

DETERMINACIÓN DE LOS MODELOS DE VELOCIDAD DE PARTÍCULAS EN VOLADURAS

(Particle Speed Determination Models in Blasting)

Luis Humberto Pinto Morales*, María del Carmen Fuentes F.**

*I.GeosoftMine, pintomoraleshumberto@yahoo.com

**Uptc-Sogamoso, marcaf_humb@latinmail.com

(Recibido Octubre 10 de 2006 y aceptado Abril 15 de 2007)

<p>Resumen: Se exponen los resultados obtenidos con la utilización de diferentes modelos de velocidad de las partículas empleados durante voladuras que se realizaron en la empresa Calizas y Agregados Boyacá S.A., para de esta forma estimar y controlar el nivel de daño generado por los trabajos que se ejecutan. Esta investigación se realizó con el objetivo de monitorear las vibraciones inducidas por las voladuras sobre las estructuras y edificaciones de interés cercanas a la línea de diseño de pit final de la cantera de caliza de esta empresa en Sáchica (Boyacá).</p>	<p>Abstract: This is an exposition of the results obtained with the use of different particles speed models, used during the blasts carried out in the company "Calizas y Agregados Boyacá S.A.", in order to consider and to control the damage's level caused by the execution of these works. This investigation was made with the aim to monitor the vibrations induced by the blasts on the structures and constructions of interest, near the final design line of the limestone quarry pit, that belongs to this company, in Sáchica, Boyacá.</p>
<p>Palabras clave: Vibraciones, Voladuras, Acelerógrafos.</p>	<p>Key Words: Vibrations, Blasting, Acceleration Graphs Machines</p>

1. INTRODUCCIÓN

Las vibraciones generadas por voladuras son producto directo del uso de explosivos para la fragmentación de la roca. La vibración del suelo o energía sísmica es comúnmente descrita como un desplazamiento con variación del tiempo, velocidad o aceleración de un punto particular (partícula) en el suelo, el cual puede generar molestias a personas o daños a estructuras cercanas a los sitios de explotación. La mina de caliza objeto de estudio se encuentra en el municipio de Sáchica, departamento de Boyacá, Colombia (ver figura 1).

2. METODOLOGÍA

El trabajo se desarrolló en cuatro etapas fundamentales:

- Toma de registros y cuantificación del comportamiento de la vibración con distancia y carga (ver figura 2).
- Ajuste estadístico o modelo de ecuación que describe dicho comportamiento.
- Ajuste de los modelos de vibración para permitir un uso confiable.
- Establecer criterios de daño.

A continuación se muestra un esquema del procedimiento por seguir durante la adquisición y registro de las ondas de choque generadas por las voladuras.

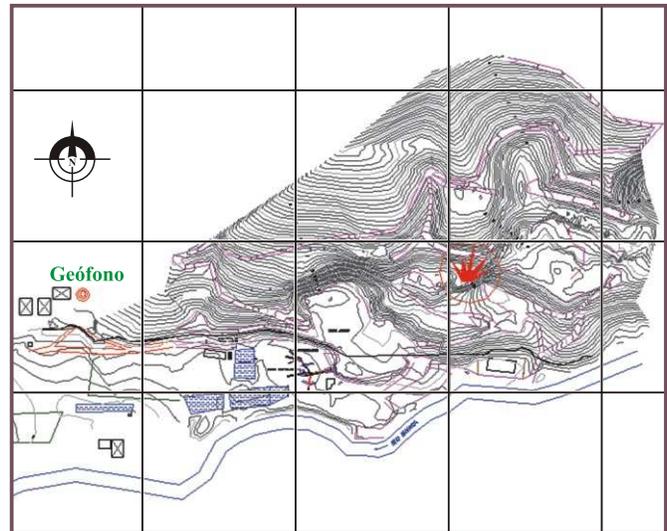


Figura 1. Localización del punto de explosión y el punto de registro.

2.1 Medición de vibraciones (monitoreo y control)

En este proceso se obtienen, para cada evento, los registros para los tres canales –longitudinal (L), vertical (V) y transversal (T)–, como los que se aprecian en la figura 3.

