



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA DE MINAS

“MITIGACIÓN DE VIBRACIONES MEDIANTE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DIRECTA (DNS), A CAMPO LEJANO EN UNA MINA A TAJO ABIERTO - 2018”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Bach. José Luis Díaz Espinoza
Bach. Roger Sebastian Lucano Alvarado

Asesor:

Ing. Alex Patricio Marinovic Pulido

Cajamarca – Perú
2018

ÍNDICE DE CONTENIDOS

<u>APROBACIÓN DE LA TESIS</u>	ii
<u>DEDICATORIA</u>	iii
<u>AGRADECIMIENTO</u>	iv
<u>ÍNDICE DE CONTENIDOS</u>	v
<u>ÍNDICE DE TABLAS</u>	viii
<u>ÍNDICE DE FIGURAS</u>	ix
<u>RESUMEN</u>	xi
<u>ABSTRACT</u>	xii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Realidad problemática	13
1.2. Formulación del problema.....	13
1.3. Justificación.....	13
1.4. Objetivos	14
1.4.1. <i>Objetivo General</i>	14
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i>	14
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	15
2.1. Antecedentes	15
2.2. Bases Teóricas	16
2.2.1. <i>Simulación Numérica Directa</i>	16
2.2.2. <i>Fundamentos de las vibraciones</i>	18
2.2.2.1. <i>Propiedades Básicas de las Ondas</i>	18
2.2.2.2. <i>Duración de las Vibraciones</i>	20
2.2.2.3. <i>Longitud de Onda de las Vibraciones</i>	21
2.2.2.4. <i>Velocidad de onda o de propagación.</i>	21
2.2.2.5. <i>Velocidad de partícula.</i>	22
2.2.2.6. <i>Tipos de Ondas Sísmicas Generadas.</i>	23
2.2.2.7. <i>Parámetros de las Ondas.</i>	25
2.2.2.8. <i>Análisis de Frecuencias</i>	27
2.2.3. <i>Variables que Afectan a las Vibraciones.</i>	27
2.2.3.1. <i>Geología Local y Características de la Roca.</i>	27
2.2.3.2. <i>Peso de la Carga Operante.</i>	29
2.2.3.3. <i>Distancia al Punto de Voladura.</i>	29
2.2.3.4. <i>Distribución de la Energía Potencial de un Explosivo en la Voladura.</i>	30
2.2.3.5. <i>Tipos de Explosivo.</i>	31
2.2.3.6. <i>Energía de las Mezclas Explosivas</i>	31

2.2.3.7.	<i>Potencia de los Explosivos</i>	33
2.2.3.8.	<i>Tiempos de Retardo.</i>	34
2.2.3.9.	<i>Variables Geométricas de las Voladuras.</i>	36
2.2.4.	<i>Características de las Vibraciones Originadas por Voladuras.</i>	38
2.2.4.1.	<i>Vibraciones de un solo Taladro</i>	39
2.2.4.2.	<i>Vibraciones Producidas por una Voladura</i>	42
2.2.4.3.	<i>Efectos de la Voladura</i>	44
2.2.5.	<i>Ecuaciones de propagación de la onda</i>	45
2.2.5.1.	<i>Atenuación Geométrica.</i>	45
2.2.5.2.	<i>Perdida Friccional</i>	45
2.2.5.3.	<i>Consecuencia de la Combinación entre el efecto de la Atenuación Geométrica y Fricción</i>	47
2.2.5.4.	<i>Cambio de la Frecuencia con la Distancia</i>	48
2.2.6.	<i>Instrumentación de Registro y Análisis de Vibraciones.</i>	50
2.2.6.1.	<i>Equipos de Registro y Análisis.</i>	51
2.2.6.2.	<i>Transductores de Vibraciones</i>	52
2.2.6.3.	<i>Modo de activación de Sismógrafo</i>	55
2.2.6.4.	<i>Equipo de Análisis</i>	55
2.2.7.	<i>Estimadores de Leyes de Amortiguación de Vibraciones.</i>	65
2.2.7.1.	<i>Análisis de la Velocidad Pico Partícula</i>	66
2.2.7.2.	<i>Estimación de Vibraciones Terrestres.</i>	67
2.2.7.3.	<i>Modelo de Campo lejano</i>	68
2.2.7.4.	<i>Modelo de Campo Cercano</i>	70
2.2.7.5.	<i>Comparación entre los Modelos de Devine y Holmberg & Persson</i> 73	
2.2.7.6.	<i>Predicción Teóricas de las Vibraciones Terrestres.</i>	74
2.2.8.	<i>Monitoreo de las Vibraciones</i>	76
2.2.8.1.	<i>Obtención de Datos a Partir del Monitoreo de las Vibraciones:</i>	77
2.2.8.2.	<i>Eficiencia Relativa del Explosivo</i>	78
2.2.9.	<i>Criterios de Prevención de Daños en Estructuras Internas y Edificaciones.</i>	79
2.2.9.1.	<i>Criterios de Prevención de Daños Para Vibraciones.</i>	79
2.3.	<i>Hipótesis</i>	82
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE TRABAJO		84
3.1.	<i>Diseño de investigación</i>	85
3.2.	<i>Unidad de estudio</i>	85
3.3.	<i>Población</i>	85
3.4.	<i>Muestra (muestreo o selección)</i>	85
3.5.	<i>Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos.</i>	85
3.5.1.	<i>Diseños Preliminares</i>	85
3.5.1.1.	<i>Diseño De Voladura</i>	85
3.5.2.	<i>Equipos de monitoreo.</i>	90
3.6.	<i>Método, instrumentos y procedimientos de recolección de datos.</i>	90
3.6.1.	<i>Desarrollo del Modelo a Campo Lejano</i>	92
3.6.1.1.	<i>Demostración de K, α y r</i>	92
3.6.1.2.	<i>Medición de la Vibraciones</i>	97

