



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA DE MINAS

“ESTIMACIÓN DE PRESIONES DINÁMICAS INDUCIDAS POR VOLADURA PARA DEFINIR DISTANCIAS CRÍTICAS PARA DETONADORES ELECTRÓNICOS DAVEYTRONIC EN TAJO LA QUINUA YANACOCCHA”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Bach. Maritza Janeth Aguilar Ayala

Bach. Fernando Chilón Ayay

Asesor:

Ing. Javier Salazar Ipanaque

Cajamarca - Perú

2017

APROBACIÓN DE LA TESIS

El asesor y los miembros del jurado evaluador asignados, **APRUEBAN** la tesis desarrollada por la Bachiller **Maritza Janeth Aguilar Ayala** y el Bachiller **Fernando Chilón Ayay**, denominada:

**“ESTIMACIÓN DE PRESIONES DINÁMICAS INDUCIDAS POR VOLADURA
PARA DEFINIR DISTANCIAS CRÍTICAS PARA DETONADORES
ELECTRÓNICOS DAVEYTRONIC EN TAJO LA QUINUA YANACOCCHA”**

Ing. Javier Salazar Ipanaque
ASESOR

Ing. Richard Wagner Figueroa Alfaro.
**JURADO
PRESIDENTE**

Ing. Jorge Luis Salazar Ríos.
JURADO

Ing. Rolando Iván Ramos Morante.
JURADO

DEDICATORIA

A Dios por darle un sentido profundo a nuestras vidas y a nuestros padres quienes nos apoyaron y motivaron a seguir adelante cada día e hicieron posible nuestra formación profesional.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Privada del Norte y a los docentes de la Carrera de Ingeniería de Minas, por haber contribuido en nuestra formación profesional.

Así mismo, nuestro agradecimiento a Minera Yanacocha por habernos permitido realizar esta investigación, teniendo el total respaldo de sus colaboradores y todos sus recursos a disposición. En especial, al área de Perforación y Voladura, liderada por el ingeniero Yorhino León.

Al ingeniero Javier Salazar, por su papel tan importante de asesor, al apoyarnos en la elaboración y culminación de este trabajo.

Gracias a Dios, el que nos permitió concretar este trabajo y nos dará las palabras correctas para sustentarlo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|-------------|
| APROBACIÓN DE LA TESIS | ii |
| DEDICATORIA | iii |
| AGRADECIMIENTO | iv |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS | v |
| ÍNDICE DE TABLAS | vii |
| ÍNDICE DE FIGURAS | viii |
| RESUMEN..... | x |
| ABSTRACT | xii |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | 14 |
| 1.1. Realidad problemática | 14 |
| 1.2. Formulación del problema | 14 |
| 1.3. Justificación | 15 |
| 1.4. Limitaciones | 15 |
| 1.5. Objetivos | 16 |
| 1.5.1. Objetivo general | 16 |
| 1.5.2. Objetivos específicos | 16 |
| CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO | 16 |
| 2.1. Antecedentes | 16 |
| 2.2. Bases teóricas | 18 |
| 2.2.1. Área de Estudio | 18 |
| 2.2.2. Presión Dinámica..... | 27 |
| 2.2.3. Fundamentos de Vibraciones | 29 |
| 2.2.4. Instrumentación para Monitoreo de Vibraciones | 42 |
| 2.2.5. Generación de los Modelos de Vibración a partir de registros de terreno | 47 |
| 2.3. Definición de términos básicos | 51 |
| 2.4. Hipótesis | 53 |
| CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA..... | 54 |
| 3.1. Operacionalización de variables | 54 |
| 3.2. Diseño de investigación | 54 |
| 3.3. Unidad de estudio | 54 |
| 3.4. Población | 54 |
| 3.5. Muestra (muestreo o selección) | 54 |
| 3.6. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos..... | 54 |

| | | |
|--------------------|---|-----------|
| 3.7. | Métodos, instrumentos y procedimientos de análisis de datos | 57 |
| 3.7.1. | Medición de Vibraciones..... | 57 |
| 3.7.2. | Modelamiento de Vibraciones en Campo Cercano | 58 |
| 3.7.3. | Configuración de la prueba | 60 |
| 3.7.4. | Análisis de la información | 61 |
| 3.7.5. | Determinación de distancias críticas | 67 |
| CAPÍTULO 4. | RESULTADOS | 69 |
| 4.1. | Distancias críticas para un diámetro de 10 5/8" | 70 |
| 4.2. | Distancias críticas para un diámetro de 9 7/8" | 72 |
| 4.3. | Distancias críticas para un diámetro de 7 7/8" | 74 |
| 4.4. | Distancias críticas para un diámetro de 6" | 76 |
| CAPÍTULO 5. | DISCUSIÓN | 78 |
| | CONCLUSIONES..... | 79 |
| | RECOMENDACIONES | 80 |
| | REFERENCIAS | 81 |
| | ANEXOS | 82 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla n.º 3.1. Operacionalización de variables. | 54 |
| Tabla n.º 3.2. Coordenadas y configuración de carguío de los taladros. | 62 |
| Tabla n.º 3.3. Datos para la ecuación de H&P. | 63 |
| Tabla n.º 3.4. Resumen de los niveles de vibraciones y de los PPV hallados por H&P. | 64 |
| Tabla n.º 3.5. Logaritmos de HP y PPV. | 65 |
| Tabla n.º 3.6. Modelo Holmberg & Persson, | 66 |
| Tabla n.º 4.1. Listado de diámetros y tipos de explosivos utilizados en las simulaciones. | 69 |
| Tabla n.º 4.2. Distancias críticas para un diámetro de 10 5/8". | 70 |
| Tabla n.º 4.3. Distancias críticas para un diámetro de 9 7/8" | 72 |
| Tabla n.º 4.4. Distancias críticas para un diámetro de 7 7/8". | 74 |
| Tabla n.º 4.5. Distancias críticas para un diámetro de 6". | 76 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura n.º 2.1. Mapa de ubicación de MYSRL en los distritos de Cajamarca. | 20 |
| Figura n.º 2.2. Mapa de ubicación de las cuatro cuencas hidrográficas. | 21 |
| Figura n.º 2.3. Columna estratigráfica generalizada para el distrito Yanacocha. | 26 |
| Figura n.º 2.4. Gestión de Voladura en Minera Yanacocha. | 27 |
| Figura n.º 2.5. Presión vs Distancia para diferentes diámetros de perforación. | 29 |
| Figura n.º 2.6. Presión vs Distancia para diferentes diámetros de perforación. | 30 |
| Figura n.º 2.7. Presión y relajación no simétrica a un elemento de roca. | 31 |
| Figura n.º 2.8. Presión y relajación no simétrica a un elemento de roca. | 33 |
| Figura n.º 2.9. Onda completa de vibración. | 34 |
| Figura n.º 2.10. Estimación de la velocidad de propagación usando geófonos separados a 300 metros. | 35 |
| Figura n.º 2.11. Ondas Vibracionales (ondas internas y superficiales) | 37 |
| Figura n.º 2.12. Ondas superficiales o Rayleigh. | 38 |
| Figura n.º 2.13. Ondas superficiales o Love. | 38 |
| Figura n.º 2.14. El primer arribo de la onda P puede ser difícil de identificar. | 39 |
| Figura n.º 2.15. El primer arribo de la onda P puede ser difícil de identificar. | 40 |
| Figura n.º 2.16. Transductor, equipo de monitoreo de vibraciones. | 43 |
| Figura n.º 2.17. Equipo de Adquisición Istantel. | 43 |
| Figura n.º 2.18. Computador. | 43 |
| Figura n.º 2.19. Geófono. | 45 |
| Figura n.º 2.20. Orientación del geófono. | 46 |
| Figura n.º 2.21. Orientación del geófono. | 47 |
| Figura n.º 2.22. Modelamiento de Vibraciones en el Campo Cercano. | 50 |
| Figura n.º 3.1. Distribución espacial de los taladros. | 55 |
| Figura n.º 3.2. Diseño de carga. | 55 |
| Figura n.º 3.3. Minimate Plus. | 56 |
| Figura n.º 3.4. Geófono Triaxial. | 56 |
| Figura n.º 3.5. Geófono Triaxial. | 57 |
| Figura n.º 3.6. Parámetros geométricos, Modelo de Holmberg - Persson. | 60 |
| Figura n.º 3.7. Configuración de la secuencia de salida. | 61 |
| Figura n.º 3.8. Configuración de la prueba. | 62 |
| Figura n.º 3.9. Modelo básico de vibración campo cercano. | 64 |
| Figura n.º 3.10. Modelo ajustado al 90% para campo cercano. | 66 |
| Figura n.º 3.11. Ejemplos de contornos de presión obtenidos mediante el software JKSimblast. | 68 |
| Figura n.º 4.1. Gráficos distancias críticas para diámetro 10 5/8". | 71 |
| Figura n.º 4.2. Gráficos distancias críticas para diámetro 9 7/8". | 73 |

| | |
|---|----|
| Figura n.º 4.3. Gráficos distancias críticas para diámetro 7 7/8" | 75 |
| Figura n.º 4.4. Gráficos distancias críticas para diámetro 6" | 77 |

RESUMEN

Las voladuras electrónicas por su mayor precisión, abarcan en la actualidad prácticamente la totalidad de la Gran Minería. Los detonadores electrónicos tienen varias protecciones en contra de efectos externos tal como la presión dinámica. Específicamente el detonador electrónico Daveytronic cuenta con una resina que recubre el módulo electrónico, una cápsula de cobre y una protección del fusehead que permiten calificarlo como el detonador con la resistencia ante presión dinámica más alta en el mercado. Sin embargo, si las condiciones exceden los valores de resistencia establecidos siempre existe una posibilidad de falla.

La tasa de eventos por presión dinámica, debido a un diseño y/o implementación deficientes, a nivel de Latinoamérica en los años 2014 - 2015 hasta la fecha es de 1.7 ppm. El 05 de agosto del 2015 se halló una prima armada en el Tajo La Quinua - Tapado Oeste nivel 3252, razón por la cual Davey Bickford inició la ejecución de una serie de medidas correctivas y preventivas derivadas de la investigación llevada a cabo por el hallazgo de un booster no iniciado sobre el material volado, el cual contenía dos detonadores (uno electrónico y otro no eléctrico) con un daño físico evidente. Durante la investigación del evento, se apuntó a la presión dinámica como potencial causa del suceso; sin embargo no se contó con la información de implementación suficiente para confirmar o desechar dicha hipótesis.

El presente trabajo de investigación busca definir distancias críticas entre taladros para distintos escenarios, en base a la resistencia de las cápsulas de aluminio y cobre, diámetro de taladro, longitud de carga y densidad del explosivo, que eviten la falla mecánica de los detonadores Daveytronic debido a presiones dinámicas. Para ello, se realizaron dos pruebas experimentales en el Tajo La Quinua nivel 3228 el día viernes 06 de octubre de 2015. Se perforaron 2 mallas en forma de "L" de 7 taladros cada una con un burden de 14 m y un espaciamiento entre taladros de 3.5 m. Los taladros fueron cargados con Explosivo Quantex 73 con densidad de 1.15 g/cc, a excepción de dos de ellos, en los que fueron instalados geófonos triaxiales para el registro de las pruebas.

La información obtenida en campo fue usada en la ecuación de Holmberg & Persson (1979), para la predicción de vibración en el campo cercano. La incorporación de los datos registrados por los geófonos y los valores de PPV (Velocidad Pico Partícula) obtenidos por H&P, permitieron hallar un modelo predictivo de vibraciones al 90% de confiabilidad, la ecuación resultante permitió hallar el valor de $k = 1271.4$, $\alpha = 0.6855$ y $\beta = 1.371$ (propiedades intrínsecas de la roca).

Las distancias críticas de diseño en las cuales se podría obtener el efecto de presión dinámica se obtuvieron contraponiendo los resultados de las simulaciones realizadas con el software JKSimblast y la información de la presión máxima permitida por los detonadores Daveytronic para los materiales de aluminio y cobre. Los resultados obtenidos mostraron que la posibilidad de estar en presencia del efecto de presión dinámica y que este efecto produzca algún tipo de deformación y/o falla en la capsula de los detonadores, está en directa relación con el diseño de carguío y la implementación

de los diseños. Para el caso de taladros con diámetro 10 5/8" (diámetro utilizado en tajo La Quinoa para producción), se obtuvo una distancia crítica mínima de 4 metros entre taladros para una carga explosiva (Quantex) de 8 metros a una densidad de 1.1 g/cc.

Los resultados obtenidos solo son representativos del sector fondo del tajo Tapado Oeste y es recomendable realizar un nuevo estudio de medición de vibraciones en el caso de querer determinar posibles efectos de presión dinámica en algún otro sector de la mina.

ABSTRACT

The electronic blasting for its better precision, nowadays practically covers the whole of the Great Mining. Electronic detonators have several protections against external effects such as the dynamic pressure. Specifically the electronic detonator Daveytronic has a resin that cover the electronic module, a copper capsule and a fusehead shield allow it to be rated as the detonator with the highest dynamic pressure resistance on the market. However, whether conditions exceed established resistance values there is always a possibility of failure.

The rate of dynamic pressure events, due to a not well design and / or implementation, in Latin America in the years 2014 - 2015 to date is 1.7 ppm. On August 5, 2015, a primer was found in the pit La Quinoa - Tapado Oeste, level 3252, which is why Davey Bickford initiated the execution of a series of corrective and preventive measures derived from the investigation carried out by the finding of a booster not started on the material flown, which contained two detonators (one electronic and another non-electric) with an obvious physical damage. During the investigation of the event, the dynamic pressure was pointed as a potential cause of the event; however, the information of implementation was not enough to confirm or discard this hypothesis.

This research aims to define critical distances among blastholes for different scenarios, based on the strength of the aluminum and copper capsules, blasthole diameter, load length and density of the explosive, to avoid the mechanical failure of Daveytronic detonators due to dynamic pressures. To do this, two experimental tests were carried out at the pit La Quinoa level 3228 on Friday, October 06, 2015. Two "L" shaped drill patterns of 7 blastholes each one were drilled, with a burden of 14 m and a spacing between blastholes of 3.5 m. The blastholes were loaded with Explosive Quantex 73 with density of 1.15 g / cc, except for two of them, in which triaxial geophones were installed to record the tests.

The information obtained in the blast area was used in the equation of Holmberg & Persson (1979), for the prediction of vibration in the near blast area. The incorporation of the data recorded by the geophones and the values of PPV (Pick Particle Velocity) obtained by H & P, allowed to find a predictive model of vibrations to 90% of reliability, the resulting equation allowed to find the value of $k = 1271.4$, $\alpha = 0.6855$ and $\beta = 1.371$ (intrinsic rock properties).

The critical design distances in which the dynamic pressure effect could be obtained were obtained by contrasting the results of the simulations performed with the JKSimblast software and the maximum pressure information allowed by Daveytronic detonators of aluminum and copper. The results showed that the possibility of being in the presence of the effect of dynamic pressure and that this effect produces some type of deformation and/or failure in the capsule of the detonators, is in direct relation with the design of load and the implementation of designs. For the case of blastholes with diameter 10 5/8" (diameter used in the pit La Quinoa for production), we got a minimum critical

distance of 4 meters among holes for an explosive load (Quantex) of 8 meters at a density of 1.1 g/cc.

The results obtained are only representative of the bottom sector of the Tapado West pit and it is advisable to carry out a new study of vibration measurement in case of wanting to determine possible effects of dynamic pressure in some other sector of the mine.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

Hoy en día la minería necesita que los procesos de voladura sean de gran precisión y eficiencia ya que es primordial para la producción minera. Producto de estas razones, nacen los detonadores electrónicos, que en la actualidad abarcan prácticamente la totalidad de la Gran Minería. Las voladuras electrónicas por su mayor precisión tienen efectos secundarios positivos en distintos procesos posteriores, permitiendo ahorrar hasta un 30% de los costos aguas abajo, debido principalmente a la mejor fragmentación que otorga este tipo de iniciación.

Sabemos que los equipos de voladura electrónica tienen un mayor costo y necesitan mayor cuidado, pero estos costos resultan ser una inversión debido a los beneficios de este método. Los detonadores de retardo electrónico tienen mucha mayor precisión respecto a los de voladura pirotécnica, tienen mayor eficiencia y rendimiento técnico debido a la capacidad de control y monitoreo sobre las operaciones. Estas características han permitido reducir los costos de operación. Otra de las ventajas que el mercado destaca entre los detonadores electrónicos es que poseen un grado de seguridad altísimo, ya que tienen las protecciones y barreras necesarias para no activarse por sí solos.

Sin embargo, la experiencia ha demostrado que, bajo ciertas condiciones particulares, los detonadores electrónicos sufren deformación y ruptura de sus cápsulas y componentes internos durante la voladura. La principal causa de este fenómeno es la presión dinámica generada por las cargas explosivas en la vecindad del taladro donde se encuentra el detonador. Dependiendo de la intensidad y duración del pulso de presión, el daño puede ser temporal (reseteo) o permanente (no comunicación) hasta aplastamiento. Es por ello que se realiza esta investigación a través de la realización de pruebas especiales diseñadas para cuantificar este efecto y así generar recomendaciones que permitan disminuir su probabilidad de ocurrencia.

1.2. Formulación del problema

La cápsula de cobre del detonador Daveytronic posee una resistencia alta a la presión dinámica generada por la detonación de cargas adyacentes. Sin embargo, por muy alta que esta sea, es posible que sea superada cuando las condiciones del entorno son desfavorables (sobrecarga explosiva, geología desfavorable, diseño de perforación, secuencia, presencia de agua, etc.), siendo estos los factores que comúnmente influyen en efectos de presión dinámica. Entonces ¿Cuáles son las distancias críticas para los detonadores electrónicos Daveytronic a través de la estimación de presiones dinámicas inducidas por voladura?

1.3. Justificación

En el Perú, este tema es poco o casi nada conocido debido a que las pruebas para determinar presiones dinámicas generadas entre taladros de voladura son recientes y no son realizadas en nuestro país, este trabajo ayudará a mejorar el entendimiento de este tema e incentivará su estudio a nivel nacional.

Debido a la presión dinámica, los detonadores sufren deformación y ruptura de sus cápsulas y componentes internos durante la voladura, estos eventos indeseados derivan en cargas explosivas sin detonar que representan una condición crítica en términos de seguridad ya que tienen el potencial de afectar la integridad del personal y de los equipos. Adicionalmente, estas cargas no detonadas se traducen en sectores de fragmentación deficiente, lo que provoca una reducción localizada de la productividad en los procesos aguas abajo, especialmente en el proceso de carguío de material. Todas las razones mencionadas hacen que cualquier intento por evitar estos eventos se encuentre justificado con creces.

Esta tesis es de mucha importancia y será como un modelo para hallar las distancias críticas entre pozos cercanos con la finalidad de evitar daños a los detonadores por presión dinámica, dependiendo de las características del macizo rocoso del frente en cuestión.

1.4. Limitaciones

Las dificultades que se presentan al desarrollar este trabajo de investigación están relacionadas a la falta de conocimiento con respecto al modelo de vibraciones de Holmberg & Persson. Esto debido a que en el Perú no existen centros de investigación o especialistas capacitados que estudien el tema de presión dinámica. A pesar de ello, esta investigación sigue siendo válida ya que con la ayuda del asesor se puede superar el obstáculo de la falta de conocimiento, y en relación a la información necesaria para este estudio, se puede obtener a través de las pruebas realizadas por Davey Bickford en el Tajo la Quina, además de fuentes de información relacionadas con el tema.

Cabe mencionar que, el acceso a la base de datos de las pruebas realizadas es gracias a los permisos otorgados por Minera Yanacocha, además de que los resultados y análisis de esta prueba no son extrapolables a otro macizo rocoso, pues estos entregan un antecedente en cuanto a los factores que inciden mayoritariamente en la propagación de las presiones y del grado de influencia que estas pueden alcanzar en función de los datos de geología entregados por la mina para esta unidad geológica; por tanto, cualquier otra unidad con diferentes características, deberá ser estudiada de manera independiente.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Definir distancias críticas para los detonadores Daveytronic debido a presiones dinámicas.

1.5.2. Objetivos específicos

- Realizar un modelo de vibraciones, aplicando la formulación de Holmberg & Persson.
- Calcular las propiedades intrínsecas de la roca a partir del modelo predictivo de vibraciones.
- Realizar una estimación de las presiones a través del software JKSimblast.
- Estimar distancias críticas para distintos escenarios, en base a la resistencia de las cápsulas de aluminio y cobre, diámetro de taladro, longitud de carga y densidad del explosivo, que eviten la falla mecánica de los detonadores Daveytronic debido a presiones dinámicas.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

A raíz del hallazgo de una prima armada con sus detonadores electrónico y no eléctrico, asociada al taladro N° 19 del Proyecto 3810 136, con fecha 12 de Agosto del 2015 en la Mina Cerro Corona; Orica propuso realizar un estudio diseñado para cuantificar y entender el fenómeno de las presiones dinámicas, y a partir de este obtener recomendaciones y buenas prácticas que permitan controlar el riesgo de ocurrencia de esta anomalía. La prueba fue ejecutada con éxito el día viernes 05 de Febrero del 2016, junto con la voladura del Proyecto 3780 166 de Roca con dureza 3 en la Mina Cerro Corona. Se perforó una configuración de malla compuesta por 05 taladros en 7 7/8 pulgadas, a distancias reales de 2.30; 4.70; 5.00 y 5.70 metros, distribuidos en dos ejes perpendiculares entre sí, respecto a 01 taladro central (TC) perforado. Los 04 circundantes (T1, T2, T3 y T4) fueron instrumentados con sensores de presión resistivos de carbón, adosados al booster y primados en dos puntos para asegurar la detonación efectiva de estos taladros. De los resultados obtenidos, se observó que: el peak de presión registrado en la muestra alcanza un valor de 532 [bar]. Para facilitar una adecuada interpretación de los datos, se incorporó a la muestra, el valor de la presión de barreno en las paredes del taladro, cuya magnitud alcanza, un valor de 34251 [bar] según la VOD obtenida en el estudio es de 5096 [m/s]. La incorporación de este dato, permitió inferir mediante

regresión, una curva tendencial de atenuación de presión por distancia y generar una recomendación válida que permita minimizar el riesgo de falla por presión dinámica de la operación de voladura con los parámetros utilizados (diámetro de perforación, largo de taladros, tipo de explosivo, longitud de taco, litología, etc.). De acuerdo a la ecuación generada a partir de los datos recuperados, se alcanzó un peak de presión dinámica de 1000 (bar) a una distancia de 3.2 (m). En base de este dato, se ajustó la curva sobre este valor levantando el límite de tolerancia a 1500 [bar] lo que desplazó la distancia horizontal mínima hasta un valor de 4.0 (m) que representa la distancia crítica de operación en diámetro 7 7/8 pulg. (Orica, 2016)

Debido a los últimos eventos indeseados de tiros no detonados en Rajo Rosario por efecto de fallas de detonadores electrónicos i-kon por presiones dinámicas, es que OMS (Orica Mining Services) propuso a CMDIC (Cia Minera Dona Ines de Collahuasi) la realización de pruebas especiales diseñadas que permitan disminuir su probabilidad de ocurrencia. Se realizaron 3 pruebas durante el mes de junio donde se instalaron sensores de presión resistivos de carbón junto a boosters iniciados con detonadores i-kon. Los resultados de estas pruebas indican que dependiendo de la condición de un macizo rocoso de mala calidad y/o saturados en agua, existe una alta posibilidad de ocurrencia de falla por efecto de presiones dinámicas si no se toman consideraciones adecuadas. Los monitoreos arrojaron que a distancia de 5 metros es posible esperar 2.500 bares de presión de gases o 500 bares de presión por onda de choque (con velocidad de propagación de 1.680 m/s). Dichos registros se encuentran por sobre el umbral de resistencia de presión para los detonadores i-kon con cápsula de Cu (700 bares), detonadores i-kon con cápsula Cu-Zn (1.000 bares) y detonadores i-kon con cápsula Cu-Zn + Booster ProTECT-i (1.200 bares). Las ecuaciones de ajuste determinaron un comportamiento exponencial de los fenómenos de presión dinámica. La presencia de un macizo rocoso de baja calidad geotécnica en el sector (RQD 25, FF>20 e Insitu Block Size 10cm), condicionan el acentuamiento de transferencia de presiones dinámicas pozo a pozo. Con la finalidad de evitar daños a los detonadores por presión dinámica, se recomendó aumentar a 5,5 m la distancia crítica entre pozos cercanos a ser detonados en forma instantánea. (Orica, 2012)

Una inadecuada distribución de las distancias entre pozos en terreno debido a una falta de información geológica y estructural en los proyectos de expansión en Cerro Verde trajo como consecuencia una excesiva transferencia energética al medio generando un problema de presión dinámica. En la voladura realizada el 21/02/14 proyecto 0045, se observó el intenso esponjamiento debido a una transferencia optima de energía hacia el macizo rocoso, esto

ligado a las características asociadas a un diseño de dimensionamiento de pozos inadecuado aumentó la probabilidad de generar un tiro quedado por presión dinámica, siendo necesario disminuir esta interacción roca & explosivo. A partir de los diferentes disparos de pruebas, se ha verificado que los factores de potencia, el explosivo usado y los tiempos de retardo, para cada dominio geológico estructural encontrado, convergen de manera favorable en obtener los resultados que permiten evidenciar el desarrollo de una interferencia de energía al medio rocoso. Se determinó el tiempo de interferencia en 4 ms, aplicando el diagrama de Lagrange para dos pozos detonados en un tiempo determinado (para las ondas P refractadas del primer pozo y las ondas S incidentes del pozo retardado) y de igual manera al refractarse en una cara libre, obteniendo una menor área de interacción con el tiempo indicado. Los resultados obtenidos en los 11 disparos de prueba realizados en el mes de marzo para los múltiplos del tiempo calculado en iguales condiciones en las que se han venido desarrollando las operaciones en los proyectos especiales de expansión en sociedad minera Cerro Verde antes del presente estudio, permitieron evidenciar una menor transferencia de energía al medio rocoso con lo cual las probabilidades de generar algún evento relacionado a presión dinámica por las situaciones planteadas se han controlado. (Orica, 2014)

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Área de Estudio

2.2.1.1. Generalidades

Minera Yanacocha es la mina de oro más grande de Sudamérica, ubicada en la provincia y departamento de Cajamarca, a 800 kilómetros al noreste de Lima, dedicada a la extracción de oro y plata por métodos de gran minería a tajo abierto.

