueron hallados en la tabla 9 basándose en el RMR del macizo rocoso mediante una interpolación por lo que se considera una adherencia

de partículas 189.4 KPa y un ángulo de fricción de 23.94° que en este caso vendría a ser la máxima pendiente para la andesita. La capacidad admisible que proviene de la relación entre la resistencia a la compresión que asume la roca y el parámetro s ajustándola con un factor de seguridad de 3, teniendo una resistencia de soportar esfuerzos de 8.87 kg/cm². (Ver tabla 26).

Tabla 26

Deformaciones, esfuerzos, resistencia cortante y capacidad admisible de Bocamina 1

Módulo de deformación		
Según Serafín Pereira	5011.9	MPa
Esfuerzos in-situ		
Esfuerzo Vertical	0.013	MPa
Esfuerzo Horizontal	0.013	MPa
Esfuerzo principal menor	0.013	MPa
Esfuerzo principal mayor	2.661	MPa
K	1	
Parámetros de resistencia cortante		
Cohesión	189.473684	KPa
Angulo de fricción interna	23.9473684	°
Capacidad admisible		
Según Hoek (Soporte última)	26.609	Kg/cm ²
Capacidad asumida	8.870	Kg/cm ²
Resistencia a la compresión del concreto	210	Kg/cm ²

Fuente: Elaboración propia.

- b) Evaluación de Parámetros de Deformación y Resistencia – Bocamina 2:** El esfuerzo mayor se obtuvo empleando las constantes de la masa rocosa (m_b , s , a) teniendo un esfuerzo principal mayor (σ_1) de 3.465. Respecto a la constante k se le colocó un valor de 1 por lo que se trata de un macizo no está en buenas condiciones y se le puede considerar fracturado. Los parámetros de resistencia cortante fueron hallados en la tabla 9 basándose en el RMR (Rock Mass Rating) del macizo rocoso

mediante una interpolación de datos por lo que se considera una adherencia de partículas 173.68 KPa y un ángulo de fricción de 22.36° que en este caso vendría a ser la máxima pendiente para la filita. La capacidad admisible que proviene de la relación entre la resistencia a la compresión que asume la roca y el parámetro s ajustándola con un factor de seguridad de 3, teniendo una resistencia de soportar esfuerzos de 11.55 kg/cm². (Ver tabla 27).

Tabla 27

Deformaciones, esfuerzos, resistencia cortante y capacidad admisible de Bocamina 2

Módulo de deformación		
Según serafín Pereira	4217.0	MPa
Esfuerzos in-situ		
Esfuerzo Vertical	0.012	MPa
Esfuerzo Horizontal	0.012	MPa
Esfuerzo principal menor	0.012	MPa
Esfuerzo principal mayor	3.465	MPa
k	1	
Parámetros de resistencia cortante		
Cohesión	173.6842105	KPa
Angulo de fricción interna	22.36842105	°
Capacidad admisible		
Según Hoek (Soporte última)	34.652	Kg/cm ²
Capacidad asumida	11.551	Kg/cm ²
Resistencia a la compresión del concreto	210	Kg/cm ²

Fuente: Elaboración propia.

- c) **Evaluación de Parámetros de Deformación y Resistencia – Bocamina 3:** El esfuerzo mayor se calculó empleando las constantes de la masa rocosa (m_b , s , a) teniendo un esfuerzo principal mayor (σ_1) de 2.055. Respecto a la constante k se le colocó un valor de 1 por lo que se trata de un macizo no está en buenas condiciones y se le puede considerar fracturado. Los parámetros de resistencia cortante fueron hallados en la tabla 9 basándose en el RMR del macizo rocoso mediante una

interpolación de datos por lo que se considera una adherencia de partículas 163.15 KPa y un ángulo de fricción de 21.32° que en este caso vendría a ser la máxima pendiente para la cuarcita. La capacidad admisible que proviene de la relación entre la resistencia a la compresión que asume la roca y el parámetro s ajustándola con un factor de seguridad (FS) de 3, teniendo una resistencia de soportar esfuerzos de 6.85 kg/cm². (Ver tabla 28).

Tabla 28

Deformaciones, esfuerzos, resistencia cortante y capacidad admisible de Bocamina 3

Módulo de deformación		
Según Serafín Pereira	3465.0	MPa
Esfuerzos in-situ		
Esfuerzo Vertical	0.012	MPa
Esfuerzo Horizontal	0.012	MPa
Esfuerzo principal menor	0.012	MPa
Esfuerzo principal mayor	2.055	MPa
k	1	
Parámetros de resistencia cortante		
Cohesión	163.157895	KPa
Angulo de fricción interna	21.3157895	°
Capacidad admisible		
Según Hoek (Soporte última)	20.553	Kg/cm ²
Capacidad asumida	6.851	Kg/cm ²
Resistencia a la compresión del concreto	210	Kg/cm ²

Fuente: Elaboración propia.

- d) **Evaluación de Parámetros de Deformación y Resistencia – Bocamina 4:** El esfuerzo mayor se calculó al emplear las constantes de la masa rocosa (m_b , s , a) teniendo un esfuerzo principal mayor (σ_1) de 2.704. Respecto a la constante k se le colocó un valor de 1 por lo que se trata de un macizo no está en buenas condiciones y se le puede considerar fracturado. Los parámetros de resistencia cortante fueron hallados en la tabla 9 basándose en el RMR del macizo rocoso mediante una

interpolación de datos por lo que se considera una adherencia de partículas 173.68 KPa y un ángulo de fricción de 22.36° que en este caso vendría a ser la máxima pendiente para la filita. La capacidad admisible que proviene de la relación entre la resistencia a la compresión que asume la roca y el parámetro s de la masa rocosa ajustándola con un factor de seguridad de 3, teniendo una resistencia de soportar esfuerzos de 9.01 kg/cm². (Ver tabla 29).

Tabla 29

Deformaciones, esfuerzos, resistencia cortante y capacidad admisible de Bocamina 4

Módulo de deformación		
Según serafín Pereira	4217.0	MPa
Esfuerzos in-situ		
Esfuerzo Vertical	0.013	MPa
Esfuerzo Horizontal	0.013	MPa
Esfuerzo principal menor	0.013	MPa
Esfuerzo principal mayor	2.704	MPa
k	1	
Parámetros de resistencia cortante		
Cohesión	173.684211	KPa
Angulo de fricción interna	22.3684211	°
Capacidad admisible		
Según Hoek (Soporte última)	27.043	Kg/cm ²
Capacidad asumida	9.014	Kg/cm ²
Resistencia a la compresión del concreto	210	Kg/cm ²

Fuente: Elaboración propia.

- e) **Evaluación de Parámetros de Deformación y Resistencia – Bocamina 5:** El esfuerzo mayor se halló aplicando las constantes de la masa rocosa (m_b , s , a) teniendo un esfuerzo principal mayor (σ_1) de 2.131. Respecto a la constante k se le colocó un valor de 1 por lo que se trata de un macizo no está en buenas condiciones y se le puede considerar fracturado. Los parámetros de resistencia cortante fueron hallados en la tabla 9 basándose en el RMR del macizo rocoso mediante una interpolación de

datos por lo que se considera una adherencia de partículas 210.52 KPa y un ángulo de fricción de 26.05° que en este caso vendría a ser la máxima pendiente para la cuarcita. La capacidad admisible que proviene de la relación entre la resistencia a la compresión que asume la roca y el parámetro s de la masa rocosa ajustándola con un factor de seguridad de 3 según la normativa de la Asociación Americana de diseño y construcción (AASHTO), teniendo una resistencia de soportar esfuerzos de 7.10 kg/cm². (Ver tabla 30).

Tabla 30

Deformaciones, esfuerzos, resistencia cortante y capacidad admisible de Bocamina 5

Módulo de deformación		
Según Serafín Pereira	6683.4	MPA
Esfuerzos in-situ		
Esfuerzo Vertical	0.013	MPA
Esfuerzo Horizontal	0.013	MPA
Esfuerzo principal menor	0.013	MPA
Esfuerzo principal mayor	2.131	MPA
k	1	
Parámetros de resistencia cortante		
Cohesión	210.526316	KPa
Angulo de fricción interna	26.0526316	°
Capacidad admisible		
Según Hoek (Soporte última)	21.306	Kg/cm ²
Capacidad asumida	7.102	Kg/cm ²
Resistencia a la compresión del concreto	210	Kg/cm ²

Fuente: Elaboración propia.

4.5.2. Indicadores para diseño de tapón

Para el diseño de tapón para cada bocamina se tiene que conocer el tipo de roca, el peso específico, realizar un análisis geo mecánico para evaluar esfuerzos, calidad de la roca, condición de la roca, la presencia de agua en la zona para determinar si es necesario el drenaje.

Después es importante conocer las dimensiones de la bocamina, para así saber cuáles debe ser las dimensiones del tapón. Además del método a aplicar para el cierre de bocamina.

4.5.3. Diseño estructural del tapón

Las bocaminas evaluadas en el proyecto, son estructuras temporales, que tiene como objetivo de construcción actividades de extracción, transporte de mineral y desmonte de las labores.

Para el cierre de labores se ha evaluado colocar tapones localizados en la parte de ingreso de las bocaminas, su función se imposibilitar el ingreso de personas, animales, drenar filtraciones de líquidos, por lo que se han diseñado dos tipos de tapones; de concreto armado con drenaje y de concreto sin drenaje.

4.5.4. Condiciones Estructurales

El diseño de los tapones está basado según la guía para el diseño de tapones del Ministerio de energía y Minas.

Temas a considerar para el diseño fueron los siguientes:

- Tapones ubicados en los portales de las bocaminas
- Carga hidráulica
- Calidad de la roca

Se toma en cuenta que el drenaje saldrá por las bocaminas inferiores al tener mayor drenaje que las superiores. El agua que viene de la mina será contenida por el tapón, inundando las partes con mayor profundidad de la galería.

Con respecto a la calidad de la roca en caso presente un índice de calidad y RMR de tipo III, IV o V, se considera inyecciones que permitan consolidar, con el objetivo de que las discontinuidades sean rellenadas de una manera correcta, para aumentar la gradiente hidráulica.

Finalmente, inyecciones de contacto para facilitar el fraguado del concreto y así permitir la consolidación del tapón.

4.5.5. *Parámetros de Diseño*

Para el diseño de tapones se ha usado los valores empíricos de resistencia al corte del macizo rocoso y la gradiente hidráulica indicada en la guía de diseño de tapones (**Ver Tabla 31**).