3.6.1.3.	<i>Modelo Original: (con un 50% de confianza)</i>	102
3.6.1.4.	<i>Modelo Ajustado: (con un 80% de confianza)</i>	102
CAPÍTULO 4.	RESULTADOS	104
CAPÍTULO 5.	DISCUSIÓN	112
CONCLUSIONES	114
RECOMENDACIONES	115
REFERgENCIAS	116
ANEXOS	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Distribución de la Energía en Diferentes Eventos	32
Tabla 2-2 Parámetros Característicos de las Vibraciones Producidas por Voladuras.....	50
Tabla 2-3 Constante k_f en función del tipo de terreno.....	76
Tabla 2-4 Norma Francesa AFTES (1975). Límites Máximos Permisibles de Velocidad Pico Partícula de Acuerdo Tipo Estructura.....	80
Tabla 2-5 Norma ASHLEY (1976). Límites Máximos Permisibles de Velocidad Pico Partícula de Acuerdo Tipo Estructura.....	80
Tabla 2-6 Norma ESTEVES (1978). Límites Máximos Permisibles de Velocidad Pico Partícula de Acuerdo Tipo Estructura.....	80
Tabla 2-7 Norma CHAE (1978). Límites Máximos Permisibles de Velocidad Pico Partícula de Acuerdo Tipo Estructura.....	80
Tabla 2-8 Norma WISS (1981). New SWS Standard para Vibraciones en Edificios. Límites Máximos Permisibles de Velocidad Pico Partícula de Acuerdo Tipo Clase.	81
Tabla 2-9 Normativa Americana (1982). Normativa de Oficina de la Minería de Superficie (OSM).	81
Tabla 2-10 Normativa Alemana. DIN 4150 (1983). Según el Tipo de Estructuras.	81
Tabla 2-11 Normativa Peruana de Vibraciones.....	82
Tabla 3-1 Operacionalización de Variables.....	84
Tabla 3-2 Parámetros de Perforación y Voladura del Tajo.....	86
Tabla 3-3 Consideraciones para la elaboración del cook book	86
Tabla 3-4 Registro de Vibraciones	98
Tabla 4-1 Resumen de la Recomendación de Cargas a partir del DNS	106
Tabla 4-2 Datos obtenidos para a un Ajuste del 80%.	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Diagrama de flujo de un estudio de Simulación	18
Figura 2-2 Comportamiento del PPV de Acuerdo a la Intensidad de la Frecuencia.....	19
Figura 2-3 Duración de la PPV en el Tiempo	20
Figura 2-4 Tiempo de Arribo de la Velocidad de la Onda.....	22
Figura 2-5 Análisis de la Velocidad de partícula y de Propagación.....	23
Figura 2-6 Ondas Primarias o Longitudinales “P”	24
Figura 2-7 Ondas Secundarias y Transversales “S”	24
Figura 2-8 Ondas Superficiales	25
Figura 2-9 Movimiento Ondulatorio Sinusoidal.....	26
Figura 2-10 Frecuencias Dominantes en Operaciones de Arranque con Voladuras	28
Figura 2-11 Modificación de las Vibraciones al Propagarse por Terrenos de Diferente Estructuras y Características	30
Figura 2-12 Alteración Producidas por las Voladuras	31
Figura 2-13 Esquema para la Medición de la Energía del Explosivo Bajo el Agua	33
Figura 2-14 Influencia del Intervalo de Retardo en el Nivel Máximo de Vibración.....	35
Figura 2-15 Efectos de una Carga Explosiva Según la Dimensión de la Roca.	37
Figura 2-16 Registro de Onda de la Velocidad de Vibración de una Voladura de Producción, Mostrando Variación de Amplitud y Frecuencia Respecto al Tiempo.	39
Figura 2-17 Onda Generada por la Detonación de un Taladro	40
Figura 2-18 Detalles de las Partes Analizadas en la Trayectoria de una Onda Vibratoria.	44
Figura 2-19 Pérdida de energía Friccional Durante la Propagación de la Onda (el área sombreada indica la energía).....	46
Figura 2-20 Importancia Relativa de la Pérdida de Energía y Disipación Geométrica en la Amplitud de la Vibración Debido a la Distancia.....	48
Figura 2-21 Cambios de frecuencia con la distancia de Propagación Debido a la Pérdida Friccional	49
Figura 2-22 Esquema General de Registro y Análisis de las Vibraciones.....	51
Figura 2-23 Acelerómetro.....	53
Figura 2-24 Geófono	54
Figura 2-25 Descarga de la información del Sismógrafo hacia la PC	56
Figura 2-26 Descarga de datos - Software BlastWare III	60
Figura 2-27 Secuencia de Procesamiento de Datos	60
Figura 2-28 creación de Carpeta para Copiar Data.....	61
Figura 2-29 Lista de Eventos para Copiar.....	62
Figura 2-30 Reporte de Data de Eventos.....	64