Sus operaciones se encuentran a 45 kilómetros al norte del distrito de Cajamarca, dentro de cuatro cuencas: Quebrada Honda, Río Chonta, Río Porcón y Río Rejo.

A finales de los 80s e inicios de lo 90s, Newmont exploró la zona ubicada al norte de Cajamarca, logrando identificar zonas mineralizadas. Una vez descubierta, el área de geología de la mina realizó estudios más detallados que le permitieron identificar cantidades precisas de mineral.

El yacimiento fue descubierto en 1985 y posteriormente en 1990 se llevaron a cabo los estudios de factibilidad en una planta piloto de lixiviación en pilas. En 1992 fue constituida legalmente la empresa Minera Yanacocha S.R.L., llegando a producir la primera barra de doré el 7 de agosto de 1993 proveniente del tajo Carachugo. La empresa está conformada por los siguientes accionistas:

- Newmont Mining Corporation - 51,35%
- Compañía de Minas Buenaventura - 43,65%
- International Finance Corporation - 5%

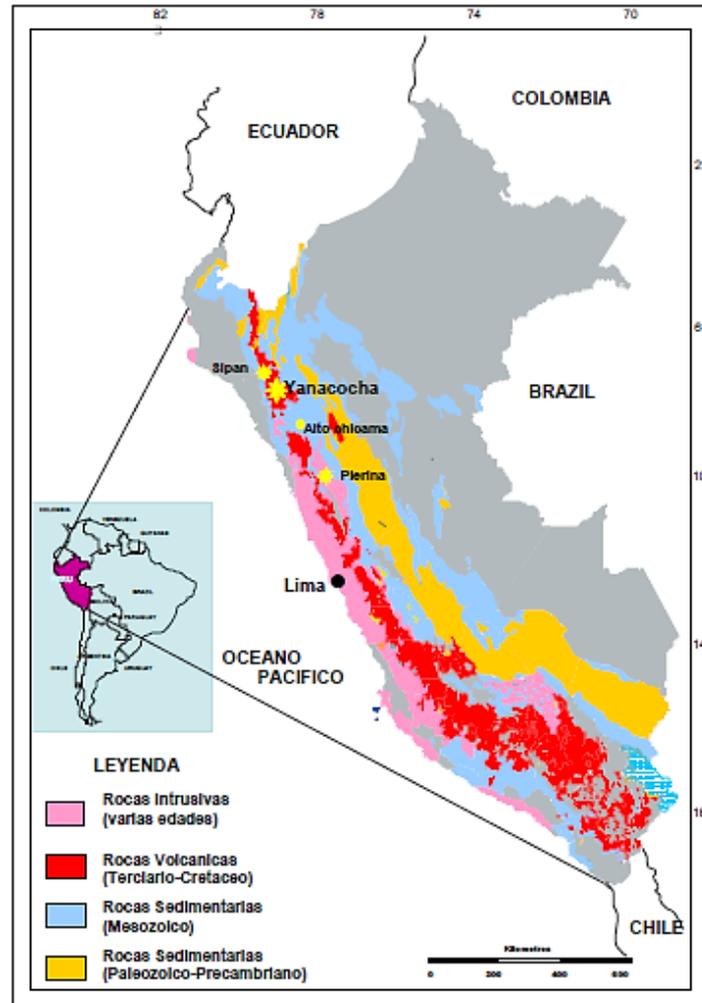
El yacimiento lo componen cinco minas a cielo abierto, cuatro plataformas de lixiviación y tres plantas de recuperación de oro. Se trata del yacimiento más importante de América Latina, pues en 2005 se produjeron 3 333 088 onzas del preciado metal. Sin embargo, durante los últimos años Yanacocha ha experimentado una caída en su producción debido al agotamiento de las reservas.

El mineral que produce Yanacocha se vende en su totalidad en el mercado spot, a refinerías de clase mundial y bajo estándares internacionales de calidad, seguridad y protección del medio ambiente.

2.2.1.2. Ubicación y Acceso

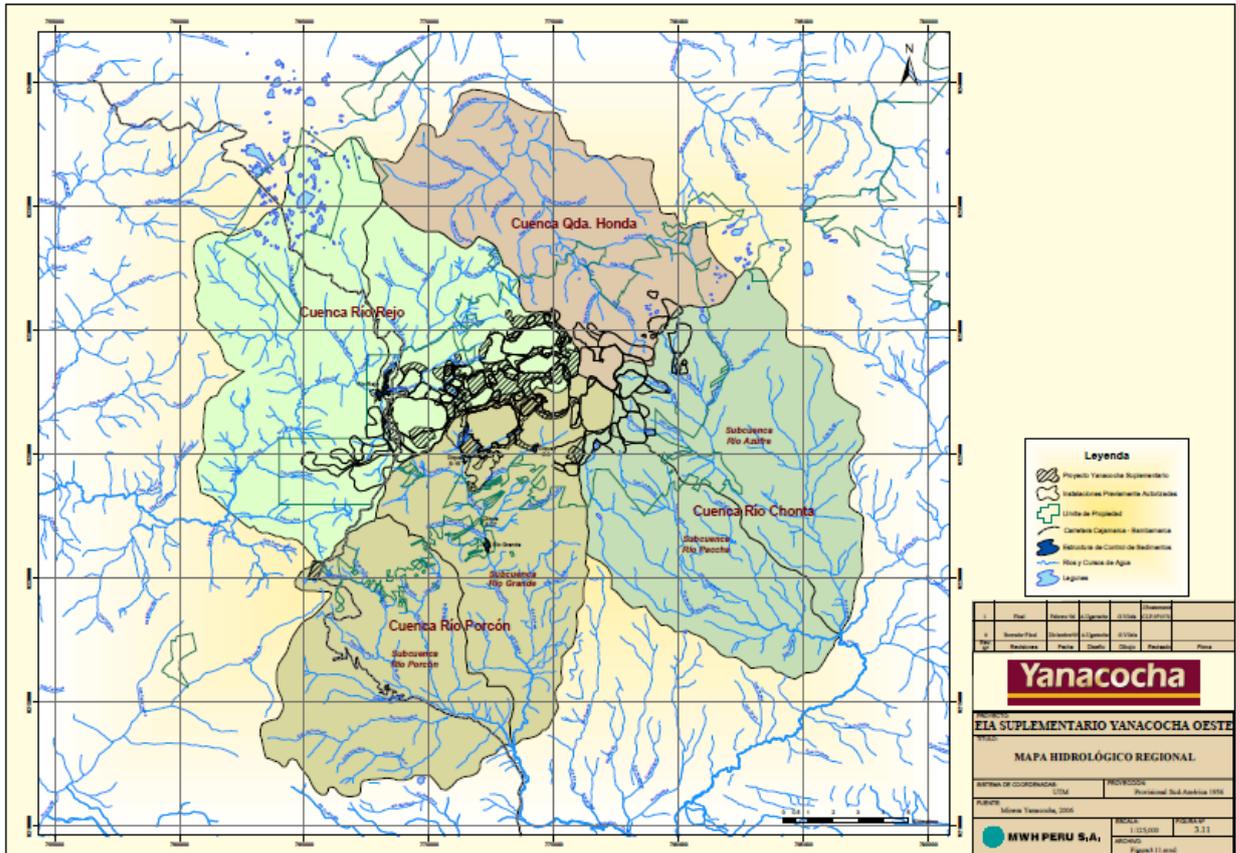
Minera Yanacocha se ubica en la Provincia y Departamento de Cajamarca sobre la Cordillera de Los Andes, al norte del Perú, con una localización aproximada de 7° Latitud Sur y 78°30' Longitud Oeste, aproximadamente a 32 kilómetros al norte de la ciudad de Cajamarca, por carretera. Toda la propiedad comprende un área de más de 175 000 hectáreas. Con elevaciones que van desde los 3 700 hasta los 4 100 msnm. El acceso a la mina desde la ciudad de Cajamarca es a través de una vía asfaltada y toma aproximadamente una hora. El distrito está ubicado en la línea divisoria continental, separando arroyos que drenan hacia el este dentro de la Cuenca del Amazonas y luego al Océano Atlántico (en las cuencas de Porcón, Chonta y Honda) de aquellas que drenan hacia el oeste al Océano Pacífico (en la cuenca Rejo) (ver Figura n.º2.2).

Figura n.º 2.1. Mapa de ubicación de MYSRL en los distritos de Cajamarca.



Fuente: Yanacocha Responsabilidad Social y Ambiental, 2006.

Figura n.º 2.2. Mapa de ubicación de las cuatro cuencas hidrográficas.



Fuente: Minera Yanacocha, 2006.

2.2.1.3. Geología General

El Distrito de Yanacocha está centrado en unidades volcánicas intermedias a ácidas del Eoceno al Mioceno conocidas como Complejo del Domo de Flujo Yanacocha. La geología refleja los procesos activos tectónicos y volcánicos de los Andes. En el distrito minero, hubo erupciones de magma con sílice o ácido a lo largo de fallas estructurales, produciendo estructuras de domo en el flujo.

Estas composiciones de sílice fueron mineralizadas por soluciones hidrotérmicas ricas en oro y, dado que estas composiciones contienen oro, son el objetivo principal de la extracción.

Las rocas contienen predominantemente cuarzo, alunita $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$, además de arcillas. La mineralización aurífera estuvo acompañada de pirita, enargita $Cu_3(As,Sb)S_4$, y otros minerales sulfúricos de cobre (covelita, digenita y chalcocita). El mineral contiene niveles elevados de arsénico, 130 mg/kg, y

plomo, 630 mg/kg, además de bajos niveles de cobre, 41 mg/kg, mercurio, 8.6 mg/kg, zinc, 25 mg/kg, y molibdeno, 25 mg/kg. (Turner, 1997).

En el Distrito Minero de Yanacocha, las formas de sílice están casi totalmente oxidadas. Alrededor de estas formas hay zonas argílicas avanzadas, y alteración argílica, que no contienen oro, sino que contienen minerales de sulfuro sin oxidar, teniendo potencial de generar ácido.

La profundidad de oxidación (la profundidad donde predominan los minerales de sulfuro) varía en todo el distrito, fluctuando entre más de 200 m en Yanacocha Sur, hasta 150 m en el centro de Maqui Maqui, hasta la exposición superficial de minerales de sulfuro en márgenes de Yanacocha Norte. No se han encontrado zonas de sulfuro bajo los yacimientos de Carachugo o San José en perforaciones de 300 m de profundidad. En esta profundidad, la roca empieza a ceder y se mezclan los óxidos con sulfuros, conformando la zona transicional de 50 a 60 m de espesor. Debajo de la zona transicional, las formas minerales de oro continúan contenidas en sulfuros primarios.

En esta zona, los niveles poco profundos son porosos y contienen bajas concentraciones de la mayoría de los metales, con la excepción del mercurio (por ello aparece como subproducto del proceso minero). Por ejemplo se encuentra el cobre que ha lixiviado, hay oro en óxidos de hierro, plata en jarosita (hidróxido de sulfato de hierro potásico), y arsénico en escorodita (arsenato de hierro hidratado) o con plomo en beudanita (un sulfato de arsénico-plomo). En la zona de sulfuro, hay oro en enargita, que a su vez contiene plata, y pirita que contiene arsénico.

A diferencia de los otros yacimientos minerales, La Quinua es un yacimiento fluvio-glacial cuaternario. Un glaciar cortó la parte superior y una porción del lado oeste del yacimiento Yanacocha y lo transportó 2 km al oeste al área de La Quinua. Los arroyos y posiblemente un aluvión (huaico) re movilizaron el material glacial, extendiéndolo en un área de 9 km², dejando la mineralización aurífera en gravas originalmente derivadas del yacimiento Yanacocha.

2.2.1.4. Geología Regional

La mineralización de oro en el distrito de Yanacocha forma parte del cinturón de depósitos polimetálicos que están ubicados a lo largo de la Cordillera de los Andes, y el cual está asociado al volcanismo Cenozoico y las rocas intrusivas (Turner, 1997).

Los Andes Peruanos son el resultado de la subducción de la litósfera oceánica (placa de Nazca) debajo de la litósfera continental (placa Sudamericana). La primera actividad magmática ocurre en el Terciario inferior y es representado por un volcanismo efusivo de tipo lávico andesítico, correspondiente al volcánico Llama. Contemporáneamente se inicia la primera pulsación intrusiva en la región, correspondiente a intrusivos dioríticos (stocks Michiquillay y Picota) datada del Eoceno medio.

La segunda manifestación magmática ocurre durante el Mioceno inferior (fase Quechua I) y corresponde al emplazamiento de numerosos stocks, entre ellos los pórfidos de: Chailhuagón, Perol, Mishacocha, Corona, Jesús y Yanacocha, todos ellos datados (K/Ar) entre 11 y 20 Ma. La composición evoluciona desde una microdiorita con hornblenda hasta microgranodioritas y pórfidos cuarzo feldespático. Paralelamente a esta fase intrusiva se desarrolla la depresión volcano tectónica de Yanacocha (20 x 20 km), compuesta de derrames lávicos y flujos piroclásticos de composición dacítica-andesítica y asociado a domos porfíricos andesíticos, cuyas edades varían desde el Mioceno inferior a medio entre 10 y 19 Ma (Longo, 2002; Turner, 1997). Este volcanismo es el principal albergante de la mineralización epitermal de Au-Ag y está asociado a stocks porfíricos del tipo pórfidos, diatremas y brechas pipes.

Posterior a la gran actividad volcano-plutónica Miocénica se produce el levantamiento Andino y erosión, seguidamente se deposita el volcanismo de la Formación Huambos, constituido por coladas piroclásticas de composición andesítica-dacítica que recubren valles y depresiones del distrito de Yanacocha. Finalmente en el Pleistoceno, ocurre una fuerte etapa de glaciación que erosiona el depósito de Yanacocha dando lugar a la depositación de morrenas y gravas del depósito La Quinua.

2.2.1.5. Estratigrafía Sedimentaria y Volcánica

La geología de la región de Cajamarca - Yanacocha está constituida por un basamento sedimentario de edad Cretácea que ha sido plegado, fallado e intruído por stocks terciarios y recubiertos por efusiones volcánicas de edad Terciaria.

Regionalmente el grupo Calipuy se subdivide en dos unidades: Volcánicos Llama y Volcánicos Porculla. Sobre ellas yacen con discordancia erosional las ignimbritas de la Formación Huambos. Turner, considera a la Formación Huambos como parte del Grupo Calipuy.

Basamento Cretáceo

La serie Cretáceo inferior, está constituida principalmente por una secuencia arenácea cuarcítica con intercalaciones de limolita, correspondientes al Grupo Goyllarisquizga; estas secuencias están coronadas por una secuencia limocálcarea correspondientes a las grandes transgresiones albiánas. Las rocas del Cretáceo superior están mejor desarrolladas y conforman una potente secuencia calcárea, correspondientes a las formaciones: Inca, Chulec, Pariatambo, Yumagual, Mujarrún, Quilquiñan y Celendín. Las rocas del Cretáceo superior y Paleoceno (Terciario inferior) consisten de Capas Rojas y conglomerados de la Formación Chota. Las capas rojas están relacionadas con la fase orogénica Andina del Cretáceo superior (Reyes, 1980; Megard, 1987; Ingemmet, 1995).

Volcánicos Llama

Es la secuencia basal y está dominada por flujos de lava, conglomerados volcánicos (flujo de debris) y rocas volcanoclásticas. Esta secuencia se localiza al sur del distrito de Yanacocha y presenta una débil alteración argílica y propilítica.

Volcánicos Porculla

Consiste de rocas piroclásticas intercaladas con niveles lávicos y cortadas por multi-fases de eventos intrusivos. Según Turner, los volcánicos Porculla se subdividen en el Complejo Volcánico Yanacocha y los Volcánicos Regalado. Complejo Volcánico Yanacocha: Esta secuencia volcanoclástica se extiende regionalmente y es en donde se alberga la mineralización del distrito de Yanacocha. Este Complejo Volcánico de edad Miocénica está constituido por rocas piroclásticas y flujos de lava de composición andesítica.

Volcánicos Regalado: Una secuencia delgada de lavas andesíticas muy viscosas, cubren principalmente las zonas de depresiones y sobreyacen a las rocas del Complejo Volcánico Yanacocha. Estos flujos de probable origen fisural son correlacionados con los Volcánicos Regalado (Reyes, 1980).

Volcánicos Huambos

Posterior a la gran actividad volcano-plutónica Miocénica se produce el levantamiento Andino y erosión, seguidamente se deposita el volcanismo de la Formación Huambos constituido por coladas piroclásticas andesítica-dacítica que recubren valles y depresiones del distrito de Yanacocha. Dos secuencias de distinta composición de flujos de brechas piroclásticas son reconocidas al norte y sur del distrito. La primera de composición dacítica, corresponde al

miembro Fraylones y la segunda de composición andesítica corresponde al miembro Otuzco, ambos de la Formación Huambos, asociados a distintos centros eruptivos.

2.2.1.6. Geología Estructural

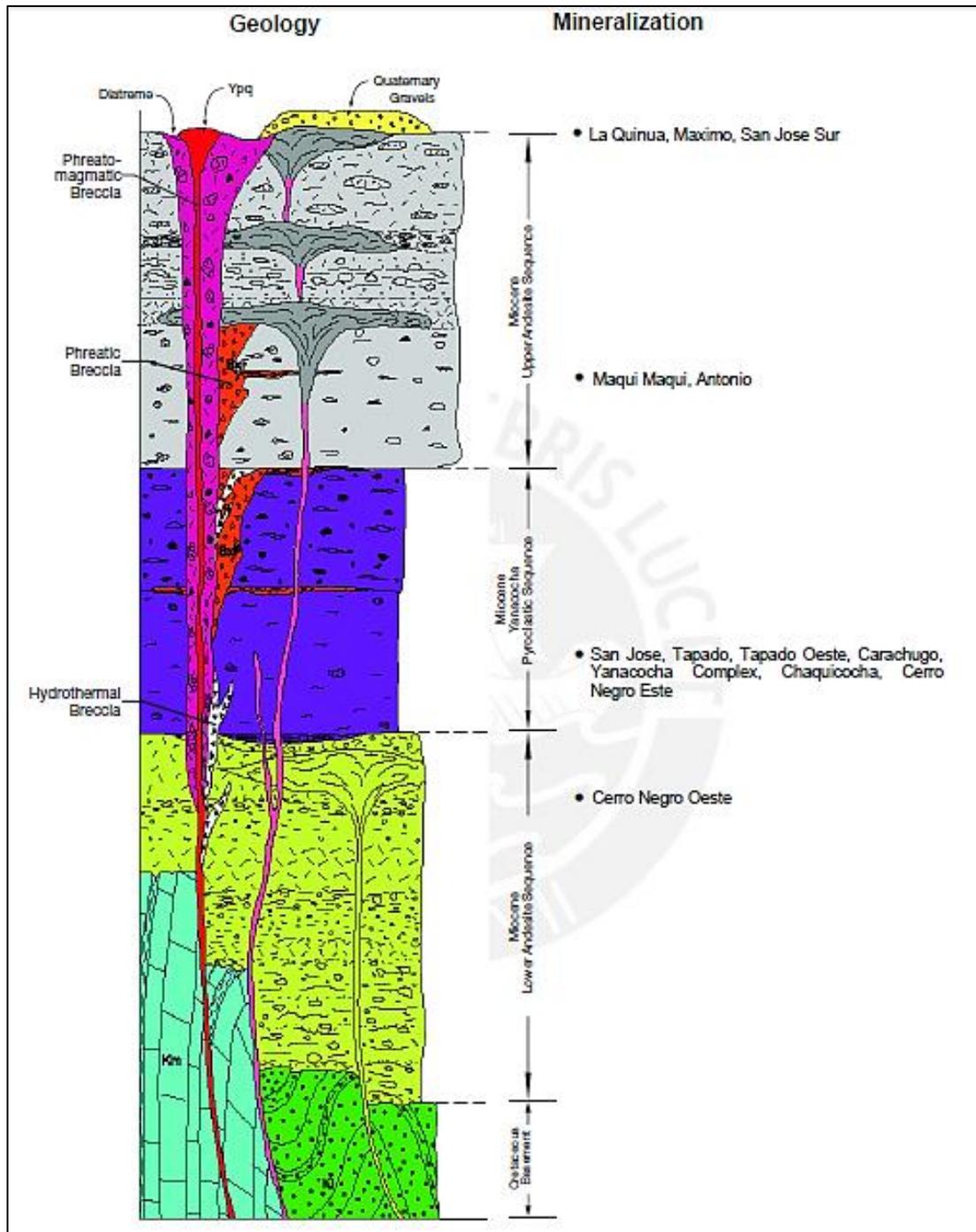
La más importante característica estructural en la región es el lineamiento transandino que forma el corredor estructural Chicama - Yanacocha (Quiroz, 1997).

Este corredor alberga una serie de fallas de dirección NE, emplazamiento de intrusivos, y controla la localización de varios pórfidos y yacimientos de alta sulfuración.

Un conjunto de fallas de rumbo general NW-SE se disponen con ligeras variaciones de rumbo, definiendo el corredor estructural Yanacocha - Hualgayoc, de 5 a 6 Km de ancho (Quiroz, 2002). A lo largo de este corredor se disponen coincidentemente una serie de ocurrencias de mineralización tanto dentro como fuera del distrito de Yanacocha.

Dentro del distrito de Yanacocha se observa un alineamiento de dirección NE definido por la sucesión de depósitos que constituyen parte del Complejo Volcánico Yanacocha. Entre ellos tenemos al Cerro Yanacocha, Carachugo, Maqui Maqui, Chaquicocha, Cerro Negro, Cerro Quillish, el Tapado y La Quinua.

Figura n.º 2.3. Columna estratigráfica generalizada para el distrito Yanacocha.

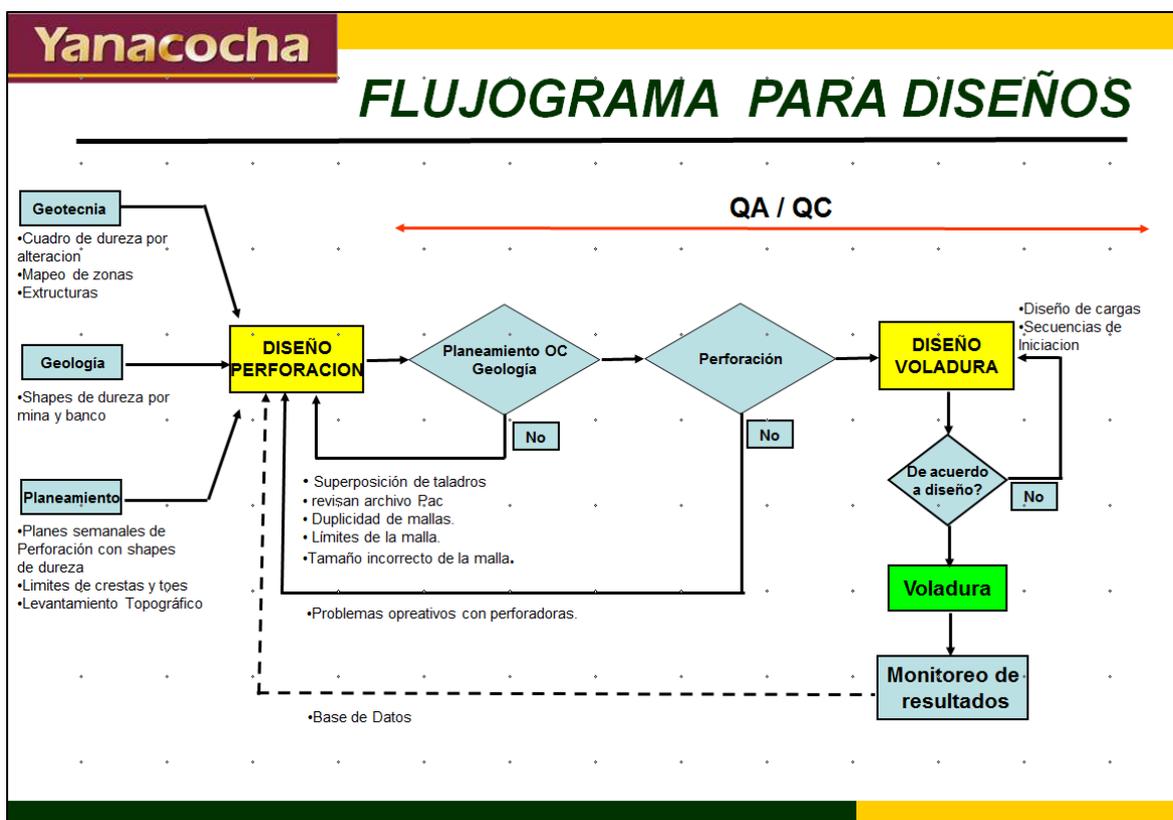


Fuente: Modificado de Teal & Benavides, 2010.

