

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA DE MINAS**

“APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DECK DE
CUTTING PARA LA REDUCCION DE
VIBRACIONES Y DAÑO POR VOLADURA AL PAD
DE UNA MINA A CIELO ABIERTO, 2022”

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Elizabeth del Pilar Cueva Esquivel

Rosita Noemí Cueva Esquivel

Asesor:

Mg. Sc. Daniel Alejandro Alva Huamán

<https://orcid.org/0000-0002-1053-9347>

Cajamarca - Perú

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	Miguel Ricardo Portilla Castañeda	45209190
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 2	Victor Eduardo Alvarez León	18034429
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 3	Danny Daniel Valderrama Gutierrez	43311969
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

INFORME DE SIMILITUD

TESIS_Cueva_Esquivel.docx

ORIGINALITY REPORT

2%

SIMILARITY INDEX

2%

INTERNET SOURCES

0%

PUBLICATIONS

0%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1

repositorio.unc.edu.pe

Internet Source

2%

Exclude quotes Off

Exclude bibliography On

Exclude assignment
template On

Exclude matches < 2%

DEDICATORIA

Con amor y mucho cariño a mis padres
Pilar y Luis, a mis abuelos Julia y Alberto, a mi
esposo José Díaz y a mis hijos Pablo y Sofia
D.C. por el apoyo incondicional.

Elizabeth del Pilar Cueva Esquivel

A mi madre María del Pilar y a mi padre
José Luis Cueva Vásquez, por su apoyo
incondicional, motivándome a cumplir mis
sueños y metas, enseñándome a salir adelante a
pesar de las adversidades.

Rosita Noemi Cueva Esquivel

AGRADECIMIENTO

Nuestro agradecimiento en primer lugar al todo poderoso Dios, por darnos la vida, la sabiduría e inteligencia.

Al Staff de profesionales de operaciones mina y a todos los docentes de la carrera de Ingeniería de Minas de nuestra alma mater.

A nuestro asesor ingeniero Daniel Alva Huamán.

TABLA DE CONTENIDO

JURADO EVALUADOR	2
INFORME DE SIMILITUD	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO	5
TABLA DE CONTENIDO	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
RESUMEN	9
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	21
CAPÍTULO III: RESULTADOS	27
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	48
REFERENCIAS	53
ANEXOS	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	44
----------------------	-----------

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1	31
Figura 2	34
Figura 3	36
Figura 4	36
Figura 5	41
Figura 6	27
Figura 7	34
Figura 8	36
Figura 9	36
Figura 10	
Figura 11	41
Figura 12	
Figura 13	
Figura 14	44
Figura 15	
Figura 16	47
Figura 17	¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo, la aplicación de la técnica deck de cutting para la reducción de vibraciones y control de daño por voladura al PAD de una mina a cielo abierto 2022, donde hasta el momento se han producido 03 fallas en las bombas de rebombeo del PAD, lo cual generó un contingente ambiental, social y productivo. Según análisis de especialistas, estas fallas obedecen un desalineamiento de cada motor con respecto a cada bomba, lo cual genera un sobre desgaste, y por último la paralización de las operaciones.

Ante ello se ha iniciado un proceso de revisión de las causas que podrían estar generando este desalineamiento, entre ellas la voladura, para lo cual se plantea poder implementar algunos controles que permitan mitigar los efectos de vibraciones causada por los disparos y que cumplan con las normativas vigentes además de las recomendaciones de límites máximos indicados por el proveedor de estos equipos (Controlar las vibraciones por debajo de 4.5 mm/s), para mitigar el impacto de la VPP a las bombas de rebombeo del Pad y permitir la continuidad de la operación en mina; de tal manera que, al sumar las ondas elementales generadas por los taladros, nos dé un registro de vibraciones con el menor nivel de vibraciones y sin atañer el costo beneficio del área.

PALABRAS CLAVES: Vibraciones, voladuras, velocidad pico partícula, deck de cutting.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

En Latinoamérica, la minería es una actividad económica de gran relevancia para países como Colombia, Bolivia, Brasil y Perú, entre otros (Velásquez, 2020).

En Perú, la minería representa más del 12% del Producto Bruto Interno (PBI) y contribuye al 60% de las exportaciones del país hacia el extranjero, situándolo en una posición destacada en el ranking mundial de producción minera, pues, el territorio peruano posee una riqueza geológica, que facilita la localización de metales en diversos lugares, desde yacimientos de llanuras aluviales, yacimientos filonianos, hasta sierras andinas y la Amazonía (Velásquez, 2020).

El proceso de extracción de minerales de yacimientos profundos generalmente se extiende a lo largo de varias décadas. Estos yacimientos pueden ser explotados a través de técnicas a cielo abierto, subterráneas o una combinación de ambas en distintas fases. La estrategia fundamental de una empresa minera radica en seleccionar el método más adecuado para cada etapa y la transición oportuna hacia otro método minero. (Rakhmangulov et al., 2022).

En las minas a cielo abierto, la actividad principal consiste en la detonación de explosivos para fragmentar las rocas. Sin embargo, solo una fracción pequeña, aproximadamente entre el 20% y el 30% de la energía generada por los explosivos se utiliza efectivamente para romper y desplazar las rocas. El resto de la energía se disipa en diversas formas de perturbaciones durante la explosión, como vibraciones en las rocas, generación de ruido, proyección de fragmentos rocosos, entre otras (Yin et al., 2018).

La vibración del suelo ocasionada por explosiones es una consecuencia inevitable de las voladuras en proyectos mineros, pudiendo generar daños considerables tanto al terreno rocoso como a las estructuras cercanas y a las personas (Saadat et al., 2014), representando también un desafío en su comprensión y manejo (Cheng et al., 2019).

Por esta razón, los responsables de las operaciones mineras buscan mejorar la fragmentación de la roca, además de que una fragmentación más eficiente reduce los costos asociados a la carga, transporte y trituración del mineral (Singh et al., 2015).

La problemática central identificada en el área de estudio proviene de inconvenientes localizados en el PAD de lixiviación de una mina a cielo abierto, pues este ha presentado 03 fallas en las bombas de rebombeo desde que se puso en marcha hasta la fecha, generando así un contingente ambiental, social y productivo. Según el análisis de especialistas, estas fallas obedecen un desalineamiento de cada motor con respecto a cada bomba, lo cual genera un sobre desgaste (falla en dichas bombas), y por último la paralización de las operaciones.

Ante ello se ha iniciado un proceso de revisión de las causas que podrían estar generando este desalineamiento, entre ellas la voladura, para lo cual se plantea poder implementar algunos controles que permitan mitigar los efectos de vibraciones causada por los disparos y que cumplan con las normativas vigentes, además de las recomendaciones de límites máximos indicados por el proveedor de estos equipos (controlar las vibraciones por debajo de 4.5 mm/s).

En este sentido y en la existencia de nuevas técnicas de diseño de voladuras, explosivos menos energéticos y accesorios explosivos para el arranque de rocas de dureza media a alta; así como el desarrollo de una serie de técnicas para la cuantificación de las

vibraciones que han permitido a su vez definir técnicas de reducción, algunas basadas en el diseño de voladura, en los productos/accesorios explosivos y en la secuencia de detonación o en el uso conjunto de lo mencionado, el presente trabajo tiene por finalidad mostrar el control realizado para mitigar el impacto de la VPP a las bombas de rebombeo del PAD, mediante la zonificación del tajo para el uso de diseños de P&V y del uso adecuado del retardo de tiempo; de tal manera que, al sumar las ondas elementales generadas por los taladros, se registren vibraciones en menor nivel y sin atañer el costo beneficio del área.

Como parte importante de la elaboración de la investigación se llevó a cabo la revisión y selección de una serie de trabajos previos relacionados con el objeto de estudio y el problema de investigación planteado, los cuales contribuirán a manera de antecedentes.

Como antecedente internacional se presenta a la investigación realizada por Cheng et al. (2019), titulada “Blasting cushion pad of reducing vibration start a new era of decreasing disaster in civil and mining engineering explosion with micro-damage”, donde se tuvo como objetivo determinar la reducción de vibraciones por voladura mediante la aplicación de una almohadilla amortiguadora. Las pruebas se realizaron en una mina a cielo abierto, llamada Panzhihua Xujiagou en la provincia de Sichuan, China, donde se extrae hierro. Se estableció una zona de prueba dividida en dos partes para realizar dos voladuras, una con carga explosiva con almohadilla en los disparos y otra de voladuras pre divididas sin el uso de almohadilla. Los resultados obtenidos afirmaron que la velocidad de vibración al utilizar almohadillas es un 50% menor que al realizar la voladura sin esta medida, e incluso cae por debajo del umbral en el que se acumula daño por vibración durante la explosión. De esta manera, se concluyó que mediante el uso de esta tecnología se reduce de manera efectiva el impacto intenso generado por la detonación de la explosión, previniendo el daño tanto a

la superficie de la roca circundante como al deterioro progresivo de la misma. Además, esta acción contribuye a mejorar la estabilidad del macizo rocoso y a reducir significativamente los costos asociados al refuerzo.

Así mismo, Pradatama et al. (2021) realizó una investigación titulada “The application of "line drilling" and "buffer holes" methods to reduce blasting vibration”, teniendo como objetivo reducir el nivel de vibraciones del suelo y mantener las condiciones de la pendiente sin ruptura mediante el uso de los métodos de voladura controlada: perforación en línea y orificios de amortiguación. Se emplearon orificios de amortiguación detrás del orificio de producción, estos contaron con una profundidad de 0.75 veces la profundidad del orificio de producción y 0.75 veces su carga. Sumado a ello, la perforación en línea se colocó detrás de los orificios de amortiguación a una misma profundidad y no se cargó con explosivos con carga menor a la del orificio de producción. Las vibraciones fueron registradas a través de un dispositivo de monitoreo en dos ubicaciones distintas; en el área experimental con los métodos propuestos y otra con el método de voladura convencional. Los resultados de VPP en voladuras con método convencional para ondas transversales, verticales y longitudinales fueron 88.7 mm/s, 109 mm/s y 99.1 mm/s respectivamente, con una suma vectorial máxima de 119 m/s; mientras que, utilizando los métodos propuestos fueron 44.7 mm/s, 79.8 mm/s, y 93.3 mm/s respectivamente con una suma vectorial máxima de 97.1 mm/s; indicando de esta manera una disminución del 19% en la vibración del suelo al emplear la técnica de perforación en línea en contraste con el método convencional. Finalmente, se concluyó los métodos de perforación en línea y orificios de amortiguación en la voladura logran de manera efectiva reducir los niveles de vibración generados por este proceso.

