UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

APLICACIÓN DE MODELO PREDICTIVO DE DAÑO (CROSS HOLE) PARA DETERMINAR LA VIBRACION PICO PARTICULA MAXIMA (VPPc) PRODUCIDA POR VOLADURA Y CONTROLAR LA ESTABILIDAD DE TALUD, MINA CONSTANCIA - 2019

TESIS

PRESENTADO POR:

Bach. Elvis Gomez Tique

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

MOQUEGUA – PERÚ
2019

020

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

FOLIO N° .....

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Según Resolución....DE COMISION ORGANIZADORA N°. 0460-2019-UNAM.....

El Jurado Dictaminador ha calificado la defensa de la tesis:

TITULADA:

APLICACIÓN DE MODELO PREDICTIVO DE DAÑO (CROSS HOLE) PARA DETERMINAR LA VIBRACIÓN PICO PARTÍCULA MAXIMA (VPPE) PRODUCIDA POR VOLADURA Y CONTROLAR LA ESTABILIDAD DE TALUD, MINA CONSTANCIA - 2019

Asesor:.....Msc. JOSE ORLANDO QUINTANA QUISPE.....

Asesor Externo:.....

Tesista: ....BACH. ELVIS GOMEZ TIQUE.....

Dictamina como.....APROBADO.....por.....UNANIMIDAD.....

La defensa del tema de investigación con la nota: .....DIESISIETE..... (17)

Por lo que....S.I.....opta el Grado de Ingeniero de Minas.

Siendo las..12:10..horas, del...27.....de.....AGOSTO.....del año.2019.....

se procede a firmar la presente.

Presidente del Jurado
ING. AGAPITO FLORES JUSTO

Primer Miembro
ING. JORGE FLORES SOLIS

Segundo Miembro
Ana Allison M. Arocutipa Gomez

Tesista
Elvis Gomez Tique

Página de Dedicatoria

A Dios por haberme dado la vida y los recursos necesarios para poder superarme y lograr mis objetivos.

A mis padres Alejandro y Agripina por su apoyo incondicional

También a las personas que contribuyeron a mi desarrollo como Profesional, que me acompañaron a lo largo de mi carrera.

Agradecimiento

A la Universidad Nacional de Moquegua y a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas por brindarme todos los conocimientos para realizar mis estudios profesionales.

A mi asesor MSc Jose Orlando Quintana Quispe por el apoyo, guía y dirección que me brindo en el desarrollo del tema de investigación.

A la empresa Enaex por acogerme en su plantel laboral y permitirme desarrollarme como ingeniero de minas.

RESUMEN

Como parte del proceso de mejora continua en la unidad minera Constancia se viene realizando pruebas cuyo objetivo principal es la estabilidad del talud del banco al momento de realizar voladuras para la obtención del mineral, para ello tenemos que determinar la Vibración Pico Partícula Máxima (VPP $_{máxima}$) producida.

El cálculo Vibración Pico (VP) promedio realizado mostro que es de 1,820 m/s correspondiente a los parámetros geotécnicos entregados en la Fase 02 Monzonita Porfirítica (MP1) potásica, con este cálculo y con lo que se definió en la Ecuación del VPP $_{máxima}$, han podido ser estimados los valores de estos.

El estudio de Cross Hole permite obtener el modelamiento de vibraciones con representación gráfica del modelo H&P, con parámetros de K=393.13 y Alpha=1.0986 a un nivel de confianza del 93%, el cual es requerido para el software especializado, para obtener las simulaciones. En conclusión, el daño al talud por la voladura no solo considera el efecto del campo cercano, sino que influye también el que se presenta por campo lejano. Por lo que la medida de control también ha de depender de los tiempos de retardo designados; definir dichos retardos críticos puede ayudar a recudir el impacto negativo hacia las paredes sin afectar la distribución granulométrica requerida por los procesos posteriores.

ABSTRACT

As part of the process of continuous improvement at the Constancia mining unit, tests have been carried out whose main objective is the stability of the bank slope at the moment of blasting to obtain the mineral, for this we have to determine the Maximum Particle Peak Vibration (VPP maxima) produced.

The calculated average Vibration Peak (VP) showed that is 1,820 m / s corresponding to the geotechnical parameters delivered in Phase 02 Potassium Porphyritic Monzonite (MP1), with this calculation and with what was defined in the Equation of the VPP maxima, have the values of these could be estimated.

The study of Cross Hole allows to obtain the modeling of vibrations with graphic representation of the H&P model, with parameters of K = 393.13 and Alpha = 1.0986 at a confidence level of 93%, which is required for specialized software, to obtain the simulations

.In conclusion, the damage to the slope by blasting not only considers the effect of the near field, but also influences the one that occurs in the far field. Therefore, the control measure must also depend on the designated delay times; Defining these critical delays can help reduce the negative impact on the walls without affecting the granulometric distribution required by subsequent processes.

CONTENIDO

Página de Dedicatoria **2**
Agradecimiento **3**
RESUMEN **4**
ABSTRACT **5**
ÍNDICE DE TABLAS **11**
I. INTRODUCCIÓN **13**
1.1.1 Descripcion de la realidad problemática 14
1.1.2 Formulación del problema 15
1.2. ANTECEDENTES **15**
1.3. OBJETIVOS **19**
1.3.1. Objetivo General 19
1.3.2. Objetivo Especifico 19
1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA **20**
1.5. HIPÓTESIS. **20**
1.5.1. Hipótesis General. 20
1.5.2. Hipótesis Específica. 20
1.6. OPERACIÓN DE VARIBLES **21**
1.6.1 Variable Independiente 21
1.6.2 Variable Dependiente 21
II. MARCO TEÓRICO **22**
2.1. BASES TEÓRICAS SOBRE EL TEMA DE INVESTIGACIÓN **22**
2.1.1 Ubicación 22
2.1.2 Accesibilidad 23
2.1.3 Topografía Y Fisiografía 24
2.1.4 Clima 24
2.1.5 Flora Y Fauna. 25
2.1.6 Recursos. 27
2.1.7 Geomorfología 27
2.1.8 Geología. 29
2.1.9 Geología Regional. 29
2.1.10 Alteraciones. 33

2.1.11 Geología Local. 33

2.1.12 Geología Estructural. 33

2.1.13 Geología Económica 35

2.1.14 Clasificación de la masa rocosa en la mina Constancia. 42

2.1.15 Caracterización geomecánica del macizo rocoso en la mina Constancia 43

2.1.16 Interpretación de la caracterización geomecánica. 43

2.1.17 Operaciones Mina 44

2.1.18 Voladura 45

2.1.19 Carguío 48

2.1.20 Acarreo 48

2.1.21 Producción mina Constancia 49

2.2. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS. 49
III. METODOLOGÍA: 51
3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN 51
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA 51
3.2.1. La Población. 51
3.2.2. La Muestra 52
3.3. INSTRUMENTOS MATERIALES Y EQUIPOS 52
3.4. PROCEDIMIENTOS 53
3.5. ANÁLISIS DE DATOS 54
3.5.1. Validación y confiabilidad de los instrumentos 54
3.5.2. Métodos y técnicas para la presentación y análisis de datos 54
IV. RESULTADOS 58
4.1. RESULTADOS DE LA PRUEBA EMPLEADA 58
4.1.1. Marco Teórico: Amplitud de vibracion y determinación de onda P 58

4.1.2. Implementación prueba campo cercano en fase 02 mp1 potásico – mina Constancia 61

4.1.3. Registro de vibración de campo cercano en fase 02 mp1 potásica – mina Constancia 63

4.1.4. Modelo de atenuación de vibraciones en fase 02 mp1 potásica – mina Constancia 64

4.2. VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA EN EL MEDIO ROCOSO 66
4.3. CALCULO DEL VPP CRÍTICO PARA FASE 02 MP1 POTÁSICA – MINA CONSTANCIA 67
4.4. CRITERIOS DEL NIVEL DE PERTURBACIÓN PARA FASE 02 MP1 POTÁSICA – MINA CONSTANCIA 68
4.5. SIMULACIONES DE PERTURBACIÓN EN TALUDES FASE 02 MP1 POTÁSICA – MINA CONSTANCIA 69
4.5.1. Estimación de vibraciones en los límites del talud 75

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 84
VI. CONCLUSIÓNES 86
VII. RECOMENDACIONES 90
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 91
IX. ANEXOS 93

ÍNDICE DE FIGURAS

Imagen 1. Ubicación mina Constancia.....23
Imagen 2. Mineralización mina Constancia 39
Imagen 3. Recursos minerales mina Constancia.....42
Imagen 4 .Ubicación de taladros mina Constancia.....57
Imagen 5. Distribución geométrica para estimación de vibraciones por h&p 59
Imagen 6. Esquema de perfil de prueba para campo cercano 61
Imagen 7. Implementación de prueba en terreno en fase 02 mp1 mina ...62
Imagen 8. Ubicación de prueba en fase 02 mina constancia se dispuso en el círculo rojo 63
Imagen 9. Registro de vibraciones, G1 y G2 (vista del registro en su componente longitudinal en el software blastware instantel).....64
Imagen 10. Representación gráfica modelo H&P – Constancia. 66
Imagen 11. Configuración de carga fase 02 mp1 potásica - Constancia. taladro de producción. 70
Imagen 12. Configuración de carga fase 02 mp1 potásica - Constancia. taladro del buffer.....70
Imagen 13. Configuración de carga fase 02 mp1 potásica - Constancia. taladro del piezómetro. 71
Imagen 14. configuración de carga fase 02 mp1 potásica - Constancia. diseño de talud. 71
Imagen 15. Disposición espacial del py 002 nv 4230 fase 02.....72
Imagen 16. Onda semilla importada en el software especializado Paradigm – onda semilla geófono 02 tiempo 900 ms. 73
Imagen 17. Cortes a lo largo de la malla y corte a - a'.....74
Imagen 18. Representación de vibración al talud Software Paradigm.....75
Imagen 19. Representación de los niveles de vibraciones en los límites del talud Software Paradigm.....76

Imagen 20. Relación de % VPP vs Distancia horizontal. Izquierda referencia 4 VPP – Derecha VPP (Software Paradigm). 78
Imagen 21. Representación de la simulación de vibraciones en los niveles inferiores del banco (Software Paradigm).....79
Imagen 22. Izquierda. efecto de las vibraciones en el talud con el diseño de berma – derecha. efecto en campo cercano entre buffer y producción (Software Paradigm). 81
Imagen 23. Relación de % VPP vs profundidad por debajo de la berma. izquierda fracturamiento intenso - derecha aparición de grietas (Software Paradigm).....82
Imagen 24. Efecto de vibraciones en la generación del talud considerando diferentes cortes en la malla (Software Paradigm). 83
Imagen 25. Plano de vías mina Constancia.....1
Imagen 26. Imagen de sismógrafo instantel de 8 canales utilizado para la lectura de datos. 2
Imagen 27. Imagen de geófono triaxial utilizado para la instalación los cuales serán enterrados. 2
Imagen 28. Perforadoras pit viper 271.....3
Imagen 29. Palas hidráulicas hitachi, capacidad de 72 ton/cuchara.....4
Imagen 30. Excavadora hidráulica.....4
Imagen 31. Cargador frontal Cat 994H.....5
Imagen 32. Transporte de material con el Camión Cat 793F. 5
Imagen 33. Camion fabrica Q-41 (Milodon).....6
Imagen 34. Camión fabrica Q-38; Q-41.....6
Imagen 35. Mini cargador bob cat. 7

Índice de tablas

Tabla 1. Constancia and pampacancha mineral reserves at june 30th, 2016.....40
Tabla 2. Constancia and pampacancha mineral reserves by ore type at june 30th, 2016.....41
Tabla 3. Tipo de mezcla explosiva utilizada en cada fase del proyecto.....45
Tabla 4. Tactor de potencia según fase del proyecto.....46
Tabla 5. Equipos utilizados para el servicio de voladura.....48
Tabla 6. Criterios de daño.....61
Tabla 7. Posición espacial de cargas y geófonos.....62
Tabla 8. Registro de vpp y factor H&P para sensores G1 y G2.....65
Tabla 9. Valores estadísticos para el cálculo de VP.....67
Tabla 10. Parámetros geotécnicos MP1 - potásica - Constancia.....67
Tabla 11. Cálculo del VPP crítico.....68
Tabla 12. Niveles de perturbación asociados al VPP crítico.....68

LISTA DE ABREVIATURAS

Km:	Kilómetros.
Ms:	Milisegundos.
N - S:	Norte - Sur.
E - W:	Este - Oeste.
VP:	Velocidad de onda P
VPP:	Vibración Pico Partícula.
gr/cc:	Gramos por centímetro cúbico.
m/s:	Metros por segundo.
m:	Metros.
cm:	Centímetro.
mm:	Milímetros
mg/m:	Miligramo por metro.
UTM:	Universal Transverse Mercator (sistema de Coordenadas).
ME:	Mezcla Explosiva
Cu:	Cobre
MP1:	Monzonita Porfirítica 1
DI:	Diorita
MMP:	Monzonota Microporfirìtica
AAN:	Andesita
SKN:	Skarn
Cu-(Mo):	Porfirítico cuprífero o pórfido de cobre y molibdeno
Tpd:	Toneladas por día.
Mo:	Molibdeno

I. INTRODUCCIÓN

El trabajo de investigación Aplicación de Modelo predictivo de daño (CROSS HOLE) para determinar la Vibración Pico Partícula Máxima producida por la voladura y determinar la estabilidad de talud se da como parte de un proyecto de mejora continua con el fin de poder realizar un trabajo con eficiencia y poder cumplir con las metas aprovechando al máximo nuestros recursos.

En este sentido se presenta los resultados del trabajo, que tiene por propósito principal realizar el modelamiento de vibraciones en el sector de prueba determinado en Fase 02 – 4200 correspondiente a la litología Monzonita Porfirítica 1 – Potásico; asimismo, dentro de los alcances del estudio está evaluar la Velocidad de onda P de la roca, el cálculo de la Velocidad de Pico Partícula Crítico (VPP crítico) y sus niveles de perturbación en función a los taludes del sector de prueba.

En el primer capítulo se desarrolla la presentación del problema, justificación, objetivos e hipótesis de la investigación.

En el segundo capítulo se desarrolla la revisión de antecedentes, se describe las características geográficas donde se desarrolló el trabajo, la geología de la zona de estudio, los diferentes tipos de fallas y definición de términos.

En el tercer capítulo se desarrolla la metodología de cómo se desarrolló el trabajo de investigación indicando las variables de estudio y se determina la población y muestra de estudio. También se detalla el método de análisis y presentación de resultados.

En el cuarto capítulo se describe y se analizan el frente de trabajo donde se realizó la investigación propuestas por la empresa Enaex en la mina Constancia. Finalmente, en los dos últimos capítulos se tiene las conclusiones y recomendaciones.

1.1. DESCRIPCIÓN Y FORMULACION DEL PROBLEMA

1.1.1 DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

El proceso de voladura es uno de los procesos unitarios más importantes en la secuencia de minado en una empresa minera, siendo un factor muy determinante en la calidad de la extracción de minerales, enfrentando problemas diarios como la granulometría, generación de polvos y partículas, estabilidad de taludes, y se puede decir que este método es el más económico para obtener producciones de material volado; por lo cual muchas empresas mineras prefieren la aplicación de tecnologías en el proceso de voladura.

La empresa minera Constancia, administrado por Hudbay no es ajeno a ello, y cada día se enfrenta a los problemas de generación de polvos, estabilidad de taludes y vibraciones y este último con mayor frecuencia en zonas de criticidad; es por lo cual con la presente investigación se pretende aplicar el modelo predictivo de daño CROSS HOLE que consiste en la introducción de una línea de geófonos, o aquófonos, por unos sondeos, y medir el tiempo de respuesta entre la pulsión sísmica y el espacio, cuyo método que “permite valorar el acabado de pilotes, valorar a mayor profundidad y exactitud la continuidad entre capas, y tener datos de zonas de difícil acceso” (Geozone, s.f.), y ahí determinar las vibraciones y así minimizarlas.

1.1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

- **Interrogante General.**

¿Cómo aplicar el modelo predictivo de daño (Cross Hole) para la estimación del criterio de vibraciones de velocidad pico partícula máxima producido por voladura en la minera Constancia?

- **Interrogante Específica.**

¿Cómo determinar las vibraciones producidas por la voladura en taludes y banco inferior, de la minera Constancia?

¿Por qué determinar la Velocidad Pico Partícula Critico (VPP) asociados a las vibraciones producidas por la voladura en el tajo de la minera constancia?

1.2. ANTECEDENTES

Algunos antecedentes de estudios realizados respecto a pruebas de vibraciones producidas por la voladura:

A nivel internacional, (Casanegra, 2008), Helmo Mine – Canadá. Se han hecho avances en la modelación de la tronadura, pero no toman en cuenta todas las variables que influyen en este proceso. Las características que influyen en la modelación de la tronadura son el macizo rocoso con sus propiedades, características del explosivo, cantidad de explosivo usado, etc. El modelo utilizado fue el que modela la tronadura como una ecuación de movimiento. Este fue implementado por Rivera en el programa Comsol. Debido a lo complejo de la forma del rajo abierto, compuesto por un rajo mediano (Cyzone) y dos rajos pequeños (Sceptre y West), y a las estructuras presentes en el macizo rocoso, el problema se resolvió en forma bidimensional. Se construyeron planos que contenían la tronadura y el acelerómetro que registraba las vibraciones. El mejor ajuste del modelo fue con valores del módulo de Young y razón de Poisson de 22 GPa y 0,42 para Cyzone Pit, 23 GPa y 0,46 para Sceptre Pit y 22 GPa y 0,46 para West Pit, produciendo errores promedio de 15% para Cyzone Pit, 30% para Sceptre y West Pit. Esta variabilidad en las propiedades del macizo rocoso

se debe a la dirección de propagación de la tronadura, heterogeneidad y estructuras de la roca y a la distancia desde la explosión y el acelerómetro.

(Music, 2007), Mina el Teniente – Chile. El impacto vibracional y el daño en el contorno fue el tema de mayor interés de evaluación en este trabajo, situación que motivó la búsqueda de una correlación entre impacto vibracional y la respuesta de la roca medida por los límites de la sobre excavación. En términos prácticos, la idea fue estudiar el comportamiento de la vibración en el contorno de la labor en función de distintos parámetros de tronadura (básicamente el tipo de carga y su localización respecto al contorno) y por otro lado, determinar niveles críticos de vibración según las propiedades de la roca de modo de controlar el impacto vibracional en la zona afectada.

La velocidad de partícula (vibración) que coincide con el límite de la excavación resultó en torno a los 5000 [mm/s] y el valor de Velocidad de Partícula Crítica estimado para el sector de pruebas, a partir de las propiedades elásticas y mecánicas de la roca, se encuentra en torno a los 1.100 – 1.200 [mm/s].

A nivel Nacional, (Giraldo, 2010), en su tesis de grado titulada; “Control de vibraciones para casas de tierra en Perú” de la Universidad Nacional de Ingeniería. Lima cuyo objetivo fue:” Analizar el campo de las vibraciones causadas por la actividad humana, principalmente respecto al tema de las voladuras, mediante el acoplo de análisis de la literatura técnica existente en el ámbito mundial. Ejemplarizar la problemática de la evaluación y control de sus efectos mediante la toma de análisis e interpretación de datos reales en condiciones locales para llegar a recomendaciones de procedimiento aplicables en la práctica de la Ingeniería en nuestro medio”. Llegando a la siguiente conclusión: El potencial de efectos perjudiciales de una voladura depende de diversas características de las vibraciones, o de su conjugación: amplitud, frecuencia, duración, cantidad de ocurrencias, etc. vs. Las propiedades de comportamiento dinámico de los sistemas que excitan (frecuencia de resonancia y resistencia, principalmente). En suma, es el sistema con las

componentes fuente-suelo transmisor-estructura el que determina en conjunto el efecto del fenómeno vibratorio. (Giraldo, 2010).

(Pampacata, 2015), en su tesis de grado denominada “Análisis de vibraciones inducidos por la voladura de rocas en cantera Atocongo en zonas cercanas a poblaciones”. De la Universidad Nacional de Ingeniería, lima cuyo objetivo fue: “capturar información sísmica en dos sismógrafos ubicados convenientemente, y comparar los resultados con los modelos predictivos desarrollados con el modelo de Vibraciones”. Llegando a la siguiente conclusión: “Lo importante de esta tecnología, es el de obtener las velocidades pico partículas, para cada una de las cargas explosivas, las que asociadas a las distancias en que se registra dicha detonación conforman una buena base de datos, que permite construir modelos confiables de predicción de vibración, con los cuales se pueden evaluar diferentes modificaciones a los distintos parámetros de la voladura, tales como tipo y cantidad de explosivo según distancia y evaluar el daño potencial que esa vibración puede producir”.