2.2.1.7. Procesos Operativos Primarios

Los procesos operativos primarios se refieren a los trabajos de perforación y voladura, los cuales son soportados por las diferentes áreas como Geotecnia, Geología y Planeamiento, quienes a través de una serie de coordinaciones y evaluaciones, definen la zona a perforar, muestrear y disparar, tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura n.º 2.4. Gestión de Voladura en Minera Yanacocha.



Fuente: Ingeniería P&V en Minera Yanacocha, 2015.

2.2.2. Presión Dinámica

Todo cuerpo en la tierra está sometido a la acción de la presión atmosférica (estática) y cualquier presión adicional que sea ejercida sobre su superficie es denominada dinámica. La presión total sobre un objeto impactado por cualquier fuerza es la suma de las presiones estática y dinámica.

Bajo esta consideración, la presión dinámica es un fenómeno inherente al proceso de voladura, interpretado como la fuerza por unidad de área ejercida por la onda de

choque, generada en el proceso de detonación del explosivo, esta presión se transmite a los taladros circundantes debido principalmente a 3 mecanismos:

- Transmisión de la onda de choque a través del medio rocoso y la columna explosiva al interior de él(los) taladro(s) adyacente(s). La generación y transmisión de la onda de choque es un fenómeno intrínseco de la detonación de un explosivo sin importar el tipo de macizo rocoso por el cual se propague. La atenuación de su impacto, depende exclusivamente de las propiedades geológicas y geotécnicas de la roca (IBS, RQD, FF, UCS, densidad, entre otras).
- Deformación del medio circundante y aprisionamiento de las cargas y el booster por desplazamiento del macizo (bloques preexistentes): La deformación de los taladros contiguos es un fenómeno típico en macizos con presencia de bloques preformados, estos debido a la deformación y expansión en volumen del taladro más cercano detonando, es capaz de desplazarlos pudiendo aplastar los booster y en consecuencia generar una falla sobre los detonadores electrónicos cercanos.
- Transmisión de presión de gases por efecto de la detonación a altas presiones y temperaturas, que fluyen por fracturas existentes a través del medio rocoso: La transmisión de gases de un taladro a otro, es un fenómeno muy poco frecuente sobre un detonador. Ante la presencia de un macizo de mala calidad, con alto grado de agrietamiento y discontinuidades, el gas busca estas zonas de menor resistencia para evacuar, pudiendo afectar gravemente un detonador cercano. Es usual tener zonas más agrietadas en la parte superior de la voladura, producto de la pasadura de la voladura en el nivel superior.

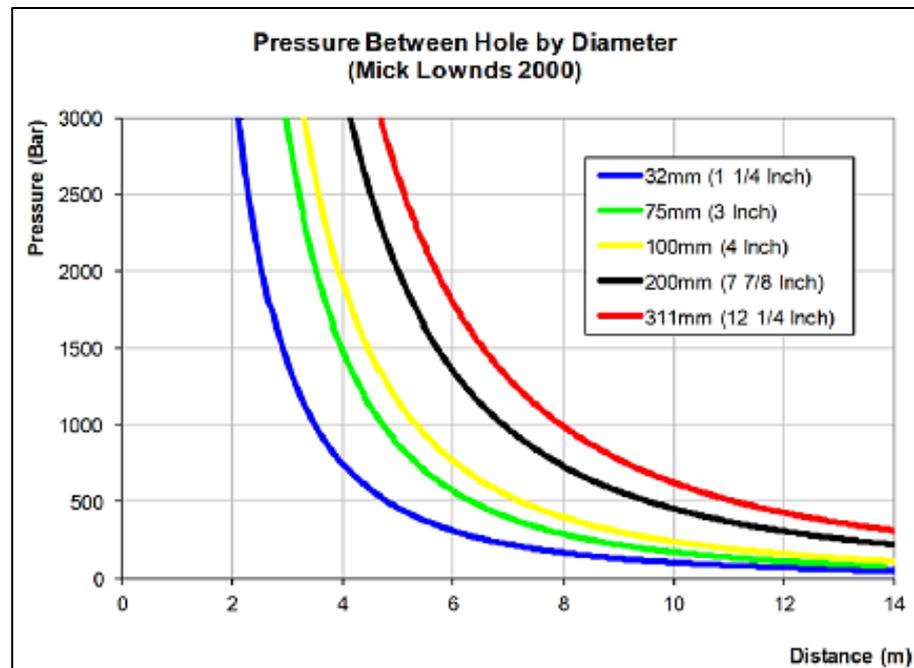
Estos factores pueden verse resaltados, si el medio está constituido por rocas porosas, altamente fracturadas, débiles y/o saturadas en agua.

Por otra parte, la presión afecta mayoritariamente a objetos vacíos. Para el caso de un detonador electrónico, en su estado de presión estática posee una diferencia entre la presión interior y exterior en la zona del circuito responsable de la iniciación.

En el caso de una detonación cercana, la presión externa, puede llegar a ser tan grande en comparación a la interna del detonador, que la cápsula puede sufrir deformación, provocando serios daños al circuito interno.

Estudios técnicos, han demostrado que, a igualdad de parámetros de carguío y características de roca, el comportamiento de la presión dinámica es función directa del diámetro de perforación, según se muestra a continuación (Mick Lownds, 2000).

Figura n.º 2.5. Presión vs Distancia para diferentes diámetros de perforación.



Fuente: Orica, 2016.

2.2.3. Fundamentos de Vibraciones

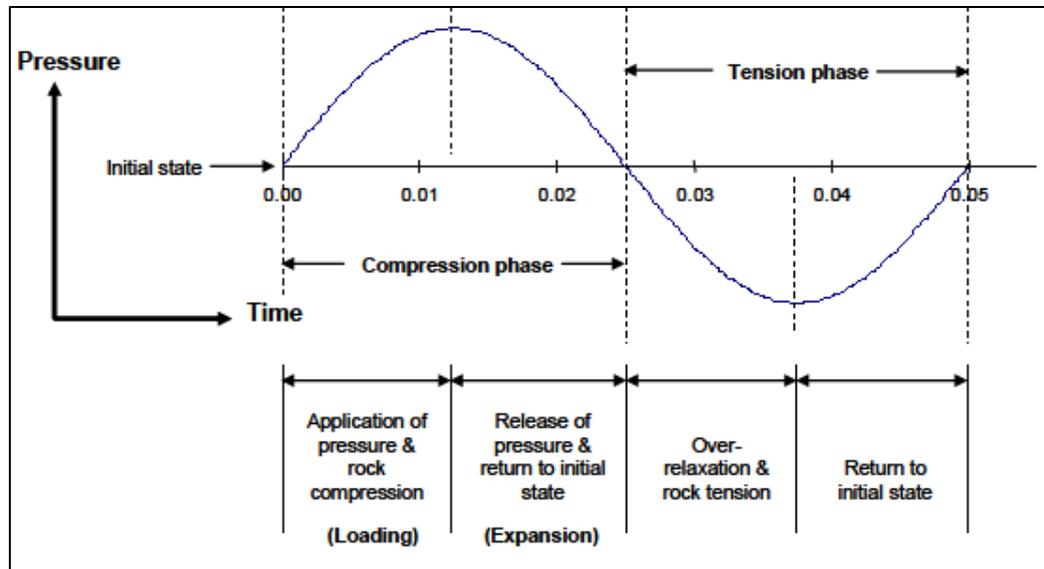
2.2.3.1. La Naturaleza Cíclica de las Vibraciones

Las vibraciones son un movimiento cíclico que ocurre dentro de un medio, debido al paso de fases alternativas de compresión y tensión. Con respecto a las vibraciones por voladuras inducidas en la roca, generalmente se considera que las vibraciones son producidas por la detonación del explosivo.

Consideremos un caso simple, de un solo taladro de voladura con una pequeña carga de explosivo (Largo = 6 * diámetro, aproximando a una carga esférica). Cuando la carga es detonada, la masa rocosa alrededor de la carga es inmediatamente sometida a compresión. Esto produce la componente de compresión del ciclo de vibraciones.

Después de la fase de compresión, la roca sufre una fase de expansión en un intento a volver a su estado original. Ya que todos los materiales se comportan, en mayor o menor medida, como un resorte, una vez que la fuerza de compresión es removida, la roca se relaja y vuelve a su estado original pasando más allá de ésta. Como la roca se mueve más allá de su posición original, esto crea una fase de tensión del ciclo de vibraciones. El ciclo completo es mostrado en la siguiente figura.

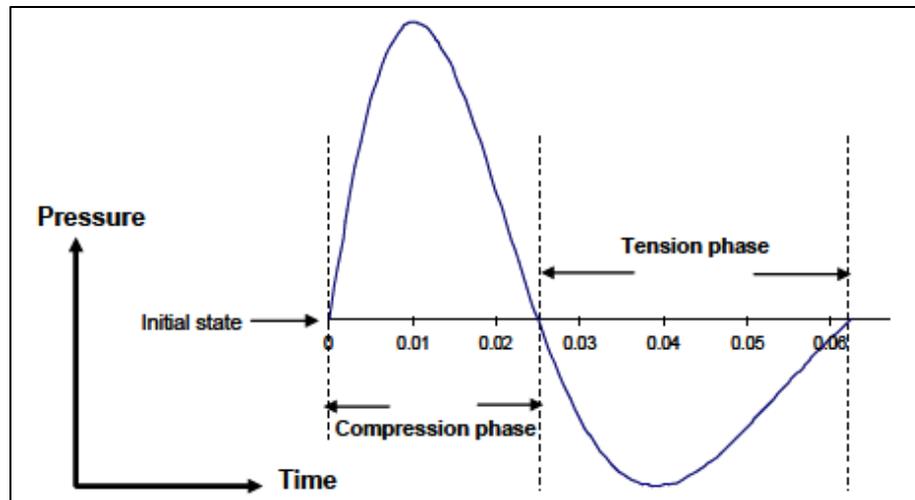
Figura n.º 2.6. Presión vs Distancia para diferentes diámetros de perforación.



Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

Ya que la roca responde como un resorte al paso de las ondas de vibraciones, (el módulo de Young representa la rigidez del resorte), el ritmo al cual la roca se relaja puede ser diferente al ritmo a la cual es sometida la roca por un pulso de corta duración, que genera la detonación de una carga explosiva. En este caso, no es inusual ver, en rocas débiles con módulo de Young relativamente bajos, que las fases de compresión y tensión tienen diferentes amplitudes y diferentes duraciones (ver figura n.º 2.7).

Figura n.º 2.7. Presión y relajación no simétrica a un elemento de roca.



Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

2.2.3.2. Propiedades Básicas de las Ondas

Las propiedades básicas de propagación de ondas de vibraciones son:

2.2.3.2.1. Frecuencia de las vibraciones

La frecuencia de las vibraciones indica el número de veces por segundo que la onda de propagación pasa por un ciclo completo de compresión y tensión. El factor que tiene una gran influencia en esto son las dimensiones de las cargas, columnas grandes de carga tienden a producir bajas frecuencias. Sin embargo otros importantes factores incluyen los módulos de la roca y la razón de carga producida por la detonación (es decir la velocidad de detonación). La frecuencia dominante es considerada generalmente como el inverso del tiempo del ciclo completo.

Se observará generalmente que las ondas de vibraciones registradas a grandes distancias tienden a tener bajas frecuencias en comparación a aquellas registradas a cortas distancias. Es importante saber que una onda con una frecuencia única, y que se propaga a través de un medio homogéneo, mantiene su frecuencia en toda su distancia de viaje y a través de todo tipo de roca. El hecho que las ondas registradas a grandes distancias tengan frecuencias menores a aquellas registradas a cortas distancias confirma que las ondas de vibraciones contienen un amplio rango de frecuencias, y

que las ondas de altas frecuencias son atenuadas preferentemente, dejando un espectro dominado por componentes de bajas frecuencias. Si la frecuencia es baja, el desplazamiento es mayor, por lo que se produce un mayor daño en el medio en que se transmite las vibraciones.

2.2.3.2.2. Amplitud de las vibraciones

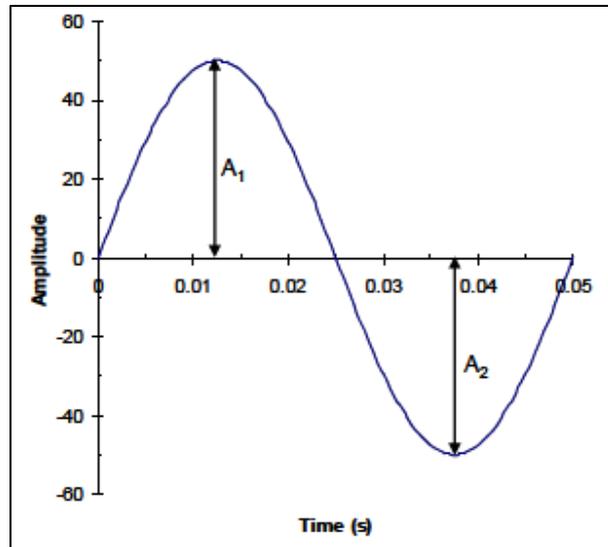
La amplitud de las vibraciones es una medida de su “Fuerza” y la energía de una onda de vibraciones es proporcional al cuadrado de su amplitud. En el caso de una vibración continua, en la cual cada ciclo de propagación tiene la misma forma, un valor único es suficiente para describir la “fuerza” de la vibración o la amplitud.

Es importante tener en cuenta, que en la medición de vibraciones en macizos rocosos, no se hacen distinciones entre amplitudes positivas o negativas, siendo éstas reportadas sólo como positivas o su valor absoluto.

Las unidades de amplitud dependen del tipo de sensor utilizado para detectar el paso de la onda cíclica de esfuerzo. El paso de las ondas de vibraciones resulta en un desplazamiento real de la partícula, y es posible medir ese desplazamiento real, la velocidad de la partícula en movimiento, o su aceleración. Ya que la frecuencia del movimiento de la partícula puede ser alta (cientos de Hertz), en la práctica es fácil encontrar y usar dispositivos que tengan una adecuada respuesta a la frecuencia y sensibilidad para medir velocidad (geófonos) o aceleración (acelerómetros). Debido a que el desplazamiento, velocidad y aceleración están relacionados, la medida de cualquiera de éstas, teóricamente podría permitir el cálculo de las otras dos. Los dispositivos más baratos y fáciles de usar para medir las vibraciones son los geófonos, y con estos dispositivos las vibraciones son medidas en términos de velocidad de partículas y tiene la unidad de mm/s (pulgadas/s en USA).

La amplitud de la vibración, medida como velocidad de partícula, es universalmente considerada como el mejor indicador del esfuerzo inducido en el macizo rocoso, y por lo tanto considerado como el mejor indicador del potencial daño y el potencial efecto de fragmentación en la roca.

Figura n.º 2.8. Presión y relajación no simétrica a un elemento de roca.

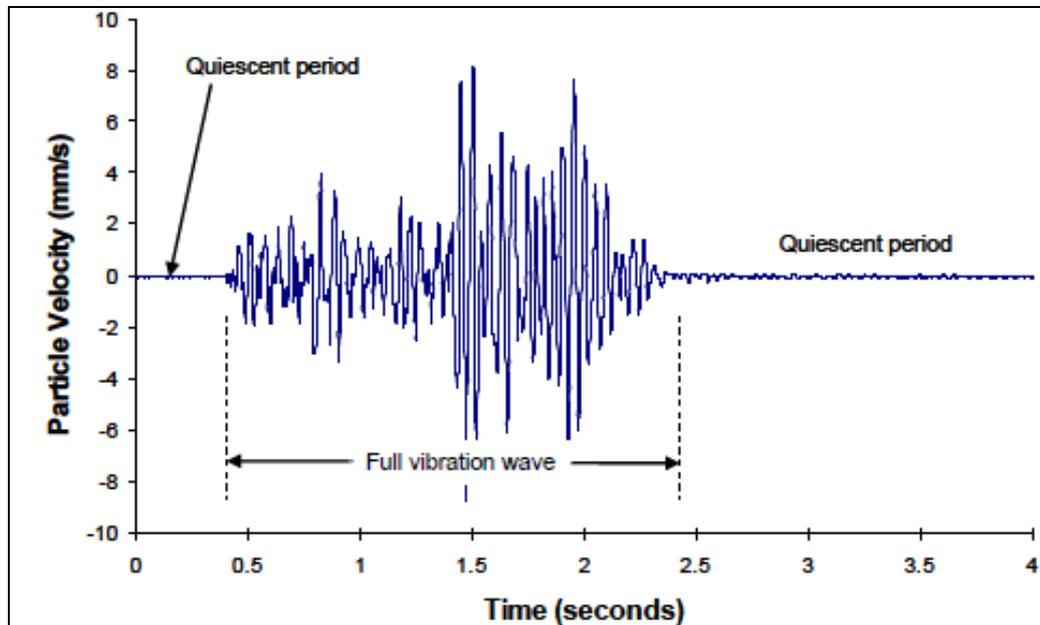


Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

2.2.3.2.3. Duración de las Vibraciones

La duración de las vibraciones dependen de dos factores principales: la duración de la voladura y la distancia del punto de monitoreo a la voladura. Para asegurar que el peak de velocidad de vibraciones (generado por una voladura) sea registrado y que la cantidad máxima de información pueda ser extraída de un registro de vibración, es importante que se registre completamente la duración de las ondas. Un buen registro de vibración mostrará un tiempo quieto previo al comienzo del registro de vibraciones, un completo detalle de las ondas de vibraciones, y un tiempo después del paso de las ondas, cuando el terreno ha vuelto a su estado de reposo.

Figura n.º 2.9. Onda completa de vibración.



Fuente: Blastware III, InstanTEL - Operador Manual.

La onda total de vibración, que es medida a partir de una voladura de producción, es el resultado de pulsos individuales producidos por cada taladro de voladura combinados todos en el punto de medición. El modelo en el cual ellas se combinan para formar la onda resultante variará de acuerdo a la dirección y distancia de la voladura, por lo tanto, dos registros de la misma voladura no producirán la misma onda de vibración. La duración de la vibración será un poco mayor que la duración de la voladura (es decir el tiempo entre la detonación del primer y último taladro). Normalmente la duración de la vibración es alrededor de 200 a 300 ms más larga que la duración de la voladura, debido al tiempo requerido para que la vibración llegue desde el último taladro detonado al punto de medición. La duración de la vibración se incrementa con el aumento de la distancia de propagación, ya que en grandes distancias, la refracción y reflexión de la onda se combinan con la onda directa, y un lento movimiento de ondas de superficie y ondas de corte comienzan a aumentar, separadas del rápido movimiento de las ondas de cuerpo. A 500 metros la onda de vibración puede ser de 500 a 1000 ms más larga que la duración de la voladura.

2.2.3.2.4. Longitud de Onda de las Vibraciones

La longitud de onda de una vibración es la distancia recorrida por la onda de vibración durante un ciclo completo de compresión y tensión, es decir un Periodo de la Onda.

La longitud de onda, λ , se puede calcular a partir de una onda de vibración con una frecuencia única, f , (es decir una onda armónica simple) por la fórmula $\lambda = v_p / f$ donde v_p es la velocidad de propagación de la onda P.

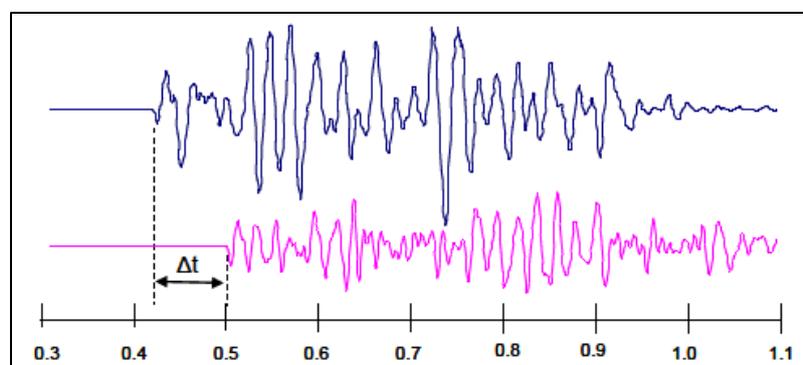
2.2.3.2.5. Velocidad de Propagación

La velocidad de propagación describe la velocidad con la cual la onda se desplaza a través de la roca. Esta velocidad puede ser medida utilizando dos geófonos ubicados a diferentes distancias de la voladura, y mediante la medición de la diferencia de tiempo de arribo de cada señal.

Cuando se usan múltiples geófonos para medir velocidad de propagación, la distancia de separación de los geófonos debe ser lo suficientemente grande para permitir un cálculo más preciso.

En la figura mostrada, los geófonos están separados 300 metros, y la diferencia de tiempo de arribo, t , es de 80 ms, correspondiendo a una velocidad de propagación de 3.750 m/s. La velocidad de propagación de onda P, v_p , se calcula usando la ecuación simple $v_p = s/t$, donde s es la distancia de propagación y t es el tiempo de propagación.

Figura n.º 2.10. Estimación de la velocidad de propagación usando geófonos separados a 300 metros.



Fuente: Blastware III, Instantel - Operador Manual.

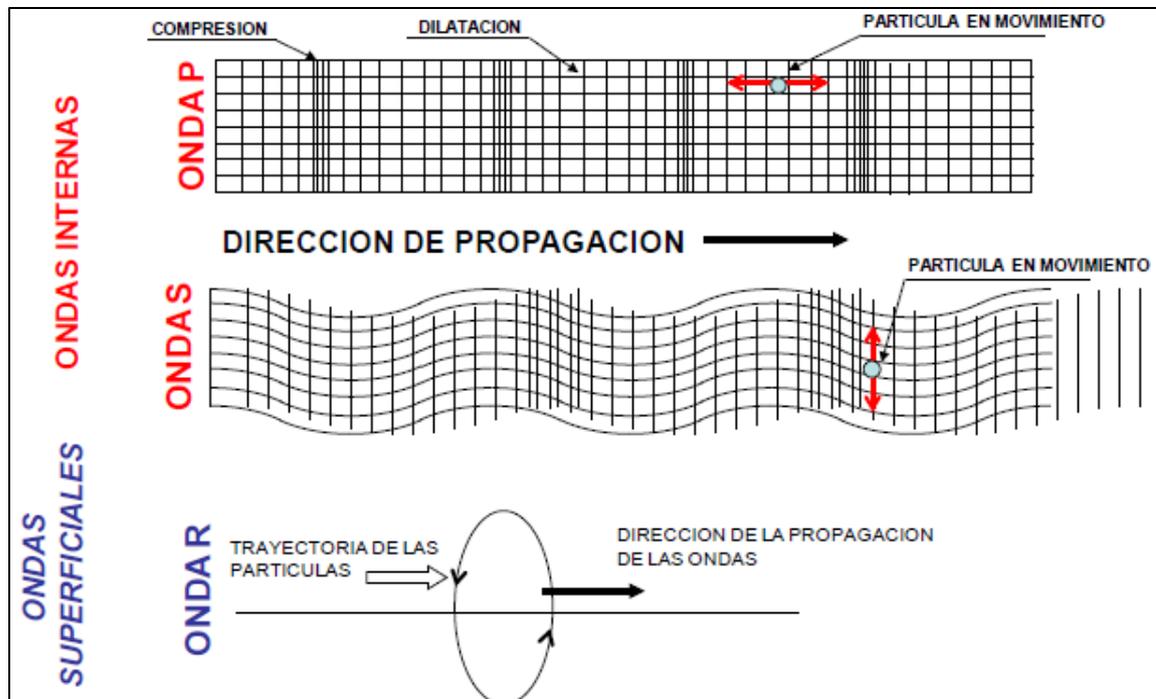
La mayoría de las rocas tienen una velocidad de propagación entre 3000 m/s y 5000 m/s. Mediciones de la velocidad de propagación en roca menores que 1500 m/s son consideradas poco confiables, y se debe revisar cuidadosamente el sistema de medición antes de aceptar un valor tan bajo, ya que ellas implican un grado de fracturamiento muy alto y que las distancias de transmisión de vibración sean probablemente muy 19 cortas. Mediciones de velocidades de propagación que excedan los 6000 m/s son consideradas también poco confiables, y nuevamente los sistemas de medición debieran ser cuidadosamente analizados antes de aceptar dichos valores tan altos.

2.2.3.3. Tipos de Ondas de Vibración

La onda de choque generada por la detonación de cargas explosivas crea tensiones que producen el fracturamiento en la roca. Esta además se propaga en forma esférica (en todos los sentidos) y transfiere una energía vibracional al macizo rocoso que es transmitida por una combinación de mecanismos que se representa fundamentalmente a través de ondas.

Los tres tipos principales de onda que se pueden observar cuando se monitorean las vibraciones generadas por voladura, aunque no todas ellas siempre se presentan o detectan son los siguientes: Ondas de Compresión; Ondas de Corte o Cizalle y Ondas de Superficie. Las ondas de compresión y de corte viajan dentro de la roca y pueden penetrar cientos de metros, aún kilómetros en la corteza terrestre, y están referidas como ondas de cuerpo. Las ondas de superficie, sin embargo, se transmiten muy cercanas a la superficie del terreno, y penetran dentro de la corteza terrestre no más que 1,5 a 2 veces su longitud de onda (aunque esto pueda representar algunos cientos de metros). A continuación damos una breve descripción de cada tipo de onda generada por la voladura.