Como antecedente nacional se presenta a la investigación elaborada por Cumpa (2016), titulada “Efecto de las cámaras de aire en taladros de producción para mejorar la fragmentación del material y reducir el nivel de vibraciones por voladura en minería a tajo abierto en el norte del Perú, 2016”, donde el objetivo principal fue determinar el efecto que generaban las cámaras de aire en el fondo del taladro de producción, en relación a la mejora de la fragmentación del material y la reducción de las vibraciones. Inicialmente, se definió el área de prueba para la aplicación de la técnica a través del mapeo geo mecánico y teniendo en cuenta el tipo de roca, que en este caso fue de tipo II. Luego se llevaron a cabo 05 simulaciones de voladura computarizada mediante el software especializado JK SimBlast 2.0. También se instaló un Sismógrafo Instantel para la obtención de los datos de vibraciones generadas y se ejecutó la distribución granulométrica. Los resultados de los ensayos realizados evidenciaron que la incorporación de cámaras de aire en la columna explosiva produce mejoras significativas en la distribución granulométrica p80 y disminuye las vibraciones hasta en un 58.30% en comparación con las voladuras tradicionales. Además, se concluyó que, sumado a la disminución del porcentaje del nivel de vibraciones, el uso de este instrumento conlleva otras ventajas, como la reducción de la dispersión de fly rock, un aumento en la eficiencia en las fases posteriores del proceso, entre otros.

Por otro lado, también se consideró el estudio de Araujo (2021), titulado “Evaluación de la eficiencia de filtro de pre corte en la reducción de vibraciones por voladura en minera Yanacocha”. Esta investigación tuvo como objetivo principal la determinación de la eficiencia del filtro de pre corte para disminuir las vibraciones ocasionadas por voladura, para ello, se seleccionaron 12 taladros de prueba, de ellos 09 fueron utilizados como fuente sísmica con el propósito de identificar la velocidad de propagación de la onda P y efectividad

que representa el uso del filtro de pre corte, y los 03 restantes fueron empleados en el monitoreo mediante el uso de 02 geófonos triaxiales y 01 uniaxial. Los resultados generados a partir de la metodología indicaron una velocidad de onda P igual a 609 m/s; una VPPc (Velocidad Pico de Partícula Crítico) igual a 1029 mm/s; un PPV igual a 257 mm/s; un tiempo de aprovechamiento igual a 11 ms; y un porcentaje de filtro de pre corte igual a 0%. A partir de ello, se concluyó que los taladros por si solos no logran filtrar las vibraciones ni eliminar los gases generados durante la voladura.

Como parte de las bases teóricas, es importante mencionar que el proceso de voladura constituye una etapa fundamental en el desarrollo de las operaciones mineras (Guerra et al., 2022)

Según el Ministerio de Energía y Minas (2020) el proceso de voladura consiste en una serie de actividades que incluyen el transporte de los explosivos y accesorios de los polvorines hasta el área de disparo, las precauciones previas al carguío, el carguío de los explosivos, la conexión de los taladros cargados, la validación de las medidas de seguridad, la autorización y el encendido del disparo.

La emisión de energía durante la voladura es responsable de provocar la vibración en el suelo, y la intensidad de esta vibración está influenciada por diversos elementos, como la cantidad de explosivos empleados, la naturaleza de la roca fragmentada y la distancia entre el punto de la voladura y el punto de monitoreo (Hosseini et al., 2023).

Estas vibraciones generadas representan el movimiento que se percibe en la superficie como resultado de las ondas elásticas ocasionadas por un evento, como la voladura en este contexto. Su medida se expresa en pulgadas por segundo de la velocidad de la

partícula, la cual indica la velocidad a la que se desplazan las partículas del suelo mientras este se mueve debido a la energía de la onda (Zúñiga-Arrobo et al., 2024).

La vibración total, medida después de una explosión de producción, se compone de pulsaciones individuales generadas por cada taladro de la explosión, todas combinadas en el punto de observación. El patrón mediante el cual se fusionan para formar la vibración resultante variará según la dirección y distancia de la voladura, lo que significa que dos registros de la misma voladura no generarán la misma vibración. La duración de la vibración suele ser ligeramente mayor que la duración de la explosión, es decir, el intervalo entre la detonación del primer y último taladro. Esto se debe al tiempo requerido para que la vibración viaje desde el último taladro detonado hasta el punto de medición, generalmente alrededor de 200 a 300 milisegundos adicionales (Barbosa y Vallejo, 2019).

Según Zúñiga-Arrobo (2024) en todas las regulaciones, el parámetro predilecto es la Velocidad Pico Partícula (VPP). La evaluación técnica de las partículas al paso de las ondas suele llevarse a cabo en tres direcciones mutuamente perpendiculares, lo que resulta en oscilaciones de las partículas en estas tres dimensiones:

- Longitudinal, conocida también como radial, implica que las partículas se desplazan hacia adelante y hacia atrás en la misma dirección en la que se desplaza la onda vibratoria.
- Vertical, describe un movimiento ascendente y descendente perpendicular a la dirección de propagación de la onda.
- Transversal, indica un movimiento lateral de las partículas hacia la derecha e izquierda, también perpendicular a la dirección en que viaja la onda.

Además, Cano (2019) indica que los materiales explosivos empleados en la industria minera emiten ondas que se propagan en todas direcciones a partir de su fuente. Las vibraciones en la superficie, predominantemente generadas por las ondas de Rayleigh, pueden ser detectadas mediante registros temporales que incluyen dos componentes horizontales y una vertical, midiendo la aceleración, velocidad o desplazamiento. Dichas vibraciones pueden tener un impacto negativo en las estructuras ubicadas en las proximidades de la zona de actividad minera.

Las ondas sísmicas se dividen en dos tipos: ondas internas y ondas superficiales. Las ondas internas se desplazan desde el epicentro hasta la superficie terrestre, y se clasifican en ondas P y ondas S. Por otro lado, las ondas superficiales se mueven a lo largo de la superficie terrestre, y se subdividen en ondas Rayleigh y ondas Love, tras la llegada de las ondas P y S a la superficie (Zafra, 2017).

Las ondas P (primarias o longitudinales), tienen la capacidad de propagarse a través de diversos medios y son las primeras en ser detectadas por un acelerómetro debido a su velocidad superior. Estas ondas provocan compresión y expansión del medio en la dirección de su avance. Badette (2020). Ver figura 1.

Las ondas S (secundarias o transversales), tienen la particularidad de no propagarse a través de medios fluidos. Se mueven de manera transversal respecto a la dirección de propagación de la onda y a una velocidad más lenta que las ondas P. Estas ondas pueden polarizarse en diferentes planos, lo que resulta en dos componentes: SV (movimiento vertical) y SH (movimiento horizontal). Badette (2020). Ver figura 2.

Las ondas Rayleigh se definen por un desplazamiento de partículas que crea una elipse retrógrada, en dirección contraria al avance de la onda. Se desplazan a una velocidad inferior a las ondas S. (Zafra, 2017).

Las ondas Love se originan a causa de la interferencia constructiva de numerosas reflexiones en la superficie libre de las ondas SH. Se desplazan más rápido que las ondas Rayleigh y el movimiento de las partículas se produce paralelamente a la superficie, pero perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda. (Zafra, 2017). Ver figura 3.

Por otro lado, las ondas elementales son las vibraciones producidas por cada carga explosiva, las cuales se combinan según la progresión de detonación y la disposición geométrica de la voladura. La optimización de los niveles de vibración se logra mediante la modificación de los tiempos de inicio y la secuencia de los taladros (Barrios, 2020).

El estudio de la onda elemental implica el registro de las vibraciones producidas por un único taladro al detonar su carga explosiva. Luego, se realizan simulaciones de estas vibraciones considerando parámetros como la cantidad de taladros y los intervalos de tiempo entre ellos, tanto dentro de una misma fila como entre filas. Esta onda registra datos sobre el macizo rocoso, ya que su forma, amplitud y duración dependen de sus características. Utilizando esta información, se desarrollan simulaciones para relacionar la velocidad de partícula de pico (VPP) y los tiempos de retardo en la zona específica analizada, siendo importante resaltar que estos resultados deben aplicarse únicamente en áreas con características geológicas similares, ya que no son transferibles a zonas con geología diferente. Además, para comprender el funcionamiento del tiempo de retardo calculado mediante este análisis, es esencial entender que las ondas pueden interactuar entre sí de manera constructiva o destructiva (Acosta et al., 2022).

1.2. Formulación del problema

¿En qué medida se reduce las vibraciones y se controlan los daños por voladura al aplicar la técnica Deck de Cutting al PAD de una mina a cielo abierto, 2022?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la reducción de vibraciones y control de daños por voladura al PAD al aplicar la técnica Deck de Cutting en una mina a cielo abierto, 2022.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar la carga y cantidad exacta de explosivo al aplicar la técnica Deck de Cutting para el control de vibraciones y daño por voladura al PAD de una mina a cielo abierto, 2022.
- Comparar las vibraciones antes y después de aplicar la técnica deck de cutting.
- Determinar los tiempos de carga en los diseños de voladura para la aplicación de la técnica Deck de Cutting para el control de vibraciones y daño por voladura al PAD de una mina a cielo abierto, 2022.
- Determinar los tiempos de retardos, mediante el Software “Blastware” para la aplicación la técnica Deck de Cutting para el control de vibraciones y daño por voladura al PAD de una mina a cielo abierto, 2022.

1.4. Hipótesis

Mediante la aplicación de la técnica Deck de Cutting para la reducción y control de daño por voladura al PAD de una mina a cielo abierto, se reducen significativamente los niveles de vibraciones generados durante esta operación, con resultados de Velocidad Pico Partícula (PPV) menores a 4.5 mm/s en el Tajo.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

La presente investigación es de tipo Aplicada, pues, aprovecha los avances previos obtenidos en la investigación básica para dirigirlos hacia la consecución de metas particulares. Por ende, se toma en cuenta toda la información disponible en un campo específico, la cual se utiliza posteriormente para abordar problemas concretos en busca de soluciones (Castro-Maldonado et al., 2023).

El enfoque que presenta es Cuantitativo, teniendo en cuenta que se estudiarán las vibraciones ocasionadas por voladura mediante valores numéricos. Esto es sustentado por Hernández y Mendoza (2018), quienes afirman que el enfoque cuantitativo es el más adecuado cuando se busca calcular las magnitudes o frecuencia de los fenómenos y validar hipótesis.

Por otro lado, también se considera Correlacional, siendo el propósito de este tipo de investigaciones comprender la relación o nivel de relación entre dos o más ideas, categorías o variables dentro de una muestra o situación específica. A veces se centra únicamente en el análisis de la relación entre dos variables, pero con regularidad se investigan vínculos entre más variables (Hernández et al., 2014).

