

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Análisis de la implementación de cámaras de aire en las voladuras de canteras urbanas.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero de Minas

Presentado por:

Francisco Xavier Heras Naranjo

Raúl Ricardo Guijarro Vallejo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

DEDICATORIA

Dedicado a mi querida madre Maritza Vallejo, por su apoyo incondicional en todo momento y por siempre comprenderme.

Raúl Ricardo G.

DEDICATORIA

Esto va dedicado a mi madre Elsa Naranjo, por haberme forjado en el hogar y académicamente, a mi padre Francisco Heras, por hacerme entender lo valioso que es el trabajo humilde para progresar, mis hermanas y mi familia, ya que me supieron motivar en su momento y de esa manera alcanzar las diferentes metas en mi vida.

Francisco Xavier H.

AGRADECIMIENTOS

Nuestros más sinceros agradecimientos a cada una de las personas que colaboraron en la realización de este trabajo, especialmente al MSc. Wilmer José Vásquez y MSc. Samantha Tamara Jiménez, ya que colaboraron invaluablemente en la realización de este proyecto.

Raúl Ricardo G.
Francisco Xavier H.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Raúl Guijarro Vallejo, Francisco Heras Naranjo*, damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



**Francisco Xavier
Heras Naranjo**



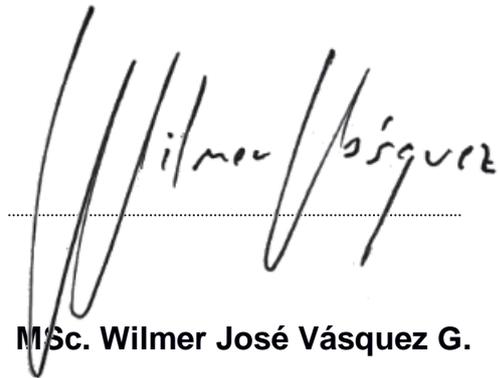
**Raúl Ricardo
Guijarro Vallejo**

EVALUADORES

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Samantha Jiménez", written over a horizontal dotted line.

MSc. Samantha Tamara Jiménez O.

PROFESOR DE LA MATERIA

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Wilmer Vásquez", written over a horizontal dotted line.

MSc. Wilmer José Vásquez G.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente trabajo se realiza con el propósito de mejorar la relación entre las urbanizaciones y las zonas mineras pertenecientes al sector Vía a la Costa, Guayaquil, a partir de la implementación de cámaras de aire en las voladuras. Las vibraciones inducidas por la actividad minera suelen causar malestar en los habitantes de las construcciones vecinas, principalmente por la detonación de bancos de explotación debido a la generación de ruido, polvo, vibraciones y proyecciones de rocas, que en determinadas situaciones podrían incurrir en el deterioro de las edificaciones. Por este motivo, en el presente trabajo se va a analizar el método convencional de voladura y el método que emplea cámaras de aire, para disminuir la percepción del impacto negativo generado por la voladura en las áreas urbanas.

El estudio se desarrolló aplicando una metodología que constó de cuatro fases: 1) recolección de información, 2) toma de datos, 3) procesamiento de datos, 4) análisis de datos. El análisis se hizo con respecto a un solo taladro de perforación perteneciente a una malla cuadrada, utilizando cuatro diámetros diferentes (3", 3.5", 4" y 4.5"), para una altura de banco fija de 12 metros. Los indicadores analizados fueron la carga de columna, consumo específico y velocidad de oscilación.

Los resultados obtenidos fueron; la disminución en las vibraciones en aproximadamente un 50% con el uso del *air deck*. Además, todos los diámetros proporcionaron un factor de carga mayor a 0.32 kg/m^3 , adecuado para la fragmentación de la caliza. Por consiguiente, se concluyó que para reducir las vibraciones es aconsejable optar por el método cámaras de aire y para evitar los *fly rocks*, no sólo es preciso dimensionar el taco del taladro con una relación del 60 a 80% respecto al burden, sino también seleccionar un tamaño de partícula del agregado según el diámetro.

Palabras Clave: voladura, urbanización, vibraciones, *air deck*, canteras.

ABSTRACT

This work is carried out with the purpose of improving the relationship between urbanizations and mining areas belonging to the Vía a la Costa sector, Guayaquil, based on the implementation of air chambers in blasting. The vibrations induced by the mining activity usually cause discomfort in the inhabitants of neighboring buildings, mainly due to the detonation of mining benches due to the generation of noise, dust, vibrations and rock projections, which in certain situations could incur deterioration of the buildings. For this reason, in the present work the conventional blasting method and the method that uses air chambers will be analyzed to reduce the perception of the negative impact generated by blasting in urban areas.

The study was developed applying a methodology that consisted of four phases: 1) data collection, 2) data collection, 3) data processing, 4) data analysis. The analysis was made with respect to a single drilling hole belonging to a square mesh, using four different diameters (3", 3.5", 4" and 4.5"), for a fixed bench height of 12 meters. The indicators analyzed were column load, specific consumption and oscillation speed.

The results obtained were; the decrease in vibrations by approximately 50% with the use of the air deck. Furthermore, all diameters provided a load factor greater than 0.32 kg / m³, suitable for limestone fragmentation. Consequently, it was concluded that to reduce vibrations it is advisable to opt for the air chambers method and to avoid fly rocks, it is not only necessary to size the hole plug with a ratio of 60 to 80% with respect to the burden, but also to select a particle size of the aggregate according to the diameter.

Keywords: *blasting, urbanization, vibrations, air deck, quarries.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1	10
1. Introducción.....	10
1.1 Descripción del problema	10
1.2 Justificación del problema	12
1.3 Objetivos	12
1.3.1 Objetivo General	12
1.3.2 Objetivos Específicos	12
1.4 Marco teórico.....	13
1.4.1 Área de estudio.....	13
1.4.2 Voladuras.....	14
1.4.2.1 Dimensión de la voladura.....	15
1.4.2.2 Parámetros Dimensionales	15
1.4.3 Consecuencias de las voladuras en el entorno.	23
1.4.4 Vibraciones.	24
1.4.4.1 Ondas sísmicas generadas por voladuras.	24
1.4.4.2 Parámetros que alteran las vibraciones.	25
1.4.4.3 Posibles soluciones para reducir las vibraciones por las voladuras. ..	26

1.4.4.4	Normas para control de vibraciones.....	27
1.4.4.5	Norma americana USBM y OSM	28
1.4.4.6	Norma española UNE 22.381-93	29
1.4.5	Cámaras de aire.....	31
1.4.5.1	La teoría del Air-deck.....	31
1.4.5.2	Uso de cámaras de aire para reducción de vibraciones.....	31
1.4.5.3	Taponex.....	32
CAPÍTULO 2		33
2.	Metodología	34
2.1	Tipo de investigación	35
2.2	Población y muestra	35
2.3	Diseño de investigación.....	35
2.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	36
2.5	Procedimiento	36
2.5.1	Fase 1.....	36
2.5.2	Fase 2.....	36
2.5.3	Fase 3.....	37
2.5.4	Fase 4.....	39
CAPÍTULO 3		40
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	40
3.1	Parámetros de diseño.....	40
3.2	Efectos de las cámaras de aire en la columna explosiva y en las vibraciones	41
CAPÍTULO 4		51
4.	Conclusiones Y Recomendaciones	51
4.1	Conclusiones.....	51

4.2	Recomendaciones.....	52
	BIBLIOGRAFÍA	53

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
URB	Urbanización
USBM	United States Bureau of Mines
OSM	Office of Surface Mining
DIN	Deutsches Institut für Normung
BAI	Blasting Analysis International

SIMBOLOGÍA

m	Metros
mm	Milímetros
H	Altura de banco
L_f	Largo del frente
A	Ancho o profundidad de avance
L	Mínima longitud del taladro
\emptyset	Diámetro del taladro
B	Burden
U	Sobreperforación
T	Taco
C	Capacidad del cucharón de la excavadora
kb	Constante de fórmula de Ash
g/cm^3	Gramos por centímetros cúbicos
E	Espaciamiento entre taladros
P_e	Perforación específica
CC	Carga de columna
ρ_e	Densidad del explosivo
v	Velocidad de oscilación
k	Constante según la capacidad de la roca en transmitir la onda
R	Distancia al sitio de análisis
mm/seg	Milímetros por segundos
AD	Columna de aire
ton/m^3	Toneladas por metros cúbicos
kg/dm^3	Kilogramos por decímetros cúbicos
mlp/m^3	Metros lineales perforados por metros cúbicos
in	inch

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de Ubicación Geográfica.....	13
Figura 1.2 Parámetros de un banco de voladura (EXSA S.A., 2019, p. 176)	16
Figura 1.3 Nomograma para determinar la carga momentánea máxima permitida en voladuras de banco (TAMROCK, 1978)	23
Figura 1.4 Tipos de ondas sísmicas (ETSAC, n.d.)	25
Figura 2.1 Diseño de taladros, donde: H: altura de diseño / U: sobreperforación / HC: altura de carga / ADs: <i>Air deck</i> superior / ADm: <i>Air deck</i> medio / ADi: <i>Air deck</i> inferior.	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Rangos de sobreperforación (EXSA S.A., 2019).....	18
Tabla 1.2 Constante (kb) (EXSA S.A., 2019)	21
Tabla 1.3 Normas internacionales (Pinto Morales & Fuentes Fuentes, 2008)	27
Tabla 1.4 Resumen de los valores indicativos de la norma OSM 817.67 (Corporación OSSO, 2003).....	28
Tabla 1.5 Valores límite de vibraciones (Gonzales, 2018, p. 50).	29
Tabla 2.1 Características técnicas, Nitrato de amonio grado ANFO	37
Tabla 3.1 Parámetros de diseño	40
Tabla 3.2 Relación porcentual del <i>Air deck</i> con respecto a la carga de columna.....	41
Tabla 3.3 Indicadores del desempeño de la voladura	41
Tabla 3.4 Variación porcentual de los indicadores del desempeño de la voladura ...	42
Tabla 3.5 Tamaño de agregado para retacado (Vásquez & Silva, 2017).	50

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La minería es una actividad que aporta al desarrollo de la sociedad e impulsa el crecimiento económico de una nación, ya que facilita en gran medida, la ampliación urbanística, a través de la explotación de materiales de construcción ubicados en canteras.

En el sector Vía a la Costa, ubicado al oeste de la ciudad de Guayaquil - Ecuador, existen alrededor de 29 canteras, de las cuales nueve están bajo la competencia del Municipio de Guayaquil y las restantes son competencia del Ministerio del Ambiente (Alcaldía Guayaquil, 2020). Una gran parte de estas minas a cielo abierto se han instalado hace más de 50 años (Coronel, Rosales, & Garzón, 2016), pero con el pasar del tiempo, lo que alguna vez era una zona minera alejada de la población, se ha convertido en una zona urbanizada. En la actualidad, las áreas mineras del sector se encuentran rodeadas por urbanizaciones residenciales como: Portal del Sol, Bosques de la Costa, Puerto Azul, Colinas del Bosque, entre otras (Dugar Morales, 2018).

La relación de estos dos entornos no es favorable, debido a que existe disconformidad por parte de la ciudadanía con respecto a las actividades diarias de las canteras, específicamente la voladura. El problema que tiene esta acción y que aqueja a los habitantes, son los efectos derivados como el ruido, vibraciones, polvo y en ocasiones *fly rocks* (proyecciones de rocas). De todos los efectos derivados de las voladuras, las vibraciones son las más percibidas por los habitantes de las construcciones vecinas, y son las de mayor preocupación ya que incluso podrían llegar a causar daños en infraestructuras cercanas.

1.1 Descripción del problema

El incremento poblacional y la demanda de viviendas han ocasionado que las empresas inmobiliarias desarrollen proyectos de construcción, que con el pasar de los años se han ido acercando a los centros de extracción de áridos y agregados. La cercanía existente entre las edificaciones y los frentes de las minas genera

malestar en los habitantes de las ciudadelas, debido principalmente a la generación de ruido y polvo producto de las actividades diarias de las voladuras. En la zona de estudio, la voladura se realiza mediante el método convencional, que en la mayoría de los casos es aquel que presenta mayores niveles de vibración con respecto a una voladura controlada (EXSA S.A., 2019).

