

INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA DOMINANTE DE LA VOLADURA EN LA ESTABILIDAD DEL TALUD

Eduardo Anchorena¹

¹ Ingeniero de Minas, Gerente Técnico MINERS Company, Lima -Perú

1. Resumen

En las operaciones mineras el objetivo principal de la voladura es la fragmentación de la roca. Parte de la energía que produce el explosivo es utilizada para lograr dicho propósito, un porcentaje similar de energía genera vibración elástica en el terreno. A medida que las ondas se alejan, la velocidad de las partículas se atenúa lo mismo ocurre con las frecuencias.

Toda estructura va a vibrar a una frecuencia natural y va a responder cuando sea excitada por una energía en esa frecuencia. La frecuencia natural esta directamente relacionada con las características y dimensiones físicas de la estructura (masa, rigidez y altura).

Los taludes de mina no son la excepción a este fenómeno. Sin embargo, la influencia de las frecuencias generadas por voladura en la estabilidad de los taludes del tajo ha sido poco estudiada y por lo general no es considerada en los diseños de voladura.

En la actualidad, los métodos de evaluación de la estabilidad del talud basados en información de la vibración no pueden evaluar la estabilidad de manera cuantitativa.

El presente estudio propone una metodología de cálculo propuesta por los autores Xie, Liu y Du de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Beijing China el cual fue aplicado con éxito en un tajo abierto en Brasil.

2. Introducción

En la pared Este de un tajo en una mina en Brasil, ocurrió un evento de inestabilidad del talud por la activación de una falla. La estabilidad del talud en la pared se ve afectada por las vibraciones producidas por las voladuras cercanas a la zona de falla.

Con la finalidad evitar un evento de deslizamiento, es necesario implementar una metodología de evaluación para determinar la estabilidad del talud, que incorpore como variable principal el efecto que produce las vibraciones del terreno en la zona de falla.

Para dicho propósito se realizó una campaña de monitoreo y registro de vibraciones provenientes de dos voladuras cercanas a la falla. Debido a la cercanía de las voladuras a la zona de falla, se asumió que las frecuencias (ω) no deberían ser bajas. Para minimizar el efecto de la Velocidad Pico de Partícula (PPV), se direccionaron los disparos teniendo en consideración que el tren de ondas producto de la interacción de taladros entre filas, sea opuesta a la dirección de la falla.

Los registros de vibraciones permitieron determinar las Frecuencias Dominantes (ω_d) de las voladuras a diferentes distancias y en dirección de la zona de falla. Las configuraciones de las cargas explosivas, parámetros de malla (burden, espaciamiento) y tiempos de retardos fueron similares en ambos proyectos.

El modelo propuesto para evaluar la estabilidad del talud, considera la forma de vibración del macizo rocoso en un espacio tridimensional (ejes: longitudinal, transversal y vertical) a partir de una ecuación de cálculo simultaneo de la frecuencia dominante en el talud y la ecuación de equilibrio mecánico de la roca.

3. Método Propuesto para Evaluar la Estabilidad del Talud

El movimiento o desplazamiento de la roca se origina por la acción de la gravedad, la resistencia de la roca es la fuerza de sujeción del talud al macizo rocoso. Para un talud con presencia de un plano de falla, se puede considerar que la fuerza de sujeción está directamente relacionada con el área del plano de unión. La causa de inestabilidad del talud se dará por la reducción del plano de unión (reducción en la fuerza de sujeción).

En la literatura técnica, autores como Spillman y Michele Salvani, realizaron estudios en los cuales demuestran que la vibración del macizo rocoso produce cambios en su estabilidad. Sin embargo, en dichos estudios el cálculo para el método cuantitativo no ha sido desarrollado.

El modelo propuesto incorpora la ecuación tradicional para el cálculo del Coeficiente de Estabilidad (F_s), a la cual se le adicionó una función de cálculo de la estabilidad del macizo rocoso que contiene el índice de frecuencia dominante, dando como resultado un nuevo método para el análisis de la estabilidad del talud basado en la Frecuencia dominante (ω_d).