(López, 2018), en su tesis de grado titulada “Modelamiento predictivo aplicado al diseño de perforación y voladura en túneles, para incrementar la rentabilidad”. De la Universidad Nacional de Trujillo. Cuyo objetivo fue “Demostrar la incidencia positiva que tiene el modelamiento predictivo de Perforación y Voladura en la mejora de los parámetros de control y mejora de los índices de rentabilidad en la construcción de Túneles”. Llegando a la siguiente conclusión: “Según los cuadros analizados en el capítulo anterior el número de taladros promedio aumento en un 20% sobre lo planificado, en gran parte vario al comienzo de la operación debido a un aumento de sección no contemplado, pero en general se mantiene ese rango del número de taladros adicionales, generalmente destinados al control de los contornos por lo cual no afecta en el factor de carga global, ya que algunos quedaban vacíos, y estando tanto la perforación como la voladura en el mismo nivel de costos (28% y 20%) se hace variar ambas y ver la mejor opción. Esto último es apreciable

en la Figura 43 donde vemos que nuestro factor de carga está por debajo de lo planificado".

(Orihuela y Dapello, 2009), en su tesis de grado denominada; "Diseño de un Modelo Predictivo a partir de un estudio de vibraciones en una voladura en una Mina modelo". De la Pontificia Universidad Católica del Perú. Cuyo objetivo principal de este proyecto es "poder desarrollar mediante el manejo de diferentes herramientas, un modelo predictivo que pueda ser usado como guía para futuras voladuras en la mina modelo. Sin embargo, para el logro de dicho objetivo es importante mencionar ciertos objetivos secundarios, los cuales serán fundamentales para lograr los resultados esperados". Llegando a la siguiente conclusión: "Los valores de VPP obtenidos en las pruebas bajo las características y condiciones de la mina modelo arrojaron como resultados k = 1834 y b = 1.74; los cuales son cercanos a los obtenidos por las fórmulas teóricas Australianas analizadas, observándose mayor correlación con el modelo donde el parámetro K=1140, que es cuando se trabaja en una roca con dureza promedio y con una cara libre (RMR* entre 41 – 60, Clasificación de roca: III)".

(Zapata, 2012), en su tesis de grado titulada: "Análisis de las vibraciones generadas por voladuras para la adecuada selección de explosivos en explotaciones mineras subterráneas en la Compañía de Minas Caudalosa S.A. de la Universidad Nacional del Centro del Perú. Cuyo objetivo; "Considerando las vibraciones causadas por la voladura realizar una adecuada selección de los explosivos en explotaciones mineras subterráneas". Llegando a la siguiente conclusión: "De todas las pruebas realizadas en los tajeos en estudio, las únicas que no sobrepasaron las cargas máximas por retardos y por consiguiente no hubo creación de nuevas fracturas fueron las que se detonaron con dinamita (usando la carga mínima), como máximo 6 taladros por retardo (2.40 kg). Las otras demás alternativas sobrepasaron la carga máxima por retardo".

A nivel regional, (Esteban, 2001), Mina Cuajone. Una vez establecidos con mayor exactitud los límites o rango de vibración máxima permisible, a través de trabajos prácticos en cada dominio litológico de la

mina, será factible utilizar los modelos de vibraciones para el diseño como guía general para evitar situaciones de riesgo al macizo rocoso un ejemplo práctico, sería el poder especificar o establecer el límite de distancia, hasta la cual se pueden seguir desarrollando voladuras de producción normal, sin tomar medidas especiales en cuanto a voladuras controladas. Servirá también para estimar el momento apropiado para realizar un Pre Corte, asumiendo que es deseable crear el plano de discontinuidad cuando el macizo rocoso detrás de la línea aún esté sano.

Se muestra un conjunto de datos representativos de diferentes tipos de rocas y los valores calculados para la velocidad pico de partícula (VPP), valores que se pueden usar inicialmente como referencia a partir de los cuales la vibración produce daño a nivel del macizo rocoso, también dan cuenta de una importante variación en las magnitudes de vibración que es capaz de resistir cada tipo de roca.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Aplicar el modelo predictivo de daño (Cross Hole) para la estimación del criterio de vibraciones de velocidad pico partícula máxima producido por voladura en la minera Constancia.

1.3.2. Objetivo Especifico

Estimar las vibraciones en taludes y banco inferior producido por voladura en la minera Constancia.

Determinar la Velocidad de Pico Partícula Crítico (VPP) y niveles de perturbación asociados al criterio de vibraciones.

1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El presente trabajo nos permite determinar la estimación del criterio de velocidad pico partícula máxima producido por la voladura. La onda de choque generada por la detonación de cargas explosivas se propaga en forma esférica y transfiere una energía vibracional al macizo rocoso. Estas ondas sísmicas transmiten a la roca movimientos de partículas en todas direcciones, con intensidades que dependen de la energía del explosivo, geometría de la voladura y la secuencia de detonación. Por lo tanto, para limitar estos efectos se debe emplear una técnica de voladura controlada, de manera tal de minimizar los efectos sobre el macizo rocoso. El control de las vibraciones hoy en día es un importante factor a considerar cuando se requiere que los taludes sean más estables y el resultado de la voladura sea el esperado.

Esto nos permitirá mitigar los accidentes que podrían producirse por desprendimiento de rocas en los taludes adyacentes al momento de que se inicie la voladura, previniendo la seguridad de todos en la empresa minera constancia.

1.5. HIPÓTESIS.

1.5.1. Hipótesis General.

Con la aplicación del modelo predictivo de daño (Cross Hole) se logrará la estimación de vibraciones de velocidad pico partícula máxima producido por voladura en la minera Constancia.

1.5.2. Hipótesis Específica.

Las estimaciones de vibraciones en los taludes y banco inferior producido por la voladura, permitirá determinar una estabilidad de talud óptima.

Con la determinación de la Velocidad de Pico Partícula Crítico (VPP) permitirá estimar la interacción de carga explosiva en el macizo rocoso dentro de la malla de perforación.

1.6. OPERACIÓN DE VARIBLES

1.6.1 Variable Independiente

Aplicación de modelo predictivo de daño (Cross Hole) para determinar la vibración producida por la voladura.

1.6.2 Variable Dependiente

- Estabilización Física de talud.
- Calculo de VPP crítico.
- Velocidad de propagación de onda en el medio rocoso.
- Determinación de onda P.
- Control de daño en paredes.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. BASES TEÓRICAS SOBRE EL TEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1.1 Ubicación

La Mina Constancia se encuentra ubicado al sureste de Los Andes, en los distritos de Chamaca y Livitaca, Provincia de Chumbivilcas, Departamento del Cusco. La superficie es de 22,516 hectáreas en 36 concesiones mineras en los Andes surorientales del Perú.

Las instalaciones proyectadas están emplazadas en los distritos de Chamaca y Velille, provincia de Chumbivilcas, en el departamento de Cusco; aproximadamente 634 kilómetros al sureste de la ciudad de Lima y 112 kilómetros al sur de la ciudad de Cusco (distancias en línea recta), a una altitud que varía entre los 4 000 y 4 500 m.

La ubicación de la mina Constancia está dada por las siguientes coordenadas geográficas y coordenadas UTM:

Coordenadas geográficas:

- 14° 27’ Latitud Sur.
- 71° 47’ Longitud sur.

Coordenadas UTM DATUM PSAD-56, zona 18:

- 8 400 685,14 Norte.
- 199 915.72 Este.

Imagen 1. Ubicación mina Constancia



Fuente: Internet google.

2.1.2 Accesibilidad

Se puede acceder a la zona por carretera asfaltada Arequipa-Yura- Juliaca (hasta el kilómetro 143), tomando el desvío hacia Tintaya, poblado de Espinar por carretera afirmada (139 kilómetros), este recorrido dura aproximadamente 4 horas. Desde este punto hasta el área de exploración existe un tramo de aproximadamente 80 kilómetros (2,5 horas adicionales) tomando la carretera a Velille hasta el kilómetro 68 y finalmente el desvío a Katanga 12 kilómetros. El recorrido total de Arequipa-Katanga es de 362 kilómetros.

Las distancias promedias con las ciudades más importantes son:

- Lima: 1 108.6 km.
- Arequipa: 368.1 km.
- Puno: 334.4 km.
- Cusco: 304.6 km.

2.1.3 Topografía Y Fisiografía

La topografía del área de influencia del proyecto Constancia está definida por un relieve moderado con valles de poca profundidad y cerros redondeados que alcanzan elevaciones de 4 000 a 5 000 m.

Se distinguen dos superficies de Erosión, una antigua donde se encuentran algunos vestigios ubicados al sur y sobre la que se depositó el volcánico Tacaza y otra más moderna que forma los rasgos topográficos actuales. Esta superficie de erosión presenta un drenaje dendrítico incipiente que indica la iniciación de una etapa erosiva más intensa.

Existen abundantes indicios de actividad glacial, y erosión relacionada con ella, que corresponde a la última etapa de glaciación. Esta erosión ha modelado los valles en forma de U.

2.1.4 Clima

Para la caracterización climática de la zona del proyecto, se consideró principalmente, la información de los registros de la estación meteorológica Constancia, perteneciente a Norsemont, cuyas coordenadas son 200 634 E 8 400 308 N y se encuentra ubicada al norte del proyecto a una altitud de 4 274 m.s.n.m.; así como de estaciones del SENAMHI ubicadas en los alrededores. De acuerdo a los registros de los parámetros climatológicos, se tiene los siguientes resultados:

Temperatura del aire: Temperatura mensual media entre 4,9°C y 7,4°C, sin una variación anual significativa y con una temperatura promedio anual de 6,2°C. La temperatura máxima promedio diaria para la estación meteorológica Yauri es de 18,9°C; en Acomayo de 20,9°C y en Imata de 12,3°C. En el caso de la temperatura mínima, se observa un promedio diario de -3,5°C en Yauri, 5,3°C en Acomayo y - 6,8°C en Imata. Los meses más fríos se encuentran en el periodo de mayo a setiembre (invierno), mientras que en los meses de noviembre a enero se encuentran las temperaturas más altas (verano).

Humedad relativa: Varía entre 53,3% y 74,7% como valores promedios durante la temporada de lluvia (octubre a abril), y entre 38,3% y 51,7% como valores promedios durante la temporada seca (mayo a setiembre). El valor de humedad promedio a lo largo del periodo de registro es de 57,3%.

En cuanto a vegetación, se observa que es escasa, alrededor del tajo, se pueden encontrar plantas silvestres como cactus y otras de su especie, en épocas de lluvias, se desarrollan pequeños arbustos, por lo general en los lugares más abrigados. En época de invierno, existe una total ausencia de vegetación, ello debido a la aridez y rocosidad del terreno.

2.1.5 Flora Y Fauna.

Durante las dos épocas de evaluación (seca y húmeda), se establecieron 44 transectos en toda el área efectiva de exploración. En total, se registraron 121 especies vegetales, agrupadas en 34 familias botánicas. De acuerdo con el hábito de crecimiento de cada especie, los registros incluyen la presencia de 105 especies herbáceas, 9 especies sub arbustivas, 6 especies arbustivas, y 1 especie suculenta. Se determinó la presencia de 3 formaciones vegetales, que cubren la extensión del área efectiva de exploración. Estas formaciones vegetales presentan una distribución variable en el área de estudio, siendo el pajonal, una de las formaciones que ocupó una mayor área sobre el terreno. Las formaciones

“pajonal” y “césped” de “puna” presentaron mayor porcentaje en la distribución del número de especies en la zona de estudio. A continuación, se mencionan estas formaciones vegetales encontradas:

- Pradera muy húmeda / bofedal.
- Césped de puna.
- Matorral / Pajonal + pedregal – roquedal.
- Matorral / Pajonal + césped de puna.
- Pajonal.
- Pajonal – Pedregal – Roquedal.
- Pedregal – Roquedal.
- Pajonal – césped de Puna.

Fauna. Se registró un total de 22 especies de mamíferos pertenecientes a 4 órdenes y 11 familias taxonómicas. El orden que presentó mayor riqueza específica fue Rodentia con 14 especies (63%). Dentro de este orden la familia Cricetidae tuvo la mayor representatividad con 11 especies. Se registraron mediante observaciones directas, grupos e individuos solitarios de algunas especies medianas y grandes como el zorro andino (Lycalopex culpaeus), la taruca (Hippocamelus antisensis) y vizcacha (Lagidium peruanum).

La zona del hábitat del río Chilloroya influye notablemente en la riqueza observada ejerciendo una atracción importante para la avifauna local donde se observaron hasta 39 especies. Algunas especies que se pueden encontrar son Buteo albigula “águila cuello blanco”, Calidris melanotos “playero pectoral” y Orochelidon andecola “golondrina andina” y Circus cinereus “gavilán cenizo”. En necesario resaltar que estas especies sólo se registraron en este lado de la zona de estudio, atraídas por el hábitat que ofrece el río.

2.1.6 Recursos.

En la zona, donde se ubica el área de producción de Constancia, se encuentran cantidad de recursos minerales con contenido de cobre, molibdeno, plata y oro.

En esta zona, no se encuentra otro tipo de recursos. Es escaso el recurso hídrico, energético e inclusive humano, por la aridez de la zona.

El recurso humano calificado, procede tanto de las ciudades vecinas, como de la capital y el extranjero. El recurso humano no calificado, procede de departamentos vecinos, tales como Puno, Moquegua, Arequipa, y del mismo Cusco. Material para construcción civil, si existe tanto como arna fina, afirmado, y rocas.

2.1.7 Geomorfología

a- Relieve Y Elevaciones.

En el área de exploración se pueden distinguir tres unidades geomorfológicas:

Colinas y lomadas (Co-lo): Conformada por las cadenas de cerros de aspecto alargado, redondeado constituida por afloramientos rocosos de naturaleza sedimentaria, volcánica e intrusiva pertenecientes a las formaciones litológicas: Chilloroya, Arcurquina, Orcopampa, Alpabamba e intrusivo Apurímac.

Valles o quebradas aluviales (Av): Constituida por las áreas por donde discurren las aguas superficiales temporales y permanentes. Hacia el río Chilloroya; está conformada por depósitos fluvio-glaciares.

Lomadas morrénicas (Lo-m): Esta unidad geomorfológica se ubica principalmente hacia la parte norte del área de exploración, destacando por su forma, dimensión y por estar conformada exclusivamente por depósitos morrénicos.

b-. Drenaje.

La zona la Modificación del Proyecto de Exploración Constancia se ubica en la subcuenca del río Chilloroya que es un tributario del río Velille, el que a su vez es un tributario del río Apurímac y forma parte de la vertiente del Atlántico.

El río Chilloroya nace a los 4 925 m de altitud en la línea divisoria con las microcuencas de la quebrada Pallallaje y la quebrada Huayllu Mayo. La subcuenca se orienta hacia la dirección noroeste y tiene un área de drenaje de 317,84 kilómetros y una pendiente media de 21,17%. Su curso principal tiene una longitud de 47,69 kilómetros con una pendiente media de 3,3% y en su recorrido recibe el aporte de numerosos tributarios, siendo los más importantes: la quebrada Casanuma, la quebrada Huayllachane, la quebrada Sacrane y la quebrada Marcapata.

Las microcuencas que se encuentran en el área de influencia directa e indirecta del proyecto de exploración son: Microcuenca de la quebrada Huayllachane; Cuenca de la quebrada Pincullune-Condormarca; Microcuenca de la quebrada Sacrane y Microcuenca de la quebrada Casanuma.

c-. Procesos Geomórficos.

Intemperismo: La descomposición o la desintegración de la roca in situ son notorias en la Diorita debido a los cambios bruscos de temperatura.

Erosión: La acción pluvial se encuentra relativamente estacionaria debido a que las lluvias son poco perceptibles, en cambio los efectos del viento se realizan con mayor dinamismo, dando como resultado el desgaste uniforme de las rocas expuestas.

Vulcanismo: El movimiento de magmas hacia la superficie terrestre se produjo hace 75 millones de años en todo el sur del Perú.

En el área, este acontecimiento volcánico está determinado por la presencia de rocas volcánicas del grupo Toquepala.

Orogénesis: Está manifestada por la formación de montañas representada por la apófisis del batolito andino (Diorita) e intrusiones pequeñas debido a la formación de la cordillera de los Andes.

2.1.8 Geología.

La mayor parte de la mineralización esta en diseminaciones, fisúrales de vetas de cuarzo y rellenos de diaclasamientos de sulfuros, que son asociados principalmente con el micro Pórfido de monzonita. La mineralización de Cu tiene un mejor desarrollo en el centro del yacimiento, dentro del pórfido de monzonita.

Mineralógicamente, el depósito desde su origen ha sufrido sucesivos cambios químicos y estructurales. La mineralización ha seguido los procesos de evolución comunes a todos los depósitos de este tipo, originando finalmente, la alteración potásica, alteración propílica, alteración fílica. En zonas de falla la mineralización corresponde a conjuntos de tipo hipogeo, con mineralización de skarn en forma secundaria.

2.1.9 Geología Regional.

El proyecto se encuentra emplazado en la margen este del batolito Andahuaylas – Yauri, aproximadamente a 3 kilómetros, al sur-este de la antigua mina Katanga.

Las rocas más antiguas en el área, corresponden a una secuencia de areniscas de grano de tamaño mediano de color blanco, rojo, violeta o gris con intercalaciones de esquistos de barro de color rojizo de la Formación Chilloroya del Cretácico Inferior (también denominada Formación Murco).

La Formación Arcurquina descansa de manera discordante sobre la Formación Chilloroya y se correlaciona con la Formación Ferrobamba del Cretácico Superior. Estas rocas se encuentran expuestas en un área alargada de norte- sur, de 15 kilómetros de largo por 5 kilómetros de ancho, conformando una secuencia de calizas, calcarenitas y lentes de conglomerados. Estas formaciones sedimentarias han sufrido fenómenos intrusivos por parte de las rocas plutónicas que pertenecen al Andahuaylas-Yauri Batolito de la era Oligoceno.

El batolito varía de diorítico a granodiorítico en composición, con plagioclasa y ortoclasa feldespato, cuarzo, hornablenda, biotita, apatita, circón y esfeno como los minerales de formación rocosa. Con presencia de mantos pequeños, vetas y lentes de skarn de magnetita masiva son comunes en el área, y probablemente se relacionan con el emplazamiento del batolito.

Varias intrusiones de roca ígnea monzoníticas, diques o lacolitos intrusionan y cortan transversalmente todas las litologías que se mencionan líneas arriba. Cuando estas rocas han intrusionado calizas, es común encontrar skarn mineralizados, algunos de los cuales contienen mineralización Cu como aquella en la mina Katanga.

Algunas de las intrusiones de roca ígnea tienen características típicas de yacimientos de cobre porfirítico.

- Rocas Intrusivas.

Múltiples fases de monzonita y pórfido de monzonita caracterizan gran parte del área de superficie del prospecto, y también dominan los tipos de rocas que se observaron en las perforaciones hasta la fecha. En esta etapa de comprensión del yacimiento, se han reconocido al menos cuatro fases principales de intrusión, y la segunda más antigua se encuentra asociada con el evento de mineralización principal. Del más antiguo al más reciente, estas son las siguientes:

a) Diorita - DI. Esta estructura no es parte del evento intrusivo asociado con la mineralización; sin embargo, forma el 'Basamento intrusivo' del Batolito Andahuaylas-Yauri, donde está emplazado el yacimiento de cobre porfirítico de Constancia.

b) Monzonita Porfirítica 1 - MP1. Esta unidad aflora como una gran intrusión de roca ígnea del cerro Constancia, extendiéndose al oeste hasta San José. Esta unidad alberga la mayor parte de la mineralización relacionada con el pórfido. Se caracteriza por fenocristales de plagioclasa abundantes (40- 50%) hasta 3 mm de longitud. La hornablenda constituye el 5- 7%, con cristales alargados de hasta 6 mm de largo. La matriz es rosácea, con cristales de ortoclasa y magnetita más pequeños. Las partes superiores de esta intrusión de roca ígnea se encuentran en su mayor parte lixiviadas, haciendo difícil su reconocimiento.

c) Monzonita Microporfirítica - MMP. Esta unidad estructural se caracteriza por una textura de grano fino con cristales de plagioclasa (60-70%) hasta 2 mm de longitud. La biotita (1-3%) y la magnetita (<1%) son visibles en la matriz de color gris claro. Dentro de este cuerpo, ocurren parches de alteración redondeada de 1-7 mm de ancho, simulando xenolitos.

Este cuerpo aflora como una intrusión de roca ígnea en el sur, pero se encuentra más diseminada al oeste del depósito, incluyendo la zona de San José. Se observó que algunos diques de MMP cortan el pórfido MP1.

d) Monzonita Porfirítica Cuarzosa - QMP. La unidad de Pórfido esto ocurre mayormente en la zona de Constancia, como diques anchos de tendencia norte-sur a norte-noroeste con límites de grano fino oscuro endurecido, clasificados erróneamente algunas veces como andesitas en registros previos. Plagioclasas abundantes (40-60%) con cristales de hornablenda tabulares y bien formados (7%) ocurren como fenocristales en una matriz de color verdoso.