Analizando el caso de la relación entre la cantera Calizas Huayco y la urbanización Portal al Sol (Coronel, Rosales, & Garzón, 2016), los frentes de explotación se encuentran distanciadas por cuatrocientos metros, esto ocasiona que los efectos por la voladura tengan mayor impacto físico.

El diario El Comercio, en una noticia publicada el 17 de febrero del 2019, titulada “Urbanizaciones de Vía a la Costa convocan a movilización contra actividad de canteras, en Guayaquil”, menciona que los pobladores que conforman la “Federación de Urbanizaciones de la Vía a la Costa”, protestan por las molestias recibidas a causa de las explosiones, además de los daños generados en algunas paredes de sus residencias (El Comercio, 2019).

La serie de eventos relacionados entre la convivencia del sector minero y urbano, han ocasionado que la Municipalidad de Guayaquil intervenga y adquiera facultades que les permitan realizar el cierre de canteras por el bien de la ciudadanía. Siendo así, la Municipalidad amparada en la reforma del 18 de mayo del 2017 mediante la ordenanza “ORDENANZA QUE REGULA LA EXPLOTACIÓN MINERA DE MATERIALES ÁRIDOS, PÉTREOS Y OTROS EN EL CANTÓN GUAYAQUIL, SUSTITUTIVO A LA ORDENANZA QUE REGULA LA EXPLOTACIÓN DE CANTERAS EN EL CANTÓN GUAYAQUIL”, adquirió la competencia de administrar, emitir, regular, controlar y extinguir derechos mineros para la explotación de materiales pétreos y áridos (Dugar Morales, 2018). El requisito que se pide a todas las canteras para mantenerse operativas, es la “tasa de habilitación”, documentación que en su mayoría no adquieren, por lo que el día 2 de enero del 2020, se dio el cierre de 29 canteras que no constaban con la totalidad de la documentación (El Universo, 2020).

1.2 Justificación del problema

El problema radica en la disensión que tienen los habitantes de las ciudadelas pertenecientes al sector Vía a la Costa de la ciudad de Guayaquil, para coexistir con las canteras que se encuentran operando. Por ende, el propósito del presente estudio es facilitar un análisis entre el uso del método convencional de voladura y la implementación de cámaras de aire (*air deck*), para mejorar la práctica de voladura en busca de la disminución de los efectos derivados por las detonaciones. Mediante este análisis, las empresas mineras podrán valorar y elegir ajustarse a un cambio de método, que promueva una mejor relación con la comunidad al disminuir los factores de riesgo físico, permitiendo la coexistencia de la actividad extractiva y de las urbanizaciones.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar la implementación de cámaras de aire, para la disminución de la percepción del impacto negativo generado por la voladura en el entorno de las urbanizaciones vía a la costa.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Determinar los parámetros de diseño de perforación y voladura que tienen influencia en la producción de vibraciones y proyección de rocas, para el conocimiento del impacto de las vibraciones en el entorno.
2. Diseñar una hoja de cálculo con los parámetros necesarios para la optimización de los recursos utilizados en el proceso.
3. Comparar los resultados del método convencional y el método que emplea cámaras de aire, para el conocimiento de la factibilidad de la propuesta.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Área de estudio

El área de estudio se localiza en la provincia del Guayas, cantón Guayaquil, en el Km 12 Vía a la Costa. La zona consta de varias urbanizaciones (Laguna Club, Casa Club, Portal del Sol, Coop. Jardines del Salado, Torres del Salado, Bosques de la Costa, Puerto Azul, Los Girasoles, Villa Nova, Belo Horizonte, Coop. El Crisol, Portofino, Punta Esmeralda, Terra Nostra, Vía al Sol y Colina de Bosque) (Dugar Morales, 2018), y a su vez comparte territorio con las canteras pertenecientes a la cordillera Chongón-Colonche, de la formación San Eduardo. En la zona de estudio, acorde a lo reportado por Pérez (2010), la geología está constituida por una serie de calizas turbidíticas de aguas profundas (calizas clásticas, calcarenitas, calciruditas y calcilitas con chert nodular esporádico).

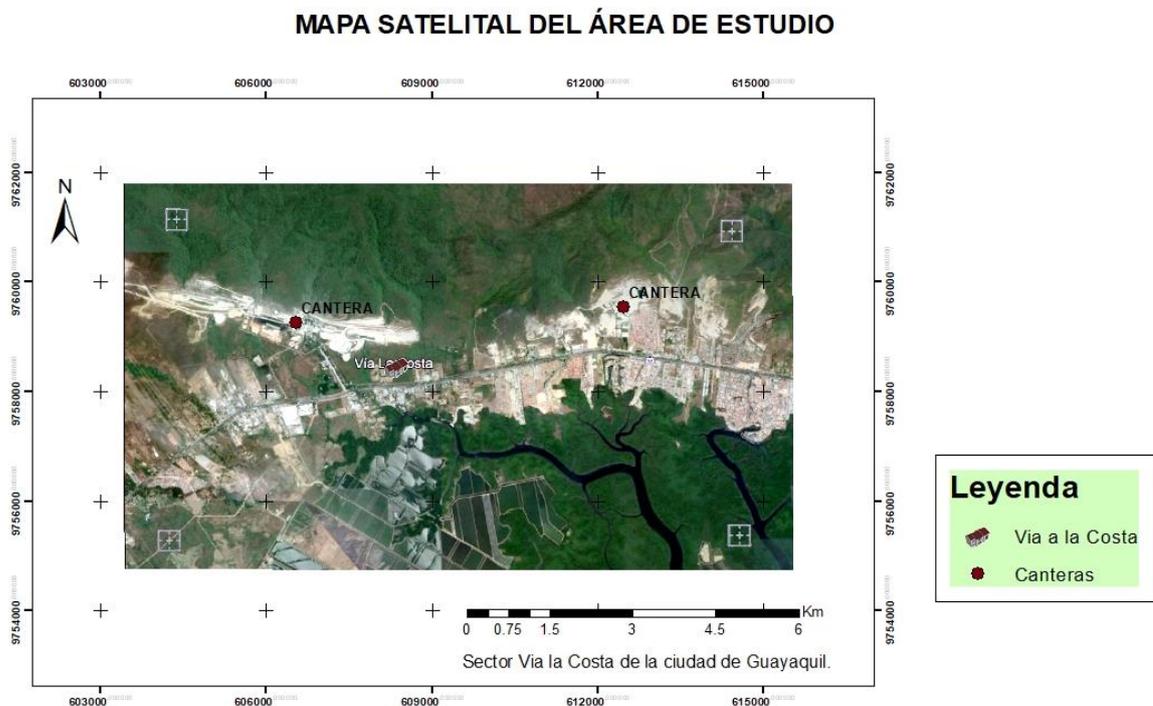


Figura 1.1 Mapa de Ubicación Geográfica

En la Figura 1.1 se puede observar el área de estudio, donde simultáneamente se aprecia la cercanía existente entre las canteras y las ciudadelas que se extienden a lo largo de Vía a la Costa.

1.4.2 Voladuras

El contenido presentado en el apartado 1.4 ha tomado como referencia del Capítulo VI perteneciente al “*Manual Práctico de Voladura*”, EXSA S.A., (2019).

La voladura es un conjunto de perforaciones, denominados barrenos, que son cargados con una cierta cantidad de explosivo para proceder a la detonación, utilizando una secuencia de iniciación con el objetivo de fragmentar a la roca y desplazarla según la conveniencia. Una correcta voladura es aquella que logra ajustarse a los requerimientos operativos de la planta y los efectos derivados la misma no generan afecciones al medio, de esta manera, la voladura en minería tiene dos lugares a darse, a cielo abierto y en subterránea, teniendo características diferentes.

Otro concepto de voladura implica que es un proceso que tiene el fin de fracturar o fragmentar la roca, suelos o instalaciones, empleando explosivos, las mismas pueden ser controladas o no, así mismo a cielo abierto o en subterráneo. En dicho proceso de voladura intervienen diferentes variables, las que se pueden controlar y otras que no (Mercado H., Angel D., 2017).

Voladuras en banco:

Este tipo de voladura se realiza a cielo abierto y mediante la detonación de la agrupación de barrenos verticales o sub verticales, utilizan la cara libre de un frente paralelo al mismo.

La agrupación de barrenos que conforman la voladura se perfora de acuerdo a una malla que fue planificada con anterioridad y se la realiza de acuerdo el fin que tenga la empresa.

Antes de ingresar a los parámetros de voladura es necesario definir ciertos conceptos que se van a emplear, de esta manera para una voladura a cielo abierto se pueden definir los siguientes conceptos:

- **Banco:** Es el lugar que se desea aplicar el proceso de voladura, depende de la planificación establecida y del método de explotación.
- **Altura de banco:** Distancia vertical entre dos bancos contiguos.
- **Angulo del frente:** Angulo que tiene un talud y está definido por dos bancos contiguos.

1.4.2.1 Dimensión de la voladura

La fórmula empleada para la determinación de este parámetro se encuentra constituida por: el área superficial que está delimitada por el largo de frente y el ancho de avance, a su vez por la altura del banco (Austin Powder Company, 2002).

$$L_f * A * H = Volumen Total \quad (1.1)$$

Donde:

L_f: largo del frente (m)

A: ancho (m)

H: altura (m)

1.4.2.2 Parámetros Dimensionales

Entre los principales parámetros dimensionales de la voladura se encuentran los siguientes: diámetro de taladro, longitud de taladro, sobre perforación, longitud de taco, altura de banco, burden, y espaciamiento. A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno:

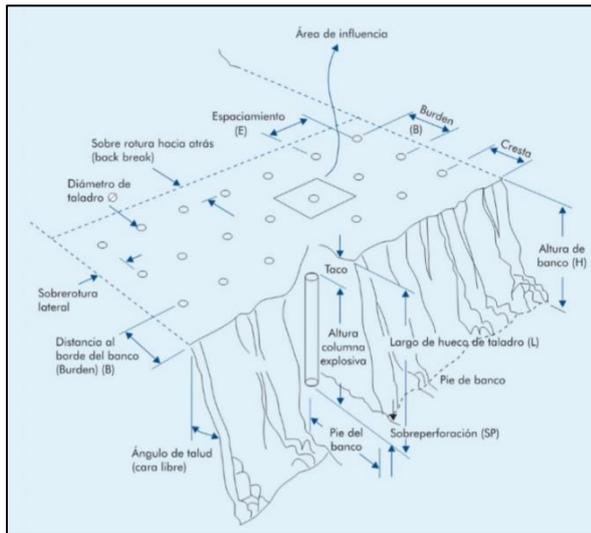


Figura 1.2 Parámetros de un banco de voladura (EXSA S.A., 2019, p. 176)

a) Diámetro del taladro

Para la determinación de un diámetro óptimo se considera: la disponibilidad y aplicabilidad del equipo de perforación en el trabajo; la altura de banco proyectada y la amplitud de las voladuras a realizar; y la distancia límite de avance proyectada para el banco.

Con respecto a realizar un diámetro pequeño, los costos de productividad (tiempo y personal) incrementarán, sin embargo, se obtendrá beneficios como la mejor distribución y consumo específico del explosivo. Mientras que, al tener un aumento del diámetro se mantendrá estable la velocidad de detonación de la carga explosiva, al mismo tiempo habrá un incremento del rendimiento de la perforación y de los equipos de acarreo, disminuyendo el costo global de la voladura (EXSA S.A., 2019).

Los diámetros habituales de bancos de canteras varían entre 50 y 125 mm, en tanto que en la minería por tajos abiertos varían entre 150 a 310 mm y pueden llegar hasta 451 mm. La siguiente fórmula hace referencia al máximo diámetro a optar, la cual depende de la profundidad del taladro y, recíprocamente, la mínima

profundidad a la que puede ser perforado un taladro depende así mismo del diámetro, expresándose de la siguiente manera:

$$L = 2 \phi \quad (1.2)$$

$$\phi = H/4 \quad (1.3)$$

Donde:

L: mínima longitud del taladro (pies).

Ø: diámetro del taladro (pulgadas).

b) Longitud o profundidad de taladro

Este es un factor relevante en cuanto al diámetro, burden y espaciado de la voladura. Otro rasgo que es necesario mencionar es la sobreperforación, esta garantiza una buena rotura y evita que queden lomos o resaltos (toes), que pudiesen afectar al trabajo del equipo de limpieza, por tanto, se utilizara la siguiente fórmula:

$$L = H + 0,3 B \quad (1.4)$$

Donde:

H: altura del banco (m)

B: burden (m)

c) La sobreperforación

Este parámetro suele ser importante en los taladros verticales para mantener la razante del piso, en caso de ser corta se originarán lomos y si es grande causará sobre excavación, que originará un incremento de vibraciones y costos por perforación.