Figura n.º 2.11. Ondas Vibracionales (ondas internas y superficiales)



Fuente: Libro de Vibraciones de EXSA.

Onda Longitudinal - Onda de Compresión (P): Normal a la dirección de la voladura en el plano Horizontal, movimiento a lo largo de una línea que une la fuente y el punto de registro. Consiste en una serie de movimientos de compresión y tensión, con oscilaciones de las partículas en la misma dirección de propagación. El término primario se origina en que esta onda tiene una gran velocidad de propagación y por ende, es la primera en llegar al punto de medición.

Onda Transversal (S): Perpendicular a la dirección de la voladura en el plano Horizontal, movimiento en ángulos rectos a una línea que une la fuente y el punto de registro.

Al momento que se genera la onda P, se produce un segundo tipo de onda que corta o tiende a cambiar la forma del material transmisor y genera movimientos en las partículas perpendiculares al frente de choque, acentuadas por el pulso de presión 20 inicial; por la duración de la onda P o por discontinuidades del macizo rocoso. A este tipo de onda se le denomina de Onda S, de Corte, Forma o Secundaria.

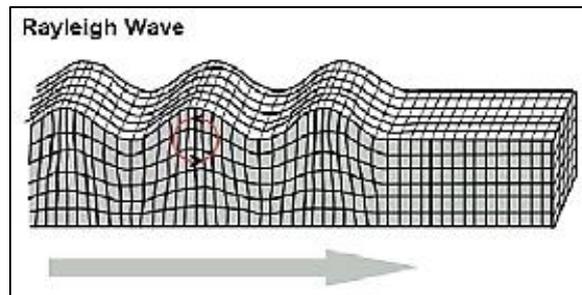
Las ondas P pueden desplazarse a través de un sólido, un líquido o gas, porque que estas materias resisten compresión o cambios de volumen. En cambio las

ondas S viajan sólo en los sólidos, puesto que su existencia depende de módulos de corte o de la habilidad del material transmisor para resistir cambios de forma. Ambas ondas, P y S, viajan en trayectoria esférica desde el cráter, a través del cuerpo de los materiales, por dicha razón a este clase de ondas también se les denomina ondas de cuerpo.

Onda de Superficie: Son generadas en la superficie en respuesta a la interacción de las ondas P y S con la superficie.

Cuando las ondas de cuerpo alcanzan la superficie de la tierra, ésta experimenta movimientos verticales y horizontales. Las ondas así producidas son denominadas “elásticas de superficie” y también como ondas Rayleigh y Love. La onda Rayleigh, predicha matemáticamente por Lord Rayleigh, imprime un movimiento en trayectoria elíptica contraria a la de propagación de avance de la onda.

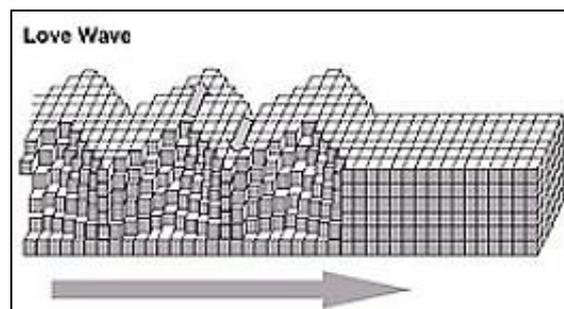
Figura n.º 2.12. Ondas superficiales o Rayleigh.



Fuente: Manual de Tronadura de Enaex, 2002.

La onda Love (onda Q) más rápida que la Rayleigh, da lugar a un movimiento transversal, relativo a la dirección de avance de la onda.

Figura n.º 2.13. Ondas superficiales o Love.

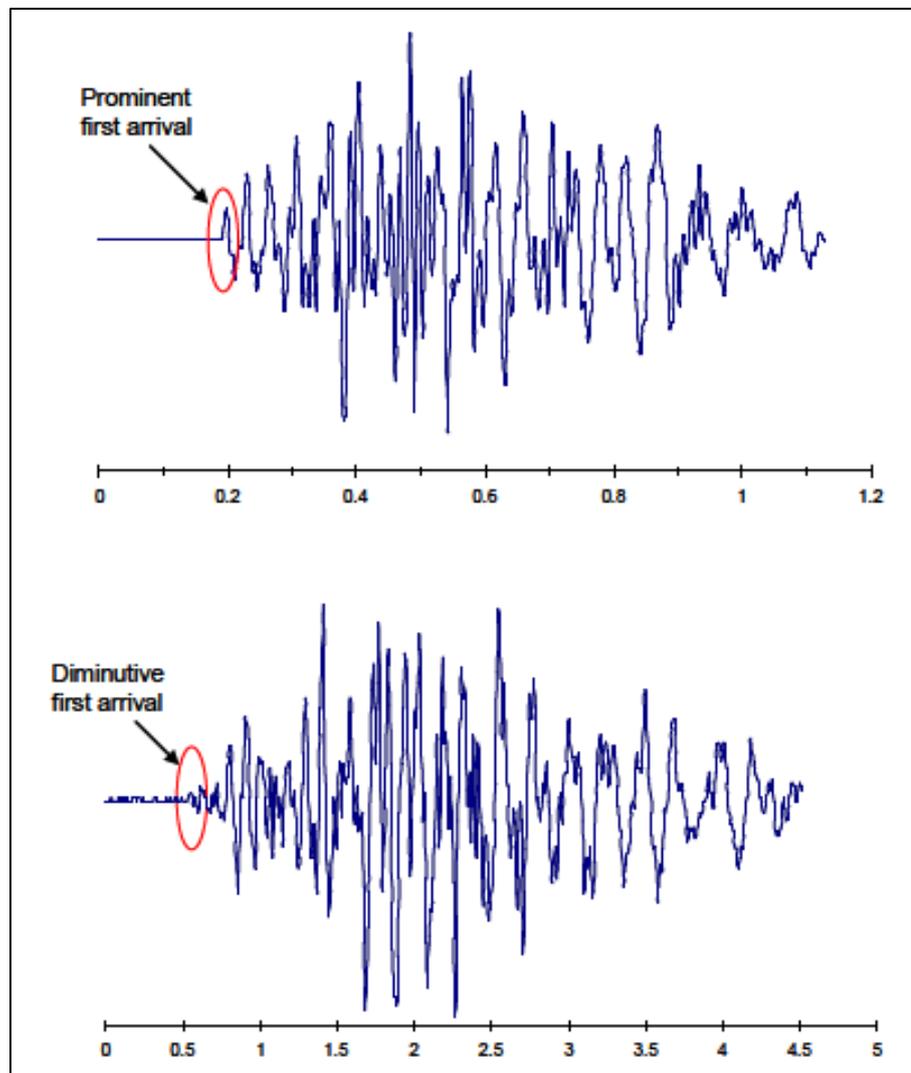


Fuente: Manual de Tronadura de Enaex, 2002.

2.2.3.4. Primer Arribo de Ondas

La primera onda que llega al monitor será siempre la onda P, ya que ésta, de todos los tipos de onda, es la que viaja más rápido (entre 30 y 50% más rápido que la onda S). Sin embargo ésta puede no ser la onda con la mayor amplitud, de tal manera que no siempre es fácil de identificar. La siguiente figura presenta dos ondas de vibraciones, donde la primera indica un arribo destacado de la onda siendo su tiempo de llegada y amplitud fácil de determinar. El segundo diagrama muestra una diminuta llegada de la primera onda, donde se dificulta determinar el tiempo de arribo y su amplitud.

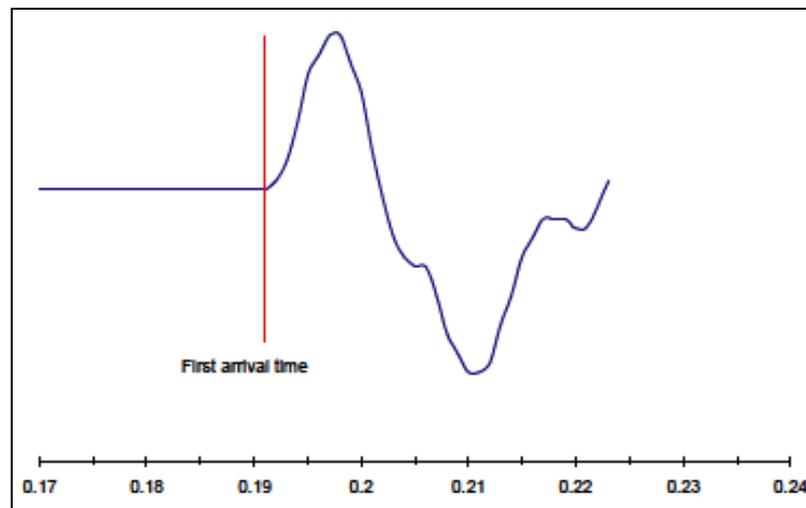
Figura n.º 2.14. El primer arribo de la onda P puede ser difícil de identificar.



Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX
(CINTEX)

La primera onda en llegar será siempre la onda P la cual viaja una distancia más corta al geófono. Sin embargo, si la onda pasa a través de un material altamente fracturado, su amplitud puede ser muy pequeña, y otra onda que realice un recorrido más largo a través de una roca más competente llegará con un pequeño atraso y con una amplitud mucho mayor. Esto puede llevar a estimaciones erróneas de velocidad de propagación, cuando la amplitud del primer arribo es muy baja y difícil de identificar. Cuando estimamos velocidades de las ondas, el momento de la llegada de la primera onda es como se indica en la siguiente figura.

Figura n.º 2.15. El primer arribo de la onda P puede ser difícil de identificar.



Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

2.2.3.5. Las Unidades de Vibraciones

Debido a que la vibración es un campo de esfuerzos oscilantes, el movimiento resultante de la partícula es en las tres direcciones ortogonales, y puede ser detectado utilizando diferentes dispositivos. Cada dispositivo tendrá las características de vibración (amplitud, duración y frecuencia) de acuerdo a las características de respuesta del dispositivo de medición utilizado. La mayoría de los instrumentos utilizados para medir vibraciones utilizan geófonos, los cuales miden la velocidad del movimiento de las partículas, o acelerómetros los cuales miden la aceleración del movimiento de la partícula. Algunos sistemas de medición permiten medir desplazamiento de la partícula.

2.2.3.5.1. Velocidad de las vibraciones

La velocidad es el método preferido de medición de las vibraciones generadas por voladura, ya que la velocidad de vibración es proporcional al esfuerzo y por lo tanto al potencial daño.

Si la onda de vibración es continua y armónica simple, (es decir una única frecuencia sinusoidal, f), ésta puede ser representada por una simple ecuación, $v(t) = A_0 \text{seno}(2\pi ft)$, donde A_0 representa el peak de amplitud de la velocidad de partícula. En la práctica, el peak de amplitud está controlado fuertemente por la cantidad de explosivo por taladro, ya que esto controla la fuente de energía que generan posteriormente las vibraciones. El otro factor que tiene una gran influencia en la amplitud de la vibración, a diferentes distancias, es la atenuación del macizo rocoso, ya que esto controla cuan rápidamente se disipa la energía. La atenuación del macizo rocoso depende de factores tales como la cantidad de fracturas o grietas en el macizo (las grietas generan una gran pérdida de energía) y el módulo de la roca. Rocas con un bajo Módulo tienden a presentar una deformación plástica, resultando en una gran pérdida de energía, mientras que rocas con un alto módulo se comportan de una manera elástica removiendo pequeñas cantidades de energía cuando pasa la onda.

2.2.3.5.2. Aceleración de las Vibraciones:

El movimiento de las partículas puede ser medido también en términos de aceleración, mediante el uso de acelerómetros. En este caso el instrumento entregará una señal de voltaje dependiente del tiempo, $V(t)$ la cual es proporcional a la aceleración de partículas en el tiempo, $a(t)$, con una constante de proporcionalidad determinada por la sensibilidad del acelerómetro usado para realizar la medición. Si la onda de vibración es continua y armónica simple (es decir una única frecuencia sinusoidal, f), ésta puede ser representada por una ecuación simple $a(t) = A_0 \text{seno}(2\pi ft)$, donde A_0 representa el peak de amplitud de la aceleración.

2.2.3.6. Vibraciones y Esfuerzo:

El fundamento para usar el peak de velocidad de partículas, PPV, es debido a que la mayoría de los análisis consideran que el daño, o potencial daño, está relacionado con la velocidad de la onda P , V_p , y la deformación inducida, ϵ , es

decir, la velocidad de vibración tiene una correlación directa con el esfuerzo cuando la onda está viajando como una onda plana y la deformación es elástica.

$$\varepsilon = \frac{PPV}{V_p} = \frac{\sigma}{E}$$

Si el macizo rocoso es duro y quebradizo, y presenta un comportamiento elástico hasta el momento de su ruptura, la velocidad máxima de partícula que la roca puede tolerar antes de su ruptura puede ser calculada a partir de:

$$PPV_{max} = \varepsilon_{max} V_p = \frac{\sigma_{max} V_p}{E}$$

Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX
(CINTEX)

Puesto que las vibraciones viajan con una componente sinusoidal de compresión y tensión aproximadamente iguales y la resistencia a la tensión es siempre mucho menor que la resistencia a la compresión, el máximo esfuerzo que la roca puede resistir es el esfuerzo a la tensión.

2.2.4. Instrumentación para Monitoreo de Vibraciones

La instrumentación es vital y su propósito es localizar transductores en puntos estratégicos a objeto de obtener una base de información consistente y representativa. Para ello pasa por manejar algunos conocimientos de las ondas sísmicas generadas por la voladura a su alrededor. Estas son importantes puesto que transportan la energía vibracional, por lo tanto, debemos tener presente sus relevancias que dependen de la geometría, posición de la voladura y sistema estructural, por ejemplo, la onda superficial es de menor amplitud y viaja más distancia, por lo tanto son importantes su medición en un campo lejano, al contrario de las ondas P y S que son más significativas cerca de la voladura. Por esto los registros de las vibraciones producidas por voladuras son almacenados en los sismógrafos, los cuales graban las amplitudes y duración de los movimientos de la tierra, producto de dichas voladuras, usando los siguientes componentes:

- Transductores (geófonos o acelerómetros) que se instalan en forma solidaria a la roca.

Figura n.º 2.16. Transductor, equipo de monitoreo de vibraciones.



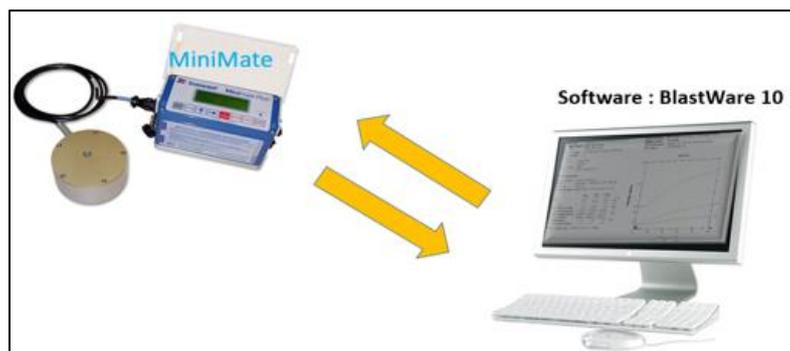
- Un sistema de cables que llevan la señal captada por los transductores al equipo de monitoreo.
- Un equipo de adquisición, el cual recibe la señal y la guarda en memoria.

Figura n.º 2.17. Equipo de Adquisición Instantel.



- Un computador, el cual tiene incorporado el software requerido para el traspaso de la información desde el equipo monitor, y su posterior análisis.

Figura n.º 2.18. Computador.



2.2.4.1. Transductores de vibraciones

Gran parte de las capacidades y ventajas de la técnica de monitoreo de vibraciones descansa en la habilidad para recolectar datos de vibración de buena calidad. La característica de estos datos tiene directa relación con el tipo de transductor utilizado, la técnica empleada para su instalación y orientación.

Existe una gran variedad de estos equipos disponibles en el mercado, que tienen la capacidad de medir velocidad o aceleración de partículas. Su función es convertir el movimiento físico generado durante el paso de la vibración, en una señal de voltaje equivalente, según sea su sensibilidad. Los transductores deben reunir algunas consideraciones prácticas, como son:

Costo: en muchos casos es necesario instalar transductores permanentes en el macizo rocoso, lo que evita efectos superficiales y permite un análisis completo de una voladura. Bajo estas circunstancias los equipos no pueden recuperarse y el costo de cada unidad debe ser minimizado.

Precisión: Gran parte del tiempo, esfuerzo y recursos están dedicados a la instalación de los transductores de vibración; es importante entonces que ellos sean confiables en el largo plazo.

Relación señal-ruido: Si la salida del transductor es grande en relación a los niveles de ruidos, los problemas detectados en minas subterráneas respecto de campos magnéticos pueden ser minimizados.

En la práctica, la selección de estos equipos es un compromiso, ya que no existen unidades que reúnan todas las características previamente detalladas. Los que se utilizan en prospecciones geofísicas y sismológicas son baratos, confiables y tienen una alta relación señal - ruido, pero soportan un rango dinámico muy limitado.

Los dos tipos básicos de transductores usados para medir las vibraciones del terreno son el acelerómetro y el geófono.

2.2.4.1.1. Acelerómetros

Los acelerómetros del tipo piezoeléctrico tienen alta frecuencia natural y una respuesta lineal bajo su frecuencia resonante. La señal de salida es proporcional a la aceleración, la cual debe por lo general ser amplificada previamente a su grabación. Los acelerómetros reúnen los datos especificados, por lo general son livianos, robustos, pero caros. Son más complejos de usar, ya que requieren

equipamiento auxiliar como fuentes de poder y pre amplificadores, los cuales pueden inducir problemas de ruidos eléctricos significativos.

Los acelerómetros pueden ser recomendables cuando los transductores son instalados en superficies, siendo necesario recalcar que se requiere cierta experiencia para la interpretación de los registros de aceleración, en particular a bajas frecuencias.

2.2.4.1.2. Geófonos

Los geófonos entregan una medición directa de la velocidad y consisten por lo general en un sistema de bobina móvil soportada por resorte, y un imán fijo. Al contrario del acelerómetro, el geófono opera sobre su frecuencia natural. Cuando se miden frecuencias muy bajas, la salida se ve influenciada por sus características de respuesta.

La señal resultante en términos del nivel de vibración debe ser corregida adecuadamente.

Figura n.º 2.19. Geófono.



El geófono no es tan robusto como el acelerómetro, por lo cual podría eventualmente dañarse si es mal manipulado. Los geófonos son relativamente baratos y su señal de salida es simple de analizar, no requieren fuente de poder adicional y normalmente no es necesario pre amplificar su señal, antes de su grabación.

Cuando los transductores a instalar no son recuperables, es preferible utilizar geófonos sensibles a la velocidad. Poco es lo que se puede hacer para mejorar el rango de respuesta dinámica de éstos, por lo tanto debe tenerse el cuidado de no usarlos donde sus especificaciones probablemente puedan ser excedidas.

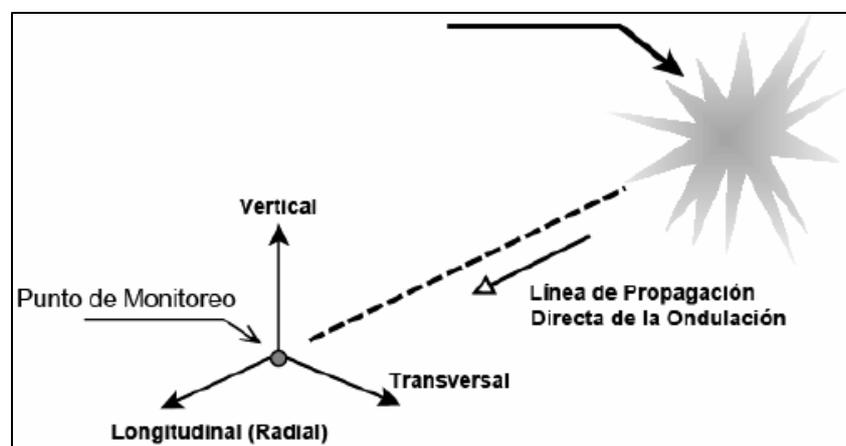
Mediante la comparación entre la señal obtenida por un geófono y la señal registrada por un acelerómetro en el mismo punto, se ha demostrado que los geófonos están inhabilitados para responder a altas frecuencias, lo que sin embargo no es impedimento en su capacidad para medir velocidad de partícula, según los requerimientos de los datos antes mencionados. Como regla general se puede establecer que resulta inadecuado usar un transductor de velocidad del tipo bobina móvil, cuando las frecuencias dominantes sean probablemente muy superiores a los 500 Hz.

En primera instancia el equipo de vibraciones debe ser tal que los geófonos asociados a la medición sean los adecuados para medir el nivel de vibraciones esperado, es decir si su sensibilidad es la adecuada. Para tal efecto se debe conocer los niveles máximos esperados en la medición, tanto en frecuencia como velocidad, para determinar si los geófonos son aptos para ello.

Orientación

Para realizar una adecuada interpretación de los datos de vibración que permitan analizar la secuencia real de iniciación de un determinado número de cargas, en asociación con la posición relativa entre ésta y el transductor, es necesario tener absoluta certeza de la orientación real del transductor. Esta orientación se consigue instalando el transductor a través de tubos de PVC de 50 mm, los que se acoplan en conjunto y que dada su rigidez y longitud permite fijar la orientación definitiva.

Figura n.º 2.20. Orientación del geófono.



Fuente: Curso de Voladura, ASP Blastronics.

Acoplamiento

Una vez que el transductor está ubicado en la perforación de monitoreo y correctamente orientado, su posición debe ser asegurada por medio de cemento con características de hormigón, el cual proporciona mejor acoplamiento. Se debe en lo posible realizar esta operación dentro de una perforación que tenga la mínima diferencia entre los diámetros, pero que facilite la operación. La idea en definitiva es disminuir la zona de interfase entre los dos medios esto es, la roca y el instrumento detector.

Figura n.º 2.21. Orientación del geófono.



Fuente: Curso de Voladura, ASP Blastronics.

2.2.5. Generación de los Modelos de Vibración a partir de registros de terreno

2.2.5.1. Análisis de Vibraciones producidas por Voladura

La señal de vibraciones producida por una voladura, consiste en un número discreto de paquetes de ondas, cada uno de estos corresponde a cargas o grupos de cargas detonando en un determinado tiempo. El primer paso en el análisis de la señal, es determinar que carga representa cada paquete de vibración. De la capacidad para realizar esto depende determinar la diferencia entre la detonación real y la secuencia diseñada.

La forma y amplitud de un paquete de vibración, da la efectividad relativa de la detonación de las cargas en una voladura. La amplitud de vibración es una medición de la energía transferida por el explosivo al macizo rocoso por lo que

para un determinado tipo de carga y geometría de monitoreo, la amplitud relativa puede ser usada como una medición de la eficiencia de cada carga.

Con el Monitoreo y Análisis de las Ondas de Vibraciones es posible determinar y calcular lo siguiente:

- Tiempo real de detonación de una carga o cargas (Dispersión)
- Velocidad de partículas de cada carga en la voladura.
- Detonación de cargas con baja eficiencia o no detonadas.
- Detonación instantánea de cargas; detonación de cargas por simpatía, acoplamiento por insuficiente tiempo entre retardo de los taladros.
- Eficiencia relativa en la detonación de cargas similares.
- Diferencia entre Cargas Explosiva de Producción y Contorno.
- Diferencia entre cargas detonadas con distinto confinamiento.
- Análisis de Frecuencia, etc.

2.2.5.2. Modelos de la Velocidad Pico de Partícula

Experimentalmente se ha llegado a establecer modelos que describen la velocidad de partícula peak (vibración), como una función de la carga detonada por retardo y la distancia entre cada detonación y el punto de medición. A continuación se señalan algunos de estos modelos.

El término “D” o Distancia Escalar, describe la influencia de la distancia en metros y el peso de la carga de explosivo detonado en kilogramos. Con relación a esta formulación matemática existen varios criterios de los cuales se pueden señalar los siguientes:

| <u>Criterio</u> | <u>Coefficiente Escalar</u> |
|------------------------------|--|
| Criterio General Exponencial | $D = \left(\frac{d}{W^{1/2}} \right) * e^{\left(\frac{d^{\alpha\beta}}{\alpha} \right)}$ |
| Criterio General | $D = \left(\frac{d}{W^{\beta/\alpha}} \right)$ |
| Langerfors (1963) | $D = \left(\frac{d}{W^{3/2}} \right)$ |
| Hendron (Bulletin 656) | $D = \left(\frac{d}{W^{1/3}} \right)$ |
| Devine (1962) | $D = \left(\frac{d}{W^{1/2}} \right)$ |

Fuente: Aplicación del Modelamiento de Vibraciones - ASIEX 2008.

Si son utilizadas cargas de explosivo cilíndricas, se ha visto por análisis adimensional que las distancias deben ser corregidas dividiéndolas por la raíz cuadrada de la distancia, Devine (1962) y Devine y Duvall (1963), (López Jimeno et al 1987).

Teóricamente este criterio es el que mejor representa el comportamiento de la vibración en el campo lejano para cargas cilíndricas, donde el análisis dimensional sugiere que las distancias deben ser corregidas dividiéndolas por la raíz cuadrada de la carga.