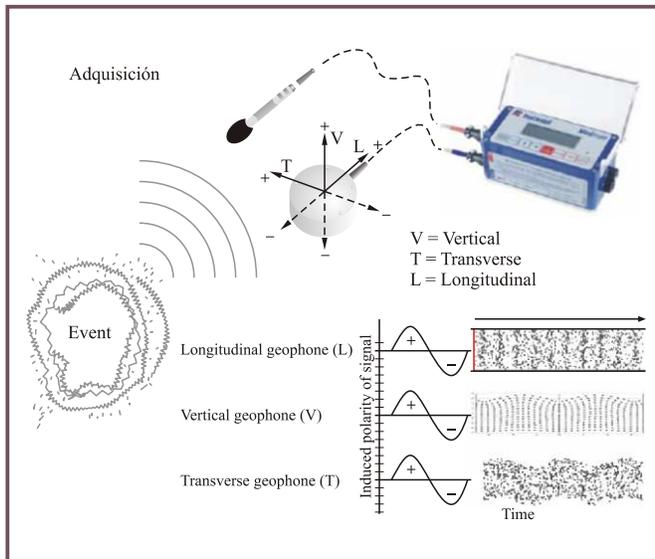


Figura 2. Equipo de registro Minimate plus DS 077, de fabricación Americana- Canadiense (USBM).

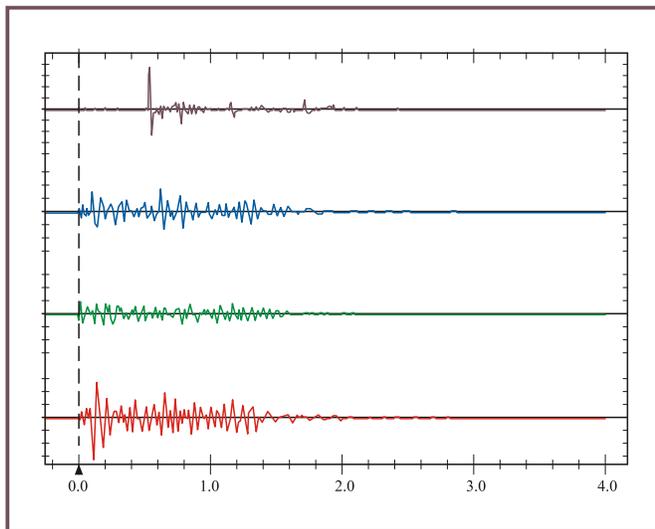


Figura 3. Registro de vibración y ondas de sobrepresión.

2.2 Determinación de la ley de Vibración

En la determinación de la ley de Vibración se deben tener en cuenta algunos conceptos importantes, que son explicados a continuación:

- *Concepto de distancia escalada.* Escalamiento: es la designación de la relación que correlaciona los niveles de movimiento del terreno, a distintas distancias de la voladura. Para ello se utiliza un factor de escalamiento, basado en parámetros dimensionales para la distancia. La distancia escalada se obtiene como una combinación de la distancia y del peso de la carga.

La energía total de la onda resultante de una columna de carga, donde la razón longitudiámetro es mayor a 6, toma la forma de cilindro. El volumen de este cilindro de compresión varía directamente con el cuadrado de su radio. Así, el nivel peak del movimiento en un punto dado es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde el tiro.

La fórmula de escalamiento, que relaciona el peak de la velocidad de partícula con la distancia escalada, ha sido desarrollada a través de los resultados obtenidos en terreno, usando equipos de monitoreo de vibraciones.

La distancia escalada $(D/W^{0,5})$ combina el efecto de la carga total por retardo (W) sobre el nivel inicial de choque, con el incremento de la distancia D desde la detonación al punto de medición.

Esta relación empírica involucra constantes del terreno, k y m , las cuales relacionan las características locales de la roca sobre la tasa de atenuación de la velocidad de partícula.