En la Tabla 1.1 se presenta los rangos de la sobreperforación, teniendo en cuenta la resistencia de la roca y el diámetro de taladro:

Tabla 1.1 Rangos de sobreperforación (EXSA S.A., 2019)

Tipo de Roca	Sobreperforación
Blanda a media	De 10 a 11 Ø
Dura a muy dura	12 Ø

$$U = 0,3 B \quad (1.5)$$

Donde:

U: sobreperforación

B: burden (m)

d) Longitud de taco

Es la parte superior del taladro, esta suele ser llenada con los detritos de la perforación, la función principal es contener los gases provenientes de la detonación, por pequeños instantes, evitando que la energía se disipe a la atmósfera y esta pueda atacar a la roca para fragmentarla. Por otra parte, si el taco es insuficiente causaría proyección de fragmentos, caracterización y un fuerte ruido por onda aérea, mientras que, si la dimensión del taco es desmedida, la mayor parte de la energía se dirigirá al fondo del taladro, ocasionando que queden bloques grandes sin fragmentar en la parte superior.

Teniendo en cuenta el burden y la competencia de la roca, para un material como granito el taco puede variar según la fórmula:

$$T = 0.7 B \quad (1.6)$$

En cambio, si existen fisuras, fracturas abiertas, es decir, el material es incompetente, la relación es de 1:

$$T = B \quad (1.7)$$

Donde:

T: taco (m)

B: burden (m)

e) Altura de banco

Se considera como la distancia vertical desde la superficie horizontal superior (cresta) a la inferior (piso). Esta se encuentra directamente relacionada con: el equipo de excavación y carga, el diámetro de perforación, la resistencia de la roca, la estabilidad del talud y de aspectos de seguridad. Se calcula la altura de banco mediante la siguiente fórmula:

$$H = 10 + 0,57 (C - 6) \quad (1.8)$$

Dónde:

C: capacidad del cucharón de la excavadora (m³)

La altura idónea o económica por experiencia, se obtiene mediante el producto de cuatro veces el diámetro en pulgadas, dando como resultado la altura en metros:

$$H (m) = 4 \emptyset \quad (1.9)$$

Donde:

\emptyset : diámetro de taladro (pulgadas)

En otra de las determinaciones prácticas de la altura de banco, menciona que esta deberá ser mayor que el diámetro de la carga explosiva, en otras palabras:

$$H = \frac{\emptyset}{15} \quad (1.10)$$

Dónde:

H: altura de banco (m).

\emptyset : diámetro de la carga explosiva (mm).

Por último, el diámetro máximo de taladro propuesto (en mm), teniendo el valor de la altura de banco, su resultado sería quince veces la altura medida en metros, expresado de la siguiente manera:

$$\varnothing_{m\acute{a}x} = 15 H \quad (1.11)$$

Donde:

\varnothing : diámetro de la carga explosiva (mm).

H: altura de banco (m)

f) Burden

Este parámetro es la distancia desde el pie o eje del taladro a la cara libre perpendicular más cercana. Depende de las siguientes variables: el diámetro de perforación, las propiedades de la roca, altura de banco y las especificaciones del explosivo a emplear. La dimensión del burden en exceso, provocaría que la roca se resista a romper, por lo que los gases saldrían por el collar, en cambio, si el burden es limitado, quedará un remanente de energía suficientemente grande que originará una fuerte proyección de fragmentos de roca y vibraciones (EXSA S.A., 2019). Para designar un valor a este parámetro, empíricamente se tiene la siguiente relación:

$$\varnothing \text{ (pulg)} = B \text{ (m)} \quad (1.12)$$

Según Langefors también es aplicable la relación siguiente:

$$B = 0,046 \varnothing \text{ (mm)} \quad (1.13)$$

g) Fórmula de Ash

En este apartado se presenta una contante, que depende de la clase de roca y del tipo de explosivo:

$$B = \frac{kb * \varnothing}{12} \quad (1.14)$$

Donde:

B: burden.

Ø: diámetro de taladro.

kb: constante, (Tabla 1.2):

Tabla 1.2 Constante (kb) (EXSA S.A., 2019)

Clase de roca	Densidad (g/cm ³)	Clase de roca		
		Blanda	Media	Dura
Baja densidad y potencia	0,8 a 0,9	30	25	20
Densidad y potencia medias	1,0 a 1,2	35	30	25
Alta densidad y potencia	1,2 a 1,6	40	35	30

h) Espaciamiento

Conocida como la distancia que hay entre los taladros de una misma fila, que se suelen disparar con un mismo retardo o con retardos diferentes en la misma fila. Su cálculo se efectúa en base a la longitud del burden, a la secuencia de encendido y el tiempo de retardo entre taladros. Si es pequeño este parámetro se producirá un aumento de trituración y caracterización en la boca del taladro, lomos al pie de la cara libre y bloques de gran tamaño en el tramo del burden. Mientras que para espaciamientos excesivos habrá una fracturación inadecuada, lomos al pie del banco y una nueva cara libre frontal muy irregular.

En caso de contar con voladuras de filas múltiples simultáneas (igual retardo en las que el radio longitud de taladro a burden (L/B) es menor que 4 el espaciado puede calcularse por la fórmula:

$$E = \sqrt{B * L} \quad (1.15)$$

Donde:

B: burden (pies).

L: longitud de taladros (pies).

En caso de presentarse detonadores de retardo el espaciado promedio es de:

$$E = 1,4 B \quad (1.16)$$

i) Perforación específica

La perforación específica es la relación que existe entre los metros lineales perforados con el volumen de roca volada.

$$Pe = \frac{1 + U\%}{B * E} \quad (1.17)$$

Donde:

U%: relación porcentual de la sobreperforación en el taladro

B: burden

E: espaciamiento

j) Carga columna

Es la cantidad de carga explosiva de requerida en el taladro, su cálculo está relacionado con el volumen ocupado por la longitud carga y el producto con la densidad del explosivo.

$$CC = \frac{\pi D^2}{4} (H + U - T) \rho_e \quad (1.18)$$

Dónde:

CC: carga de columna (kg)

D: diámetro del taladro

H: altura de diseño del banco

U: sobreperforación

T: taco

ρ_e : densidad del explosivo

k) Velocidad de oscilación

Una de las fórmulas más utilizadas es de Langefors y Kihlstrom, en el presente caso se menciona la siguiente versión que es adaptada para distancias mayores a 100 metros desde el sitio de voladura a la estructura (TAMROCK, 1978).

$$v = \frac{k * CC}{R^{1.5}} \quad (1.19)$$

Donde:

v: velocidad de oscilación

k: constante que hace referencia a la capacidad de la roca en transmitir la onda

CC: carga explosiva

R: distancia al sitio de análisis

El valor de la constante k esta dado en función de la roca, para roca compacta con mínimas señales de fracturas y cercanas al sitio de voladura, se usa K=400, pero en formaciones rotas, el valor de k está entre 200 y 300.

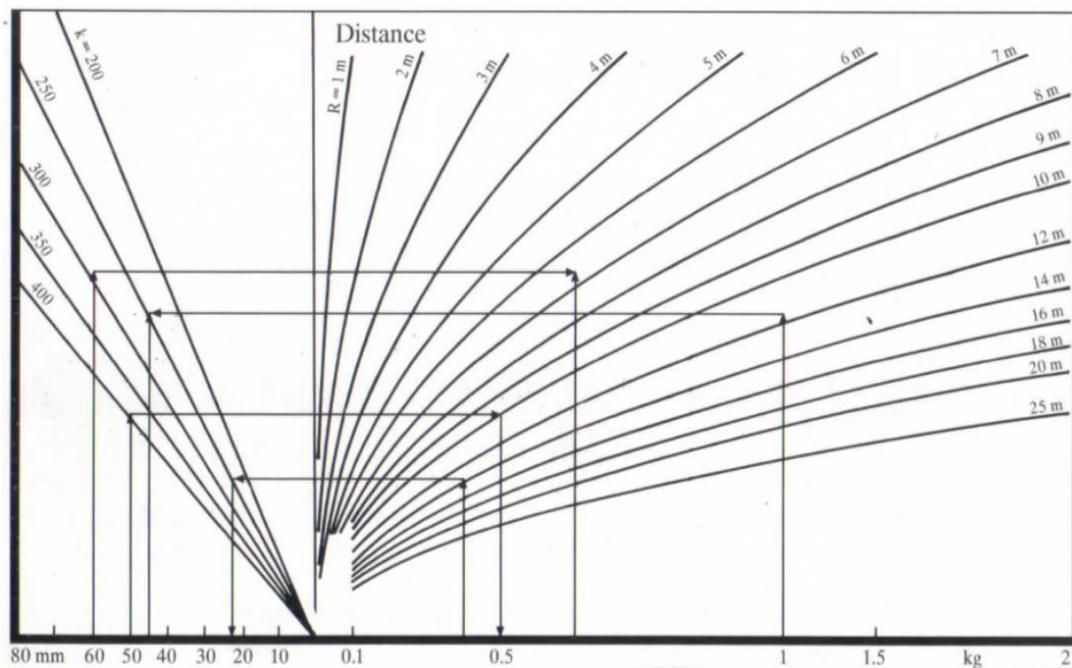


Figura 1.3 Nomograma para determinar la carga momentánea máxima permitida en voladuras de banco (TAMROCK, 1978)

1.4.3 Consecuencias de las voladuras en el entorno.

El siguiente apartado contiene información del documento “*Perforación y voladura de rocas en minería*” (Bernaola, Castilla y Herrera,2013).

Durante el proceso de la voladura existen efectos colaterales, que necesitan ser controlados para evitar daños en los alrededores de la explotación, estos efectos se relacionan con modificaciones del entorno, se clasifican en:

a) *Modificaciones permanentes.*

Las modificaciones permanentes son aquellos efectos que conllevan fragmentación o desplazamiento de las rocas, efectos que se dan por el diseño de la voladura, a continuación, se mencionan los siguiente:

- Degradación de roca circundante.
- Desplazamiento de bloques.
- Compactación del terreno

b) *Modificaciones transitorias.*

Efectos generados por la voladura que desaparecen después de un corto periodo de tiempo, alterando el equilibrio, pero a su vez no produce desplazamientos, estas afecciones pueden ser:

- Vibraciones.
- Onda aérea.
- Proyecciones.

1.4.4 Vibraciones.

Las vibraciones son fenómenos cuyo principio es la transmisión de energía mediante movimientos ondulatorios a través de un medio. Este fenómeno se caracteriza por la fuente que lo emite, en este contexto son generadas por la detonación de la carga explosiva que se encuentra dentro del macizo rocoso.

1.4.4.1 *Ondas sísmicas generadas por voladuras.*

La detonación de una columna explosiva genera gases a una presión y temperatura elevadas. La violenta muestra de presión en las paredes alrededor

de los taladros, lo hace por medio de ondas de deformación a su alrededor. Es una onda de tensión que es soportada por un elemento material y esta dependerá de la distancia que se encuentre con respecto al barreno (Cánovas Carrasco, 2016, pág. 6). No obstante, en este estudio se analizará la propagación de ondas en la zona exterior o elásticas.

Las ondas elásticas se pueden agrupar en dos grupos:

- Ondas internas, estas se propagan en el interior del sólido y son longitudinales, dentro de este grupo de encuentran las ondas P, Y las ondas S.
- Ondas de superficie, estas se propagan únicamente en la superficie del medio, aquí se encuentran las ondas R, Y las ondas L.