Figura 2-31 Resultado de Vibraciones	65
Figura 2-32 Integración de la Longitud de Carga para Calcular la Velocidad de Partícula en un Punto.....	71
Figura 2-33 Barrenos de Pequeño Diámetro y Longitud Cargados con ANFO (Holmberg y Persson).....	72
Figura 2-34 Diferencia en la Predicción de Vibraciones según el Modelo Devine y Holmberg & Persson	74
Figura 2-35 Distancia de la Voladura al Punto de Registro.....	76
Figura 2-36 Registro Genérico de la Velocidad de Partículas.....	77
Figura 2-37 Desplazamiento Permitido del Geófono (< 2mm)	78
Figura 2-38 Desplazamiento Excesivo del Geófono (>2mm)	78
Figura 2-39 Medición de Vibraciones de una Voladura en Frentes.....	79
Figura 3-1 Diseño de Perforación y Voladura Estándar AC PV271 75°	88
Figura 3-2 Diseño de Perforación y Voladura Estándar IR DML 75°.....	89
Figura 3-3 Metodología Propuesta para la Prevención y Control de Vibraciones de Voladura	91
Figura 3-4 Línea de Tendencia - TO. Ajustado al 50%	101
Figura 3-5 Línea de Tendencia - TO. Ajustado al 80%.....	102
Figura 3-6 Línea de Tendencia Promedio Vs Modelo Ajustado al 80%.	103
Figura 4-1 Comportamiento de PPV	104
Figura 4-2 Línea de Tendencia Promedio Vs Modelo Ajustado al 80%.	105
Figura 4-3 Abaco de Carga Vs Distancia. Ajustado al 80%	108
Figura 4-4 Ubicación de la Estación de Geófono	109
Figura 4-5 Resumen de los PPVs de Voladuras del Tajo	111
Figura 4-6 Resultados del Dig Rate – HIT 5500EX	111
Figura 5-1 Resumen de Carguío en las 3 Pruebas	112
Figura 5-2 Factor de Carga Vs Factor de Carga Real.....	113