3.1. Ecuaciones del Modelo

Para un talud típico donde el plano de juntas corta la roca formando una cuña de peso W y la longitud de conexión entre roca y talud es l_1 y la longitud de separación es l_2 , es posible estimar el Factor de Estabilidad (F_s) mediante la siguiente ecuación:

$$F_s = \frac{\tau_1 l_1 + \tau_2 l_2}{W \sin \alpha}$$

Ec1

Donde:

τ_1 : Esfuerzo cortante máximo de la región de conexión de la roca

τ_2 : Esfuerzo cortante máximo de la región de separación de la roca (τ_2 es igual a cero, cuando no hay material de relleno)

l_1 : Longitud de conexión entre la cuña y el talud

l_2 : Longitud de separación

α : Angulo de inclinación del plano de juntas

La ecuación para calcular la frecuencia intrínseca de vibración longitudinal de la roca propuesto por el modelo es la siguiente:

$$k_1 \cos\left(\frac{\omega_1 H}{c_1}\right) - EBL \left(\frac{\omega_1}{c_1}\right) \sin\left(\frac{\omega_1 H}{c_1}\right) = 0$$

Ec2

La velocidad de propagación de la onda elástica puede ser calculada por la siguiente ecuación

$$c_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Ec3

Donde:

k_1 : Constante de rigidez

ω_1 : Frecuencia de la vibración

c_1 : Velocidad de propagación de la onda elástica

E: Módulo de Young

B, L, H: Dimensiones de la cuña

ρ : Densidad de la roca

La expresión para calcular la restricción de rigidez k_1 de la vibración de un talud de roca se muestra a continuación:

$$k_1 = \frac{4G}{1-\nu} 0.55\sqrt{Bl_1}$$

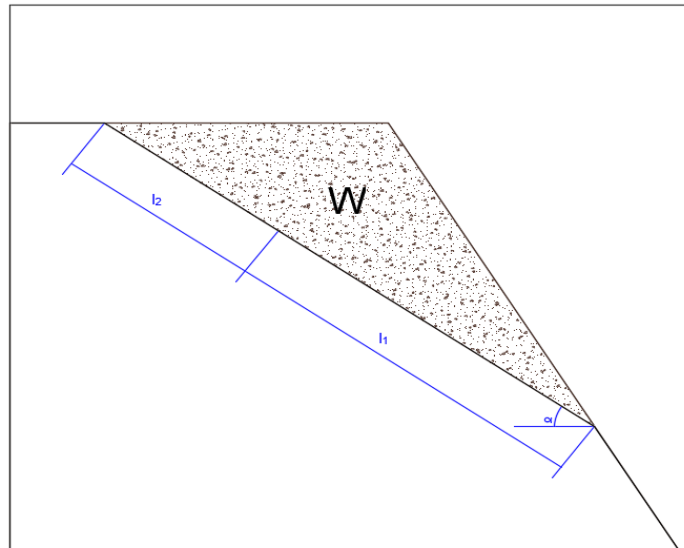
Ec4

Donde:

G: Módulo de corte del macizo rocoso

ν : Coeficiente de Poisson de la roca

Figura 1: Representación de un talud con cuña de peso W



El modelo propuesto, formula una expresión matemática de la frecuencia natural de la roca y la longitud de conexión (deducibles de las ecuaciones Ec2 y Ec4).

El máximo esfuerzo cortante (τ) puede ser calculado por la siguiente expresión:

$$\tau_1 = c + \frac{W \cos \alpha}{l_1} \tan \phi$$

Ec5

Donde:

c: Cohesión de la roca

ϕ : Ángulo de resistencia al corte

El Coeficiente de Estabilidad (F_s) del talud es calculado por la siguiente ecuación:

$$F_s = \frac{Cf(\omega_d)}{W \sin \alpha} + \cot \alpha \tan \phi$$

Ec6

4. Caso de Estudio

En la pared este de una mina a cielo abierto en Brasil ocurrió un evento de inestabilidad del talud por la activación de una falla. La inestabilidad del talud en la pared Este, se ve afectada por las vibraciones producidas por las voladuras. Con la finalidad evitar un evento de deslizamiento del talud se implementó un método de Evaluación de la Estabilidad del Talud basado en la Frecuencia Dominante de las voladuras cercanas. Para dicho propósito se realizó un estudio que permita determinar la forma de la vibración del macizo rocoso en el espacio tridimensional.