La aplicación de la técnica Deck de Cutting para el control de vibraciones dentro del proceso de voladura fue realizada en un único periodo tiempo. De esta manera, el alcance de la investigación se define como Transversal, el cual según Cvetkovic-Vega (2021) se distingue principalmente por la evaluación de un momento específico en el tiempo, a diferencia de los estudios longitudinales, que implican seguimientos a lo largo del tiempo. Sumado a ello, indica también que convencionalmente, los estudios transversales se han

valorado como herramientas útiles para establecer la prevalencia de una condición, lo que ha llevado a denominarlos también como estudios de prevalencia.

Además, presenta un diseño Experimental, donde el investigador interviene en una o varias variables de estudio para regular el aumento o disminución de dichas variables y evaluar su impacto en las conductas observadas (Guevara et al., 2020). Tal y como se llevó a cabo en la aplicación de la técnica Deck de Cutting, puesto que se interfirió en el procedimiento habitual de voladura con la finalidad de obtener niveles de vibraciones reducidos en comparación a los cotidianos.

Adicionalmente, Guevara et al. (2020) menciona que la investigación experimental posee diversas ventajas, dentro de las cuales destacan las siguientes:

- Proporciona a los investigadores una mayor capacidad de manejo sobre las variables para alcanzar los resultados esperados.
- La elección del sujeto o la industria no constituye un criterio restrictivo en la investigación experimental, ya que cualquier sector industrial puede emplearlo con propósitos investigativos.
- Los resultados son muy detallados o particulares
- La relación entre causa y efecto de una hipótesis brinda la oportunidad a los investigadores de examinar aspectos más minuciosos o detallados.
- Es posible emplearla en combinación con otros enfoques de investigación.

Por otro lado, la población de investigación consiste en un grupo de casos específicamente definido, delimitado y accesible, que servirá como base para la selección de una muestra que cumpla con una secuencia de criterios predefinidos (Arias-Gómez et al.,

2016). Teniendo en cuenta ello, la población definida para la investigación fue todas las áreas de operación del tajo minero en estudio.

Según Hernández et al. (2014), en el enfoque cuantitativo, la muestra representa un segmento específico de la población de interés donde se recopilarán datos. Así mismo, es esencial que este subgrupo esté previamente definido y delimitado con precisión, además de ser representativo de toda la población. De este modo, la muestra de estudio elegida para el desarrollo de la investigación fue un PAD de lixiviación del tajo minero en estudio.

El muestreo fue por conveniencia, ya que de esta manera la selección de la muestra se realiza según la conveniencia del investigador, lo que le otorga la libertad de determinar arbitrariamente la cantidad de participantes o componentes que formarán parte del estudio (Hernández, 2021).

La técnica para la recolección de datos relevantes sobre los niveles de vibraciones antes y después de la aplicación del Deck de Cutting durante todo el proceso de estudio fue principalmente la observación. Esta técnica se destaca por su versatilidad y utilidad en una variedad de campos de estudio. Permite a los investigadores recolectar información detallada y objetiva sobre comportamientos, actitudes y eventos. Sin embargo, es importante reconocer los desafíos que conlleva, como la influencia de la subjetividad. Al emplear métodos rigurosos y analizar minuciosamente los datos obtenidos, la observación puede convertirse en una herramienta efectiva para adquirir una comprensión profunda de los temas investigados (Medina et al., 2023).

Como instrumento complementario a la técnica utilizada, se empleó la ficha de observación, donde se registraron anotaciones de todos los datos obtenidos de la velocidad

de pico de partícula (VPP), los cuales fueron fundamentales para el análisis del control de vibraciones. La ficha mencionada es empleada por el investigador para medir, analizar o evaluar un objetivo particular, es decir, para recabar datos específicos sobre dicho objeto. Puede ser utilizada para evaluar tanto las situaciones externas como internas de las variables (Arias, 2020). Además, también contribuye a reducir el sesgo subjetivo, dado que la información se documenta de manera estandarizada y se evalúa de manera coherente (Medina et al., 2023).

Adicionalmente, se utilizaron otros instrumentos como el plano de ubicación de las voladuras de prueba, el plano de zonificación del tajo para el diseño de P&V y el manual “Installation, operation and maintenance Manual” descrito por Goulds Pumps (2015).

Como primera etapa del procedimiento desarrollado, se realizó el registro de la onda elemental. El estudio de las ondas elementales se fundamenta en el análisis de la vibración generada por un único taladro al detonar su carga explosiva (Acosta et al., 2022). En este caso se capturaron las ondas elementales de cada deck para determinar el retardo preciso: tiempo entre deck., tiempo entre taladros y tiempo entre filas.

Posteriormente, se realizó el diseño de carga / secuencia de salida por modelo de onda elemental, para lo cual se distribuyó la carga de columna explosiva con el propósito de disminuir la carga operante, usando doble carga espaciada; también se determinó que la longitud del deck debió ser cutting, puesto que las cámaras de aire producen onda de choque y estas podrían generar posible presión dinámica. Para evitar presión dinámica la longitud del deck debió ser mayor a la distancia de la longitud de obtención de la VOD de régimen (1.0 m), por lo cual se duplicó y se propuso 2.0 m de deck intermedio de cutting. Luego de los controles antes mencionados para evitar presión dinámica se mantuvo el uso del cordón

detonante como respaldo de iniciación del detonador no eléctrico. Por último, con el fin de determinar los tiempos de precisión para estos diseños de carga propuestos se realizó el modelo de vibraciones por onda elemental. La configuración de la prueba ejecutada para onda elemental se muestra en la siguiente figura 4 en anexos.

La ejecución de capturas de ondas elementales se llevó a cabo el 27 de noviembre del año 2022. El registro de vibraciones se realizó en un monitoreo lineal para capturar 05 ondas elementales con el propósito de determinar los tiempos entre deck entre cargas superior e inferior, tiempos entre taladros y tiempo entre filas, que permitan reducir las vibraciones; y para alimentar los datos del modelo de campo lejano a fin de ajustar los valores de K y α . Para ello, se configuró la prueba de campo representada en la siguiente figura 5 en anexos.

Se registraron las ondas elementales producidas por las vibraciones de voladura a partir de 02 sismógrafos ubicados a 30 m y 60 m de distancias a partir de los taladros de prueba.

Por otro lado, cabe mencionar que el software utilizado para el análisis de datos fue Blastware, el cual sirve para la creación de informes en formato PDF sobre las mediciones realizadas en cada evento de vibraciones. También incluye un conjunto de herramientas para el post procesamiento y análisis de vibraciones, como la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para identificar las frecuencias principales, filtros de frecuencia, comparación de resultados con normas internacionales sobre prevención de daños estructurales, cálculos aritméticos sobre los resultados, entre otras funciones (Suárez y Torres, 2015). Además, posee una herramienta denominada Signature Hole Analysis, que se emplea para la creación

y análisis de una explosión teórica mediante la información de las vibraciones y el tiempo de registro (Barrios, 2020).

Como parte de los aspectos éticos de la investigación, se citó toda la información empleada en el documento, de acuerdo a lo descrito en el Manual de Publicaciones de la American Psychological Association séptima edición, de tal manera no se quebrantan los derechos de originalidad de los autores. Además, se contó con el permiso respectivo por parte de la empresa minera, la cual autorizó el uso de datos y la publicación de la información requerida en el estudio.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Registro de ondas elementales

Para obtener los registros debemos tener claramente el valor de la vibración no debe exceder a 4.5 mm/s (norma API – 610) y así no causar daños al PAD.

Para determinar la reducción de vibraciones y control de daños por voladura al PAD al aplicar la técnica Deck de Cutting en una mina a cielo abierto, 2022. Se obtuvo el registro de 5 ondas elementales.

Diseño de carga:

- Distribuir la carga de columna explosiva para disminuir la carga operante, usar doble carga espaciada.
- La longitud del deck debe ser cutting, debido a que las cámaras de aire producen onda de choque y estas podrían generar posible presión dinámica.
- Para evitar presión dinámica la longitud del deck debe ser mayor a la distancia de la longitud de obtención de la VOD de régimen (1m). Por lo cual se duplica y se propone 2.0m de deck intermedio de cutting.
- Luego de los controles antes mencionados para evitar presión dinámica se debe mantener el uso del cordón detonante como respaldo de iniciación del detonador no eléctrico.
- Con el fin de determinar los tiempos de precisión para estos diseños de carga propuestos se propone realizar el modelo de vibraciones por Onda elemental.

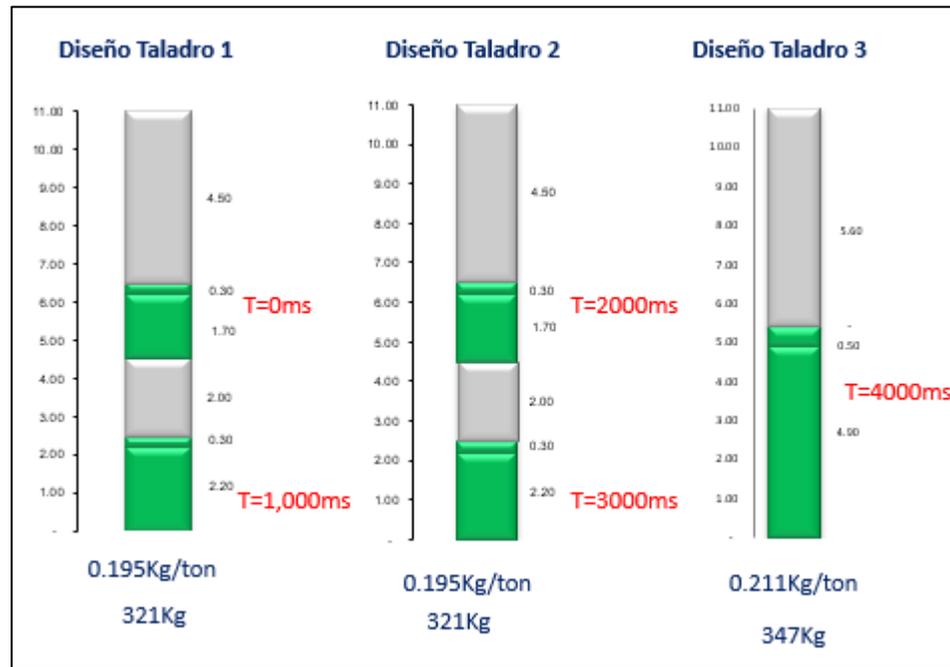


Figura 4. Configuración de la prueba para onda elemental imagen referencial

Primer deck Taladro 1, carga superior:

Para iniciar las pruebas se tiene el primer taladro con deck de 11 m de longitud con taco de 4.50, la primera longitud de carga de 2m (1.70 de Quantex73 con 0.30 de esponjamiento).