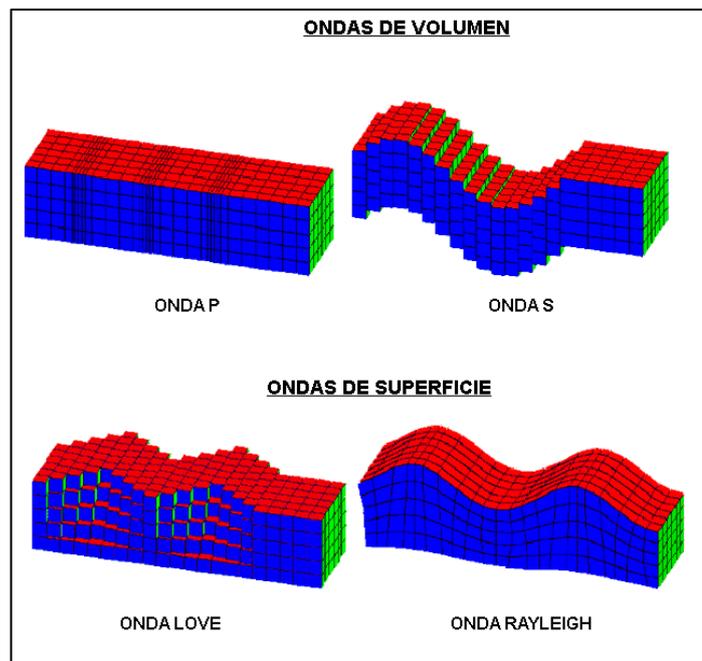


Figura 1.4 Tipos de ondas sísmicas (ETSAC)

1.4.4.2 Parámetros que alteran las vibraciones.

Carga explosiva que detona simultáneamente:

Este factor es muy importante, puesto que la generación de fuertes vibraciones en mayor parte depende de la cantidad de explosivo que se detona al mismo tiempo, y no por cada columna de explosivo, para evitar fuertes vibraciones es recomendable dar un pequeña paula en cuestión de milisegundos.

Grado de confinamiento:

Es fundamental estudiar el grado de confinamiento ya que depende del tipo de roca a la cual se le aplica la voladura, si esta tiene un alto grado de confinamiento las ondas generadas serán de mayor impacto porque la energía liberada se transmite por el macizo rocoso, en cambio cuando tiene un menor grado de confinamiento dicha energía fragmenta la roca y también desplaza a la roca fragmentado, y de esta manera transmite menos energía por el macizo rocoso.

Propiedades del Macizo rocoso:

Otro factor con gran influencia en la generación de vibraciones son las propiedades del macizo rocoso, debido a que no en todas las rocas se transmite de la misma manera las ondas sísmicas, en parte depende de la densidad, ya que, a mayor densidad, más facilidad de propagarse tienen las ondas.

Distancia al lugar de la voladura:

Es obvio que los efectos de las vibraciones y de la voladura se ven mientras más cerca te encuentres de la labor, por lo que se debe tener un diseño cuidadoso de la voladura cuando tienes cerca ciudadelas, fabricas, etc.

1.4.4.3 Posibles soluciones para reducir las vibraciones por las voladuras.

Dentro de las posibles soluciones citadas en el documento “*Perforación y voladura de rocas en minería*”, se mencionan las siguientes acciones:

- Reducir la carga operante:
 - Aumentar el número de detonadores y microrretardos.

- Utilizar explosores secuenciales (con detonadores eléctricos).
- En casos especiales, usar detonadores electrónicos.
- Reducir la carga por barreno:
 - Reducir el diámetro y el número de barrenos por pega.
 - Utilizar cargas espaciadas en los barrenos.
 - Utilizar cargas de diámetro inferior al del barreno. o Reducir la altura de banco.
- Reducir el grado de confinamiento de las cargas:
 - Utilizando barrenos inclinados.
 - Cerrando la malla.
 - Adecuando la secuencia de encendido.
- Crear una discontinuidad entre la estructura a proteger y la voladura.

1.4.4.4 Normas para control de vibraciones

En la actualidad muchos países poseen sus propias normas para el control de vibraciones, la cantidad que existe esta sobre los 20 ejemplares a nivel internacional, sin embargo, las que más empleadas son la americana y la alemana que se fundamentan en las afecciones a los habitantes aledaños a las áreas mineras (Pinto Morales, Fuentes Fuentes, & Hernández, 2013). La siguiente tabla muestra algunas de las normativas internacionales vigentes con mayor relevancia:

Tabla 1.3 Normas internacionales (Pinto Morales & Fuentes Fuentes, 2008)

País	Norma	Fecha
Estados Unidos	USBM Ri8507	1980
	OSM 817.67	1983
Canadá	NPC 2001	1983
Alemania	DIN 4150, Parte 3	1999
R.D. Alemania	Directriz KDT 046	1972
España	UNE 22.381-93	1993

Francia	GFEE	2001
Inglaterra	BS 7385 parte 2	1993
Suecia	SS 460 48 46	1991
Suiza	SS 640 31 2a	1992

1.4.4.5 Norma americana USBM y OSM

La oficina de minas de los Estados Unidos (USBM), con el propósito de indicar los niveles seguros de vibración para las residencias, desarrollo un gráfico en relación a la velocidad y desplazamiento (Pinto Morales, Fuentes Fuentes, & Hernández, 2013).

**Tabla 1.4 Resumen de los valores indicativos de la norma OSM 817.67
(Corporación OSSO, 2003)**

Campo de aplicación	Vibraciones en el suelo producidas por voladuras en minas de carbón.
VARIABLES medidas	Velocidad de partícula pico [mm/seg] en cada componente o velocidad resultante pico [mm/seg] del arreglo tridimensional de sensores.
Valores indicativos	25.4 mm/seg a distancias entre 100 y 1500 m y 19.0 mm/seg para distancias superiores.
Sensores utilizados	Sensores de tres componentes que registren velocidad.
Debilidades	No es autosuficiente, necesita de la USBM RI8507 cuando se necesite utilizar la frecuencia en el análisis.

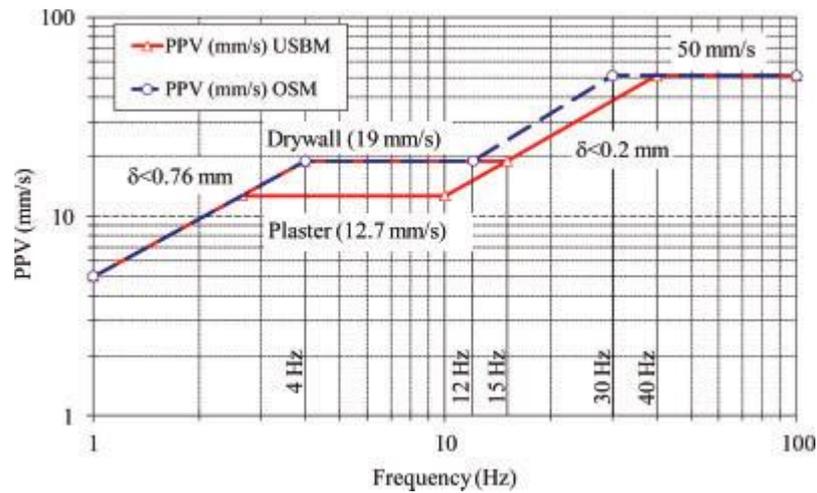


Gráfico 1.1 Criterios de límite de seguridad USBM y OSM contra vibraciones (Sayed-Ahmed, 2013)

1.4.4.6 Norma española UNE 22.381-93

Es una normativa española que determina los límites permisibles de vibración en consecuencia de las voladuras, relacionando con el tipo de estructura.

Según la normativa estas estructuras pueden clasificarse en:

- Grupo 1: Edificios y almacenes, hechos por hormigos armado o metal.
- Grupo 2: Viviendas, oficinas, centros comerciales, museos que no presente sensibilidad a las vibraciones.
- Grupo 3: museos o estructuras arqueológicas que presenten sensibilidad a las vibraciones.

Tabla 1.5 Valores límite de vibraciones (Gonzales, 2018, p. 50).

Valores límites del criterio de prevención de daños UNE 22.381-93
--

Valores límite del criterio	Frecuencia (Hz)		
	2-15	15-75	>75
	<i>Velocidad (mm/s)</i>	<i>Desplazamiento (m)</i>	<i>Velocidad (mm/s)</i>
Grupo 1	20	0.212	100
Grupo 2	6	0.095	45
Grupo 3	4	0.042	20

En los tramos de frecuencia comprendida entre 15 y 75 Hz, se podrá calcular la velocidad equivalente, v, a través de la ecuación: $v = 2 \cdot f \cdot d$, siendo f: frecuencia; d: desplazamiento indicado en la tabla.

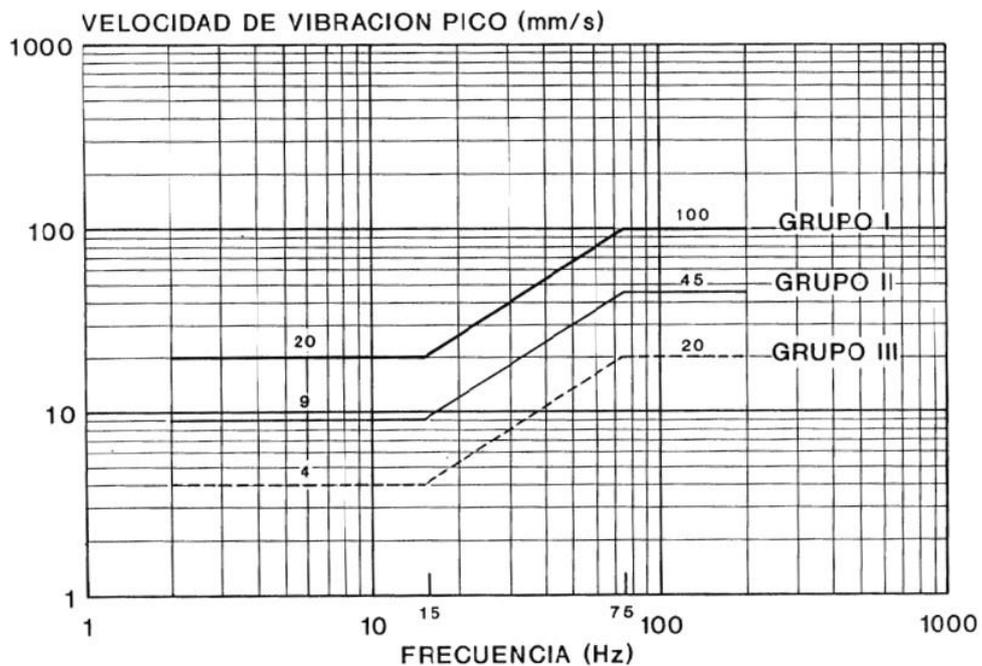


Gráfico 1.2 Criterio de prevención de daños (Gonzales, 2018)

1.4.5 Cámaras de aire.

Las cámaras de aire es una técnica que se está utilizando en la actualidad dado a los beneficios que trae consigo, entre ellos destaca la optimización de los costos por perforación y voladura, en vista que disminuye la sobre perforación y al mismo tiempo la columna explosiva. Para el cálculo de la columna de aire dentro del taladro, se utiliza la siguiente expresión:

$$AD = 4 * \emptyset * 0.0254 \quad (1.20)$$

Donde:

AD: columna de aire (m)

\emptyset : diámetro (pulgadas)

1.4.5.1 La teoría del Air-deck.

En 1940 a los científicos rusos se les ocurrió que la eficiencia de la voladura podría mejorar si las cargas explosivas se encuentran espaciadas por aire. En 1970 la investigación rusa fue comprobada por los trabajos de Australia y Estados Unidos. En los estudios se vio que la presión que ejerce el explosivo es superior al que la roca necesita, aplastándola y generando fragmentos muy pequeños. Una gran parte de la energía de la explosión es improductiva y se la ve en áreas cercanas a las cargas. Por consiguiente, introdujeron espacios de aire en la columna explosiva para que se generen ondas de tensión secundarias, incrementando el tiempo de acción y la generación de grietas (Quarry Management, 1997).

1.4.5.2 Uso de cámaras de aire para reducción de vibraciones.

Se realizaron pruebas a escala total por *Blasting Analysis International, Inc.* (BAI) para establecer el funcionamiento del sistema, tuvieron éxitos en sus pruebas y a su vez mejoraron los parámetros de las condiciones del macizo rocoso, dentro de sus resultados han mostrado la reducción de la sobre perforación, reducción de las vibraciones en un 33%, el consumo de explosivo bajó entre un 16 y 25%, mejorando la fragmentación en un 25% (Chiappetta, 2004).

De esta manera las cámaras de aire cumplen una función importante en la reducción de vibraciones, esto se debe a que se está reduciendo la carga explosiva por barrenos en cada perforación de la malla.