La característica más distintiva es una cantidad pequeña (1- 2%) de "ojos" de cuarzo de tres a cuatro milímetros de ancho. Estos diques tienen hasta 60 m de ancho, están basados en secciones, y en su mayoría son verticales.

No existe mineralización asociada con los diques. Esta unidad parece estar desplazada horizontalmente por una falla derecha en las proximidades de los Sondajes CO-05-024 y CO-05-036.

e) Monzonita Porfirítica 2 - MP2. Esta Manzanita Porfirítica es similar a un dique aflora en su mayor parte hacia el oeste de Constancia, entre las zonas de Constancia y San José. Se caracteriza por fenocristales de plagioclasa abundantes (60-70%) hasta 4 mm de longitud. Estos cristales se encuentran normalmente sub-redondeados en una matriz de color blanquecino con pequeñas cantidades de magnetita y de rocas máficas (hb>bio) en aproximadamente 5-8%.

La manzanita porfirítica posee una ocurrencia geológica, con estructuras tabulares, en formas de diques de hasta 150 m de ancho, con rumbo norte-sur, posiblemente con buzamiento acusado hacia el este.

f) Andesita-AAN. Esta unidad posee una roca afanítica de color gris oscuro (color verdoso por la cloritización), con fenocristales de plagioclasa y hornablenda, y con aproximadamente 1% de magnetita. Esto ocurre principalmente como cuerpos similares a diques angostos, alguno de ellos cerca de los contactos con pórfidos de cuarzo manzanita. Además, varias unidades brechadas y diques félsicos menores ocurren en el área.

El prospecto de pórfido de cobre de Constancia se encuentra ubicado en el margen oriental del Batolito Andahuaylas-Yauri, aproximadamente 3 kilómetros al sureste de la antigua mina Katanga, plano 03.

2.1.10 Alteraciones.

- Alteración Potásica (Potasio-Feldespato, Biotita, Magnetita, Anhidrita, Calcopirita, Bornita, Molibdenita).
- Alteración Propilitica (Epidota, Clorita, Calcita, Pirita, Rodocrosita, Esfalerita, Galena).
- Alteración Fílica (Sericita, Cuarzo, Pirita, Calcopirita).

2.1.11 Geología Local.

El mapeo geológico de superficie realizado por Norsemont entre los años 2005 y 2008 ha sido complementada en gran medida por los nuevos caminos de perforación y plataformas para los 317 puntos de perforación que se han construido.

La interpretación de los resultados de los testigos de perforación ha sido de bastante utilidad para la mejora del mapeo de la superficie.

2.1.12 Geología Estructural.

De igual forma que ocurre con la mayoría de complejos de cobre porfídico, la actividad estructural en Constancia ha jugado el papel más significativo en la preparación y localización de la alteración hidrotermal y en el acompañamiento de la mineralización de cobre, molibdeno, plata, oro, incluyendo la formación de skarn.

Los sistemas principales de diaclasamiento inter-mineral y post-mineral en el área del yacimiento tienen rumbo noreste. Uno de los mejor conocidos es la "Falla de Barita", y se hace referencia a la dirección de la "Barita".

El sistema estructural de la Falla Barita está formado por un número de fallas de vetas casi paralelas que transportan sulfatos de metal base y barita. Estas vetas han sido explotadas mediante trabajos mineros

artesanales en toda la propiedad. Este sistema es claramente visible en los mapas magnéticos de suelos, controlando las características principales incluyendo los cambios topográficos y cortes en la zona de San José.

Un segundo sistema importante tiene rumbo norte-sur. Éste parece ser más reciente que el sistema de Barita, controlando parte del yacimiento San José y la mayor parte de las brechas silicificadas (algunas de ellas mineralizadas) en el sistema. Éste tiene la misma dirección que los diques post-minerales, y puede haberse originado en la medida que existen cortes de tensión hacia la dirección de la Barita.

Al final de la secuencia se encuentra el sistema de fallas con orientación norte-noroeste a sur-sureste, cuyo principal ejemplo es la Falla Yanak.

Estas fallas generan extensas áreas de salbanda y roca molida, algunas de las cuales muestran altas pendientes hidráulicas.

a-. Fallas Barita.

La Falla de Barita es una estructura de formación tardía, con rumbo noreste-suroeste entre las zonas de Constancia y San José. La zona de falla tiene por lo general de 5 a 1O metros de ancho, y se caracteriza por óxidos brechados de monzonita-barita-cuarzo-cobre y galena. En detalle, la veta muestra una estructura escalonada, con secciones ajustadas al noreste seguidas de cortes de tensión este-noreste e incluso este-oeste, las cuales contienen mineralización de mejor ley.

Varios tajos y túneles de exploración se encuentran ubicados a lo largo de esta estructura en más de 1 000 m. Ocurren vetas paralelas, las cuales muestran rumbo y mineralización similar. Debido a la escasez de afloramientos y al rumbo cambiante, la Falla de Barita se define como una zona con fallas simples definidas en oposición a la zona de corte, donde las fallas / vetas individuales no han sido definidas.

La Falla de Barita tiene movimiento de cobre Post - Hipógeno tardío que difiere y limita la zona de Constancia en su lado noroeste. El sistema de fallas puede asimismo controlar la zona de San José en su lado sur.

Es posible que las zonas de San José y Constancia puedan tener desplazamiento horizontal equivalente a lo largo de una Falla de Barita lateral izquierda.

b-. Falla San José.

Esta es una falla que está ligada al lado oriental del tajo San José. Tiene rumbo norte-sur; sin embargo, serpentea en su extensión norte, donde puede estar asociada con las zonas de silicificación de Yanaccaca.

c-. Falla Yanak.

Esta falla pertenece al evento estructural más reciente en el área. La estructura presenta rumbo norte-noroeste a sur- sureste y se encuentra ubicado entre los yacimientos Constancia y San José. Ha sido reconocida por aproximadamente 3 kilómetros y ha desarrollado una zona de influencia de hasta 50 m de ancho donde se encuentran presentes la salbanda y roca molida.

2.1.13 Geología Económica

El yacimiento Constancia es un sistema pórfido de Cu-(Mo) que incluye mineralización skarn de cobre. Este tipo de mineralización es común en el cinturón metalogénico Yauri-Andahuaylas donde varios prospectos pórfidos de Cu-Mo han sido definidos, pero no han sido explotados.

a-. Tipo de yacimiento.

Las características geológicas, en “Tajo Constancia”, son típicas de los depósitos polimetálicos tipo Pórfido de Cobre – Molibdeno - Oro.

El pórfido Constancia ha sido evaluado por 317 sondajes de perforación diamantina (antes de enero de 2009), algunos hasta profundidades de más de 600 metros, con un máximo de 675.80 metros (CO-08-133). La mayor parte de la mineralización ocurre como diseminaciones, yacimientos fisurales de vetas de cuarzo y rellenos de diaclasamientos de sulfuros, asociados principalmente con el “Micro Pórfido de Monzonita 1 (MP1)”. El MP1 muestra cuarzo - sericita extensiva o alteración potásica.

La mineralización de cobre está mejor desarrollada en la parte central del yacimiento dentro del pórfido de monzonita y se encuentra abierto a una profundidad por debajo de 3800 msnm (por ejemplo, CO-06-083, CO-07-105, CO-08-233, CO-08-278 y CO-08-288).

La oxidación y lixiviación son intensas, casi sin sulfatos frescos que ocurran en la superficie. Una capa lixiviada tiene lugar a profundidades variables, hasta un máximo de 100 metros donde el diaclasamiento es más intenso, o en rocas con desarrollo de yacimiento fisural intenso.

La oxidación decrece hacia los márgenes del prospecto y en el skarn de magnetita, alcanzando solamente unas cuantas decenas de metros de profundidad. Los minerales de óxido de hierro principales son jarosita y goethita con cantidades menores de hematita después de calcocita supergénica. Las leyes de cobre normales en la capa lixiviada se encuentran en el orden de 100 - 200 ppm, valores considerados como muy anómalos en términos geoquímicos. Los valores de molibdeno y oro en la capa lixiviada son generalmente similares a las leyes hipogénicas.

La zona de San José se encuentra en 350 metros al oeste-noroeste del límite occidental del yacimiento Constancia y está separada de éste por la Zona de la Falla de Barita. Se completaron sesenta taladros

de perforación en el área; muchos de ellos con el propósito de identificar la extensión y profundidad de la mineralización. Los controles principales para el área parecen ser dos fallas que lo conectan en el este (Falla San José) y el oeste. Estas dos fallas tienen generalmente rumbo norte-sur, pero podrían unirse en uno solo en la zona de Yanaccaca.

La mineralización en esta área corresponde mayormente a conjuntos del tipo Hipógeno, con mineralización de skarn en forma secundaria.

b-. Caracterización Mineralógica del yacimiento Constancia.

El yacimiento Constancia es un sistema pórfido de Cu-Mo que incluye mineralización skarn de cobre. Este tipo de mineralización es común en el cinturón metalogénico Yauri-Andahuaylas donde varios prospectos pórfidos de Cu-Mo han sido descritos, pero no han sido explotados.

Se han encontrado cinco asociaciones (o tipos) de mineral diferente dentro del área del Proyecto Constancia, siendo así:

- Hipógeno. Mineralización hipogénica de estilo porfídico, que incluye yacimiento fisural de vetas de cuarzo diseminadas y mineralización de calcopirita-molibdenita de diaclasamiento controlado en el intrusivo. La mineralización hipogénica (Tipo1) constituye el grueso del yacimiento, extendiéndose por debajo del nivel de 3900 metros.

- Skarn. La mineralización de skarn (Tipo 2) es volumétricamente más pequeña que el Tipo 1; sin embargo, las leyes son normalmente superiores, y la mineralización ocurre en la superficie o cerca de ésta.

En el contacto entre los intrusivos y las calizas, se desarrolla skarn granate y magnetita, mientras que la asociación piroxena – diópsido (granate – epidota) es más común en areniscas calcáreas y arcosas de la Formación Chilloroya.

- Supérgeno. El enriquecimiento supérgeno (Tipo 3) ocurre inmediatamente debajo del Tipo 2, y ocasionalmente como remanentes dentro de la capa lixiviada. Las leyes más altas de cobre en el pórfido Constancia están generalmente asociadas con este tipo y con la zona de skarn.

La Digenita – covelita - calcocita supergénica (cobre nativo raro) principalmente alojada en intrusivo, que yace por debajo de una capa lixiviada.

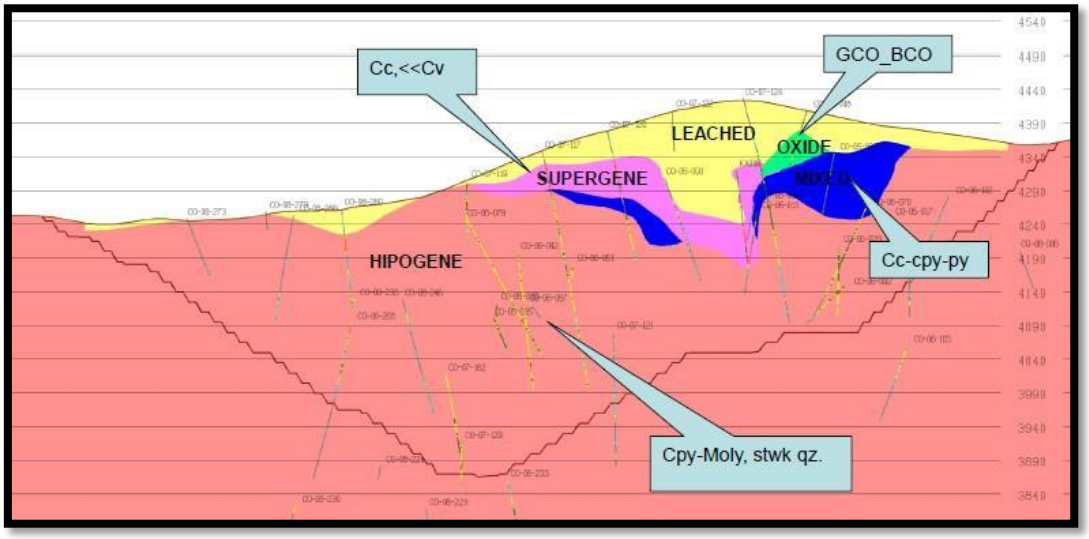
- Mixto o de transición. La zona transicional (Tipo 4) corresponde a la zona donde se mezcla la mineralización supergénica e hipogénica; por ejemplo, donde coexisten los sulfuros supérgeno e Hipógeno.

Es también denominado transicional (Mezclado) que incluye sulfuros de cobre secundario / calcopirita en la monzonita (transición del Tipo 1 y Tipo 3 líneas arriba).

- Óxidos de cobre. La mineralización de óxido de cobre (Tipo 5) ocurre localmente. Mientras sea superficial, es volumétricamente pequeña y por lo tanto, no es considerada relevante para su explotación en esta etapa de desarrollo. Para efectos de un análisis económico, considerando un tratamiento y procesamiento de minerales, sólo se ha considerado los tipos de mineralizaciones 1, 2 y 3; y además el tipo 4, considerando que en esencia es la mezcla del tipo 1 y 3, correspondiente al material Hipógeno y Supérgeno. Los óxidos de cobre no han sido considerados para efectos de evaluación económica. Siendo parte del material de desmonte.

Se conocen dos áreas de mineralización de estilo porfídico dentro del área del proyecto, Constancia y San José. En Constancia, la mineralización es más profunda que la observada en San José, la cual ocurre en la superficie. La zona mineralizada se extiende aproximadamente 1200 m en la dirección norte-sur y 800 m en la dirección este-oeste. Se identificaron varias áreas nuevas de exploración en los alrededores de Constancia, distintas de “Yanaccaca” y “Old Adits”.

Imagen 2. Mineralización Mina Constancia



Fuente: Área Geología mina Constancia.

c-. Radios Metálicos.

En la parte de la mina la ratio de concentración promedio es de 1:2 respecto al mineral con el desmonte.

d-. Reserva.

Las reservas probadas y probables han continuado creciendo en la mina Constancia a 598 millones de toneladas a un grado de cobre equivalente de 0.40% que respalda una vida útil de 20 años en la mina. El plan de la mina es tal que la planta de proceso está operando a la capacidad del circuito de molienda en toda la LOM. La planta es Procesando 31 Mtpa

(90,000 tpd con un 94% de disponibilidad), con una tasa de extracción de 70Mtpa (mineral más residuos). Las reservas minerales de Constancia y Pampacancha por pozo se resumen en la Tabla 1 y por tipo de mineral en la tabla 2.

Tabla 1. Constancia and Pampacancha Mineral Reserves at June 30th, 2016.

	Category	**Mt**	**Cu (%)**	**Mo (g/t)**	**Ag (g/t)**	**Au (g/t)**
Constancia	Probado	442.3	0.30	99	2.99	0.037
	Probable	109.4	0.23	64	2.66	0.035
	Total 2P	551.7	0.29	92	2.93	0.037
Pampacancha	Probado	22.8	0.53	149	4.44	0.299
	Probable	20.2	0.44	164	3.85	0.250
	Total 2P	43	0.49	156	4.17	0.276
Stockpile	Probado	3.5	0.50	115	4.53	0.075
	Probado	468.6	0.32	101	3.08	0.05
	Probable	129.6	0.26	80	2.85	0.068
Total		**598.2**	**0.30**	**97**	**3.03**	**0.054**

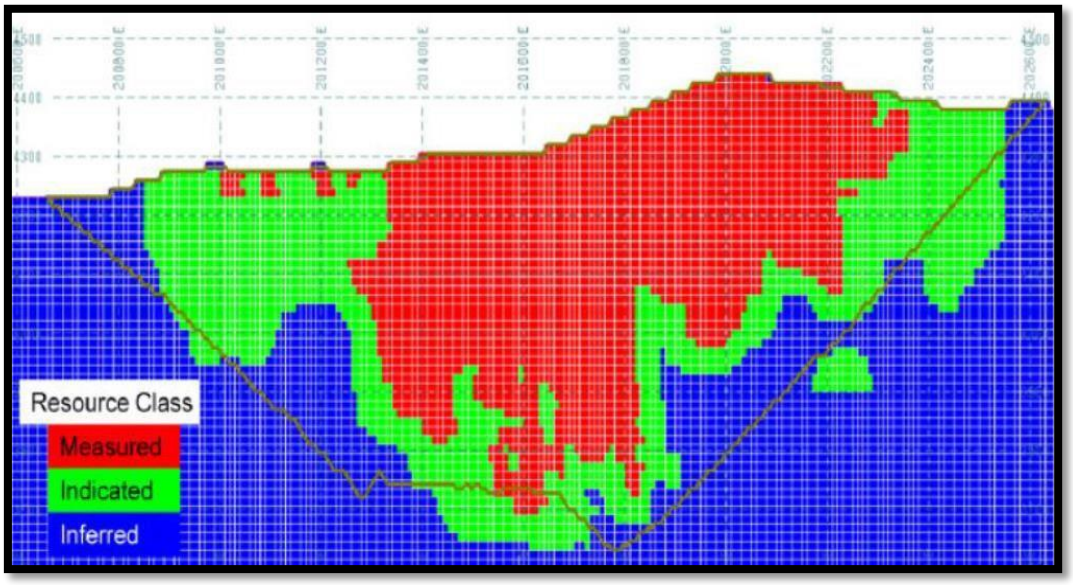
Fuente. Elaboración propia

Tabla 2. Constancia and Pampacancha Mineral Reserves by Ore Type at June 30th, 2016

Constancia	Category	Mt	Cu (%)	Mo (g/t)	Ag (g/t)	Au (g/t)
Hipogeno	Probado	360.3	0.28	100	2.76	0.036
	Probable	99.4	0.23	63	2.55	0.035
Supergeno	Probado	29.1	0.49	94	4.56	0.035
	Probable	1.2	0.34	110	5.74	0.040
Skarn	Probado	19.7	0.46	120	4.07	0.066
	Probable	1.4	0.90	92	3.51	0.030
Mezclada	Probado	3.5	0.45	98	3.42	0.040
	Probable	0.1	0.19	36	1.80	0.018
HiZinc	Probado	29.6	0.25	71	3.56	0.041
	Probable	7.4	0.20	63	3.65	0.034
	Probado	442.2	0.30	99	2.99	0.037
	Probable	109.5	0.23	64	2.67	0.035
Subtotal		598.2	0.30	97	3.03	0.054
Constancia	Category	Mt	Cu (%)	Mo (g/t)	Ag (g/t)	Au (g/t)
Skarn	Probado	22.8	0.53	149	4.44	0.299
	Probable	20.2	0.44	164	3.85	0.250
Subtotal		598.2	0.30	97	3.03	0.054
Stockpile	Category	Mt	Cu (%)	Mo (g/t)	Ag (g/t)	Au (g/t)
	Probado	3.5	0.50	115	4.53	0.075
Subtotal		3.5	0.50	115	4.53	0.075
Total		598.2	0.30	97	3.03	0.054

Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3. Recursos minerales Mina Constancia.



Fuente: Área de Geología – Mina constancia, 2015.

2.1.14 Clasificación de la masa rocosa en la mina Constancia.

El Yacimiento Constancia es el resultado de una secuencia de eventos tectónicos y magmáticos, que han deformado e instruido a la roca sedimentaria preexistente (formaciones Chilloroya y Arcurquina). Las exposiciones de la roca sedimentaria siguen una dirección de norte a sur, y están rodeadas de roca intrusiva del Batolito de Apurímac.

Las rocas sedimentarias están constituidas por areniscas, limolitas y calizas de las formaciones Chilloroya y Arcurquina. Mientras que los cuerpos ígneos pertenecen al Batolito de Apurímac y comprenden la mayor parte del área del yacimiento, constituido principalmente por dioritas, monzonitas, y monzodioritas. Se observa la presencia de diques (QMP), Estos afloramientos, aislados cortan los cuerpos intrusivos y no siguen una tendencia estructural específica, sino más bien se localizarían en zonas de debilidad pre-existentes.

2.1.15 Caracterización geomecánica del macizo rocoso en la mina Constancia.

Para la zonificación geomecánica, se empleó la siguiente información:

- Los resultados de la caracterización de la masa rocosa, especialmente las características estructurales establecidas a partir de un mapeo geotécnico.

- La calidad de la masa rocosa determinada por la clasificación geomecánica (RMR).

- Los planos y secciones topográficas y geológicas proporcionadas en la mina Constancia.

- Las observaciones in-situ realizadas durante el mapeo geotécnico.