La atenuación geométrica está incluida en la pendiente exponencial, m , de la siguiente ecuación:

$$V_{\max} = k * (D/W^{0.5})^m$$

donde:

V = Peak de velocidad de partícula (mm/s)

D = distancia entre tiro y lugar de registro (m)

W = peso total de explosivo por retardo (Kg)

K, m = constantes del terreno

$(D/W^{0.5})^m$ = distancia escalada para cargas cilíndricas

Las constantes del terreno son determinadas de un gráfico logarítmico de la velocidad de partícula vs. la distancia escalada, donde m corresponde a la pendiente y k es el intercepto a la distancia escalada de 1.

- *Modelos de velocidad de partícula.* La literatura presenta diversos criterios de velocidad, entre los cuales destacan:

Devine $V = k * (D/W^{0.5})^m$ (1)

Hendrom $V = k * (D/W^{0.33})^m$ (2)

Langerfors $V = k * (D/W^{1.5})^m$ (3)

- *Criterio coeficiente escalara*

Criterio General Exponencial

$$D = \left(\frac{d}{W^{1/2}} \right) * e^{\left(\frac{d * \beta}{\alpha} \right)} \quad (4)$$

Criterio General

$$D = \left(\frac{d}{W \beta / \alpha} \right) \quad (5)$$

Langefors (1963)

$$D = \left(\frac{d}{W^{3/2}} \right) \quad (6)$$

Hendron (Bulletin 656)

$$D = \left(\frac{d}{W^{1/3}} \right) \quad (7)$$

Devine (1966)

$$D = \left(\frac{d}{W^{1/2}} \right) \quad (8)$$

El más utilizado en minería a tajo abierto es el Modelo de Devine; el cual se tuvo en cuenta para el presente estudio:

$$PPV = K * \left(\frac{d}{W^{1/2}} \right)^a \quad (9)$$

Donde:

PPV: velocidad de partícula Peak (mm/s)

W: peso de la carga explosiva

d: distancia entre el punto de medición y la carga explosiva detonada

K: factor de velocidad

a: factor de atenuación

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

De ellos, el más utilizado, por investigadores, usuarios y empresas, es el Criterio de Devine.

A continuación se presentan los resultados de los ajustes obtenidos al modelar una ley de Vibración con la información obtenida de las 7 voladuras, realizadas en la cantera de estudio.

2.3 Criterio de prevención de daños

La finalidad es establecer límites de vibración y cargas máximas operantes vs. distancia, para la protección a estructuras cercanas a la mina y controlar posible sobrequebre del macizo.

- *Estructuras:* para las estructuras, la velocidad crítica se limita a 31,8 mm/s, entre 0 y 91 metros de distancia del punto de explosión y el punto de muestreo –según norma Americana OSM (Oficina de Minería de Superficie)–.

- *Ley de Vibración:* aplicando el criterio de Devine, se obtiene el siguiente modelo de ajuste para el Sector Norte.

Coefficiente de correlación: 0,841

Coefficiente k: 959 310

Coefficiente alfa: -1056

Puntos de ajuste: 7,00

La ley de Vibración se calculará así:

$$V = 959\,310 * (D/W^{0.5})^{-1.056} \quad (10)$$

Con fines de diseño, debe adoptarse un modelo que asegure la mayor concentración posible de puntos cercanos al ajuste.

Para ello, debe desplazarse la recta hacia arriba, incrementando el valor de k. Así, el valor de k es de 1 453 297, lo que asegura el 80% de los puntos medidos.

El modelo ajustado será:

$$V = 1\,453\,297 * (D/W^{0.5})^{-1.056} \quad (11)$$

Aplicando como criterio de daño, un límite de velocidad de partícula de 31,8 mm/s para la estructura a cautelar, podemos diseñar la carga requerida de explosivo para el límite de vibraciones establecido.

Determinaron inicialmente, la distancia, carga explosiva y velocidad peak para 7 voladuras monitoreadas, y se ajustó la regresión correspondiente (ver tablas 1 y 2)

Tabla 1. Datos de las voladuras monitoreadas.