1.4.5.3 Taponex

Accesorio creado para generar cámaras de aire en una perforación, fabricado en plástico de alta resistencia (Polietileno), permitiéndole ser auto soportable y no necesita de aire comprimido (Perez, 2010).

El Taponex está diseñado para crear ondas de Tensión a través de las cámaras de aire, que actúan en el macizo rocoso, de esta manera dando origen a una voladura de tensión. Este producto puede sostener con total seguridad columnas de explosivos, además puede sellar los taladros, y así evitar contaminación entre el taco y el explosivo. Las cámaras que se forman con el taponex, aportan milisegundos de duración para que se distribuya la energía, lo que favorece en la fragmentación de la roca. Además, el uso de este implemento minimiza la probabilidad de “*Fly Rocks*”, debido a que, la carga de la columna explosiva se reduce.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

El Gráfico 2.1 corresponde a la metodología y describe cada una de las fases que se empleó durante el proyecto.

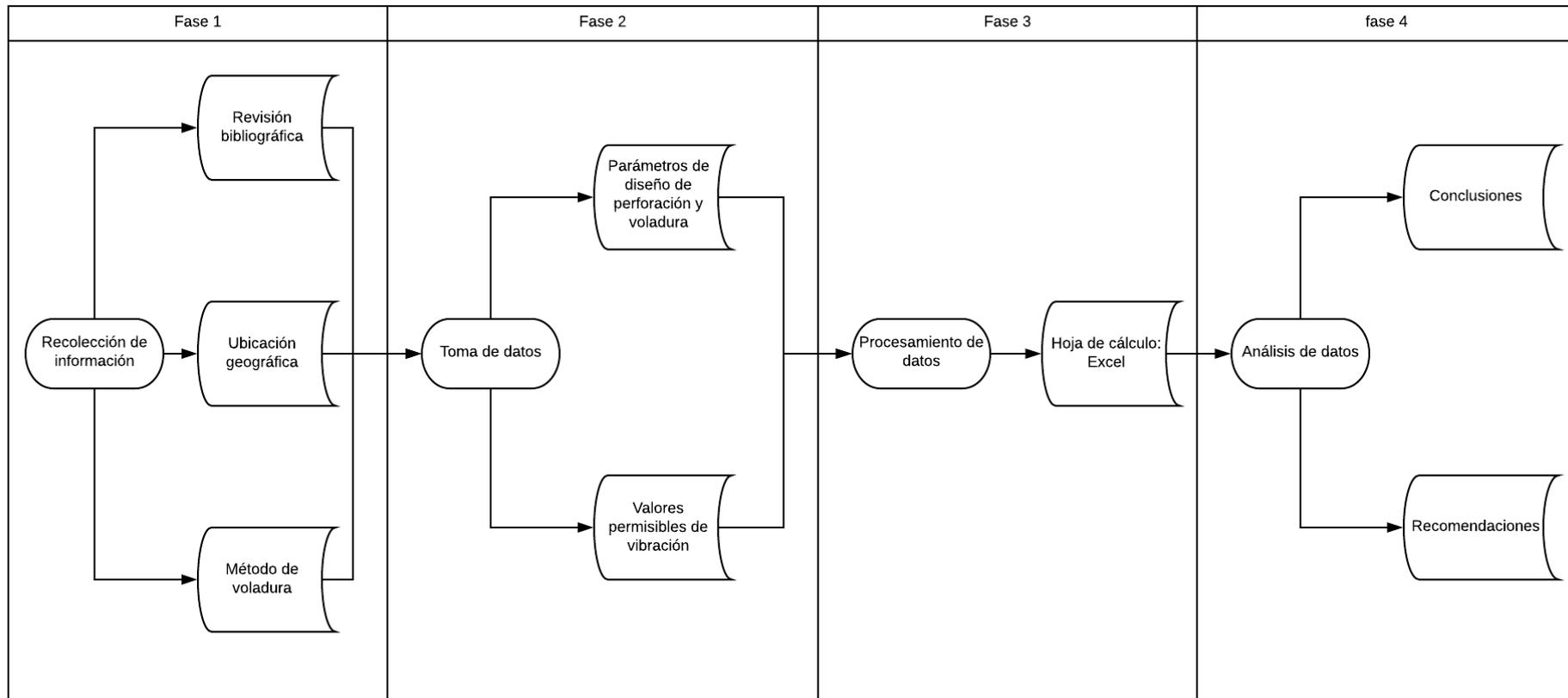


Gráfico 2.1 Metodología de investigación.

2.1 Tipo de investigación

Con respecto a los objetivos de investigación, esta sección es de tipo correlacional, donde se estableció una relación entre el diseño del taladro, con el método cámaras de aire y el método convencional. Dicho de otra manera, se relacionaron las variables dependientes (taco, espaciamento, burden, sobreperforación, columna *Air deck*, perforación específica, carga de columna, consumo específico, velocidad de oscilación) e independientes (diámetro de taladro).

2.2 Población y muestra

La zona de estudio para la presente investigación se limitó al sector Vía a la Costa, donde se encuentran alrededor de 16 zonas residenciales de acuerdo con Dugar Morales (2018) y 29 canteras (El Universo, 2020). La muestra que se analizó fue el escenario correspondiente a la coexistencia de la urbanización Portal al Sol y la cantera Calizas Huayco, teniendo en cuenta que según información bibliográfica es la situación más crítica.

2.3 Diseño de investigación

La investigación fue tipo no experimental-transversal correlacional, considerando que existe una relación en cadena con más de tres variables como lo son: taco, espaciamento, burden, sobreperforación, columna *Air deck*, perforación específica, carga de columna, consumo específico, velocidad de oscilación y diámetro de taladro.

Según Hernández Roberto (2014), los estudios correlacionales tienen como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en una muestra o contexto en particular. En ocasiones sólo se analiza la relación entre dos variables, pero con frecuencia se ubican en el estudio vínculos entre tres, cuatro o más variables.

2.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica de recolección de información se realizó mediante investigación bibliográfica, donde se abarcó mayormente de información secundaria; utilizando libros, manuales, artículos, Blogger, y revistas. En cuanto, a los instrumentos se empleó Microsoft Excel (2016) para insertar ecuaciones con el objetivo de obtener valores que fueron correlacionados y graficados.

2.5 Procedimiento

2.5.1 Fase 1

En la recolección de información se recopiló manuales de “Perforación y Voladura”, informes de estudios relacionados al “*Air deck*”, artículos de revistas con información referente a las vibraciones, documentos para la obtención de tesis de grado y maestría de diferentes instituciones, entre otros.

2.5.2 Fase 2

Para el cálculo de las vibraciones se definieron los parámetros de diseño de perforación y voladura. El análisis se hizo con respecto a un solo taladro de perforación, perteneciente a una malla cuadrada, utilizando cuatro diámetros diferentes (3”, 3.5”, 4” y 4.5”), para una altura de banco fija de 12 metros. A continuación, se detallará las ecuaciones y valores utilizados:

- El burden se calculó utilizando la ecuación (1.12).
- El espaciamiento fue igual al burden, puesto que el análisis se planteó tomando como referencia una malla cuadrada.
- La sobreperforación está en base a la ecuación (1.5).
- Para determinar el taco, se utilizó la expresión (1.6), que muestra una relación del 70% con respecto al burden, sin embargo, para el estudio de caso se delimitó entre el 60% y 80%.
- En la columna de aire, el cálculo se efectuó según la expresión (1.20), la misma que se aplicó de manera indiferente a su ubicación dentro del taladro, ya sea arriba, abajo o en medio.

- La densidad de la roca caliza, perteneciente a la formación San Eduardo, tiene un valor de 2,3 ton/m³ (Ordoñez Mejía, Ramirez Torres, & Proaño Cadena, 2009), el mismo que se utilizó para el presente estudio.
- El explosivo referenciado en el cálculo posee una densidad de 0.8 kg/dm³.

Tabla 2.1 Características técnicas, Nitrato de amonio grado ANFO

Fuente: <https://n9.cl/t9in>

Características técnicas	Nitrato de amonio grado ANFO
Pureza	98.5%MIN
Humedad	0.3% MAX
Ph (solución del 10%)	4.5 MIN
Insoluble en agua	0.8% MAX
Densidad aparente	0.72 – 0.80 G/CM ³
Absorción de petróleo	8% MIN
Granulometría (1mm – 3mm)	90% MIN

- La perforación específica se calculó mediante la expresión (1.17).
- El volumen que produce un taladro está dado de la división de la longitud del barreno (presente en la ecuación (1.4)) entre la perforación específica.

2.5.3 Fase 3

Después de haber calculado los parámetros básicos de diseño de perforación y voladura, se procedió con el cálculo de los siguientes indicadores; carga de columna, consumo específico y velocidad de oscilación; que se correlacionaron para la creación de gráficas.

- La ecuación (1.18) da referencia a la carga de columna, con la cual se realizaron los cálculos. En este apartado se consideraron cuatro escenarios con respecto a la longitud de carga:
 1. Longitud del taladro menos la sobreperforación y el taco.
 2. A la longitud resultante anterior restarle la longitud del *Air deck* de arriba.

3. Concatenada con la longitud anterior minorar la longitud del *Air deck* de en medio.
4. Disminuyendo a la longitud resultante anterior, se resta la longitud de *Air deck* de abajo.

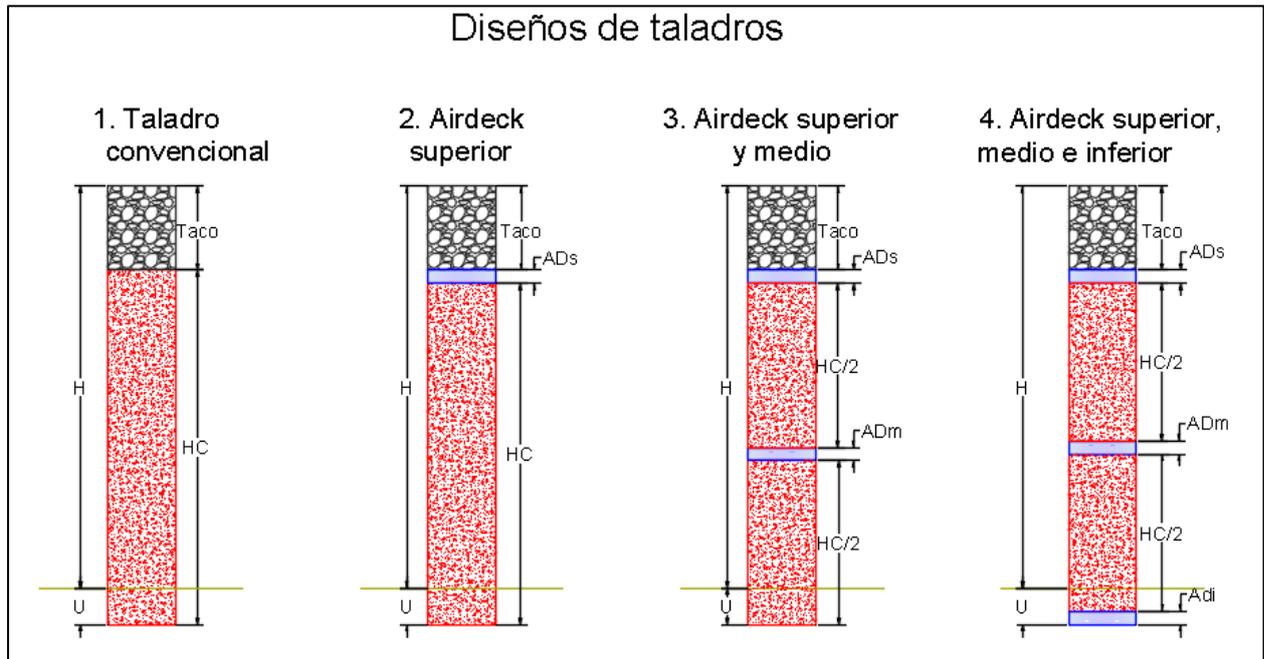


Figura 2.1 Diseño de taladros, donde: H: altura de diseño / U: sobreperforación / HC: altura de carga / ADs: *Air deck* superior / ADm: *Air deck* medio / ADi: *Air deck* inferior.

Fuente: Autores 2020

- El consumo específico se cuantificó mediante la razón entre la carga de columna y el volumen que produce un taladro.
- La vibración o velocidad de oscilación se determinó a través de la fórmula (1.19), considerando la distancia de análisis entre el frente de explotación y la infraestructura más cercana (un valor de 400 m) y un valor de $K=300$.
- Luego se realizó una gráfica que relacionó la *Carga de Columna en función Consumo Específico*.
- También otro gráfico con relación a la *Velocidad de Oscilación vs Consumo Específico*.