Tabla 31

Clase	Calidad	RMR	Corte Admisible (KPa)	Gradiente Hidráulico (m/m)
I	Muy buena	81-100	500	15-30
II	Buena	61-80	300	10-14
III	Regular	41-60	200	7-9
IV	Mala	21-40	100	5-6
V	Muy mala	0-20	50	3-4

Parámetros según corte admisible y gradiente hidráulica

Fuente: MINEM (2007). Guía para el diseño de tapones para el cierre de labores mineras.

En la guía de diseño de para tapones indica que se debe tomar por lo menos un factor de seguridad de 3 ya que dicho valor sería el valor mínimo que debería tener el diseño y que además la gradiente hidráulica aumentará si es que se le aplica inyección al concreto. (**Ver tabla 32**). Además, para los parámetros de diseño se tomó en cuenta lo siguiente:

- Ancho, altura, área y perímetro de las bocaminas
- Presión hidrostática
- Resistencia a la compresión del concreto
- Cobertura de Roca
- Inclinación
- Peso específico de los materiales

Tabla 32

Parámetros de diseño de tapón

Bocamina	Ancho (m)	Altura (m)	Área (m)	Perímetro (m)	Densidad (kg/m ³)	Cortante (kPa)	FS
1	2	3.2	6.4	10.4	1000	100	3
2	2.6	2.3	5.98	10	1000	100	3
3	2	2	4	8.4		100	3
4	2	2.7	5.4	9.4	1000	100	3
5	2	1.8	3.6	7.6		200	3

Fuente: Elaboración propia.

4.5.74.5.7. Estabilidad de los Tapones

En la Tabla 33 se puede apreciar los cálculos realizados para encontrar el cálculo de la viga gruesa que consistió en la carga (w), el momento de flexión (M_u), la resistencia permisible a tensión y flexión (f_t) además de la resistencia a la compresión del concreto (f'_c) y el peso unitario (b) factor por lo cual en el cálculo de la longitud del tapón no se toma en cuenta debido a que no aplica para dicho diseño debido a que no se muestran estructuras de soporte para vigas.

Tabla 33

Resultados de la longitud del tapón según viga gruesa

Bocamina	w	M_u	b	f'_c	f_t	Viga Gruesa
1	219.74	1352.27	2400	21	1.90	1.33
2	164.81	1714.00	2400	21	1.90	1.50
4	206.01	1267.75	2400	21	1.90	1.29

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 34 se puede apreciar los cálculos realizados para encontrar el del ariete hidráulico que se basó en cargas dinámicas (sismos) que muestra la velocidad acústica del agua que ya es un parámetro definido de 1437 m/s, la aceleración que proviene de estudios de ondas sísmicas realizadas que permitieron la subida de la presión hidráulica que se le adiciona a la carga estática; teniendo una relación con la gradiente hidráulica hallada según la calidad de la roca como se muestra en la ecuación 24, dándonos el parámetro de longitud para el diseño del tapón con drenaje que es unos centímetros más a la longitud de la bocamina.

Tabla 34

Resultados de la longitud del tapón según ariete hidráulico

Bocamina	c (m/seg)	a (m/seg ²)	v (m/s)	Densidad (kg/m ³)	PH (KPa)	Subida de H	h (m)	RMR	Gradiente (m/m)	Longitud de tapón
1	1437	0.12	0.03	1000	43110	4.4	16	38	6	3.4
2	1437	0.12	0.03	1000	43110	4.4	12	35	6	2.7
4	1437	0.12	0.03	1000	43110	4.4	15	35	6	3.2

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 35 se puede apreciar los cálculos realizados para la encontrar la cobertura de la roca según el método noruego que se basa en la altura de la roca sobre el túnel, altura del túnel sobre la roca además de la densidad de la roca y el suelo; y el método normal que tiene una inclinación de 30° de acuerdo a la inclinación del talud H2:1V considerando un factor de seguridad de 1.3 según la guía de diseño de taponos del ministerio de energía y minas debido a levantamientos sobre planos horizontales.

Tabla 35

Falla por levantamiento hidráulico

Bocamina	Altura (m)	Inclinación Cobertura	Cos30°	Densidad MN/m ³	Cobertura	
					Noruego	Normal
1	3.2	30	0.87	0.027	0.60	1
2	2.3	30	0.87	0.025	0.60	1
4	2.7	30	0.87	0.027	0.60	1

Fuente: Elaboración propia.

4.5.8. Resumen de dimensiones del tapón:

En base a los criterios mencionados anteriormente se han diseñado los tapones para las bocaminas, indicando la longitud de diseño final tomando en cuenta la falla de corte y el ariete hidráulico sin tener en cuenta la viga gruesa debido a que el tapón solo será una losa que no necesita refuerzo apoyada en cuatro lados y no dispone de estructuras de soporte según los estándares del CSA “Diseño de estructura de concreto para edificaciones”. (Ver tabla 36).

Tabla 36

Longitud de diseño

Longitud de diseño por (m)				Verificación x Grad. Hidráulica		Grad. Hidra. Adm.
Corte	Ariete	Viga Gruesa	Elegido	H (m)	H/L (m/m)	(m/m)
0.97	3.4	1.33	4	16	4	6
0.73	2.7	1.50	3	12	4	6
0.85	3.2	1.29	4	15	4	6

Fuente: Elaboración propia.

4.5.9. Descripción de obras

- a) **Excavación de la cimentación:** Se realizará con una profundidad aproximadamente de 0.5 m para cada bocamina con el objetivo de mejorar el contacto de la roca y material aplicado que será el concreto.
- b) **Inyecciones de consolidación:** La introducción de la mezcla que está hecha en base de agua y cemento en el macizo. (Technology, 2010); con el objetivo de aumentar la gradiente hidráulica y reducir la longitud del tapón, se inyecta la mezcla en contacto directo aproximado hacia el tapón.

En la tabla 37 se aprecia la dosificación de inyecciones que consiste en cinco etapas teniendo dos etapas de mortero para envolver completamente la estructura dando

resultado a una superficie lisa que no presente porosidades y tres etapas de lechado con la finalidad de obtener una adecuada resistencia y durabilidad. Es importante la mezcla de agua y cemento debido a que se forma una pasta la cual al tener una determinada dureza actúa como aglomerante manteniendo compacto todo el agregado, es decir una correcta adherencia del material al tapón, para una resistencia la concreto de 210 kg/cm^2 obtenida del ensayo de CESEL INGENIEROS.

Tabla 37

Dosificación de inyecciones

Componente	Mortero 1	Mortero 2	Lechada 3	Lechada 4	Lechada 5
Arena	38%	50%			
Cemento	36.50%	25%	60%	50%	46%
Agua	25.50%	25%	40%	50%	54%

Fuente: MINEM (2007). Guía para el diseño de tapones para el cierre de labores mineras.

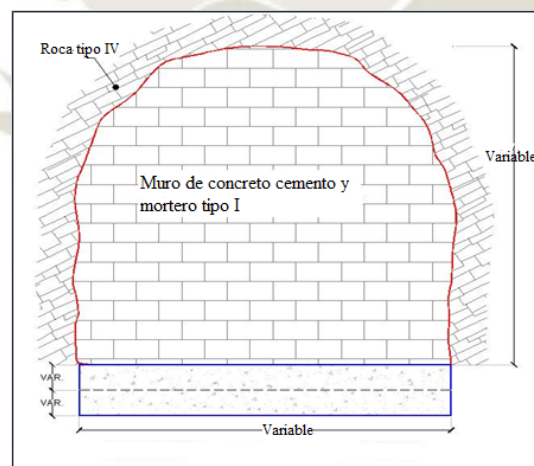
- c) **Equipo:** Se emplearán en las perforaciones equipos rotativos, para inyecciones, equipos que cumplan con los parámetros establecidos, para ello se necesita un mezclador, una bomba, medidores de presión y válvulas.
- d) **Perforaciones:** Se ejecutarán 16 perforaciones 8 en la parte de cimentación y 8 en el techo con taladros de 1.8 m y diámetro de 1.4 m.
- e) **Inyecciones en Relleno:** Sirven para lograr un contacto entre la roca y el concreto. Las perforaciones realizadas deben tener un espaciamiento de tres metros a medida que se pueda penetrar la roca con un mínimo de dieciocho centímetros y con barrenos de diámetro de treinta y cinco milímetros. Las inyecciones tienen una resistencia al concreto de 210 kg/cm^2 .

f) **El bloque de concreto:** El tapón debe tener entre 0.2 a 0.3 m del ancho del túnel por cuestiones de seguridad, resistencia al concreto de 210 kg/m^2 y resistencia a la fluencia de 400 MPa.

Los tapones de concreto sin drenaje son muros de bloques de concreto fabricado con mortero cemento y arena, es fijada en el ingreso de cada galería, no necesitan refuerzo de acero debido a que no hay presencia de presión hidrostática que pueda vencer la resistencia del concreto, en la que se realiza el diseño del tapón de las bocaminas que no necesitan drenaje, y de acuerdo al RMR de la primera bocamina se le dio una ponderación de roca tipo IV, siendo aplicado este tipo de tapón para una bocamina que no necesita drenaje y que solo requiere la aplicación de un mortero tipo I de arena y cemento, con dimensiones de 2 m de altura y una base de 2 m. (Ver **figura 26**).

Figura 26

Diseño de tapón de la bocamina 3

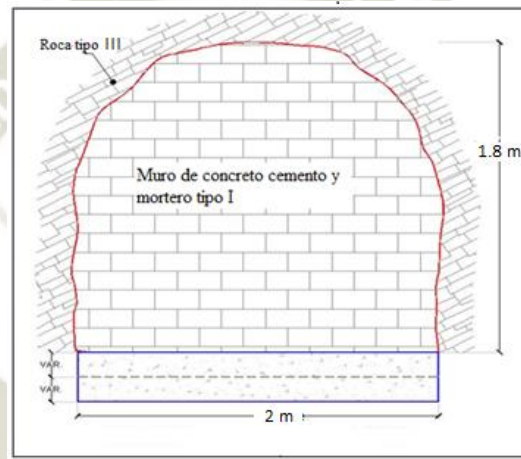


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 27 en la que se realiza el diseño del tapón de las bocaminas que no necesitan drenaje, y de acuerdo al RMR de la primera bocamina se le dio una ponderación de roca tipo III, siendo aplicado este tipo de tapón para una bocamina que no necesita drenaje y que solo necesita la aplicación de un mortero tipo I de arena y cemento, con dimensiones de 1.8 m de altura y una base de 2 m.