Dist (m)	Explosivo (kg)	(Raíz cuadrada de (m/kg ½))	Transversal Peak (mm/s)	Vertical Peak (mm/s)	Longitudinal Peak (mm/s)	PPV Peak (mm/s)
20	1.7	15.34	30.80	30.10	29.00	30.80
50.0	1.7	38.35	29.00	13.50	29.70	29.70
100	1.7	76.70	17.90	14.90	16.10	17.90
150	1.7	115.04	9.56	2.86	5.38	9.56
200	1.7	153.39	3.75	2.59	3.65	3.75
250.0	1.7	191.74	1.78	1.52	3.05	3.05
300.0	1.5	244.95	1.94	1.52	1.95	1.95

Tabla 2. Datos de ajuste de regresión al 80%.

1453.30
-1.056
PPV Modelo [mm/s]
81.34
30.91
14.87
9.69
7.15
5.65
4.39

Pendiente	-1.056
K Promedio	959.310
K - 80%	1453.297
Correlación (R2)	0.841
Puntos	7

Los datos obtenidos permitieron ajustar el modelo de vibraciones aplicando el modelo Devine (ver figura 4).

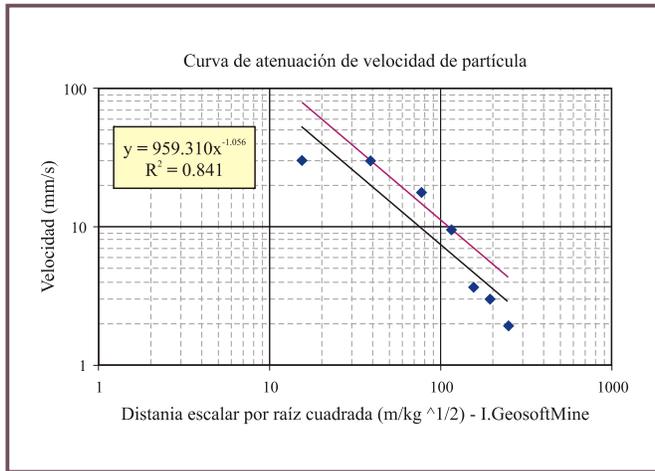


Figura 4. Curvas de atenuación.

3. RESULTADOS

El procesamiento de los datos obtenidos durante los monitoreos de las voladuras permitió obtener los siguientes resultados:

- *Ábaco de diseño sector norte para vibraciones esperadas con diferentes cargas explosivas:* el ábaco permite calcular la vibración esperada a diferentes distancias y para 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 kg de explosivo (ver figura 5 y tabla 3).

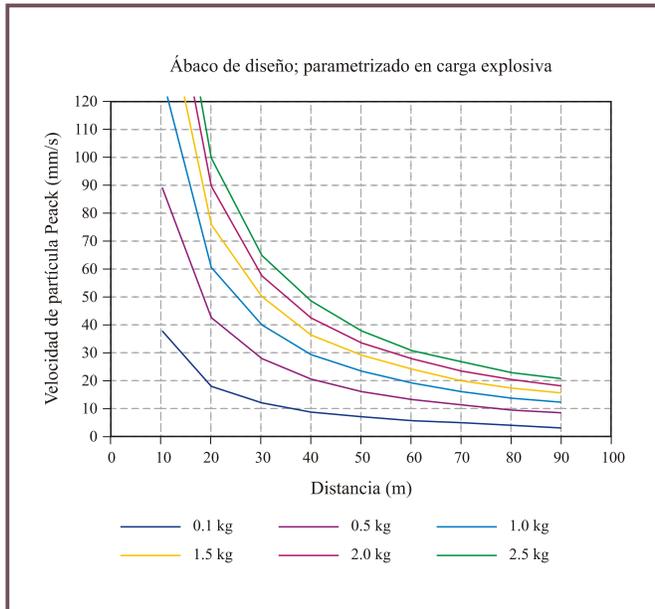


Figura 5. Ábaco de diseño sector norte con diferentes cargas explosivas.

Tabla 3. Datos de las voladuras monitoreadas.

