



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**Diseño de un Modelo Predictivo a partir de un estudio de
vibraciones en una voladura en una Mina modelo**

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO DE MINAS

Presentado por los bachilleres:

STEFANIE MARYBELL ORIHUELA CASTILLO

JOSÉ RAÚL DAPELLO VIZCARRA

Asesor:

ING. MARIO CEDRÓN LASSUS

Lima, Junio 2009

RESUMEN

El objetivo principal del presente proyecto es hallar un modelo del alcance de las ondas vibratorias, producto de una voladura, para un terreno determinado, mediante datos reales obtenidos de los diferentes ensayos realizados. De la misma manera, se complementará realizando una comparación entre los cálculos efectuados con la data real y los resultados teóricos.

Se comenzará un primer capítulo describiendo algunas características generales de las ondas vibratorias, desde sus tipos hasta la manera en que pueden afectar estructuras de diferentes materiales. Además, se realizará una breve revisión sobre las legislaciones que se rigen actualmente alrededor del mundo, las cuales se encargan de establecer los niveles permisibles de vibraciones en toda actividad minera.

En un segundo capítulo se analizará más selectivamente la ley de transmisividad, donde se realizarán los respectivos cálculos teóricos mediante el uso de fórmulas y ecuaciones diseñadas para aproximarse a la realidad.

El tercer capítulo se centrará en el análisis empírico del proyecto, desde la toma de datos (detallando todos los implementos utilizados y ubicaciones exactas) hasta la selección y organización adecuada de cada uno de los resultados obtenidos en las diferentes voladuras realizadas.

El cuarto capítulo será sobre el desarrollo y todos los procedimientos efectuados para llegar al modelo predictivo del comportamiento de las ondas vibratorias en el terreno de ensayos, la mina modelo. Asimismo, ya habiendo realizado la regresión correspondiente, se mostrarán las aplicaciones que se le pueden dar y se discutirán las ventajas que implicaría la realización de dicho modelo.

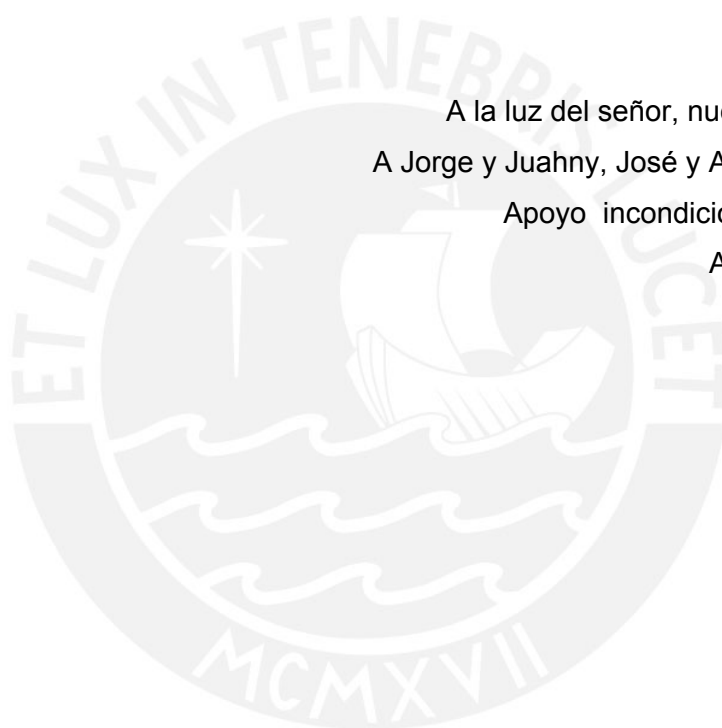
En el quinto y último capítulo se analizará todo el proyecto en conjunto. Una vez que se obtuvieron todos los resultados y los cálculos necesarios, tanto los teóricos como los hallados en los ensayos, se podrán trabajar con las conclusiones y determinar las observaciones pertinentes.

En conclusión, el siguiente trabajo se concentra en el análisis y monitoreo de las vibraciones, resultado de ciertas pruebas de voladura en la mina modelo; dicha data será correctamente clasificada y ordenada. De esta manera, mediante un ajuste cuadrático se podrán hallar las incógnitas de una ecuación base (“k” y “b”) usadas para la predicción de las velocidades pico partícula (VPP), las cuales dependerán de un terreno y circunstancias específicas.

Poder hallar las incógnitas “k” y “b” no solo permite obtener datos más cercanos a la realidad en el momento de predecir las VPP para un evento en particular, sino también, hace posible enfrentar futuros problemas con las normas reguladoras de vibraciones, tanto con el daño en estructuras cercanas a dicho terreno o efectos negativos en las personas a sus alrededores.

Dedicatoria

A la luz del señor, nuestro guía y maestro,
A Jorge y Juahny, José y Ana, nuestros padres,
Apoyo incondicional y desinteresado,
A nuestros hermanos.



INDICE

PRÓLOGO 1

INTRODUCCIÓN 3

OBJETIVOS 6

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES, NORMATIVA DE CONTROL DE VIBRACIONES

1.1 Generalidades 7

 1.1.1 Definición de vibraciones 7

 1.1.2 Tipos de Ondas 8

 1.1.3 Velocidad de Partícula 9

 1.1.4 Efectos de la voladura 11

 1.1.4.1 Análisis de la Velocidad Pico Partícula 12

 1.1.4.2 Análisis de Frecuencias 13

1.2 Normativa de Control de Vibraciones 14

 1.2.1 Normativas Internacionales 15

 1.2.1.1 U.S Bureau of Mines (USBM) 17

 1.2.2 Legislaciones Locales 20

CAPÍTULO 2

3.2.2 Resultados Finales de las Pruebas	44
---	----

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN, CREACIÓN Y APLICACIÓN DEL MODELO PREDICTIVO

4.1 Análisis de la información	47
4.1.1 Velocidad Pico Partícula y Frecuencia	47
4.2 Generación del modelo predictivo	50
4.2.1 El Escalador	50
4.2.2 Creación del modelo	54
4.2.3 Comparación del modelo predictivo con los modelos Australianos	58
4.1 Aplicación del Modelo	63

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

5.1 Conclusiones	69
5.2 Observaciones	71

BIBLIOGRAFÍA	73
---------------------------	-----------

PRÓLOGO

Con el tiempo, la voladura se ha convertido en uno de las técnicas más utilizadas en la industria de construcción civil, extracción de materiales (tanto en canteras como en minería) y demoliciones. Al mismo tiempo, las voladuras son la forma más común de generación de vibraciones y son estas las causantes de varios problemas ambientales y sociales, profundizándose de esta manera las contradicciones en relación sociedad-naturaleza.

Es Imprescindible tener claro ciertos parámetros con respecto a dichas vibraciones; el correcto conocimiento de su origen, la medición de ciertas magnitudes fundamentales, los fenómenos existentes relacionados a su transmisión, la actual legislación que las regula, entre otros, serán pautas importantes para identificarlas, controlarlas, reducirlas e incluso lograr hacerlas imperceptibles, tanto para las personas como para las estructuras cercanas que eventualmente podrían verse afectadas por ellas.

Lo que se busca principalmente es hallar un modelo mediante ensayos reales (disparo de cargas y medición de vibraciones) que pueda ayudarnos a obtener la ley de la transmisividad de un terreno específico, que viene a ser el nivel de vibración recibida en un punto y expresado como valor de velocidad de vibración, para así poder predecir los niveles de vibraciones con el objeto de poder delimitarlas y garantizar que no se alcanzará en ningún caso, los límites permisibles establecidos por la legislación que se rija en el momento.

Por otro lado, también se desea prever el caso en que una voladura pueda arrojar como resultado niveles de vibraciones superiores a los límites exigidos, lo cual traería problemas legales y sociales.

La mayor importancia de tener un modelo que nos permita planear y controlar nuestras voladuras radica en tener el poder para “encontrarnos delante de los problemas...” y no “reaccionar frente a los problemas...”, lo cual debería ser el objetivo de todo profesional de la ingeniería a lo largo de su actividad laboral, utilizando ciencia e ingenio para llegar a los mejores resultados en calidad, costo y tiempo.

Se espera que dicho trabajo cumpla con los objetivos trazados, se agradece sinceramente a la Universidad Colorado School of Mines que permitió realizar todos los ensayos en la Mina modelo y brindó todos los materiales necesarios para poder culminar satisfactoriamente la parte práctica de este proyecto.

Asimismo, se agradece al Dr. Vilem Petr, ingeniero experto en explosivos, quien supervisó cada una de las pruebas; al Ing. Mario Cedrón, asesor de esta tesis, a los profesores de la Pontificia Universidad Católica del Perú y a todos aquellos que guiaron esta investigación y permitieron profundizar en el tema.

INTRODUCCIÓN

La voladura es usada con bastante frecuencia en la industria, la razón fundamental es que esta técnica continúa siendo la más barata y la que permite obtener mayores producciones de material arrancado, superiores a cualquier medio de arranque mecánico alternativo como lo son: martillos demoledores, rozadoras, excavadoras hidráulicas o tractores. Uno de los principales inconvenientes de su utilización es que, como consecuencia directa, se produce la generación de vibraciones en el medio circundante además de otros problemas medioambientales como ruido, onda aérea, polvo y/o proyecciones; y esto se atenúa con la existencia de vida animal o humana a los alrededores.

La energía de los explosivos desde hace mucho es utilizada para cumplir diferentes tipos de trabajo, por ejemplo: en la minería su objetivo principal es quebrar la roca, en la industria de la soldadura se usa para unir dos materiales disimilares, y así existen una diversidad de casos. Sin embargo, mediante el análisis de la eficiencia resultante de una voladura, podemos observar, que la energía no es utilizada en su totalidad en el momento de realizar su trabajo, como resultado, parte de esta energía será liberada en forma de vibraciones y airblast.

Hasta el momento se han realizado varias investigaciones con el fin de poder predecir los niveles de las vibraciones producto de una voladura; desde el año 1930, el US Bureau of Mines ha puesto grandes esfuerzos en investigar con profundidad varios aspectos que se encuentren involucrados directa o indirectamente con en el tema. Todos estos estudios son realizados con el principal objetivo de no solo evitar que los

niveles de vibraciones de ciertas voladuras excedan a los límites preestablecidos, sino también, con el fin de poder evitar problemas sociales, ya que dichas vibraciones además de causar fallas en ciertas estructuras también generan malestar a las personas que viven cerca a alguna operación minera.

Para poder crear el modelo predictivo de VPP de las vibraciones se realizaron todos los ensayos necesarios en una zona de pruebas en la mina modelo, puesta en funcionamiento en el año 2007. Esta mina escuela se encuentra a pocos metros de la ciudad de Idaho Springs y es utilizada para realizar pruebas de voladura y además simulaciones de actividades mineras.

Existen varios cálculos y ecuaciones que son usados para el análisis de los posibles VPP a obtener en una voladura, sin embargo, se ha querido crear un único modelo predictivo para la mina modelo, dado que cada modelo difiere de cualquier otro debido a las características exclusivas del terreno y eficiencia del explosivo, y además, estos ensayos fueron realizados en la superficie, es decir, los explosivos y accesorios no se encontraban confinados. Estos detalles hacen una diferencia bastante grande, el hecho de realizar todos los cálculos pertinentes utilizando constantes preestablecidas teóricamente, arrojaría información poco confiable debido a las distintas características de la prueba.

Desde que la zona de pruebas fue habilitada, se han realizado diferentes proyectos relacionados con la investigación del funcionamiento de los explosivos, distribución de energía, usos adecuados de ciertas mezclas y mejoras de eficiencia; del mismo modo, cada prueba realizada debía ser debidamente monitoreada y almacenada junto con los reportes, sin embargo, ninguno de los datos recopilados fue ni analizado

correctamente ni agrupado adecuadamente para poder crear, posteriormente, un modelo predictivo para dicha mina modelo.

Por tal motivo, con la intención de evitar utilizar los modelos teóricos habituales, se decidió realizar algunas pruebas para así obtener resultados más acertados y afines a la realidad, pudiendo demostrar el hecho de que siendo esta mina un lugar de pruebas e investigaciones prácticas, es bastante improbable que se lleguen a sobrepasar los límites permisibles establecidos por las normas americanas, el US Bureau of Mines; y por ende, sería poco factible registrar daños en las estructuras vecinas.



OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es poder desarrollar mediante el manejo de diferentes herramientas, un modelo predictivo que pueda ser usado como guía para futuras voladuras en la mina modelo. Sin embargo, para el logro de dicho objetivo es importante mencionar ciertos objetivos secundarios, los cuales serán fundamentales para lograr los resultados esperados.

Objetivos secundarios:

- Medición de la velocidad pico partícula (VPP) y la frecuencia de las vibraciones en el terreno, generadas por la voladura.
- Comparación de los valores obtenidos de los ensayos con aquellos que son resultado de ecuaciones netamente teóricas.
- El diseño de un gráfico que represente las áreas de riesgo y la carga máxima permisible en la mina modelo, para que la presencia de vibraciones no sobrepase los límites establecidos, en este caso, por el US Bureau of Mines.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES Y NORMATIVA DE CONTROL DE VIBRACIONES

1.1 Generalidades

1.1.1 Definición de Vibraciones

Las vibraciones vienen a ser un fenómeno de transmisión de energía que se refleja en la propagación de un movimiento ondulatorio a través de un medio. La detonación de un explosivo contenido en un taladro localizado en un macizo rocoso genera de una forma casi instantánea un gran volumen de gases a altas temperaturas y elevadas presiones. La aplicación brusca de estas presiones tan elevadas sobre las paredes del taladro simula un choque o impacto brusco, provocando en cada punto del macizo deformaciones axiales y tangenciales en diferentes direcciones, produciendo de esta manera la rotura del macizo en sus proximidades.

Como es de esperarse el explosivo trabaja con una determinada eficiencia, lo que nos muestra que no toda la energía es utilizada para causar rotura sino un porcentaje de esta es liberada al ambiente propagándose a través del macizo rocoso, napa freática y aire; desplazándose a diferentes velocidades. La amplitud de este movimiento ondulatorio disminuye a medida que nos alejamos del punto principal de detonación.

1.1.2 Tipos de Ondas

El fenómeno de las vibraciones por efecto de una voladura busca ser descrito por algunas ecuaciones clásicas de ondas elásticas, sin embargo, aunque hasta la fecha es el modelo simplificado que mejor se adecúa para el análisis de este fenómeno, estos cálculos no son totalmente confiables debido a ciertos problemas como atenuación, dispersión, superposición y cambio de longitud de onda que suelen manifestarse. Básicamente podemos separar en dos grupos los tipos de ondas elásticas (Anexo 1):

- Ondas internas, las cuales se propagan por el interior del macizo. Dentro de este grupo encontramos a las ondas longitudinales, de compresión o principales P, aquellas que provocan la oscilación de las partículas en la misma dirección de la propagación de la onda; y las ondas transversales, de cizalladura o secundarias S, caracterizadas por provocar la oscilación de las partículas en una dirección transversal a la dirección de la propagación de la onda.
- Ondas de superficie, transmitidas únicamente por la superficie del macizo. Dentro de este grupo tenemos las ondas Rayleigh (R), las cuales originan oscilaciones elípticas en el plano donde se propagan y tienen como efecto la compresión, dilatación y cizalla; y las ondas Love (L), su velocidad es bastante similar a las ondas R y de la misma manera originan oscilaciones elípticas.

Los frentes de cada una de las ondas tiene un forma diferente, las ondas P se propagan por tracciones y compresiones sucesivas del medio, y en el momento que alcanzan una superficie libre o cambian del medio donde se encontraban, influidas por esta discontinuidad, sufren el fenómeno de reflexión y refracción originándose las ondas S. Un ejemplo bastante común de cambio de medio, sobre todo en el tema de la voladura en la minería, sería el de pasar de un estrato geológico a otro muy diferente. Estas ondas P y S se propagan en todas las direcciones, también son conocidas con el nombre de ondas de volumen. En las interfaces del terreno las ondas de volumen dan lugar a las ondas de superficie, las cuales se propagan en ese límite. Por lo tanto, estas ondas superficiales tienen dos orígenes, la propia detonación del explosivo y el rebote de las ondas internas al incidir sobre la superficie.

Una característica principal de las ondas de superficie es que poseen frecuencias más bajas que las de volumen, siendo la onda R la más común y con mayor energía transportada, por lo que representa un mayor peligro para las estructuras.

1.1.3 Velocidad de Partícula

Analizando el fenómeno de las vibraciones, es importante hacer una distinción entre dos aspectos que aunque son bien diferenciados, suele caerse en el error de confundirlos y hasta usarlos equivocadamente al momento de realizar ciertos cálculos. Nos referimos a la propagación o transmisividad de la vibración por el

medio, y al movimiento propio que genera el paso de dichas vibraciones en cada una de las partículas por dicho medio. Por lo tanto, es fundamental comprender que existe una separación entre los conceptos de velocidad de propagación (velocidad con la que la vibración se propaga por un medio) y la velocidad de partícula (aquella relativa a las oscilaciones que experimenta la partícula, excitada por el paso de la onda de energía vibratoria).

Gráficamente, se puede apreciar con mayor claridad la diferencia existente entre las definiciones de velocidad de propagación y de partícula.