Figura 27

Diseño de tapón de la bocamina 5

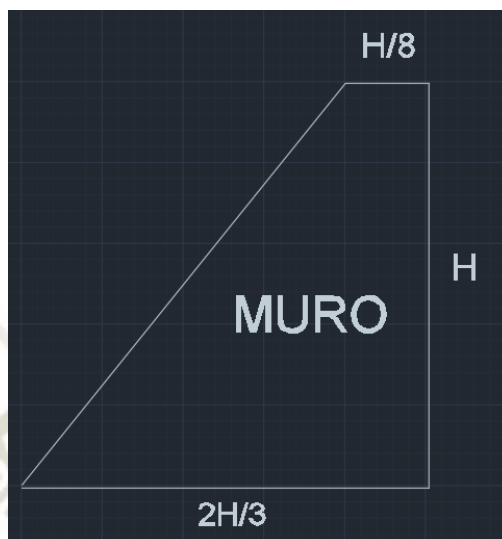


Fuente: Elaboración propia.

Para el diseño del muro hermético se consideró que es un tapón de seguridad para impedir el ingreso de personas y animales por lo que dependerá principalmente de su peso y se basará en sus dimensiones de acuerdo a como se muestra las siguientes relaciones referentes a la altura. **(Ver figura 28).**

Figura 28

Diseño para el muro hermético



Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 38 se muestran los resultados de se muestran los resultados de la estabilidad física desarrollada como se observó teniendo en cuenta la evaluación geo mecánica y el diseño de los tapones para las bocaminas 3 y 5 necesitan un cierre tipo III es decir que se empleará un tapón de concreto que no presenta drenaje y con su respectiva cobertura.

Tabla 38

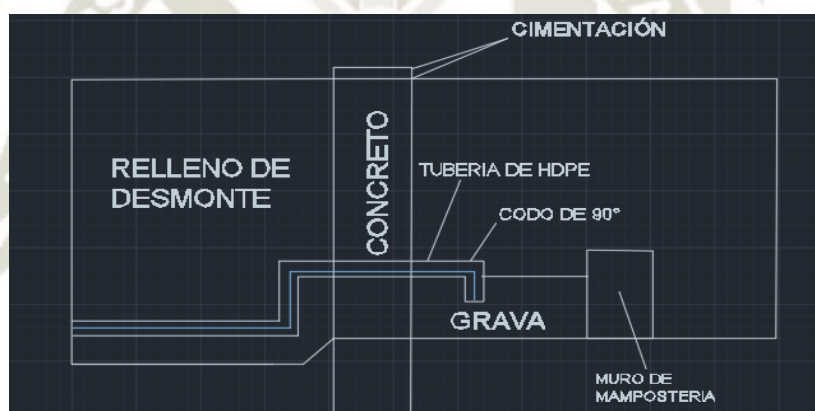
Resultados del diseño de tapón para bocaminas 3 y 5

Bocamina	Dimensión de la Bocamina		Tipo de tapón	Dimensión del tapón			Distancia al tapón de la superficie
	Altura (m)	Base (m)		Base mayor (m)	Base menor (m)	Altura (m)	
3	2	2	III	1.3	0.3	2	11
5	1.8	2	III	1.1	0.2	1.8	8

Fuente: Elaboración Propia.

Los tapones de concreto armado con drenaje, presentan una tubería HDPE (Polietileno de alta densidad) para el drenaje su interior liso para soportar la presión del agua y en la parte exterior corrugada ello para soportar cargas externas y reforzar la estructura; para evacuar los

fluidos que puedan estar presentes y así puedan cumplir con todos los parámetros geo mecánicos como la resistencia a la compresión, resistencia al corte, así como impermeabilidad. Al no presentar valores exactos del volumen de agua que es descargada de las bocaminas se analizó que en el plan de cierre de mina de la compañía se indicó que las tuberías con un diámetro de 4 pulgadas para las canchas de desmonte no eran suficientes para descargar el agua por lo que se empleará tuberías con un diámetro de 6 pulgadas, dicho diseño será empleado para las bocaminas 2, 3 y 4, colocando relleno de desmonte además de grava. (Ver Figura 29).

Figura 29*Diseño de tapón*

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 39 se muestran los resultados de la estabilidad física desarrollada como se observó teniendo en cuenta la evaluación geo mecánica y el diseño de los tapones para las bocaminas 1,2 y 4 necesitan un cierre tipo II es decir que se empleará un tapón de concreto con tubería de drenaje que presentará un diámetro de tubería de 6 pulgadas con una trampa mejorando lo requerido en el plan de cierre de mina, con relleno de desmonte y grava, teniendo cobertura la cual será especificada, y se aplicó dicho cierre debido a que los tapones tienen una longitud mayor a 2.5 metros, respecto al espesor debido a que las dimensiones de la bocamina

son superiores a los 2 metros se le da un espesor al tapón de 1 m por el método normal según la guía de tapones del ministerio de energía y minas.

Tabla 39

Resultados del diseño de tapón para bocaminas 1,2 y 4

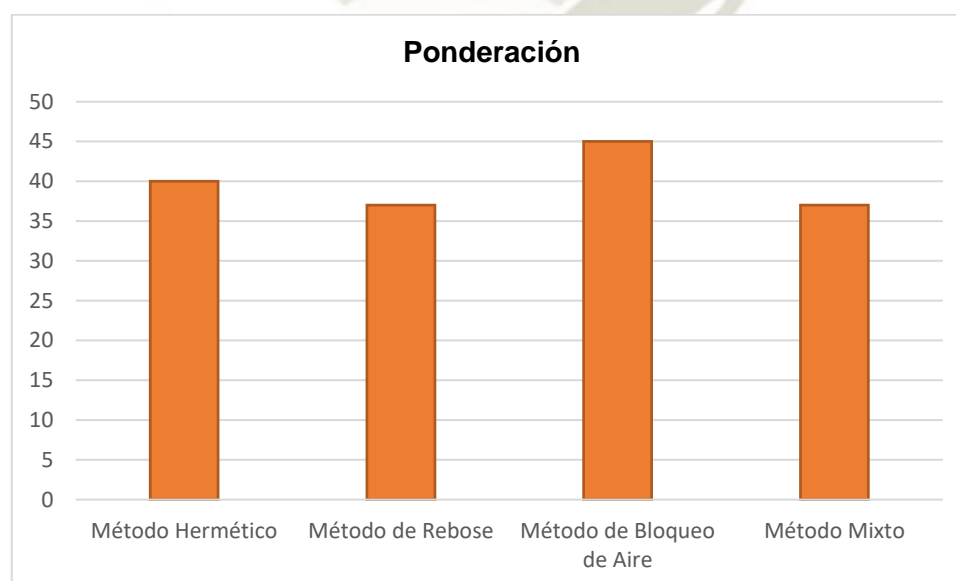
Bocamina	Dimensión de la Bocamina		Tipo de tapón	Dimensión del tapón			Diámetro de tubería (pulg)	Distancia al tapón de la superficie
	Altura (m)	Base (m)		Altura (m)	Base (m)	Espesor (m)		
1	3	2	II	4	2.3	1	6	16
2	2.3	2.6	II	3	2.9	1	6	12
4	2.7	2	II	4	2.3	1	6	15

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 30 se muestra que el método de cierre de bocamina más recomendado según parámetros de costo, construcción, garantía ambiental, tiempo de ejecución, riesgo de falla, impacto visual, aporte social, seguridad, garantía de perpetuidad es el de bloqueo de aire con una ponderación de 45; indicando que dicho método permite la salida de agua por medio de una tubería y evita el ingreso de aire. (MINEM, 2007).

Figura 30

Selección de método para el cierre de bocaminas



Fuente: Elaboración propia.

g) Descarga y transporte: El material al ser descargado de mezcladoras debe poseer consistencia, fácil manipulación y uniformidad en toda su estructura.

En el transporte se recomienda entregar de manera rápida debido a que la preparación e instalación no toma mucho tiempo para que está no pierda las características de la mezcla.

h) Preparación para aplicación de concreto: Primero los resultados de encofrado, refuerzo de las superficies que estarán con el concreto deben ser aprobadas, después se debe eliminar el agua que circule por las superficies sobre la que se aplicará, y verificar que en el tiempo de aplicación de la mezcla y el consolidado de la misma en la roca, no tenga contacto con agua. El concreto debe ser colocado impidiendo la separación de sus componentes, permitiéndose solo el transporte en carretillas; el concreto se debe colocar lo más próximo a su ubicación final, y lo que no se logre por medio de vibraciones, esta distribución se debe realizar evitando aplicar demasiada presión o chocar con el refuerzo.

i) Vibración: El concreto es consolidado mediante vibración, hasta ser lo más denso posible, de tal forma que no se generen grietas, además debe cubrir todo el material del encofrado, para lograr la consolidación ideal el vibrador debe estar sumergido sobre la mezcla. Se le puede añadir otra capa de concreto si es que el material anterior ya se encuentra consolidado.

j) Agujeros para el drenaje: Los agujeros a través del concreto pueden ser tuberías metálicas, plásticas o de concreto, en el caso los desfuegos de drenaje son tuberías de HDPE que presentan resina de polietileno de alta densidad y resistencia que van adheridas al tapón.

k) Encofrado: Se realiza teniendo mucho cuidado tomando como principal aspecto que el concreto ya esté endureciendo, para que este tome uniformemente los esfuerzos propios de su peso.

l) Curado: En el proceso de endurecimiento del concreto, este debe ser sometido a un proceso de curado que puede ser a largo plazo de acuerdo a las condiciones, por lo que es recomendable que tengan una duración de siete días después de culminar de aplicar la mezcla. El curado por medio de agua se debe realizar manteniendo húmedo el concreto de manera continua, cubriéndolo con algodón mojado, también con mangueras, rociadores. El curado por medio de membranas, consiste en colocar por toda la superficie para crear la membrana impermeable y que pueda retener el agua. El objetivo del curado permite tener una humedad y temperatura adecuada del concreto.

m) Limpieza: Al culminar el proyecto, se retiran todos los desechos presentes en el proyecto para que el lugar este limpio y adecuado.

4.6. Revegetación

Para la revegetación se tiene como principal objetivo que el sistema de cobertura sea el adecuado por lo que se debe seguir una serie de procedimientos para la aplicación de la cobertura vegetal.