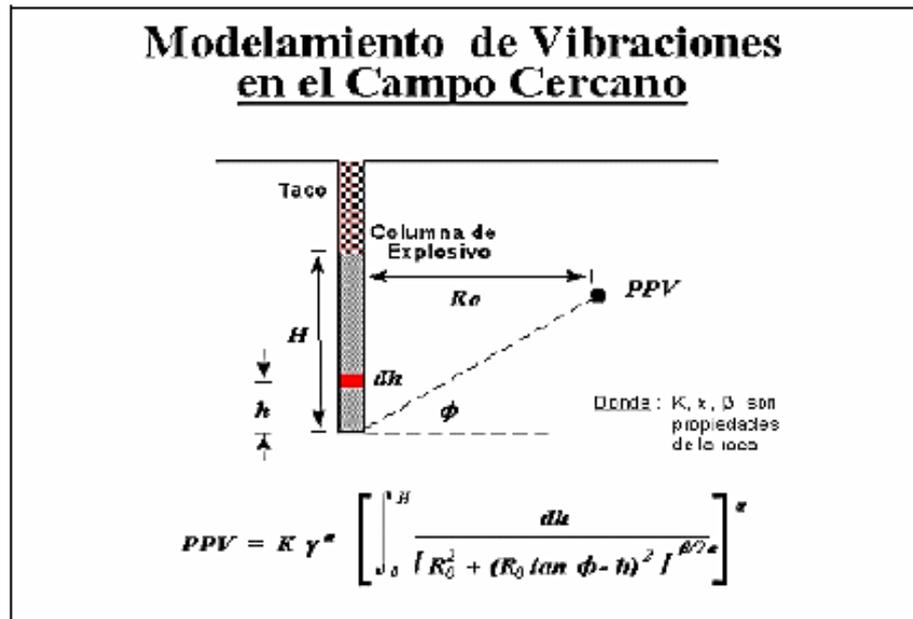
2.2.5.2.1. Modelo de Campo Cercano

En el campo cercano (muy cerca de los taladros donde ocurre el fracturamiento), la ecuación se debe modificar para tomar en cuenta la forma cilíndrica larga de la carga.

La ecuación para la predicción de vibración en el campo cercano, como se muestra en la siguiente ecuación, fue desarrollada por Holmberg & Persson (1979).

Figura n.º 2.22. Modelamiento de Vibraciones en el Campo Cercano.

$$PPV = K\gamma^\alpha \left[\int_0^H \frac{dh}{\left[R_0^2 + (R_0 \tan \phi - x^2) \right]^{\beta/2\alpha}} \right]^\alpha$$



Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

Donde K, α y β son las mismas constantes que se muestran en la ecuación de Devine y γ es la carga lineal cargada en el taladro (kg/m). Holmberg & Persson (1979) dieron valores de K, β y α de 700, 1.5 y 0.7 respectivamente para las condiciones de roca dura en Suecia.

La ecuación de H&P indica que el factor que tiene el mayor impacto en la vibración peak y en el daño no es el peso de la carga por retardo como es evidente en la ecuación de Devine, sino que más bien la carga lineal, que se controla por una combinación de diámetro del hoyo y densidad de carga.

Esta relación muestra que la Velocidad de Partícula Peak (PPV), en un punto del espacio, está dada por la ubicación de este punto respecto de la carga, el tipo de explosivo y la geometría del taladro definida por la concentración de carga lineal " γ " (Kg/m), y más importante, por las características de atenuación de cada macizo rocoso en particular (constantes K y α).

2.3. Definición de términos básicos

- Fragmentación.- Es la rotura de la roca en el área de la línea de menor resistencia (Burden) como consecuencia de la acción ejercida por los explosivos.
- Burden y Burden efectivo.- El burden de un pozo se refiere a la dimensión lineal entre el pozo y la cara libre y se mide perpendicular a la dirección de la línea de pozos que constituyen una fila. El término burden efectivo se refiere a la dimensión lineal entre el pozo y la posición de la cara libre más cercana al tiempo de la detonación del pozo, y toma en consideración la dirección de la iniciación.
- Espaciamiento.- Se define como la distancia entre taladros de una misma fila perpendiculares al burden.
- Booster.- Alto explosivo utilizado para mejorar la detonación de la columna explosiva (aumentar la velocidad de detonación). Por lo general se utilizan explosivos de alta velocidad de detonación, como el Booster de pentolita.
- Taladro.- Cavidad cilíndrica como consecuencia de una perforación en la cual, se deposita el explosivo de acuerdo a un diseño previo.
- Explosivo.- Es toda sustancia sólida o líquida, que al recibir un estimulante adecuado, en un infinitésimo de tiempo, se convierte en otras sustancias más estables, generalmente gaseosas; acompañados de una liberación de calor y altas presiones.
- Cara libre.- Superficie de contacto con el medio ambiente tomando como referencia un cubo, es indispensable para la formación y retorno de las ondas de tensión relejadas que provocan la fragmentación.
- Malla.- Es la forma geométrica en la que se disponen los taladros de una voladura, considerando básicamente la relación burden y espaciamiento.
- Desplazamiento.- Consiste en el movimiento de la masa rocosa triturada como consecuencia de la acción ejercida por los explosivos hacia una dirección establecida.
- Voladura de rocas.- Es un proceso tridimensional, en la cual las presiones generadas por explosivos dentro de taladros, originan una zona de alta concentración de energía que producen dos efectos dinámicos: fragmentación y desplazamiento.
- Factor de carga.- Mediante este término se describe la cantidad de explosivo usado para romper un volumen o peso unitario de roca. El factor de carga se indica mediante unidades de kg/m^3 o kg/ton .
- Diámetro crítico.- Es el diámetro mínimo mediante el cual puede detonar una carga explosiva. Agregando gas finamente disperso se reduce considerablemente el diámetro crítico de un explosivo.

- Cable de Conexión.- Este se empaca en cajas de fibracel que contienen 12 rollos, cada rollo de 200 m. Se utiliza para el amarre de los detonadores electrónicos, va conectado al Logger permitiéndole verificar la conexión de cada uno de ellos.
- Carga Explosiva.- Cantidad de material explosivo utilizado en un taladro de voladura, o dispositivo de voladura.
- Detonador Electrónico.- Se puede comunicar con los otros componentes del sistema. Cada detonador tiene un número de ID único el que es asignado en la fábrica. Parecido a un sistema de telecomunicaciones, donde cada participante tiene un número de teléfono, la nueva tecnología permite doble comunicación desde cada detonador en el circuito. Esto permite que cualquier detonador sea programado desde 1 a 15000 milisegundos con incrementos desde 1 milisegundos.
- Velocidad de detonación (VOD).- Es la velocidad con que el frente de detonación recorre la longitud del mismo, dicha velocidad es supersónica (mayor a la velocidad del sonido). La VOD es uno de los parámetros más importantes del proceso de detonación. Su valor es indicativo de la performance del explosivo.
- Campo cercano.- Término que describe el nivel de vibraciones cercano a una columna larga de explosivos. Generalmente, cuando se mide tan cerca, como aproximadamente 5 longitudes de la carga de una columna de explosivo, los niveles de vibración es llamado de campo cercano, y requiere la aplicación de ecuaciones complejas para la predicción. En el campo cercano es probable que se dañe la roca por la iniciación de fracturas frescas, y por la dilatación de fracturas existentes.
- Carga operante.- Es la cantidad máxima de explosivo (Anfo, Emulsiones y Booster) que detona dentro de una voladura por retardo espaciados a 10 ms.
- Taco superior.- Es el material inerte añadido en la cima del pozo de tronadura para efectuar el confinamiento de los gases de la explosión y prevenir una proyección y sobre presión excesiva.
- Presión de detonación.- La presión de detonación ocurre dentro de la zona primaria de reacción, está limitada en un lado por el frente de choque y en el otro por el plano de Chapman Jouguet (C-J). Detrás del plano C-J están los productos de la reacción; y aún algunos productos todavía sufren reacción, ejercida por una presión menor, que se conoce como la presión de explosión, o presión peak de pozo.
- Velocidad pico de partícula y velocidad de la onda P.- La Velocidad pico de partícula (PPV) se refiere a la velocidad de movimiento de partículas individuales dentro de la masa rocosa como una vibración u onda de choque que se propaga por la roca. Estas partículas se pueden mover sólo en cantidades pequeñas en 3 dimensiones, de manera que se pueden medir velocidades pico de partícula en 3 direcciones ortogonales. El PPV

medido en cualquiera ubicación es una función de la energía en la fuente de vibración, la distancia desde la fuente, y las características de la atenuación de la roca. La velocidad de la onda P, V_p , es una medida de la velocidad de propagación de la onda en la roca, y es independiente de la fuente de vibración. La velocidad de la onda P es controlada por la roca y propiedades estructurales del medio.

2.4. Hipótesis

Las distancias críticas para los detonadores electrónicos Daveytronic a través de la estimación de presiones dinámicas inducidas por voladura están en un rango de 2 a 5 metros entre taladros.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1. Operacionalización de variables

Tabla n.º 3.1. Operacionalización de variables.

| VARIABLE DEPENDIENTE | DEFINICIÓN CONCEPTUAL | DIMENSIONES | INDICADORES |
|----------------------|--|-------------|-------------|
| Distancia Crítica | Distancia mínima entre dos taladros para evitar daños en los detonadores por presión dinámica. | Longitud | Metros (m) |

Fuente: Propia.

3.2. Diseño de investigación

Experimental, cuasi experimental; donde las variables independientes son manipulables de forma intencional para analizar la alteración de la variable dependiente.

3.3. Unidad de estudio

Tajo de producción.

3.4. Población

Todos los bancos del tajo La Quinoa - Yanacocha.

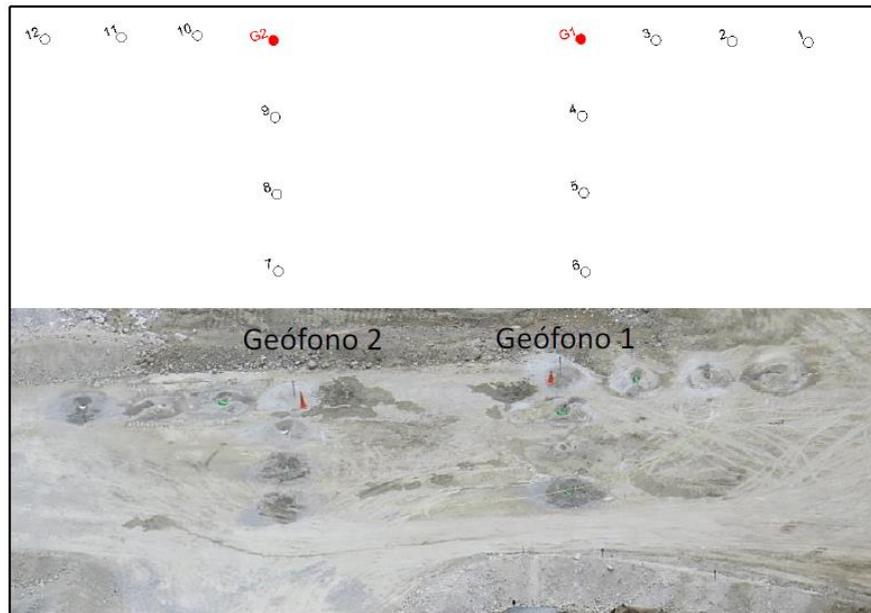
3.5. Muestra (muestreo o selección)

Zona Tapado Oeste Nivel 3228.

3.6. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos

Las pruebas experimentales fueron realizadas en el tajo La Quinoa nivel 3228, zona con menor cantidad de agua. Los puntos se levantaron con ayuda del área de topografía. Cada prueba consistió en la detonación de 6 cargas explosivas, para ello se perforaron dos mallas con un burden de 14 m y un espaciamiento entre taladros de 3.5 m (ver Figura n.º 3.1). Cada taladro tuvo un diámetro de 9 7/8 pulg y una longitud de 10 m.

Figura n.º 3.1. Distribución espacial de los taladros.

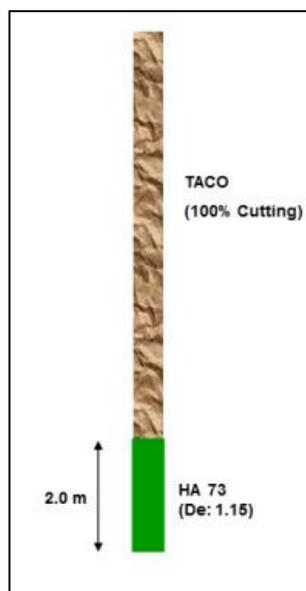


Fuente: Minera Yanacocha.

Los taladros fueron cargados con 2 metros de explosivo Quantex 73 (70% de Emulsión Sensibilizada y 30% de Nitrato Quantex) y 8 metros de taco (ver Figura n.º 3.2), a excepción de 2 taladros en los que fueron instalados los geófonos triaxiales para el registro de las pruebas.

El explosivo tuvo una densidad de 1.15 g/cc según diseño para las pruebas.

Figura n.º 3.2. Diseño de carga.



Fuente: Minera Yanacocha.

El equipo utilizado para el monitoreo de las vibraciones fue un sismógrafo (Minimate Plus) con 2 geófonos triaxiales. Dichos geófonos son los encargados de captar las vibraciones, y a su vez las registra en la memoria para finalmente transmitir toda la data a una computadora. Los datos resultantes son proporcionados en términos de velocidad y frecuencia.

Figura n.º 3.3. Minimate Plus.



Los geófonos triaxiales utilizados fueron de origen canadiense con una resistencia de 106 (Ohm) de 8 canales de frecuencia para campo cercano, a una sensibilidad de 0.0008057 (v/mm).

Figura n.º 3.4. Geófono Triaxial.



Fuente: Davey Bickford.

El Minimate Plus fue instalado a una distancia aproximadamente de 150 m desde la malla de perforación y los sensores o arreglos triaxiales fueron instalados en el fondo de las

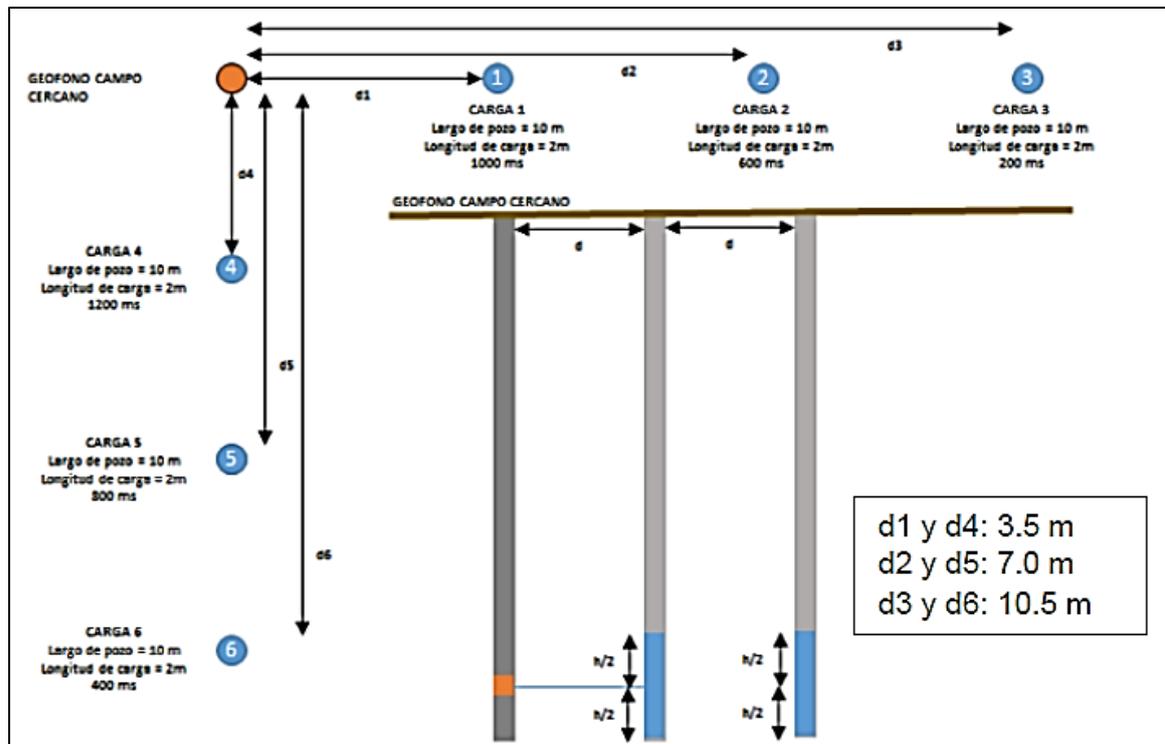
perforaciones, dentro de un tubo de plástico PVC de 6 pulg de diámetro estabilizado con material de concreto, para un registro adecuado y buen funcionamiento.

3.7. Métodos, instrumentos y procedimientos de análisis de datos

3.7.1. Medición de Vibraciones

La información de vibraciones necesaria para el ajuste de nuestro modelo de amplitud de ondas sísmicas fue monitoreada a través de las pruebas realizadas cuya configuración se detalla en la Figura n.º 3.5. Tal como se ha mencionado con anterioridad, esta información fue usada como base para la estimación de las presiones dinámicas y las condiciones límite de diseño e implementación.

Figura n.º 3.5. Geófono Triaxial.



Fuente: Davey Bickford.

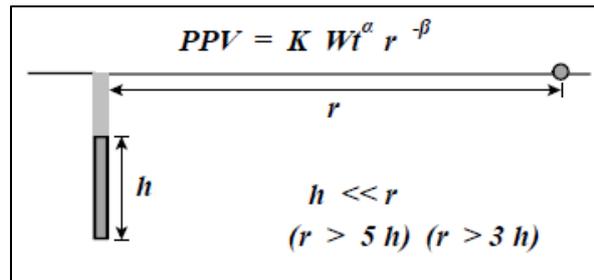
Los sensores instalados, basan su funcionamiento en la variación de su resistencia al momento de recibir un impacto por la alta presión, lo que conllevó a una fluctuación en el voltaje del circuito conectado al equipo de registro de datos, dicha fluctuación fue conducida a lo largo del cable y luego medida por equipos registradores de gran sensibilidad y de alta frecuencia de muestreo (ver Anexo n.º 7 y Anexo n.º 8).

Después de recolectar los datos obtenidos en campo se procedió al análisis correspondiente utilizando el formulismo de campo cercano de Holmberg y Persson.

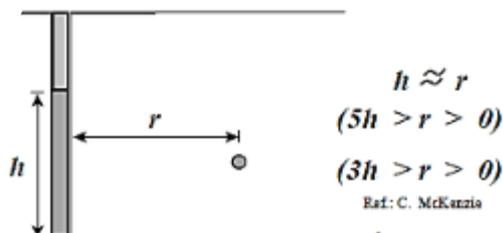
3.7.2. Modelamiento de Vibraciones en Campo Cercano

El mejor ajuste de curva para la predicción de vibración en el campo cercano, como se muestra en las ecuaciones siguientes, fueron desarrolladas por Holmberg & Persson (1979).

Ecuación convencional de la PPV:



En el siguiente modelo predictivo no es aplicable la ecuación convencional de la PPV.

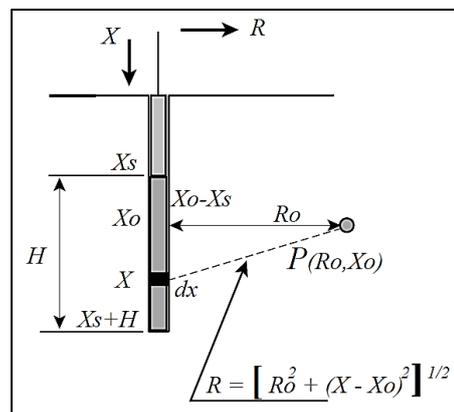


El Modelo H&P, asume que:

- Las Ondas de Vibración que irradian de la Carga, obedecen a la ecuación de propagación dada por :

$$PPV = K W t^\alpha R_0^{-\beta}$$

- La Velocidad Pico Partícula, debido a cada elemento de la carga, es numéricamente aditivo.
- La Velocidad de Detonación (VOD) es infinita.



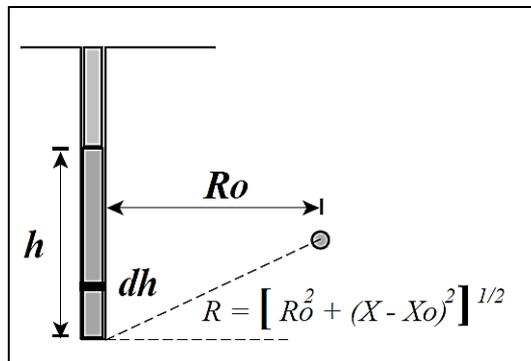
Cada elemento, dh

$dh < R_0$

$$PPV = KWt^\alpha R_0^{-\beta}$$

$$dPPV = K \frac{(\gamma * dh)^\alpha}{R^\beta}$$

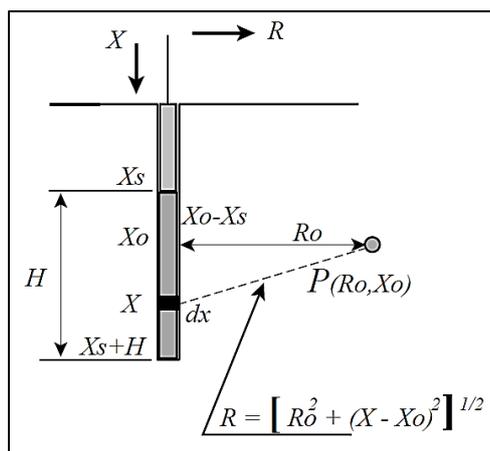
$$dPPV = K \frac{(\gamma * dh)^\alpha}{(R_0^{-\beta} * (X - X_0)^{\beta/2})}$$



Donde:

K, α, β : son propiedades intrínsecas de la roca.

γ : es la concentración de carga lineal, Kg/m.



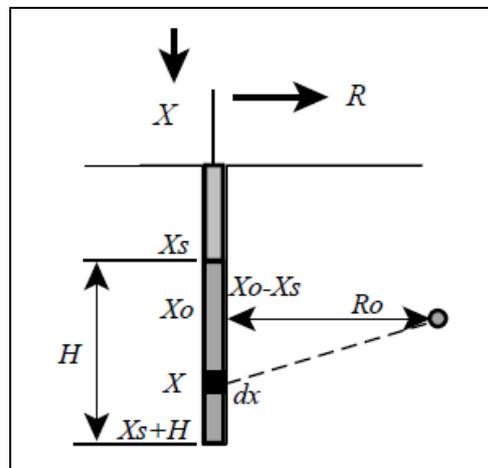
$$PPV = \left[\int_{X_s}^{X_s+H} \frac{dx}{(R_0^2 + (X - X_0)^2)^{\beta/2\alpha}} \right]^\alpha$$

Para $\beta = 2\alpha$, esta ecuación puede ser integrada, quedando como:

$$PPV = K \left[\left(\frac{\gamma}{R_0} \right) \left(\arctan \left(\frac{H + X_s - X_0}{R_0} \right) + \arctan \left(\frac{X_0 - X_s}{R_0} \right) \right) \right]^\alpha$$

Esta ecuación muestra una descripción detallada de la formulación matemática desarrollada por Holmberg and Persson (1979), la cual será utilizada para los fines del presente estudio. Los parámetros utilizados en el modelamiento de vibraciones se detallan en la Figura n.º 3.6.

Figura n.º 3.6. Parámetros geométricos, Modelo de Holmberg - Persson.



Fuente: Orica.

Siendo:

V = Velocidad peak de partícula (m/s)

γ = Carga lineal (kg/m)

H = Largo de carga total en el taladro (m)

X = Posición de la carga elemental desde el piso del taladro (m)

R_0 = Distancia horizontal desde el taladro hasta el punto de monitoreo (m)

X_0 = Distancia vertical desde la superficie al punto de monitoreo (m)

X_s = Longitud de taco (m)

K y α son constantes empíricas.

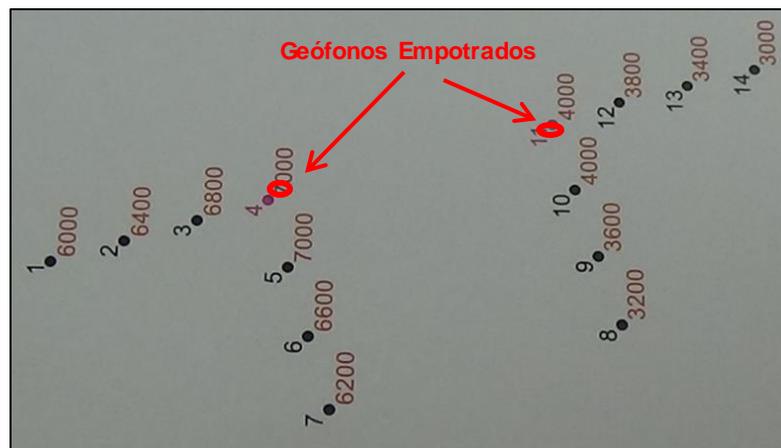
3.7.3. Configuración de la prueba

Según diseño de prueba se definió una configuración de 14 taladros, de los cuales 12 fueron cargados a una altura de 2 m con explosivo Quantex 73 (70% de Emulsión

Sensibilizada y 30% de Nitrato Quantex) y en dos fueron instalados los sensores para el registro de las pruebas.