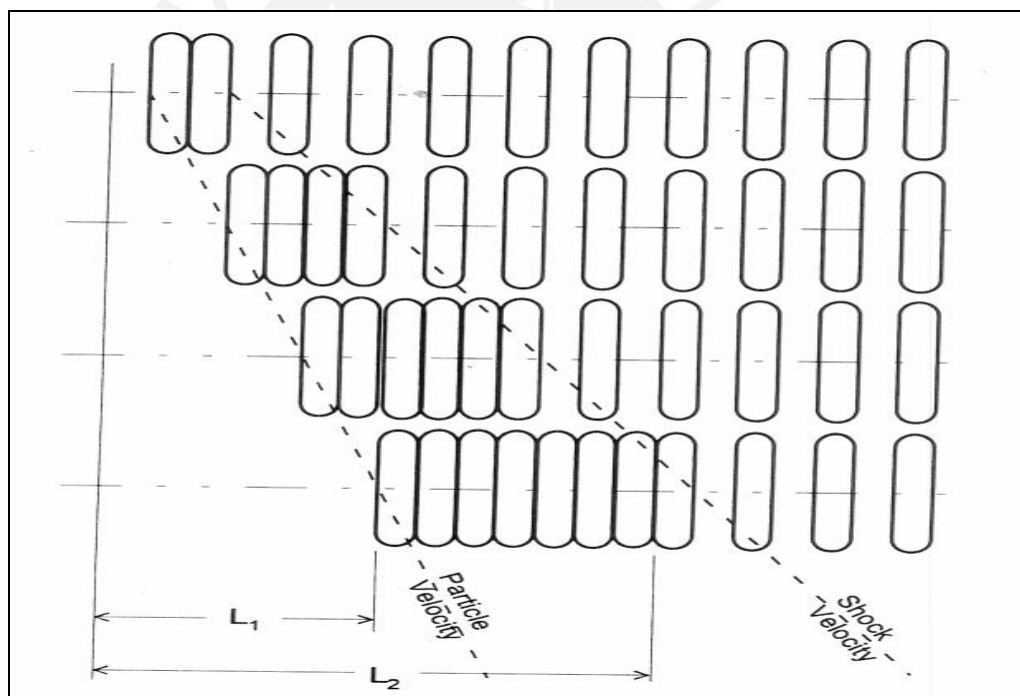


FIGURA 1. Análisis de la Velocidad de partícula y de Propagación. Tomado de presentación “Shock Waves”, Dr. Eric Rinehart (Defense Threat Reduction Agency)

Como se ha mencionado anteriormente, una partícula sometida a una vibración experimenta un movimiento oscilante del cual es importante poder registrar ciertos parámetros medibles que se presentan, como lo son: desplazamiento, velocidad, aceleración de partícula y la frecuencia del movimiento ondulatorio. Conociendo cualquier pareja de estos parámetros, es posible deducir el valor que tendrán los restantes.

1.1.4 Efectos de la Voladura

En general, las voladuras generan vibraciones en el macizo rocoso, las cuales pueden tener diferentes efectos negativos sobre infraestructuras (desde edificios hasta centrales hidroeléctricas), y además, ocasionar daños a las mismas estructuras de la masa rocosa, como fallas y diaclasas, las cuales podrían dar origen a deslizamientos en los bancos de minas a cielo abierto; todos esto puede traer consecuencias graves, tanto a la maquinaria como a los trabajadores.

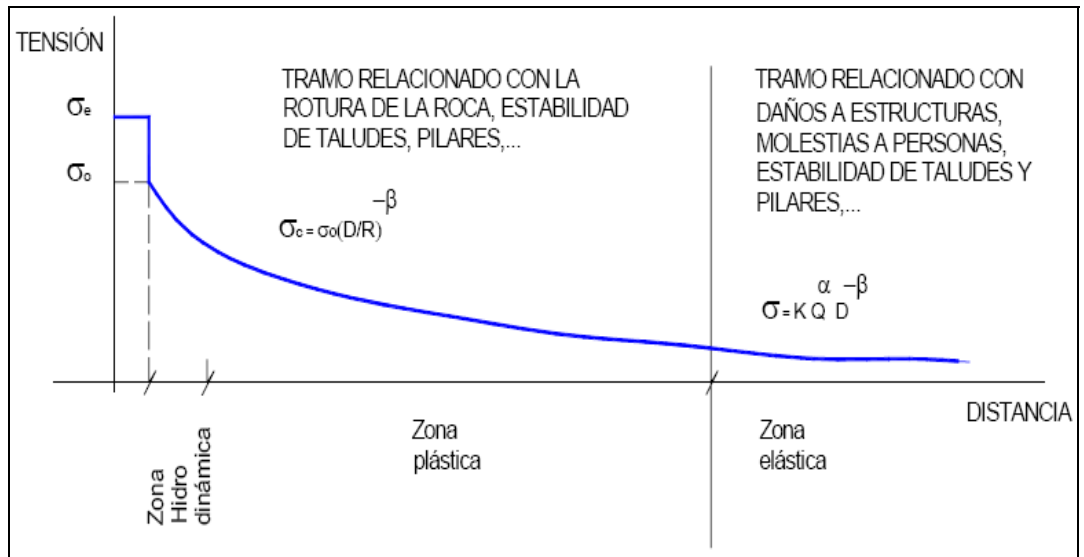


GRÁFICO 1 Detalles de la las partes analizadas en la trayectoria de una onda vibratoria. Tomado de la presentación de la Unión Española de explosivos

Los análisis de la velocidad pico partícula y las frecuencias influyen directamente con el estudio de los efectos en una voladura.

1.1.4.1 Análisis de la Velocidad Pico Partícula

Al efectuar la medición del nivel de vibraciones es necesario definir qué magnitud física debe de ser cuantificada, entre las cuales tenemos el desplazamiento, la velocidad y la aceleración. Las velocidades Pico Partícula o también llamadas VPP, están definidas como el valor máximo de cualquiera de las tres magnitudes mencionadas que varía durante cierto intervalo de tiempo. De todos los parámetros mencionados, universalmente, se considera a la velocidad de vibración como la mejor representante del nivel de una vibración y los daños que pueda causar, tanto a edificaciones como a personas.

Los efectos en una voladura están referidos a la cantidad de vibraciones producidas en una masa rocosa, las cuales son medidas mediante las velocidades sísmicas. Por tal motivo, se puede encontrar una relación directa entre la naturaleza del daño producido por dichas vibraciones y la velocidad pico partícula, medida en el disparo de la voladura.

Generalmente, los límites propuestos por distintas normativas son establecidos en base a las medidas de las VPP (Velocidad Pico Partícula), por lo que, la correcta medición y almacenamiento de este parámetro no solo es considerado importante, sino también crítico para cualquier operación minera.

1.1.4.2 Análisis de Frecuencias

Por otro lado, no solo el valor de la VPP es el único índice de la peligrosidad con respecto a una estructura de una vibración, sino también, se puede considerar la frecuencia de la misma.

Las dos principales respuestas de una estructura respecto a las vibraciones dependerán del nivel de la frecuencia, para rangos de frecuencias altas los componentes individuales de las estructuras vibran, dicho movimiento es conocido como la “respuesta midwall”; en el caso de tener rangos de frecuencias bajas, se puede producir un movimiento total de la estructura, debido a su frecuencia natural baja de oscilación, la cual normalmente se encuentra entre los rangos de 5 - 20 Hz.

En este último caso, el daño se origina debido a que la frecuencia de onda, producida en un disparo en una voladura, resulta ser igual a la frecuencia natural de dicha estructura; esto originaría la máxima absorción de energía por parte de la estructura y aumentarían las probabilidades de que se puedan causar daños en la misma.

Por este motivo, es muy importante poder determinar cuáles son las frecuencias que participan en el tren de onda generado por la voladura; sin embargo, un tren de onda puede contener diferentes niveles de frecuencias, por lo que es necesario calcular cuáles son las frecuencias que más dominan en dicho tren y eso se puede hacer hallando el espectro de frecuencias del mismo.

1.2 Normativa de Control de Vibraciones

En todos los países del entorno Europeo y en la mayoría de los países desarrollados existen normativas específicas que tienen como finalidad regular las vibraciones generadas por la práctica de diferentes actividades, proponiendo criterios de limitación de las mismas, e incluso, en ciertos casos, brindando pautas sobre el mejor procedimiento a seguir si se va a realizar un proyecto que lleve implícito el uso de explosivos.

Los límites admisibles establecidos por estas organizaciones equivalen a patrones ambientales, los cuales deben ser respetados por toda empresa minera. Estos límites

son similares a los patrones de calidad de aire y del agua, todos equivalen al concepto de capacidad de asimilación del medio.

1.2.1 Normativas Internacionales

Trabajos realizados en diversos países Europeos, en Canadá, USA y en Australia propusieron diferentes valores de velocidad máxima de partícula, tratando de esta manera evitar daños a construcciones. Los valores propuestos se sitúan usualmente entre el rango de 10 – 50 mm/s.

Las normas internacionales de los países del entorno Europeo más destacadas son las siguientes:

- Alemania: DIN 4150
- Francia: GFEE
- Gran Bretaña: BS 7385
- Suecia: SS460 48 66
- Portugal NP-2074
- Internacional: ISO 2631
- Estados Unidos: USBM RI 8507
- Norma Unión Europea
- Otros

En la mayoría de estas normas, los criterios generales de limitación de vibraciones son bastante parecidos. Entre dichos criterios podemos resaltar los siguientes:

- Variación de la velocidad de vibración límite (VPP) con la frecuencia, de forma directamente proporcional a la misma.
- Consideración de varios tipos de estructuras generales distintas (según el nivel de resistencia adherido en el momento de su construcción) y exclusión de ciertas estructuras especiales como lo son túneles, puentes, represas, entre otros.
- Establecimiento de unos criterios de cálculo de la frecuencia predominante basados en hallar el espectro de frecuencias mediante un análisis FFT de los registros de vibraciones.

A pesar de las similitudes en los criterios utilizados para la determinación de los diferentes límites, cada norma posee algún rasgo que la hace peculiar y que de la misma manera, suele representar alguna circunstancia particular del país o zona de origen. Por ejemplo, podríamos mencionar algunos casos como: la consideración especial de las varias casas de madera existentes en EEUU, la alta frecuencia del número de voladuras en Suecia, la ponderación por factores socioculturales en Gran Bretaña, entre otros.

1.2.1.1 U.S Bureau of Mines (USBM)

El USBM es una organización líder en el campo de la investigación de los efectos de una voladura, analizando desde hace varias décadas la generación de vibraciones, su propagación y el impacto que tienen en las diferentes estructuras que existen (Anexo 2).

Una de las primeras investigaciones relacionadas a las vibraciones producto de voladuras consistió en hacer detonar cierta cantidad de explosivo en un desmante de rocas, para posteriormente, medir los daños causados en las estructuras cercanas. Este fue el inicio de un programa de investigaciones por el USBM en 1930. El primer trabajo que realizó este equipo fue el de desarrollar un tipo de sismógrafo que se pudiera adaptar a la tarea de captar vibraciones producidas durante las operaciones normales de explotación de minas. Luego de estudiar los aparatos utilizados en la captación de vibraciones originadas por movimientos telúricos, y a varios proyectos, se fabricaron algunos modelos, los cuales fueron los precursores de los modernos sismógrafos de ingeniería.

Una nueva síntesis del USBM fue hecha por Fogelson en 1971, en el cual incluía el análisis de nuevos datos pero se mantenía como límite los 50 mm/s (VPP), bajo el cual, la probabilidad de daños era muy pequeña. Sin embargo, fue en el año 1980 donde el USBM revé este valor, el cual era visto bastante alto en otras partes del mundo e incluso para algunos estados norteamericanos; y decide introducirle la frecuencia, considerándolo como un parámetro tan

importante como la velocidad de partícula. Los valores que se propusieron son mostrados en el cuadro siguiente.

Tipo de estructura	Baja Frecuencia	Alta Frecuencia
Casas modernas con paredes revestidas de material diferente del revoque común (yeso, etc.)	19 mm/s	50 mm/s
Casas antiguas, con paredes revocadas	12,5 mm/s	50 mm/s

Baja frecuencia: < 40 Hz, todo pico espectral que se produzca por debajo de 40 Hz y dentro de una faja de 6 dB (o sea, 5% de la amplitud verificada a la frecuencia predominante) justifica el empleo del criterio de baja frecuencia.

Alta frecuencia: > 40 Hz

TABLA 1. Valor máximo de velocidad de partícula según propuesta del U.S. Bureau of Mines en 1980

Debido a que el daño en las estructuras se encuentra directamente relacionado a las velocidades de la partícula y al nivel de la frecuencia, el USBM creó un gráfico donde se combinan ambos parámetros, para así, establecer los límites donde es posible que ocurra una falla.

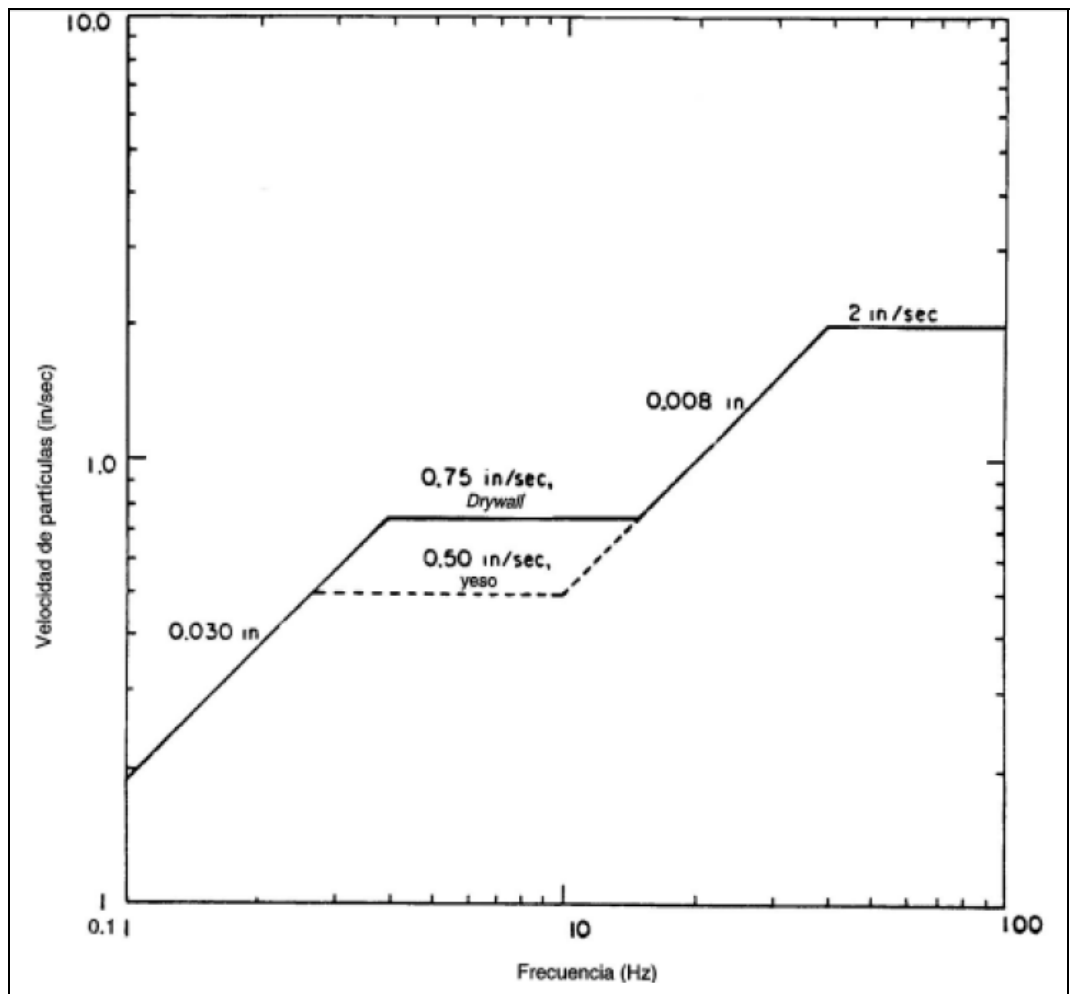


GRÁFICO 2 Niveles de seguridad para vibraciones de estructuras residenciales según el U. S. Bureau of Mines, 1980. Tomado de Siskind et al., 1980

Lamentablemente, este análisis no predice el comportamiento de una onda, sólo es una herramienta de gestión que permite monitorear las vibraciones para que estas se encuentren en valores aceptados y libres de riesgo.

1.2.2 Legislaciones Locales

Además de las normas ya citadas, existen una serie de normativas, casi siempre de tipo local, que regulan la emisión e inmisión de vibraciones, y también de ruido, en núcleos urbanos. Estas normas son prácticamente todas iguales y más sencillas de predecir; suelen excluir la ejecución de voladuras, ya que se refieren a vibraciones y ruidos continuos, originados por máquinas, tráfico rodado, personas, etc.



CAPÍTULO 2

LEY DE TRANSMISIVIDAD Y EVALUACIÓN TEÓRICA DEL PROYECTO

2.1 Ley de Transmisividad

La velocidad de vibración (V), nivel de vibración recibida en un punto, se encuentra en función directa con la carga del explosivo (Q) y en función inversa con la distancia (D) entre el punto de disparo y de registro. De forma genérica, esta relación se puede expresar en la siguiente fórmula:

$$V = K \times Q^{\alpha} \times D^{\beta}$$

Donde K , α y β son constantes referentes a la geología del terreno, las diferencias entre las cotas de los puntos de disparos, la eficiencia del explosivo utilizado, la geometría de las cargas, entre otros.