El monitoreo de vibraciones es fundamental para determinar la estabilidad del talud, para ello se realizó una campaña de registro de vibraciones que consistió en colocar sismógrafos alineados y orientados a la zona de falla a diferentes distancias. Los diseños de voladura de la mina no fueron modificados en lo referente a cargas explosivas ni parámetros de diseño. La modificación realizada en los diseños se produjo únicamente en la secuencia de iniciación de los disparos con la finalidad de evitar el impacto del tren de ondas en la zona de falla.

4.1. Prueba Especial

Para el cumplimiento de los objetivos planteados en este proyecto, se realizaron dos pruebas especiales con arreglos de geófonos triaxiales para campo lejano, posicionados y orientados entre dos proyectos de voladura y la pared Este del tajo (zona de falla). Las mediciones registradas, así como las variables de voladura utilizadas en el carguío de explosivos se dan a continuación en la Tabla 1:

Tabla 1: Mediciones de Campo de los Proyectos F06B y F10

Nº	Fecha	Proyecto de Voladura	Qi (Kg)	Dh (m)	Ds (m/Kg ^{1/2})	TRAN. (mm/s)	VERT. (mm/s)	LONG. (mm/s)	FDT (Hz)	FDV (Hz)	FDL (Hz)	TZC (Hz)	VZC (Hz)	LZC (Hz)	PPV (mm/s)
1	23/02/2022	Poligono F06B	52.5	237	33	2.3	2.5	3.0	26.5	24	12	24	19	22	3.9
2	23/02/2022	Poligono F06B	52.5	364	50	1.8	1.1	3.4	24.2	35	28	29	32	24	3.6
3	25/02/2022	Poligono F10	53.6	139	19	23.9	27.8	19.4	20.7	21	13	18	20	15	31.5
4	25/02/2022	Poligono F10	53.6	171	23	8.4	9.3	12.9	19.9	19	30	21	18	30	14.9
5	25/02/2022	Poligono F10	53.6	106	14	43.9	38.2	53.9	41.5	46	28	31	30	20	58.1

Donde:

Qi: Carga Media del Disparo.

Dh: Distancia Horizontal del Disparo al Punto de Monitoreo.

Ds: Distancia Escalada.

TRAN, VERT y LONG: Velocidades Pico de Partícula.

FDT, FDV y FDL: Frecuencias Dominantes Transversal, Vertical y Longitudinal (Cálculo, Transformada de Fourier)

TZC, VZC y LZC: Frecuencia del Valor Pico (Cálculo, Método gráfico).

PPV: Vector Suma

4.2. Estabilidad del Talud en Función de la Frecuencia Dominante

Con la información obtenida de las pruebas especiales, se realizaron los cálculos de estabilidad del talud, para lo cual fue necesario contar con información geotécnica del macizo rocoso en la zona del evento.

Las variables necesarias para estimar la estabilidad del talud en función de la frecuencia dominante del macizo rocoso son las siguientes:

- Variables del Macizo Rocosos
 - Cohesión del macizo rocoso
 - Angulo de resistencia al corte
 - Módulo de corte del macizo rocoso

- Variables de la Roca Intacta
 - Módulo de Young
 - Relación de Poisson
 - Densidad de la roca

- Variables Geométricas
 - Dimensiones (largo, ancho y altura) y peso de la cuña
 - Angulo que forma el plano de falla con la horizontal

- Variables de Voladura
 - Parámetros de diseño (consumo específico, carga media)
 - Características del explosivo (densidad y energía total)
 - Secuenciamiento del disparo (tiempos entre taladros y entre filas)
 - Registro de Onda Elemental
 - Simulación de Interacción de Ondas para determinar el tiempo de retardo.
 - Registros de vibraciones
 - Cálculo de PPV
 - Cálculo de Frecuencias Dominantes (Fourier)

a. Datos de Entrada del Modelo

Las variables utilizadas en el cálculo de estabilidad del talud fueron obtenidas a partir de los ensayos de laboratorio de roca intacta y caracterización geomecánica del macizo rocoso.