En el taladro número 14 se generó el pulso de detonación (donante) y luego al taladro número 8 con un retardo de 200 ms, de esta forma fueron diseñadas las configuraciones de pruebas representadas en el cuadro siguiente:

Figura n.º 3.7. Configuración de la secuencia de salida.



Fuente: Minera Yanacocha.

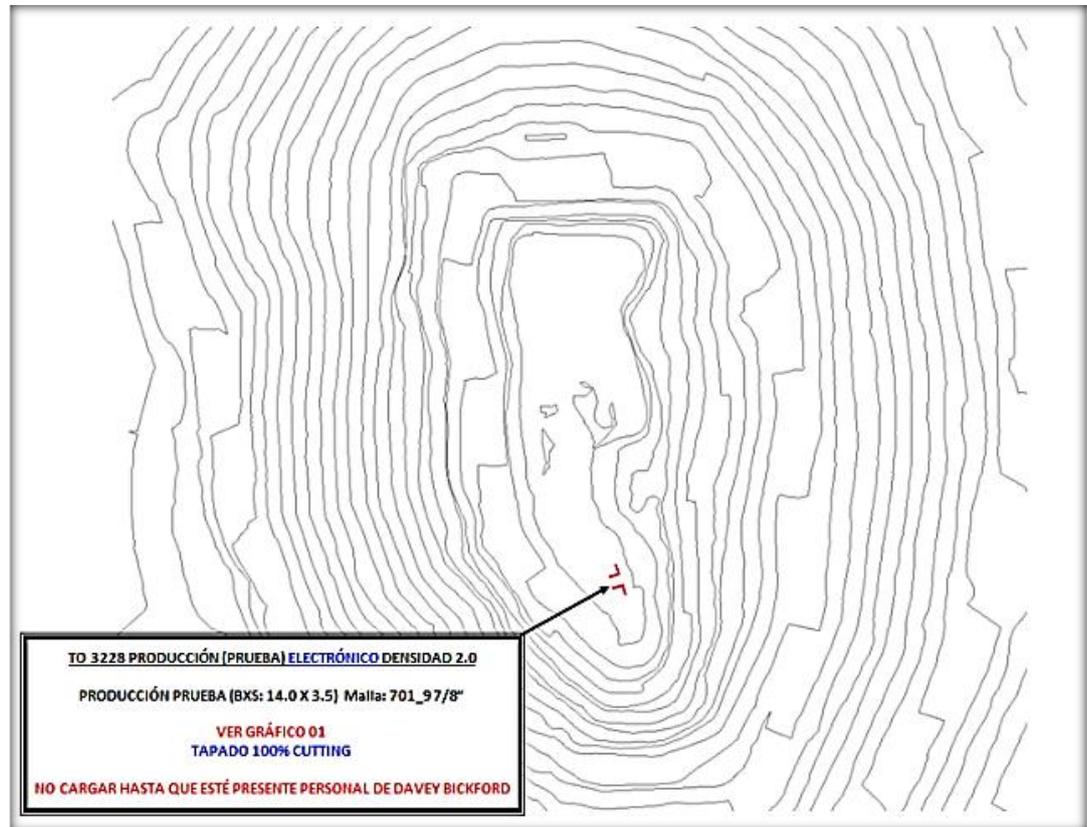
Se adjunta en el Anexo n.º 01 la base de datos para modelar nuestra investigación, los parámetros utilizados en el modelamiento de vibraciones se detallan en la siguiente figura.

3.7.4. Análisis de la información

La Tabla n.º 3.2 muestra las coordenadas de los taladros utilizados en la prueba y la cantidad de explosivo real. Por su parte, la Figura n.º 3.8 muestra la distribución espacial del diseño.

El sector donde se realizaron las pruebas corresponden al fondo del tajo Tapado Oeste, por lo cual los resultados solo serán representativos de dicho sector.

Figura n.º 3.8. Configuración de la prueba.



Fuente: Minera Yanacocha

Tabla n.º 3.2. Coordenadas y configuración de carguío de los taladros.

| | ID | Tiempo [ms] | Coordenadas de los Pozos | | | Parámetros Pozos | |
|----------|-----------|----------------|--------------------------|--------------|-------------|------------------|------------|
| | | | Este [m] | Norte [m] | Cota [m] | Longitud [m] | Carga (Kg) |
| | Geófono 1 | | 25352.518 | 11647.799 | | 8.8 | |
| Prueba 1 | 1 | 6000 | 25362.413 | 11644.433 | 3228 | 10 | 114 |
| | 2 | 6400 | 25359.099 | 11645.56 | 3228 | 10 | 114 |
| | 3 | 6800 | 25355.786 | 11646.687 | 3228 | 10 | 114 |
| | 5 | 7000 | 25351.502 | 11644.455 | 3228 | 10 | 114 |
| | 6 | 6600 | 25350.49 | 11641.109 | 3228 | 10 | 114 |
| | 7 | 6200 | 25349.448 | 11637.667 | 3228 | 10 | 114 |
| | Geófono 2 | | 25339.067 | 11652.109 | 3228 | 8.7 | |
| Prueba 2 | 8 | 3200 | 25336.042 | 11642.054 | 3228 | 10 | 114 |
| | 9 | 3600 | 25337.05 | 11645.406 | 3228 | 10 | 114 |
| | 10 | 4000 | 25338.059 | 11648.757 | 3228 | 10 | 114 |
| | 12 | 3800 | 25335.812 | 11653.395 | 3228 | 10 | 114 |
| | 13 | 3400 | 25332.458 | 11654.396 | 3228 | 10 | 114 |
| | 14 | 3000 | 25329.105 | 11655.397 | 3228 | 10 | 114 |

Fuente: Propia.

Tabla n.º 3.3. Datos para la ecuación de H&P.

| Datos HP | | | | | |
|----------|-----|----------|----------|-----|-----|
| Ro | Xo | densidad | densidad | H | Xs |
| [m] | [m] | g/cc | [g/t] | [m] | [m] |
| 10.5 | 10 | 1.15 | 57 | 2 | 8 |
| 7.0 | 10 | 1.15 | 57 | 2 | 8 |
| 3.5 | 10 | 1.15 | 57 | 2 | 8 |
| 3.5 | 10 | 1.15 | 57 | 2 | 8 |
| 7.0 | 10 | 1.15 | 57 | 2 | 8 |
| 10.6 | 10 | 1.15 | 57 | 2 | 8 |
| 10.5 | 10 | 1.15 | 57 | 2 | 8 |
| 7.0 | 10 | 1.15 | 57 | 2 | 8 |
| 3.5 | 10 | 1.15 | 57 | 2 | 8 |
| 3.5 | 10 | 1.15 | 57 | 2 | 8 |
| 7.0 | 10 | 1.15 | 57 | 2 | 8 |
| 10.5 | 10 | 1.15 | 57 | 2 | 8 |

Fuente: Propia.

Estos datos son usados en la ecuación de Holmberg & Persson para hallar las Velocidades Pico de Partícula (ver tabla n.º 3.4).

$$PPV = K \left[\left(\frac{Y}{Ro} \right) \left(\arctan \left(\frac{H + Xs - Xo}{Ro} \right) + \arctan \left(\frac{Xo - Xs}{Ro} \right) \right) \right]^\alpha$$

El análisis de los registros de las vibraciones de la voladura nivel 3228 permitió identificar sólo 12 ondas, las cuales fueron correlacionadas con los tiros que las originaron. La siguiente tabla muestra un resumen con los niveles de vibración y sus tiros asociados.

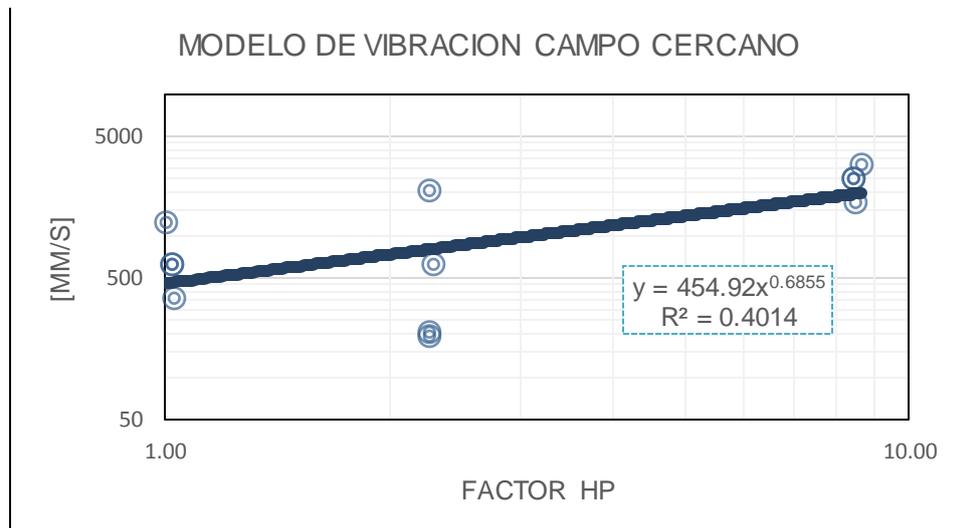
Tabla n.º 3.4. Resumen de los niveles de vibraciones y de los PPV hallados por H&P.

| ID | Velocidades Pico de Partícula | | | | HP |
|----|-------------------------------|--------------------|-----------------|-------------|------|
| | Radial (mm/s) | Transversal (mm/s) | Vertical (mm/s) | Vector Suma | |
| 1 | -124.99 | -178.99 | -57 | 353 | 1.3 |
| 2 | 454.98 | 412.98 | 23 | 611 | 2.29 |
| 3 | 2022.91 | 108 | 161.99 | 3124 | 8.64 |
| 5 | 752.97 | -85 | 62 | 1680 | 8.45 |
| 6 | 120.99 | 23 | 16 | 192 | 2.26 |
| 7 | 809.96 | -44 | -131 | 1227 | 1 |
| 8 | 89 | -227.99 | -549.98 | 616 | 1.2 |
| 9 | 130.99 | -96 | -112 | 204 | 2.26 |
| 10 | 2028.91 | -482.98 | 2043.91 | 2529 | 8.43 |
| 12 | -1533.93 | -2046.91 | 2043.91 | 2530 | 8.43 |
| 13 | -22 | -40 | 2000 | 2052 | 2.26 |
| 14 | -289.99 | -462.98 | -371.98 | 622 | 1.02 |

Fuente: Propia.

Entonces, para encontrar las constantes K, α y β , se correlacionaron los PPV calculados a partir de la ecuación de Holmberg & Persson con los PPV del Vector Suma registrados en el software Instantel, generando la siguiente ecuación exponencial:

Figura n.º 3.9. Modelo básico de vibración campo cercano.



Fuente: Propia.

La ecuación resultante es la siguiente:

$$\text{PPV (50\%)} = 454.92 (\text{FACTOR HP})^{0.6855} \text{ [mm/s]}$$

$$R^2 = 0.4014$$

Donde:

$$k = 454.92, \alpha = 0.6855 \text{ y } \beta = 1.371$$

De forma de aumentar la seguridad de esta curva resultante, se presenta una curva ajustada, que entrega un mayor margen de seguridad respecto a la resultante (ver figura n.º 3.10).

Se correlacionaron los logaritmos de los HP con los logaritmos de los PPV del Vector Suma, generando una ecuación exponencial al 90% de confiabilidad de nuestro modelo de predicción (ver tabla n.º 3.6).

Tabla n.º 3.5. Logaritmos de HP y PPV.

| PPV (mm/s) | HP | LOG PPV | LOG HP |
|------------|------------|------------|------------|
| 353 | 1.02770796 | 2.54777471 | 0.01186972 |
| 611 | 2.28954307 | 2.78604121 | 0.35974882 |
| 3124 | 8.64222724 | 3.49471103 | 0.93662568 |
| 1680 | 8.44919559 | 3.22530928 | 0.92681536 |
| 192 | 2.26460508 | 2.28330123 | 0.35499248 |
| 1227 | 1.00195562 | 3.08884456 | 0.00084849 |
| 616 | 1.01837924 | 2.78958071 | 0.00790954 |
| 204 | 2.25876687 | 2.30963017 | 0.35387141 |
| 2529 | 8.42561359 | 3.40294883 | 0.92560154 |
| 2530 | 8.42759404 | 3.40312052 | 0.92570361 |
| 2052 | 2.26278364 | 3.31217736 | 0.35464303 |
| 622 | 1.02021975 | 2.79379038 | 0.00869373 |

Fuente: Propia.

Para hallar el valor de K ajustado, se aplicó la siguiente fórmula:

$$K_a = \text{Antilog} (\text{Log } K + \text{Inv.Distr.Norm.Stand } (X\%) * E (t))$$

Donde:

- **K_a**: Valor de K ajustado.
- **Inv.Distr.Norm.Stand (X%)**: Inverso de la Distribución Normal Estándar del porcentaje de mediciones por debajo de la recta de ajuste.
- **Error Típico**: Es el error típico de todas las mediciones que intervienen en el primer gráfico.

En la investigación se considera el 90% de confiabilidad de los datos, para determinar la variabilidad del valor de K. Entonces:

$$K_a = 10^{(\text{INTERSECCION.EJE}(x,y) + \text{DISTR.NORM.ESTAND.INV}(90\%))} \\ * \text{ERROR.TIPICO.XY}(x,y))$$

$$K_a = 10^{(2.6579 + 1.2816 * 0.3483)}$$

$$K_a = 1271.4$$

Este escalamiento se realiza principalmente cuando el modelo tiene como finalidad predecir los niveles máximos de vibraciones, lo que significa que si el modelo es correcto, el nivel registrado debe estar por debajo del valor predicho.

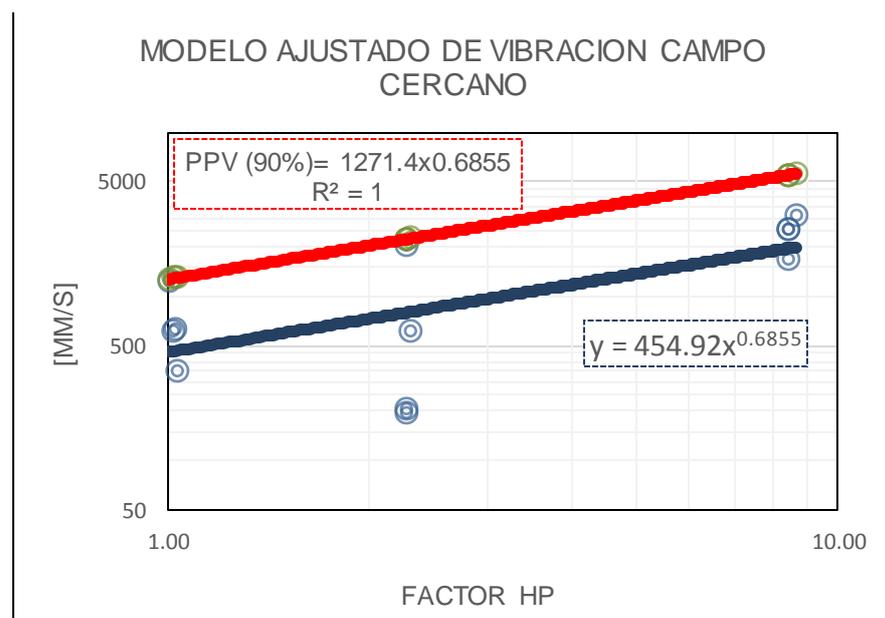
Utilizando los resultados obtenidos en el monitoreo, se modeló el comportamiento de las vibraciones en la voladura (modelo básico al 50% de certeza) y el modelo corregido se obtiene desplazando la curva hasta obtener una certeza de un 90% para que los puntos se encuentren bajo esta.

Tabla n.º 3.6. Modelo Holmberg & Persson,

| MODELO BÁSICO | MODELO CORREGIDO |
|---|--|
| PPV (50%) = 454.92(FACTOR HP) ^{0.6855} | PPV (90%)= 1271.4(FACTOR HP) ^{0.6855} |

Fuente: Propia.

Figura n.º 3.10. Modelo ajustado al 90% para campo cercano.



Fuente: Propia.

La ecuación resultante de la curva ajustada es la siguiente:

$$\text{PPV (90\%)} = 1271.4 (\text{FACTOR HP})^{0.6855} \text{ [mm/s]}$$
$$R^2 = 1$$

Donde:

$$k = 1271.4, \alpha = 0.6855 \text{ y } \beta = 1.371$$

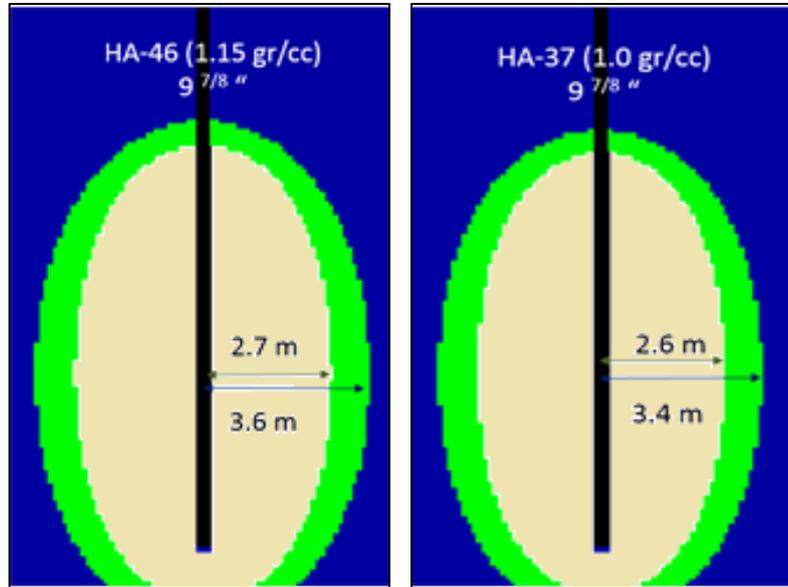
3.7.5. Determinación de distancias críticas

Las distancias críticas de diseño en las cuales se podría obtener el efecto de presión dinámica se obtuvieron contraponiendo los resultados de las simulaciones realizadas con el software JKSimblast y la información de la presión máxima permitida por los detonadores Daveytronic para los materiales aluminio y cobre. Cabe señalar que las capsulas de aluminio tienen un 25% menor resistencia, expresada en psi, que las capsulas de cobre (15.000 psi y 20.000 psi respectivamente).

Para las diferentes configuraciones de carga utilizadas en las simulaciones, se usaron 4 diferentes diámetros de perforación y 6 diferentes explosivos disponibles en la mina, los cuales se listan en la Tabla n.º 4.1. Para cada uno de ellos se varió la carga explosiva desde 1 hasta 8 metros con simulaciones cada medio metro. Los resultados se presentan en las Tablas n.º 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 para los detonadores Daveytronic de cobre y de aluminio.

En la Figura n.º 3.11 se muestra un ejemplo de los Halos simulados para dos explosivos de 1,15 y 1,0 gr/cc respectivamente. Los contornos de color verde representan la presión máxima a la cual el detonador de cobre se ve afectado. Los contornos de color azul corresponden a la presión máxima que soporta el detonador de aluminio. Para ambos casos, se muestra la distancia a la cual ocurren tales presiones.

Figura n.º 3.11. Ejemplos de contornos de presión obtenidos mediante el software JKSImblast.



Fuente: Davey Bickford.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Como medida de cautela, se aplicó arbitrariamente un factor de un 20% sobre las magnitudes de las presiones modeladas. De esta manera se busca eliminar la posibilidad de experimentar condiciones desfavorables que desemboquen en falla de los detonadores. En el siguiente cuadro se presenta al lado izquierdo los distintos diámetros utilizados para cada tipo de explosivo en las simulaciones.

Tabla n.º 4.1. Listado de diámetros y tipos de explosivos utilizados en las simulaciones.

| Diámetro | Explosivo (densidad gr/cc) |
|----------|----------------------------|
| 10 5/8 " | ANFO (0.78) |
| 9 7/8 " | HA37 (1.0) |
| 7 7/8 " | HA73(1.1) |
| 6 " | HA46(1.15) |
| | Emulsión (0.8) |
| | Emulsión (0.9) |

Fuente: Minera Yanacocha.

4.1. Distancias críticas para un diámetro de 10 5/8"

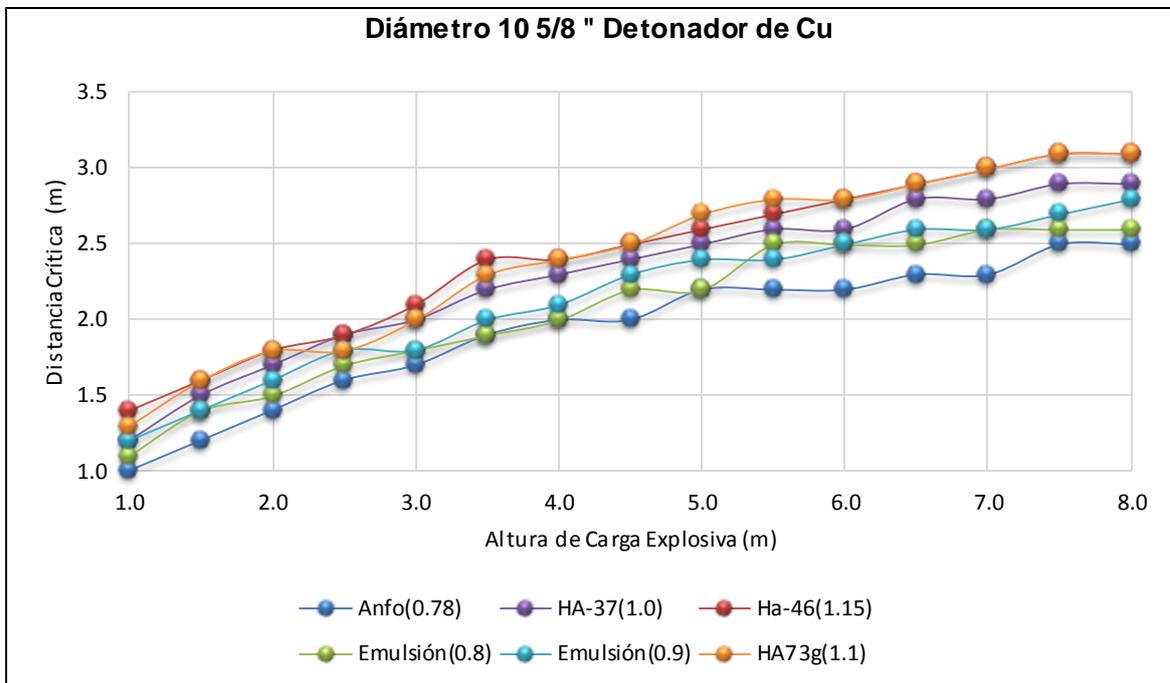
En la siguiente tabla se definen las condiciones límite en términos de distancia y cantidad de explosivo para taladros de 10 5/8", por cada tipo de explosivo usado en Minera Yanacocha y en base a la resistencia de las cápsulas de aluminio y cobre usadas en los detonadores Daveytronic.

Tabla n.º 4.2. Distancias críticas para un diámetro de 10 5/8".