Por lo tanto, uno de los objetivos principales de cualquier estudio de vibraciones es el de poder hallar el valor de las constantes mencionadas a través de un ajuste mínimo

cuadrático, realizado con los valores de V, Q y D obtenidos en varios ensayos de campo.

Cada tipo de roca y cada explosivo poseen una serie de particularidades en cuanto al tipo y magnitud (amplitud y frecuencia) de las vibraciones generadas. Algunos factores como la rigidez de las rocas y la velocidad de detonación del explosivo (según la tipificación de la onda de choque) influyen en la amplitud y frecuencia de las vibraciones y en su variación conforme van transmitiéndose.

2.2 Evaluación teórica del Proyecto

Para poder diseñar el modelo predictivo de vibraciones para la mina modelo en Colorado, principal objetivo de nuestro proyecto, era indispensable partir de un punto, de una fórmula ya existente; donde podríamos asociar los parámetros con los que contábamos desde un comienzo, como son las distancias entre el punto de disparo y el equipo de medición, y la carga de explosivo con las velocidades pico partículas, las cuales, mediante sismógrafos, mediríamos durante las pruebas.

Muchos son los factores que afectan la transmisión de las vibraciones a través de la roca. Cada operación de voladura produce diferentes niveles de vibración. La fórmula más comúnmente utilizada es:

$$PPV = K \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^b$$

Donde:

- PPV es la velocidad pico partícula expresada en mm/s.
- D es la distancia entre el punto de disparo y el punto de monitoreo expresada en m.
- Q es la carga de explosivo por retardo expresada en Kg.
- K y b son constantes que dependen de las propiedades del lugar y de la roca.

A partir de esta fórmula, se derivan otras, recomendadas por el Australian Estándar 2187 como una guía conservadora; En las cuales se han asignado un valor a las constantes K y b, tratando de esta manera, generalizarlas de acuerdo a ciertas propiedades del terreno y al tipo de voladura.

Así tenemos:

- Para voladuras donde existe una cara libre y el tipo de roca se encuentra entre dura y altamente estructurada. (RMR* entre 21- 40, Clasificación de roca: IV)

$$PPV = 500 \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^{1.6}$$

- Para voladuras donde existe una cara libre y la roca tiene una dureza promedio. (RMR* entre 41 – 60, Clasificación de roca: III)

$$PPV = 1140 \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^{1.6}$$

- Para voladuras donde las cargas se encuentren totalmente confinadas.

$$PPV = 5000 \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^{1.6}$$

CAPÍTULO 3

ESTUDIO DE VIBRACIONES

La capacidad de una onda para generar daño a una estructura se debe a dos variables críticas: la velocidad pico partícula y la frecuencia. Como resultado, instituciones como el Bureau of Mines de los Estados Unidos han generado a partir de gran cantidad de información una serie de análisis para poder controlar los efectos negativos de las vibraciones en estructuras. Como resultado de uno de dichos análisis se creó un cuadro de control de vibraciones, mostrado anteriormente (Fig. 2).

Otras instituciones se han dedicado a crear modelos que pueden predecir el comportamiento de una onda para ciertas condiciones. Se ha considerado que la generación de un modelo predictivo de ondas generadas por explosivos para la mina modelo puede resultar un tema crítico e importante.

3.1 Trabajo de Campo

Los límites permisibles para vibraciones son establecidos para que se puedan evitar los daños a las construcciones o efectos dañinos a la salud humana, producto de una operación minera.

Como Ingenieros, se tiene claro que al elaborarse un proyecto de ingeniería, cualquiera que fuera, es necesario tener una evaluación previa de las consecuencias que este podría traer. Por supuesto, este aspecto también forma parte de la evolución de un proyecto minero.

En busca del cumplimiento de las diferentes normativas existentes, la empresa minera debe tener un programa de control y seguimiento de vibraciones. Antes de la aprobación de un proyecto, el proyectista debe entregar toda la información referente a los análisis realizados con el objetivo de conocer con antelación los futuros niveles de vibración resultante de una mina que aún no existe, y así, evaluar las consecuencias que podría traer las vibraciones sobre construcciones o molestias a los habitantes de la vecindad.

Para ello, con miras a una situación futura, estos cálculos se efectúan en base a modelos que representen las condiciones de propagación de ondas sísmicas en un macizo rocoso. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, el terreno suele ser lo suficientemente heterogéneo como para no poder encontrar en dichos modelos, los cuales solo se basan en el comportamiento del macizo frente a las vibraciones de forma analítica, los resultados más confiables; incluso si las características del terreno a analizar sean bastante similares a las ya analizadas.

3.1.1 Metodología

Desde hace muchos años se ha ido realizando diversas investigaciones con el fin de estudiar con mayor profundidad el comportamiento de las vibraciones en

una voladura, y poder prever los niveles de vibración a diferentes distancias del lugar de la detonación. Para esto, se debe trabajar en la búsqueda de:

- Una relación empírica entre medidas de energía de las vibraciones y la probabilidad de que existan daños a residencias y otras estructuras de las cercanías.
- Una relación empírica entre la carga detonada y la energía liberada por los explosivos que genera las vibraciones, en función de la distancia.

Para poder conseguir dichas medidas, decidimos diseñar la evaluación práctica del presente proyecto de la siguiente manera:

- Primero se realizaron las mediciones de las VPP cambiando las posiciones de los equipos medidores, pero manteniendo en todo momento la carga de explosivo inicial.
- Segundo, se realizaron las mediciones de las VPP cambiando la cantidad de carga de explosivo sin variar en ningún momento las distancias entre los equipos medidores y la posición de disparo.

Como se observa, este proyecto trabajará con dos parámetros fundamentales en un estudio de vibraciones, la carga de explosivo (Kg) y las distancias (m).

Utilizando como datos base la carga y la distancia se realizó nueve ensayos, los cuales se llevaron a cabo durante tres días diferentes. De dichas pruebas se obtuvieron datos como frecuencias y velocidades, que con un mayor análisis y un estudio adecuado, posteriormente, llevarán a los objetivos planteados desde el principio del proyecto.

3.1.2 Ubicación y posicionamiento de las pruebas

Todas las pruebas realizadas para llevar a cabo este proyecto se efectuaron en la “mina modelo”, conocida mina experimental donde se realizan diferentes pruebas sobre voladura, perforación, acarreo, entre otras.

3.1.2.1 Reseña de la mina modelo

Las montañas debajo de Idaho Springs y en los límites de las comunidades de Black Hawk, Central City y Georgetown muestran algunas minas abandonadas, prueba de lo que fue la fiebre de la minería de plata y oro en esas tierras ("Rush to the Rockies"), varios años atrás.

La mina modelo se encuentra en Idaho Springs en el boulevard de Colorado en la Av. 8, en lo alto de la colina. Esta mina forma parte de la larga historia, antes productora de minerales como el oro, plata, plomo y cobre; ahora se ha convertido en un laboratorio subterráneo para futuros ingenieros de la escuela

de minas de Colorado. Ambientada con aulas subterráneas, donde sus alumnos, no solo los pertenecientes a la facultad de minas, tienen la oportunidad de involucrarse con el trabajo dentro de una mina de una manera práctica, para así realizar investigaciones y entrenamiento en las distintas áreas como lo son el mapeo geológico, ventilación de minas, perforación y voladura, mecánica de rocas, entre otras.

3.1.2.2 Geología de la mina modelo

La mina modelo se extiende a través de rocas del precámbrico, las cuales han sido sometidas a aproximadamente tres o más episodios de deformación estructural. El principal tipo de roca frecuente incluye cuarzo-plagioclasa gneiss, cuarzo-biotita gneiss, cuarzo-biotita-hornblenda gneiss y biotita-microclina pegmatitas. En el gráfico siguiente se podrá observar con mayor detalle las características de la mineralogía y petrología.

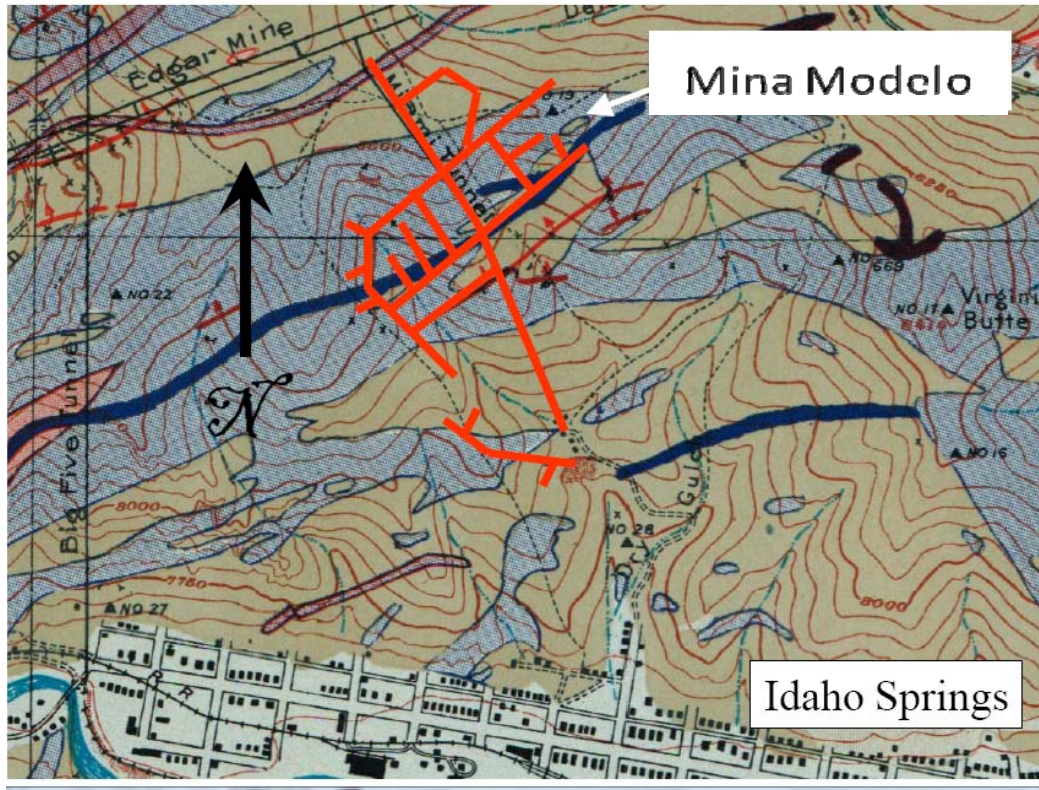


FIGURA 2 Mapa Geológico de la mina Modelo.

Leyenda del mapa:

- Azul claro: Precámbrico cuarzo-plagioclasa gneiss y cuarzo-plagioclasa-biotita gneiss
- Marrón: Precambriano cuarzo-biotita-hornblenda gneiss y biotita-microclina pegmatitas
- Naranja: Locaciones aproximadas de las áreas de trabajo de la mina Edgar.
- Negro y Morado: Diques Porfiríticos Terciarios
- Azul oscuro: Venas de plata

La mina está situada en un flanco de buzamiento noroeste pronunciado de un anticlinal con tendencia noreste, y contiene varias pequeñas zonas de falla. Las zonas de falla generalmente se orientan en una dirección noreste y su buzamiento es hacia el norte, entre 30 y 80 grados.

La masa rocosa que se encuentra en el área de la mina tiene por lo menos tres familias de discontinuidades y algunas áreas llegan a tener hasta un máximo de cinco familias.

Las rocas en la mina Edgar son por lo general bastante competentes, dichas propiedades geomecánicas son mostradas en el cuadro que viene a continuación:

Uniaxial Compressive Strength	40 – 150 MPa
Elastic Modulus	60 to 90 GPa
Poisson's Ratio	0.2
Joint Friction Angle	30° to 45°
Rock Mass Rating (RMR)	40 to 80

Tabla 2 Típicas propiedades geomecánicas de las rocas encontradas en la Mina Modelo.

3.1.2.3 Ubicación de los puntos de prueba

Como se mencionó en la parte de metodología, los dos principales parámetros a ser tomados en cuenta fueron la distancia y la carga, por lo que, alternando ambos datos como punto de inicio realizamos nueve ensayos; los cuales se pueden observar en los siguientes gráficos:



FIGURA 3. Día 30 de Octubre, 2008. Primer día de pruebas en la Mina Modelo.

El primer día, debido a problemas técnicos y calibración de unos de los equipos, solo se pudo trabajar con un sismógrafo, por lo que se optó con tomar mediciones en el mismo lugar dos veces (dos ensayos diferentes y consecutivos).



FIGURA 4. Día 20 de Noviembre, 2008. Segundo día de pruebas en la Mina Modelo.

En este caso se solucionaron los problemas con los sismógrafos y no hubo ningún inconveniente para trabajar con ambos. Se realizaron cuatro ensayos, donde se trató de ubicar los diferentes puntos de pruebas a una misma elevación; pero debido a la excesiva vegetación y tipo de terreno fue imposible cumplir totalmente con esta condición.



FIGURA 5. Día 21 de Noviembre, 2008. Tercer día de pruebas en la Mina Modelo.

El último día se realizaron en total dos pruebas. En esta oportunidad, los distintos puntos de toma de datos se ubicaron en línea horizontal con una cota casi nula entre sus posiciones; Sin embargo, como se podrá observar más adelante en la tabla de resultados, la última prueba no grabó resultados verosímiles.

3.1.3 Control de Vibraciones

Cuando hablamos de hacer un control de vibraciones nos referimos a realizar mediciones puntuales de las vibraciones generadas por una voladura en un punto de estudio, con el fin de poder comparar los niveles medidos con los

límites definidos por la normativa; para así poder efectuar correcciones de la carga operante, en el caso que fuera necesario. Este proceso es bastante básico, sin embargo, nos permite disponer de datos reales sobre la transmisividad, la amplitud y la frecuencia.

3.1.3.1 Instrumentación

Una de las principales razones por la cual hoy en día se actúe de una manera tan pragmática es por el gran desarrollo que ha sufrido en los últimos años los sistemas de medición, los cuales resultan mucho más asequibles, manejables y fiables. Lo mismo ocurre con los sistemas de análisis de vibraciones, los cuales nos permiten obtener de forma automatizada y rápida, información bastante útil de las ondas provocadas en una voladura.

Para la medición de vibraciones originadas por una voladura se utilizan diferentes tipos de sistemas, ya que existen diversos tipos de fenómenos vibratorios de muy distinto comportamiento. Dentro de los dispositivos más empleados por la industria minera tenemos:

- Los medidores de desplazamiento: generalmente constituidos por galgas extensométricas. Este sistema se emplea en la medición de la onda de choque muy cercana al taladro.
- Los medidores de velocidad de vibración: también conocidos como geófonos, son de tipo electrodinámicos. Estos sensores son los más

extendidos en la medida de vibraciones en voladuras y además arrojan datos bastante confiables.

- Los medidores de aceleración: también reciben el nombre de acelerómetros. En voladura los más utilizados son los del tipo piezométrico. Se emplean para la medida de ondas de choque y también para medidas en estructuras.

Es fundamental tomar en cuenta que estos equipos necesitan una calibración periódica, la cual nos asegurará su correcto funcionamiento, lo que implicará una mayor fiabilidad y fidelidad de medición.

3.1.3.1.1 Características del Equipo utilizado

Las mediciones de las diferentes variables fueron hechas utilizando dos sismógrafos Minimate Plus de la compañía Instantel, proporcionados por la Colorado School of Mines.

Un sismógrafo es un instrumento que registra el movimiento del suelo causado por el paso de las ondas sísmicas. Los sismógrafos en minería están contruidos especialmente para realizar los estudios de vibraciones, producto de una voladura, y sobre todo, para poder establecer el cumplimiento con las normas y evaluar el desempeño de los explosivos.

Sus partes esenciales son el geófono, un amplificador y un registrador. Un geófono es el encargado de captar las vibraciones mecánicas y las transforma en corriente eléctrica, transmitida por cable al amplificador que a su vez las registra en la memoria, para luego transmitir toda la data a un microcomputador. Los datos resultantes son suministrados en términos de velocidad y frecuencia.

Las velocidades de partícula son representadas por un vector de tres componentes el cual tiene la dirección vertical, la longitudinal y la transversal. La velocidad pico no se produce simultáneamente en las tres direcciones, de este modo, lo que debe ser medido, de acuerdo a las normas técnicas, es la velocidad resultante a cada intervalo de tiempo de tal manera que se pueda obtener la velocidad máxima.

Los sismógrafos utilizados constaban de un geófono, el cual medía las vibraciones en el suelo; y el micrófono, encargado de medir las ondas aéreas que se generaban. Debido a que el presente proyecto se trata solo de voladuras de prueba, en donde el explosivo no se encontraba confinado, los datos de las presiones de aire sobrepasaban cabalmente los límites registrables de la máquina, por lo que se concentró en las mediciones hechas por los geófonos.

Las características de fabricación de los sismógrafos se pueden apreciar en la siguiente tabla, sacada del manual de dichos equipos.

Geophone	Seismic	Range	10 in/s
		Trigger Levels	0.005 to 10 in/s
		Accuracy	3% at 15Hz
Microphone	Air Linear	Range	0.5 to 500 Pa
		Trigger Levels	100-148 dB
		Accuracy	0.2 dB at 30Hz

TABLA 3 Características de fabricación del sismógrafo Minimate Plus de la compañía Instatel. Tomado del MiniMate Plus Operator Manual (Software Version 4.0)

3.1.3.1.2 Utilización del equipo de medición

Los sismógrafos se disponen en el lugar para registrar los niveles de vibraciones en el suelo; la exactitud, confiabilidad y consistencia de cada registro es esencial, y dependerá en su mayoría del manejo correcto del sismógrafo.