2.1.16 Interpretación de la caracterización geomecánica.

FASE I: La cara Norte está conformada por roca dura a muy dura (R4-R5), la cara Sur está conformada por roca dura a muy dura (R4-R5), la cara Este está conformado por roca media a muy dura (R3-R5) y la cara Oeste está conformada roca dura a muy dura (R4-R5).

FASE II: La cara Norte está conformada por roca media a muy dura (R3-R5), la cara Sur está conformada por roca media a muy dura (R3-R5), la cara Este está conformado por roca débil a muy dura (R2-R5). En esta fase no hay presencia de bancos mapeables en la cara W, debido a la configuración actual de minado del tajo.

FASE IV: La cara Norte está conformada por roca débil a muy dura (R2-R5), la cara Sur está conformada por roca media a muy dura (R3-R5), la cara Este está conformado por roca muy dura (R5), la cara Oeste está conformada por roca media a muy dura (R3-R5).

2.1.17 Operaciones Mina

Las operaciones de minado del tajo abierto Constancia están basadas en técnicas de minado convencional de tajo abierto, como el uso de perforación & voladura, palas y camiones mineros.

a-. Perforación

La perforación primaria se realiza con hasta tres perforadoras PIT VIPER 271 de Atlas Copco, con un diámetro de perforación de 11” , 10 5/8” en las distintas fases y para taladros de Pre corte, buffer y short hole con un diámetro de 9 5/8”, La velocidad de perforación es de 27 m/h aproximadamente.

b-. Mallas de Perforación

Se trabaja con mallas rectangulares, que van desde 6 x 3 m hasta 8.4 x 9 m.

- En la Fase I, se tienen mallas de 7 x 8 m.
- En la Fase II, se tienen mallas de 6 x 3 m, 7 x 7 m, 7.5 x 7.5 m, 7.8 x 8 m, 8 x 8.4 m y 8.4 x 9 m.
- En la Fase VII, se tienen mallas de 7.8 x 8.4 m y 8.4 x 9 m.
- Pre corte: El espaciamiento de las mallas de pre corte varían de 1.5 m a 2.5 m, lo define el área de geotecnia.

c-. Diámetros de Perforación

Se trabaja con 3 diámetros de perforación:

- Diámetro de 9 7/8’’, las perforadoras con dicho diámetro se encuentran ubicadas en la fase II, IV y VII. Taladros de Pre corte, Short Hole, Piezómetro, Anillo.
- Diámetro de, 11’’ y 10 5/8’’ las perforadoras con dicho diámetro se encuentran ubicadas en la fase I, II, IV y VII.

Debido a los continuos cambios de las perforadoras, pueden llegar a estar en una misma fase y en un mismo proyecto perforadoras de diámetros distintos, ello afecta el diseño de carga.

d-. Equipos de Perforación

Hasta fines del 2018, para la perforación se utilizan 3 perforadoras Pit Viper 271 de Atlas Copco.

2.1.18 Voladura

Para taladros de las distintas fases del proyecto Constancia el factor de Potencia cambia ya que se utiliza una mezcla explosiva diferente, esto depende de las condiciones del terreno y se explica mejor en las siguientes tablas 3 y 4.

Tabla 3. Tipo de mezcla explosiva utilizada en cada fase del proyecto.

FASES PROYECTO	TIPO DE MEZCLA EXPLOSIVA				
	HA 37	HA 46	HA 55	HA 64	HA 73
FASE I			X		X
FASE II	X	X	X	X	X
FASE IV	X	X	X		X
FASE VII	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**

Fuente. Elaboración Propia.

Tabla 4. Factor de potencia según fase del proyecto

FASES PROYECTO	FACTOR DE POTENCIA (KG/TM)
FASE I	0.3315 - 0.3956
FASE II	0.1078 - 1.5388
FASE IV	0.0775 - 0.3395
FASE VII	0.2018 - 0.2703

Fuente: Elaboración Propia.

Los principales insumos que se utilizan son:

- Nitrato de Amonio.
- Emulsión Matriz.
- Altos Explosivos (Primers o boosters, explosivo de pre corte y Cordón detonante).
- Accesorios para voladura (detonadores y retardos).
- Iniciadores (Línea Silenciosa, Fulminantes, Mecha de seguridad).

a-. Diseño De Carga

El diseño de carga se hace buscando el factor de potencia adecuado según las características del macizo rocoso, considerando además el esponjamiento de la mezcla explosiva, el espaciamiento de la malla y el diámetro de la perforadora, lo que termina variando y siendo una variable dependiente de las ya mencionadas es el taco.

b-. Tiempos De Retardo

El amarre es una actividad realizada por personal de enaex, quienes en coordinación con el jefe de perforación y disparos definen los tiempos para cada disparo.

• Tiempo entre taladros: 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12,13 Milisegundos.

• Tiempo entre filas: 106, 111, 127, 107, 127, 107, 117,130 Milisegundos.

c-. Accesorios De Voladura

Los accesorios de voladura usados son:

- Detonador electrónico Davey Tronic.
- Dual 17/700; 25/700; 17/1000
- Conector Unidireccional superficie de 12 m (0,25,35,42,65,100 Milisegundos)
- Taponex

d-. Equipos Usados En Voladura

En la unidad Constancia se cuenta con los siguientes equipos utilizados para la voladura:

Tabla 5. Equipos utilizados para el servicio de voladura

EQUIPOS UTILIZADOS PARA EL SERVICIO DE VOLADURA		
CAMION FABRICA	**CAPACIDAD NITRATO**	**CAPACIDAD EMULSION**
CAMION FABRICA Q-41 (Milodon) Marca Mercedez Benz	8.6 TN	20 TN
CAMION FABRICA Q-38 Marca Mercedez Benz	6.25 TN	12 TN
CAMION FABRICA Q-45 Marca Mercedez Benz	7.5 TN	12 TN
EQUIPOS AUXILIARES	**CANTIDAD**	
BOB CAT 035	2	
TELEHANDER TH-406	1	
CAMIONETA FURGON	2	

Fuente. Elaboración propia

2.1.19 CARGUÍO

El proceso consiste en cargar el material volado para posteriormente trasporta lo para su tratamiento sea para lixiviación, flotación o desmonte.

a-. Equipos De Carguío

• Se realiza con 3 palas hidráulicas Hitachi de la serie EX5600de capacidad de cuchara de 28 m3 (72 toneladas) y un cargador frontal CAT 994H.

2.1.20 ACARREO

a-. Equipos de Acarreo

Con respecto a equipos en la unidad constancia se cuenta con 19 camiones CAT 793 F y 3 camiones Hitachi EH 4100 AC de 240

toneladas de capacidad, cuenta con 3 palas hidráulicas de 72 toneladas/cuchara tiene una productividad de 3500 toneladas/hr las palas.

2.1.21 Producción mina Constancia

La producción diaria de la mina constancia es de 80,000 toneladas día, su producción promedio anual de cobre 82,000 toneladas y tiene una vida útil de la mina de 22 años.

2.2. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.

Para mejor comprensión de la presente investigación se consideró los términos más importantes.

Estimación: “Es la acción de tasar el valor de parámetros a través de estadísticos, con un nivel incertidumbre determinable, también suele utilizarse para denotar el valor de un estimador”. (Alvarado & Obaji, 2008, p. 109).

Estimación es el proceso de determinar una aproximación sobre cierta medida, lo que se valora con algún propósito, es la apreciación o análisis cuantitativo y/o cualitativo, de distintos sucesos pasados que se requiere determinar.

Modelo: “Es un objeto, concepto o conjunto de relaciones que se utiliza para representar y estudiar de forma simple y comprensible una porción de la realidad” (Felicísimo, 2009, pág. 1)

El modelo es una representación parcial de la realidad que refiere a que, a la imposibilidad de explicar una totalidad, e involucrar el total de las variables que esta pueda tener, por lo que se puede llegar a la conclusión de que el modelo hace referencia a la explicación de un fenómeno o proceso específico.

Partícula: La partícula es el fragmento más pequeño de materia que mantiene las propiedades químicas de un cuerpo.

Predicción: Una predicción es una anticipación de lo que sucederá en situaciones ya existentes, a menudo ocurren después de experimentos de investigaciones que le permiten cumplir con las condiciones y estiman que, si se repite, el resultado será el mismo. (Bembibre, 2011).

Velocidad: Rapidez del movimiento de las partículas medido en distancia por tiempo (milímetros/ segundo). La velocidad máxima que alcanza el movimiento de partículas mientras pasa la onda vibratoria se conoce como velocidad pico de partícula (PPV por sus siglas en ingles) y suele usarse para calcular la posibilidad del daño. (Loayza, 2014, p. 31).

Vibración: Una vibración se refiere al movimiento repetitivo entorno a la posición de equilibrio. Ya que esta posición es a la que llegará cuando la fuerza interactúa sobre ella sea igual a cero. Este movimiento no necesariamente muestra deformaciones internas del cuerpo entero, a diferencia de una vibración.

Voladura: Son procesos tridimensionales donde las presiones se producen por los explosivos confinados dentro del taladro, perforado en la roca, generan una zona de alta concentración de energía que produce dos efectos dinámicos “Fragmentación” y “Desplazamiento”. En otras palabras, la voladura es la fragmentación de la roca y otros materiales sólidos mediante explosivos confinados en un adosado en su superficie. (Loayza, 2014, p. 23).

III. METODOLOGÍA:

3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

En el ámbito de la metodología, la investigación se clasifica en un tipo de investigación descriptiva, analítica debido al análisis profundo de los datos obtenidos del campo en el procesamiento de datos, también de tipo aplicativo esto tiene un enlace con el diseño de investigación para ser aplicado en el campo para determinar valores reales y luego ser procesados. (Hernandez Fernandes y Baptista, 2015).

El diseño de investigación es experimental subdivido como un experimento verdadero debido a que se aplicara en el campo moviendo la variable independiente por completo y ver el efecto que tiene en la variable dependiente de la investigación (Hernandez Fernandes y Baptista, 2015).

Experimental – Descriptiva.

Según el Autor de metodología de investigación Ñaupas et al (2014), menciona cuatro niveles de investigación, de los cuales la presente investigación se clasifica en un nivel de investigación IB descriptiva debido al análisis de datos que se obtendrán en el proceso de recolección de datos y también se basa en un IB experimental debido al diseño de investigación que se harán diferentes pruebas para la recolección de datos. (Ñaupas et. al, 2014).

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. La Población.

La población para dicha investigación está conformada por las áreas de voladura de rocas en la minera constancia y diferentes lugares que no son cuantificables.

3.2.2. La Muestra.

Siendo una población no cuantificable se determina por el criterio del autor Niño (2011) “se utiliza muestra por conveniencia para poblaciones desconocidas”, por lo tanto, se utiliza un muestreo no probabilístico usando la técnica por conveniencia de tomar las zonas de criticidad en el proceso de voladura es por lo cual el criterio de exclusión será los lugares de voladura normal.

3.3. INSTRUMENTOS MATERIALES Y EQUIPOS

Para garantizar la prosperidad de la prueba se requiere los siguientes materiales e equipos que a continuación se detalla:

- Perforaciones de Cross Hole con perforadora Pit viper 271 Atlas Copco con diámetro de 270 mm.
- Explosivo Heavy Anfo 73 (Densidad de explosivo 1.32 gr/cc).
- Grava de 1”. Para taco de los taladros.
- Tubería de PVC con un diámetro de 2”.
- Acoples para tubería de PVC.
- Pegamento de PVC.
- Cinta Aluminizada.
- Marcador indeleble.
- Cemento de construcción tipo I, marca TOPEX Concreto Fácil.
- Agua y grava para la mezcla de cemento.
- Alicate pelacables.

- Cinta aislante.
- Cable multifilar FTP o UTP de 300 metros aproximadamente.

EQUIPOS

- Sismógrafo marca INSTANTEL, Serie BE 18271 Minimate Plus/8 de (08) canales.
- Geófonos marca GEOBLAST (02) unidades de 28 Hz.
- Llave USB Blast Ware.
- Breakout Box o Caja Militar dos (02) unidades.
- Cable Trigger dos (02) unidades.
- Multímetro.
- Cámara fotográfica.

3.4. PROCEDIMIENTOS

El comportamiento de la vibración del terreno depende de las características intrínsecas a la roca, Para la prueba se utilizan geófonos triaxiales enterrados. Los resultados obtenidos, definieron la relación entre la carga explosiva y la distancia del foco de la detonación, como un escalamiento cuadrático de la forma.

Esta consideración debe tenerse presente mientras la diferencia de cota pueda influir en el cálculo de la distancia efectiva del sensor a la carga de detonación, por lo que, para distancias grandes donde la diferencia en altura no sea significativa en relación a las distancias en los ejes este y norte, basta con que el geófono se encuentre suficientemente fijo a la roca dentro de la perforación por medio de detrito para no incurrir en errores al momento de registrar estará definida por una serie de taladros

dispuestos de manera lineal con una longitud de carga de 1.2 metros. y una longitud de perforación de 10.4 metros. y separados por una distancia de 3 metros.

El ensayo considero un arreglo de 08 cargas explosivas de 100 kilogramos de Heavy Anfo 73 en un diámetro de perforación de 270 mm. Estas cargas fueron detonadas secuencialmente mediante el sistema de iniciación electrónico DAVEY TRONIC. La señal de cada onda sísmica generada por cada carga fue registrada por dos geófonos triaxiales ubicados linealmente al centro de la secuencia explosiva.

3.5. ANÁLISIS DE DATOS

3.5.1. VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS

Siendo una tesis de diseño experimental la investigación se basa en la teoría experimental que determina la validez y la confiabilidad mediante la eficiencia de control mediante los protocolos de trabajo y el cumplimiento de los procedimientos escritos de trabajo en el campo, además los resultados de confiabilidad es posible determinar con el coeficiente de confiabilidad de Alfa de Cron Bach tal como determina el autor de Hernández, Fernández y Baptista (2014, pp. 416-418).

3.5.2. MÉTODOS Y TÉCNICAS PARA LA PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

Para la aplicación del modelo predictivo Cross Hole se seguirán diferentes etapas comenzando de la Apertura de la solicitud de prueba de cross hole.

Seguidamente realizar la recolección de los datos de mina:

- Longitud de Perforación (Lp),
- Burden (B)

- Espaciamiento (S)
- Altura de Banco (H)
- Sobreperforación (J)
- Diámetro de perforación (ϕ)
- Tipo de Explosivo
- Densidad de explosivo

Teniendo los datos correspondientes, verificar que toda prueba debe estar contemplada por el cliente, por tanto se debe definir la zona de pruebas, y si este representa a una unidad litológica, unidad geológica, geotécnica, sector, etc. Que debe ser definida en una reunión con el cliente entre el Soporte Técnico de Enaex – Área de Perforación y Voladura y Área de Geomecánica.

De dichas zonas establecidas para la prueba se debe recolectar los siguientes datos:

- Resistencia a la compresión simple (UCS)
- Resistencia a la tracción
- Módulo de Elasticidad (E)
- Coeficiente de Poisson
- Densidad de la roca
- RMR

Determinación de cantidad de pozos. La prueba de Croos Hole, debe contemplar un mínimo de dos pozos de monitoreo y 8 pozos con cargas cilíndricas. Dando un total de 10 pozos distribuidos espacialmente de forma lineal y debe cumplirse de esta manera.

La distancia y ubicación entre los geófonos debe ser tal que las perforaciones no afecten la estabilidad de esta. Se propone una distancia mínima de 03 metros. La ubicación de los geófonos será en el nivel inferior de la perforación por lo que estos deben cumplir una longitud adecuada.

Cálculo de longitud de perforación y carga: La longitud de perforación debe considerar una distancia adecuada en la que el terreno no se encuentre alterado por la actividad de voladuras superiores y/o cercanas (Siendo conservador mayor igual a 8m).

La longitud de carga (Lc) va a corresponder 1.2 m. Esta carga puede ser modificada dependiendo del tipo de explosivo con la que se realice la prueba.

Distancia de los pozos cargados al geófono. Determinar la cantidad de carga (Q) a utilizar en la prueba por pozo:

$$\frac{\boldsymbol{kg}}{\boldsymbol{m}} = \boldsymbol{densidad}(\boldsymbol{\rho}) * \boldsymbol{\phi^2} * \mathbf{0.507}$$

$$\boldsymbol{Q = lC * Kg/m}$$

Ecuación 1. Cantidad de Carga (Q).

Para determinar la distancia del primer pozo con carga al primer geófono debe considerarse la siguiente relación:

$$\mathbf{1.5} \leq \frac{\boldsymbol{Distancia}\ (\boldsymbol{m})}{\boldsymbol{Q}}$$

Cuando la relación se cumple en igualdad, se tiene la primera distancia a medir.

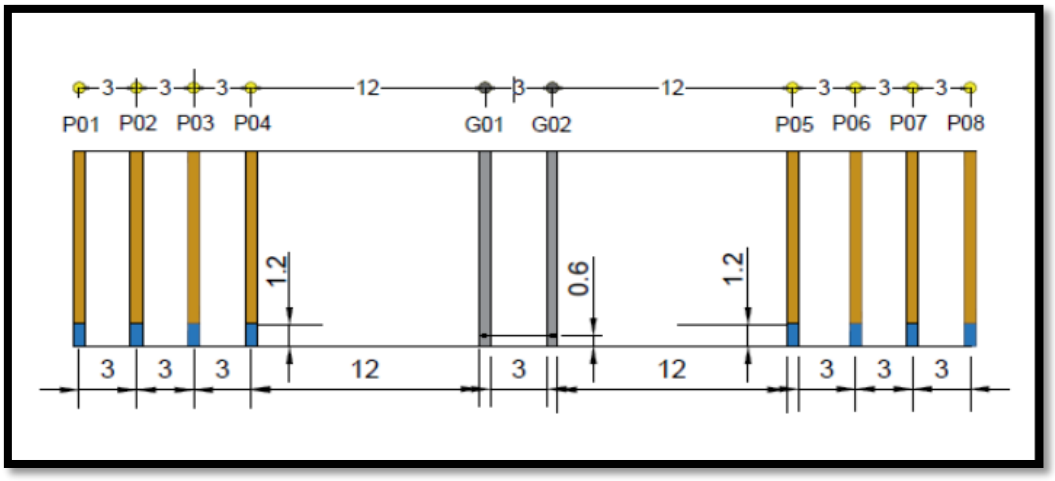
Dependiendo del tipo de mina y prueba que se desee hacer, la separación que se tenga entre pozos con carga será

$$\boldsymbol{Distancia}_{\boldsymbol{pozo-pozo}} \leq \boldsymbol{4m}$$

Recordar que, si bien es cierto, a distancias más cercanas podríamos tener una menor variabilidad de la prueba, la detonación en orden de las cargas podría afectar las condiciones del siguiente barreno.

Se debe elaborar un reporte escrito antes de realizar la prueba de Cross Hole, que debe ser revisado y aprobado por la Oficina Técnica. El diseño debe estar diseñado en algún software donde sea posible observarlo y modificarlo, de preferencia en el software Paradigm.

Imagen 4 . Ubicación de taladros mina Constancia.



Fuente: Esquema de perfil de prueba para campo cercano.

IV. RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DE LA PRUEBA EMPLEADA

4.1.1. MARCO TEÓRICO: AMPLITUD DE VIBRACIÓN Y DETERMINACIÓN DE ONDA P

Para confeccionar el modelo de atenuación de vibraciones inducidas al macizo, ha sido utilizado el postulado de Holmberg & Persson (H&P). La Ecuación 2. Modelo de vibraciones H&P en campo cercano, indica la relación de la amplitud de vibraciones para campo cercano considerando el factor de H&P en función de la distancia y ubicación del punto estimado respecto de la fuente explosiva - ver **Figura 5.** Distribución geométrica para estimación de vibraciones por H&P.