Las variables geométricas de la cuña: dimensiones, peso y el ángulo que forman el plano horizontal con la falla, se obtuvieron mediante levantamiento topográfico y software de diseño minero.

Las variables de voladura fueron calculadas de los reportes de carguío, diseño de secuenciamiento de salida (teniendo en consideración el tren de ondas del disparo) y los registros de vibraciones realizados con sismógrafos y geófonos triaxiales para campo lejano en la prueba especial. En la Tabla 2 se muestran las variables del modelo y los valores de cada una de ellas.

Tabla 2: Variables del Modelo

Nº	Var.	Description	Unid.	Valor
1	C_1	Velocidad de la Onda Vp	m/s	2,611.2
2	ρ	Densidad de la Roca	Kg/m ³	2,200
3	E	Módulo de Young	Gpa	15.0
4	B	Longitud de la Falla	m	13
5	H	Altura de la Falla	m	6
6	L	Ancho de la Falla	m	40
7	ν	Relación de Poisson		0.32
8	G	Módulo de Corte del Macizo Rocosos	MPa	25

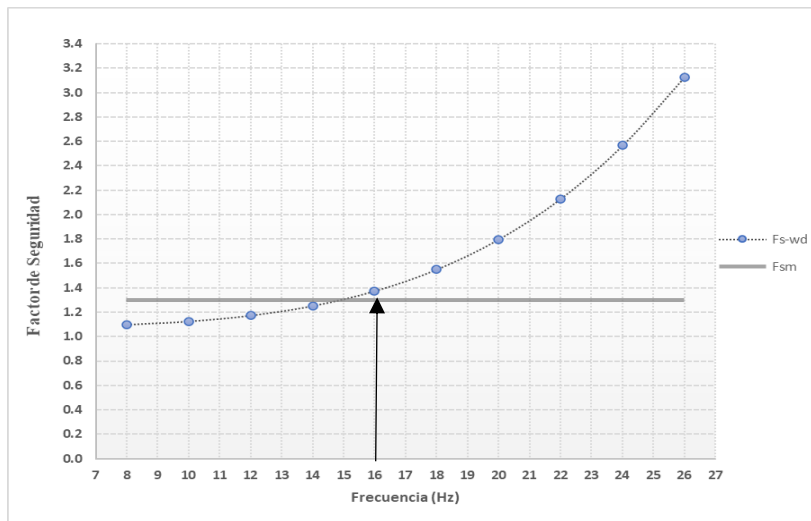
b. Frecuencia Dominante Crítica (ω_{dc})

Para determinar el la **Frecuencia Dominante Crítica (ω_{dc})** de la zona de estudio, es necesario elaborar una base de datos experimental (a partir de la información obtenida en las pruebas especiales) y determinar la influencia de las Frecuencias Dominantes mediante una función (ecuaciones Ec2 y Ec3) y estimar diferentes Factores de Estabilidad.

Al desarrollar los cálculos se puede determinar que la estabilidad del talud decrece al disminuir la Frecuencia Dominante.