K	1453.30	Modelo DEVINE				
Alfa	-1.055843	V (%)				
Kilos	0-1	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
Dist (m)	PPV (mm/s)					
10	37.9	88.6	127.8	158.3	184.3	207.3
20	18.2	42.6	61.5	76.1	88.6	99.7
30	11.9	27.8	40.1	49.6	57.8	65.0
40	8.8	20.5	29.6	36.6	42.6	48.0
50	6.9	16.2	23.4	28.9	33.7	37.9
60	5.7	13.4	19.3	23.9	27.8	31.3
70	4.9	11.4	16.4	20.3	23.6	26.6
80	4.2	9.9	14.2	17.6	20.5	23.1
90	3.7	8.7	12.6	15.6	18.1	20.4

La tabla 3 permite calcular la velocidad crítica para diferentes cargas explosivas y a una distancia dada. Por ejemplo, para una carga de 2 kg y a una distancia de 60 metros se obtendría una velocidad de partícula de 27,8 mm/s.

Se diseñó además el ábaco del sector norte, para carga explosiva en un nivel de vibración determinado (ver figura 6).

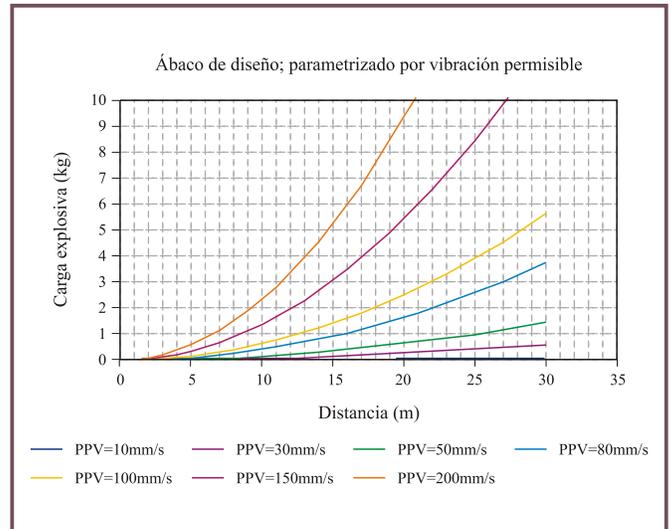


Figura 6. Ábaco de diseño sector norte.

Las voladuras monitoreadas con cargas explosivas, recomendadas para diferentes límites de vibración fueron: 10, 30, 50, 80, 100, 150 y 200 mm/seg (ver tabla 4), permitió calcular la cantidad de explosivo por unidad de retardo que se puede utilizar para no superar el umbral seguro de la velocidad de partícula. Por ejemplo: para que una voladura no supere los 30 mm/s, a una distancia de 20 metros, se recomienda utilizar una carga explosiva de 0,26 kg.

Tabla 4. Datos de las voladuras monitoreadas.

K	1453.30			Modelo DEVINE			
Alfa	-1.055843			V (½)			
PPV	10.0	30.0	50.0	80.0	100.0	150.0	200.0
Dist (m)	Carga Explosiva (W)						
	(kg)						
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02
2	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.05	0.09
3	0.00	0.01	0.02	0.04	0.06	0.12	0.21
4	0.00	0.01	0.03	0.07	0.10	0.22	0.37
5	0.00	0.02	0.04	0.10	0.16	0.34	0.58
6	0.00	0.02	0.06	0.15	0.23	0.49	0.84
7	0.00	0.03	0.08	0.20	0.31	0.66	1.14
8	0.01	0.04	0.11	0.26	0.40	0.87	1.49
9	0.01	0.05	0.14	0.33	0.51	1.10	1.89
10	0.01	0.06	0.17	0.41	0.63	1.35	2.34
11	0.01	0.08	0.20	0.50	0.76	1.64	2.83
12	0.01	0.09	0.24	0.59	0.90	1.95	3.36
13	0.01	0.11	0.29	0.70	1.06	2.29	3.95
14	0.02	0.13	0.33	0.81	1.23	2.65	4.58
15	0.02	0.14	0.38	0.93	1.41	3.05	5.26
16	0.02	0.16	0.43	1.05	1.61	3.47	5.98
17	0.02	0.19	0.49	1.19	1.82	3.91	6.75
18	0.03	0.21	0.55	1.33	2.04	4.39	7.57
19	0.03	0.23	0.61	1.49	2.27	4.89	8.43
20	0.03	0.26	0.68	1.65	2.51	5.42	9.34
21	0.04	0.28	0.75	1.82	2.77	5.97	10.30
22	0.04	0.31	0.82	1.99	3.04	6.56	11.31
23	0.04	0.34	0.89	2.18	3.32	7.17	12.36
24	0.05	0.37	0.97	2.37	3.62	7.80	13.45
25	0.05	0.40	1.06	2.57	3.93	8.47	14.60
26	0.05	0.43	1.14	2.78	4.25	9.16	15.79
27	0.06	0.47	1.23	3.00	4.58	9.87	17.03
28	0.06	0.50	1.33	3.23	4.93	10.62	18.31
29	0.07	0.54	1.42	3.46	5.28	11.39	19.65
30	0.07	0.58	1.52	3.71	5.66	12.19	21.02