Antes de empezar con el monitoreo y registro de datos, fue necesario leer el manual que venía con el sismógrafo (MiniMate Plus Operator Manual, Software Version 4.0) y asegurarse que el equipo había sido calibrado según la fecha que le correspondía (anualmente).

Otro punto importante era el de almacenar ordenadamente todos los registros apropiados; desde la fecha, hora y lugar del evento, hasta las distancias horizontales, lo más precisas posibles, entre el punto de disparo y los equipos que realizaban la medición.

Es muy importante conocer la capacidad de memoria y registro del sismógrafo; como además, su nivel de activación por vibraciones en el suelo, el cual debe ser programado lo suficientemente bajo como para activar la unidad a causa de las vibraciones por la voladura y lo suficientemente alto como para minimizar la ocurrencia de falsos eventos. (Anexo 3 Fig. 1)

3.1.3.1.3 Ubicación y Acoplamiento del equipo para las pruebas

La ubicación y el acoplamiento del sensor de vibraciones son los dos factores que deben considerarse con mayor importancia si se busca lograr registros exactos y fiables. Así tenemos:

- Ubicación del sensor

Es preferible que el sensor sea enterrado y dirigido hacia la voladura (Anexo 3 Fig. 2); y que este se encuentre lo más nivelado posible. En el caso de que el geófono sea instalado cerca a alguna estructura, se debe mantener una distancia adecuada y ubicarlo en el suelo; ya que lo que se pretende es medir las vibraciones, producto de un disparo, en la roca y no la respuesta de la estructura.

- Acoplamiento del sensor

Debido a que los niveles de aceleración podrían exceder lo previsto y causar el resbalamiento del sensor, ocasionando error en los datos

registrados; es conveniente excavar un hoyo de aproximadamente tres veces la altura del sensor (ANSI S2.47-1990, R1997) para luego clavar el geófono en el fondo, compactando firmemente el suelo alrededor, y por último, reforzarlo con bolsas de arena. (Anexo 4).

3.2 Trabajo de Oficina

Al momento de culminar cada una de las pruebas correspondientes a la parte práctica del proyecto, se realizó un análisis de data para poder determinar cuáles de los datos habían sido correctamente medidos y podían ser utilizados para la elaboración del modelo predictivo, principal objetivo.

Para poder seleccionar la data nos basamos en diferentes criterios:

3.2.1 Clasificación de data

a. La hora de la voladura

Cuidadosamente se registraron los momentos precisos en los cuales se llevaron a cabo las voladuras; ya que por motivos de fallas técnicas o una mala ubicación, podríamos confundir otros movimientos que no fueran generados por la detonación del explosivo.

Además, de esta manera se podría acelerar el proceso de búsqueda de los datos útiles, ya que al trabajar con los sismógrafos en el modo de “monitoreo continuo” se ordenó que se grabaran todos los parámetros de las vibraciones originadas por cualquier movimiento que supere su límite de perceptibilidad. Esto podría traer algunas confusiones y alargar el proceso de selección en el caso de no contar adecuadamente con la información del factor tiempo.

b. Las gráficas

Al momento de bajar la data acumulada en los sismógrafos a un computador, utilizamos el software BlastWare III (Software Version 4.3) – Instantel Wold Leader (Anexo 5). Una vez que se descargaron los datos tomados, se abren las ventanas de reporte de eventos (Anexo 6), donde, según las gráficas de las vibraciones originadas en ese instante, se puede identificar y discernir entre aquellas vibraciones generadas por una voladura original o aquellas vibraciones esporádicas, generadas por cualquier otro tipo de movimiento (lo más general son las vibraciones ocasionadas por el ser humano).

Como un ejemplo podemos mostrar las diferencias entre los tipos de gráficas mencionados. Así tenemos:

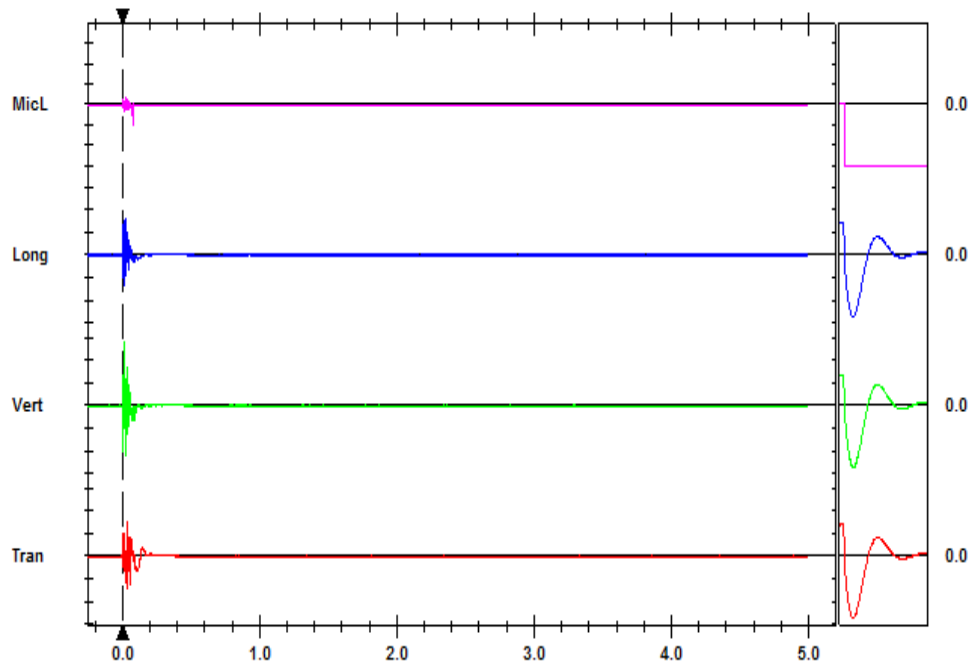


GRÁFICO 3 Reporte de un evento tomado el día 30 Oct. Registro de vibraciones originadas por una voladura.

En esta primera gráfica se puede observar que el evento ha sucedido en un espacio corto y definido de tiempo, las vibraciones registradas demuestran que las alteraciones de la onda se deben a un movimiento único y brusco, por lo que se intuye que se trata de una detonación.

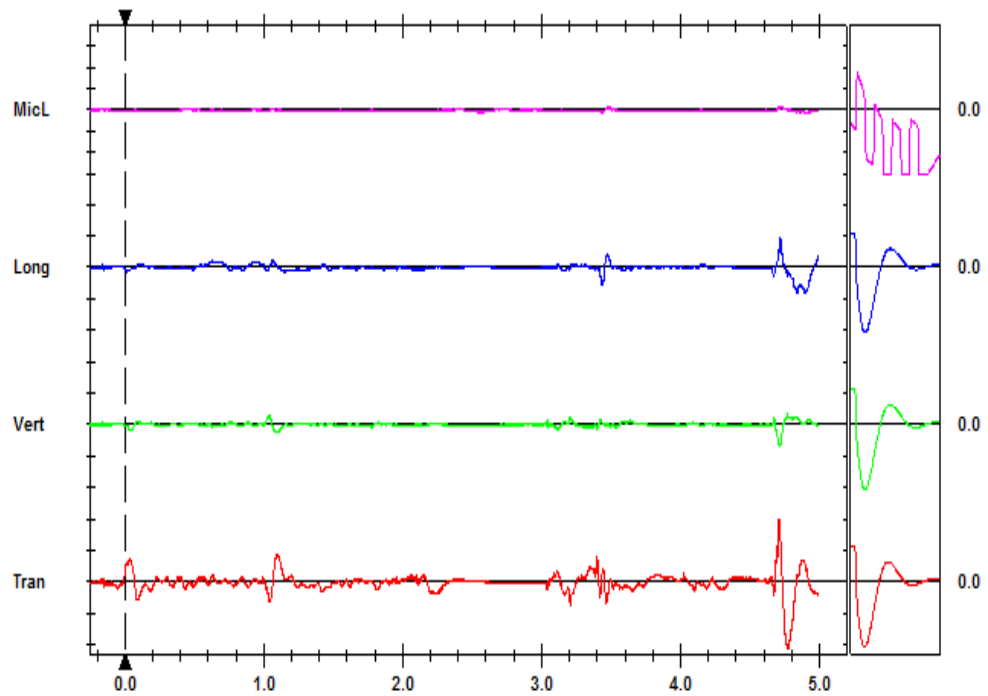


GRÁFICO 4. Reporte de un evento tomado el día 30 Oct. Registro de vibraciones originadas por un factor ajeno a una voladura.

Como se puede observar en esta segunda gráfica, las representaciones de las ondas difieren con las de la gráfica anterior; en este caso, dichas ondas se ven perturbadas en forma constante y por un lapso de tiempo prolongado. Lo más probable sea que estos movimientos que originan las vibraciones sean producidos ya sea por el desplazamiento de las personas que se encontraban en la zona de pruebas, la acomodación de los equipos, el movimiento de los motores eléctricos que operaban en el lugar u otros eventos realizados en el lapso de tiempo en el cual los sismógrafos se encontraban encendidos.

3.2.2 Resultados finales de las pruebas

Una vez seleccionados los datos necesarios, se agruparon en una tabla, detallando cada uno de los parámetros influyentes y útiles para la elaboración del modelo predictivo, objetivo principal de este proyecto

Para la elaboración de la tabla, se ordenó la información en diferentes columnas, las cuales mostraban los datos indispensables. Dentro de estas columnas tenemos la hora de la voladura, la distancia existente entre el sismógrafo y el punto de detonación, la carga del explosivo utilizada, resultados teóricos utilizando las fórmulas australianas explicadas en el capítulo dos, resultados reales registrados por los sismógrafos, entre otros.

De los datos obtenidos, solo se seleccionaron dieciséis de ellos para realizar los estudios correspondientes, sin embargo, en el momento de realizar los cálculos se descartaron tres por falta de información.

A continuación se muestra la tabla final de los ensayos:

Test	Date	Blasting	Seism.	Sensibility	Distance	Charge	K= 5000		K= 500		K= 1140		REAL			
							Ground Vibration		Ground Vibration		Ground Vibration		Ground Vibration			Peak Vector Sum
							PPV	PPV	PPV	PPV	PPV	PPV	PPV	PPV	Freq.	
Time	S	(in/s)	m	Kg.	in/s	mm/s	in/s	mm/s	in/s	mm/s	in/s	mm/s	Hz.	mm/s		
1	30-oct-08	11:34:59	1	10	20.6248	5.9	6.42	163.17	0.64	16.32	1.46	37.20	1.61	40.8	47	43.4
2	30-oct-08	00:04:06	1	10	20.6248	5.9	6.42	163.17	0.64	16.32	1.46	37.20	2.08	52.8	57 - >100	54.4
3	20-nov-08	10:31:45	1	1.25	32.72	4.31	2.39	60.67	0.24	6.07	0.54	13.83	0.51	12.9	73	13.8
		10:31:43	2	1.25	32.72	4.31	2.39	60.67	0.24	6.07	0.54	13.83	0.63	16.1	100	17.3
4	20-nov-08	11:00:00	1	1.25	32.72	6.47	3.31	83.96	0.33	8.40	0.75	19.14	0.56	14.2	64	14.9
		10:59:58	2	1.25	32.72	6.47	3.31	83.96	0.33	8.40	0.75	19.14	0.67	16.9	100	18.7
5	20-nov-08	11:25:33	1	1.25	32.72	6.47	3.31	83.96	0.33	8.40	0.75	19.14	0.54	13.6	73	14.5
		11:25:31	2	1.25	32.72	6.47	3.31	83.96	0.33	8.40	0.75	19.14	0.60	15.3	100	16.6
6	20-nov-08	14:28:57	1	10	32.72	1.36	0.95	24.11	0.09	2.41	0.22	5.50	0.62	15.70	85.00	15.9
		14:28:59	2	10	16.71	1.36	2.78	70.60	0.28	7.06	0.63	16.10	0.00	---	---	---
7	20-nov-08	15:05:13	1	10	21.44	1.36	1.87	47.41	0.19	4.74	0.43	10.81	1.61	40.90	100.00	41.4
		15:05:11	2	10	16.71	1.36	2.78	70.62	0.28	7.06	0.63	16.10	0.96	24.40	85.00	30.1
8	21-nov-08	10:30:34	1	10	18.24	1.36	2.42	61.40	0.24	6.14	0.55	14.00	1.10	27.90	100.00	29.5
		10:30:32	2	10	61.26	1.36	0.35	8.83	0.03	0.88	0.08	2.01	0.06	1.65	100.00	1.85
9	21-nov-08		1		188.98	1.36	0.06	1.46	0.01	0.15	0.01	0.33	0.00			
			2		91.44	1.36	0.18	4.65	0.02	0.47	0.04	1.06	0.00			
Total							10.88									

TABLA 4 Resultados teóricos y prácticos de las nueve pruebas realizadas en la Mina Modelo.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN, CREACIÓN Y APLICACIÓN DEL MODELO PREDICTIVO

Como se menciona anteriormente, el principal objetivo del presente proyecto es realizar un estudio de vibraciones generadas por explosivos, a partir de información real que fue tomada directamente en el campo. Este capítulo se enfocará en el análisis y evaluación de dicha información, desde la generación de un modelo predictivo de la velocidad pico partícula del área en estudio hasta su aplicación.

Como ya se sabe, la capacidad de una onda para generar daño a una estructura se debe a dos variables críticas: la velocidad pico partícula y la frecuencia. Como resultado, instituciones como el Bureau of Mines de los Estados Unidos han realizado un gran número de estudios para poder controlar los efectos negativos de las vibraciones. Uno de dichos estudios derivó en la creación de un cuadro de control de vibraciones (mostrado en el gráfico 2). Lamentablemente, la gráfica no predice el comportamiento de una onda, sólo es una herramienta de gestión que permite monitorear las vibraciones para que estas se encuentren en valores aceptados y libres de riesgo. Sin embargo, otros estudios realizados crearon modelos orientados a predecir el comportamiento de una onda para condiciones específicas y estándares. A pesar de los resultados aceptables que se puedan obtener, se aconseja desarrollar un modelo a partir de información real de campo para los diferentes casos en estudio.

Por estos motivos, se considera que la generación de un modelo predictivo únicamente aplicable para la mina modelo puede resultar un tema importante.

4.1. Análisis de la información

4.1.1 Velocidad Pico Partícula y Frecuencia

Al considerar ambas variables determinantes para el desarrollo del presente estudio, es importante comprobar la posible correlación que pueda existir entre ellas. Para el presente análisis utilizaremos dos herramientas estadísticas.

La primera herramienta es el “diagrama de correlación”, la cual consiste en graficar una nube de puntos en un sistema de pares coordenados, en el cual los ejes de las abscisas y ordenadas son los dos parámetros en estudio. Además, se puede aproximar una recta que permitirá determinar la correlación de las variables en forma gráfica.

El siguiente gráfico muestra el diagrama de correlación de la VPP vs. Frecuencia que se obtuvo con los datos registrados de campo, y una recta cuya correlación es 1:1.

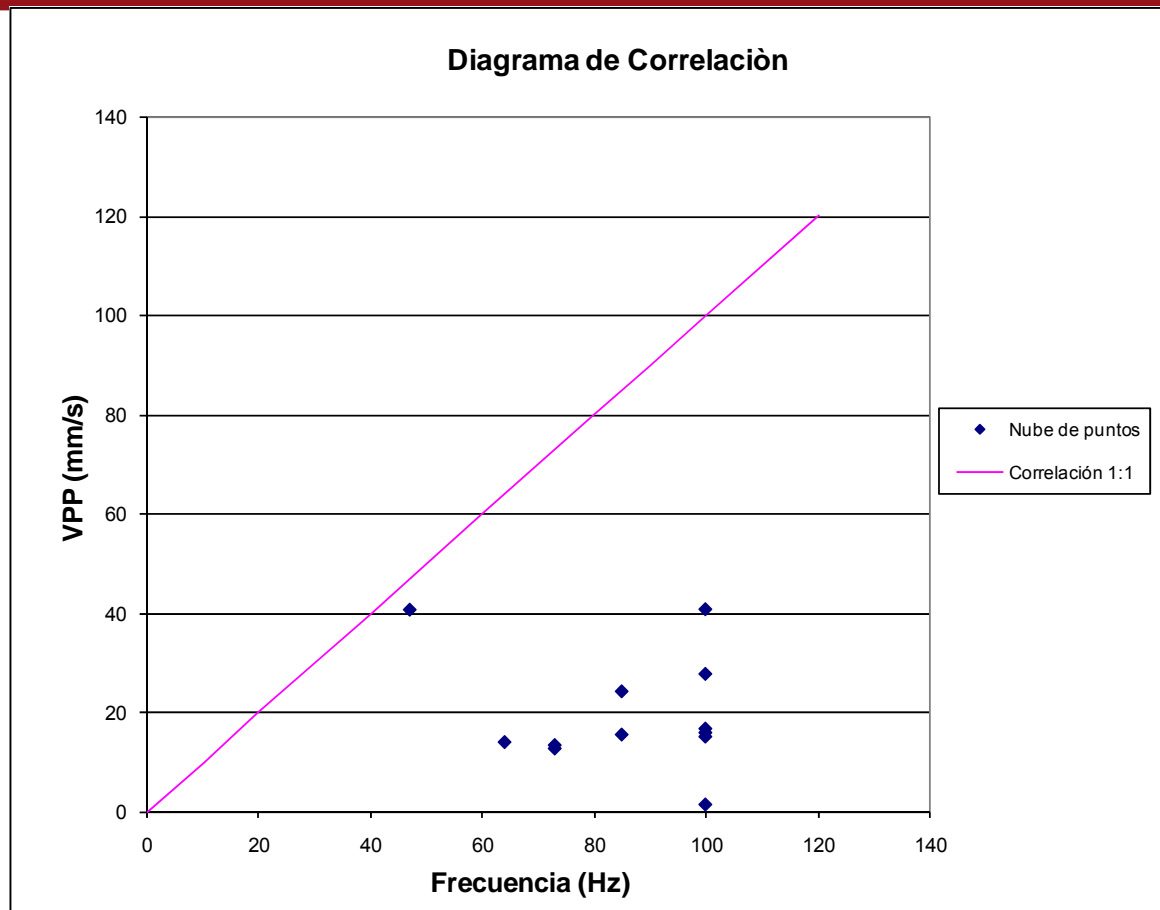


Gráfico 5 Correlación de la Velocidad Pico Partícula y la Frecuencia

En general la correlación de las dos variables de la gráfica está muy lejos de ser perfecta (es decir 1:1), sin embargo, se puede observar una tendencia de proporcionalidad entre la frecuencia y la velocidad pico partícula.