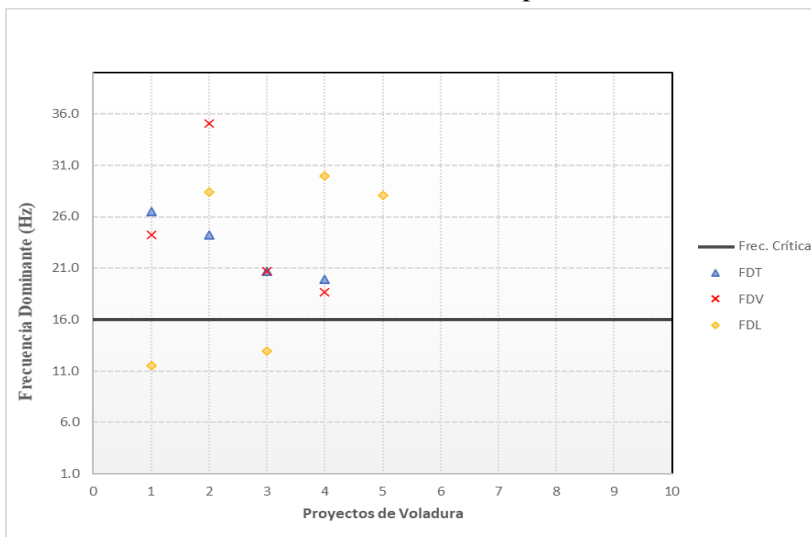
Para el determinar la **Frecuencia Dominante Crítica (ω_{dc})**, se determinó como valor mínimo del **Factor de Estabilidad (F_{sm}) en 1.3**. En el Gráfico 1, se puede observar los Factores de Estabilidad (F_s), para el talud en estudio, a diferentes Frecuencias Dominantes (ω_d). La Frecuencia Dominante Crítica será aquella que tenga como valor un Factor de Estabilidad de 1.3

Gráfico 1: Frecuencia Dominante Crítica del Talud (ω_{dc})



La Frecuencia Crítica para el talud en estudio es de 16 Hz, valores por debajo de este valor, generarán un estado de inestabilidad en la zona de falla. Las voladuras deben tener en cuenta dicho valor (Criterio de Daño) al momento de ser diseñadas con la finalidad de evitar una condición de inestabilidad en el talud. En el Gráfico 2, se muestran las Frecuencias Dominantes (ω_d) en los tres ejes (longitudinal, transversal y vertical) registradas en las voladuras de la Prueba Especial