RESUMEN

En la actualidad en la industria de la minería en nuestro país, la voladura de roca es la técnica de extracción masiva más usada y que a su vez es una forma de generar vibraciones; por lo tanto, el conocimiento de su origen, los fenómenos asociados a su transmisión (Atenuación Geométrica, Perdida Friccional), la medición de sus magnitudes fundamentales (Amplitud, Frecuencia, Velocidad de Partícula, Aceleración), las técnicas para mitigarlas (Voladura Controlada) y la legislación que las regula; sirven para controlarlas, reducir las y hacerlas imperceptibles tanto para la operación como para las zonas cercanas que podrían verse afectadas por ellas. Además, el alto grado de influencia de los resultados de la voladura, en los procesos del ciclo operacional, hace evidente la necesidad de contar con la experiencia y tecnología que permitan evaluar y posteriormente optimizar la operación unitaria.

El empleo adecuado del Monitoreo de las Vibraciones producidas por voladuras, es una técnica que provee múltiples ventajas en términos de poder examinar en detalle la operación unitaria. En efecto, la medición de los niveles de Velocidad Pico Partícula (PPV), que provoca la detonación de cada carga explosiva, es un medio a través del cual es posible conocer su eficiencia relativa, su interacción con las cargas adyacentes y en definitiva el rendimiento general del diseño.

En este sentido, la presente investigación desarrollada en una Operación Minera ideal, se enfoca en la mitigación del impacto de vibraciones mediante la Simulación Numérica Directa a Campo Lejano inducidas por una voladura, a través de la optimización la carga explosiva (Quantex 70/30), por retardo utilizando datos del monitoreo de vibraciones como: carga operante y características dinámicas o leyes de atenuación del terreno; para luego, aplicar una regresión lineal entre la Distancia Escalar (D_s), y la Velocidad Pico Partícula (PPV), que nos dará como resultado un modelo predictivo confiable.

Como resultado del análisis de vibraciones para la etapa operacional, el modelo ajustado para la estimación de vibraciones obtenidas a la distancia más cercana de influencia (límite de tajo con la comunidad), recomendó para la primera prueba una Carga Máxima Operante de 494 kg con una predicción de PPV de 2.37 mm/s. En la segunda prueba ubicada prácticamente a la misma distancia la carga recomendada fue de 494 kg, con una predicción de PPV de 2.06 mm/s. y finalmente en la última prueba realizada se decidió cargar 460 kg de explosivo con una predicción de PPV de 2.04 mm/s.

En cuanto al Dig Rate (Tasa de Excavación), de la pala modelo HIT 5500EX, se obtuvieron un 92%, 79% y 74% de resultados positivos durante el tiempo de minado correspondientemente.

ABSTRACT

Currently in the mining industry in our country, rock blasting is the most used mass extraction technique and in turn is a way to generate vibrations; therefore, the knowledge of its origin, the phenomena associated with its transmission (Geometric Attenuation, Frictional Loss), the measurement of its fundamental magnitudes (Amplitude, Frequency, Speed of Particle, Acceleration), the techniques to mitigate them (Controlled Blasting) and the legislation that regulates them; they serve to control them, reduce them and make them imperceptible both for the operation and for the nearby areas that could be affected by them. In addition, the high degree of influence of the results of the blasting, in the processes of the operational cycle, makes evident the need to have the experience and technology to evaluate and subsequently optimize the unit operation.

The proper use of the Monitoring of Vibrations produced by blasting, is a technique that provides multiple advantages in terms of being able to examine in detail the unit operation. In effect, the measurement of the levels of Peak Speed Particle (PPV), which causes the detonation of each explosive charge, is a means through which it is possible to know their relative efficiency, their interaction with adjacent charges and ultimately the performance general design

In this sense, the present research developed in an ideal Mining Operation, focuses on the mitigation of the impact of vibrations by means of Direct Numerical Direct Field Simulation induced by a blast, through the optimization of the explosive charge (Quantex 70/30) , by delay using vibration monitoring data such as: operant load and dynamic characteristics or laws of ground attenuation; to then apply a linear regression between the Scalar Distance (Ds), and the Peak Particle Rate (PPV), which will give us as a result a reliable predictive model.