La segunda herramienta estadística es numérica, y se denomina coeficiente de correlación. Dicha herramienta se define como la razón entre la covarianza de las dos variables en estudio (a y b) y el producto de la desviación estándar de la variable a y la desviación estándar de la variable b.

El coeficiente de correlación es un número adimensional que siempre se encuentra en el rango $[-1,1]$. Si su rango está entre $]0,1]$, significa que existe una correlación positiva, es decir, las variables son directamente proporcionales. Si es igual a cero no existe proporcionalidad. Finalmente, si el coeficiente se encuentra en el rango $[-1,0[$, la correlación es negativa, lo que se interpreta como una proporcionalidad inversa.

Para este de análisis de interrelación, mediante la gráfica anterior se pudo identificar un par coordinado fuera de la nube de puntos principal (40.8, 47), por lo que no debería incluirse. Aplicando el concepto del coeficiente de correlación a los pares de variables VPP y Frecuencia obtuvimos el siguiente resultado:

Coeficiente de Correlación	
Con Outliers	-0.230
Sin Outliers	0.252

Tabla 5 Coeficiente de correlación de la data con y sin outlier

En la tabla podemos observar la variación del coeficiente de correlación debido al outlier existente, pasando de valores negativos a positivos.

Respecto al número obtenido de 0.252, podemos concluir que las dos variables tienen cierta proporcionalidad, en otras palabras, si se genera un incremento en la velocidad pico partícula también aumentaría la frecuencia, y viceversa.

Lamentablemente, la frecuencia de las vibraciones en cinco mediciones sobrepasó el límite máximo de de los equipos, 100 Hz., por lo que dichas frecuencias no son

completamente acertadas, dando como resultado un coeficiente que sólo puede servir de línea base para explicar la correlación de las dos variables.

A pesar de que ambas herramientas pueden demostrar la existencia de una correlación positiva, la falta de data no permite llegar a una conclusión acertada. Sin embargo, se puede rescatar un punto fundamental para el presente estudio, que todas las velocidades pico partícula están relacionadas a frecuencias altas.

4.2. Generación del modelo predictivo

Diferentes investigaciones determinaron que el daño o impacto de las vibraciones generadas por explosivos en las estructuras dependen tanto de la velocidad pico partícula como de las frecuencias; pero, la mayor cantidad de estudios consideran que la primera variable es más significativa. Ello, sumado al hecho de haber demostrado en el punto anterior que las frecuencias tienden a ser altas (recuérdese que las críticas son las bajas), permite despreciar los datos de la frecuencia y centrarse en las velocidades pico partícula en la elaboración del modelo predictivo.

4.2.1. El escalador

Para poder generar un modelo matemático que predecirá la velocidad pico partícula en una voladura es importante definir las variables que intervendrán en este. Como se explicó anteriormente, la VPP depende de dos factores, la distancia

en metros entre la carga explosiva y el punto de medición (D) y el peso de la carga explosiva en kilogramos (Q).

Intuitivamente se puede explicar la relación que existe entre dichas variables. Si D aumenta, la onda se atenúa y por ende VPP disminuye; si D decrece ocurrirá lo contrario. Por otro lado, si Q aumenta, la energía liberada será mayor y como consecuencia VPP también aumentará; si Q disminuye, lo opuesto se cumplirá.

Las tres variables juegan un papel importante en el modelo predictivo. La velocidad pico partícula es obviamente la variable dependiente, mientras que Q y D son ambas las variables independientes. El trabajar con tres variables dificulta la generación de un modelo. Para evitar este tipo de complicaciones se opta por usar una herramienta bastante conocida, denominada escalador.

Este escalador puede definirse como la relación existente entre las dos variables independientes (D y Q). Gracias al aporte de diferentes estudios este ratio puede describirse como $\sqrt{Q/D}$.

Al comprimir la información de las dos variables independientes a un escalador, podemos pasar de un escenario de tres variables a uno de dos.

Según la teoría propuesta por los modelos australianos, una forma práctica de diseñar el modelo es a partir de la relación VPP/escalador que se muestra a continuación:

$$VPP = k \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^b$$

Donde k y b son constantes que dependen de las características propias del lugar en estudio como geología, suelos, topografía, entre otros.

Un ejercicio interesante que se puede efectuar es el de cuantificar la influencia de las dos variables independientes (Q y D) que forman parte del escalador respecto a la VPP. Para ello se trabajará con el criterio de “Ceteris Paribus”, el cual se define como el cambio que experimentaría la variable dependiente (VPP) si hubiera un incremento diferencial en una de las variables independientes, manteniendo las otras constantes. En términos matemáticos, este criterio es definido como la derivada parcial de la VPP respecto a una de las variables independientes (Q o D), es decir, una razón de cambio.

Aplicando las derivadas parciales a ambas variables tenemos:

$$\frac{dVPP}{dQ} = \frac{k \times b}{2} \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^{(b-1)} \times \left(\frac{1}{\sqrt{Q} \times D} \right)$$

$$\frac{dVPP}{dD} = -k \times b \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^{(b-1)} \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D^2} \right)$$

Vemos que ambas derivadas parciales comparten multiplicadores, por lo que se puede reducir las expresiones a:

$$\frac{dVPP}{dQ} = \frac{(A \times X)}{2 \times Q}$$

$$\frac{dVPP}{dQ} = -\frac{(A \times X)}{D}$$

Donde los multiplicadores mencionados son:

$$A = k \times b \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^{(b-1)}$$

$$X = \frac{\sqrt{Q}}{D}, \text{ el escalador}$$

Despejando los diferenciales de VPP y obviando los multiplicadores que son compartidos, los cuales no son determinantes para la comparación, obtenemos lo siguiente:

$$dVPP = \frac{dQ}{2Q}$$

$$dVPP = -\frac{dD}{D}$$

Al comparar ambas expresiones se puede observar que la variable D tiene mayor influencia sobre el valor de VPP que Q, es decir, cuando se da un incremento en una unidad infinitesimal de dQ, el dVPP aumenta en 0.5 unidades, mientras que cuando el incremento se da en dD, el dVPP aumenta en una unidad infinitesimal.

4.2.2. Creación del modelo

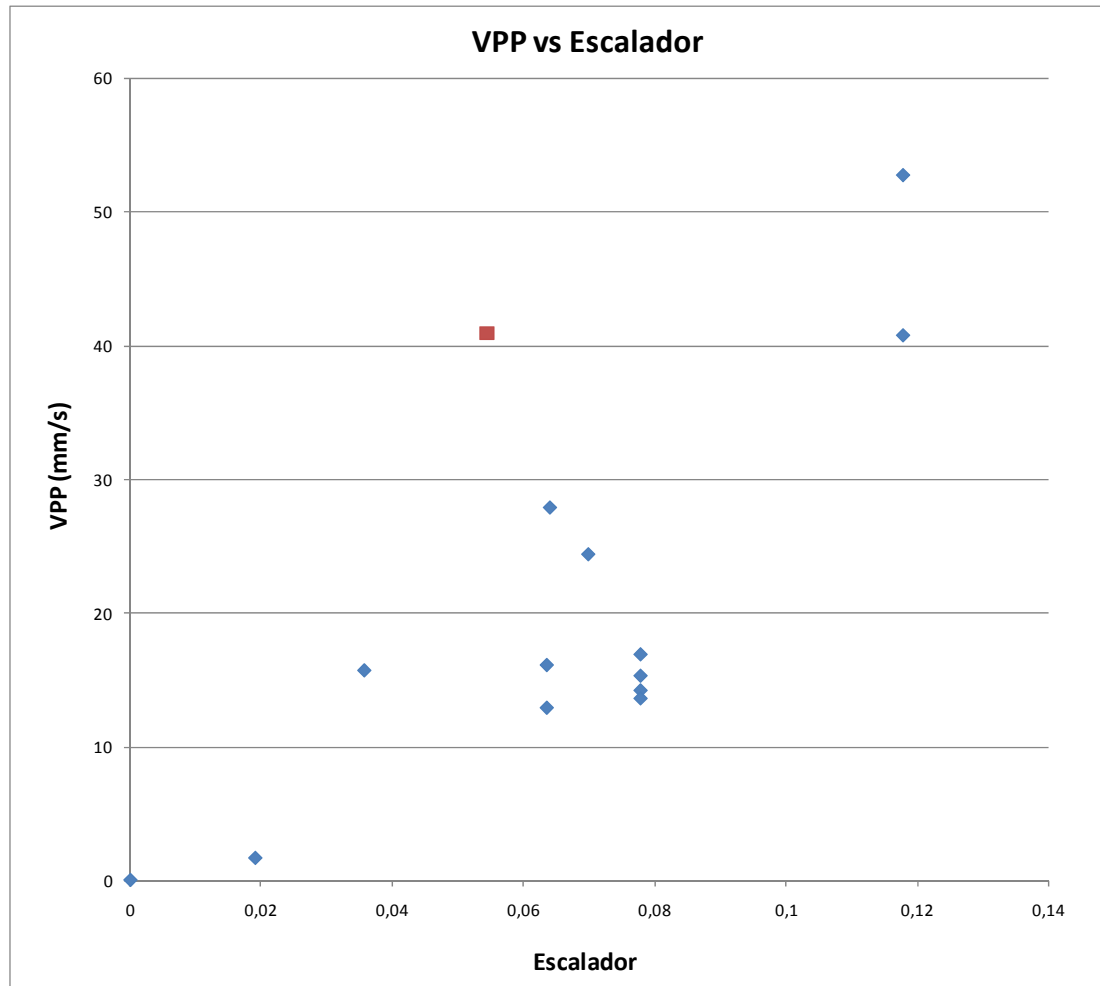
Una vez definido el escalador y su relación con la velocidad pico partícula se procede a generar el modelo predictivo para la mina modelo. Para ello debemos transformar los datos de carga explosiva y distancia a una sola variable. La tabla que a continuación se presenta muestra los valores de velocidad pico partícula y escalador para las 13 pruebas realizadas.

VPP	Escalador
40,8	0,1178
52,8	0,1178
12,9	0,0635
16,1	0,0635
14,2	0,0778
16,9	0,0778
13,6	0,0778
15,3	0,0778
15,7	0,0356
40,9	0,0544
24,4	0,0698
27,9	0,0639
1,65	0,0190

Tabla 6 Relación de datos registrados en las pruebas de voladura.

El siguiente paso es plasmar dicha información en una gráfica en donde el eje vertical es la variable dependiente (VPP) y el eje horizontal es la independiente (escalador). Como se puede apreciar de la gráfica 6 la mayoría de pares coordenados están dentro de una tendencia, a excepción del par (0.0544, 40.9) que

se muestra en color rojo. Por esta razón, este par fue descartado durante el análisis del modelo predictivo.



Gráfica 6 Datos de campo. Velocidad Pico Partícula vs Escalador

Como ya se explicó varias veces en capítulos anteriores, el modelo predictivo que se generará se basa en los modelos australianos cuya forma es:

$$VPP = k \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^b$$

Por lo que las constantes que se deben encontrar para poder definirlo son k y b. Para hallar dichas constantes es necesario hacer una regresión no lineal y por razones de eficiencia y rapidez se decide utilizar el software de estadística SPSS 15.0 (Anexo 7 y 8). Tras correr el programa con la información de la tabla se obtuvieron las constantes del modelo que se muestran a continuación:

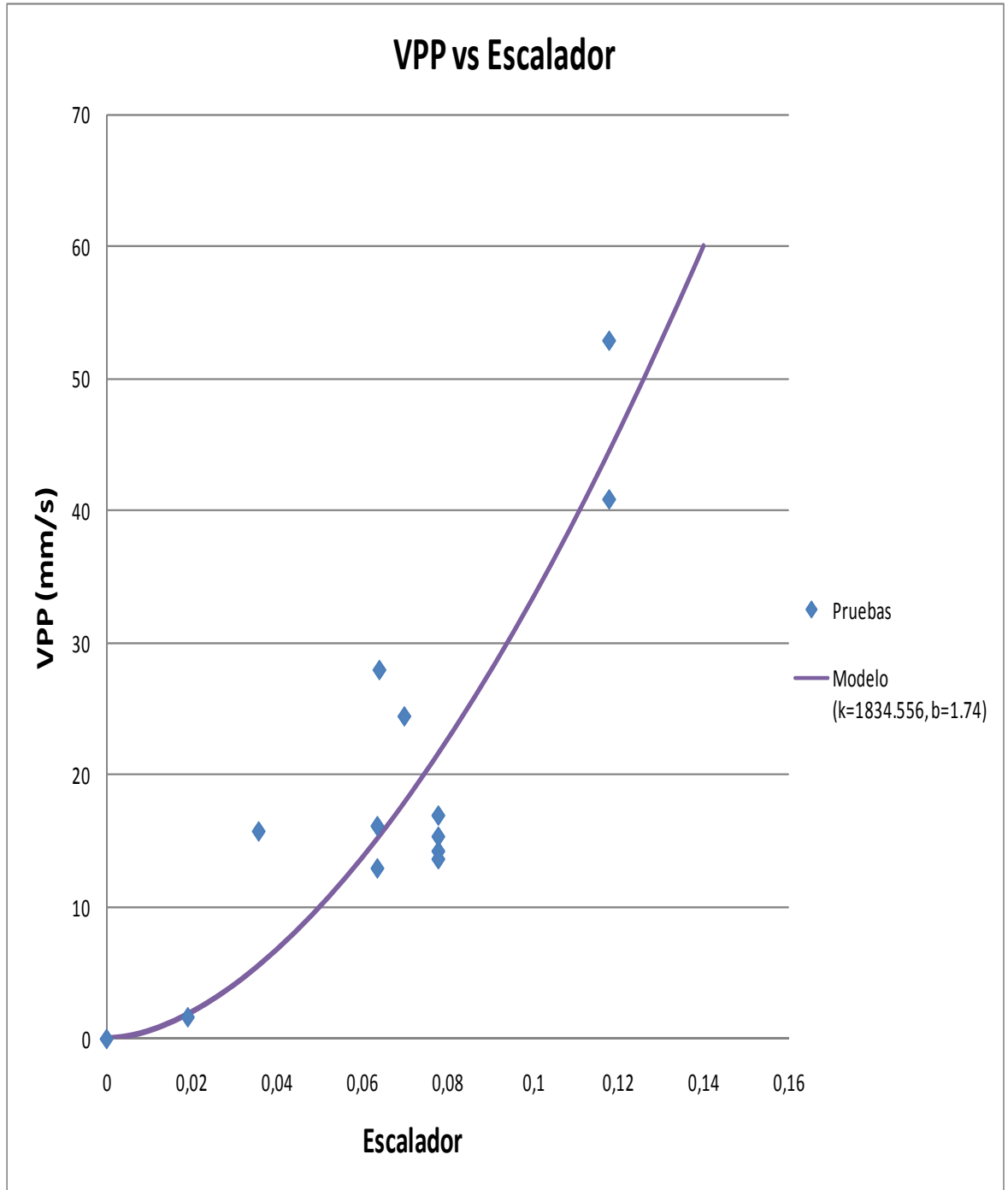
Constante	
k	1834.56
b	1.74

Tabla 7 Valor de las constantes “k” y “b”.