Carga inferior

La segunda carga con taco de 2 m, longitud de carga 2.20m y esponjamiento de 0.30.

El primer deck se cargó en total 321 kg

Factor potencia 0.195kg/ton

Taladro 2, carga superior

Longitud de taladro 11m, taco 4 m, longitud de carga 2.20, esponjamiento 0.30 m, tiempo de inicio de detonación 2000ms.

Carga inferior

Taco 2m, longitud de carga 2.20, esponjamiento 0.30, tiempo de detonación 2037ms.

Segundo deck, Taladro 2, carga superior:

Longitud de taladro 11m, taco de 4.50m, longitud de carga 1.70 con esponjamiento de 0.30 y con un tiempo de detonación de 2000 ms.

Carga inferior con un taco de 2m, longitud de carga explosiva 2.20 con esponjamiento de 0.30 y con un tiempo de detonación de 3000 ms.

El segundo deck se cargó en total 321 kg.

Con un factor potencia de 0.195kg/ton

Tercer Taladro, carga corrida:

Taco de 5.60, longitud de carga 4.90, esponjamiento 0.50 y con un tiempo de 4000ms.

Se cargó en total 347kg.

Con un factor potencia de 0.211kg/ton.

Ejecución Capturas de Ondas elementales

El registro de vibraciones se realizó en un monitoreo lineal para:

- Capturar 05 ondas elementales para determinar los tiempos entre deck entre cargas superior e inferior, tiempos entre taladros y tiempo entre filas, que nos permitan reducir las vibraciones. Donde:

Longitudes de carga pequeñas generan mayor frecuencia.

Longitudes de carga mayor generan menor frecuencia.

- De tal manera que, al sumar las ondas elementales generadas por los taladros, nos dé un **registro de vibraciones con el menor nivel de vibraciones** y con **frecuencias controlables** acorde a la necesidad.

Para la toma de las 5 ondas elementales se necesitó 3 taladros: 2 con deck para cutting y un taladro de carga corrida.

Se usó 2 sismógrafos de monitoreo y 2 geófonos de 30m y 60m de distancia. Así como se muestra en la siguiente figura:

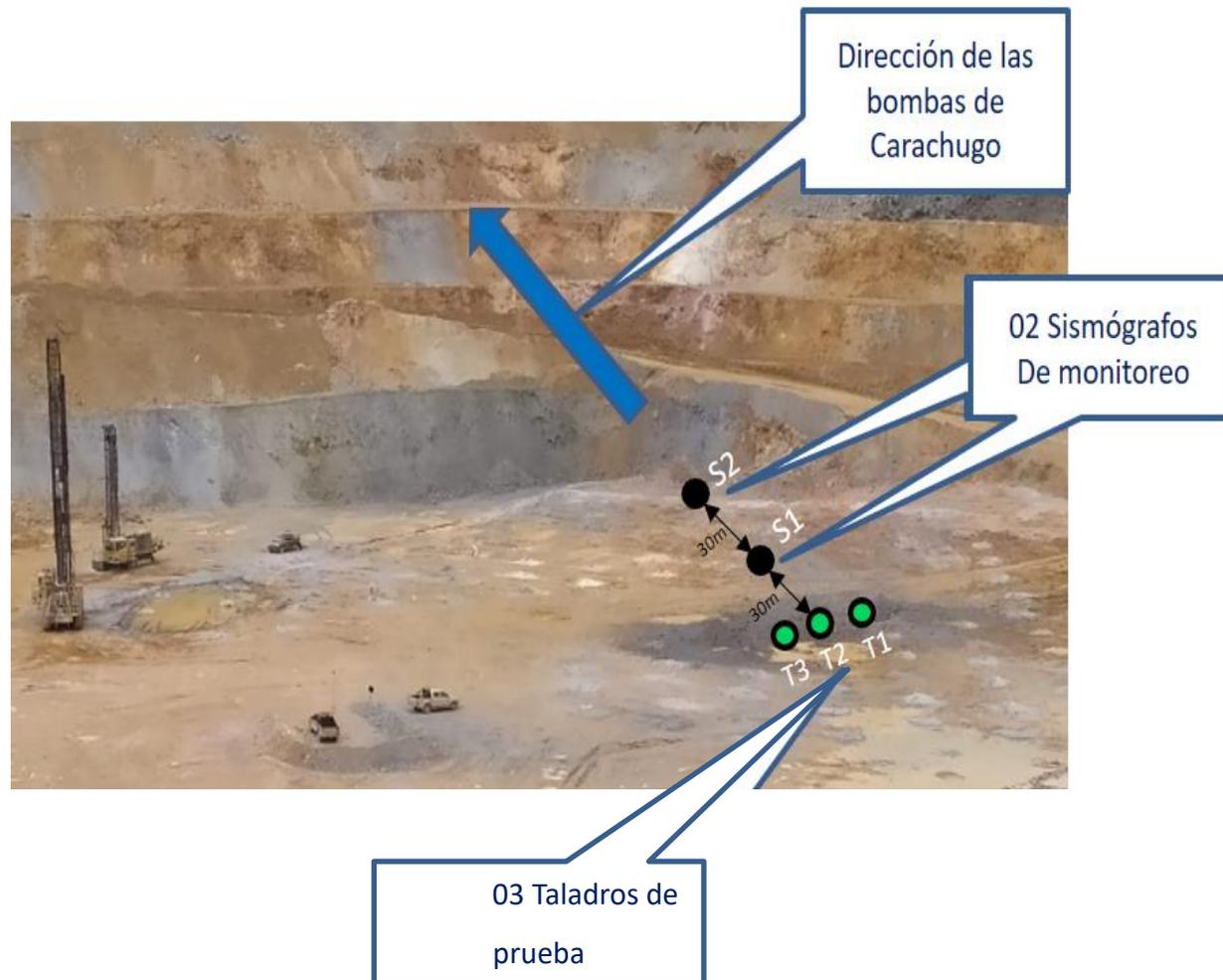
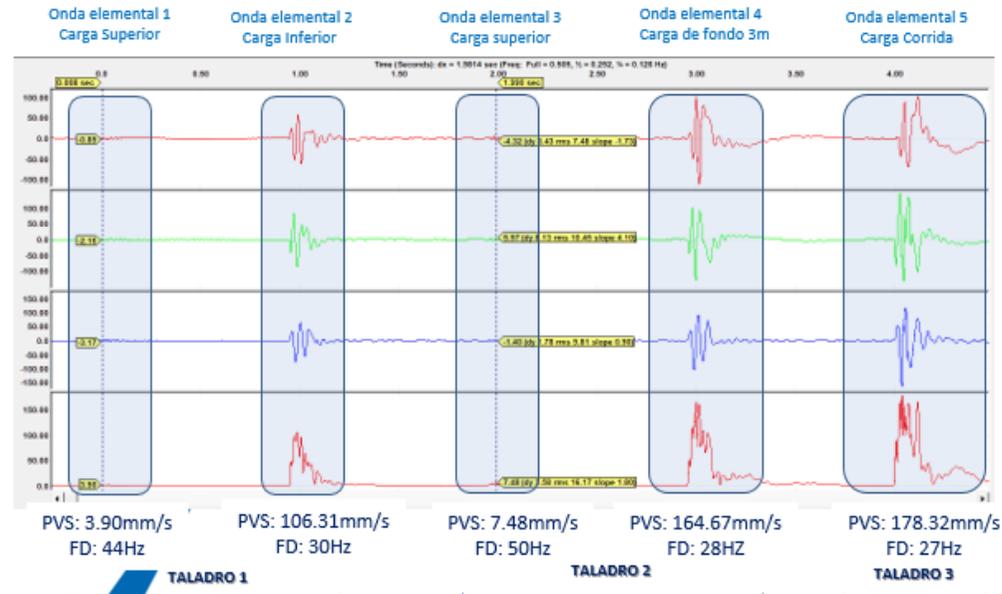


Figura 1

Imagen de la ubicación de equipo y taladros para iniciar la prueba.

Registro de las ondas elementales (30m)



DONDE:
PVS: Peak vector sum
FD: Frecuencia Dominante

Se evidencia en los registros:

Longitudes de carga **pequeñas** generan **mayor frecuencia**.
Longitudes de carga **mayor** genera **menor frecuencia**.

Para el pico vector suma (la suma de la longitudinal, transversal y horizontal) el sistema nos arroja el promedio de las 3 sumas.

Para el primer taladro:

Carga superior PVS:3.90m/s con FD:44Hz.

Carga inferior PVS:106.31m/s con FD:30Hz.

Para el segundo taladro:

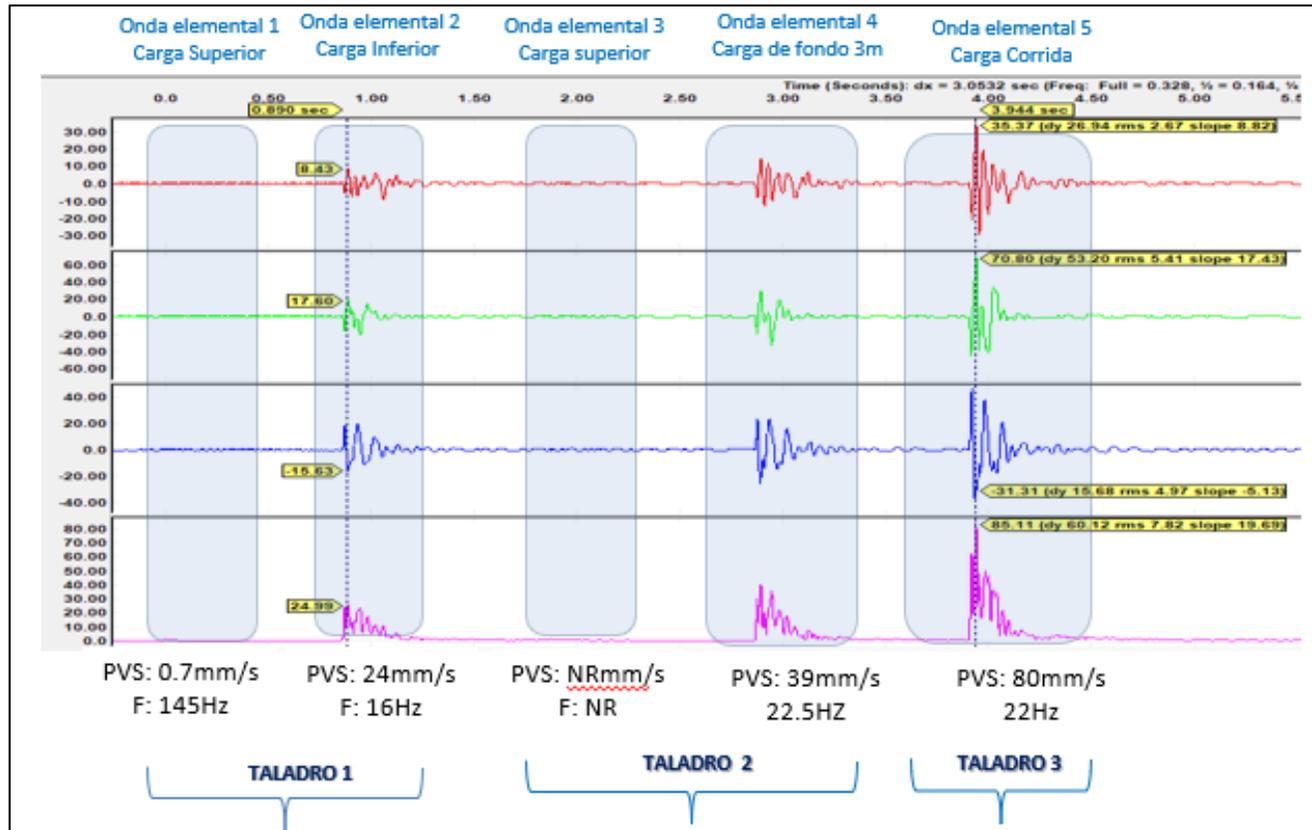
Carga superior PVS:7.48m/s con FD:50Hz

Carga inferior PVS:164.67m/s con FD:28Hz

Para la carga corrida:

PVS:178.32m/s con FD:27Hz

Registro de ondas elementales a 60m



Nota. PVS: Peak vector sum; FD: Frecuencia dominante; NR: No registró.

Figura 2

Ondas elementales medidas a 60 m

Taladro 1, carga superior:

PVS:0.7m/s con FD:145Hz

Carga inferior:

PVS:24m/s con FD:16Hz

Taladro 2, carga superior:

PVS:NO REGISTRO CON FD:NR.

Carga inferior:

PVS:39m/s con FD:22.5Hz

Taladro 3, carga corrida

PVS:80m/s con FD:22Hz

3.2. Selección de tiempos de retardos aplicando Software Especializado

Figura 3

Tiempo entre decks – Software 01 PARA CARGA SUPERIOR DE 2M

Signature Hole Analysis Table													Selección de retardos			
File Filename (Double Click to view)	Blast Timing			Peak Particle Velocity				PVS	Dominant FFT Frequency							
	Deck	Hole	Row	Trans	Vert	Long	Peak	Peak	Trans	Vert	Long	Peak				
	Delay (msec)	Delay (msec)	Delay (msec)	(mm/s)	(mm/s)	(mm/s)	(mm/s)	Vector	(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)				
1D0H42R169.BWP	0	42	169	2.38	3.53	3.32	3.53	3.66	47.9	46.7	47.6	47.9				
1D0H43R169.BWP	0	43	169	2.12	3.32	3.54	3.54	3.69	46.5	45.9	46.1	46.5				
1D0H12R169.BWP	0	12	169	2.24	2.36	2.92	2.92	3.71	84.3	249.9	80.9	249.9				
1D0H35R169.BWP	0	35	169	1.77	3.12	3.26	3.26	3.80	57.4	56.8	57.3	57.4				

Lo que nos arroja el Blastware:

Para la onda cargada superior con carga de 2m de longitud, el tiempo entre deck es de 42ms porque genera menor amplificación de vibración peak.

Figura 4

SELECCIÓN DE TIEMPO ENTRE TALADROS – Software 01

Signature Hole Analysis Table													Selección de retardos			
File Filename (Double Click to view)	Blast Timing			Peak Particle Velocity				PVS	Dominant FFT Frequency							
	Deck	Hole	Row	Trans	Vert	Long	Peak	Peak	Trans	Vert	Long	Peak				
	Delay (msec)	Delay (msec)	Delay (msec)	(mm/s)	(mm/s)	(mm/s)	(mm/s)	Vector	(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)				
1D0H17R169.BWP	0	17	169	41.82	62.64	46.75	62.64	65.12	26.4	14.6	20.7	26.4				
1D0H18R169.BWP	0	18	169	40.18	63.93	41.03	63.93	67.56	25.0	29.9	19.7	29.9				
1D0H15R169.BWP	0	15	169	45.65	62.80	50.99	62.80	68.60	24.3	10.4	17.2	24.3				

RESULTADO DEL TIEMPO entre taladros 17 ms y tiempo entre filas 169 ms. Genera menor amplificación de vibración peak.

Resultado para los valores de retardos de precisión determinados:

Los tiempos entre decks debe ser de 42ms

El tiempo entre taladros debe ser 17ms

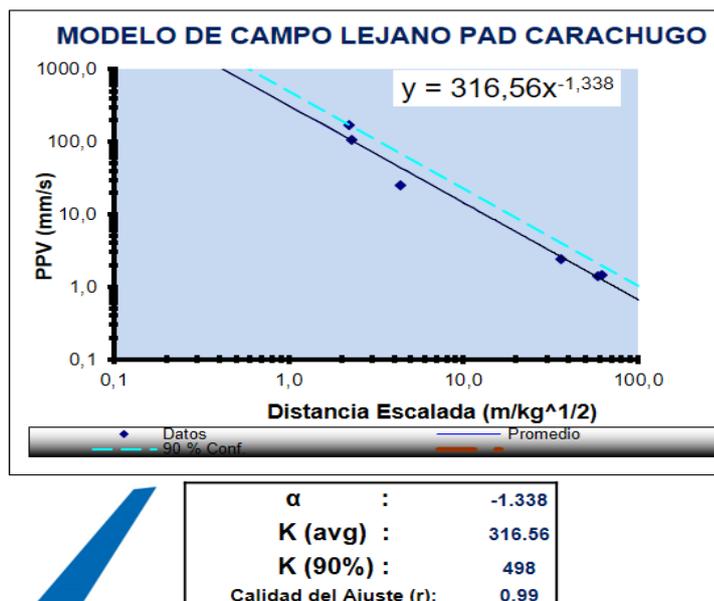
El tiempo entre filas debe ser 169ms

UTILIZANDO EL MODELO PREDICTIVO DE DIVINE & DUVALL

Para crear el modelo se necesita la carga explosiva detonada, la distancia y el vector suma del PPV. Una vez que tienes una cierta cantidad de datos iniciales, encuentras el K y alfa de la fórmula que son valores que representan las características específicas del terreno en donde haces el estudio.

Además, el modelo tiene que seguir siendo alentado con información de todas las voladuras que se hagan en el sitio y ajustando el modelo con mínimo de 90% de confiabilidad.

Modelo de vibraciones en Campo Lejano



Nota. α : -1.338; K (avg): 316.56; K (90%): 498; calidad del ajuste (r): 0.99.

Predicción de registro de vibración Para estar debajo de 2.5mm/s

Distancia M	DECK SUPERIOR 148Kg	DECK INFERIOR 140Kg	1 TAL CORRIDA 302Kg
75.0	43.67	52.34	70.39
125.0	22.04	26.42	35.53
175.0	14.05	16.84	22.65
225.0	10.04	12.03	16.18
275.0	7.67	9.20	12.37
325.0	6.14	7.35	9.89
375.0	5.07	6.07	8.17
425.0	4.29	5.14	6.91
475.0	3.69	4.43	5.95
525.0	3.23	3.87	5.20
550.0	3.03	3.64	4.89
575.0	2.86	3.43	4.61
600.0	2.70	3.24	4.35
625.0	2.56	3.07	4.12
650.0	2.43	2.91	3.91
675.0	2.31	2.77	3.72
700.0	2.20	2.63	3.54
725.0	2.10	2.51	3.38
750.0	2.00	2.40	3.23
775.0	1.92	2.30	3.09
800.0	1.84	2.20	2.96
825.0	1.76	2.11	2.84
850.0	1.69	2.03	2.73
875.0	1.62	1.95	2.63
900.0	1.56	1.88	2.53
925.0	1.50	1.81	2.44
950.0	1.44	1.75	2.35
975.0	1.41	1.69	2.27
1000.0	1.36	1.63	2.20

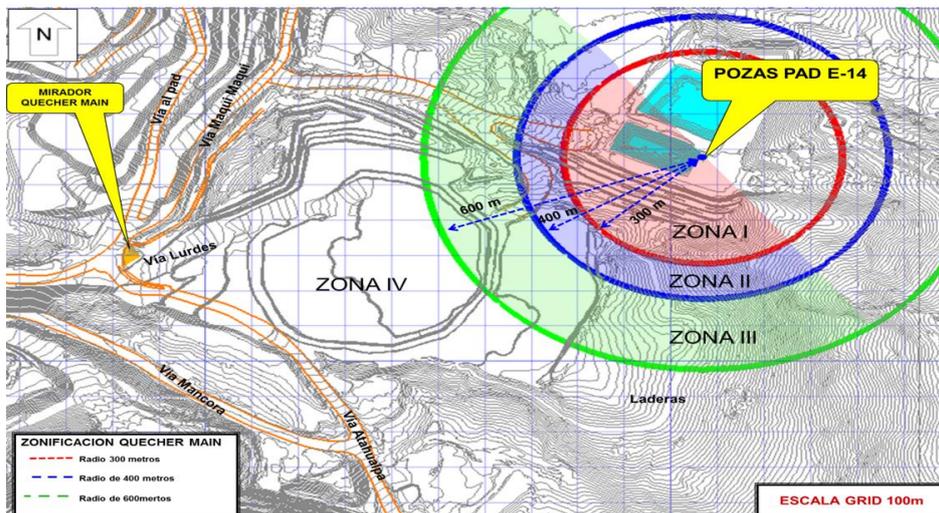
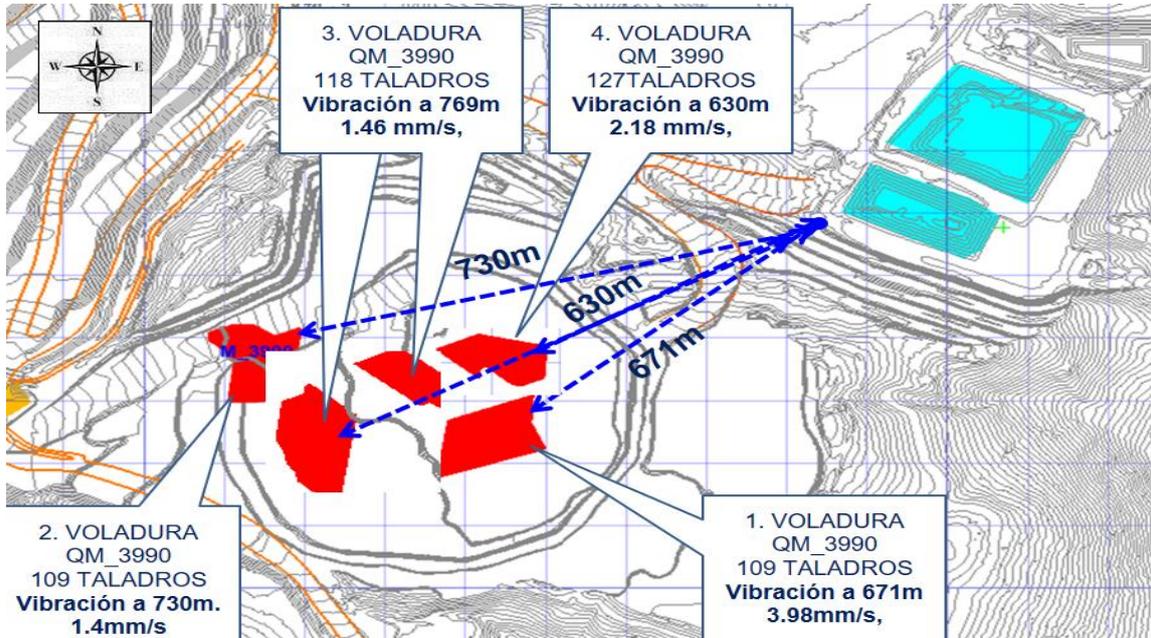
**Límite de vibración
Establecido por P&V
Propuesto 2.5mm/s**