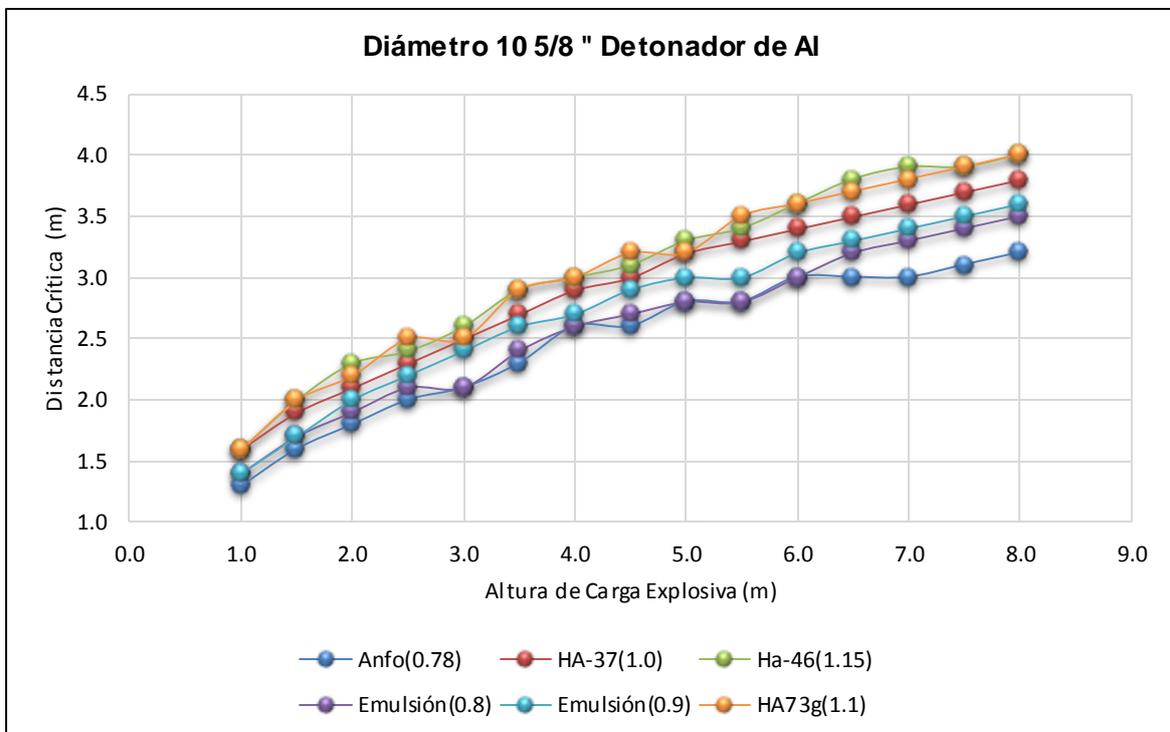
| Altura de Carga (m) | Anfo(0.78) | | HA-37(1.0) | | Ha-46(1.15) | | Emulsión(0.8) | | Emulsión(0.9) | | Q-73g(1.1) | |
|---------------------|-------------|-----|-------------|-----|-------------|-----|---------------|-----|---------------|-----|-------------|-----|
| | Detonadores | | Detonadores | | Detonadores | | Detonadores | | Detonadores | | Detonadores | |
| | Cu | Al | Cu | Al | Cu | Al | Cu | Al | Cu | Al | Cu | Al |
| 1.0 | 1.0 | 1.3 | 1.2 | 1.6 | 1.4 | 1.6 | 1.1 | 1.4 | 1.2 | 1.4 | 1.3 | 1.6 |
| 1.5 | 1.2 | 1.6 | 1.5 | 1.9 | 1.6 | 2.0 | 1.4 | 1.7 | 1.4 | 1.7 | 1.6 | 2.0 |
| 2.0 | 1.4 | 1.8 | 1.7 | 2.1 | 1.8 | 2.3 | 1.5 | 1.9 | 1.6 | 2.0 | 1.8 | 2.2 |
| 2.5 | 1.6 | 2.0 | 1.9 | 2.3 | 1.9 | 2.4 | 1.7 | 2.1 | 1.8 | 2.2 | 1.8 | 2.5 |
| 3.0 | 1.7 | 2.1 | 2.0 | 2.5 | 2.1 | 2.6 | 1.8 | 2.1 | 1.8 | 2.4 | 2.0 | 2.5 |
| 3.5 | 1.9 | 2.3 | 2.2 | 2.7 | 2.4 | 2.9 | 1.9 | 2.4 | 2.0 | 2.6 | 2.3 | 2.9 |
| 4.0 | 2.0 | 2.6 | 2.3 | 2.9 | 2.4 | 3.0 | 2.0 | 2.6 | 2.1 | 2.7 | 2.4 | 3.0 |
| 4.5 | 2.0 | 2.6 | 2.4 | 3.0 | 2.5 | 3.1 | 2.2 | 2.7 | 2.3 | 2.9 | 2.5 | 3.2 |
| 5.0 | 2.2 | 2.8 | 2.5 | 3.2 | 2.6 | 3.3 | 2.2 | 2.8 | 2.4 | 3.0 | 2.7 | 3.2 |
| 5.5 | 2.2 | 2.8 | 2.6 | 3.3 | 2.7 | 3.4 | 2.5 | 2.8 | 2.4 | 3.0 | 2.8 | 3.5 |
| 6.0 | 2.2 | 3.0 | 2.6 | 3.4 | 2.8 | 3.6 | 2.5 | 3.0 | 2.5 | 3.2 | 2.8 | 3.6 |
| 6.5 | 2.3 | 3.0 | 2.8 | 3.5 | 2.9 | 3.8 | 2.5 | 3.2 | 2.6 | 3.3 | 2.9 | 3.7 |
| 7.0 | 2.3 | 3.0 | 2.8 | 3.6 | 3.0 | 3.9 | 2.6 | 3.3 | 2.6 | 3.4 | 3.0 | 3.8 |
| 7.5 | 2.5 | 3.1 | 2.9 | 3.7 | 3.1 | 3.9 | 2.6 | 3.4 | 2.7 | 3.5 | 3.1 | 3.9 |
| 8.0 | 2.5 | 3.2 | 2.9 | 3.8 | 3.1 | 4.0 | 2.6 | 3.5 | 2.8 | 3.6 | 3.1 | 4.0 |

Fuente: Propia.

Figura n.º 4.1. Gráficos distancias críticas para diámetro 10 5/8”.



Fuente: Propia.



Fuente: Propia.

4.2. Distancias críticas para un diámetro de 9 7/8"

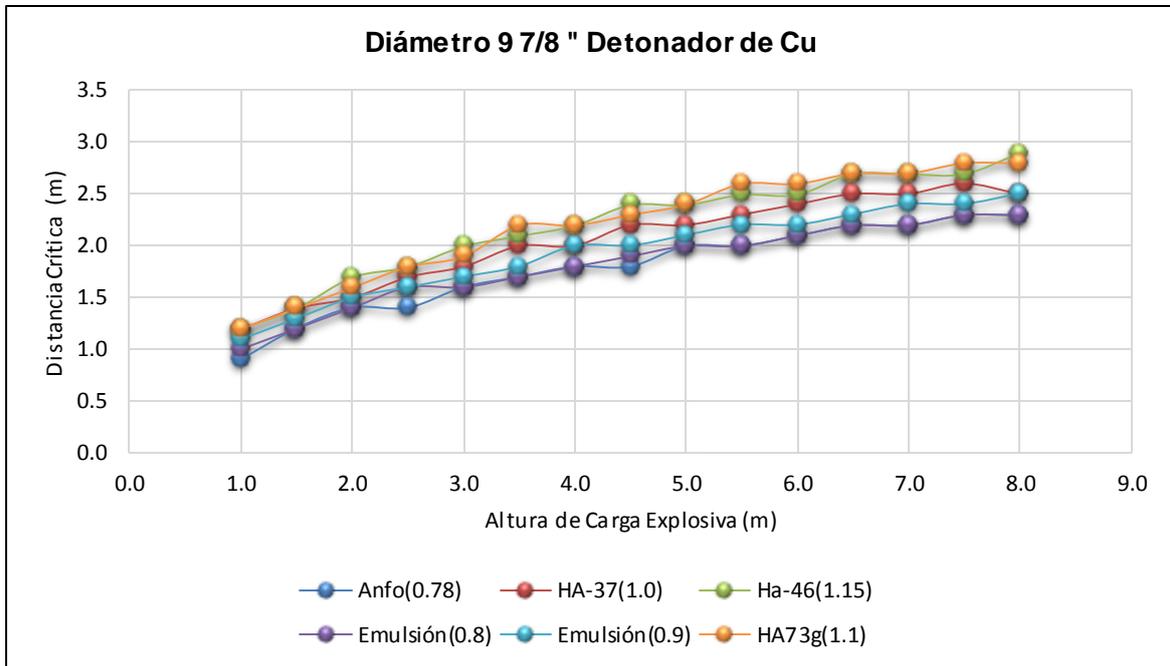
En la siguiente tabla se definen las condiciones límite en términos de distancia y cantidad de explosivo para taladros de 9 7/8", por cada tipo de explosivo usado en Minera Yanacocha y en base a la resistencia de las cápsulas de aluminio y cobre usadas en los detonadores Daveytronic.

Tabla n.º 4.3. Distancias críticas para un diámetro de 9 7/8"

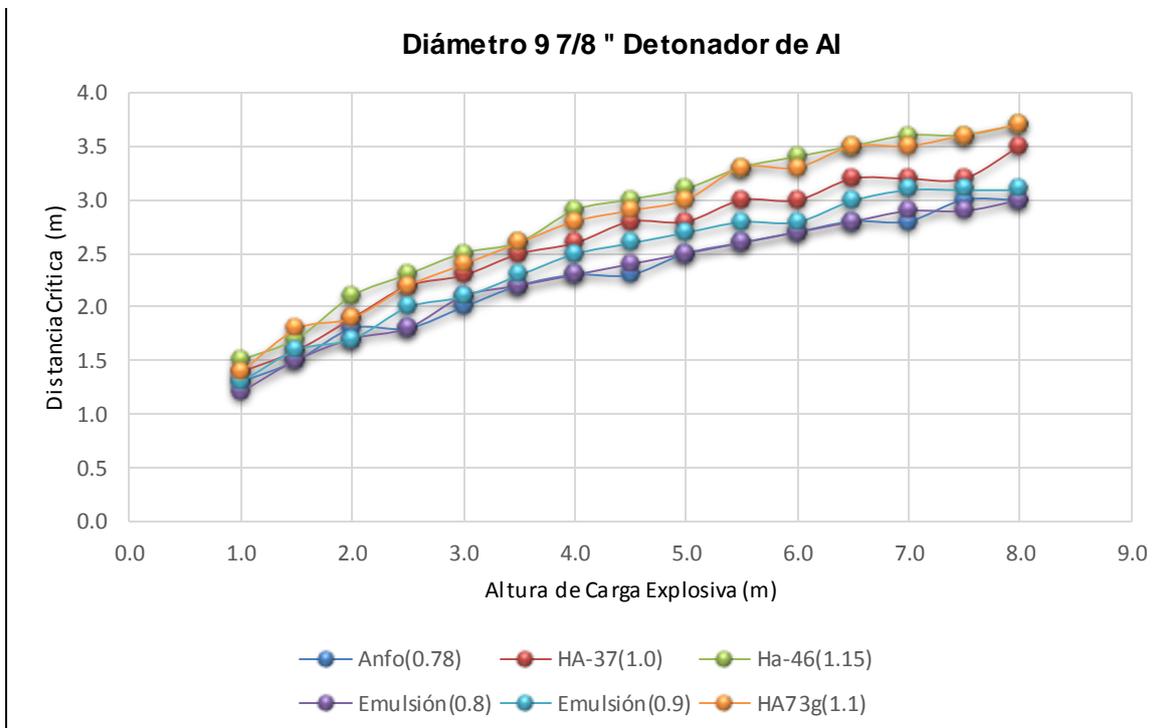
| Altura de Carga (m) | Anfo(0.78) | | HA-37(1.0) | | Ha-46(1.15) | | Emulsión(0.8) | | Emulsión(0.9) | | Q-73g(1.1) | |
|---------------------|-------------|-----|-------------|-----|-------------|-----|---------------|-----|---------------|-----|-------------|-----|
| | Detonadores | | Detonadores | | Detonadores | | Detonadores | | Detonadores | | Detonadores | |
| | Cu | Al | Cu | Al | Cu | Al | Cu | Al | Cu | Al | Cu | Al |
| 1.0 | 0.9 | 1.3 | 1.2 | 1.4 | 1.2 | 1.5 | 1.0 | 1.2 | 1.1 | 1.3 | 1.2 | 1.4 |
| 1.5 | 1.2 | 1.5 | 1.4 | 1.6 | 1.4 | 1.7 | 1.2 | 1.5 | 1.3 | 1.6 | 1.4 | 1.8 |
| 2.0 | 1.4 | 1.8 | 1.5 | 1.9 | 1.7 | 2.1 | 1.4 | 1.7 | 1.5 | 1.7 | 1.6 | 1.9 |
| 2.5 | 1.4 | 1.8 | 1.7 | 2.2 | 1.8 | 2.3 | 1.6 | 1.8 | 1.6 | 2.0 | 1.8 | 2.2 |
| 3.0 | 1.6 | 2.0 | 1.8 | 2.3 | 2.0 | 2.5 | 1.6 | 2.1 | 1.7 | 2.1 | 1.9 | 2.4 |
| 3.5 | 1.7 | 2.2 | 2.0 | 2.5 | 2.1 | 2.6 | 1.7 | 2.2 | 1.8 | 2.3 | 2.2 | 2.6 |
| 4.0 | 1.8 | 2.3 | 2.0 | 2.6 | 2.2 | 2.9 | 1.8 | 2.3 | 2.0 | 2.5 | 2.2 | 2.8 |
| 4.5 | 1.8 | 2.3 | 2.2 | 2.8 | 2.4 | 3.0 | 1.9 | 2.4 | 2.0 | 2.6 | 2.3 | 2.9 |
| 5.0 | 2.0 | 2.5 | 2.2 | 2.8 | 2.4 | 3.1 | 2.0 | 2.5 | 2.1 | 2.7 | 2.4 | 3.0 |
| 5.5 | 2.0 | 2.6 | 2.3 | 3.0 | 2.5 | 3.3 | 2.0 | 2.6 | 2.2 | 2.8 | 2.6 | 3.3 |
| 6.0 | 2.1 | 2.7 | 2.4 | 3.0 | 2.5 | 3.4 | 2.1 | 2.7 | 2.2 | 2.8 | 2.6 | 3.3 |
| 6.5 | 2.2 | 2.8 | 2.5 | 3.2 | 2.7 | 3.5 | 2.2 | 2.8 | 2.3 | 3.0 | 2.7 | 3.5 |
| 7.0 | 2.2 | 2.8 | 2.5 | 3.2 | 2.7 | 3.6 | 2.2 | 2.9 | 2.4 | 3.1 | 2.7 | 3.5 |
| 7.5 | 2.3 | 3.0 | 2.6 | 3.2 | 2.7 | 3.6 | 2.3 | 2.9 | 2.4 | 3.1 | 2.8 | 3.6 |
| 8.0 | 2.3 | 3.0 | 2.5 | 3.5 | 2.9 | 3.7 | 2.3 | 3.0 | 2.5 | 3.1 | 2.8 | 3.7 |

Fuente: Propia.

Figura n.º 4.2. Gráficos distancias críticas para diámetro 9 7/8".



Fuente: Propia.



Fuente: Propia.

4.3. Distancias críticas para un diámetro de 7 7/8"

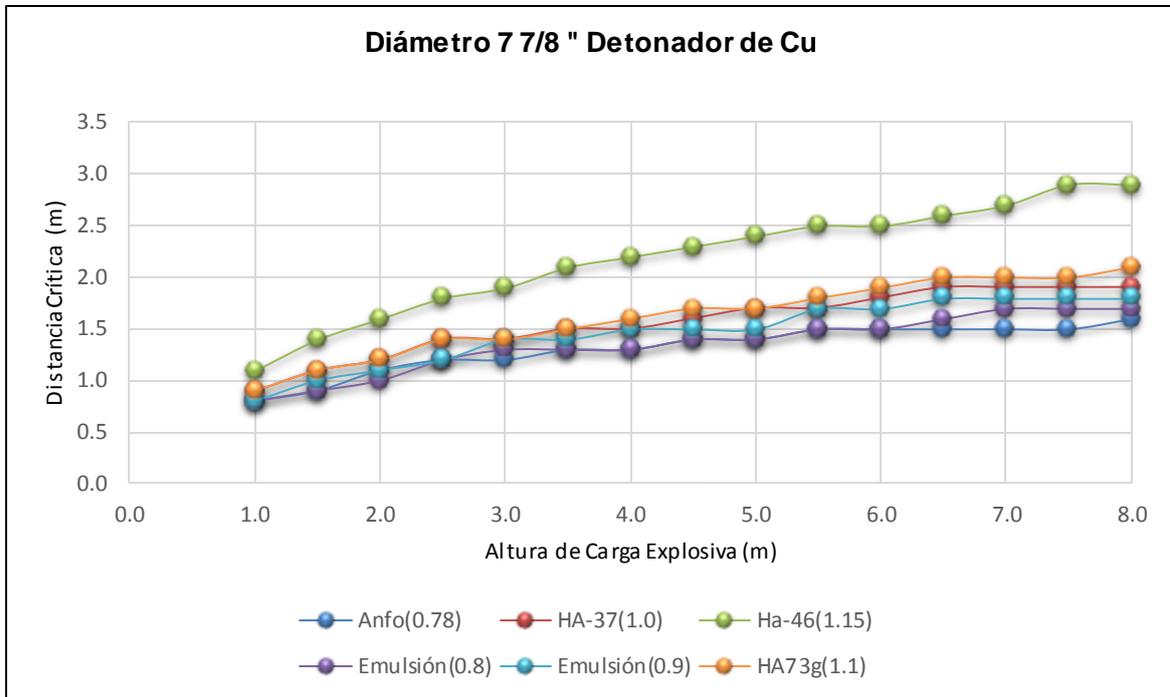
En la siguiente tabla se definen las condiciones límite en términos de distancia y cantidad de explosivo para taladros de 7 7/8", por cada tipo de explosivo usado en Minera Yanacocha y en base a la resistencia de las cápsulas de aluminio y cobre usadas en los detonadores Daveytronic.

Tabla n.º 4.4. Distancias críticas para un diámetro de 7 7/8".

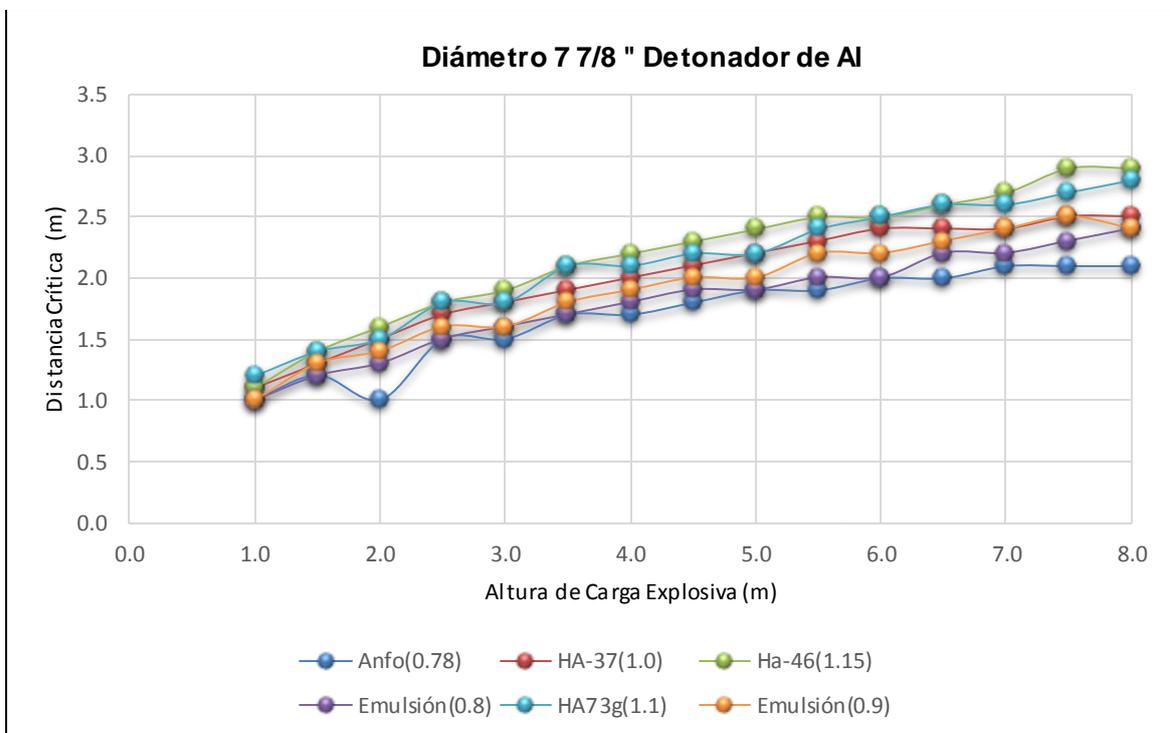
| Altura de Carga (m) | Anfo(0.78) | | HA-37(1.0) | | Ha-46(1.15) | | Emulsión(0.8) | | Emulsión(0.9) | | Q-73g(1.1) | |
|---------------------|-------------|-----|-------------|-----|-------------|-----|---------------|-----|---------------|-----|-------------|-----|
| | Detonadores | | Detonadores | | Detonadores | | Detonadores | | Detonadores | | Detonadores | |
| | Cu | Al | Cu | Al | Cu | Al | Cu | Al | Cu | Al | Cu | Al |
| 1.0 | 0.8 | 1.0 | 0.9 | 1.1 | 0.9 | 1.1 | 0.8 | 1.0 | 0.8 | 1.0 | 0.9 | 1.2 |
| 1.5 | 0.9 | 1.2 | 1.1 | 1.3 | 1.1 | 1.4 | 0.9 | 1.2 | 1.0 | 1.3 | 1.1 | 1.4 |
| 2.0 | 1.1 | 1.0 | 1.2 | 1.5 | 1.3 | 1.6 | 1.0 | 1.3 | 1.1 | 1.4 | 1.2 | 1.5 |
| 2.5 | 1.2 | 1.5 | 1.4 | 1.7 | 1.4 | 1.8 | 1.2 | 1.5 | 1.2 | 1.6 | 1.4 | 1.8 |
| 3.0 | 1.2 | 1.5 | 1.4 | 1.8 | 1.4 | 1.9 | 1.3 | 1.6 | 1.4 | 1.6 | 1.4 | 1.8 |
| 3.5 | 1.3 | 1.7 | 1.5 | 1.9 | 1.6 | 2.1 | 1.3 | 1.7 | 1.4 | 1.8 | 1.5 | 2.1 |
| 4.0 | 1.3 | 1.7 | 1.5 | 2.0 | 1.7 | 2.2 | 1.3 | 1.8 | 1.5 | 1.9 | 1.6 | 2.1 |
| 4.5 | 1.4 | 1.8 | 1.6 | 2.1 | 1.7 | 2.3 | 1.4 | 1.9 | 1.5 | 2.0 | 1.7 | 2.2 |
| 5.0 | 1.4 | 1.9 | 1.7 | 2.2 | 1.8 | 2.4 | 1.4 | 1.9 | 1.5 | 2.0 | 1.7 | 2.2 |
| 5.5 | 1.5 | 1.9 | 1.7 | 2.3 | 1.9 | 2.5 | 1.5 | 2.0 | 1.7 | 2.2 | 1.8 | 2.4 |
| 6.0 | 1.5 | 2.0 | 1.8 | 2.4 | 1.9 | 2.5 | 1.5 | 2.0 | 1.7 | 2.2 | 1.9 | 2.5 |
| 6.5 | 1.5 | 2.0 | 1.9 | 2.4 | 2.0 | 2.6 | 1.6 | 2.2 | 1.8 | 2.3 | 2.0 | 2.6 |
| 7.0 | 1.5 | 2.1 | 1.9 | 2.4 | 2.0 | 2.7 | 1.7 | 2.2 | 1.8 | 2.4 | 2.0 | 2.6 |
| 7.5 | 1.5 | 2.1 | 1.9 | 2.5 | 2.1 | 2.9 | 1.7 | 2.3 | 1.8 | 2.5 | 2.0 | 2.7 |
| 8.0 | 1.6 | 2.1 | 1.9 | 2.5 | 2.1 | 2.9 | 1.7 | 2.4 | 1.8 | 2.4 | 2.1 | 2.8 |

Fuente: Propia.

Figura n.º 4.3. Gráficos distancias críticas para diámetro 7 7/8".



Fuente: Propia.



Fuente: Propia.

4.4. Distancias críticas para un diámetro de 6"

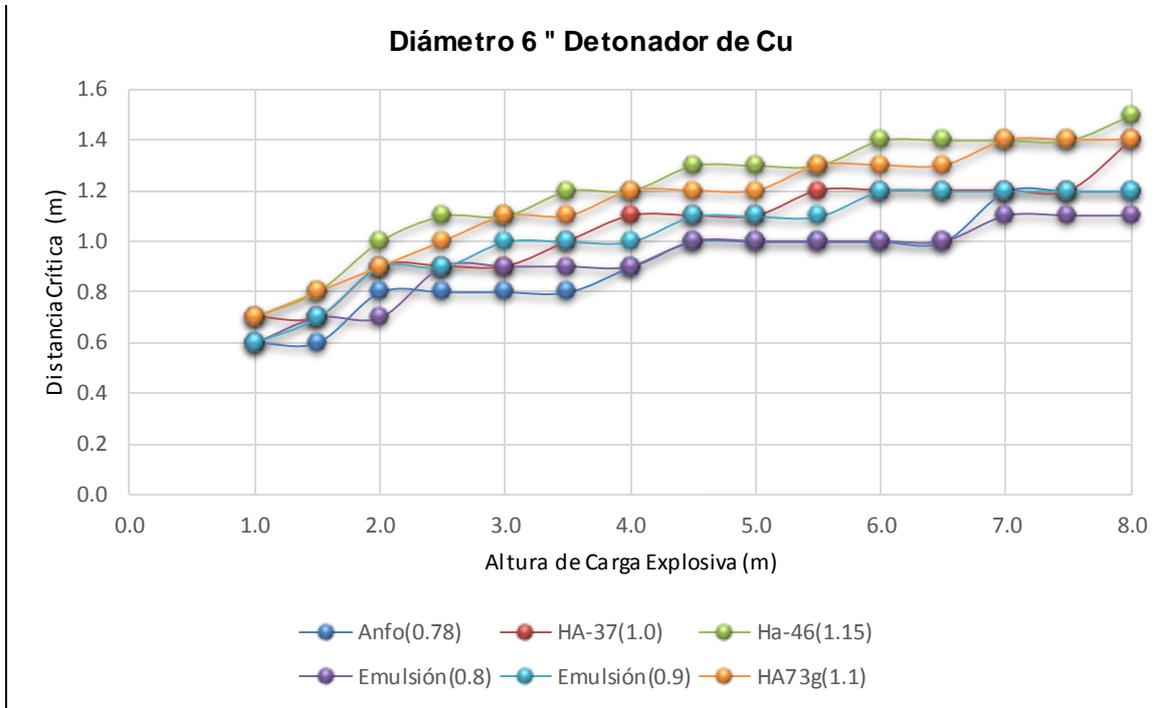
En la siguiente tabla se definen las condiciones límite en términos de distancia y cantidad de explosivo para taladros de 6", por cada tipo de explosivo usado en Minera Yanacocha y en base a la resistencia de las cápsulas de aluminio y cobre usadas en los detonadores Daveytronic.