Gráfico 2: Criterio de Daño para el Talud



5. Conclusiones

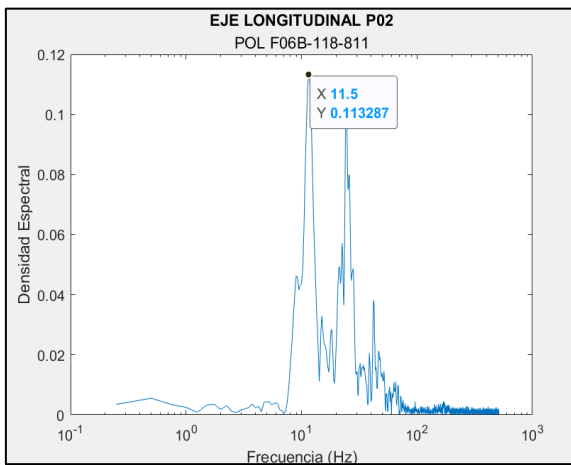
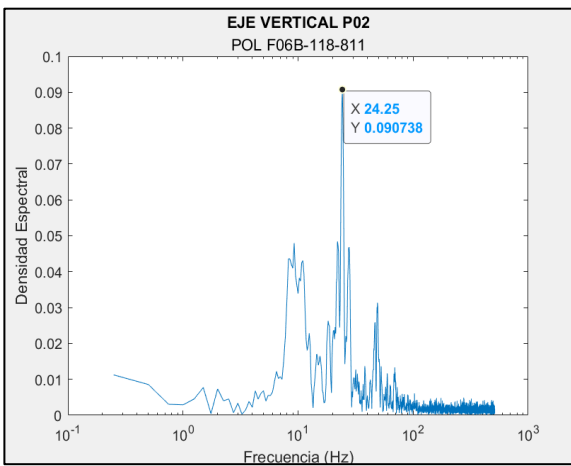
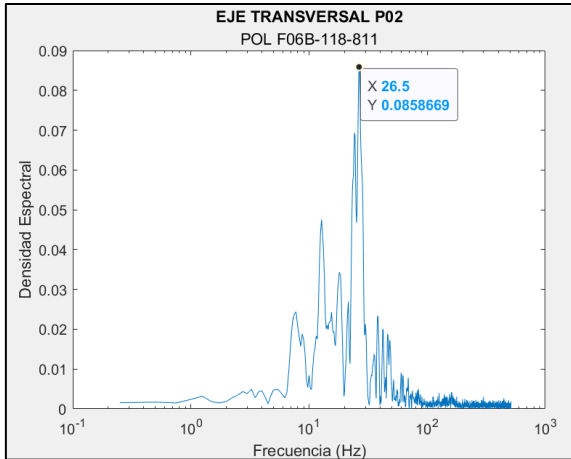
- Mediante la metodología de cálculo expuesta en este artículo, es posible establecer un Criterio de Daño para el talud, en el cual se relacionan variables geomecánicas, geomecánicas y de voladura con las Frecuencias Dominantes del macizo rocoso.
- El secuenciamiento del disparo es una variable importante en la estabilidad del talud. El direccionamiento de las ondas del disparo debe ser en sentido opuesto a la zona de falla para evitar el incremento de la PPV.
- Las variables geométricas descritas en el artículo tienen un peso significativo en la estabilidad del talud, razón por la cual deben ser calculadas con el mayor detalle posible.
- Las mediciones de los equipos de monitoreo de la falla (escáner) en el tajo no detectaron desplazamiento al realizar las voladuras cercanas.