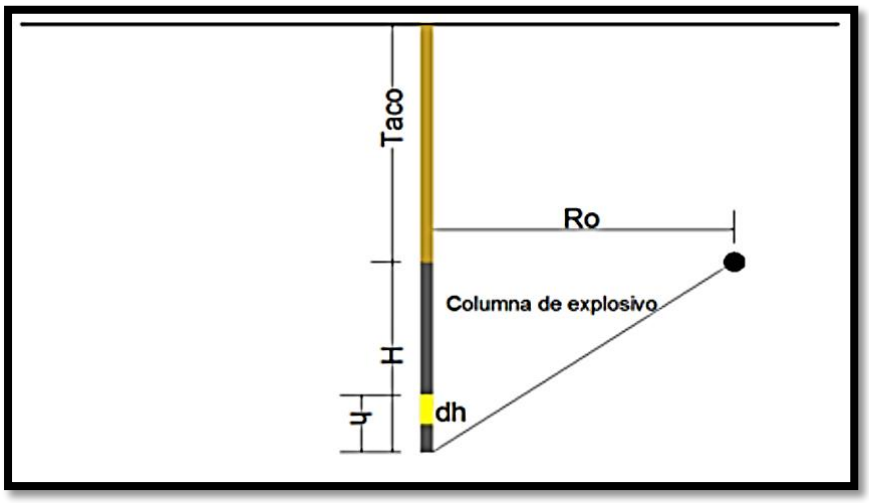
$$v = K\left(\frac{q}{R_0}\right)^{\propto}\left[\tan^{-1}{*}\frac{z}{R_0} - \tan^{-1}{*}\frac{z-h}{R_0}\right]^{\propto}$$

Ecuación 2. Modelo de vibraciones H&P en campo cercano

Siendo:

- v = Velocidad pico de partícula (m/s)
- q = Carga lineal (kg/m)
- h = Carga total en el pozo (m)
- x = Posición de la carga elemental desde el piso del pozo (m)
- R0 = Distancia horizontal desde la carga explosiva hasta el punto de monitoreo (m)
- Z = Distancia vertical desde el punto de monitoreo hasta el nivel de piso del pozo.
- K = Constante de eficiencia de trasmisión del explosivo en el macizo rocoso
- α = Factor de atenuación del macizo rocoso.

Imagen 5. Distribución geométrica para estimación de vibraciones por H&P



Fuente: Elaboración Propia.

Mediante la lectura de las señales de vibración generadas por cargas las explosivas es posible determinar la velocidad dela onda p del macizo rocoso según indica la Ecuación 3. Cálculo de velocidad de propagación.

$$Vp = \frac{T_{G2} - T_{G1}}{d}$$

Ecuación 3. Cálculo de velocidad de propagación.

Siendo:

- Vp = Velocidad de propagación (m/s)
- TG2 = Tiempo de arribo de señal de onda sísmica en Geófono 2
- TG1 = Tiempo de arribo de señal de onda sísmica en Geófono 1
- d = Distancia entre sismógrafos (m)

Para poder estimar un rango de Velocidad de Pico Partícula Crítico (VPP crítico) fueron usados los parámetros geotécnicos de roca

intacta. Cabe señalar que, el VPP crítico asume rotura antes que ocurra el fallamiento por tensión.

Como puede observarse en la Ecuación 4, la velocidad límite es una función directamente proporcional a la resistencia a la tracción de la roca e inversamente proporcional al módulo de Young; y, debido a que el macizo roco se presenta como un medio anisotrópico, las propiedades geotécnicas de la roca varían generando un rango de valores a trabajar. Por lo que, para trabajar en el rango antes mencionado, el escenario más desfavorable corresponderá a un menor valor de resistencia a la tracción y un mayor valor del módulo de Young. Análogamente, el caso más favorable, corresponde al mayor valor de resistencia a la tracción y menor valor del módulo de Young.

$$VPP_{CRíTICO} = \frac{\sigma_t * V_P}{E}$$

Ecuación 4. VPP crítico de la roca

Donde:

- σt = Resistencia a la tracción (Mpa)
- E = Modulo de Young (Gpa)
- Vp = Velocidad de la onda P (m/s)

Los niveles de daño están asociados al VPP crítico, por lo que, determinar su rango de acción es definido haciendo uso del mejor y peor escenario del VPP crítico. Los criterios de daño (Tabla 6) son utilizados teóricamente, en base a ensayos de laboratorio, para relacionar el umbral de PPV con el impacto generado en la roca. La relación considera cuatro niveles; desde el grado de pulverización del macizo a la dilatación de las fracturas preexistentes y generadas por causa de la energía liberada por la detonación.

Tabla 6. Criterios de Daño

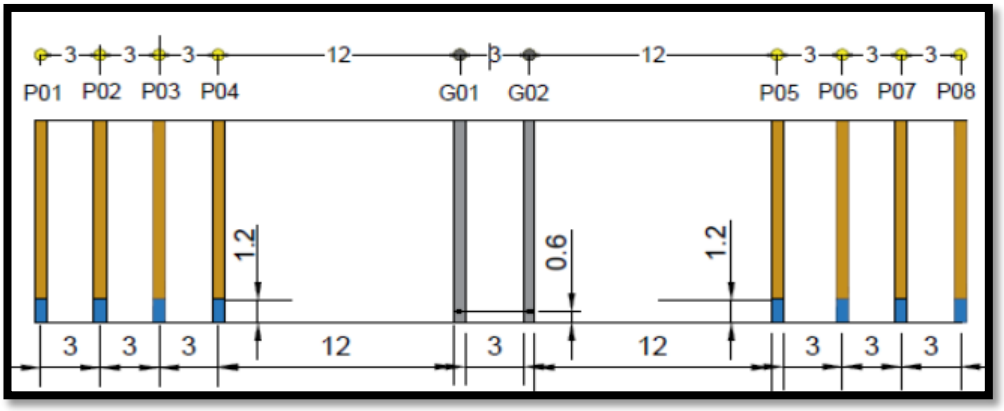
Nivel de Perturbación	Relación vpp
Pulverización	8*VPPc
Fracturamiento Intenso	4*VPPc
Aparición de Nuevas grietas	VPPc
Dilatación de Fracturas	¼ * VPPc

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.2. IMPLEMENTACIÓN PRUEBA CAMPO CERCANO EN FASE 02 MP1 POTÁSICO – MINA CONSTANCIA

La prueba fue desarrollada en la Litología MP1 – Potásico en la fase 02 en Mina Constancia. En específico, el ensayo consideró un arreglo de 08 cargas explosivas de aproximadamente 100 (kg) de Heavy Anfo 73 en un diámetro de perforación de 10 5/8. Estas cargas fueron detonadas secuencialmente mediante el sistema de iniciación electrónico DAVEYTRONIC. La señal de cada onda sísmica generada por cada carga fue registrada por dos geófonos triaxiales ubicados linealmente al centro de la secuencia explosiva.

Imagen 6. Esquema de perfil de prueba para campo cercano



Fuente: Esquema de perfil de prueba para campo cercano.

La Tabla 7. Posición espacial de cargas y geófonos, resume la configuración implementada en campo para el desarrollo del ensayo. Las desviaciones levantadas en la operación son menores, pudiendo calificarse el proceso de perforación dentro de estándares aceptables. Estas pruebas fueron realizadas en fase 5 en un tipo de roca Qq siendo un tipo de roca semidura.

Tabla 7. Posición espacial de cargas y geófonos

Norte	Este	Elevación	Profundidad Geófono (m)	Largo Pozo (m)	H (m)	Masa Carga (kg)	Secuencia (ms)
8399693.856	201869.91	4199.468	9.8	-	-	-	-
8399696.407	201867.98	4199.547	9.8				
8399677.390	201883.04	4199.38	-	10.4	1.2	100	1300
8399679.850	201881.16	4199.411	-	10.4	1.2	100	1600
8399682.160	201879.19	4199.329	-	10.4	1.2	100	1900
8399684.560	201877.40	4199.298	-	10.4	1.2	100	2200
8399705.700	201860.70	4199.399	-	10.4	1.2	100	3900
8399708.120	201858.84	4199.328	-	10.4	1.2	100	3600
8399710.520	201856.89	4199.456	-	10.4	1.2	100	3300
8399712.69	201854.98	4199.659	-	10.4	1.2	100	3000

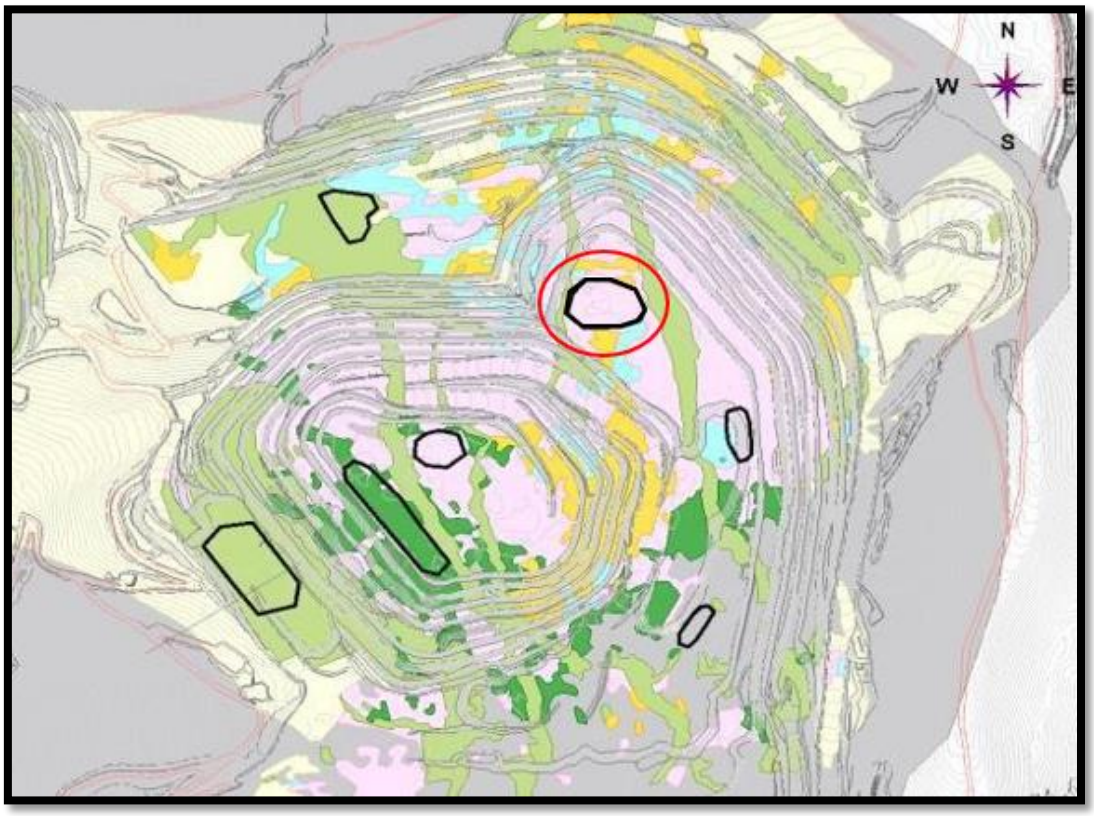
Fuente: Elaboración Propia.

Imagen 7. Implementación de prueba en terreno en Fase 02 MP1 Mina



Fuente: Área de Asistencia Técnica Enaex.

Imagen 8. Ubicación de prueba en Fase 02 Mina Constancia se dispuso en el círculo rojo

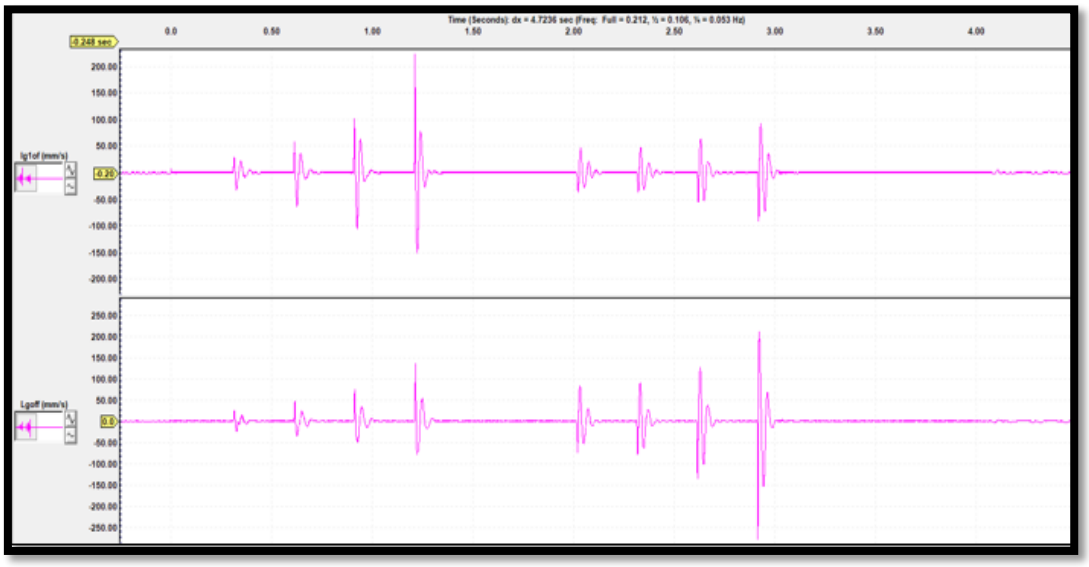


Fuente: Área Geología Constancia.

4.1.3. REGISTRO DE VIBRACIÓN DE CAMPO CERCANO EN FASE 02 MP1 POTÁSICA – MINA CONSTANCIA

La prueba realizada y las señales de vibración registradas están dentro del umbral esperado e indican que la implementación del proceso de P&V, junto con la instalación de equipos de medición, fue apropiada para desarrollar un modelo representativo del macizo rocoso. La Figura 9 presenta el registro obtenido en ambos geófonos en su componente longitudinal; en éstas, se puede observar los 08 pulsos que fueron generados por las cargas explosivas.

Imagen 9. Registro de vibraciones, G1 Y G2 (vista del registro en su componente longitudinal en el software Blastware Instantel)



Fuente: Área de Asistencia Técnica Enaex

4.1.4. MODELO DE ATENUACIÓN DE VIBRACIONES EN FASE 02 MP1 POTÁSICA – MINA CONSTANCIA

El análisis de las ondas generadas por la detonación de los pozos de prueba, nos permiten generar un modelo matemático predictivo de las velocidades de partícula propias de la litología y alteración seleccionada. De la prueba se puede desprender un total de 08 datos por geófono para generar una regresión que represente adecuadamente las relaciones consideradas. En la Tabla 8, se muestran los valores de los pozos que fueron considerados dentro del modelamiento mostrando sus distancias, factor H&P y VPP suma respectivamente. Cabe señalar que, las señales o pulsos de onda descartados muestran un comportamiento anómalo de la distribución normal.

Tabla 8. Registro de VPP y Factor H&P para sensores G1 y G2.

G1				G2			
ID Pozo	**Ro (m)**	**Factor H&P**	**VPP Suma (mm/s)**	**ID Pozo**	**Ro (m)**	**Factor H&P**	**VPP Suma (mm/s)**
P01	21.062	0.204	69.0446	**P01**	24.263	0.154	53.3225
P02	-	-	-	**P02**	21.164	0.202	64.0434
P03	14.926	0.406	146.3490	**P03**	18.128	0.276	96.7704
P04	11.932	0.636	232.9720	**P04**	15.133	0.395	139.936
P05	15.007	0.402	118.3920	**P05**	11.805	0.650	310.342
P06	18.056	0.278	77.5163	**P06**	14.854	0.410	150.093
P07	21.150	0.202	57.8195	**P07**	17.949	0.281	94.7955
P08	24.036	0.157	58.0313	**P08**	20.835	0.209	90.2814

Fuente: Área de Voladura Enaex

Luego, se confeccionó el modelo de atenuación de vibraciones para litología correspondiente a Monzonita Porfirítica alteración Potásica. La Ecuación 5. Modelo de vibraciones en campo cercano Fase 02 MP1 Potásica. La Ecuación 6. Modelo de vibraciones en campo cercano Fase 2 MP1 Potásica - Constancia, 93% de confianza. Es importante considerar que el modelo con 93% permite realizar estimaciones de vibración ajustadas siempre a los niveles más altos medidos; de este modo, la predicción de vibración representa sin subestimar las amplitudes que puedan generarse en el macizo rocoso.

$$PPV = 393.14 * (\mathrm{H\&P})^{1.0986}$$

Ecuación 5. Modelo de vibraciones en campo cercano Fase 02 MP1 Potásica – Constancia

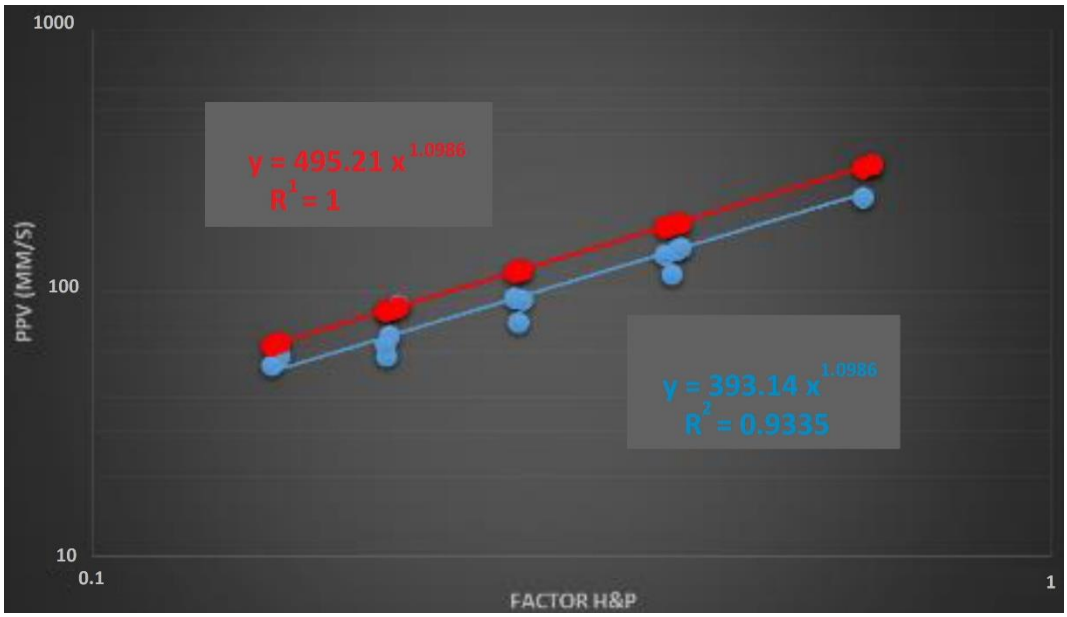
$$PPV = 495.21 * (\mathrm{H\&P})^{1.0986}$$

Ecuación 6. Modelo de vibraciones en campo cercano Fase 2 MP1 Potásica - Constancia, 93% de confianza

El modelo confeccionado cuenta con una correlación del 93% entre la vibración estimada y el factor de H&P definido por la distancia y

tipo de carga explosiva detonada – ver Figura 10. Representación gráfica modelo H&P - Constancia.

Imagen 10. Representación gráfica modelo H&P – Constancia.



Fuente: Área de Asistencia Técnica Enaex

4.2. VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA EN EL MEDIO ROCOSO

El cálculo de la velocidad de propagación de la roca o VP en el macizo rocoso se da por medio del arribo de la onda a dos transductores separados por una distancia conocida, esta variación de tiempo corresponde a la velocidad que toma la onda en viajar por un medio con características singulares, por lo que dicho cálculo solo corresponderá a la litología definida para el estudio- ver Tabla 9.

Tabla 9. Valores estadísticos para el cálculo de VP

Tolerancia	Cantidad	Unidades
N° de Datos	08	Unid.
Valor máximo	2,186	m/s
Valor Mínimo	1,455	m/s
Desviación Estándar	305	m/s
Promedio	1,820	m/s

Fuente: Elaboración Propia.

4.3. CALCULO DEL VPP CRÍTICO PARA FASE 02 MP1 POTÁSICA – MINA CONSTANCIA

Para el análisis del VPP crítico, han sido utilizados los parámetros geotécnicos de la Tabla 10, correspondiente a la litología MP1 alteración Potásica y la VP de la roca detallado en el apartado 4.2. Velocidad de propagación de la onda en el medio rocoso. Tal como se mencionó anteriormente, la determinación del VPP crítico se realizará en concordancia de la Ecuación 4. VPP crítico de la roca, desprendiendo la Tabla 11.

Tabla 10. Parámetros Geotécnicos MP1 - Potásica - Constancia

Parámetro Geotécnico	Valor	Unidades
UCS	40	Mpa
Resistencia a la Tracción	7.85	Mpa
Densidad	2.5	g/cc
Módulo de Young	17.19	Gpa
Coeficiente de Poisson		0.295

Fuente: Área de Geotecnia Constancia.

Tabla 11. Cálculo del VPP crítico

Descripción	Cantidad	Unidades
$VPP_{crítico}$	831	mm/s

Fuente: Elaboración Propia.

4.4. CRITERIOS DEL NIVEL DE PERTURBACIÓN PARA FASE 02 MP1 POTÁSICA – MINA CONSTANCIA

Una vez definido el modelo de vibraciones en campo cercano, determinado la VP de la roca y la magnitud de VPP crítico, se procederá a calcular las relaciones existentes entre el nivel de vibración o amplitud que se genera entre la interacción de las cargas de los barrenos y el grado de perturbación que sufre el macizo rocoso. Cabe señalar que estas relaciones han sido definidas en función de las propiedades de roca intacta entregadas por el área de geotecnia de Mina Constancia. En la Tabla 12, se pueden observar los niveles de daño asociados al VPP crítico.