Tabla n.º 4.5. Distancias críticas para un diámetro de 6".

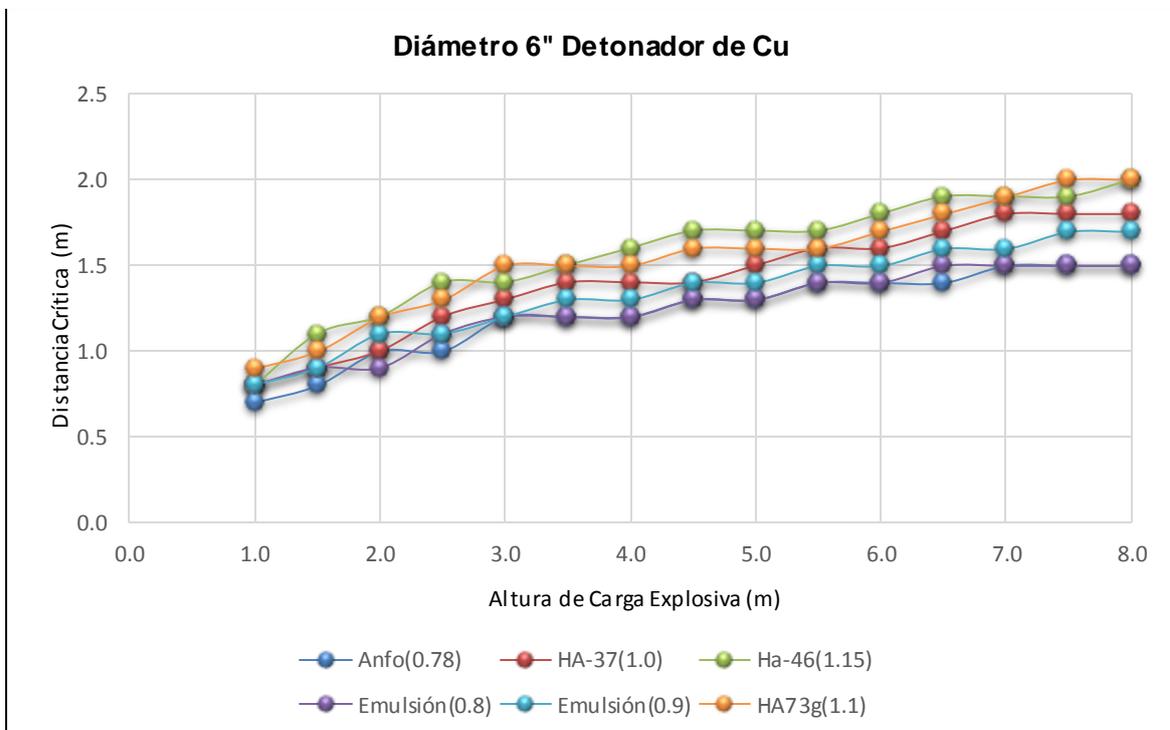
| Altura de Carga (m) | Anfo(0.78) | | HA-37(1.0) | | Ha-46(1.15) | | Emulsión(0.8) | | Emulsión(0.9) | | Q-73(1.1) | |
|---------------------|-------------|-----|-------------|-----|-------------|-----|---------------|-----|---------------|-----|-------------|-----|
| | Detonadores | | Detonadores | | Detonadores | | Detonadores | | Detonadores | | Detonadores | |
| | Cu | Al | Cu | Al | Cu | Al | Cu | Al | Cu | Al | Cu | Al |
| 1.0 | 0.6 | 0.7 | 0.7 | 0.8 | 0.7 | 0.8 | 0.6 | 0.8 | 0.6 | 0.8 | 0.7 | 0.9 |
| 1.5 | 0.6 | 0.8 | 0.7 | 0.9 | 0.8 | 1.1 | 0.7 | 0.9 | 0.7 | 0.9 | 0.8 | 1.0 |
| 2.0 | 0.8 | 1.0 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 1.2 | 0.7 | 0.9 | 0.9 | 1.1 | 0.9 | 1.2 |
| 2.5 | 0.8 | 1.0 | 0.9 | 1.2 | 1.1 | 1.4 | 0.9 | 1.1 | 0.9 | 1.1 | 1.0 | 1.3 |
| 3.0 | 0.8 | 1.2 | 0.9 | 1.3 | 1.1 | 1.4 | 0.9 | 1.2 | 1.0 | 1.2 | 1.1 | 1.5 |
| 3.5 | 0.8 | 1.2 | 1.0 | 1.4 | 1.2 | 1.5 | 0.9 | 1.2 | 1.0 | 1.3 | 1.1 | 1.5 |
| 4.0 | 0.9 | 1.2 | 1.1 | 1.4 | 1.2 | 1.6 | 0.9 | 1.2 | 1.0 | 1.3 | 1.2 | 1.5 |
| 4.5 | 1.0 | 1.3 | 1.1 | 1.4 | 1.3 | 1.7 | 1.0 | 1.3 | 1.1 | 1.4 | 1.2 | 1.6 |
| 5.0 | 1.0 | 1.3 | 1.1 | 1.5 | 1.3 | 1.7 | 1.0 | 1.3 | 1.1 | 1.4 | 1.2 | 1.6 |
| 5.5 | 1.0 | 1.4 | 1.2 | 1.6 | 1.3 | 1.7 | 1.0 | 1.4 | 1.1 | 1.5 | 1.3 | 1.6 |
| 6.0 | 1.0 | 1.4 | 1.2 | 1.6 | 1.4 | 1.8 | 1.0 | 1.4 | 1.2 | 1.5 | 1.3 | 1.7 |
| 6.5 | 1.0 | 1.4 | 1.2 | 1.7 | 1.4 | 1.9 | 1.0 | 1.5 | 1.2 | 1.6 | 1.3 | 1.8 |
| 7.0 | 1.2 | 1.5 | 1.2 | 1.8 | 1.4 | 1.9 | 1.1 | 1.5 | 1.2 | 1.6 | 1.4 | 1.9 |
| 7.5 | 1.2 | 1.5 | 1.2 | 1.8 | 1.4 | 1.9 | 1.1 | 1.5 | 1.2 | 1.7 | 1.4 | 2.0 |
| 8.0 | 1.2 | 1.5 | 1.4 | 1.8 | 1.5 | 2.0 | 1.1 | 1.5 | 1.2 | 1.7 | 1.4 | 2.0 |

Fuente: Propia.

Figura n.º 4.4. Gráficos distancias críticas para diámetro 6”.



Fuente: Propia.



Fuente: Propia.

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN

Para Davey Bickford un evento de tiro cortado es un evento con la más alta prioridad por lo cual se ponen a disposición todos los recursos posibles para investigar y cerrar conformemente estos incidentes. La investigación llevada a cabo por el hallazgo de un booster no iniciado sobre el material volado con un daño físico evidente, apuntó a la presión dinámica como potencial causa del suceso. Razón por la cual se llevaron a cabo 2 pruebas experimentales realizadas en el tajo La Quinua, con el fin de definir condiciones límite, en términos de distancia y cantidad de explosivo, que eviten la falla mecánica de los detonadores Daveytronic. El uso del modelo matemático de Holmberg & Persson para vibraciones en campo cercano (ecuación llevada al 90% de confiabilidad), y las simulaciones realizadas en el software JKSimblast permitieron hallar las distancias mínimas a las cuales deben estar los taladros para que no se genere otro problema como el ocurrido. Para los taladros con mayor diámetro de 10 5/8" y con mayor densidad de 1.15 gr/cc las distancias críticas van de 3.1 a 4 metros y para taladros con menor diámetro de 6" y con menor densidad de 0.8 gr/cc las distancias críticas van de 1.1 a 1.5 metros para los detonadores de cobre y aluminio respectivamente, usando la carga explosiva máxima establecida por Yanacocha. Dichos valores mostrados en los resultados del presente trabajo de investigación, permitirán evitar un diseño y/o implementación deficientes en las operaciones.

Finalmente se puede afirmar que las pruebas ejecutadas durante el desarrollo de la investigación sirvieron para encontrar las distancias críticas de diseño de malla de perforación. Los valores de las propiedades intrínsecas de las rocas se usaron para analizar los diferentes escenarios, con distintos tipos de diámetros para distintos explosivos según las necesidades.

Cabe resaltar que las propiedades intrínsecas de la roca encontradas en el tajo La Quinua son estrictamente usadas para el sector del tajo Tapado Oeste, por ningún motivo pueden ser usadas en otros sectores ya que las propiedades de las rocas cambian considerablemente en cada sector. Se debe tener en cuenta también la presencia de agua en los taladros, ya que esta cambia considerablemente el comportamiento de la roca al momento de la detonación.

CONCLUSIONES

A través del presente trabajo de investigación, se logró definir las distancias críticas para los detonadores Daveytronic, utilizando la información de las pruebas realizadas en el tajo La Quinua nivel 3228, para los taladros de producción de 10 5/8" usados en este tajo se halló que las distancias entre taladros para el diseño de malla deben estar en un rango de 1.6 a 4 metros de longitud dependiendo de la altura de carga, lo que representa las distancias críticas de operación segura para no afectar los detonadores por efecto de la presión dinámica.

La información de vibraciones recolectada durante ambas pruebas experimentales permitió ajustar un modelo de amplitud de ondas sísmicas aplicando la formulación de Holmberg & Persson, con el cual se logró hallar las propiedades intrínsecas de la roca.

El uso del software JKSimblast permitió realizar una estimación de las presiones con el uso de las configuraciones de carga existente en mina Yanacocha.

De los resultados obtenidos, se concluye que: respecto del diámetro, la distancia crítica entre los taladros aumenta a medida que el diámetro es mayor. Para el caso de taladros de diámetro 10 5/8" se obtuvo una distancia crítica mínima de 4 metros entre taladros para una carga explosiva de 8 metros con densidad 1.15 gr/cc. Para la misma densidad mencionada anteriormente, taladros con diámetro de 9 7/8", 7 7/8" y 6" la distancia crítica mínima es de 3.9, 2.9 y 2.1 metros respectivamente. La densidad del explosivo afecta de manera directamente proporcional a la generación de presiones, por lo cual taladros cargados con explosivos de una densidad mayor hacen necesario que estén más alejados unos de otros en comparación a taladros cargados con explosivos de menor densidad. Las distintas simulaciones mostraron que los diseños de taladros cargados con explosivos de densidad 1.15 gr/cc presentan una distancia crítica de hasta 1 metro por sobre otros explosivos de densidad menor. Respecto del material en que los detonadores Daveytronic están hechos, los construidos de cobre presentan una resistencia a la deformación mayor a los construidos con aluminio, por ende la distancia crítica para cada uno de los diseños simulados anteriormente es menor.

La posibilidad de estar en presencia del efecto de presión dinámica y que este efecto produzca algún tipo de deformación y/o falla en la cápsula de los detonadores, está en directa relación con el diseño de carguío y la implementación de los diseños.

RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos solo son representativos del sector fondo del tajo Tapado Oeste y es recomendable realizar un nuevo estudio de medición de vibraciones en el caso de querer determinar posibles efectos de presión dinámica en algún otro sector de la mina.

Finalmente, cabe señalar que si bien la metodología y las técnicas de medición utilizadas en este estudio conforman, en conjunto, una buena aproximación a la problemática de presiones dinámicas; estas en ningún caso reemplazarán la medición directa de dichas presiones.

Por ende, se recomienda que en el futuro se realicen campañas de análisis y modelamiento de presiones inducidas usando sensores de turmalina o similares, con el fin de conferir aún más confiabilidad a los resultados obtenidos. Actualmente, Davey Bickford está adquiriendo un set de sensores y un equipo de recolección de datos que cumplen con todos los requerimientos para medir las altas presiones generadas en las cercanías de los pozos de voladura.

REFERENCIAS

Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de Enaex (CINTEX) (2010). *Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento*. Chile, Universidad de la Serena.

Contreras, W. (2009). *Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones "Aplicación en minas Ares"* (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

CCM Candelaria (2006). *Modelamiento de Vibraciones Campo Cercano - Roca Metandesita*. Chile: Álvaro Roco.

Giraldo, F. (2010). *Control de vibraciones para casas de tierra en Perú*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Huamán, B. (2010). *Implementación de un nuevo sistema de iniciación electrónica en Perú - seguridad y versatilidad*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

International Society of Explosives Engineers (ISEE) (2001). *ISEE Blasters' Handbook™ 18th Edition*. ISEE, Cleveland, Oh.

Journal of Geology and Mining Research. (2010). *Estimation of near-field peak particle velocity: A mathematical model*. Shrey Arora y Kaushik Dey.

Merino, D. (2005). *Geología y Controles de Mineralización en el depósito Cerro Yanacocha, distrito de Yanacocha (Cajamarca - Perú)* (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Orica. (Febrero de 2016). *Estudio de presiones dinámicas - Cerro Corona*. Perú: Jorge Cárdenas.

Orica. (Septiembre de 2012). *Reporte Prueba Espiral "Estudio de Presiones Dinámicas"*. Chile: Ignacio Humeres, Carlos Salas, Cristián Rojas y Pablo Martínez.

Orica Australia (2006). *Near-field blast vibration models*. Chile: Dane Blair y Alan Minchinton.

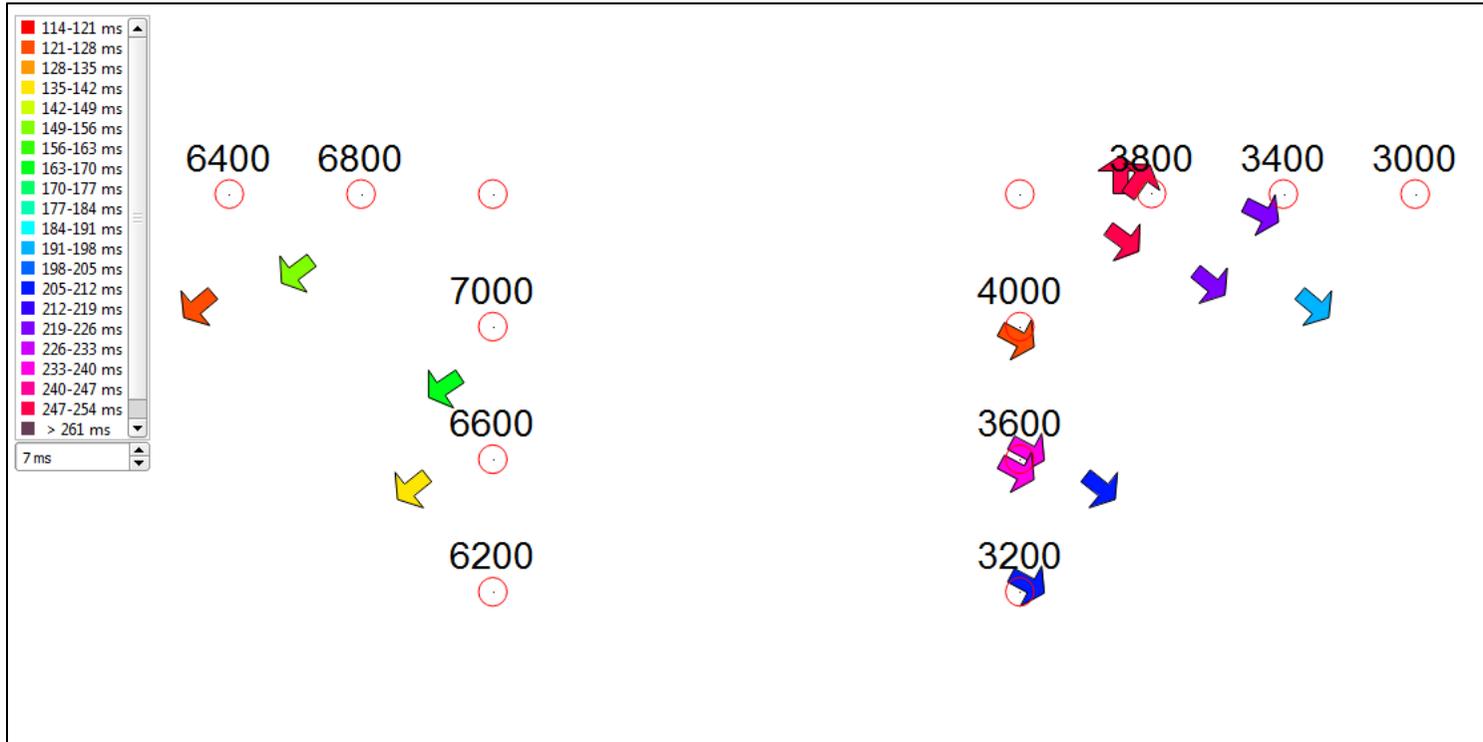
Poma, J. (2012). *Importancia de la fragmentación de la roca en el proceso Gold Mill (Caso Minera Yanacocha)*. (Tesis de grado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

Society of Economic Geologists. (2010). *Evolution of Calc-Alkaline Volcanism and Associated Hydrothermal Gold Deposits at Yanacocha, Perú*. Perú: Anthony Lango, John Dilles, Anita Grunder y Robert Duncan.

Vilela, W. (2014). *Análisis de factibilidad para el uso de anfo pesado a base de emulsión gasificable en Minera Yanacocha*. (Tesis de grado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

ANEXOS

Anexo n.º 1. Simulación del desplazamiento del material.



Fuente: Exsa.

Anexo n.º 2. Medición de densidad de la mezcla Quantex.



Fuente: Minera Yanacocha.

Anexo n.º 3. Carguío de taladros en el nivel 3228 La Quinua.



Fuente: Minera Yanacocha.

Anexo n.º 4. Mallas programadas para la detonación.



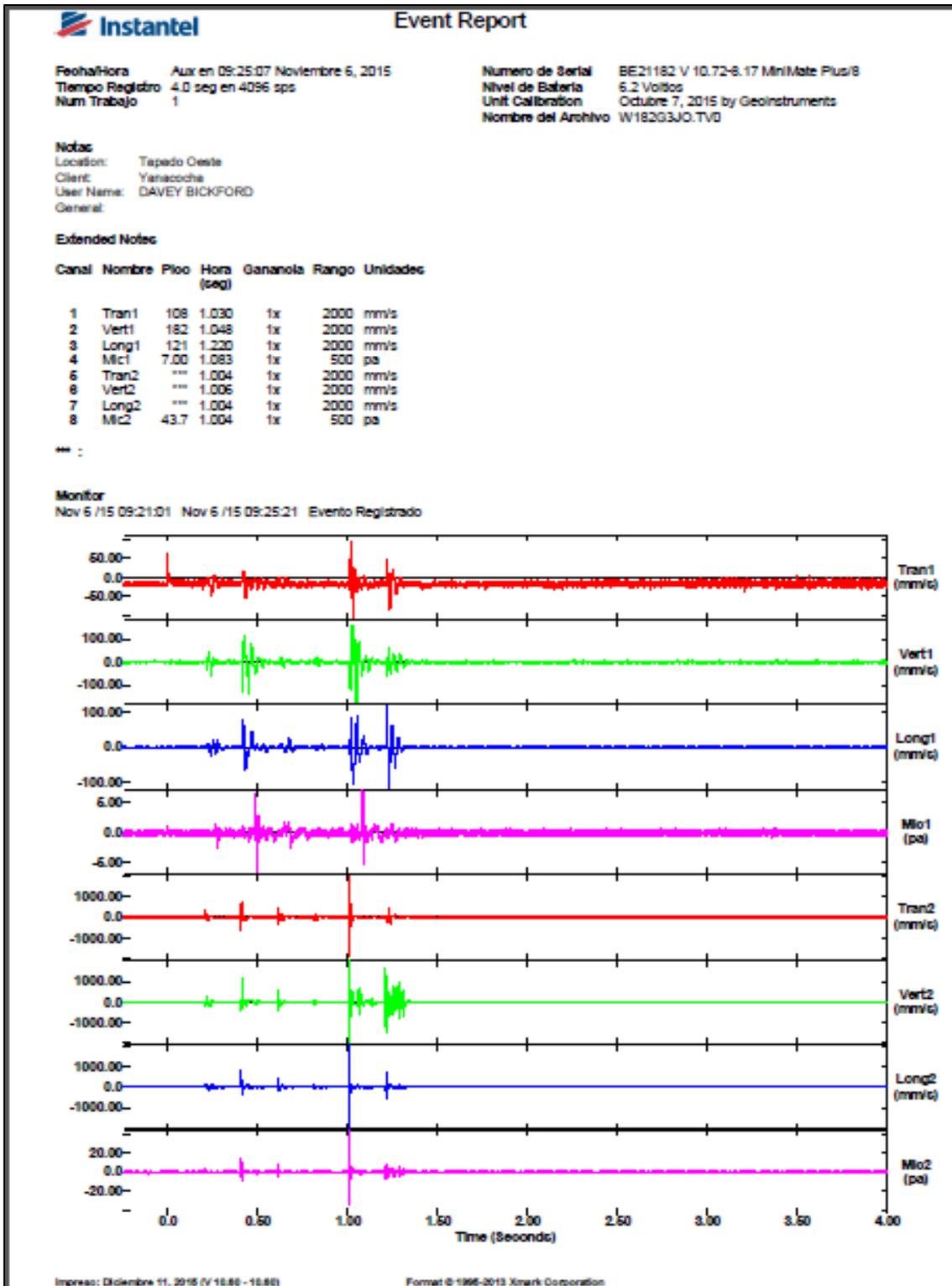
Fuente: Minera Yanacocha.

Anexo n.º 5. Post Voladura en el nivel 3228 La Quinua.



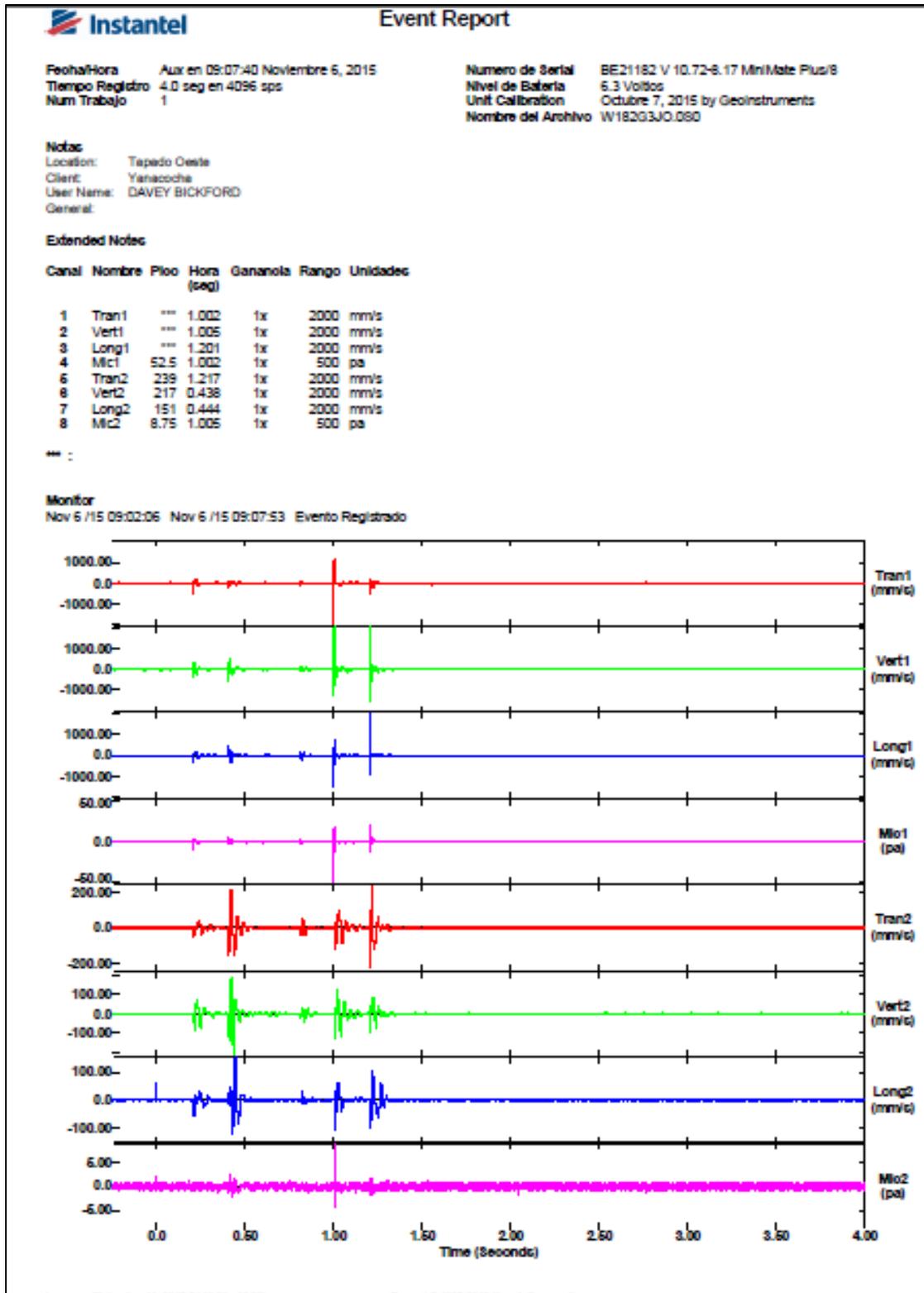
Fuente: Minera Yanacocha.

Anexo n.º 7. Reporte 1 de las pruebas de presión dinámica.



Fuente: Davey Bickford.

Anexo n.º 8. Reporte 2 de las pruebas de presión dinámica.



Fuente: Davey Bickford.