Es necesario tener en cuenta las características de las bocaminas a revegetar. Se tiene en cuenta que la estabilidad del talud es de 2H: 1V es decir que corresponde a una inclinación entre 27° y 30°, es un punto de incertidumbre en la generación de drenaje ácido.

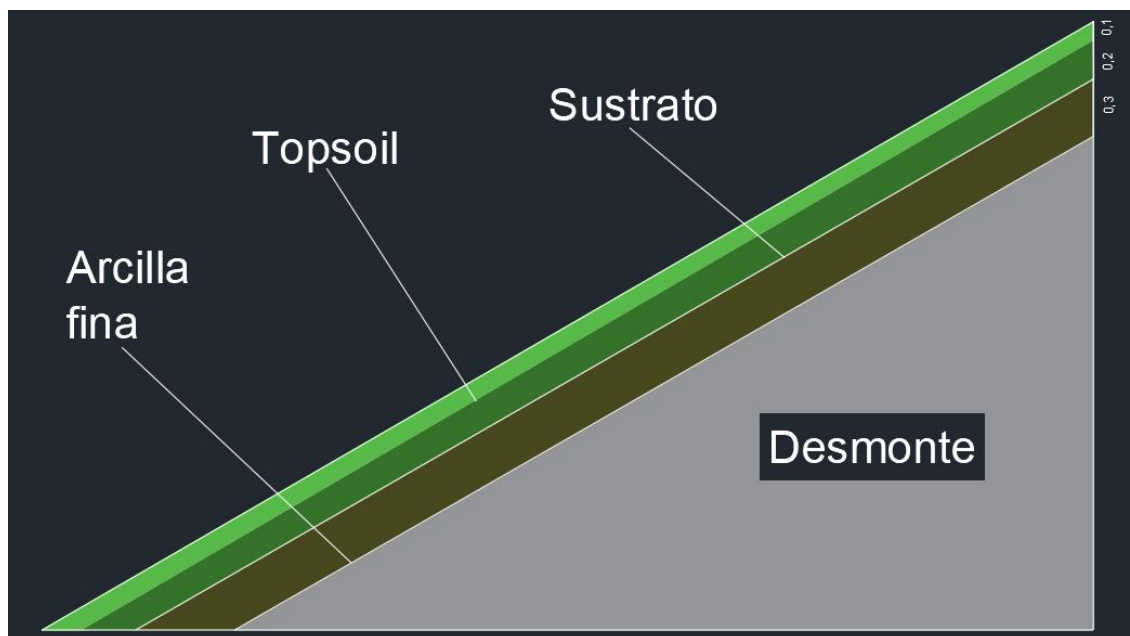
La unidad minera en encuentra en la zona de la Puna, por lo que normalmente la temperatura oscila entre los 0 a 6°C, los taludes son pronunciados por lo que presentan poca cobertura vegetal, a causa de las lluvias, por lo que las coberturas no deberían tener revegetación sino solo cumplir como drenaje para evitar infiltraciones, sin embargo, se utilizaran especies vegetales propias de dichas condiciones, colocando coberturas para luego revegetar.

Para la selección de especies se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Rápido crecimiento
- Se adecuen suelos con pocos nutrientes
- soporten heladas.

El topsoil que será el material orgánico empleado será el ichu que es propio de la puna y que se adecua a las temperaturas frías, El sustrato a emplear será el material morrénico que servirá como refuerzo al material orgánico y también servirá como impermeable dicho material está formado por arena y grava que deberá ser tamizada, El material impermeable será la arcilla fina cuya función será evitar la filtración de agua, tiene la descripción de material fino debido a que sus diámetros son menores a tres micras también deberá ser tamizada.

La cobertura adecuada será una capa de arcilla que es un material que no permite la filtración de agua con un espesor de 0.30 metros, así como otra capa de material morrénico que sirve de soporte con un espesor de 0.20 metros y por último una capa de material orgánico con un espesor de 0.10 metros como se aprecia a continuación. **(Ver figura 31).**

Figura 31*Cobertura para el cierre de bocaminas***Fuente:** Elaboración propia.

4.7. Evaluación de Impactos Ambientales

Teniendo en cuenta los posibles impactos por la producción del drenaje ácido se tiene la respectiva evaluación de dichos impactos aplicando la matriz del banco mundial.

Partiendo en que la pérdida de la cubierta vegetal, eliminación de comunidades biológicas, contaminación hídrica, modificación del paisaje por la actividad minera, Bajas concentraciones de metales y alteración del hábitat de la fauna que pueden presentar un daño severo. La disminución de la calidad del agua, daño al ser humano, adición de sulfatos en los suelos, variaciones del potencial de Hidrógeno que pueden presentar un daño moderado y creando conflictos en la población con un daño moderado; cabe resaltar que todos estos impactos se mostraran en caso no se tengan los debidos tratamientos para el drenaje ácido generado por la actividad minera.

Cabe resaltar que dicha matriz está proyectada en el supuesto caso que no se le dé el debido tratamiento al material de mina que es ligeramente ácido y mediante el método de bloqueo de aire debe ser neutralizado, siendo distribuida el impacto debido a factores de aire, agua, suelo, flora-fauna y social. (Ver tabla 40).

Tabla 40

Matriz de impactos de la zona Carabaya

IMPACTO AMBIENTAL	CRITERIOS							TOTAL
	CARÁCTER	PERTURBACIÓN	IMPORTANCIA	OCURRENCIA	EXTENSIÓN	DURACIÓN	REVERSIBILIDAD	
Generación de lluvias ácidas	-1	3	3	3	2	2	3	-16
Contaminación por metales pesados y metaloides al aire	-1	3	3	3	2	2	2	-15
Disminución de la calidad del agua	-1	3	3	3	2	2	1	-14
Contaminación hídrica	-1	3	3	3	3	2	2	-16
Pérdida de la cubierta vegetal por actividad minera	-1	3	3	3	2	3	3	-17
Incremento de la erosión	-1	3	3	3	2	2	1	-14
Adición de sales en el suelo (sulfatos)	-1	3	3	3	2	2	2	-15
Eliminación o alteración de comunidades biológicas	-1	3	3	3	2	3	3	-17
Modificación del paisaje por actividad minera	-1	3	3	3	3	3	3	-18
Altas concentraciones de metales en los tejidos de las plantas	-1	3	3	3	2	2	3	-16
Alteraciones al hábitat de la fauna	-1	3	3	3	2	2	3	-16
Daño elevado a la salud del ser humano	-1	3	3	3	2	2	2	-15
Conflictos entre la población y la compañía minera	-1	1	1	3	2	2	1	-10

Fuente: Elaboración propia.



4.8. Resultados del Monitoreo

4.8.1. Resultados del Monitoreo Físico

Se concluye que las bocaminas evaluadas se encuentran estables; ninguna de ellos presenta agrietamientos, filtraciones, asentamientos ni derrumbes; por lo que se concluye que por el momento no se requiere mantenimiento alguno.

4.8.2. Resultados del Monitoreo Geoquímico

Los resultados obtenidos en los monitoreos indican que se encuentran dentro del rango de los límites máximos permisibles indicados. Concluyendo que la zona está químicamente estable.

4.9. Propuesta Económica

Se considera los costos de remuneración del personal, el costo para el alquiler de una camioneta para realizar la parte de las supervisiones, así como para el traslado de materiales, insumos, combustible. (Ver tabla 41).

Tabla 41

Costos de Supervisión

Costo de la Supervisión				
Descripción	Cantidad	Costo (\$)	Parcial (\$)	Total (\$)
Mano de obra				
Ingeniero de obra	1	1400	1400	
Supervisor	1	1200	1200	
Inspector de seguridad	1	900	900	
Administrador	1	700	700	
Beneficios sociales			2200	
Alimentación	70	7.5	525	
				6925
Herramientas y equipos				
Camioneta	1	2500	2500	
Combustible	700	3.5	2450	
Herramientas y EPP	0.15	630	94.5	
				5044.5
				11969.5

Fuente: Elaboración propia.

- La tabla 42 los costos generados por el desarrollo de la estabilidad física y la revegetación de la zona donde están ubicadas las bocaminas.

Tabla 42

Propuesta económica

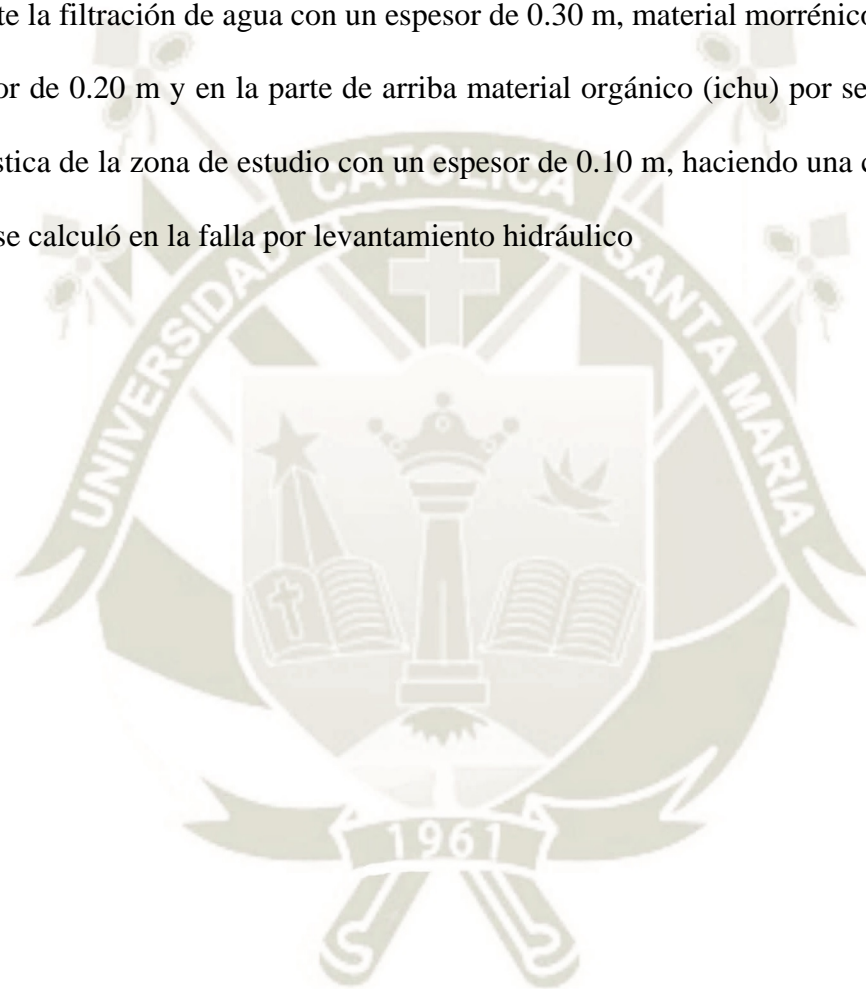
PROPUESTA ECONÓMICA						
Proyecto	Tapones en zona Carabaya					
Lugar	Carabaya-Puno					
	Descripción	Unidad	Metrado	P.unitario	Parcial	Subtotal
	Supervisión		2	13500.5	27001	27001
	Obras Preliminares					7800
	Movilización y Desmovilización		1	4000	4000	
	Trazo y replanteo topográfico		1	1200	1200	
	Instalación de la supervisión		1	2200	2200	
	Carteles y señales de seguridad		1	400	400	
	Tapón de concreto					26429.65
	Limpieza y apertura con maquinaria	m3	20	4.3	86	
	Desquinche	m2	4	3.7	14.8	
	Demolición de concreto	m3	9	38	342	
	Limpieza interior de mina	ml	14	19.3	270.2	
	Excavación	m3	18	75	1350	
	Muro de seguridad	m3	7.5	65	487.5	
	Desquinche de techo	m2	45	5.3	238.5	
	Instalación de sistemas de drenaje	ml	20	95	1900	
	Encofrado	m2	9.5	36.7	348.65	
	Concreto $f_c' = 210 \text{ kg/cm}^2$	m3	50	142	7100	
	Inyección de concreto	ml	50	96	4800	
	Bombeo de concreto	m3	50	96	4800	
	Relleno con material de desmonte	m3	75	24	1800	
	Relleno con material inerte	m3	35	75	2625	
	Revegetación	m2	30	8.9	267	
				Costo Directo (\$)		306153.25
	Gastos administrativos		10%			30615.325
	Utilidad		10%			30615.325
	Costo Total Sin IGV					367383.9