Es merced mencionar, que todas las operaciones se desarrollaron dentro de una Hoja de cálculo en Excel.

2.5.4 Fase 4

Para el análisis de datos se llevó a cabo mediante las gráficas elaboradas en la fase anterior. Es necesario recalcar que cada gráfica está superpuesta con los cuatro diámetros propuestos.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el cálculo de la velocidad de oscilación se consideró una distancia de cuatrocientos metros, correspondiente a la separación entre la cantera Calizas Huayco S.A. y la infraestructura más cercana de la urbanización Portal al Sol. Este dato está relacionado con la situación más crítica de la coexistencia entre las áreas mineras y zonas residenciales del sector Vía a la Costa. Es necesario recalcar que sólo se analizó este caso, debido a que es la distancia más corta desde los frentes de explotación hasta las infraestructuras más cercanas que se presenta en el sector.

3.1 Parámetros de diseño

Como se explicó en la metodología, este trabajo se analizó las vibraciones por perforación, en cuatro diámetros diferentes, con una altura de banco fija. El diseño de los parámetros se realizó para una malla cuadrada.

Tabla 3.1 Parámetros de diseño

Fuente: Autores 2020

Parámetros	Diámetro 3"	Diámetro 3.5"	Diámetro 4"	Diámetro 4.5"	Unidades
Diámetro	3.0	3.5	4.0	4.5	pulgadas
Burden	3.0	3.5	4.0	4.5	metros
Espaciamiento	3.0	3.5	4.0	4.5	metros
Sobreperforación	0.9	1.1	1.2	1.4	metros
Taco	2.4	2.5	2.4	2.7	metros
<i>Air deck</i> arriba	0.3	0.4	0.4	0.5	metros
<i>Air deck</i> medio	0.3	0.4	0.4	0.5	metros
<i>Air deck</i> abajo	0.3	0.4	0.4	0.5	metros
Altura banco	12.0	12.0	12.0	12.0	metros
Densidad roca	2.3	2.3	2.3	2.3	ton/m ³
Densidad del explosivo	0.8	0.8	0.8	0.8	kg/dm ³
Perforación específica	0.119	0.088	0.068	0.054	mlp/m ³
Volumen arrancado	108.5	148.0	193.6	245.5	m ³

En la Tabla 3.1, podemos observar los parámetros de diseño de la perforación. Es importante mencionar que estos datos se correlacionan, es decir, dependen uno del otro.

Tabla 3.2 Relación porcentual del *Air deck* con respecto a la carga de columna

Fuente: Autores 2020

Diseño	Diámetros			
	3"	3.5"	4"	4.5"
<i>Air deck arriba</i>	3%	3%	4%	4%
<i>Air deck medio</i>	6%	7%	8%	9%
<i>Air deck abajo</i>	9%	11%	12%	14%

La Tabla 3.2 muestra la relación porcentual que existe entre el espacio que ocupa la cámara de aire con respecto la carga de columna (100%), podemos ver que a medida que se añade más cámaras de aire su porcentaje también. La explicación gráfica se muestra en la Figura 2.1, porque al añadir cámaras de aire arriba, en la mitad y abajo, los espacios libres dejados por los *Air decks* son insignificantes con respecto a la carga de columna, esto se realiza para precautelar el consumo específico necesario para obtener una buena fragmentación de roca.

3.2 Efectos de las cámaras de aire en la columna explosiva y en las vibraciones

Tabla 3.3 Indicadores del desempeño de la voladura

Fuente: Autores 2020

	Ø	Carga Columna CC (Kg)	Consumo Específico CE (Kg/m3)	Velocidad de Oscilación (mm/seg)
Convencional	3"	38.3	0.353	1.44
<i>Air deck arriba</i>		37.2	0.343	1.39
<i>Air deck medio</i>		36.1	0.332	0.68
<i>Air deck abajo</i>		35.0	0.322	0.66
Convencional	3.5"	52.6	0.356	1.97
<i>Air deck arriba</i>		50.8	0.344	1.91

<i>Air deck</i> medio		49.1	0.332	0.92
<i>Air deck</i> abajo		47.3	0.320	0.89
Convencional	4"	70.0	0.362	2.63
<i>Air deck</i> arriba		67.4	0.348	2.53
<i>Air deck</i> medio		64.7	0.334	1.21
<i>Air deck</i> abajo		62.1	0.321	1.16
Convencional	4.5"	87.4	0.356	3.28
<i>Air deck</i> arriba		83.6	0.341	3.14
<i>Air deck</i> medio		79.9	0.325	1.50
<i>Air deck</i> abajo		76.1	0.310	1.43

La Tabla 3.3 representa los valores obtenidos de velocidad de oscilación, con relación a la carga de columna y el consumo específico. Los valores obtenidos fueron utilizados para comparar cada caso por medio de gráficas y determinar que taladros no cumplen con la normativa y se encuentran dentro de los límites de percepción, además facilitan apreciar el comportamiento de la vibración con la inserción de las cámaras de aire.

Tabla 3.4 Variación porcentual de los indicadores del desempeño de la voladura

Fuente: Autores: 2020

	Diámetro	% Carga columna	% Consumo específico	% Vibración
<i>Convencional</i>	3"	100%	100%	100%
<i>Air Deck</i> arriba		97%	97%	97%
<i>Air Deck</i> medio		94%	94%	47%
<i>Air Deck</i> abajo		91%	91%	46%
<i>Convencional</i>	3.5"	100%	100%	100%
<i>Air Deck</i> arriba		97%	97%	97%
<i>Air Deck</i> medio		93%	93%	47%
<i>Air Deck</i> abajo		90%	90%	45%
<i>Convencional</i>	4"	100%	100%	100%
<i>Air Deck</i> arriba		96%	96%	96%
<i>Air Deck</i> medio		92%	92%	46%
<i>Air Deck</i> abajo		89%	89%	44%
<i>Convencional</i>	4.5"	100%	100%	100%
<i>Air Deck</i> arriba		96%	96%	96%

<i>Air Deck medio</i>		91%	91%	46%
<i>Air Deck abajo</i>		87%	87%	44%

La Tabla 3.4 indica la como varían los parámetros de vibración al agregar las cámaras de aire, se muestra en forma porcentual el cambio que existe con respecto al taladro tradicional. La reducción más significativa en las vibraciones se presente con la implementación de la cámara de aire en la mitad.

De acuerdo a la Tabla 3.3 que presenta los valores de las vibraciones por taladro calculados y haciendo uso de la Tabla 1.4 correspondiente a la normativa americana, se determinó que en ningún escenario planteado se supera los 25.4 mm/seg, que es el límite permitido por la normativa OSM 817.67 para distancias entre 100 y 1500 metros.

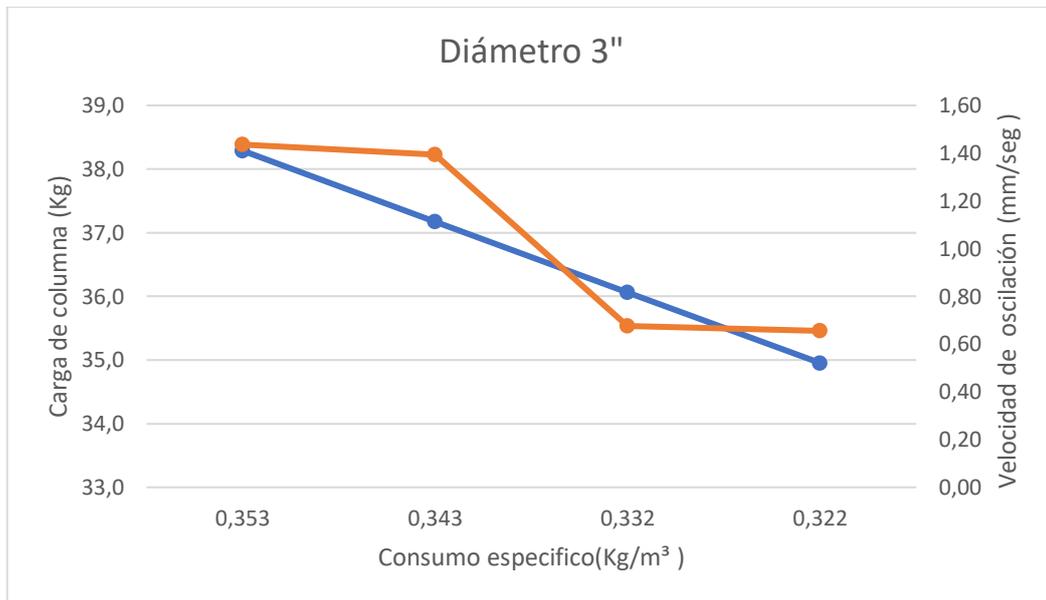


Gráfico 3.1 Comparación del consumo específico, carga de columna y velocidad de oscilación aplicado a un diámetro de 3"

Fuente: Autores 2020

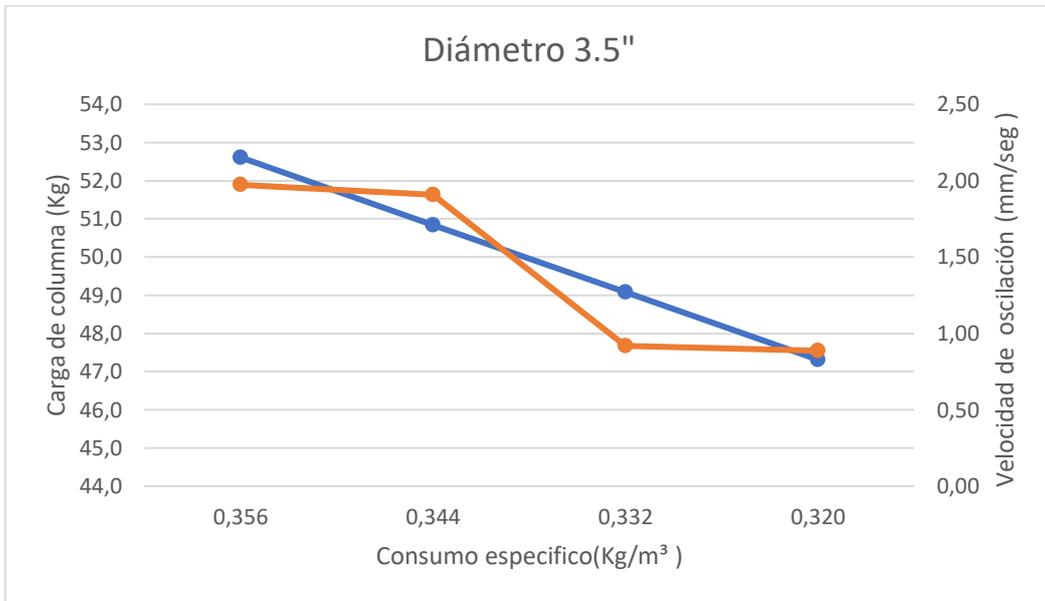


Gráfico 3.2 Comparación del consumo específico, carga de columna y velocidad de oscilación aplicado a un diámetro de 3.5"