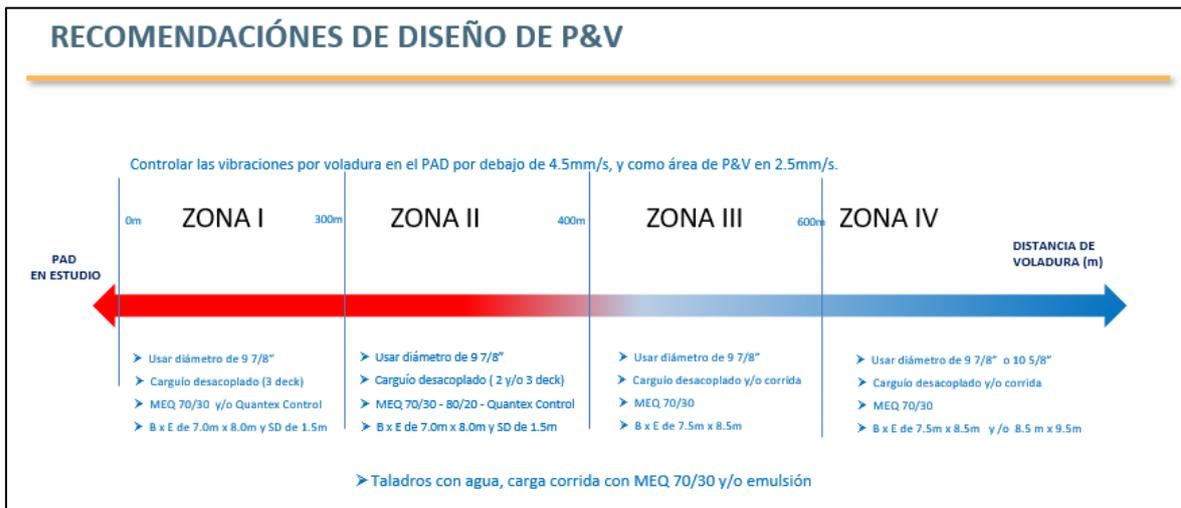
Tabla de guía para futuras voladuras.

La tabla representa un numerador de parámetros en términos de distancia, carga y ppv para una predicción aproximada.

Nos permite tener estimaciones para la distancia del control de vibraciones.

RESULTADOS REALES LUEGO DE APLICAR LOS TIEMPOS RECOMENDADOS DE LAS PRUEBAS EN LA VOLADURA





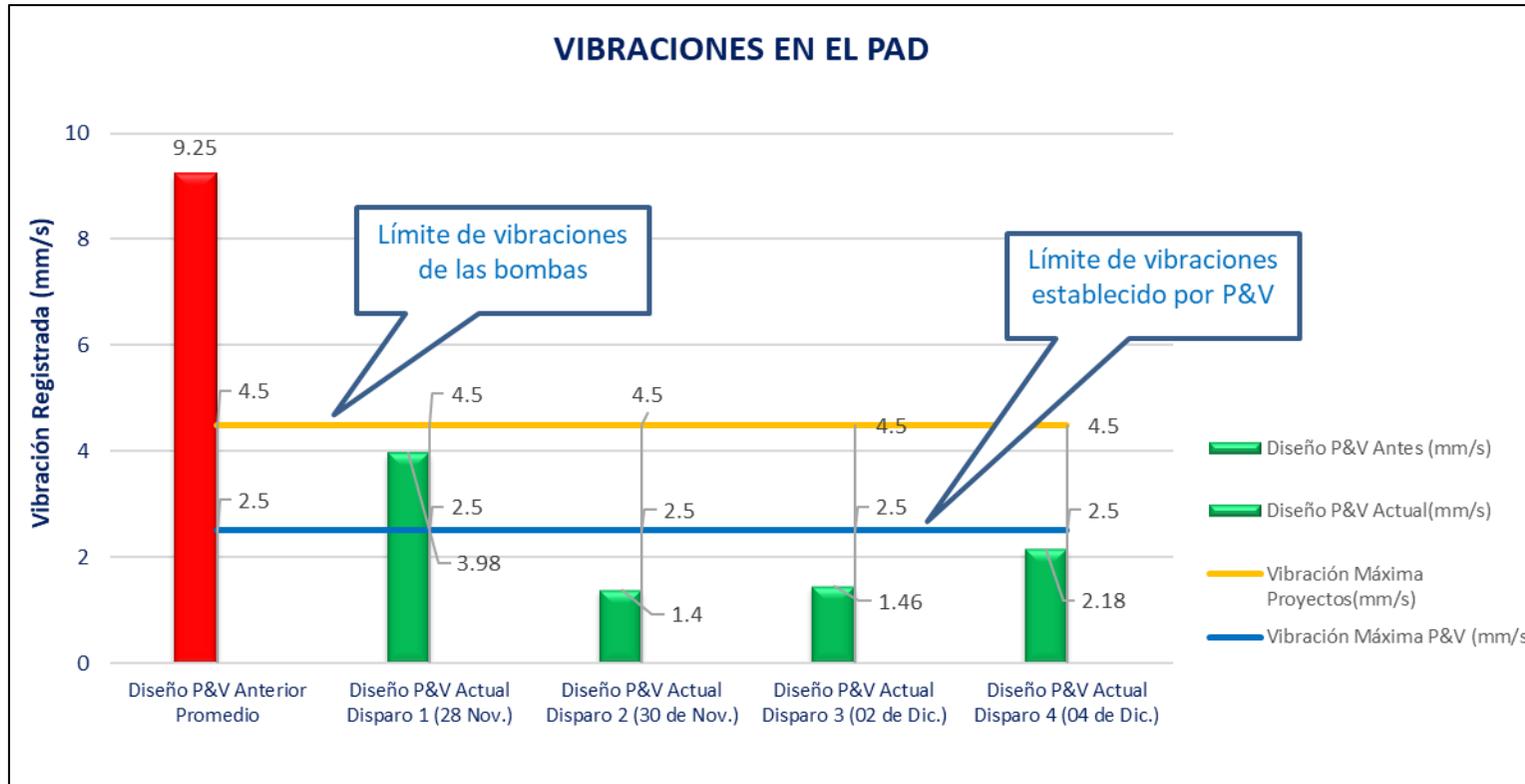
Nota. MEQ82: 80% Slurrex G + 20% NA; MEQ73: 70% Slurrex G + 30% NA

- A distancias mayores de 900m se puede disparar con el diseño de carga corrida con MEQ73 de 302Kg/tal, sin lograr sobrepasar los 2.5mm/s.
- A distancias de voladuras menores entre 625m y 725m hacia el Pad (según el modelo de campo lejano), Se recomienda perforar 03 filas de taladros con diámetro de 9 7/8 malla (8.0x9.0m²) con el diseño 02 propuesto, con la finalidad de **generar una canaleta que haga las veces filtro de vibraciones del proyecto en el disparo, en la secuencia de salida poner una pausa de 01segundo luego de la detonación de las 03 filas y reducir la carga operante usando mezcla MEQ82**, estos contribuirán en atenuar la vibración en el PAD.
- Para distancias menores a 625 metros, se recomienda cambiar el diámetro del taladro de 10 5/8" a 9 7/8" y cambiar el diseño a 8.0x9.0m² con MEQ82, de preferencia usar un explosivo menos energético **Quantex control**.

3.3. Resultados de vibraciones en el PAD

Figura 5

Vibraciones en el PAD de estudio



Nota. Vibraciones por voladura con las recomendaciones técnicas propuestas. P&V: Perforación y voladura.

Se está logrando el objetivo de controlar las vibraciones por voladura con las recomendaciones técnicas propuestas manteniéndose por debajo de 4.5mm/s desde el primer disparo.

En paralelo luego desde el segundo disparo en adelante nos mantenemos debajo de los 2.5mm/s target con 45% de factor de seguridad establecido por P&V.

Para distancias menores a 300m usar taladros de 5pulg. De diámetro cargados con **Quantex Control**.

Los taladros con agua usar carga corrida con emulsión gasificada (menor carga operante y costo vs el diseño inicial y/o usar **Quantex Control**).

La secuencia de salida de los taladros con agua, debe ser retrasada y salir **como el último taladro de la siguiente fila disparada debido a su mayor carga operante.**

3.5. Recomendación de diseño y evaluación económica

Se presentan a manera de recomendación las siguientes pautas generadas a partir de los resultados obtenidos en relación a las vibraciones ocasionadas por voladura en el PAD, para su reducción:

- De 0 metros a 300 metros de distancia a partir del PAD: Carga desacoplada con diámetro de 9 7/8” con mallas desde 7.0m x 8.0m y MEQ70/ 30, 80/20 y/o ideal para el uso de Quantex control.
- De 301 metros a 625 metros de distancia a partir del PAD: Carga desacoplada con diámetro de 9 7/8” con malla desde 7.5m x 8.5m y MEQ 70/30 y/o 80/20.
- De 326 metros a 900 metros de distancia a partir del PAD: Carga desacoplada y/o corrida con diámetro de 9 7/8” en mallas desde 7.0m x 8.0m hasta 8.0m x 9.0m, y MEQ 70/30.
- De 900 metros en adelante a partir del PAD: Usar diámetro de 10 5/8” con carga corrida y aplicar MEQ73.