As a result of the analysis of vibrations for the operational stage, the adjusted model for the estimation of vibrations obtained at the closest influence distance (cutoff limit with the community), recommended for the first test a Maximum Operational Load of 494 kg with a PPV prediction of 2.37 mm / s. In the second test located practically at the same distance the recommended load was 494 kg, with a PPV prediction of 2.06 mm / s. and finally in the last test carried out it was decided to load 460 kg of explosive with a PPV prediction of 2.04 mm / s

As for the Dig Rate (Excavation Rate), of the model blade HIT 5500EX, 92%, 79% and 74% of positive results were obtained during the mining time correspondingly.

NOTA DE ACCESO

No se puede acceder al texto completo pues contiene datos confidenciales

REFERgENCIAS

- Arana et al. (2016). *Apuntes de Simulación Numérica de Yacimientos*. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ash, R. &. (1976). *Changing borehole length to improve breakage: a case history, Proc Second Conference on Explosives and Blasting Techniques, Society of Explosives Engineers, Louisville, Kentucky*.
- ATLAS POWDER. (1987). *EXPLOSIVES AND ROCK BLASTING*. Texas USA: Atlas Powder Company Dallas.
- Borges Viralta, J. E. (2004). *Monitoreo, Estudio y Analisis de Vibraciones Asociadas al Uso de Voladuras con Explosivos en los Trabajos de Ejecución del Tunel Carrizalito de la Linea del Metro Los Teques*. Caracas: Ilustre Universidad Central de Venezuela.
- Contreras Perez, W. J. (2009). *Selección del Explosivo Adecuado y Carga Maxima por Retardo Usando el Monitoreo, Modelamiento y Analisis de Vibraciones - Aplicación Mina Ares*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Cunningham C. (1983). *The Model for Production of Fragmentation from Blasting*. Lulea.
- Díaz , L., & Lucano, R. (2014). *VIBRACIONES EN VOLADURA: MEDICIÓN, CONTROL Y REGULACIÓN LEGAL*. Cajamarca.
- ENAEEX. (2001). *Manual de Tronadura de Rocas a Cielo Abierto*. Chile: Gerencia Técnica ENAEEX S.A.
- EXSA Soluciones S.A. (2010). *Manual Practico de Voladura*. Lima: Exsa.
- Hardygóra et al. (2004). *Mine Planing and Equipment Selection*. London: Francis Group.
- INGEMMET. (2007). *Geología de los Cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba*. Lima: Boletín N° 31.
- Instantel® Inc. (2005). *Blasmate® III - Operador Manual*. U.S.A.
- Iriarte, F. A. (2010). *Control de Vibraciones para Casas e Tierra en Perú*. Lima.
- Konya, C. J. (1998). *Diseño de Voladuras*. Cuicatl.
- López et al. (1994). *Manual de Perforación y Voladura de rocas*. Madrid: Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
- López et al. (2003). *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*. Madrid: Gráficas Arias Montana S.A.
- López et al. (2010). *Manual de Voladura en Tuneles*. Madrid: Graficas Areas Montano S.A.
- Lutton. (1976). *Geology of the Bohemia Mining District, Lane County, Oregon*. . Arizona: Universidad de Arizona.
- McKenzi C.K. (1992). *The Significance of Amplitude in Blast Vibration*. Montreal: Canadian Institute of Mining & Metallurgy, 94th.
- Navarro, T. V., & Masques, B. P. (2004). *El Blastware III como Heramienta para la Prevension y Control Ambiental de Vibraciones en Voladura*. Lisboa: Universidad Tecnica de Lisboa.
- Orica Mining Services . (2009). *Presentaciones de Trabajos Tecnicos*. Lima: Orica.
- Orihuela Castillo, S., & Dapello, V. J. (2009). *Diseño de un Modelo Predictivo a partir de un estudio de vibraciones en una voladura en una Mina modelo*. Lima: Catolica.
- Sanchidrián et al. (2013). *Measurement and Analisis of Blast Fracmentation*. London: Francis Group.
- SVS Ingenieros, S. (2014). *IV Modificación del Plan de Cierre de Minas* . Lima.