Tabla 12. Niveles de perturbación asociados al VPP crítico

Nivel de Perturbación	Relación VPP	Vibración (mm/s)
Pulverización	8 * VPPc	6,647
Fracturamiento Intenso	4 * VPPc	3,324
Aparición de Nuevas grietas	VPPc	831
Dilatación de Fracturas	¼ * VPPc	208

Fuente: Elaboración Propia.

Con todos estos parámetros evaluados y mediante el apoyo del software especializado utilizado; se puede simular la condición de vibración generada por la configuración de perforación y voladura aplicada en la Fase 02 MP1 Potásica, enfocándose en los niveles de vibración que llegan al talud de diseño y la cota inferior del banco. Cabe mencionar que dicha simulación

es una aproximación estática de lo que ocurre realmente, ya que deja de considerar fallas principales, estratificaciones del macizo rocoso y otras consideraciones geológicas estructurales; así mismo, es calculada con parámetros de roca intacta y considera el secuenciamiento de los pozos. A pesar de lo mencionado, es una muy buena aproximación que permite definir un valor o nivel de aceptabilidad de vibración para poder empezar a tomar decisiones que permitan mitigar dicha energía entregada por el explosivo en la detonación. Los factores a los cuales se somete el VPPC puede variar a partir de este primer cálculo que se realiza y que debe ser confirmada con datos de campo o el ajuste necesario que requiera.

4.5. SIMULACIONES DE PERTURBACIÓN EN TALUDES FASE 02 MP1 POTÁSICA – MINA CONSTANCIA

Una vez definido el modelo representativo de campo cercano, es decir, definiendo el valor de “k”, factor de eficiencia del explosivo en la roca y explosivo, y “alpha”, factor de atenuación definimos los VPP crítico que permiten establecer umbrales de perturbación referenciales, es posible realizar las simulaciones del efecto de las voladuras hacia los taludes y pisos que se generarán. Para la simulación se hará uso del proyecto PY 002 Nv 4230 Fase 02.

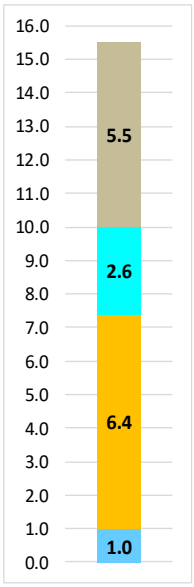
En este sentido, el primer paso es entender la configuración de carga que tiene Mina Constancia. En las Figuras 11, 12, 13 y 14, se puede observar la configuración actual; en ella se describe dos tipos de configuraciones de carga pudiéndose diferenciar:

- Taladros de Producción. Dicha configuración considerada una carga entre dos decks de aire con una longitud de carga de 6.4 m de Heavy Anfo 46 con sobreperforación de 0.5m.
- Taladros de Buffer. Posee una carga de 205 kilogramos en el fondo del taladro y está destinado a cuidar los perfiles del talud.

Imagen 11. Configuración de carga Fase 02 MP1 Potásica - Constancia. Taladro de producción.

ZONA DE CRITICIDAD	
Densidad de Roca	2.6
Diámetro (Pulg.)	10 5/8
Burden (m)	9.2
Espaciamiento (m)	9.2
Altura de banco (m)	15.0
Sobreperforación (m)	0.5
Aire Superior (m)	2.6
Aire Inferior (m)	1.0
Carga de Fondo (m)	6.4
Kg. Carga de Fondo	440
Carga de Columna (m)	
Kg. Carga de Columna	0
Taco (m)	5.5
Tonelaje	3301.0
Factor de Potencia	0.133

Tipo de Roca	
Explosivo	HA-46

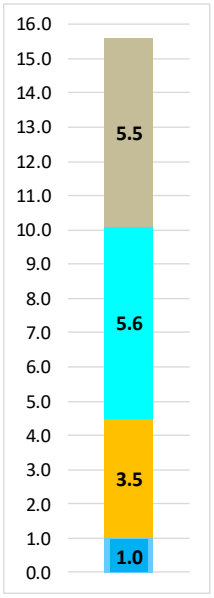


Fuente: Área de Voladura Enaex.

Imagen 12. Configuración de carga Fase 02 MP1 Potásica - Constancia. Taladro del buffer.

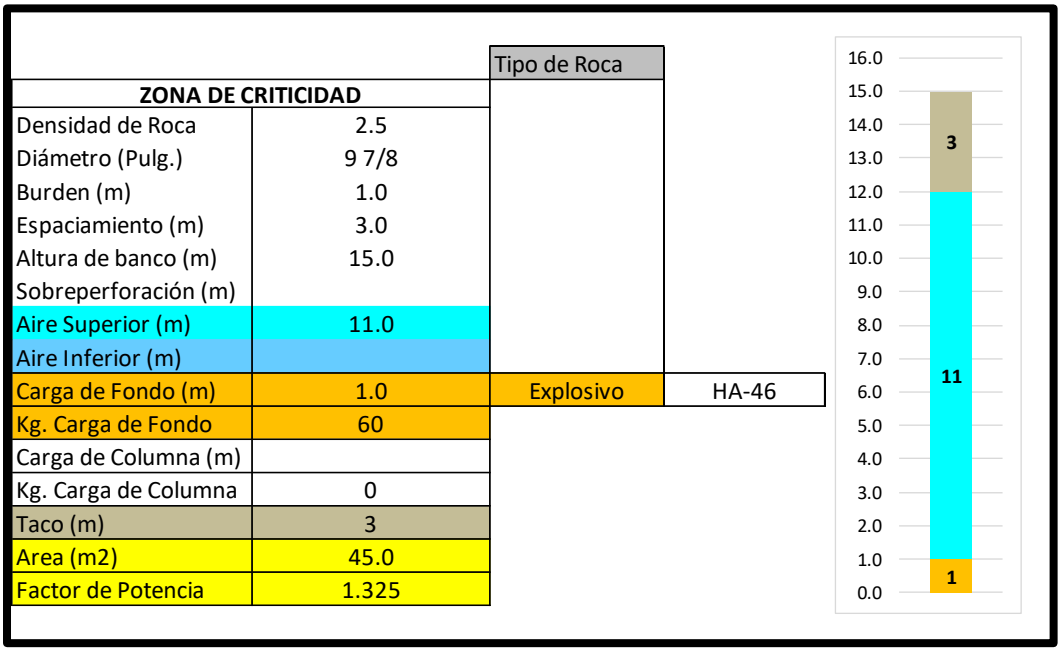
ZONA DE CRITICIDAD	
Densidad de Roca	2.5
Diámetro (Pulg.)	9 7/8
Burden (m)	7.0
Espaciamiento (m)	6.0
Altura de banco (m)	15.0
Sobreperforación (m)	0.5
Aire Superior (m)	5.6
Aire Inferior (m)	1.0
Carga de Fondo (m)	3.5
Kg. Carga de Fondo	205
Carga de Columna (m)	
Kg. Carga de Columna	
Taco (m)	5.5
Tonelaje	1575.0
Factor de Potencia	0.13

Tipo de Roca	
Explosivo	HA-46



Fuente: Área de Voladura Enaex.

Imagen 13. Configuración de carga Fase 02 MP1 Potásica - Constancia. Taladro del Piezómetro.

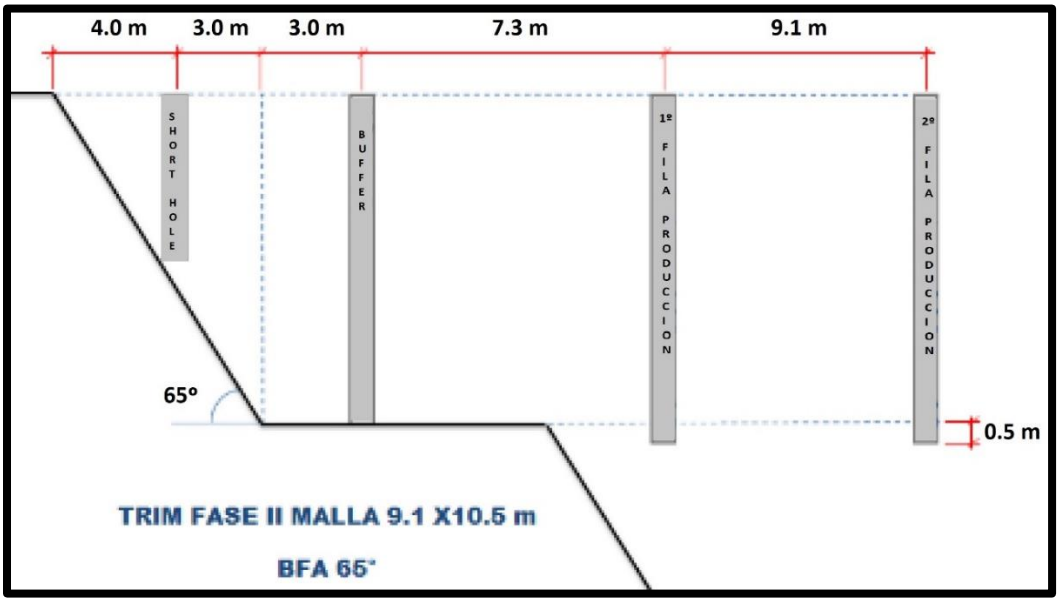


ZONA DE CRITICIDAD	
Densidad de Roca	2.5
Diámetro (Pulg.)	9 7/8
Burden (m)	1.0
Espaciamiento (m)	3.0
Altura de banco (m)	15.0
Sobreperforación (m)	
Aire Superior (m)	11.0
Aire Inferior (m)	
Carga de Fondo (m)	1.0
Kg. Carga de Fondo	60
Carga de Columna (m)	
Kg. Carga de Columna	0
Taco (m)	3
Area (m2)	45.0
Factor de Potencia	1.325

Tipo de Roca	
Explosivo	HA-46

Fuente: Área de Voladura Enaex.

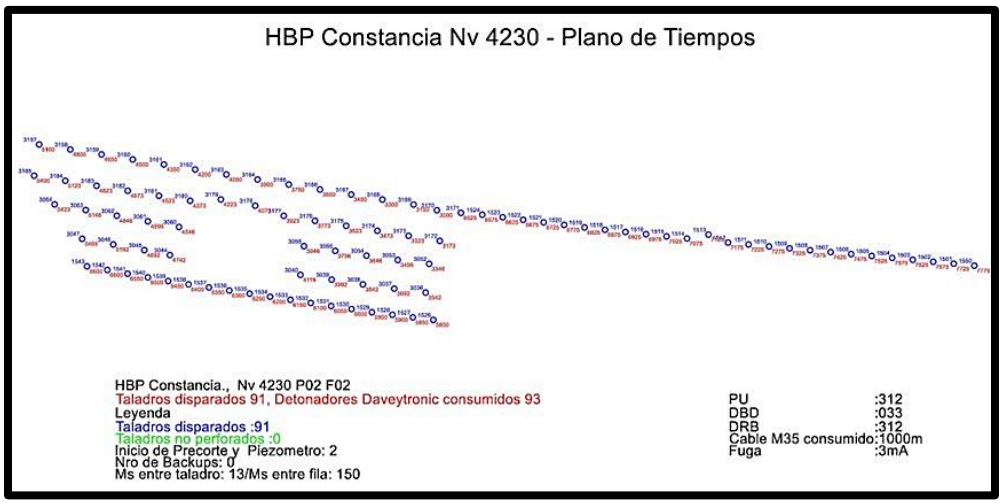
Imagen 14. Configuración de carga Fase 02 MP1 Potásica - Constancia. Diseño de talud.



Fuente: Área de Voladura Enaex.

La voladura usada como referencia es el proyecto PY 002 Nv 4230 Fase 02 proporcionado por el área técnica de Enaex Constancia. En la Figura 15 se puede observar la disposición espacial de los taladros; dicha voladura cuenta con 01 fila Buffer y taladros de producción.

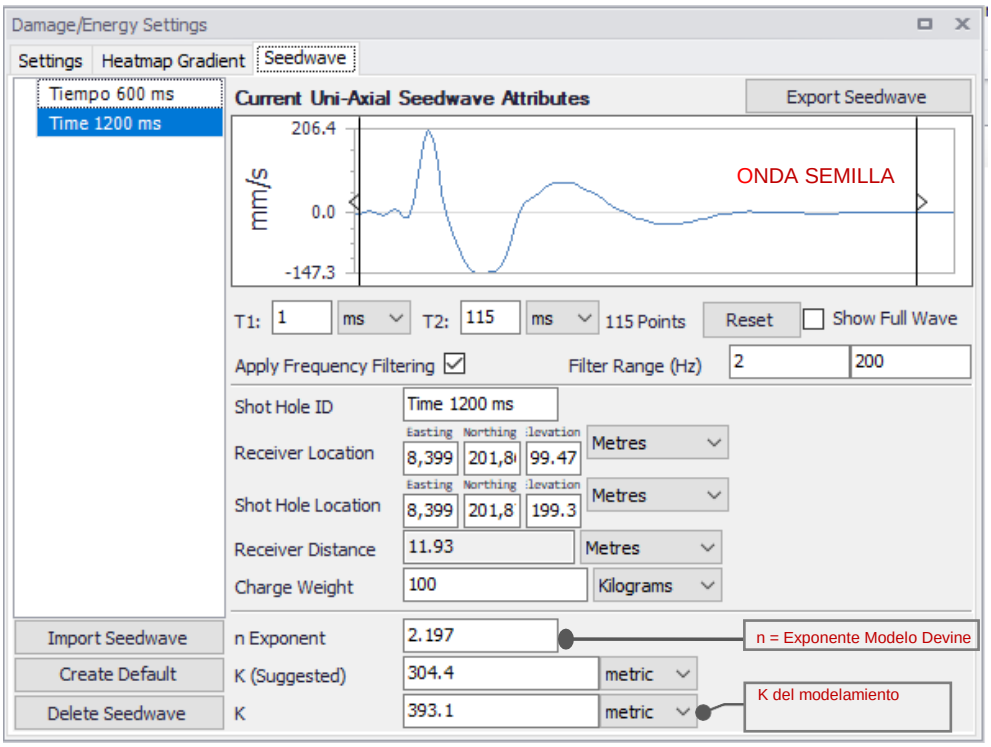
Imagen 15. Disposición espacial del PY 002 Nv 4230 Fase 02



Fuente: Área de Voladura Enaex.

Para la evaluación de los niveles de vibración se hizo uso del software especializado, en los que fue cargado el modelamiento de campo cercano, parámetros geotécnicos, VP y VPP crítico de la roca y ondas semillas que generan los pulsos en la medición que es un parámetro primordial dentro de la simulación ver Figura 16.

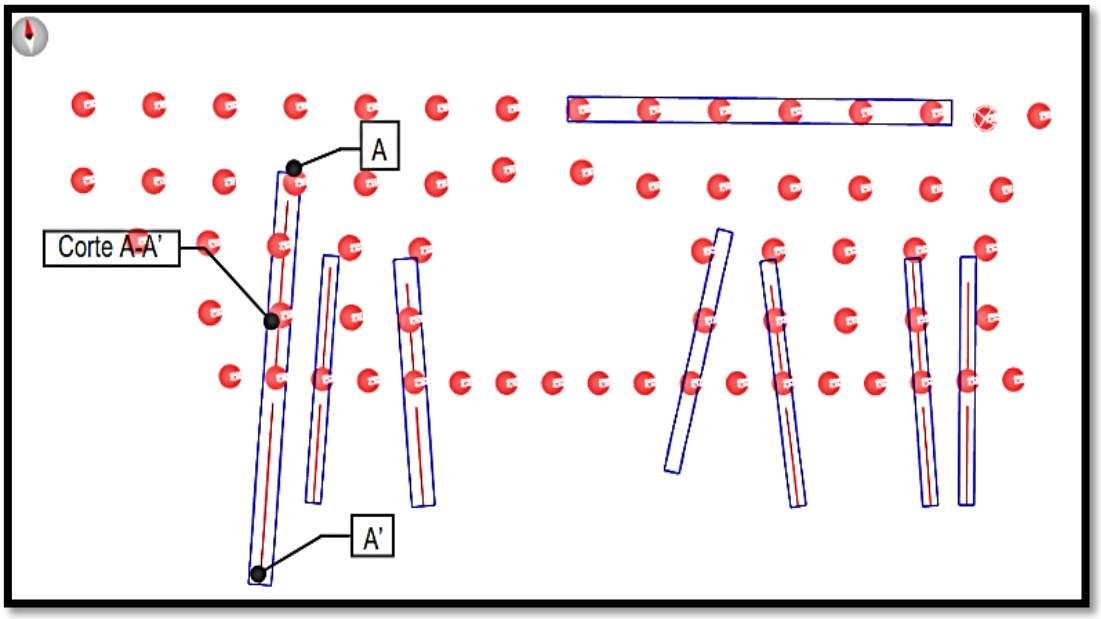
Imagen 16. Onda semilla importada en el software especializado Paradigm – Onda Semilla Geófono 02 tiempo 900 ms.



Fuente: Área de Voladura Enaex.

El análisis de vibraciones que generan las voladuras y su impacto en el talud de diseño (65° de inclinación) y en los niveles inferiores del nuevo banco generado. Para lo cual realizamos diferentes cortes en la malla estudiada para simular su impacto. La sección A-A´ es la que mejor representa la distribución de energía; con dicha sección han sido generados perfiles de vibración para los análisis respectivos - ver Figura 17. Cortes a lo largo de la malla y Corte A - A' -.

Imagen 17. Cortes a lo largo de la malla y Corte A - A'.

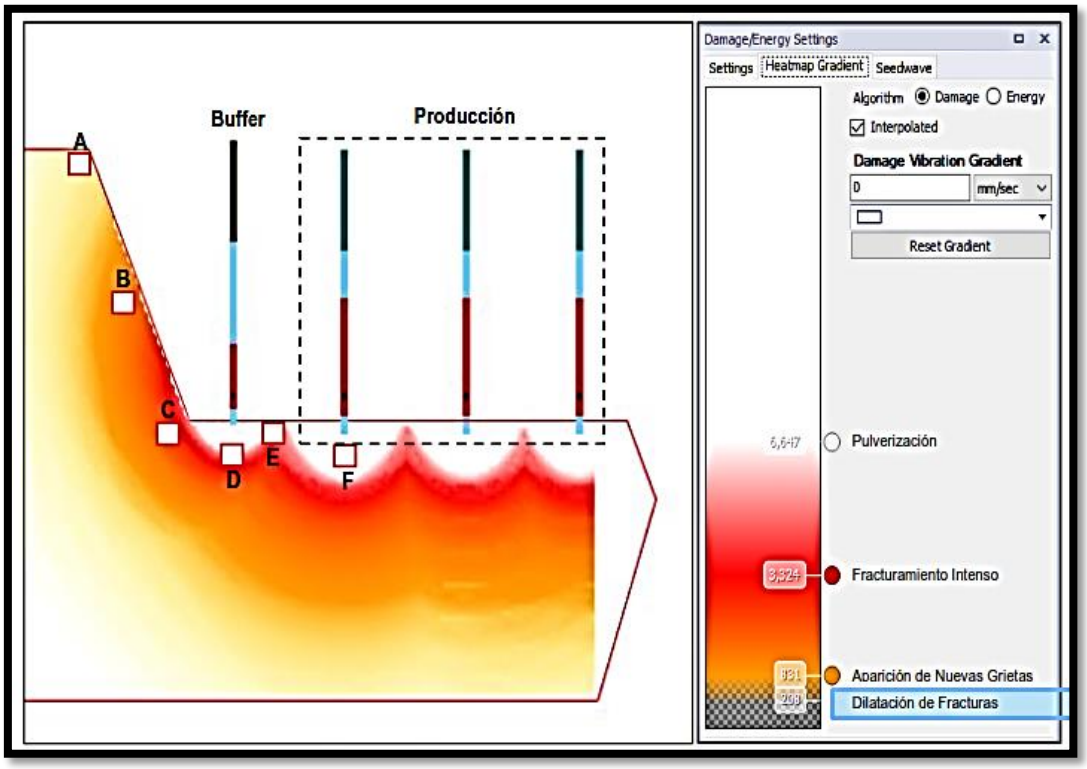


Fuente: Área de Voladura Enaex.

En la Figura 18, se puede observar el efecto de las vibraciones en el talud y el impacto que tiene en los nuevos pisos generados en función a un esquema Heatmap a lo largo de los taladros de Buffer y Producción.

El análisis de vibraciones es diferenciado en dos sectores; el primero referenciado a la vibración que se genera en los límites del talud - representada en la Figura 18 con las letras A, B y C - y el segundo, referido al daño generado por la sobre perforación en los niveles inferiores de cada pozo, zona que condiciona el nuevo piso y berma del banco construido - ver Figura 18 letras D, E y F -. Para ambos casos se considerará el modelo avanzado del software especializado que considera el secuenciamiento realizado en el proyecto de voladura.