Finalmente, el modelo predictivo para el lugar de pruebas de la mina modelo se define como:

$$VPP = 1834.56 \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^{1.74}$$

Si se grafica dicha ecuación junto con los pares coordenados de las pruebas (sin incluir el outlier) tenemos lo que se muestra en la gráfica 7 a continuación:



Gráfica 7 Datos de campo sin outlier y Modelo Predictivo

4.2.3 Comparación del modelo predictivo con los modelos australianos

Dado que el escalador y las constantes hallados se basan en los modelos australianos, es posible realizar comparaciones entre el modelo predictivo generado y dichos modelos teóricos; los cuáles son:

Modelo A: Voladuras muy confinadas

$$VPP = 5000 \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^{1.6}$$

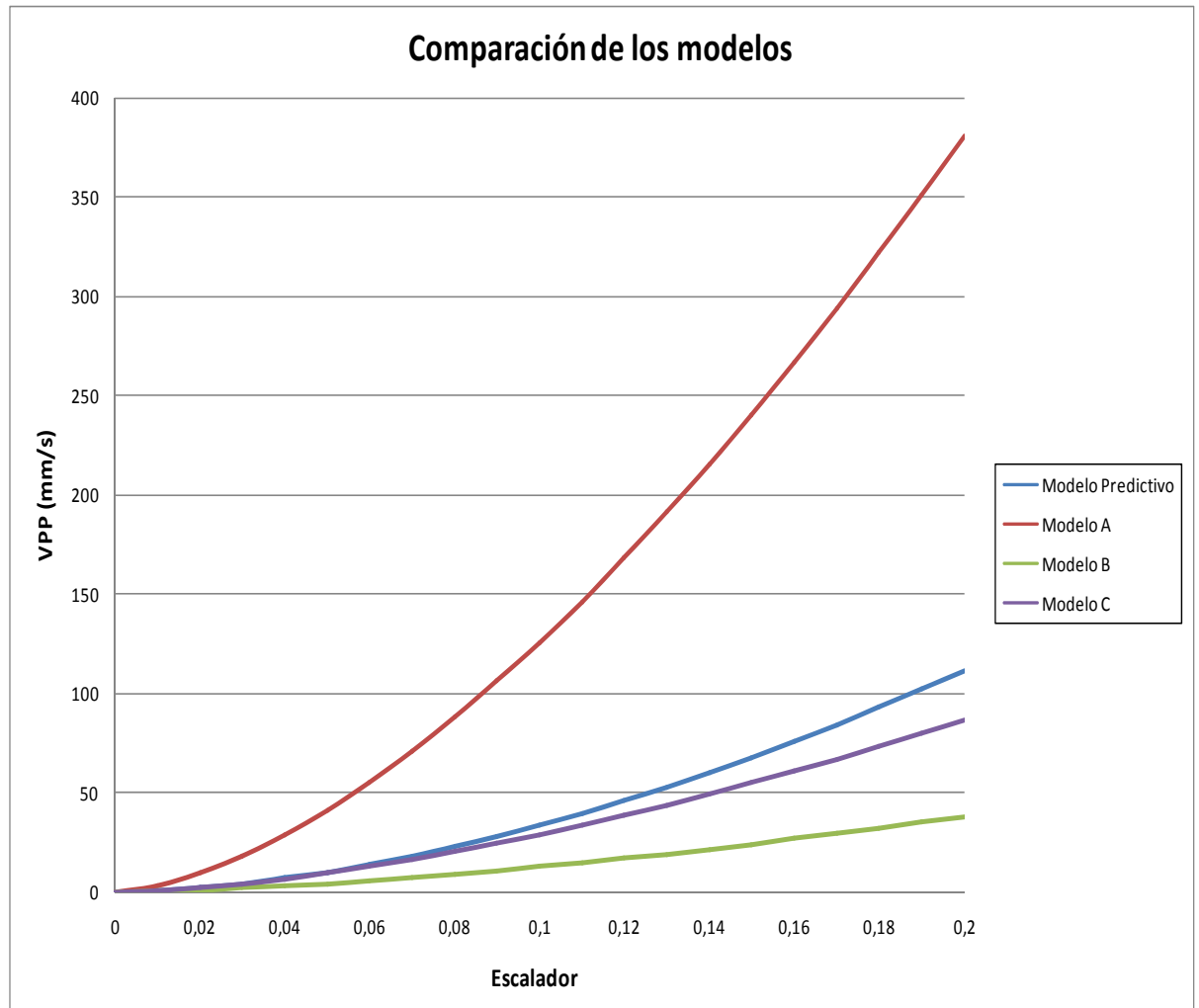
Modelo B: Voladura a una cara libre en roca dura o muy estructurada (RMR* entre 21- 40, Clasificación de roca: IV)

$$VPP = 500 \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^{1.6}$$

Modelo C: Voladura a una cara libre en roca promedio. (RMR* entre 41 – 60, Clasificación de roca: III)

$$VPP = 1140 \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^{1.6}$$

Si se llevan los cuatro modelos a una gráfica para su comparación se obtiene lo que se aprecia en la gráfica 8.



Gráfica 8 Comparación del modelo predictivo con los modelos Australianos

Lo primero que se observa es que el modelo predictivo de la mina modelo se asemeja más a los modelos B y C, mientras que éste es muy diferente del modelo A. Estas semejanzas y diferencias se deben a las condiciones de la voladura, que traen como consecuencia una distribución de la energía del explosivo diferente para cada caso en particular.

Para dar una explicación a las cuatro curvas se mostrará en forma intuitiva cómo las condiciones de la voladura influyen en la distribución de energía, y por ende, cómo son afectados los modelos de predicción de la velocidad pico partícula.

Se parte con el modelo "A". Bajo condiciones de confinamiento, se sabe que gran parte de la energía se distribuirá a la roca en forma de ondas de compresión generadas por la gran presión que ejercen los gases sobre la superficie de la roca en el proceso de detonación. El resto de la energía se disipará en sus otras formas (calor y "air blast" como las más resaltantes). Ahora, debido a que no existe una cara libre en este modelo, la onda de compresión simplemente seguirá su trayecto y el único efecto que esta causará en la roca es el denominado efecto cráter (Anexo 9), en donde se formará un anillo en la roca concéntrico al explosivo y se observará que la parte interior de este anillo está fracturada, consumiéndose el 30% de la energía del explosivo, y el exterior de este permanecerá inalterado.

Este anillo marca el límite elástico de la roca; en otras palabras, la onda compresiva es tan fuerte en términos de presión o esfuerzo al inicio de la explosión que supera la resistencia dinámica de la roca y como consecuencia ésta se fractura. Pero conforme la onda se desplaza ocurre el fenómeno denominado atenuación (Anexo 10), que en términos simples es la pérdida de energía de la onda. Ello permite que en un punto determinado el esfuerzo de la onda sea igual al límite elástico, y a partir de ese momento la roca es sólo deformada elásticamente, es decir, no es alterada. De ahí en adelante la onda simplemente se desplazará sin obstáculos.

Respecto a los modelos “B” y “C”, nos encontramos en una situación típica de una voladura a tajo abierto, explosivo algo confinado y con una cara libre, la cual es la condición clave de dichos modelos. Luego de ocurrida la detonación, las ondas de compresión generadas por las altas presiones de los gases contra las paredes de la roca viajarán por ésta, ocasionando el efecto cráter que se mencionó en el modelo “A”. Sin embargo, estas ondas al encontrarse con una cara libre (una superficie que determina el cambio de un material a otro, en este caso de roca a aire) se reflejarán en la roca cambiando su naturaleza de ondas de compresión a ondas de tracción (Anexo 11).

Una de las principales características de cualquier masa rocosa es que la resistencia dinámica a la tracción alcanza valores de 5 a 15% de la resistencia a la compresión. Como consecuencia, las ondas generadas por la presencia de una cara libre proporcionan las condiciones ideales para fracturar la roca, y por ende, realizar un trabajo en donde se utilizará gran parte de la energía del explosivo. Este efecto, sumado a la rápida expansión de los gases es lo que determinan la fragmentación del macizo rocoso. La utilización de la energía del explosivo es la principal diferencia entre los modelos “B” y “C”, y el modelo “A”.

Comparándose los modelos “B” y “C”, y enfocándose en las condiciones estructurales del macizo y la distribución de energía respecto a ellas, se tiene que en el primer modelo, la roca es muy estructurada, con un RMR entre 21 y 40, y como consecuencia las estructuras se comportarán como pequeñas caras libres que evitan la distribución adecuada de la energía y la amortiguan con rapidez. Por otro lado, en el segundo modelo, la roca es promedio, con un RMR de 41 a 60, es

decir, con un moderado número de discontinuidades, y por ende la energía se distribuirá mejor y no se disipará tan rápido como en el modelo “B”.

Como conclusión de los tres modelos, vemos que la energía de la onda se distribuirá de forma diferente. Por las condiciones ya mencionadas, el modelo “A” es el que transporta más energía a la roca circundante; el modelo “B” es el que menos energía liberará al macizo adyacente debido a que la mayor parte de la energía del explosivo realiza un trabajo en roca fracturada; mientras que el modelo “C” liberará más energía que “B” al darse en roca promedio, no tan estructurada (diferencias en los RMR).

Dado que la velocidad pico partícula dependerá de la energía de la onda en un punto dado, lo explicado puede ser corroborado en la gráfica 8. Para un mismo escalador, las VPP más altas se presentarán en condiciones como “A”, luego en “C” y finalmente en “B”.

Habiendo explicado las diferencias y similitudes entre los tres modelos australianos, podemos compararlos con el modelo predictivo encontrado para la mina modelo. Si se analizan las condiciones en las que se da la detonación, se debe indicar que a diferencia de los otros tres modelos, en los que el explosivo se encontraba confinado en el macizo, las pruebas que se realizan en la mina modelo se dan en superficie. Por lo tanto, el modelo se ubica en una situación en la que la mayor parte de la energía del explosivo se libera como “airblast”, otra pequeña porción se utiliza en realizar un trabajo determinado (soldadura, rotura de bloques de concreto, grabado, entre otros) y el resto en vibraciones en el macizo rocoso.

Intuitivamente se puede deducir que para un mismo escalador, la VPP del modelo predictivo se alejará del modelo “A” y se acercará más a los modelos “B” y “C”, lo cual se puede observar en la gráfica 8.

Se concluye entonces que el modelo predictivo de la mina modelo se asemeja mucho al modelo “C”, y por ende, es muy diferente del modelo “A”. Ello por dos motivos. El primero es la condición en la cual se realiza la detonación. A pesar que son situaciones muy diferentes, en cuanto al confinamiento del explosivo, la forma en la que la energía se distribuye hace que para un mismo escalador las VPP del modelo predictivo y del modelo “C” sean muy cercanas (siendo el del primero ligeramente superior). De igual manera, la mayor distribución de la energía al macizo rocoso en el modelo “A” hace que las VPP sean muy superiores respecto al modelo predictivo. El segundo motivo es el parecido de la calidad de la roca entre el modelo predictivo y el modelo “C”, representado en sus RMR (para el modelo está entre 40 y 80, y para “C” entre 41 y 60). Es por la combinación de ambas que las constantes k y b del modelo predictivo y del modelo “C” son tan parecidas.

4.3 Aplicación del modelo

El modelo que se obtuvo para el área de pruebas de la mina modelo es una herramienta de gestión que permite predecir la velocidad pico partícula que se puede generar para cualquier voladura en dicho lugar. Sabiendo la cantidad de explosivo que se usará y la distancia del sitio de pruebas a un punto cualquiera del

terreno, se puede predecir la VPP en dicho punto simplemente haciendo uso del modelo predictivo a través de la gráfica o de la ecuación; pero también se puede predecir cualquiera de las variables independientes haciendo un uso inverso del modelo.

La pregunta que uno se haría es por qué es necesario predecir la velocidad pico partícula o cualquiera de las dos variables independientes. En capítulos anteriores se explicó que uno de los principales efectos de la voladura es la generación de vibraciones en la roca, las cuales pueden causar graves daños a estructuras cercanas en el caso que se exceda los límites de la velocidad pico partícula. Es por este motivo que no sólo es necesario tener un control de éstas a través de mediciones, sino sería recomendable tener una herramienta de predicción que permita tomar decisiones proactivas ante situaciones adversas.

Para el área de pruebas de la mina modelo se detectaron tres lugares cercanos en donde había estructuras, las cuales estaban expuestas a las vibraciones. Estas son la oficina del área de prueba (una casa remolque de drywall), las oficinas de la mina (hechas de material noble) y las viviendas más cercanas del pueblo Idaho Springs (hechas de material noble) (Anexo 12).

Con la ayuda de un GPS de baja precisión se obtuvo las coordenadas geográficas de esos tres lugares y del área de pruebas, las cuales se transformaron a UTM para el cálculo posterior de distancias. Estas se muestran en la siguiente tabla:

	Coordenadas Geograficas		Coordenadas UTM Zona 13		
	Longitud	Latitud	Este	Norte	Elevacion
Area de Pruebas	105°31.368'	39°44.969'	455211,83	4400083,55	2442
Oficina	105°31.464'	39°44.890'	455073,25	4399938,29	2422
Oficinas Mina	105°31.519'	39°44.836'	454994,13	4399838,83	2399
Idaho Springs	105°31.464'	39°44.697'	455071,16	4399581,25	2338

Tabla 8 Coordenadas de las estructuras cercanas y del área de pruebas

La gráfica que a continuación se muestra es una fotografía satelital del área, obtenida del software libre “Google Earth”, en la cual se identificaron los cuatro lugares mencionados. Nótese la gran cercanía de las estructuras respecto al área de pruebas.



Figura 6 Fotografía satelital mostrando los lugares claves

Estas coordenadas son estáticas por lo que las distancias que hay entre el área de pruebas y los otros tres puntos permanecerán constantes a menos que el área de pruebas cambie de lugar en un futuro. Estas distancias se obtuvieron a través de cálculos muy sencillos a partir de las coordenadas UTM, las cuales se muestran a continuación.

Distancia Real del Area de Pruebas a:		
Oficina	201,75	m
Oficinas Mina	330,34	
Idaho Springs	531,89	

Tabla 9 Distancias de las estructuras al área de pruebas

Teniendo establecidas las distancias del área de pruebas a las diferentes estructuras y los límites máximos de la Velocidad Pico Partícula, sólo quedaría saber cuál es la cantidad máxima de explosivo a usar para no exceder los límites permisibles.

Para el caso de esta aplicación, se usará los límites de la VPP establecidos por el Bureau of Mines de los Estados Unidos de acuerdo al tipo de material de construcción. Para la oficina del área de pruebas, debido a que está construida en Drywall, se utilizará el límite de 0.75 in/s o 19.1 mm/s, mientras que para las oficinas de la mina y el pueblo de Idaho Springs (construcciones de material noble) se utilizará un límite superior de 2 in/s o 50.8 mm/s.

Ambos límites se observan en el Anexo 2, y se eligieron por ser valores acertados y aceptados. Si se introduce esta información al modelo predictivo, el resultado de la cantidad de explosivo máxima para cada caso se muestra en la siguiente tabla.

Cantidad Maxima de Explosivo		
Oficina	214,31	Kg.
Oficinas Mina	1768,74	
Idaho Springs	4585,35	

Tabla 10 Cantidad máxima de explosivos a usar para no exceder el límite máximo de VPP de acuerdo al modelo predictivo

Si se llevan estas cantidades a la fotografía satelital se pueden crear radios de acción para cada una de estas situaciones y visualizar de forma sencilla e interactiva los resultados mostrados.

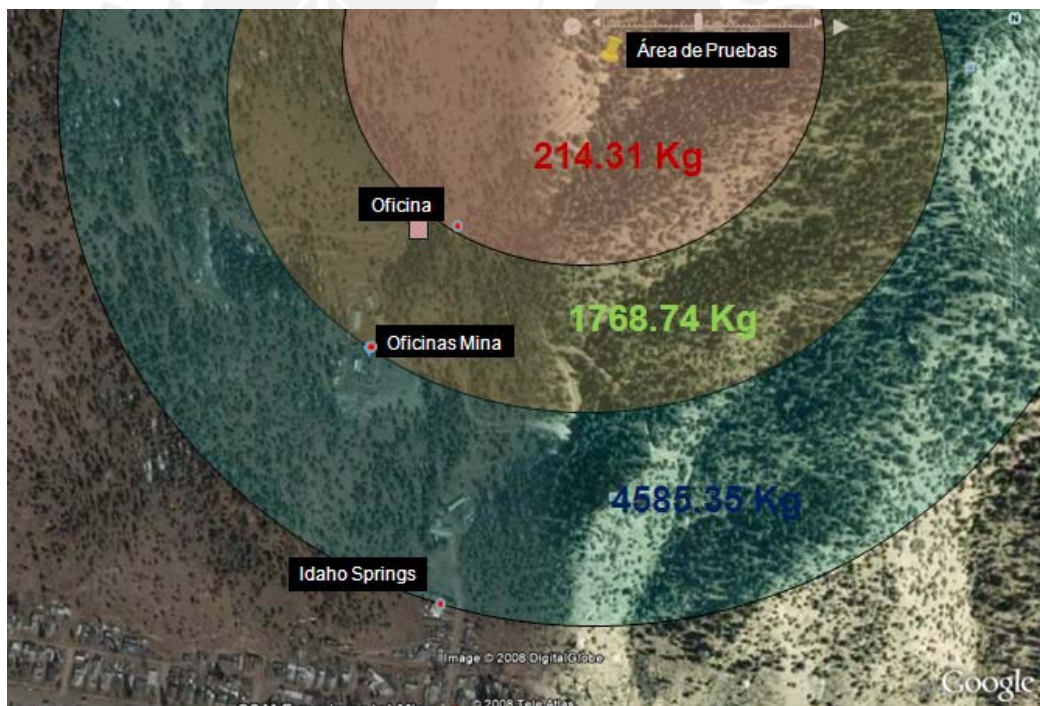


Figura 7 Foto satelital con radios de acción

Si buscamos obtener el valor de “Q” para el caso de las oficinas mina, con la condición de que el VPP no sobrepase el límite permitido por el US Bureau of mines, para material noble, de 50.8 mm/s, y utilizamos como base la siguiente fórmula:

$$VPP = k \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^b$$

Obtenemos:

VPP	K	D	b	Q
50,8	1140	330,34	1,6	2234,19
50,8	1834	330,34	1,74	1768,69

Tabla 11 Cantidad máxima de explosivos a usar para no exceder el límite máximo de VPP utilizando modelos teórico y real.