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Para el tratamiento de drenaje ácido y el respectivo cierre de bocamina, se empleó el método de bloqueo de aire que consiste en evitar el ingreso de oxígeno a la tubería mediante una trampa o codo; de tal manera se evitará la oxidación de los sulfuros, la generación del drenaje ácido y se logrará la reducción del contenido de metales, así como la neutralización del pH. Siendo comprobada según la Guía de Diseño de Tapones del Ministerio de Energía y Minas, por lo tanto, cumplirá con la hipótesis propuesta.
2. La zona de estudio está dividida en tres zonas, en las cuales se realizarán labores de cierre de las bocaminas localizándose las bocaminas 1 y 2 en la zona I en un talud rocoso de elevada pendiente cerca de la laguna Aciruni; las bocaminas 3 y 4 en la zona II sobre un talud de material glaciar y la bocamina 5 en la zona III sobre un talud de material glaciar.
3. El material de mina (desmonte) fue sometido a pruebas de laboratorio teniendo como potencial de hidrógeno el valor de 6.4, por lo que según los rangos del test ABA está en zona de incertidumbre, siendo el valor de neutralización 7. Aplicando el método de bloqueo de aire ya mencionado.
4. El diseño de los tapones de concreto está conectado a una tubería de drenaje que a la vez cumplirá la función de evitar el ingreso de aire se basó en estudios geo mecánicos, análisis de fallas para proponer la altura del tapón, el ancho será 0.3 metros más del ancho de la bocamina y el espesor será la relación entre la altura y ancho del tapón del tapón. Además, para el diseño del muro de seguridad la base mayor será los $\frac{2}{3}$ de la altura o el 67% y la base menor será $\frac{1}{8}$ de la altura o el 13%, dichos parámetros son evaluados según la guía de diseño de tapones y los estándares del CSA “Diseño de estructuras de concreto para edificaciones”.
5. El cierre progresivo de minas minimiza los impactos ambientales negativos relacionado a la unidad operativa disminuyendo los costos que se realizarán en el cierre final de todas las

operaciones en un aproximado del 30%. Según la matriz de impactos realizada es importante disminuir los pasivos ambientales por la salud, seguridad de personas, flora y fauna de la zona de Carabaya; así mismo la cobertura la cobertura está compuesta por tres capas; la arcilla que no permite la filtración de agua con un espesor de 0.30 m, material morrénico o sustrato con un espesor de 0.20 m y en la parte de arriba material orgánico (ichu) por ser especie vegetal característica de la zona de estudio con un espesor de 0.10 m, haciendo una cobertura de 0.60 m como se calculó en la falla por levantamiento hidráulico



RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que los titulares de las concesiones mineras en explotación realicen estudios de cierre, para que se pueda implementar proyectos de inversión respecto al cierre progresivo, conociendo las ventajas ambientales y de costos. Sirviendo como un medio de guía la presente investigación debido a que se brindan aportes, tanto para el tratamiento de posibles materiales que produzcan drenaje ácido y cierre de bocaminas.
2. Se deberá acondicionar el área de construcción de los tapones con un sistema adecuado de agua y ventilación.
3. Se recomienda conocer el caudal exacto de agua proveniente del interior de las bocaminas para así realizar un correcto análisis del diámetro de tubería necesario para el drenaje correspondiente, debido a que se realizó un cálculo basado en el Plan de Cierre de la mina en el que indica que las tuberías de 4 pulgadas son insuficientes para el caudal de agua emitido.
4. Al no necesitar monitoreo las bocaminas, de igual forma se recomienda realizar un monitoreo postcierre periódicamente por cuestiones de seguridad y ambiente, teniendo en cuenta en la estabilidad física el estado del concreto, el estado de la roca, presencia de agrietamientos y filtraciones. Respecto a la estabilidad química un pequeño análisis de los efluentes provenientes de la tubería en caso este siga evacuando agua del interior, teniendo en cuenta el caudal, temperatura, metales presentes y el potencial de hidrógeno, según el plan de cierre ello puede ser de forma trimestral o semestral.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Acosta, Valencia, Flores, & Rodriguez. (2011). *Memoria sobre la geología económica de la región Puno*. Puno.
- Aduvire, O. (2006). *Drenaje ácido de mina: Generación y tratamiento*. Madrid.
- AMIRA. (2002). *Proyect P387A Prediction & Kinetic Control of Acid Mine Drainage*.
- Bejarano, & Estacio. (2019). *Propuesta de tratamiento de drenes anóxico calizo conbinado con humedal en la mina Michiquillay*. Cajamarca.
- Belandría, N. (2016). *web del profesor*. Obtenido de web del profesor:
file:///C:/Users/MIPC/Downloads/Tema2-PROPIEDADES-MECANICASDELASROCAS.pdf
- Bermejo, J., & Llanos Rimarachin. (2019). *Evaluación del drenaje anóxico calizo, como técnica complementaria al cierre de bocamina de colquirrumi*. Cajamarca.
- Cadillo, E. (2018). *Propuesto de mejoramiento de la calidad de las aguas ácidas que drenan del pasivo ambiental de la mina nuncia mediante el uso de bacterias sulfato reductoras Ataquero-Carhuaz-Ancash*. Lima.
- Chura, L. (2013). *Diseño del cierre de pasivos ambientales de labores a menor costo y minimización de impactos de mina Ishihuinca Caravelí, Arequipa Perú*. Arequipa.
- Fidias, G. (2012). *El proyecto de investigación*. Caracas: Editorial Episteme.
- García, E. (2016). *Diseño de un sistema de tratamiento para el control de drenaje ácido dentro de una mina*. Ciudad de México.
- Grande, J. (2016). *Drenaje Ácido de Mina en la Faja Pirítica Ibérica: Técnicas de Estudio e Inventario de Explotaciones*. Huelva: Universidad de Huelva.
- Hoek, E. (2006). *Practical Rock Engineering*. Vancouver. Obtenido de Geotecnia fácil:
<http://geotecniafacil.com/formula-rqd-sondeos/>
- Huayhua Rojas, J. (2016). *Inpermeabilización mediante inyección de resina líquida poliuretano y construcción de un tapón de cierre*. Arequipa.
- Lapakko, Wessels, & Antonson. (1995). *Long term dissolution testing of mine wastes*.
- Lopez, H. (2011). *Tratamiento anaeróbico de aguas ácidas de mina con travertino y compost a escala de laboratorio*. Huancayo.
- Lottermoser, B. (2007). *Mine Wastes: Characterization, Treatment, Environmental Impacts*. New York.
- MINEM. (2007). *Guía para el diseño de tapones para el cierre de labores mineras*. Lima.
- Nordstrom , D., & Alpers , C. (2011). *Geochemistry of acid mine waters*. En: Plumlee, G.S. ,Logsdon, M.J. (eds), *The environmental geochemistry of mineral deposits. Economic*.

- Palma, G. (2018). *Evaluación del funcionamiento de un biorreactor pasivo utilizando bacterias sulfato-reductoras para el tratamiento de drenajes ácidos de mina*. Arequipa.
- Pérez, R. (2008). *Tratamientos de drenaje ácido de minas división el teniente- Codelco Chile*. Valparaíso.
- Pérez, Schwarz, & Urrutia. (2017). *Tratamiento del drenaje ácido de minas, estudio de reducción de sulfato en mezclas orgánicas*. Concepción.
- Rodriguez, B. (2000).
- Rodriguez, F. (2008).
- Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2007). *Metodología de la investigación*. Berlín: McGraw-Hill.
- Sanchez Castillo, & Sanchez Espinoza. (2018). *Desarrollo del sistema pasivo sustrato alcalino disperso (DAS) para el tratamiento de dreja ácido de mina*. Cajamarca.
- Sarmiento, M. (2007). *Estudio de la contaminación por drenajes ácidos de mina de las aguas superficiales en la cuenca del río Odiel (SO España)*. Huelva.
- Technology, G. (2010).
- Zambrano, & Calderón. (2020). *Tratamiento de drenaje ácido mediante columnas verticales de arena fina, caliza y biocarbón*. Azuay.
- Zeballos, J. (2016). *Estabilización del drenaje ácidode mina de la empresa Paraiso Perdido APATA*. Huancayo.
- Zevallos, L. (2010). *Plan de cierre de mina de la unidad de San Rafael Minsur*. Lima.