Imagen 18. Representación de vibración al talud Software Paradigm.



Fuente: Área de Voladura Enaex.

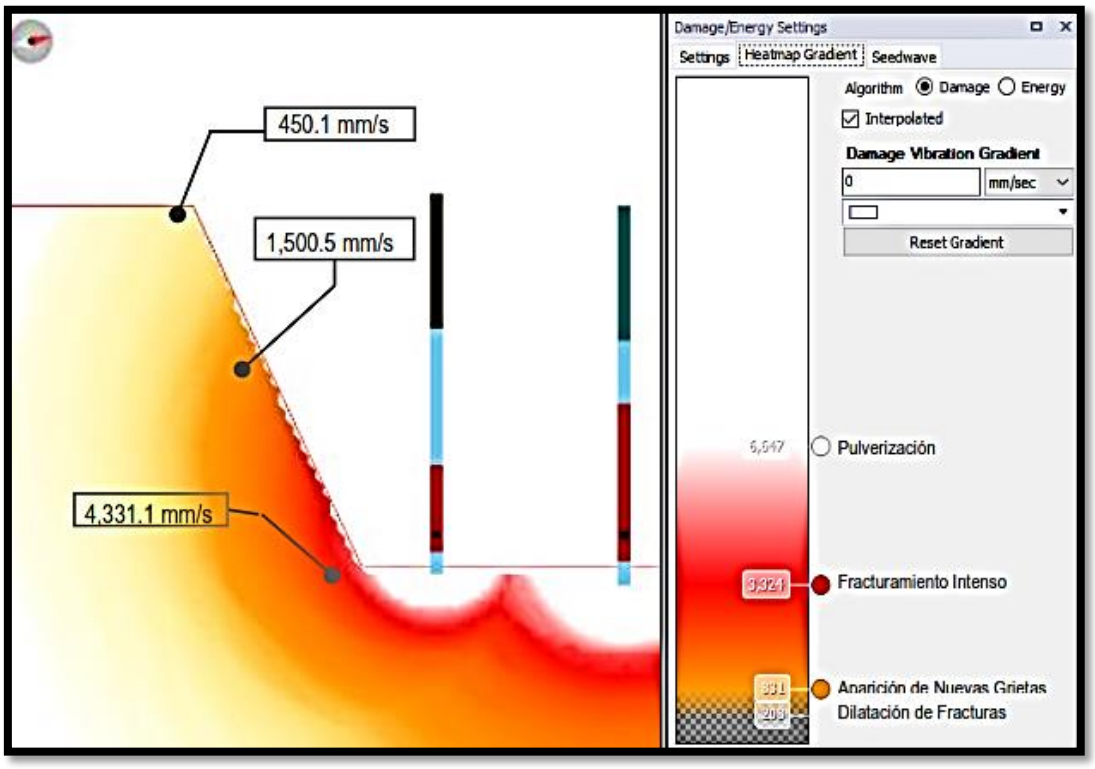
La configuración de P&V de Mina Constancia propone optar por los taladros de Buffer y Pre-Corte para controlar el efecto de las vibraciones en el talud. La prueba de Cross Hole realizada no permitió realizar el cálculo del filtro de Pre-corte, por lo que la estimación presentada no incluye la mitigación por Pre-Corte ya que inicialmente se propone poder modelar en campo cercano.

4.5.1. Estimación de vibraciones en los límites del talud

Como se mencionó anteriormente primero analizaremos las vibraciones generadas en los límites del talud y los efectos provocados, considerando los niveles de perturbación descritos y los valores de VPPc para las características otorgadas por el área de geotecnia. Los valores del Heatmap Gradient, están en función a la Tabla 12 antes mencionada.

Los valores de VPP generados en el talud, serán medidos en tres zonas como se muestra en la Figura 19. Primero se simuló el VPP de 450 mm/s en la cresta del talud, segundo en el nivel medio del talud con un valor de 1,500 mm/s y para finalizar en el pie del talud con un valor de 4,331 mm/s.

Imagen 19. Representación de los niveles de vibraciones en los límites del talud Software Paradigm.



Fuente: Área de Voladura Enaex.

El análisis del escenario mostrado está en relación a los datos mostrados en Tabla 12. Niveles de perturbación asociados al VPP crítico. Y los valores mostrados en la Figura 19. Representación de los niveles de vibraciones en los límites del talud.

Tal como se puede observar el nivel de perturbación infringido a la cresta es de 450 mm/s que se encuentra entre dos niveles de perturbación, dilatación de fracturas y aparición de nuevas grietas, lo cual no es lo bastante crítico considerando que previo a la detonación de la voladura, se tuvo la influencia directa del taladro de pre-corte detonado a una distancia de 03 m de altura con una carga base en fondo. Por lo que dicho valor mostrado podría ser castigado incluso teniendo menor influencia al talud.

El daño infringido en la mitad del talud de 1,500 mm/s correspondiente a un nivel de perturbación de aparición de nuevas grietas y dilatación de éstas; por lo que, si nos encontramos en un terreno fracturado podría poner en riesgo la estabilidad superior o la presencia de cuñas si es el caso del estructuramiento que buza hacia la cara del banco.

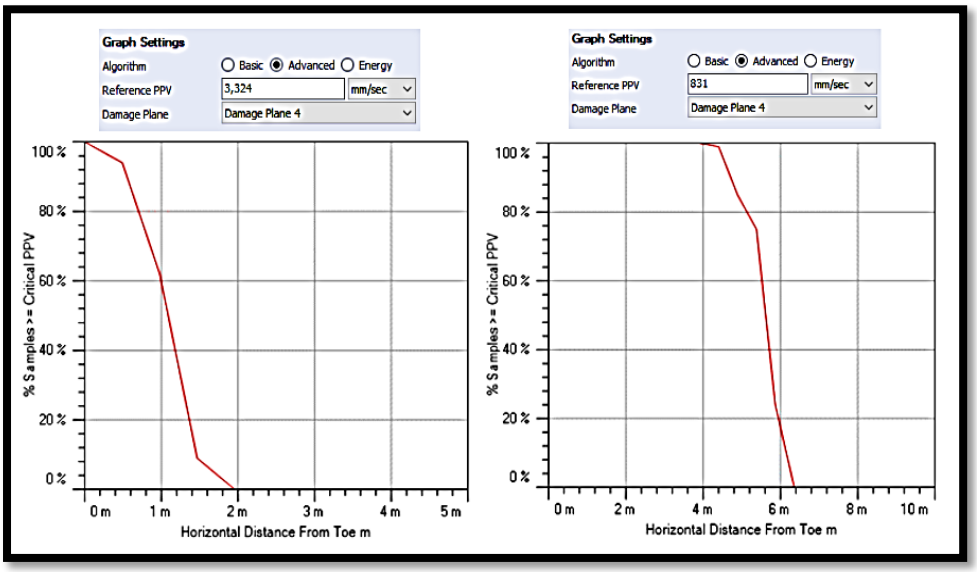
El nivel de vibración en el pie del banco es superior al nivel de fracturamiento intenso pero menor al grado de pulverización, esto permite cumplir con el nivel inferior del banco y que no produzcan toes o pies que pueden generar condiciones desfavorables en la operación, aun así se debe tener mucho cuidado con dicha vibración, ya que el exceso de esta puede provocar inestabilidad del banco desde la zona inferior hasta la superior pudiendo incluso originar colgantes de roca fracturada que debieran ser desprendidas para no generar condiciones de alto riesgo.

Cabe indicar que dicha simulación se realiza de forma dinámica, es decir, utilizando el módulo de sección de daño avanzado, el cual considera los parámetros geomecánicos dentro de la simulación así como el modelamiento de campo cercano, velocidad de onda P de la roca y el secuenciamiento de diseño. Esto indica que la simulación si considera el secuenciamiento entre pozos de 50 milisegundos y explicaría la heterogeneidad en el heatmap que se puede mostrar en la Figura 19. Representación de los niveles de vibraciones en los límites del talud.

La Figura 20 muestra la relación del % VPP en función a la distancia horizontal del toe. Para evaluar el efecto de vibración que se

produce una distancia horizontal del toe, simularemos dos escenarios, el primero va corresponder al cálculo considerando como VPP al nivel de perturbación de fracturamiento intenso (4*VPPC) mientras que el segundo, un caso más crítico, en relación a la aparición de nuevas grietas (VPPC). Como se puede observar en la figura mencionada, la línea de %VPP vs Distancia horizontal del pie, se extiende a una distancia mayor para el segundo caso que el primero, esto es debido a que el nivel de perturbación es mucho menor en el de aparición de nuevas grietas por lo tanto la distancia en la que es afectada es mucho mayor. Para el primer escenario, el caso de fracturamiento intenso (3,324 mm/s) la línea se extiende hasta una distancia de 1.97m, donde a partir de esta, la generación de VPP serán menores al nivel de referencia asociado. Mientras que en el segundo caso, aparición de grietas (831 mm/s), el 100% de puntos sobrepasa al VPP hasta una distancia de 4.02m y que se extenderá hasta una distancia de 6.37m donde el daño será menor a la aparición de grietas pero el efecto que se mantendrá hasta unos 15m en dilatación de fracturas preexistentes, pero en un daño de mucha menor magnitud.

Imagen 20. Relación de % VPP vs Distancia Horizontal. Izquierda referencia 4VPP – Derecha VPP (Software Paradigm).



Fuente: Área de Voladura Enaex.

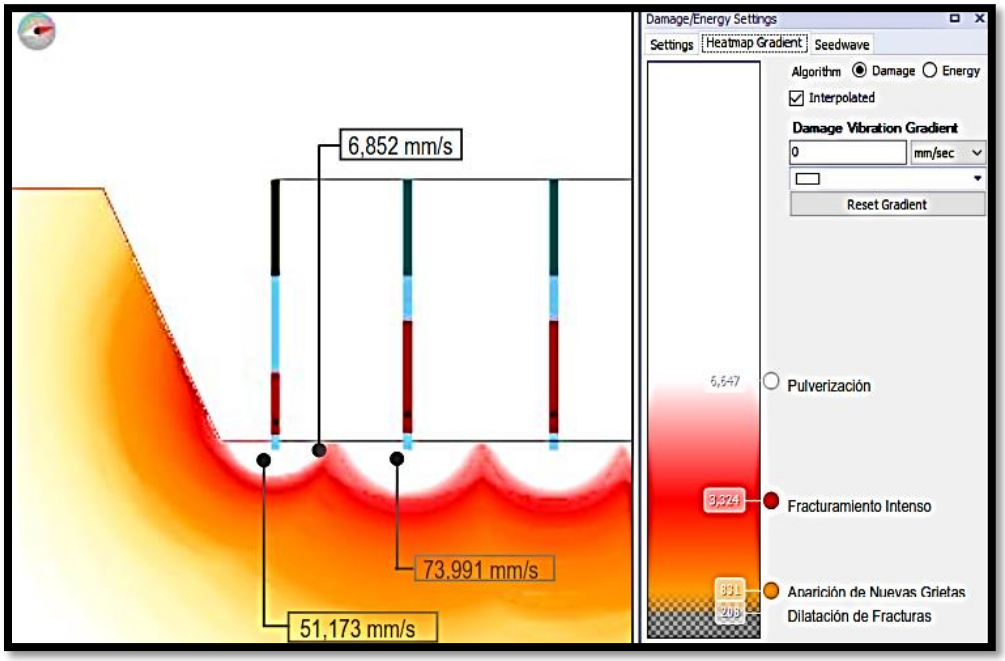
4.5.2. Estimación de Vibraciones en los Límites inferiores del banco.

Al igual que la estimación anterior, son considerados los criterios de daño en la Tabla 12 con los valores de la Tabla 11 para simular el umbral de vibración generada en: los niveles inferiores del banco y en la zona de sobre perforación de los taladros de Buffer y Producción.

Tal como fue indicado en la Figura 18, queda definido el VPP generado en los puntos D, E y F tal como es presentado en la Figura 21. En esta última figura, pueden apreciarse los valores siguientes:

- El nivel de vibración generado en la zona inferior al taladro Buffer es de 51,173 mm/s
- Al nivel del nuevo banco generado el taladro de Producción correspondiente 73,991 mm/s
- Zona de Interacción entre los Taladros de Producción y Taladros de Buffer, se genera una vibración de 5,394 mm/s

Imagen 21. Representación de la simulación de vibraciones en los niveles inferiores del banco (Software Paradigm).



Fuente: Área de Voladura Enaex.

Como se puede notar, los valores de vibración generados en los pisos de los barrenos son extremadamente altos en consideración a los niveles de daño que se presentaron en la Tabla 12, cabe señalar también que dichos valores altos se disipan rápidamente debido a que es la zona con mayor resistencia a la rotura, aun así, el efecto a niveles inferiores es necesario estudiarlo para poder entender la repercusión que se tiene en la generación de bancos inferiores.

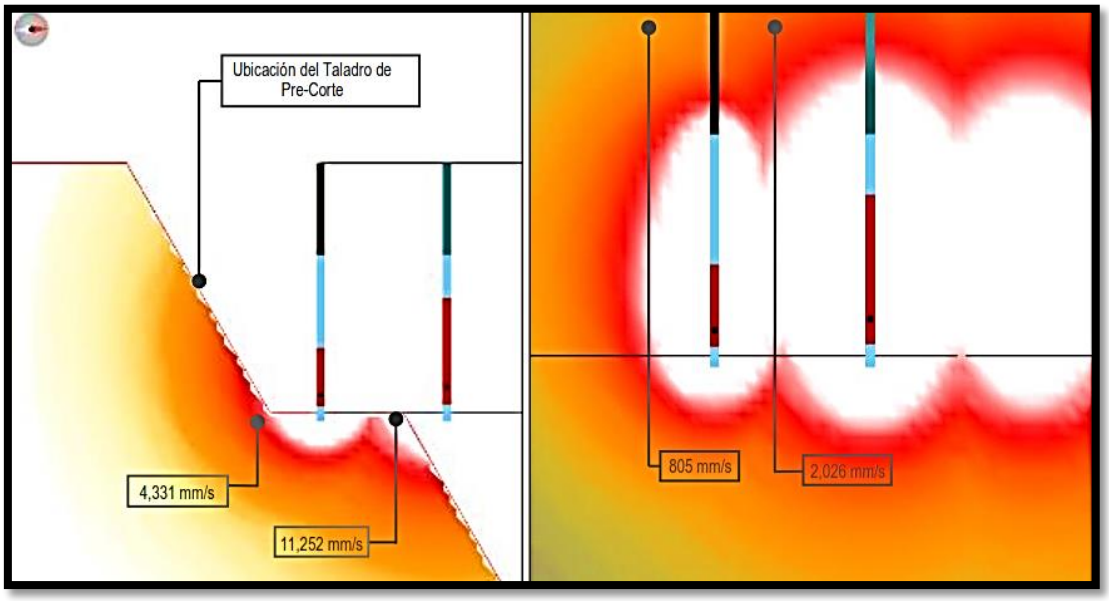
Se puede ver que la vibración entre los pozos de Buffer y Producción está en un nivel cercano a la pulverización por lo que representa que dichos niveles generan pisos homogéneos pero que se podría tener repercusión en el armado de taladros del nuevo banco generado ya que se encontraría en una zona altamente fracturado.

Cabe señalar que, esta simulación representa un escenario ideal de voladura sin desviaciones operacionales. Desde esta perspectiva, podría darse una condición más desfavorable aún provocada por variabilidad en la calidad de implementación del proceso de P&V. Es así como, variaciones del explosivo en densidad, composición a lo largo de la columna de carga y detonación hasta llegar a su VOD régimen pueden aumentar el grado de perturbación en la condición y diseño del talud final. Entender también que la ubicación de la prima o booster afecta en la generación de energía desprendida, ya que si es ubicada en niveles cercanos al fondo del pozo puede ocasionar un retraso en lograr el VOD régimen y tras una mayor resistencia podría generar pisos con desniveles.

Para poder tener una mejor representatividad del efecto que tienen las voladuras en la generación del talud y la berma de diseño de 08m, podemos realizar el corte en la malla de generación del nuevo talud – Ver Figura 22 Izquierda – Si bien se puede interpretar que el nivel de vibración en la cresta del nuevo talud sobrepasa el nivel de perturbación del grado de pulverización es requerido un nivel de energía óptimo en el inicio del taladro para poder conseguir el VOD régimen el cual permita una correcta distribución de energía a lo largo del taladro pudiendo, de esta manera, lograr niveles de vibración suficiente entre taladros de buffer y

producción superiores a 2,000 mm/s para poder fragmentar en zona de taco – Ver Figura 22 Izquierda – . Se puede entender que el taladro de Pre-Corte posee una longitud de 06 m con una carga inferior lo cual produce el suficiente efecto en el nivel medio del taladro para generar el perfil del talud y crear un filtro a lo largo del taladro, disminuyendo el nivel de daño.

Imagen 22. Izquierda. Efecto de las vibraciones en el Talud con el diseño de Berma – Derecha. Efecto en campo cercano entre Buffer y Producción (Software Paradigm).

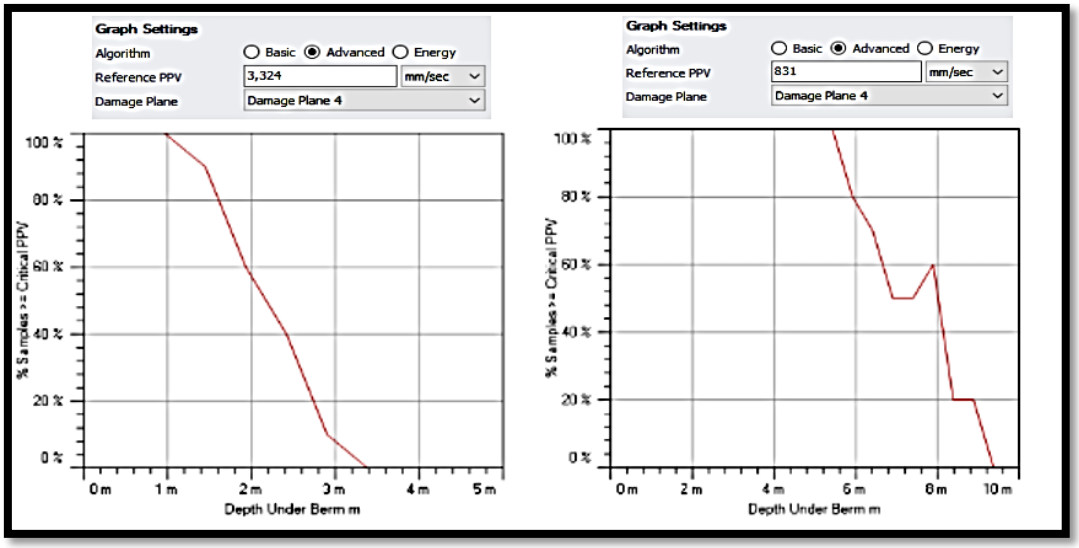


Fuente: Área de Voladura Enaex.

Tomando como referencia la Figura 22 Derecha, podemos identificar el efecto que ejerce la vibración según la longitud de profundización. Para esto, se tomó como referencia el nivel de fracturamiento intenso (4*VPPC) y de aparición de nuevas grietas (VPPC) tal como se pueden apreciar en la Figura 23. De la figura de la derecha podemos observar que de una totalidad de 100% de puntos simulados, sobrepasarán el nivel de 4*VPP a una distancia aproximada de 1m mientras que esta se verá mitigado a una distancia de 3.46m mientras que el

comportamiento para la aparición de grietas se extiende a una distancia mayor de hasta 9.39m para concepción de VPP menores. Ahora es conveniente recalcar que dicho nivel asociado a 1*VPP no tiene mayor alcance de la longitud de las grietas que se forman y la extensión de estas, pero que es un buen indicio a considerar, si es que en niveles inferiores podemos obtener problemas en la perforación de armado del taladro.

Imagen 23. Relación de % VPP vs Profundidad por debajo de la berma. Izquierda Fracturamiento intenso - Derecha Aparición de grietas (Software Paradigm).