Se puede observar una diferencia de 465.5 kg. entre los valores de carga del explosivo, los cuáles varían por el ajuste de las variables “k” y “b” para este terreno en particular. Trabajar con modelos ajustados a una realidad específica puede mejorar la calidad de un análisis de riesgo, minimizando el factor error, para proyectos que impliquen voladuras.

Esta es sólo una de las formas de aplicación del modelo. Este puede servir para predecir cualquiera de las tres variables en juego y por ende tomar cualquier medida antes de una prueba.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

5.1 Conclusiones

- Los valores de VPP obtenidos en las pruebas bajo las características y condiciones de la mina modelo arrojaron como resultados $k = 1834$ y $b = 1.74$; los cuales son cercanos a los obtenidos por las fórmulas teóricas Australianas analizadas, observándose mayor correlación con el modelo donde el parámetro $K=1140$, que es cuando se trabaja en una roca con dureza promedio y con una cara libre (RMR* entre 41 – 60, Clasificación de roca: III).
- Una vez creado el modelo predictivo de la mina modelo, se corroboró su afinidad comparando los valores de las variables “K” y “b” con los del modelo teórico Australiano mencionado desde el inicio del presente trabajo; indicando que la utilización de este último puede aplicarse en el momento de obtener resultados base o con una aproximación a la realidad. Sin embargo, como se ha venido mencionando a lo largo de este proyecto, con la idea de minimizar los efectos negativos generados por una voladura, la industria minera necesita modelos predictivos diseñados en base a data real, considerando sus condiciones específicas como lo son la geología, topografía, parámetros de voladura, climas, entre otras.

- Los resultados finales obtenidos generan un modelo predictivo en base a una data que puede considerarse exacta pero no precisa. Esto se debe a la reducida cantidad de datos con los que se contó (Anexo 13).
- El modelo diseñado permite predecir cualquiera de las siguientes variables en cuestión: distancia (D), carga (Q) y VPP; conociendo dos de ellas y basándose en el comportamiento de las ondas vibratorias generadas por una voladura en la mina modelo.
- No se debe dejar de mencionar que si bien es cierto que el valor de la frecuencia es un parámetro importante en la evaluación de la capacidad de daño de las vibraciones producto de una voladura; los efectos negativos considerables se dan con frecuencias bajas, y dado que se comprobó que todas las VPP se dieron con frecuencias altas, se decidió no considerar dicho parámetro en el diseño del modelo.
- Basándonos en el modelo diseñado se puede concluir que toda prueba de voladura realizada en la mina modelo no generará vibraciones mayores al límite establecido por el Bureau of Mines (50.8 mm/s) y por ende no significarán una amenaza a las estructuras que se encuentran a su alrededor.
- Además de las variables básicas, Q, D y VPP, tenemos otras como la geología, topografía, parámetros de voladura, etc; las cuales están representadas en las constantes "K" y "b". Sin embargo, a pesar de incluir

la mayor cantidad de parámetros que influyen en el comportamiento de las ondas vibratorias, el diseñar un modelo en base a información histórica solo minimizará el factor error existente en la predicción, más no lo eliminará en un 100%; por lo que es fundamental ser conscientes de esto y trabajar con rangos de variabilidad.

5.2 Observaciones

- Por restricciones de tiempo y costos, la realización de las pruebas en la mina modelo fue limitada (16 pruebas realizadas y 13 pruebas aceptadas); por lo que el modelo predictivo solo es un diseño base del procedimiento de la elaboración de un modelo para cualquier operación minera, teniendo en cuenta que se debe contar con una mayor cantidad de datos para tener una conclusión más acertada de la relación entre VPP y frecuencia, y además, reducir el factor error.
- Para lograr una mayor precisión en el diseño del modelo predictivo es necesario trabajar con equipos más especializados; como por ejemplo, en el momento de medir distancias es recomendable utilizar equipos como estaciones totales o GPS, ya que al utilizar cintas métricas se incurre en errores, ya sean del instrumento en sí, humanos o los originados por la dificultad del terreno, aumentando así el error total de medición.

- Debido a que las pruebas fueron realizadas en superficie se considera importante el diseño de un modelo predictivo para el comportamiento del airblast, producto de las voladuras; ya que, como se mencionó anteriormente, la mayor parte de energía en este caso se libera en forma de airblast y no en vibraciones. Sin embargo, para tales propósitos es necesario contar con un equipo con una mayor capacidad de medición de presión de aire, partiendo de las halladas en los modelos teóricos correspondientes.
- Si bien se confirmó que las vibraciones generadas por las voladuras en la mina modelo no afectaban la infraestructura de los alrededores, también es importante considerar dentro de los efectos negativos de dichas voladuras la respuesta humana frente a estas vibraciones; ya que estas variables dependerán de la percepción de las personas involucradas, y para esto es necesario realizar estudios más precisos que escapan de un análisis de ingeniería.

BILIOGRAFÍA

- 2005** Fitzgerald Nicholson, Roy. Universidad: Lulea University of Technology
Determination of blast vibrations using Peak Particle Velocity in Bengal
Quarry, in St Ann, Jamaica.
- 1999** ORIARD, Lewis
The effects of vibrations and environmental forces.
- 1980** STAGG, Mark
Measurement of blast-induced ground vibrations and
seismograph calibration.
- 1999** INSTANTEL
Minimate Plus Operator Manual. Software Version 4.0
- 1999** INSTANTEL
Minimate Plus Software Manual. Software Version 4.
- 2003** López Jimeno, Carlos
Manual de Perforación y Voladura de rocas
- 1998** Siskind, David - Stachura, Virgil
Air blast and ground vibration generation from contour mine blasting
- 1981** Siskind - Stagg – Kopp - Downding
Structure response and damage produced by ground vibration from
surface mine design.
- 1995** Sánchez, Luis Enrique
Control de Vibraciones – II Curso Internacional de Aspectos Geológicos
de Protección Ambiental
- 1989** Isaaks, Edward – Srivastava, Mohan
An Introduction to Applied Geostatistics

1998 Deutsh, Clayton – Journal, André
GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide

Peralte Herrera, Germán – Mojica Villamizar, Rubén
Características y control de las vibraciones producidas por acción de las voladuras en minas a cielo abierto.

Pascual de Blas, Jesús
Problemática de las vibraciones en las voladuras.
Medición, Control y Regulación Legal.

Haberer, Braden – Whitebay Eric – Riggins, Luke
The measurement and Analysis of ground vibrations

Software SPSS Versión 15.0

Software Blastware

ANEXOS



ANEXO 1

Gráficamente podemos observar las diferentes clases de ondas:

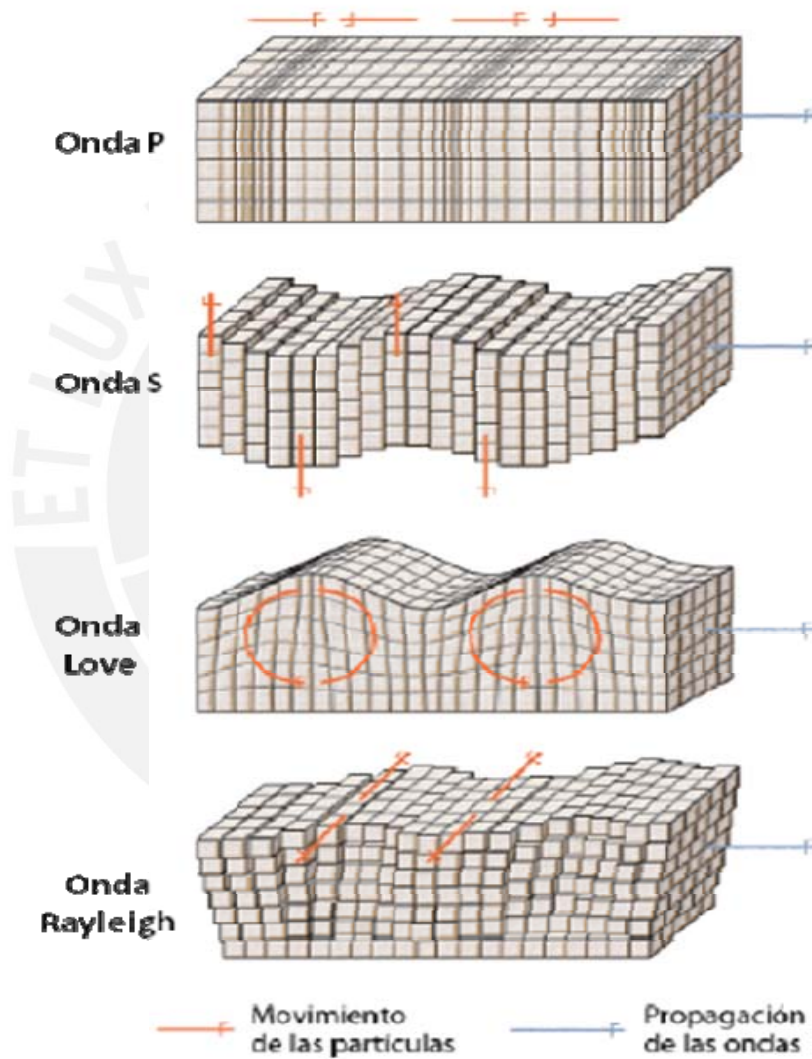


Fig. Tipos de ondas, sacado de <http://www.kalipedia.com>

ANEXO 2

12.7 mm/s (0.5in/s)	Bureau of Mines recommended guideline for plaster-on-lath construction near surface mines (long term, large scale, low frequency vibrations) (RI 8507)
19.1mm/s (0.75in/s)	Bureau of Mines recommended guideline for sheetrock construction near surface mines (RI 8507)
25.4 mm/s (1.0in/s)	OSM regulatory limits for residences near surface mine operations at distances 92-1524 meters (301-5000 feet)
50.8 mm/s (2.0 in/s)	Widely accepted limit for residences near construction and quarry blasting (BuMin 656, RI 8507)
137mm/s (5.4 in/s)	Minor damage to the average house subjected to quarry blasting vibrations (BuMin 656)
229 mm/s (9 in/s)	About 90% probability of minor damage from construction or quarry blasting. Structural damage to some houses depending on vibration source and character of the vibrations.
501 mm/s (20 in/s)	For close-in construction blasting, minor damage to nearly all houses and structural damages to some. For low-frequencies, major damage to most houses.

Tabla Rango de efectos en estructuras según los niveles de vibraciones

ANEXO 3

Valoración RMR		100 a 81	80 a 61	60 a 41	40 a 21	Menor a 20
Clasificación Nº		I	II	III	IV	V
Descripción		Roca muy buena	Roca buena	Roca regular	Roca mala	Roca muy mala
Tiempo medio de sostén		10 años para claro de 5m.	6 meses para claro de 4m.	1 semana para claro de 3m.	5 horas para claro de 15 m.	10 minutos para claro de 0.5 m
Parámetros geomecánicos	Cohesión	30 ton/m ²	20 a 30 ton/m ²	15 a 20 ton/m ²	10 a 15 ton/m ²	Menor a 10 ton/m ²
Recomendados	Ang. Fricción	Mayor a 45°	40° a 45°	35° a 40°	30° a 35°	Menor a 30°

Tabla Valoración RMR en un análisis Geomecánico

ANEXO 4



Fig. 1. Actualización de hora, fecha y lugar del evento, y programación del nivel de activación y sensibilidad de registro.



Fig. 2. Ubicación correcta del sensor, con dirección hacia la voladura.

ANEXO 5



Fig. Correcto Acoplamiento del sensor.

ANEXO 6

Blastware - # BC7228, Nov 20 /08 14:24:35 - [Event Manager - h:\blastware 8\event\21november08ii]

File Unit Tools Remote Access Window Help

Event Manager Event Report FFT Report Print Report Options Compliance Setup

Copy/Print Print Open Copy Delete New Folder Notes ASCII Print List Filter Archive Extract

Type	Serial No.	Date/Time	No. Chan	Trigger	Tran Peak (mm/s)	Vert Peak (mm/s)	Long Peak (mm/s)	Mic Peak (pa./dB)	PVS1 (mm/s)	Description
LOG	BC7228	Nov 20 /08 09:02:29	***	***	***	***	***	***	***	Start Monitoring
W	BC7228	Nov 20 /08 09:22:30	4	Tran	28.9	10.7	4.46	1.00L	30.7	CSM Explosive Engineering
W	BC7228	Nov 20 /08 09:22:40	4	Long	3.29	1.89	5.19	1.50L	5.61	CSM Explosive Engineering
W	BC7228	Nov 20 /08 10:31:43	4	Tran	15.5	16.1	8.46	***	17.3	CSM Explosive Engineering
W	BC7228	Nov 20 /08 10:59:58	4	Tran	15.1	16.9	8.33	***	18.7	CSM Explosive Engineering
W	BC7228	Nov 20 /08 11:25:31	4	Tran	14.1	15.3	7.72	***	16.6	CSM Explosive Engineering
W	BC7228	Nov 20 /08 13:15:13	4	Tran	3.60	0.810	1.25	0.500L	3.81	CSM Explosive Engineering
LOG	BC7228	Nov 20 /08 13:15:24	***	***	***	***	***	***	***	Keyboard Stop
LOG	BC7228	Nov 20 /08 14:23:24	***	***	***	***	***	***	***	Start Monitoring
W	BC7228	Nov 20 /08 14:24:35	4	Tran	8.76	9.52	4.19	1.50L	10.4	CSM Explosive Engineering
LOG	BC7228	Nov 20 /08 14:24:40	***	***	***	***	***	***	***	Stop Monitoring
LOG	BC7228	Nov 20 /08 15:02:24	***	***	***	***	***	***	***	Start Monitoring
W	BC7228	Nov 20 /08 15:05:11	4	Long	17.7	24.4	19.3	***	30.1	CSM Explosive Engineering
LOG	BC7228	Nov 20 /08 15:05:16	***	***	***	***	***	***	***	Stop Monitoring
LOG	BC7228	Nov 20 /08 15:08:46	***	***	***	***	***	***	***	Start Monitoring
W	BC7228	Nov 20 /08 15:08:46	4	Vert	30.0	13.8	17.5	1.25L	31.3	CSM Explosive Engineering
LOG	BC7228	Nov 20 /08 15:08:51	***	***	***	***	***	***	***	Stop Monitoring
LOG	BC7228	Nov 21 /08 10:21:08	***	***	***	***	***	***	***	Start Monitoring
W	BC7228	Nov 21 /08 10:21:24	4	Long	11.2	4.32	3.30	<0.500L	11.4	CSM Explosive Engineering
W	BC7228	Nov 21 /08 10:21:29	4	Tran	3.94	0.889	1.40	<0.500L	4.00	CSM Explosive Engineering
W	BC7228	Nov 21 /08 10:30:31	4	Vert	0.889	1.65	1.52	<0.500L	1.85	CSM Explosive Engineering
W	BC7228	Nov 21 /08 10:33:10	4	Tran	7.37	2.16	2.29	<0.500L	7.88	CSM Explosive Engineering
W	BC7228	Nov 21 /08 10:33:16	4	Tran	9.02	2.29	3.05	<0.500L	9.57	CSM Explosive Engineering
LOG	BC7228	Nov 21 /08 10:33:24	***	***	***	***	***	***	***	Keyboard Stop
LOG	BC7228	Nov 21 /08 10:54:12	***	***	***	***	***	***	***	Start Monitoring
W	BC7228	Nov 21 /08 10:54:17	4	Tran	2.38	1.21	0.794	0.500L	2.49	CSM Explosive Engineering
W	BC7228	Nov 21 /08 10:54:32	4	Vert	2.32	2.19	1.41	0.500L	2.77	CSM Explosive Engineering
W	BC7228	Nov 21 /08 10:54:38	4	Tran	2.32	3.70	3.38	1.00L	4.32	CSM Explosive Engineering

Default Directory

Series III Minimate Blaster Series II

Fig. Software BlastWare III (Software Version 4.3) – InstanTEL World Leader. Enumeración de todos los eventos registrados.