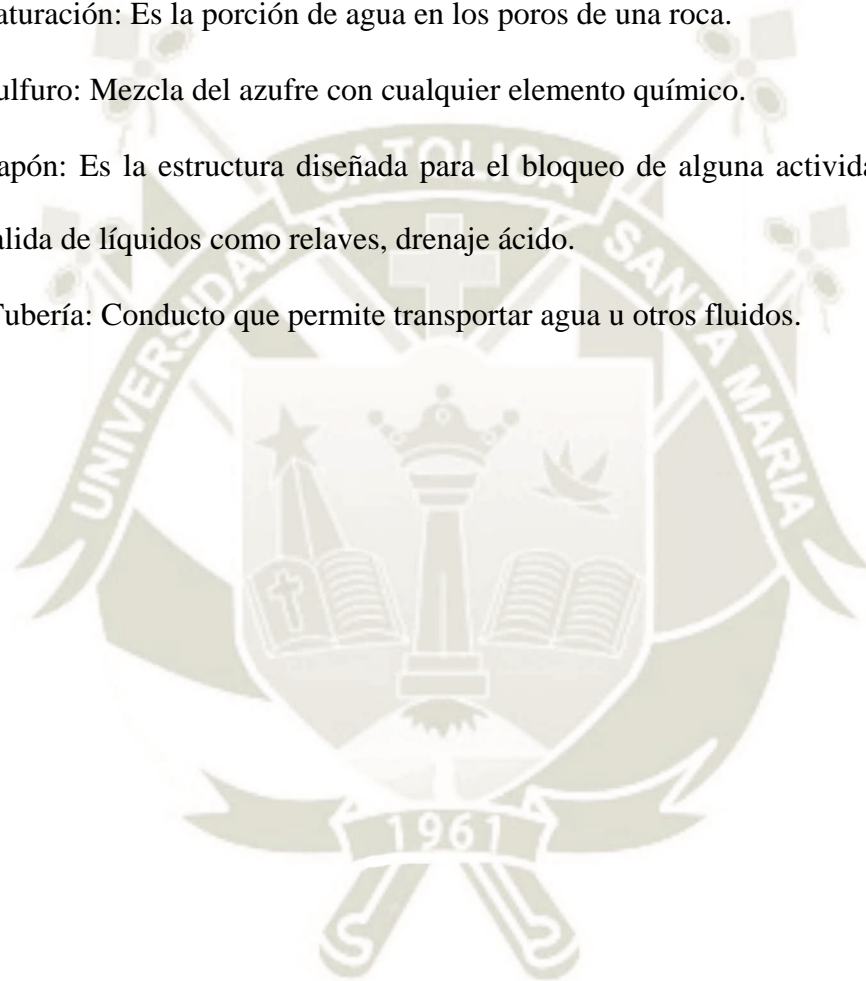
GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **Ángulo de Fricción:** Propiedad de materiales que sirve para encontrar la resistencia al deslizamiento.
- **Bocamina:** Es una labor horizontal que sirve para el ingreso a una mina subterránea, es el límite entre ambos espacios el exterior y el interior donde se efectúa la actividad minera para la explotación de minerales para beneficio económico, presenta dimensiones de largo y ancho la cual da facilidad al desarrollo de actividades.
- **Cierre de Mina:** Es la herramienta que permite identificar y cuantificar todos los impactos negativos generados en la etapa de cierre de la actividad minera, así como, definir medidas de acción presentes y futuras para prevenirlos, minimizarlos y/o mitigarlos y desarrollar un cronograma de ejecución de actividades para las medidas proyectadas, dando cumplimiento al marco legal ambiental para cierre.
- **Cimentación:** Es una estructura que tiene como objetivo transmitir cargas de forma que no supere la capacidad admisible.
- **Cohesión:** Es la relación entre partículas entre las fuerzas de las moléculas y el agua, la cohesión varía de acuerdo al contenido de humedad.
- **Concreto:** Es un material compuesto para la construcción, se le conoce como hormigón está formado por agua, aditivos y alquitrán.
- **Cobertura:** Capa de vegetación empleada para cubrir la superficie que ha sido sometida a actividad minera.

- Diaclasa: Fractura o junta que aparece en las rocas ocasionada por esfuerzos tectónicos y que presenta direcciones definidas a las cuales se le denomina sistemas de diaclasas.
- Discontinuidad: Es un plano de procedencia mecánica que separa los bloques de matriz rocosa en lo que se le denomina macizo rocoso.
- Drenaje ácido: Es una sustancia que presenta bajo PH que se da por causa de la oxidación y la lixiviación de rocas sulfurosas cuando están en contacto con oxígeno y agua.
- Esfuerzo: Es una magnitud física con unidades de fuerza sobre área específica.
- Estabilidad Física: Es el equilibrio mecánico libre de perturbaciones que afecten al cuerpo o estructura.
- Estabilidad Química: Es el equilibrio termodinámico libre de perturbaciones que afecten molecularmente a un cuerpo o estructura.
- Falla: Es una fractura con desplazamiento de un bloque rocoso con respecto a otro, colindante a éste o de ambos bloques, a través de un plano denominado plano de falla.
- Factor de Seguridad: Se define como la relación entre la resistencia del material y el esfuerzo admisible.
- Geo mecánica: Es el área que estudia propiedades mecánicas, hidráulicas y de ingeniería de la geología, estudia el suelo, rocas; para el diseño de sostenimiento de las mismas.
- Gradiente Hidráulica: Se le conoce como la pérdida de la altura hidráulica por unidad de longitud.
- Impacto Ambiental: Es el efecto que produce la actividad humana sobre el ambiente.

- Límites máximos Permisibles: Grado de concentración de elementos o sustancias que caracterizan a un efluente que al ser propasada es dañino para la salud y el medio ambiente.
- Macizo rocoso: Es un compuesto de una o varias rocas que presentan planos de estratificación, fallas, juntas, pliegues.
- Matriz Ambiental: Método aplicado para evaluar el grado que pueden causar los impactos ambientales.
- Matriz rocosa: Es un material compuesto por roca que no tiene discontinuidades.
- Mina: Excavación realizada para la extracción de un mineral.
- Monitoreo: Proceso de seguimiento o de control de un proyecto u obra.
- Neutralización: Es una reacción que se da entre un ácido y una base produciendo sal y agua, es decir mediante este proceso se evita el exceso de iones de hidrógeno.
- Nivel: Son intervalos regulares que permiten la separación entre 50 metros a más, a partir de varias galerías de acceso con diferente cota, a partir de rampas.
- Oxidación: Fenómeno por el cual un elemento o compuesto se une con el oxígeno, conocido también como la pérdida de electrones de una molécula.
- Pirita: Es un mineral sulfuro de hierro brillante.
- Potencial de Hidrógeno: Es un factor que indica el grado de concentración de iones de hidrógeno.
- Relleno: Material que sirve para cubrir los espacios huecos o vacíos con material inerte u desmonte.
- Revegetación: Actividad que consiste en restaurar la zona afectada por la actividad minera.

- Riesgo Ambiental: Probabilidad de que se puede causar un daño que afecte al ambiente.
- Roca intacta: Es un bloque que se ubica entre las discontinuidades y se puede utilizar una muestra de ello para evaluaciones de laboratorio.
- Saturación: Es la porción de agua en los poros de una roca.
- Sulfuro: Mezcla del azufre con cualquier elemento químico.
- Tapón: Es la estructura diseñada para el bloqueo de alguna actividad impidiendo la salida de líquidos como relaves, drenaje ácido.
- Tubería: Conducto que permite transportar agua u otros fluidos.



ANEXOS

ANEXO N° 01 ENSAYOS GEO MECÁNICOS DE MACIZOS ROCOSO DE LA
BOCAMINA1



CAPACIDAD ADMISIBLE DE MACIZOS ROCOSOS

PROYECTO : Ingeniería de Obras de Remediación de los Pasivos Ambientales
y Plan de Cierre de Unidad Minera San Rafael – Puno
TRAMO : BOCAMINA 1
LITOLOGIA : Andesita

1.0 Roca intacta

Peso específico (MN/m ³)	:	0,027
Resistencia a la compresión uniaxial U_c (MPa)	:	130
Módulo de elasticidad (MPa)	:	41000
Relación de Poisson	:	0,25
Angulo de fricción interna (°)	:	33
m_i	:	19
cohesión MPa	:	35,29
Profundidad de cimentación (m)	:	0,5

2.0 Macizo Rocoso

Valoración de la masa rocosa (RMR)	:	37
Índice Q (Barton 1974)	:	0,459
Espaciamiento de discontinuidades (m)	:	0,1

a) Calidad del macizo rocoso (RQD)

Número de discontinuidades por m ³	:	-
Frecuencia de discontinuidades por metro lineal	:	-

- Palmstrom	RQD =	-
- Priest y Hudson	RQD =	-
Valor asumido	RQD =	39

b) Módulo de deformación de la masa rocosa (MPa)

- Bieniawski (1978), Serafim y Pereira (1983)	$E_m =$	4732	MPa
- Kulhawy y Goodman (1980)	$E_m =$	4100	MPa
- Hoek (1995)	$E_m =$	5395	MPa
- Grimstad y Barton (1993)	$E_m =$	-	MPa
Valor asumido	$E_m =$	4100	MPa

c) Parámetros de Hoek & Brown - masa rocosa

$m =$	0,211
$s =$	0,00003 Para roca alterada
$s =$	0,00091 Para roca no dañada por voladura
$a =$	0,5

d) Esfuerzos in-situ

$k =$	1,00	En rocas fracturadas en superficie
$k =$	1,50	En rocas no alteradas en superficie
$k =$	0,33	En medios homogéneos e isotrópicos en función de m
$k =$	57,88	Sheorey (1994)
$k =$	1,0	Valor asumido

Esfuerzo vertical	$\sigma_v =$	0,013 MPa
Esfuerzo horizontal	$\sigma_h =$	0,013 MPa
Esfuerzo principal menor	$\sigma_3 =$	0,013 MPa

e) Parámetros de Resistencia cortante

Bieniawski (1979)	$C_m =$	185 KPa
	$\phi_m =$	23,5 °
Hoek-Brown (1988)	$h =$	1,01
	$C_m =$	66,45 KPa
	$\phi_m =$	67,95 °
Ajuste de Mohr-Coulomb a la curva de Hoek-Brown (1995)	$\lambda_m =$	18,19
	$C_m =$	79,98 KPa
	$\phi_m =$	63,61 °
Valor asumido	$C_m =$	185,00 KPa
	$\phi_m =$	23,50 °

f) Capacidad admisible

Hoek (1995)	$\sigma_{cs} = \sqrt{s} * \sigma_c$	
	$s =$	0,00091
	$\sigma_c =$	1300 Kg/cm ²
	$q_{ut} =$	39,3 Kg/cm ²