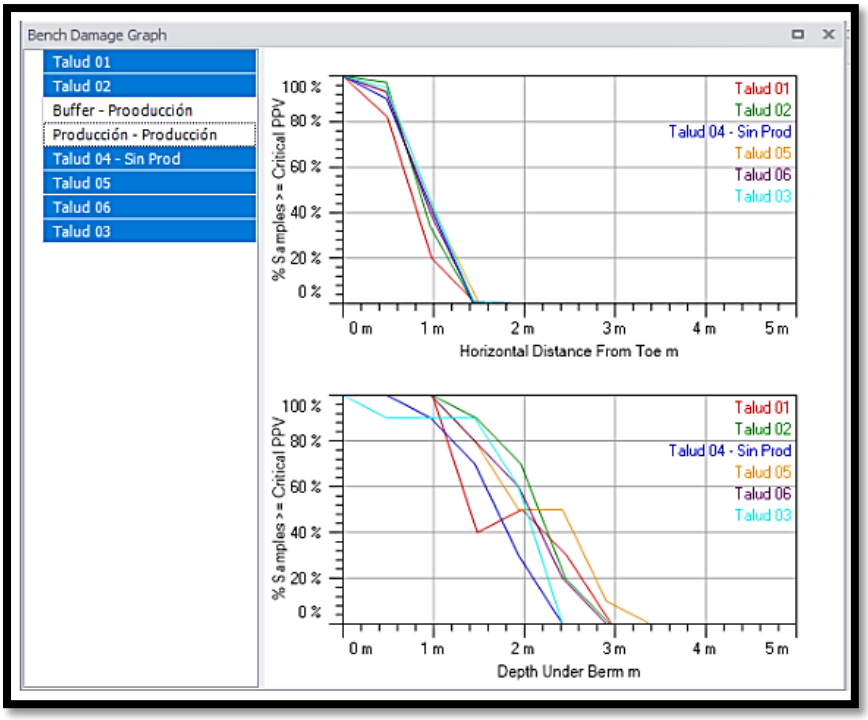


Fuente: Área de Voladura Enaex.

En la Figura 17. Cortes a lo largo de la malla y Corte A - A', se consideró para el estudio el corte antes mencionado, pero para el análisis en distintos cortes y el efecto que se presenta en distancias horizontales y verticales en relación al talud, se puede observar el comportamiento de estos – ver Figura 24. Efecto de vibraciones en la generación del talud considerando diferentes cortes en la malla – de donde se puede desprender que, para un nivel de referencia de fracturamiento intenso (3,324 mm/s) se confirma que la mayor distancia de horizontal del pie del talud es de aproximadamente 2 m mientras que la distancia debajo de la berma es de

3.46 m, a distancias mayores se puede tener la certeza que los niveles de vibración son menores a la referencia descrita.

Imagen 24. Efecto de vibraciones en la generación del talud considerando diferentes cortes en la malla (Software Paradigm).



Fuente: Área de Voladura Enaex.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El estudio de Cross Hole permitió obtener el modelamiento de vibraciones mostrado en la Figura 10. Representación gráfica modelo H&P - Constancia obteniendo como valores de K = 393.13 y Alpha = 1.0986 a un nivel de confianza del 93%, el cual es requerido por el software especializado, para poder obtener las simulaciones. Dentro del software también fueron simulados las configuraciones de carga y los tiempos asociados a cada pozo del proyecto que fue tomado como referencia.

En el apartado 4.5. SIMULACIONES DE PERTURBACIÓN EN TALUDES FASE 02 MP1 POTÁSICA – MINA CONSTANCIA, fue evaluado el diseño actual aplicado por Mina Constancia en diferentes perfiles, tomando como referencia la Figura 11. Configuración de carga Fase 02 MP1 Potásica - Constancia. Taladro de producción, Figura 12 Configuración de carga Fase 02 MP1 Potásica - Constancia. Taladro del buffer, la Figura 13 Configuración de carga Fase 02 MP1 Potásica - Constancia. Taladro del Piezómetro y la Figura 14 Configuración de carga Fase 02 MP1 Potásica - Constancia. Diseño de talud. De este proyecto se escogió el corte A-A' con el que se trabajó y realizó la mayor parte del análisis, ya que representaba en mejor medida el efecto de la vibración. Específicamente el análisis estuvo enfocado en la generación del nuevo talud (cresta, centro y pie) y en el nivel inferior del banco a volar. Es importante notar que, la construcción del nivel inferior y el impacto que este recibe por las voladuras, es fundamental en el diseño y condición del nuevo banco a construir, concretamente en la base de los taladros de Buffer y Producción. Es necesario mencionar que, toda simulación mostrada a partir de este punto no considera la atenuación a causa de los taladros de Pre-Corte.

Para todo lo anteriormente mencionado la Tabla 12 mostró los niveles de perturbación asociados a las características del macizo rocoso entregado por el área de Geotecnia Mina Constancia, si bien es cierto se

trata de valores específicos, es una primera cuantificación referido al daño a partir de ello se puede empezar a confirmar dichos valores o ajustarlos según lo mostrado en mina y que es ideal para poder empezar a entender el comportamiento del explosivo dentro de nuestra malla a volar.

VI. CONCLUSIÓNES

Mediante el modelo de cross hole ha sido posible determinar el nivel de energía resistido por la roca, y evaluar el nivel de energía disponible generado por el explosivo en una voladura de este modo puede precisarse en que grado de perturbación es afectada el talud. El modelo confeccionado fue ajustado según el postulado y formulación de Holmberg & Persson (1994). La prueba considero la medición de las vibraciones generadas por 10 pozos dispuestos como indica la imagen 6.

La longitud de los taladros alcanzo los 10.4 m y fueron cargados con 1.2 m de heavy anfo 73. La vibración fue medida por un arreglo triaxial de geófonos para campo cercano y un sismógrafo de 8 canales para el registro de dicho sensor. La señal de vibración de cada carga explosiva detonada fue registrada por cada, G1 y G2, para luego ser representada en un par ordenado (tiempo v/s amplitud) que permite establecer una correlación entre los puntos medios. Es importante destacar que el coeficiente de correlación (R^2) obtenido en ambos geófonos un 93 % de confianza. Esto permitió determinar la velocidad de propagación VP = 1820 m/s. Esto en correspondencia a los parámetros geotécnicos entregados de la Fase 02 Monzonita Porfirítica (MP1) – Potásica mostrados en la Tabla 10. Parámetros Geotécnicos MP1 - Potásica - Constancia. Con este cálculo y con lo que se definió en la Ecuación 04. VPP crítico de la roca, han podido ser estimados los valores de VPP crítico el cual dio como resultado 831 mm/s.

El estudio de Cross Hole permitió obtener el modelamiento de vibraciones mostrado en la Imagen 10. Representación gráfica modelo H&P obteniendo como valores de K=393.13 y Alpha = 1.0986 a un nivel de confianza del 93%, el cual es requerido por el Software Paradigm, para poder obtener las simulaciones, configuraciones de carga y los tiempos asociados.

Con dicho cálculo se presentó los valores de la. Tabla 12. Niveles de perturbación asociados al VPP Critico que están asociados, como su nombre lo dice, al VPPC de la roca y que muestra los diferentes niveles de perturbación teóricos más utilizados en operaciones mineras mundialmente. Cabe señalar que, todo el análisis es una estimación que obedece a los datos proporcionados por mina, en este sentido, el éxito y exactitud de las estimaciones está en la representatividad de estos parámetros y mientras los ensayos de laboratorio de roca intacta sean los más actuales posibles, serán mucho más representativos de la litología evaluada.

Las simulaciones de perturbación en taludes fase 02 MP1 Potásica – Mina Constancia, fue evaluado el diseño actual aplicado por Mina Constancia en diferentes perfiles, tomando como referencia la Figura 11. Configuración de carga Fase 02 MP1 Potásica - Constancia. Taladro de producción, Figura 12 Configuración de carga Fase 02 MP1 Potásica - Constancia. Taladro del buffer, la Figura 13 Configuración de carga Fase 02 MP1 Potásica - Constancia. Taladro del Piezómetro y la Figura 14 Configuración de carga Fase 02 MP1 Potásica - Constancia, que corresponde al proyecto de voladura PY 002 Nv 4230 Fase 02. De este proyecto se escogió el corte A-A con el que se trabajó y realizo el análisis, ya que representaba en mejor medida el efecto de la vibración. Específicamente el análisis estuvo enfocado en la generación del nuevo talud (cresta, centro y pie) y en el nivel inferior del banco a volar. Es importante notar que, la construcción del nivel inferior y el impacto que este recibe por las voladuras, es fundamental en el diseño y condición del nuevo banco a construir, concretamente en la base de los taladros de Buffer y Producción.

La tabla 12 mostro niveles de perturbación asociados a las características del macizo rocoso entregado por el área de Geotecnia Mina Constancia, si bien es cierto se trata de valores específicos, Es una cuantificación referido al daño a partir de ello se puede empezar a confirmar dichos valores o ajustarlos según lo, mostrado en mina y que es ideal para

poder empezar a entender el comportamiento del explosivo dentro de una malla a volar.

Analizamos la Imagen 19. Representación de los niveles de vibraciones en los límites del talud donde se encontró que los niveles de vibración en la cresta del talud estaban en correspondencia al grado de dilatación y apertura de grietas preexistentes. El valor estudiado se realizó sin considerar el impacto de la voladura con pre corte con lo que vendríamos a considerar que el nivel de vibración podría llegar a ser menor. Por lo tanto, al evaluar el talud generado, se pudo comprobar que a un nivel de referencia de fracturamiento intenso, en nivel de impacto horizontal y vertical de la berma es de 1.97 m y 3.46 m respectivamente – ver Imagen 24. Efecto de vibraciones en la generación del talud considerando diferentes cortes en la malla, Esto se consideró en el software Paradigm, ya que si evaluamos en el diseño estático, es decir sin considerar la secuencia, las distancias de daño mostradas podrían aumentar hasta 2.52 m en daño horizontal y hasta 4.9 m en daño vertical al pie del talud. En la evaluación de campo cercano, se simulo diferentes tiempos entre taladros de la línea de buffer y se pudo notar que entre 40 milisegundos hasta 70 milisegundos no hay variación en el efecto vibracional para esta última línea de salida, a valores de salida mayores no habrá menor efecto de vibraciones y que podría extender en tiempo la secuencia de salida.

En la Imagen 22. Efecto de las vibraciones en el Talud con el diseño de Berma. Efecto en campo cercano entre buffer y producción, las simulaciones mostraron que el daño de los taladros de producción en la zona de cresta del nuevo talud formado, excede nuestros niveles de perturbación teórica estimada para un diseño de berma de 08 m, tomar esto como comentario relevante, ya que como se explicó, esto se simulo es un escenario ideal y que hay muchos factores que castigan este valor, como la densidad del explosivo al final del taladro, la contaminación del explosivo en contacto con el taladro, la ubicación de la prima, condiciones geológicas y geotécnicas del macizo rocoso en esa zona, etc. Pero de tener valores altos y de presentarse en el terreno condiciones de taludes inestables, va

corresponder al nivel de daño infligido por el banco superior y que este daño puede verse ampliado si la longitud de perforación es mayor al de diseño, perjudicando los niveles inferiores.

Cabe señalar que los efectos causados por la vibración pueden ser reducidos a partir de la generación de un filtro de Pre Corte efectivo. Sin embargo, el efecto de un buen filtro atenúa solo un 40% de las vibraciones cuando es llevado correctamente y que por ello se debe enfocar primero en tener una correcta implementación de la perforación y una correcta configuración de P&V a fin de minimizar el impacto.

La correcta identificación de los taladros que generaran la berma del siguiente banco inferior apoyara a la estabilidad y geometría de este. Específicamente es necesario identificar los taladros de la línea de buffer y producción, ya que por criterio de proximidad se dimensiona una franja extensible, metros antes y después de la nueva cresta proyectada al banco inferior.

El nivel de daño horizontal podría extenderse a 1.47 m frente a los 2 m que se extiende con sobre perforación y de 2.68 m en promedio en distancias verticales de la berma (profundidad) mientras que con sobreperforacion de buffer el impacto se da a 3.46 m.

VII. RECOMENDACIONES

Como fue señalado anteriormente, Los resultados de voladura obedecen al grado de caracterización del macizo rocoso a volar y de la calidad de implementación del proceso de perforación y voladura (P&V). en la optimización de cualquier proceso primero deben identificarse las principales desviaciones y/o fuentes de error para luego generar una operación o sistema controlado, de mejor calidad y reducida variabilidad que permita aplicar fidedignamente diseños de P&V según factores propios y característicos del medio evaluado.

La correcta identificación de los taladros que generarán la berma del siguiente banco inferior apoyará a la estabilidad y geometría de éste. Específicamente es necesario identificar los taladros de la línea Buffer y Producción, ya que por criterio de proximidad se dimensiona una franja extensibles metros antes y después de la nueva cresta proyectada al banco inferior.

Se recomienda poder brindar capacitación al personal encargado del carguío para asegurar el correcto cumplimiento del procedimiento PETS y aseguramiento de la calidad de la mezcla explosiva, así poder hacer seguimiento al explosivo teniendo en mira el concepto de mejora continua para poder realizar un trabajo de clase mundial.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarado Valencia, J. A., & Obaji Araujo, J. J. (2008). Fundamentos de inferencia estadística (Primera ed.). Pontificia Universidad Javeriana.

Bembibre, C. (05 de Abril de 2011). Definición ABC. Obtenido de https://www.definicionabc.com/general/prediccion.php

Bobadilla Velásquez, Y. T. (2016). La, Modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano para el Control de daño en Chancado Primaria y Poza pop en la unidad Minera Lagunas Norte. Trujillo.

Espino Timón, C. (2017). Análisis predictivo: técnicas y modelos utilizados y aplicaciones del mismo; Herramientas Open Source que permite su uso. Catalunya.

Felicísimo, A. M. (2009). Conceptos básicos y modelos de simulación. Obtenido de http://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema_1.pdf

Geozone. (s.f.). Ensayos de pozo. Down-hole y Cross-hole. Sísmica Paralela. Recuperado el 03 de 04 de 2019, de http://www.geozone.es/tecnicas/sismicas/ensayos-de-pozo-down-hole-y-cross-hole/

Giraldo, F. (2010). Control de vibraciones para casas de tierra en Perú. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. Obtenido de file:///C:/Users/control/Downloads/giraldo_if.pdf

Hernandez Fernandes y Baptista. (2015). Metodología de Investigación (Vol. 5). México: Mc DRAW - HILL.

Loayza Días, J. (2014). Algoritmo predictivo de perturbación de la roca en función a la voladura para el control de estabilidad, Compañía Minera Bateas S. A. Fortuna Silver Mines. Arequipa.

López, E. (2018). Modelamiento predictivo aplicada al diseño de perforación y voladura en túneles, para incrementar la rentabilidad. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo. Obtenido de http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/11172/Lopez%20Sevilla%2C%20Eddie%20Mariano.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ñaupas et. al, .. (2014). Metodología de la Investigación cuantitativa - cualitativa y Redacción de Tesis (4º ed.). Ediciones U. doi: ISBM 978-958-762-188-4

Orihuela, S., & Dapello, J. (2009). Diseño de un Modelo Predictivo a partir de un estudio de vibración en una voladura en una Mina modelo. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de file:///C:/Users/control/Downloads/ORIHUELA_STEFANIE_MODELO_PREDICTIVO_VOLADURA-1.pdf

Pampacata, L. (2015). Análisis de vibraciones inducidos por la voladura de rocas en cantera Atocongo en zonas cercanas a poblaciones. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. Obtenido de http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/2096/1/pampacata_hl.pdf

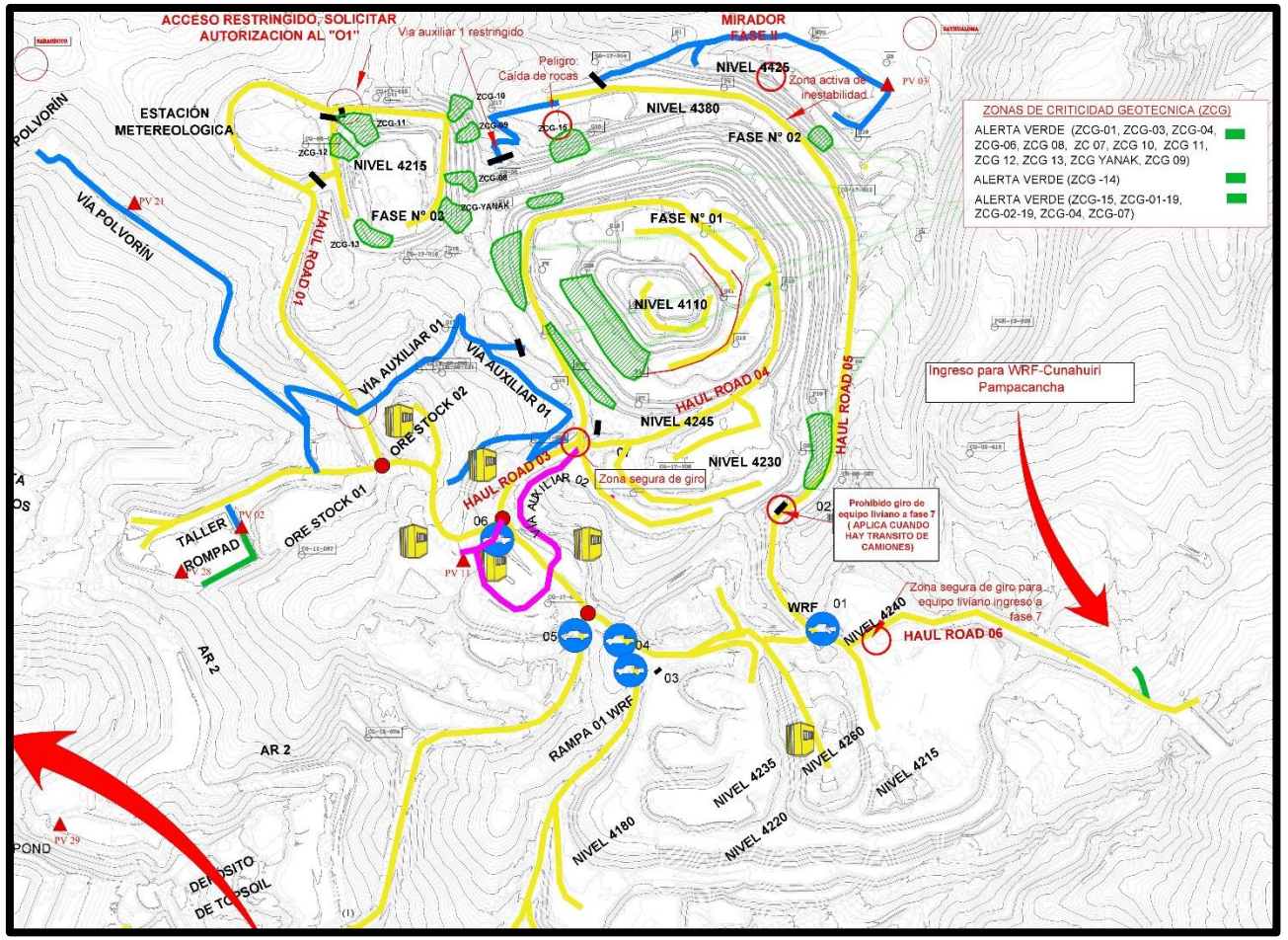
valdivia Cuevas , A. L. (2017). Diseño de modelo predictivo de vibración PPV en la voladura del tajo Isabelita Mina El Toro para evitar riesgos en la población cercana. Tesis, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo.

Zapata, J. (2012). Análisis de las vibraciones generadas por voladuras para la adecuada selección de explosivos en explotaciones mineras subterráneas en la Compañía de las Minas Caudalosa S.A. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú. Obtenido de http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3177/Zapata%20Porras.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

IX. ANEXOS

ANEXO 1.

Imagen 25. Plano de vías mina Constancia.



Fuente: Departamento de Seguridad y Salud Ocupacional.

ANEXO 2.

Imagen 26. Imagen de sismógrafo Instantel de 8 canales utilizado para la lectura de datos.



Fuente: Area de Asistencia Técnica, Enaex.

Imagen 27. Imagen de geófono triaxial utilizado para la instalación los cuales serán enterrados.



Fuente: Área de Asistencia Técnica, Enaex.

ANEXO 3

EQUIPOS DE PERFORACIÓN

Imagen 28. Perforadoras Pit Viper 271.



Fuente: Área de asistencia técnica ENAEX.

ANEXO 4

EQUIPOS DE CARGUÍO

Imagen 29. Palas Hidráulicas Hitachi, capacidad de 72 ton/cuchara



Fuente: Área de asistencia técnica ENAEX.

Imagen 30. Excavadora hidráulica.



Fuente: Área de asistencia técnica ENAEX.

Imagen 31. Cargador Frontal CAT 994H



Fuente: Área de asistencia técnica ENAEX.

Imagen 32. Transporte de material con el camión CAT 793F.



Fuente: Área de asistencia técnica ENAEX

ANEXO 5

EQUIPOS UTILIZADOS EN VOLADURA

Imagen 33. Camion Fabrica Q-41 (Milodon).



Fuente: Área de asistencia técnica ENAEX.

Imagen 34. Camión Fabrica Q-38; Q-41.



Fuente: Área de asistencia técnica ENAEX.

Imagen 35. Mini Cargador Bob Cat. .



Fuente: Área de asistencia técnica ENAEX.