ANEXO 7

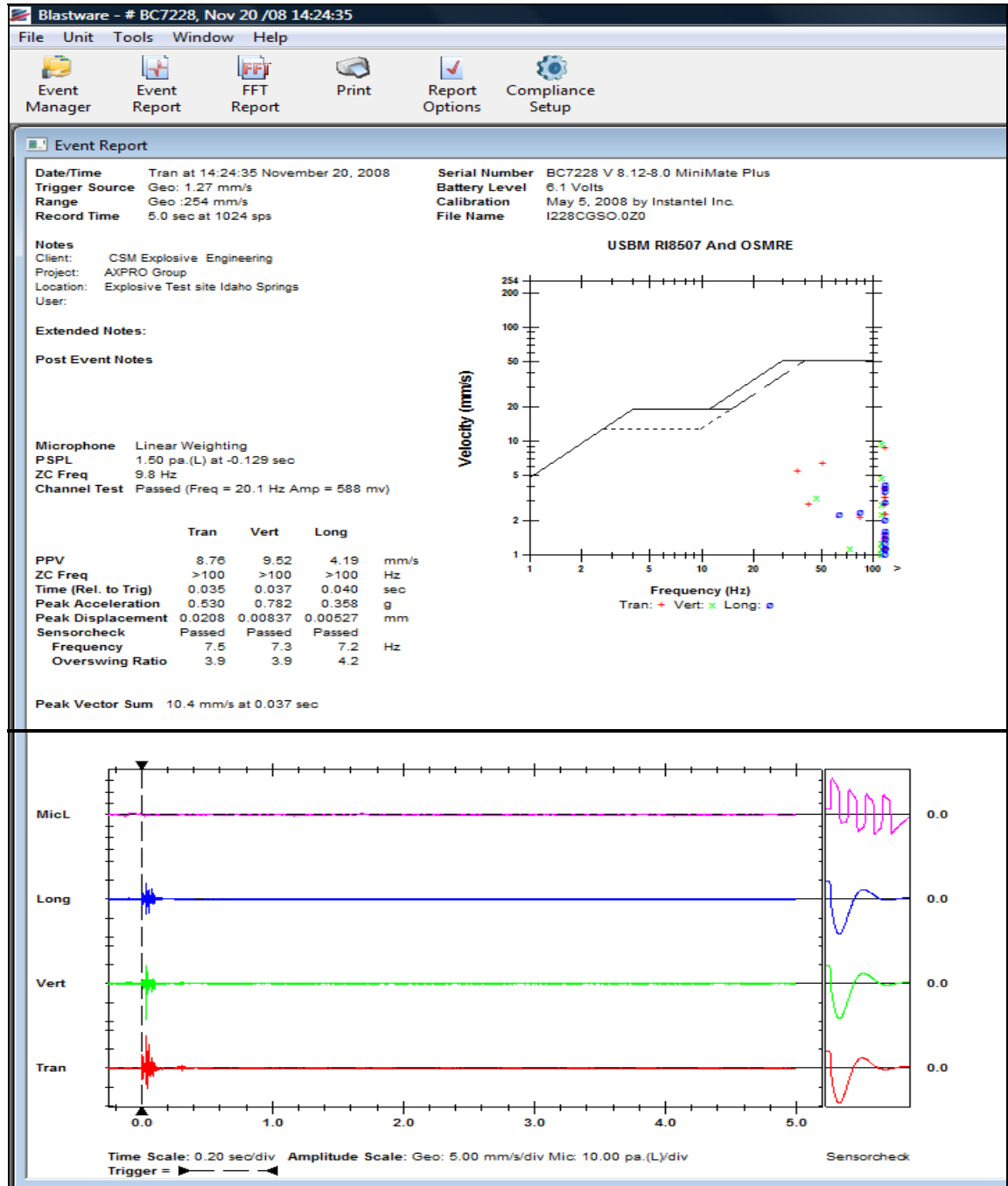
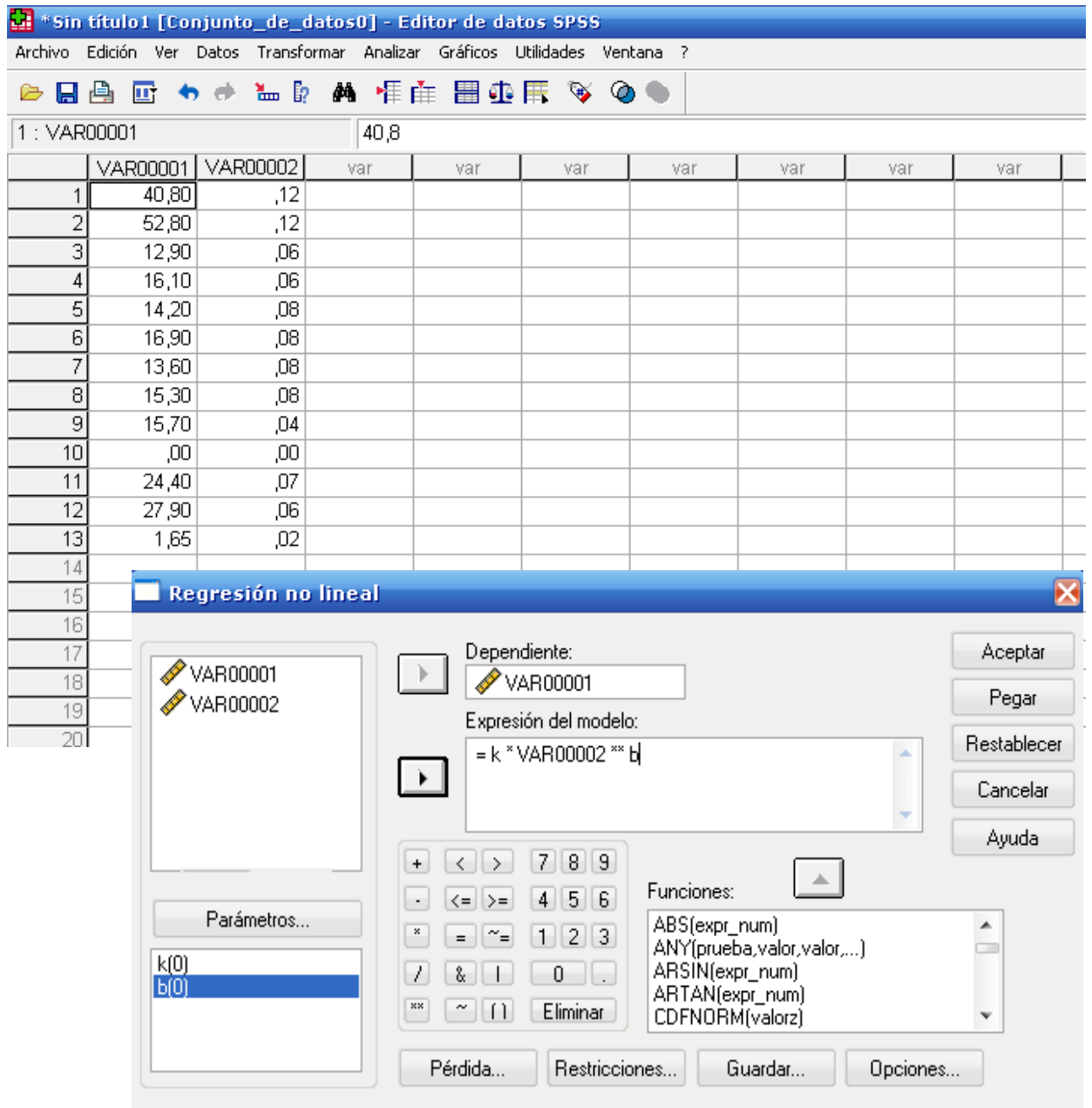


Fig. 1 Software BlastWare III Operator Manual (Software Version 4.3) – InstanTel Wold Leader. Reporte de Eventos de uno de los registros seleccionados.

ANEXO 8



*Sin título1 [Conjunto_de_datos0] - Editor de datos SPSS

Archivo Edición Ver Datos Transformar Analizar Gráficos Utilidades Ventana ?

1 : VAR00001 40,8

	VAR00001	VAR00002	var	var	var	var	var	var	var
1	40,80	,12							
2	52,80	,12							
3	12,90	,06							
4	16,10	,06							
5	14,20	,08							
6	16,90	,08							
7	13,60	,08							
8	15,30	,08							
9	15,70	,04							
10	,00	,00							
11	24,40	,07							
12	27,90	,06							
13	1,65	,02							
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									

Regresión no lineal

Dependiente: VAR00001

Expresión del modelo: = k * VAR00002 ** b

Funciones:
 ABS(expr_num)
 ANY(prueba,valor,valor,...)
 ARSIN(expr_num)
 ARTAN(expr_num)
 CDFNORM(valorz)

Parámetros...
 k(0)
 b(0)

Botones: Aceptar, Pegar, Restablecer, Cancelar, Ayuda, Pérdida..., Restricciones..., Guardar..., Opciones...

Fig. Utilización del software SPSS 15.0 para encontrar las constantes “K” y “b” mediante una regresión no lineal.

ANEXO 9

Número de iteraciones(a)	Suma de cuadrados residual	Parámetro		Número de iteraciones(a)	Suma de cuadrados residual	Parámetro	
		k	b			k	k
1	7,407,382	,000	,000	15.1	1,253,381	84,522	,533
1.1	3.31E+89	20,714	-24,400	16	1,253,381	84,522	,533
1.2	1,132,573,226,415	2,071	-2,440	16.1	1,127,143	128,277	,713
1.3	7,215,707	,207	-,244	17	1,127,143	128,277	,713
2	7,215,707	,207	-,244	17.1	370,281	172,040	,801
2.1	6,808,246	,368	-,476	18	370,281	172,040	,801
3	6,808,246	,368	-,476	18.1	891,048	259,566	,383
3.1	6,320,852	,524	-,588	19	891,048	259,566	,383
4	6,320,852	,524	-,588	19.1	770,982	347,097	1,075
4.1	5,571,106	,751	-,632	20	770,982	347,097	1,075
5	5,571,106	,751	-,632	20.1	733,047	522,159	1,260
5.1	4,770,641	1,118	-,770	21	733,047	522,159	1,260
6	4,770,641	1,118	-,770	21.1	644,957	697,222	1,356
6.1	4,367,300	1,710	-,685	22	644,957	697,222	1,356
7	4,367,300	1,710	-,685	22.1	645,411	1,047,350	1,545
7.1	3,929,375	2,859	-,518	22.2	612,586	871,366	1,441
8	3,929,375	2,859	-,518	23	612,586	871,366	1,441
8.1	3,438,653	5,409	-,306	23.1	606,832	1,219,654	1,595
9	3,438,653	5,409	-,306	24	606,832	1,219,654	1,595
9.1	2,884,737	8,128	-,252	24.1	576,665	1,393,798	1,628
10	2,884,737	8,128	-,252	25	576,665	1,393,798	1,628
10.1	2,547,729	13,496	-,053	25.1	574,812	1,709,757	1,720
11	2,547,729	13,496	-,053	26	574,812	1,709,757	1,720
11.1	2,167,305	18,955	,012	26.1	571,418	1,817,122	1,737
12	2,167,305	18,955	,012	27	571,418	1,817,122	1,737
12.1	1,913,443	29,851	,195	27.1	571,396	1,831,963	1,740
13	1,913,443	29,851	,195	28	571,396	1,831,963	1,740
13.1	1,640,955	40,784	,271	28.1	571,396	1,834,167	1,740
14	1,640,955	40,784	,271	29	571,396	1,834,167	1,740
14.1	1,457,598	62,644	,450	29.1	571,396	1,834,556	1,740
15	1,457,598	62,644	,450				

Fig. Historial de Iteraciones realizados en el software SPSS 15.0

ANEXO 10

VOLADURA TIPO CRÁTER

La llamada voladura tipo cráter es aquella que se da cuando las cargas se encuentran concentradas, esféricas o cúbicas, y ciertas veces con una buena aproximación con cargas cilíndricas no muy alargadas.

En la siguiente figura se puede apreciar la influencia de la energía que transmite el explosivo a la roca en una voladura, dependiendo de la profundidad de la carga y el volumen de material afectado. De esta manera tenemos:

- (a) Voladura superficial – $0.2 \text{ m/kg}^{1/3}$, en este caso, al encontrarse la carga en la superficie, la mayor cantidad de energía será liberada en forma de onda aérea (airblast).
- (b) Cráter aparente óptimo – $0.6 \text{ m/kg}^{1/3}$, situación intermedia donde se conseguirá el cráter de mayor volumen.
- (c) Voladura profunda – $0.1 \text{ m/kg}^{1/3}$, si la profundidad es bastante marcada, toda la energía liberada se concentrará en la roca, fragmentándola y produciendo de esta forma un alto nivel de vibraciones.

ANEXO 11

ATENUACIÓN

La palabra atenuación se refiere al decaimiento de la amplitud y de la energía en un movimiento oscilatorio, debido a la existencia de fuerzas de amortiguación que afectan al movimiento.

El amortiguamiento es un sinónimo de la pérdida de energía de sistemas vibratorios, también conocido como damping, viene a ser un fenómeno por el cual se reduce la amplitud del movimiento ondulatorio de un punto del macizo, que ha sido excitado al paso del frente de onda, debido a trabajo que cede al material y que generalmente se transforma en calentamiento. En consecuencia, la energía total del frente disminuye.

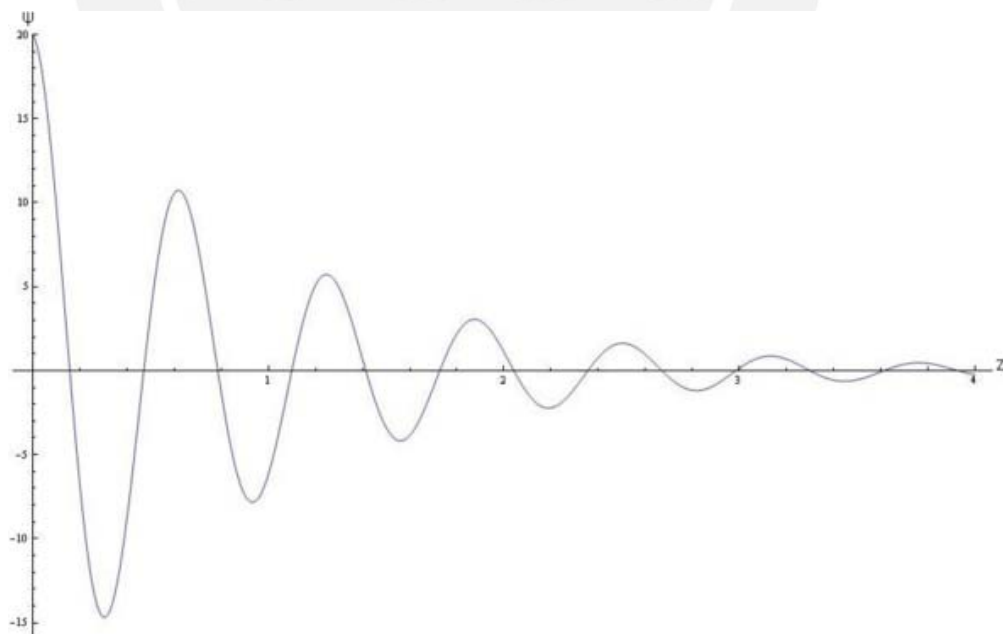


Figura Propagación de una onda viajera con atenuación en función de la distancia que recorre

ANEXO 12

Reflexión de la onda de choque

Cuando una onda de choque alcanza una superficie libre, esta genera dos ondas, una de tracción y otra de cizallamiento.

Esto sucederá siempre y cuando las grietas radiales no se hayan propagado más que una distancia equivalente a un tercio de la que existe desde la carga a dicha superficie libre. Si bien es cierto que la magnitud es relativa de las energías asociadas a las dos ondas depende del ángulo de incidencia de la onda de choque primaria, generalmente, la onda de tracción reflejada es la que causa la fracturación. Cuando estas tensiones de tracción superan la resistencia dinámica de la roca se produce hacia el interior el fenómeno conocido como descostramiento o spalling.

Lo que se busca es aprovechar las diferentes resistencias que posee la roca, debido a que las resistencias a tracción aproximadamente alcanzan valores entre un 5 y 15% de las resistencias a compresión.

ANEXO 13



Fig.1 Oficinas



Fig.2 Oficinas Mina



Fig.3 Idaho Springs

Fig. 1, 2 y 3 Lugares que se tomaron en cuenta para realizar el gráfico de radios de acción de las ondas vibratorias.

ANEXO 14

Precisión se refiere a la dispersión del conjunto de valores obtenidos de mediciones repetidas; es lo cerca que dichos valores están unos de otros. Cuanto menor es la dispersión, mayor será la precisión. La desviación estándar de las mediciones es la medida común de variabilidad.

La exactitud se refiere a que tan cerca del valor real se encuentra el valor medido y en términos estadísticos, ésta está relacionada con el sesgo de estimación. En este caso, cuanto menor sea el sesgo, más exacta podrá ser la estimación.

Gráficamente se tiene,

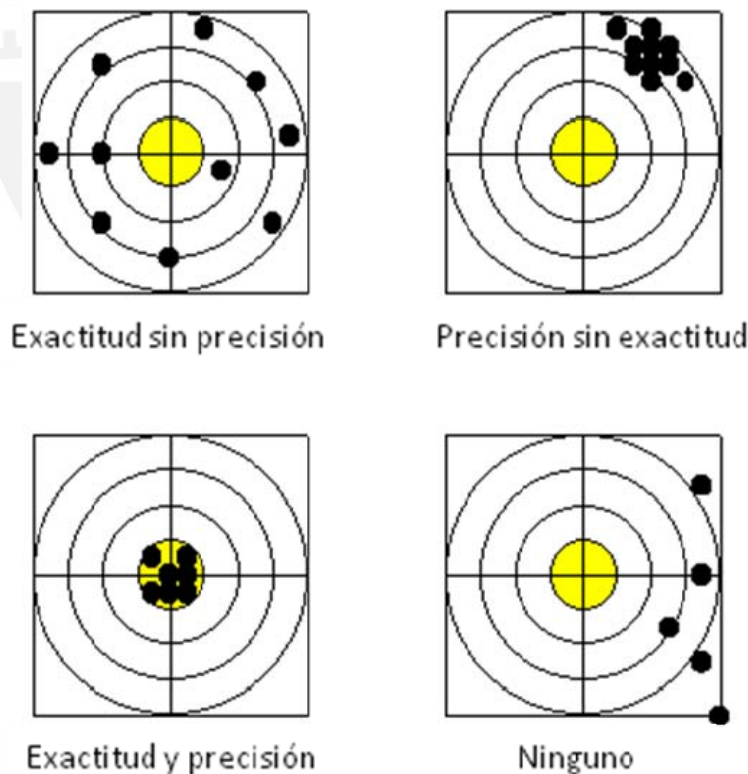


Figura. Ejemplos de Exactitud y Precisión sacado de presentación “Introducción al muestreo minero” de Ing. Marco Antonio Alfaro.