3.4. Resultados de la aplicación en campo

Tabla 1

Resultados de PPV post controles

Id. Voladura	Fecha	Distancia al monitor (m)	Carga (kg)	VPP Pico. Max. (mm/s)
Tajo de estudio	08/12/2021	432	302	3.56
Tajo de estudio	09/12/2021	776	160	1.65
Tajo de estudio	10/12/2021	844	154	1.36
Tajo de estudio	15/12/2021	560	194	2.29
Tajo de estudio	16/12/2021	529	294	2.81
Tajo de estudio	17/12/2021	756	302	1.84
Tajo de estudio	21/12/2021	660	128	1.57
Tajo de estudio	21/12/2021	413	128	2.07
Tajo de estudio	22/12/2021	763	155	1.27
Tajo de estudio	27/12/2021	659	194	2.01
Tajo de estudio	28/12/2021	413	134	3.73
Tajo de estudio	30/12/2021	426	134	2.75
Tajo de estudio	02/01/2022	486	138	1.79

Tajo de estudio	03/01/2022	1020	386	1.82
Tajo de estudio	04/01/2022	1068	386	1.49
Tajo de estudio	05/01/2022	895	386	1.63
Tajo de estudio	06/01/2022	685	341	1.47
Tajo de estudio	06/01/2022	440	288	4.05
Tajo de estudio	07/01/2022	571	305	1.82
Tajo de estudio	07/01/2022	852	385	1.82
Tajo de estudio	09/01/2022	647	305	3.25
Tajo de estudio	12/01/2022	458	166	2.12
Tajo de estudio	13/01/2022	582	194	3.80
Tajo de estudio	13/01/2022	856	385	2.10
Tajo de estudio	14/01/2022	627	194	3.81
Tajo de estudio	16/01/2022	645	194	2.56
Tajo de estudio	17/01/2022	862	386	2.29

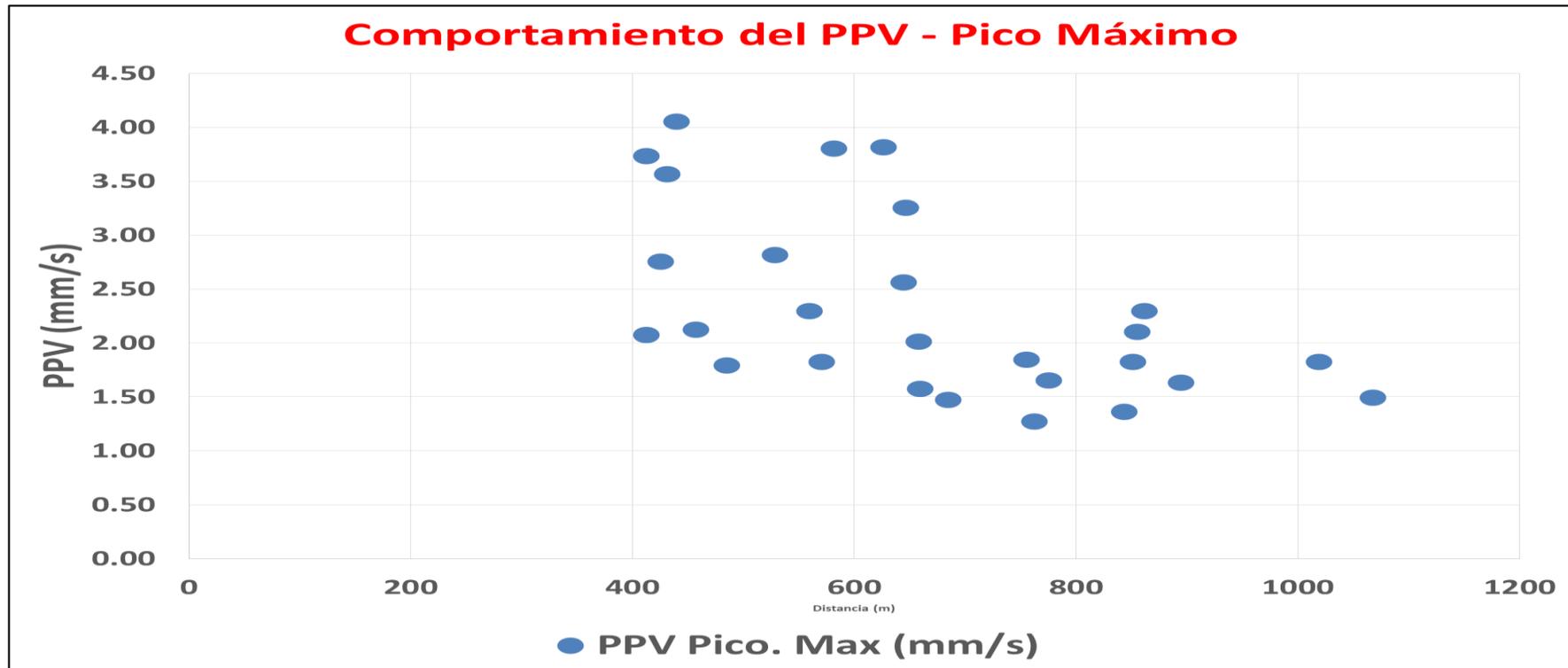
Nota. VPP: Velocidad pico partícula

La tabla representa un numerador de parámetros en términos de distancia, carga y ppv.

Nos permite tener estimaciones para la distancia del control de vibraciones.

Figura 6

Comportamiento del PPV post controles recomendados



CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En esta sección se interpreta comparativamente los resultados con estudios previos citados con los resultados de la presente investigación. Además, debe comunicarse las limitaciones.

De acuerdo a los Límites de vibraciones estructurales en el sistema para el control de daño por vibraciones de voladura al PAD de una mina a cielo abierto, 2022. la vibración por voladura no debe exceder a 4.5 mm/s (norma API-610).

Diseño de carga / Secuencia de salida por Modelado de Onda Elemental: como se muestra en la figura 4.

1. Distribuir la carga de columna explosiva para disminuir la carga operante, usar doble carga espaciada.
2. La longitud del deck debe ser cutting, debido a que las cámaras de aire producen onda de choque y estas podrían generar posible presión dinámica.
3. Para evitar presión dinámica la longitud del deck debe ser mayor a la distancia de la longitud de obtención del VOD de régimen (1m). Por lo cual se duplica y se propone 2.0 m de deck intermedio de cutting.
4. Luego de los controles antes mencionados para evitar presión dinámica se debe mantener el uso del cordón detonante como respaldo de iniciación del detonador no eléctrico.
5. Con el fin de determinar los tiempos de precisión para estos diseños de carga propuestos se propone realizar el modelo de vibraciones por Onda elemental.
6. Limitar a 130 taladros por cada disparo.

7. Ejecución Capturas de Ondas elementales.

- **Ejecución Capturas de Ondas elementales:** como se muestra en la figura 5.

El registro de vibraciones se realizó en un monitoreo lineal para:

1. Capturar 05 ondas elementales para determinar los tiempos entre deck entre cargas superior e inferior, tiempos entre taladros y tiempo entre filas, que nos permitan reducir las vibraciones.
 2. Alimentar los datos del modelo de campo lejano para ajustar los Valor de K y α .
- **Registro de las ondas elementales (30m):** como se muestra en la figura 6. Donde se evidencia en los registros: longitudes de carga pequeñas generan mayor frecuencia, longitudes de carga mayor genera menor frecuencia.
 - **Registro de las ondas elementales (60m):** como se muestra en la figura 7. Donde se evidencia en los registros: Longitudes de carga pequeñas generan mayor frecuencia, longitudes de carga mayor genera menor frecuencia.

Con lo que se presenta en lo antes ya expuesto logramos controlar las vibraciones por voladura con las recomendaciones técnicas descritas anteriormente manteniéndose por debajo de 4.5mm/s desde el primer disparo.

En paralelo luego desde el segundo disparo en adelante nos mantenemos debajo de los 2.5mm/s target con 45% de factor de seguridad establecido por P&V de una Mina a Cielo Abierto.

A distancias mayores de 900m se puede disparar con el diseño de carga corrida con MEQ73 de 302Kg/tal, sin lograr sobrepasar los 2.5mm/s.

A distancias de voladuras menores entre 625m y 725m hacia el Pad de Carachugo (según el modelo de campo lejano), Se recomienda perforar 03 filas de taladros con diámetro de 9 7/8 malla (8.0x9.0m²) con el diseño 02 propuesto, con la finalidad de generar una canaleta que haga las veces filtro de vibraciones del proyecto en el disparo, en la secuencia de salida poner una pausa de 01segundo luego de la detonación de las 03 filas y reducir la

carga operante usando mezcla MEQ82, estos contribuirán en atenuar la vibración en el PAD.

Para distancias menores a 625 metros, se recomienda cambiar el diámetro del taladro de 10 5/8" a 9 7/8" y cambiar el diseño a 8.0x9.0m² con MEQ82, de preferencia usar un explosivo menos energético **Quantex control**.

Para distancias menores a 300m usar taladros de 5pulg. De diámetro cargados con **Quantex Control**.

Los taladros con agua usar carga corrida con emulsión gasificada (menor carga operante y costo vs el diseño inicial y/o usar **Quantex Control**).

La secuencia de salida de los taladros con agua, debe ser retrasada y salir **como el último taladro de la siguiente fila disparada debido a su mayor carga operante**.

Mantener los diseños de carga con factor 0.189Kg/ton y los tiempos determinados por el modelo de Onda Elemental validados en los disparos con (Tiempo entre deck 42ms, tiempo entre taladro 17ms y detonación de taladro a taladro), como una sola gran fila larga con pausas de 01segundo cada 45 taladros.

Mantener el uso del cordón detonante como respaldo para prevenir presión dinámica.

Alimentar continuamente los registros de vibraciones al modelo de vibraciones de campo lejano, con la finalidad de predecir vibraciones y ver opciones diferentes de diseños de carga.

Cumplir operativamente con los diseños de P&V propuestos.

Conclusiones:

Las vibraciones generadas por el proceso de voladura en el tajo de una mina a cielo abierto, reducen significativamente a partir de la aplicación de la técnica Deck de Cutting, obteniéndose como resultado valores de velocidad pico

partícula por debajo del límite máximo permitido (4.5 mm/s) establecido en la guía Installation, Operation and Maintenance Manual (ITT inc) , lo que significa que la bomba ubicada en el PAD no se verá afectada por las vibraciones.

Para lo cual se utilizó los siguientes diseños de carga:

Diseño taladro 1: con 0.195kg/ton,321kg, tiempo 1: 1,000ms y tiempo 2: 0ms.