Fuente: Autores 2020

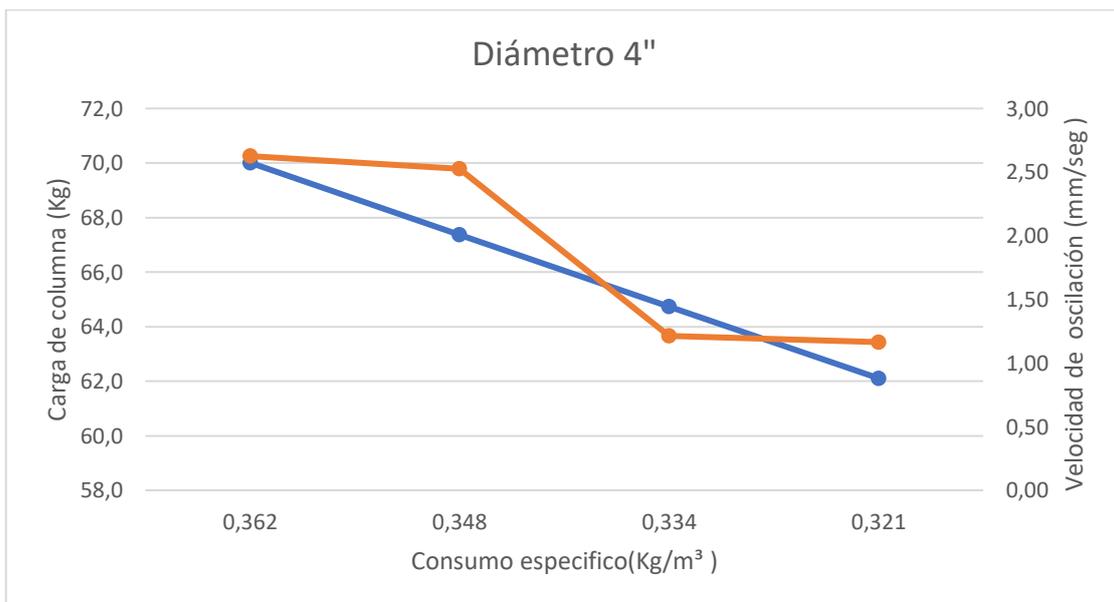


Gráfico 3.3 Comparación del consumo específico, carga de columna y velocidad de oscilación aplicado a un diámetro de 4"

Fuente: Autores 2020

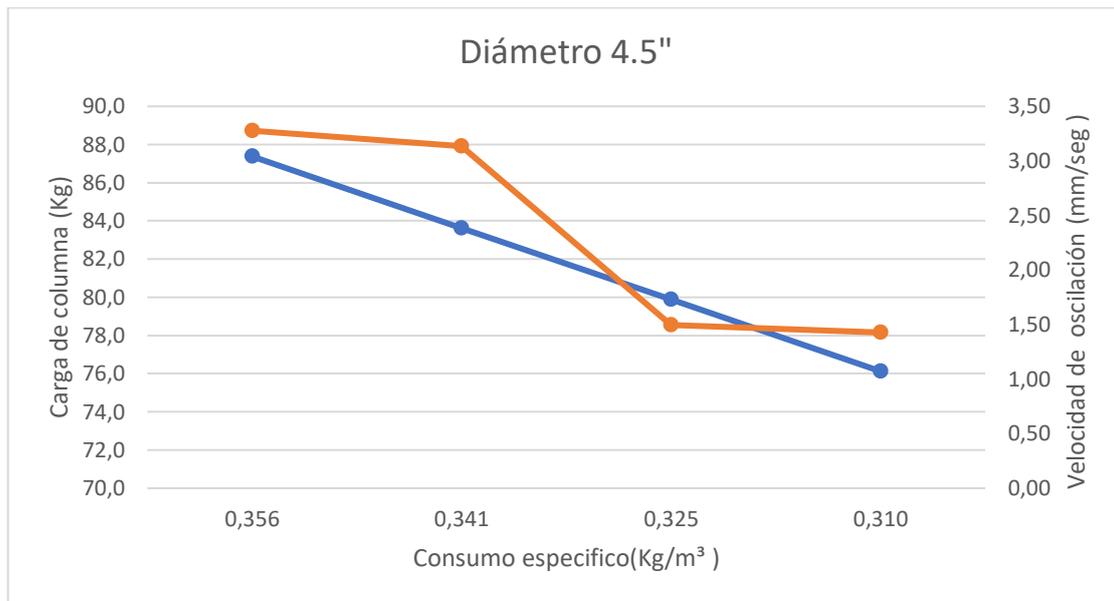


Gráfico 3.4 Comparación del consumo específico, carga de columna y velocidad de oscilación aplicado a un diámetro de 4.5”

Fuente: Autores 2020

En los Gráfico 3.1, Gráfico 3.2, Gráfico 3.3, Gráfico 3.4 se muestra una comparación del consumo específico, carga de columna y velocidad de oscilación para cada diámetro. La recta azul indica una relación directamente proporcional entre el consumo específico y la carga de columna. Por otra parte, la recta naranja no presenta un comportamiento lineal, siendo evidente un salto abrupto en la mitad de la gráfica, producto de la formación de dos columnas de carga. A continuación, se detallará cada diseño de taladro:

- ❖ El taladro convencional presenta la columna explosiva con mayor dimensión, acompañado de los valores más altos de vibraciones y uso de explosivo.
- ❖ La implementación de la columna de aire en cada caso aportó a la disminución en los indicadores del desempeño de la voladura mostrados en la Tabla 3.3.

- ❖ El *Air deck* en la parte superior disminuyó el valor de las vibraciones y el consumo específico de explosivo entre un 3 y 4%.
- ❖ Al añadir una cámara de aire en el centro del taladro anterior se formaron dos columnas de carga. Por tanto, es necesario considerar el uso de dos iniciadores. Esta combinación redujo considerablemente las vibraciones alrededor del 50%.
- ❖ Con la adición de una tercera columna de aire en la parte inferior, se mantienen las dos columnas de carga, pero su dimensión disminuye. Los efectos que proporciona son similares al diseño anterior, pero este facilita que la energía se dirija al fondo y actúe horizontalmente para la fragmentación del pie del banco.

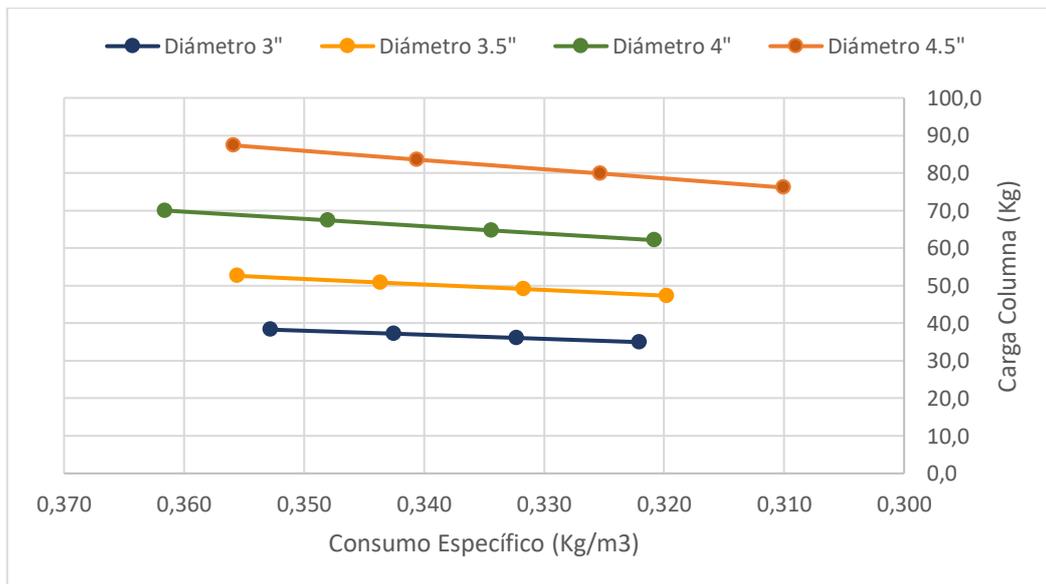


Gráfico 3.5 Carga de Columna vs Consumo Específico

Fuente: Autores 2020

El Gráfico 3.5 muestra las rectas del consumo específico en relación a la carga explosiva, para los cuatro diámetros. La correlación entre estos dos indicadores es de forma lineal, y la pendiente representa la carga explosiva que se retiró para agregar el *Air deck*, ocasionando una variación mínima. Esto se debe a que la carga

de columna no puede decrecer significativamente, porque provocaría falencias en la voladura o una mala fragmentación. La carga específica idónea que se utilizó como referencia para obtener una correcta fragmentación debe superar los 0,32 kilogramos de explosivo por metro cúbico (Vásquez & Silva, 2017). Para una altura de banco de 12 metros se logró identificar que todos los diámetros propuestos cumplieron con una carga específica adecuada para una buena fragmentación de roca.

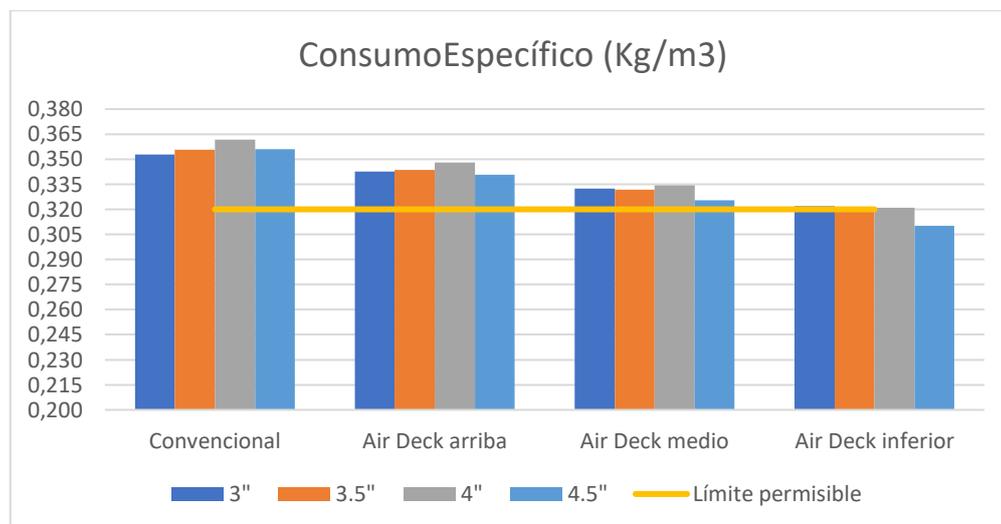


Gráfico 3.6 Diagrama de barras del consumo específico

Fuente: Autores 2020

En el Gráfico 3.6 el diagrama de barras representa el consumo específico para los diferentes diámetros y diseños de taladro, en donde se evidenció que el taladro de 4.5" con air deck inferior tiene un consumo específico de 0.31 Kg de explosivo, que de acuerdo al inciso anterior no lograría una buena fragmentación, sin embargo, el valor obtenido se aproxima al consumo específico idóneo, y es por esto que no se ha descartado a este diseño de taladro.

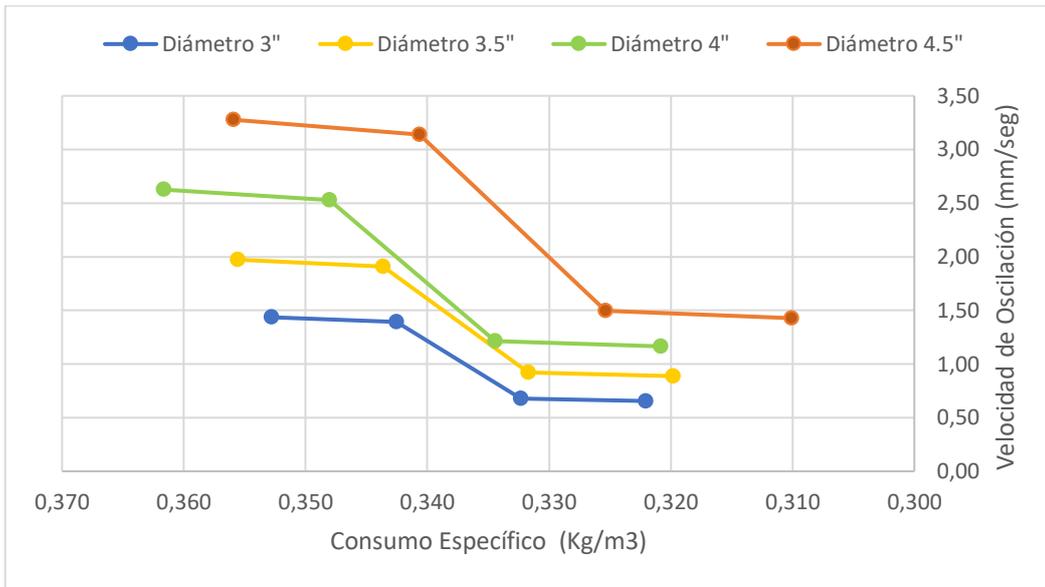


Gráfico 3.7 Velocidad de Oscilación vs Consumo Específico

Fuente: Autores 2020

En el Gráfico 3.7 se observa la relación entre el consumo específico y la velocidad de oscilación. Al aumentar los diámetros de taladro se generó un incremento en la carga de columna y, por ende, en la vibración.