- *Cálculo de la velocidad crítica, para evitar algún fracturamiento del macizo:* para este proceso se tuvo en cuenta la velocidad crítica en mm/s, donde se pueden generar daños o sobrefracturamiento del macizo rocoso según los criterios de daño de Holmberg y Persson (ver tabla 5).

Tabla 5. Tipos de daño según el PPV crítico.

Criterios de daño	PPV crítico
Dilatación de fracturas	¼
Aparición de nuevas grietas o fracturas	PPV crítico
Daño notorio u obvio	4
Sobrequebre	8

El criterio de **Holmberg** y **Persson** tiene en cuenta las características de las rocas como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Parámetros físico-mecánicos de la roca caliza.

Resistencia a la compresión (MPa)	63
Resistencia a la tracción (MPa)	6,3
Densidad (t/m ³)	2,7
Módulo de Young dinámico (GPa)	51,1
Velocidad de onda P (m/s)	3700

Aplicando la fórmula 12 se calculó el PPV crítico para medir el nivel correspondiente de daño (ver tabla 7).

$$PPV_{\max} = \frac{\sigma_T \cdot V_p}{E} \quad (12)$$

Tabla 7. Resultados del análisis.

Nivel de daño	PPV crítico	mm/s
Dilatación de fracturas	¼	114
Aparición de nuevas grietas o fracturas	PPV	456
Daño notorio u obvio	4	1824
Sobrequebre	8	3648

4. CONCLUSIONES

Para la estructura a cautelar, la velocidad crítica se limita a 31,8 mm/s, entre 0 y 91 metros de distancia del punto de explosión y el punto de muestreo, según norma Americana para la protección de estructuras OSM, Oficina de Minería de Superficie.

La velocidad crítica para evitar sobrefracturamiento del macizo rocoso es $PPV_{\text{CRIT}} = 114$ mm/s.

Los ábacos de diseño obtenidos según la ley de Vibración local, permitió realizar diseños técnicos de voladuras controladas, los cuales aseguran que el umbral establecido de 31,8 mm/seg no se ha superado.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Allard, P. (1986). Etude des vibrations Engendrées par les Tirs de Mines", Sctaroute. Février.
- ASP. Blastronics, Dr. Carlos Scherpenisse, Adamson W. R. (1997). Asesoría técnica en monitoreo de vibraciones para el modelamiento y control de daño.

- Barkley et ál. (1983). Ground and Air Vibrations Caused by Surface Blasting. N.T.I.S.
- Bollinger, G.A. (1971). Blast Vibration Analysis.
- Carvajal, A. (2006). Control de vibraciones producidas por voladuras. Chile: Universidad La Serena.
- Esteves, J. M. (1978). Control of Vibrations Caused by Blasting, Memoria 498, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Gama, Dinis C. (2004). Vibrações dos terrenos: da geração ao controle, I Semana Iberoamericana de Minas, Portugal. Pp. 147- 152.
- Hinzen, K. G. et al. (1987). A New Approach to Predict and Reduced Blast Vibration by Modelling of Acelerograms and Using a New Electronic Initiation System. S.E.E. U.S. Bureau of Mines-RI 8506 Blast vibration Instrumentation. U.S. Bureau of Mines-RI 9455 Blast vibration impacting a distant community.