Diseño taladro 2: con 0.195kg/ton,321kg, tiempo 1: 3000ms y tiempo 2: 2000ms.

Diseño taladro 3: con 0.211kg/ton,347kg, tiempo 4000ms.

Están serían las cantidades exactas de explosivo al aplicar la técnica Deck de Cutting para el control de daño por vibraciones de voladura al PAD de una mina a cielo abierto, 2022. Y evitar ocasionar a las bombas de rebombeo del Pad y permitir la continuidad de la operación en mina; de tal manera que, al sumar las ondas elementales generadas por los taladros, nos dé un registro de vibraciones con el menor nivel de vibraciones y sin atañer el costo beneficio del área.

Para lo cual se realizó 4 pruebas de voladura:

Primera voladura: tajo 1 nivel 3990,109 taladros, vibración a 671m con velocidad 3.98mm/s.

Segunda voladura: tajo 1 nivel 3990,109 taladros, vibración a 730m con velocidad 1.4mm/s.

Tercera voladura: tajo 1 nivel 3990,118 taladros, vibración a 769 m con velocidad 1.46mm/s.

Cuarta voladura: tajo 1 nivel 3990,127 taladros, vibración a 630m con velocidad 2.18 mm/s.

Para lo cual determinamos los tiempos de retardos, mediante el software “Blastware” para la aplicación de la técnica Deck de Cutting para el control de daño por vibraciones de voladura al PAD de una mina a cielo abierto, 2022.

También se evaluó los tiempos de retardos entre deck 42 ms, tiempo entre taladros 17ms y tiempo entre filas 169ms permitieron la adecuada aplicación de la técnica Deck de Cutting para la reducción de vibraciones y minimización de daños al PAD.

REFERENCIAS

- Acosta, J., Quiroz, E., Pereyra, O., y Ventura, A. (2022). Reducción de vibraciones hacia comunidades mediante control de retardos. *Instituto de Ingenieros de Minas del Perú*. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/PERM35-459.pdf>
- Araujo, M. D. (2021). *Evaluación de la eficiencia de filtro de pre corte en la reducción de vibraciones por voladura en minera Yanacocha* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional de Cajamarca.
- Arias, J. (2020). *Técnicas e instrumentos de investigación científica*. ENFOQUES CONSULTING EIRL.
- Arias-Gómez, J., Villasís-Keever, M. A. y Miranda-Novales, M. G. (2016). El protocolo de investigación III: la población de estudio. *Revista Alergia México*, 63(2), 201-206. <https://doi.org/10.29262/ram.v63i2.181>
- Barbosa, J. y Vallejo, A. (2019). *Análisis de la afectación por vibraciones de la cantera “La Roca” en zonas cercanas a poblaciones* [Tesis de Pregrado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional – Universidad Católica de Colombia.
- Barrios, M. A. (2020). *Descripción de efectos ambientales de las voladuras de rocas en mina y su mitigación* [Informe por servicios profesionales]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Cano, J. (2019). *Estudio de vibraciones para la selección de explosivo óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. Filial de Hochschild* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.
- Castro-Maldonado, J. J., Gómez-Macho, L. K. y Camargo-Casallas, E. (2023). La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI. *Tecnura*, 27(75). <https://doi.org/10.14483/22487638.19171>
- Cheng, X., Li, H. G., Han, R. Z., Meng, X. D., Zhou, J. R., Duan, L. H., Peng, Y., Zheng, J., Fu, L., Lu, X., Zhang, H. B., Liu, Y. P. y Huang, C. H. (2019). Blasting cushion pad

- of reducing vibration start a new era of decreasing disaster in civil and mining engineering explosion with micro-damage. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 351, 1-9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/351/1/012034>
- Cumpa, J. (2016). *Efecto de las Cámaras de Aire en Taladros de Producción para Mejorar la Fragmentación del Material y Reducir el Nivel de Vibraciones por Voladura en Minería a Tajo Abierto en el Norte del Perú, 2016* [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional – Universidad César Vallejo.
- Cvetkovic-Vega, A., Maguiña, J., Alonso-Soto, Lama-Valdivia, J. y Correa-López, L. (2021). Estudios transversales. *Rev. Fac. Med. Hum*, 21(1), 179-185. <https://doi.org/10.25176/RFMH.v21i1.3069>
- De Cospedal, J. (2019). *Utilización de la medida de vibraciones en voladura para el conocimiento de los daños al macizo rocoso* [Tesis de Doctorado]. Repositorio Institucional – Universidad Politécnica de Cartagena.
- De los Santos, P. (2016). *Comparación de normas internacionales para su aplicación en la Republica Dominicana en voladuras* [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Catalunya]. Repositorio Institucional – Universidad Politécnica de Catalunya.
- Goulds Pumps. (2015). *Installation, operation and maintenance manual*. (11^a ed.) ITT Corporation.
- Guerra, C. A., Altamirano, H. M. y Villalobos, C. (2022). Gestión de la percepción de voladuras con un enfoque social y eficiencia operativa en Unidad Minera La Arena. *Instituto de Ingenieros de Minas del Perú*. <https://catalogobiblioteca.ingemmet.gob.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=50699>
- Guevara, G., Verdesoto, A. y Castro, N. (2020). Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). *RECIMUNDO*, 4(3), 163-173. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(3\).julio.2020.163-173](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(3).julio.2020.163-173)
- Hernández, G. (2021). Aproximación a los distintos tipos de muestreo no probabilístico que existen. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 37(3), 1-3.

- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw Hill España. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008>
- Hernández, R. y Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas: cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mc Graw Hill – educación.
- Hosseini, S., Khatti, J., Taiwo, B. O., Fissaha, Y., Grover, K. S., Ikeda, H., Pushkarna, M., Berhanu, M. y Ali, M. (2023). Assessment of the ground vibration during blasting in mining projects using different computational approaches. *Scientific Reports*, 13(18582). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46064-5>
- Medina, M., Rojas, R., Bustamante, W., Loaiza, R., Martel, C. y Castillo, R. (2023). *Metodología de la investigación: Técnicas e instrumentos de investigación*. Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C. <https://doi.org/10.35622/inudi.b.080>
- Ministerio de Energía y Minas. (2020). *Reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería*. MINEM.
- Pradatama, D., Pradasara, C. y Isnaya, S. (2021). The application of “line drilling” and “buffer holes” methods to reduce blasting vibration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 882. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/882/1/012057>
- Rakhmangulov, A., Burmistrov, K. y Osintsev, N. Selection of Open-Pit Mining and Technical System’s Sustainable Development Strategies Based on MCDM. *Sustainability*, 14(13), 1-31. <https://doi.org/10.3390/su14138003>
- Saadat, M., Khandelwal, M. y Monjezi, M. (2014). An ANN-based approach to predict blast-induced ground vibration of Gol-E-Gohar iron ore mine, Iran. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.11.001>
- Singh, P. K., Roy, M. P., Paswan, R., Dubeyb, R. K. y Drebenstedtc, C. (2015). Blast vibration effects in an underground mine caused by open-pit mining. *International Journal or Rock Mechanics and Mining Sciences*, 80, 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.09.009>

- Suárez, H. y Torres, O. (2015). *Sistema autónomo de monitoreo remoto para la optimización del registro de vibraciones en procesos de voladuras en minería y construcción civil* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio Institucional - Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- Velásquez, G. (2020). Problemas medioambientales de la minería aurífera ilegal en Madre de Dios (Perú). *Observatorio Medioambiental*, 23, 229-241. <http://dx.doi.org/10.5209/OBMD.73177>
- Yin, Z., Hu, Z., Wei, Z., Zhao, G., Ma, H., Zhang, Z. y Feng, R. (2018). Assessment of Blasting-Induced Ground Vibration in an Open-Pit Mine under Different Rock Properties. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2018/4603687>
- Zafra, D. ONDAS SÍSMICAS, su importancia para la geofísica y la humanidad. *Universidad Industrial de Santander*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20029.08168>
- Zúñiga-Arrobo, C. A., Rojas-Villacís, C. A., Rosero-Padilla, C. D., Fernández-Suárez, L. G. y Idrovo-Palomeque, J. P. (2024). Velocidad de detonación del explosivo, vibración y ruido en pequeña minería subterránea, Zaruma – Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y desarrollo*, 17(1), 26-42. <https://doi.org/10.29166/revfig.v17i1.4634>

ANEXOS

FIGURA 1: ONDAS PRIMARIA O LONGITUDINALES “P”



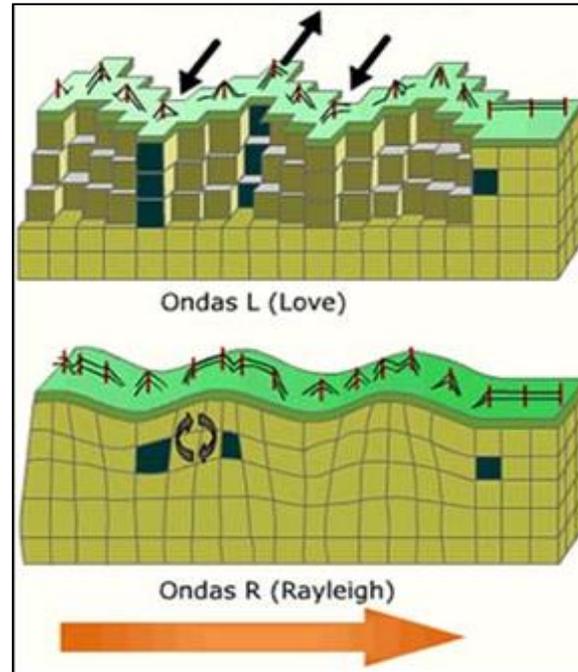
Nota. Adaptado de “Comparación de normas internacionales para su aplicación en la República Dominicana en voladuras” (p. 9), por De los Santos, 2016.

FIGURA 2: ONDS SECUNDARIAS Y TRANSVERSALES “S”



Nota. Adaptado de “*Comparación de normas internacionales para su aplicación en la Republica Dominicana en voladuras*” (p. 9), por De los Santos, 2016.

FIGURA 3: ONDAS SUPERFICIALES



Nota. Adaptado de “Utilización de la medida de vibraciones en voladura para el conocimiento de los daños al macizo rocoso” (p. 46), por De Cospedal, 2019.

Cueva Esquivel, E; Cueva Esquivel, R.	Pág. 56
---------------------------------------	--------------------------



Foto 1: Taladros cargados para las pruebas en el tajo.



Foto 2 :taladros listo para iniciar las pruebas.



Foto 3: Investigador 1 en el área de investigación.



FOTO 4: Investigador 2 en oficinas del proceso de datos.



FOTO 5: Iniciación del proceso de voladuras.