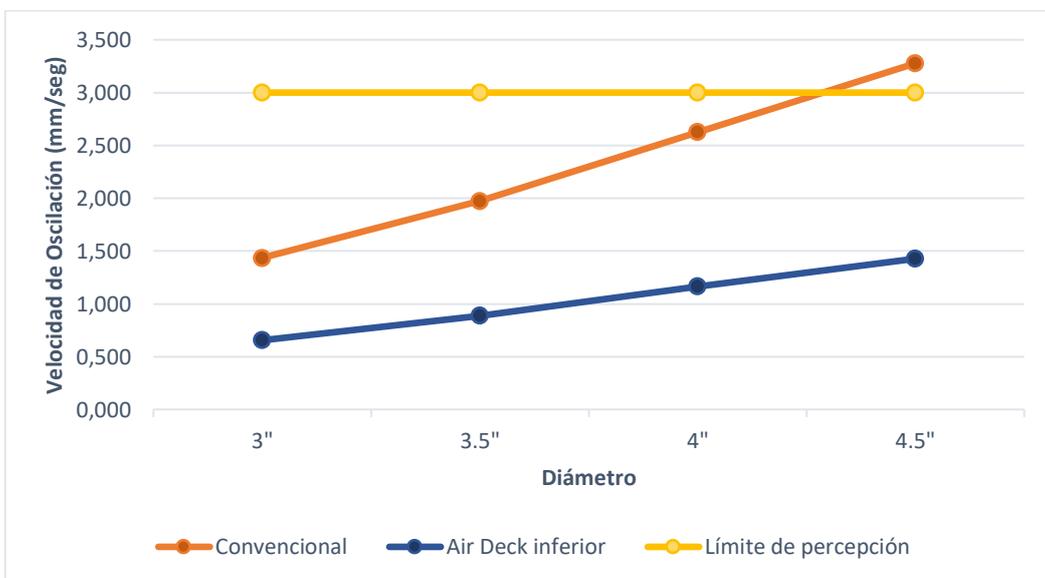


Gráfico 3.8 Comparación de la velocidad de oscilación entre el método convencional y el

Air deck inferior.

Fuente: Autores 2020

En el Gráfico 3.8 se comparó las velocidades de oscilación del método convencional y el método con air deck, con respecto al límite de percepción por parte de los habitantes aledaños al sector minero. El valor mínimo de percepción fue delimitado en 3 mm/seg, dato que según la normativa UNE 22.381 93 no provocan daños en las infraestructuras, sin embargo, al alcanzar este valor existen quejas por parte de los habitantes, ya que la detonación de cada taladro genera malestar. Por lo antes expuesto, se ha determinado que el taladro convencional con 4.5" supera los 3 mm/seg, por lo que no se recomienda trabajar con este taladro, debido a que, significaría inconvenientes entre la cantera y las urbanizaciones. En contraste, al hacer uso del método cámaras de aire, se obtuvo una reducción mayor al 50% en las vibraciones producidas con respecto a este taladro, lo cual permitiría trabajar sin inconvenientes a la cantera.

Para controlar la proyección de rocas, se consideró en la secuencia de encendido, el uso de retardo entre barrenos, puesto que la mayor parte de la energía es ocupada en la fragmentación de la roca. El tiempo de retardo recomendado en este caso de estudio fue de 50 a 100 milisegundos entre cada hilera, valor que dependió de cada espaciamiento para su respectivo escenario, y en añadidura cada barreno tendría que contar con un retardo de 5 milisegundos. Al mismo tiempo, es preciso ajustar estos tiempos según el número de taladros de diseño por hilera definidos en la malla de perforación, con el fin de que la diferencia entre un barreno y el más próximo de la siguiente hilera no sea tan grande (Cornejo Alvarez, 1971).

En relación al párrafo anterior, también fue necesario escoger un tamaño adecuado para el material de retacado, puesto que es de suma importancia contener la energía generada por la voladura para evitar los *fly rocks*. Para ello, se hizo uso de la siguiente tabla:

Tabla 3.5 Tamaño de agregado para retacado (Vásquez & Silva, 2017).

AGREGADO PARA EL RETACADO		
Diámetro Perforación (in)	Tamaño de partícula (mm)	N.º de tamaño ASTM-C33
3.0"	6.4 - 9.5	89
4.0"	9.5	8
4.5"	9.5 - 12.7	7

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- La implementación de cámaras de aire disminuye los valores de velocidad de oscilación en más del 50% con respecto al método convencional. Esta significativa reducción en las vibraciones es esencial para evitar la percepción de los habitantes pertenecientes a las urbanizaciones cercanas.
- Los *fly rocks* se controlaron con la construcción del taco usando una altura del 60 al 80% el valor del burden, evitando la disminución de la carga específica. El particulado a agregar dentro del taco se midió a partir del diámetro establecido por taladro, los valores fueron de 6.4 a 9.5 mm para un diámetro de 3" y 3.5", y 9.5 mm para un diámetro de 4" y 4.5"; permitiendo contener eficientemente la energía de la voladura y evitar los *fly rocks*.
- El uso de la herramienta Microsoft Excel permitió optimizar el tiempo de cálculos, generar gráficos y diagramas de barras, importantes en la descripción del comportamiento de las vibraciones por cada taladro con su respectivo diámetro.
- El espacio ocupado por una cámara de aire dentro del taladro, representó del 3 al 4% con respecto a la carga de columna. La utilización del *air deck* disminuyó gradualmente la cantidad de la carga de columna y se consiguió mantener los valores del consumo específico por encima de los 0.32 kg/m³, siendo importante para obtener una roca bien fragmentada y prevenir sobre tamaños.
- El diámetro de 4.5" podrá ser utilizado en el diseño de taladro con el uso de cámaras de aire, evitando que la percepción en los habitantes sea notoria al dejar de utilizar el método convencional. La vibración logra disminuir de 3.28 a 1.43 mm/seg con la implementación de cámaras de aire. En un diámetro de 4" los valores cambiaron de 2.63 a 1.16 mm/seg. Para un diámetro de 3.5" la variación fue de 1.97 a 0.89 mm/seg. El diámetro de 3" cambió de 1.44 a 0.66 mm/seg. Por la reducción significativa en las vibraciones que mantienen las

velocidades de oscilación por debajo de los 3 mm/seg, es necesario implementar el uso de cámaras de aire en las voladuras para mejorar la coexistencia entre las empresas mineras y las urbanizaciones.

- Para un diámetro de 4.5" con el uso de las cámaras de aire se redujo en un 56% el valor de la velocidad de oscilación, el cambio del método de voladura es fundamental para poder aplicar este diámetro y evitar que los habitantes perciban la detonación del taladro.

4.2 Recomendaciones

- Respecto a las vibraciones se puede realizar el mismo análisis, pero cambiando el tipo de explosivo y tomando como indicador el factor de energía.
- Para la construcción del taco no es necesario que la relación con el diámetro sea de uno, esto dependerá del propósito que se plantee para la voladura y las condiciones que se tenga, es decir, el tipo de explosivo y el tamaño del *Air deck*.
- Es recomendable hacer una estimación de costos detallada por cada método, respecto al consumo de explosivo y el costo por metro lineal perforado.
- Para un posterior estudio se podría considerar el análisis para el diseño de una malla de voladura, puesto que esta investigación está enfocada en un solo taladro.
- En base a los buenos resultados de este estudio bibliográfico se recomienda que se aplique en campo y ajustar los parámetros en caso de ser necesario.
- Una vez aplicado el estudio en campo, sería preciso acompañar con el uso de instrumentos de medición de vibraciones, para realizar un monitoreo y a su vez comparar los valores teóricos e insitu.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía Guayaquil. (2 de Enero de 2020). *Municipio de Guayaquil inició cierre de canteras en la vía a la Costa por no cumplir con las normas de regularización*. Recuperado el 6 de Junio de 2020, de Alcaldía Guayaquil: <https://cutt.ly/5fDL7gb>
- Austin Powder Company. (2002). *The Blaster's Guide*. Cleveland: Austin Powder Company.
- Cánovas Carrasco, V. M. (08 de 2016). *Onda sísmica en voladuras. Estudio en la mina Sotiel (Trabajo fin de Máster)*. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena: eicm.
- Chiappetta, R. F. (Enero de 2004). Nueva Técnica de Voladura. *Journal of Explosives Engineering*.
- Cornejo Alvarez, L. (1971). Estudio sobre voladuras. *Revista de obras publicas*, 719-724.
- Coronel, J., Rosales, R., & Garzón, W. (29 de Agosto de 2016). Conflictos del uso de suelo urbanizado en el sector Vía a la Costa, Guayaquil. *El Misionero del Agro*.
- Corporación OSSO. (2003). Reglamentación (Tesis). *Reglamento de manejo de vibraciones*, 19-39. Colombia. Obtenido de <https://url2.cl/ESnMB>
- Dugar Morales, M. A. (2018). *Sistema De Gestión Ambiental para las canteras de la vía a la Costa - Guayaquil (Trabajo de titulación)*. Universidad de Guayaquil. Guayaquil: Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil.
- El Comercio. (17 de Febrero de 2019). *Urbanizaciones de Vía a la Costa convocan a movilización contra actividad de canteras, en Guayaquil*. Recuperado el 6 de Junio de 2020, de El Comercio: <https://n9.cl/3wxxp>
- El Universo. (3 de Enero de 2020). *Cierre de 29 canteras en vía a la costa por no cumplir requisitos*. Recuperado el 6 de Junio de 2020, de El Universo: <https://n9.cl/zr6f>
- ETSAC. (s.f.). *Ondas sísmicas*. Recuperado el 29 de Junio de 2020, de www.udc.ec: <https://url2.cl/36GBj>
- EXSA S.A. (2019). *Manual Práctico de Voladura* (Quinta ed.). Lima: EXSA S.A.
- Gálvez, I. P. (2013). *Mediciones Sísmicas e Investigación: Ondas (P y S) (R y L)*. Obtenido de Blogger: <https://url2.cl/FGYS7>
- Gonzales, J. (2018). *Diseño de una voladura a cielo abierto para la producción de áridos (Trabajo fin de Máster)*. Universidad de Oviedo , Oviedo.

- Hernández Sampiere, R. (2014). *Metodología de la investigación*. (Sexta ed.). México: McGraw-Hill Education.
- José Bernaola Alonso, Jorge Castilla Gómez, Juan Herrera Herbert. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Madrid, España.
- Mercado H., Angel D. (2017). *Análisis de variables controlables y no controlables en el proceso de voladura de rocas*. Venezuela .
- Ordoñez Mejía, M. E., Ramirez Torres, C. A., & Proaño Cadena, G. N. (2009). *Planificación y predicción de la fragmentación en las voladuras a cielo abierto (Artículos de Tesis de Grado - FICT)*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Guayaquil.
- Perez, A. (2010). *Análisis Comparativo de la Reducción de Vibraciones en la Cantera de Cerro Blanco, durante voladuras; Utilizando carga tradicional de explosivo y el uso de Taponex (Tesina de Grado)*. Guayaquil.
- Pinto Morales, L. H., & Fuentes Fuentes, M. (Diciembre de 2008). Propuesta de guía de regulación colombiana para el control de vibraciones por voladuras de rocas en áreas urbanas RCOLVV.09. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 7(2), 26-38.
- Pinto Morales, L. H., Fuentes Fuentes, M., & Hernández, J. A. (2013). Monitoreo y control de vibraciones por efecto de voladuras en el túnel Sumapaz, concesión Bogotá-Girardot. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 13(2), 15-21.
- Quarry Management. (1997, April). Air-deck Techniques. *Improvements in costs and efficiency linked with the use of gas bags*.
- Sayed-Ahmed, E. Y. (2013). *Status quo and critical review of PPV safe limits for subsurface construction blasting close to low-rise buildings*. Retrieved Junio 2, 2020, from researchgate.net: <https://n9.cl/ilxs>
- TAMROCK. (1978). *Surface Drilling And Blasting*.
- Vásquez, W., & Silva, J. (2017). Modificaciones en los parámetros de voladura para matener una explotación sustentable en cantera de áridos de construcción en zonas urbanas, calizas Huayco Guayaquil, Ecuador. En ASIEX, *XII Jornada de voladura* (págs. 1-11). Santiago, Chile: Asociación Chilena de Ingenieros Explosivistas A.G. (ASIEX). Obtenido de www.asiex.cl