6. Recomendaciones

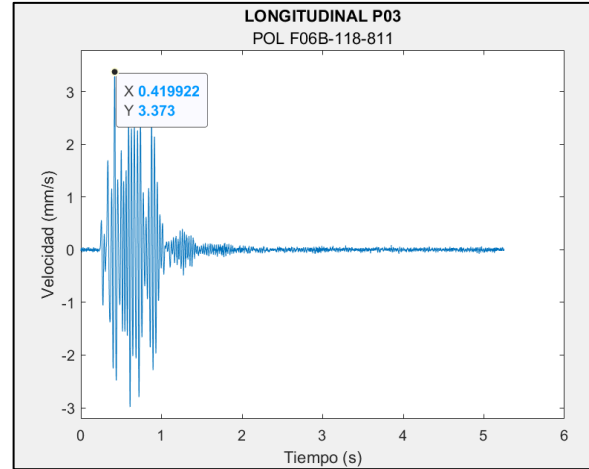
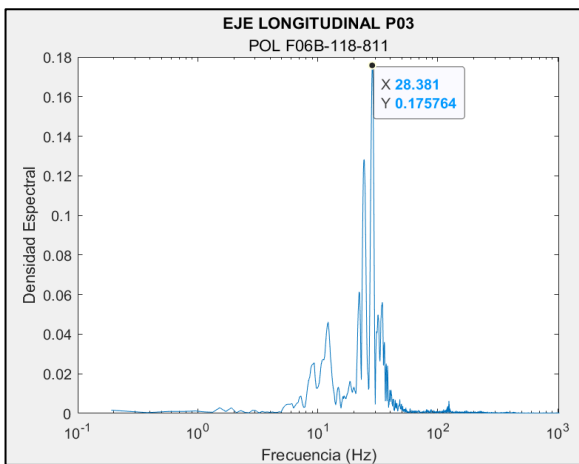
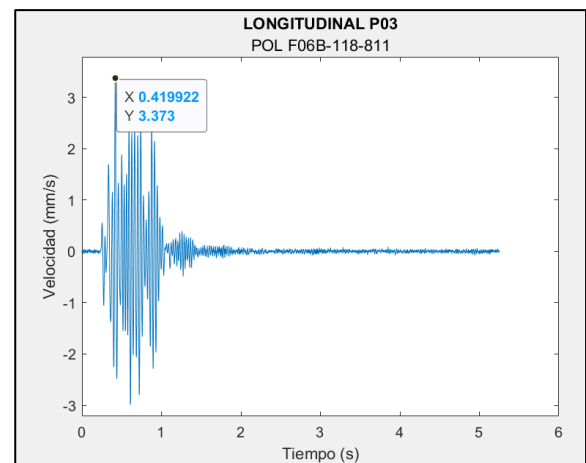
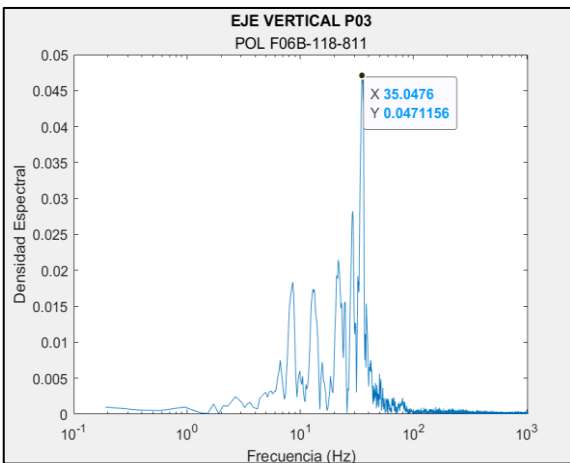
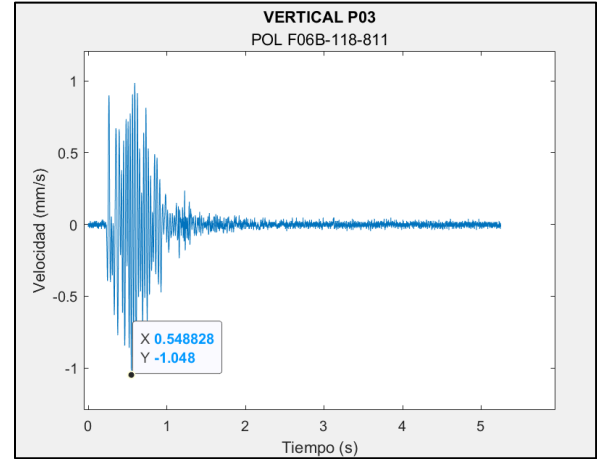
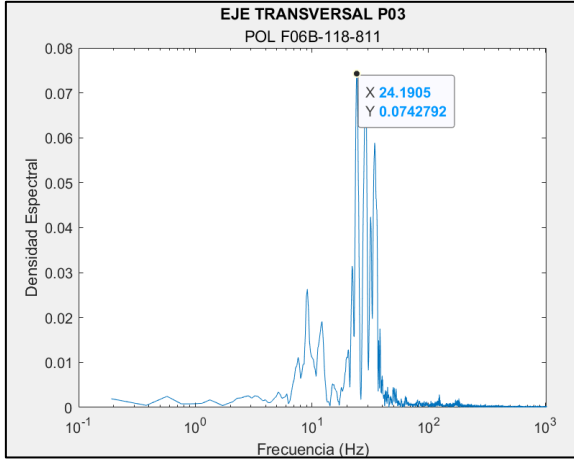
- Es necesario el monitoreo permanente de la zona de falla.
- Las voladuras cercanas a la zona de falla deben ser diseñadas teniendo en consideración no sobrepasar el límite propuesto de 16 Hz para las frecuencias dominantes.
- Es necesario monitorear con sismógrafos permanentemente la zona de falla y colocando los registros de las Frecuencias Dominantes en el Gráfico 2 Criterio de Daño para Talud.