AASHTO (1996)	$q_{ut} = N_{ms} * U_c$	
	$N_{ms} = (D)$	0,050
	$U_c =$	1300 Kg/cm ²
	$q_{ut} =$	65,1 Kg/cm ²

Criterio de comprobación	$q_{ad} < 0.2 * U_c$	
	$U_c =$	1300 Kg/cm ²
	$q_{ad} <$	260,0 Kg/cm ²

	$q_{ad} < 0.33 * f_c$	
	$f_c =$	210,0 Kg/cm ²
	$q_{ad} <$	69,3 Kg/cm ²

TRAMO: BOCAMINA 1
LITOLOGIA: Andesita

Capacidad de soporte última	$q_{ut} =$	39,3 Kg/cm ²
Capacidad admisible de la roca asumida	$q_{ad} =$	13,1 Kg/cm ²
Adherencia con el concreto (Littlejohn y Bruce 1975)	$\tau =$	43,3 Kg/cm ²

ANEXO N° 02 ENSAYOS GEO MECÁNICOS DE MACIZOS ROCOSO DE LA BOCAMINA 2



CAPACIDAD ADMISIBLE DE MACIZOS ROCOSOS

PROYECTO : Ingeniería de Obras de Remediación de los Pasivos Ambientales
y Plan de Cierre de Unidad Minera San Rafael " – Puno
TRAMO : BOCAMINA 2
LITOLÓGIA : Filitas

1.0 Roca intacta

Peso específico (MN/m ³)	:	0,025
Resistencia a la compresión uniaxial U _c (MPa)	:	200
Módulo de elasticidad (MPa)	:	64000
Relación de Poisson	:	0,25
Angulo de fricción interna (°)	:	30
m _i	:	10
cohesión MPa	:	58,90
Profundidad de cimentación (m)	:	0,5

2.0 Macizo Rocoso

Valoración de la masa rocosa (RMR)	:	38
Índice Q (Barton 1974)	:	0,513
Espaciamiento de discontinuidades (m)	:	0,05

a) Calidad del macizo rocoso (RQD)

Número de discontinuidades por m ³	:	-
Frecuencia de discontinuidades por metro lineal	:	-

- Palmstrom	RQD =	-
- Priest y Hudson	RQD =	-
Valor asumido	RQD =	34

b) Módulo de deformación de la masa rocosa (MPa)

- Bieniawski (1978), Serafim y Pereira (1983)	E _m =	5012	MPa
- Kulhawy y Goodman (1980)	E _m =	3200	MPa
- Hoek (1995)	E _m =	7088	MPa
- Grimstad y Barton (1993)	E _m =	-	MPa
Valor asumido	E _m =	3200	MPa

c) Parámetros de Hoek & Brown - masa rocosa

m =	0,119
s =	0,00003 Para roca alterada
s =	0,00102 Para roca no dañada por voladura
a =	0,5

d) Esfuerzos in-situ

k =	1,00	En rocas fracturadas en superficie
k =	1,50	En rocas no alteradas en superficie
k =	0,33	En medios homogéneos e isotrópicos en función de m
k =	45,07	Sheorey (1994)
k =	1,0	Valor asumido

Esfuerzo vertical	$\sigma_v =$	0,012 MPa
Esfuerzo horizontal	$\sigma_h =$	0,012 MPa
Esfuerzo principal menor	$\sigma_3 =$	0,012 MPa

e) Parámetros de Resistencia cortante

Bieniawski (1979)	$C_m =$	190 KPa
	$\phi_m =$	24 °
Hoek-Brown (1988)	$h =$	1,01
	$C_m =$	139,51 KPa
	$\phi_m =$	62,51 °
Ajuste de Mohr-Coulomb a la curva de Hoek-Brown (1995)	$\lambda_m =$	10,92
	$C_m =$	172,59 KPa
	$\phi_m =$	56,33 °
Valor asumido	$C_m =$	190,00 KPa
	$\phi_m =$	24,00 °

f) Capacidad admisible

Hoek (1995)	$\sigma_{cs} = \sqrt{s} * \sigma_c$	
	$s =$	0,00102
	$\sigma_c =$	2000 Kg/cm ²
	$q_{ut} =$	63,8 Kg/cm ²
AASHTO (1996)	$q_{ut} = N_{ms} * U_c$	
	$N_{ms} = (B)$	0,043
	$U_c =$	2000 Kg/cm ²
	$q_{ut} =$	86,6 Kg/cm ²
Criterio de comprobación	$q_{ad} < 0.2 * U_c$	
	$U_c =$	2000 Kg/cm ²
	$q_{ad} <$	400,0 Kg/cm ²
	$q_{ad} < 0.33 * f_c$	
	$f_c =$	210,0 Kg/cm ²
	$q_{ad} <$	69,3 Kg/cm ²

TRAMO: BOCAMINA 2

LITOLOGIA: Filitas

Capacidad de soporte última	$q_{ut} =$	63,8 Kg/cm ²
Capacidad admisible de la roca asumida	$q_{ad} =$	21,3 Kg/cm ²
Adherencia con el concreto (Littlejohn y Bruce 1975)	$\tau =$	66,7 Kg/cm ²

ANEXO N° 03 ENSAYOS GEO MECÁNICOS DE MACIZOS ROCOSO DE LA BOCAMINA 3



CAPACIDAD ADMISIBLE DE MACIZOS ROCOSOS

PROYECTO : Ingeniería de Obras de Remediación de los Pasivos Ambientales
y Plan de Cierre de Unidad Minera San Rafael " – Puno
TRAMO : BOCAMINA 3
LITOLOGIA : Filitas

1.0 Roca intacta

Peso específico (MN/m ³)	:	0,027
Resistencia a la compresión uniaxial U_c (MPa)	:	165
Módulo de elasticidad (MPa)	:	53000
Relación de Poisson	:	0,25
Angulo de fricción interna (°)	:	30
m_i	:	10
cohesión MPa	:	48,60
Profundidad de cimentación (m)	:	0,5

2.0 Macizo Rocoso

Valoración de la masa rocosa (RMR)	:	30
Índice Q (Barton 1974)	:	0,211
Espaciamiento de discontinuidades (m)	:	0,05

a) Calidad del macizo rocoso (RQD)

Número de discontinuidades por m ³	:	-
Frecuencia de discontinuidades por metro lineal	:	-

- Palmstrom	RQD =	-
- Priest y Hudson	RQD =	-
Valor asumido	RQD =	32

b) Módulo de deformación de la masa rocosa (MPa)

- Bieniawski (1978), Serafim y Pereira (1983)	$E_m =$	3162	MPa
- Kulhawy y Goodman (1980)	$E_m =$	2650	MPa
- Hoek (1995)	$E_m =$	4062	MPa
- Grimstad y Barton (1993)	$E_m =$	-	MPa
Valor asumido	$E_m =$	2650	MPa

c) Parámetros de Hoek & Brown - masa rocosa

$m =$	0,087
$s =$	0,00001 Para roca alterada
$s =$	0,00042 Para roca no dañada por voladura
$a =$	0,5

d) Esfuerzos in-situ

$k =$	1,00	En rocas fracturadas en superficie
$k =$	1,50	En rocas no alteradas en superficie
$k =$	0,33	En medios homogéneos e isotrópicos en función de m
$k =$	37,37	Sheorey (1994)
$k =$	1,0	Valor asumido

Esfuerzo vertical	$\sigma_v =$	0,013 MPa
Esfuerzo horizontal	$\sigma_h =$	0,013 MPa
Esfuerzo principal menor	$\sigma_3 =$	0,013 MPa

e) Parámetros de Resistencia cortante

Bieniawski (1979)	$C_m =$	150 KPa
	$\phi_m =$	20 °
Hoek-Brown (1988)	$h =$	1,02
	$C_m =$	60,54 KPa
	$\phi_m =$	61,86 °
Ajuste de Mohr-Coulomb a la curva de Hoek-Brown (1995)	$\lambda_m =$	11,08
	$C_m =$	72,56 KPa
	$\phi_m =$	56,56 °
Valor asumido	$C_m =$	150,00 KPa
	$\phi_m =$	20,00 °

f) Capacidad admisible

Hoek (1995)	$\sigma_{cs} = \sqrt{s} \cdot \sigma_c$	
	$s =$	0,00042
	$\sigma_c =$	1650 Kg/cm ²
	$q_{ut} =$	33,8 Kg/cm ²
AASHTO (1996)	$q_{ut} = N_{ms} \cdot U_c$	
	$N_{ms} = (B)$	0,024
	$U_c =$	1650 Kg/cm ²
	$q_{ut} =$	39,3 Kg/cm ²
Criterio de comprobación	$q_{ad} < 0,2 \cdot U_c$	
	$U_c =$	1650 Kg/cm ²
	$q_{ad} <$	330,0 Kg/cm ²
	$q_{ad} < 0,33 \cdot f_c$	
	$f_c =$	210,0 Kg/cm ²
	$q_{ad} <$	69,3 Kg/cm ²
TRAMO: BOCAMINA 3 LITOLOGIA: Filitas		
Capacidad de soporte última	$q_{ut} =$	33,8 Kg/cm ²
Capacidad admisible de la roca asumida	$q_{ad} =$	11,3 Kg/cm ²
Adherencia con el concreto (Littlejohn y Bruce 1975)	$\tau =$	55,0 Kg/cm ²

ANEXO N° 04 ENSAYOS GEO MECÁNICOS DE MACIZOS ROCOSO DE LA BOCAMINA 7



CAPACIDAD ADMISIBLE DE MACIZOS ROCOSOS

PROYECTO : Ingeniería de Obras de Remediación de los Pasivos Ambientales
y Plan de Cierre de Unidad Minera San Rafael " – Puno
TRAMO : BOCAMINA 7
LITOLOGIA : Cuarzita

1.0 Roca intacta

Peso específico (MN/m ³)	:	0,025
Resistencia a la compresión uniaxial U_c (MPa)	:	85
Módulo de elasticidad (MPa)	:	27000
Relación de Poisson	:	0,25
Angulo de fricción interna (°)	:	32
m_i	:	24
cohesión MPa	:	23,56
Profundidad de cimentación (m)	:	0,5

2.0 Macizo Rocoso

Valoración de la masa rocosa (RMR)	:	28
Índice Q (Barton 1974)	:	0,169
Espaciamiento de discontinuidades (m)	:	0,1

a) Calidad del macizo rocoso (RQD)

Número de discontinuidades por m ³	:	-
Frecuencia de discontinuidades por metro lineal	:	-

- Palmstrom	RQD =	-
- Priest y Hudson	RQD =	-
Valor asumido	RQD =	43

b) Módulo de deformación de la masa rocosa (MPa)

- Bieniawski (1978), Serafim y Pereira (1983)	$E_m =$	2818	MPa
- Kulhawy y Goodman (1980)	$E_m =$	2700	MPa
- Hoek (1995)	$E_m =$	2598	MPa
- Grimstad y Barton (1993)	$E_m =$	-	MPa
Valor asumido	$E_m =$	2590	MPa

c) Parámetros de Hoek & Brown - masa rocosa

$m =$	0,140
$s =$	0,00001 Para roca alterada
$s =$	0,00034 Para roca no dañada por voladura
$a =$	0,5

d) Esfuerzos in-situ

$k =$	1,00	En rocas fracturadas en superficie
$k =$	1,50	En rocas no alteradas en superficie
$k =$	0,33	En medios homogéneos e isotrópicos en función de m
$k =$	36,65	Sheorey (1994)
$k =$	1,0	Valor asumido

Esfuerzo vertical	$\sigma_v =$	0,012 MPa
Esfuerzo horizontal	$\sigma_h =$	0,012 MPa
Esfuerzo principal menor	$\sigma_3 =$	0,012 MPa

e) Parámetros de Resistencia cortante

Bieniawski (1979)	$C_m =$	140 KPa
	$\phi_m =$	19 °
Hoek-Brown (1988)	$h =$	1,01
	$C_m =$	21,58 KPa
	$\phi_m =$	68,85 °
Ajuste de Mohr-Coulomb a la curva de Hoek-Brown (1995)	$\lambda_m =$	19,32
	$C_m =$	23,97 KPa
	$\phi_m =$	64,37 °
Valor asumido	$C_m =$	140,00 KPa
	$\phi_m =$	19,00 °

f) Capacidad admisible

Hoek (1995)	$\sigma_{cs} = \sqrt{s} * \sigma_c$	
	$s =$	0,00034
	$\sigma_c =$	850 Kg/cm ²
	$q_{ut} =$	15,8 Kg/cm ²

AASHTO (1996)	$q_{ut} = N_{ms} * U_c$	
	$N_{ms} = (B)$	0,021
	$U_c =$	850 Kg/cm ²
	$q_{ut} =$	17,5 Kg/cm ²

Criterio de comprobación	$q_{ad} < 0.2 * U_c$	
	$U_c =$	850 Kg/cm ²
	$q_{ad} <$	170,0 Kg/cm ²
	$q_{ad} < 0.33 * f_c$	
	$f_c =$	210,0 Kg/cm ²
	$q_{ad} <$	69,3 Kg/cm ²

TRAMO: BOCAMINA 7
LITOLOGIA: Filitas

Capacidad de soporte última	$q_{ut} =$	15,6 Kg/cm ²
Capacidad admisible de la roca asumida	$q_{ad} =$	5,2 Kg/cm ²
Adherencia con el concreto (Littlejohn y Bruce 1975)	$\tau =$	28,3 Kg/cm ²

ANEXO N° 05 ENSAYOS GEO MECÁNICOS DE MACIZOS ROCOSO DE LA BOCAMINA 9



CAPACIDAD ADMISIBLE DE MACIZOS ROCOSOS

PROYECTO : Ingeniería de Obras de Remediación de los Pasivos Ambientales
y Plan de Cierre de Unidad Minera San Rafael " – Puno
TRAMO : BOCAMINA 9
LITOLÓGIA : Cuarzita

1.0 Roca intacta

Peso específico (MN/m ³)	:	0,026
Resistencia a la compresión uniaxial U_c (MPa)	:	130
Módulo de elasticidad (MPa)	:	41000
Relación de Poisson	:	0,25
Angulo de fricción interna (°)	:	32
m_i	:	24
cohesión MPa	:	36,03
Profundidad de cimentación (m)	:	0,5

2.0 Macizo Rocoso

Valoración de la masa rocosa (RMR)	:	31
Índice Q (Barton 1974)	:	0,236
Espaciamiento de discontinuidades (m)	:	0,1

a) Calidad del macizo rocoso (RQD)

Número de discontinuidades por m ³	:	-
Frecuencia de discontinuidades por metro lineal	:	-

- Palmstrom	RQD =	-
- Priest y Hudson	RQD =	-
Valor asumido	RQD =	33

b) Módulo de deformación de la masa rocosa (MPa)

- Bieniawski (1978), Serafim y Pereira (1983)	$E_m =$	3350	MPa
- Kulhawy y Goodman (1980)	$E_m =$	4100	MPa
- Hoek (1995)	$E_m =$	3819	MPa
- Grimstad y Barton (1993)	$E_m =$	-	MPa
Valor asumido	$E_m =$	3350	MPa

c) Parámetros de Hoek & Brown - masa rocosa

$m =$	0,174
$s =$	0,00001 Para roca alterada
$s =$	0,00047 Para roca no dañada por voladura
$a =$	0,5

d) Esfuerzos in-situ

$k =$	1,00	En rocas fracturadas en superficie
$k =$	1,50	En rocas no alteradas en superficie
$k =$	0,33	En medios homogéneos e isotrópicos en función de m
$k =$	47,17	Sheorey (1994)
$k =$	1,0	Valor asumido

Esfuerzo vertical	$\sigma_v =$	0,013 MPa
Esfuerzo horizontal	$\sigma_h =$	0,013 MPa
Esfuerzo principal menor	$\sigma_3 =$	0,013 MPa

e) Parámetros de Resistencia cortante

Bieniawski (1979)	$C_m =$	155 KPa
	$\phi_m =$	20,5 °
Hoek-Brown (1988)	$h =$	1,00
	$C_m =$	38,39 KPa
	$\phi_m =$	68,97 °
Ajuste de Mohr-Coulomb a la curva de Hoek-Brown (1995)	$\lambda_m =$	21,61
	$C_m =$	44,50 KPa
	$\phi_m =$	65,72 °
Valor asumido	$C_m =$	155,00 KPa
	$\phi_m =$	20,50 °

f) Capacidad admisible

Hoek (1995)	$\sigma_{cs} = \sqrt{s} * \sigma_c$	
	$s =$	0,00047
	$\sigma_c =$	1300 Kg/cm ²
	$q_{ut} =$	28,1 Kg/cm ²
AASHTO (1998)	$q_{ut} = N_{ms} * U_c$	
	$N_{ms} = (C)$	0,030
	$U_c =$	1300 Kg/cm ²
	$q_{ut} =$	39,6 Kg/cm ²
Criterio de comprobación	$q_{ad} < 0.2 * U_c$	
	$U_c =$	1300 Kg/cm ²
	$q_{ad} <$	260,0 Kg/cm ²
	$q_{ad} < 0.33 * f_c$	
	$f_c =$	210,0 Kg/cm ²
	$q_{ad} <$	69,3 Kg/cm ²
TRAMO: BOCAMINA 9 LITOLOGIA: Cuarzita		
Capacidad de soporte última	$q_{ut} =$	28,1 Kg/cm ²
Capacidad admisible de la roca asumida	$q_{ad} =$	9,4 Kg/cm ²
Adherencia con el concreto (Littlejohn y Bruce 1975)	$\tau =$	43,3 Kg/cm ²

ANEXO N° 06 ANÁLISIS DE LABORATORIO DE MATERIAL DE DESMONTE



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y BIOTECNOLOGICAS
LABORATORIO DE ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD
Urb. San José 9/N Umacollo CAMPUS UNIVERSITARIO H-204/205. + 5154382038/ANEXO1166
1811a borisrfoedersap@ucsmadu.pe (1) http://www.ucsmadu.pe E/ Aptdo 1350
AREQUIPA - PERU



INFORME DE ENSAYO N° ANA07820.004517

INFORMACION PROPORCIONADA POR EL CLIENTE

Nombre del cliente : Sergio Luque Amado
Dirección del cliente : Calle El Salvador 107 Urb Fecia
RUC : No corresponde
Identificación del contacto : Sergio Luque Amado
Descripción de la muestra : Mineral para tratamiento de drenaje acido

INFORMACIÓN DEL ENSAYO

Condición del muestreo : Por el cliente
Tamaño de muestra : 5000 g
Fecha de recepción : 07/02/2020
Fecha de ejecución de ensayo : 07/02/2020 al 17/02/2020
Fecha de emisión de informe : 17/02/2020
Página : 1 de 2

1. ANALISIS FISICO - QUIMICO:

ANALISIS	UNIDADES	RESULTADO
DETERMINACION DE METALES TOTALES Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma -Atomic Emission Soectrometry		
Fe	%	0,82
Al	%	6,31
Cu	%	0,50
N	%	0,00
Ca	%	0,09
Na	%	0,08
Zn	%	0,20
B	%	18,69
Ti	%	0,28
K	%	2,14
Si	%	7,97
P	%	0,02
S	%	0,12
Cr	%	0,00
Co	%	0,00
Ni	%	0,00
Se	%	0,00
Mg	%	0,27
DETERMINACION DE SULFATOS Metodoloaia aplicada según NTP 335.178	mg/kg	230,21
DETERMINACION DE SULFUROS Método volumétrico	mg/kg	No detectable
DETERMINACION DE CAPACIDAD DE NEUTRALIZACION Método volumétrico	Kg /TM	0,05
DETERMINACION DE ACIDEZ Método volumétrico	Kg / TM	0,32
DETERMINACION DE INDICE ABA Cálculo	-	-0,27
DETERMINACION DE RATIO ACIDO BASE Cálculo	-	6,40



ANEXO N° 07 BOCAMINAS PARA CIERRE



Foto N°1: En la fotografía se muestra la bocamina 02 que será sometida a cierre, cubierta por una de las capas a emplear que será el sustrato que viene a ser una cubierta de glaciár no estratificada.



Foto N°2: Bocamina clausurada mediante un muro de seguridad de concreto que evitará el ingreso de personas y animales



Foto N°3: Habilitación del área para la construcción del tapón y cierre de Bocamina



Foto N°4: Reconocimiento de la Bocamina a ser clausurada mediante un tapón de concreto.



Foto N°5: Vista Panorámica de los componentes a ser clausurados ubicados en los niveles 4700



Foto N°6: Bocamina 2 ubicada en el nivel 4650, la cual necesitará una tubería para drenaje.