7. Anexos

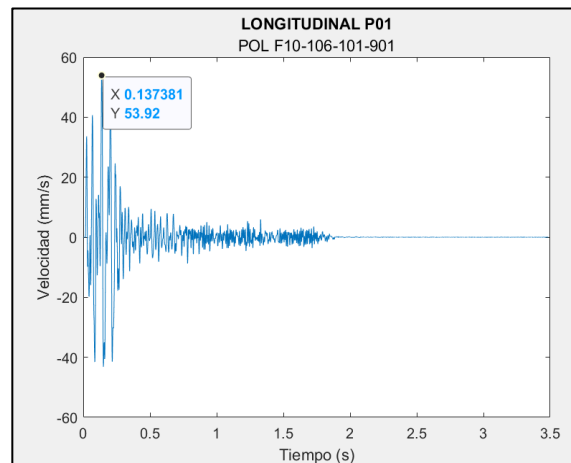
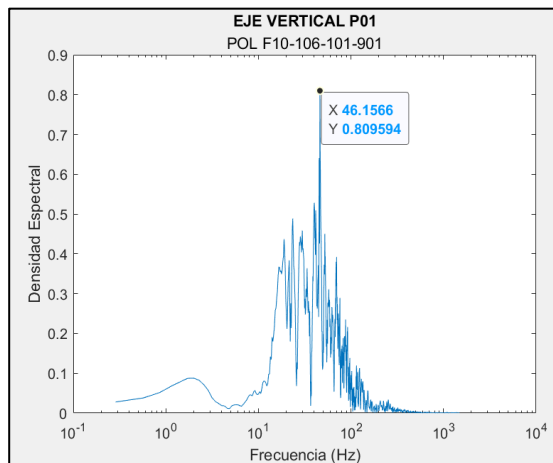
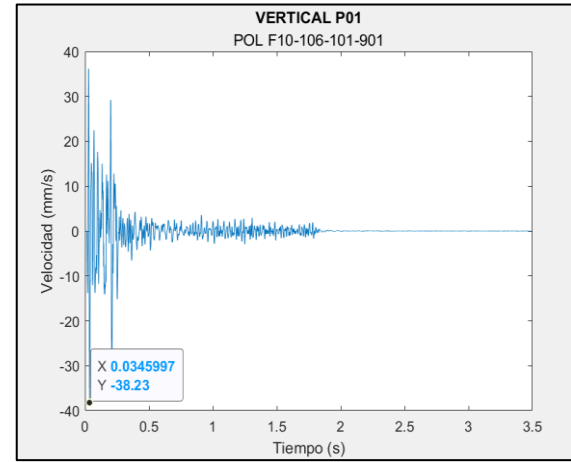
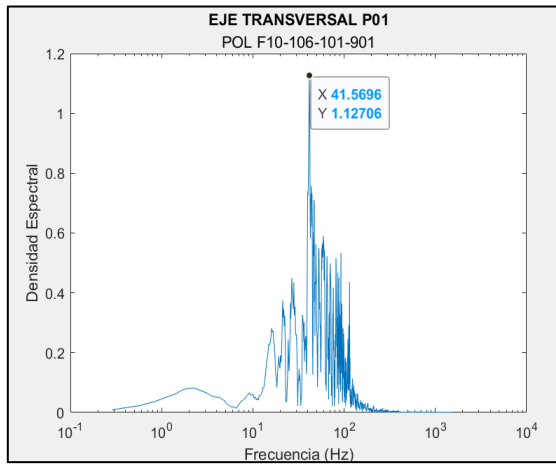
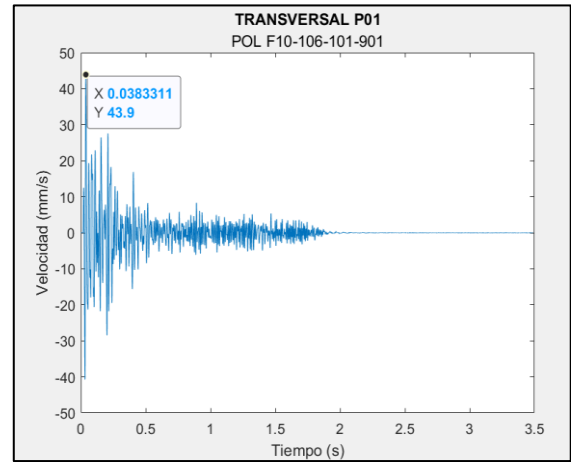
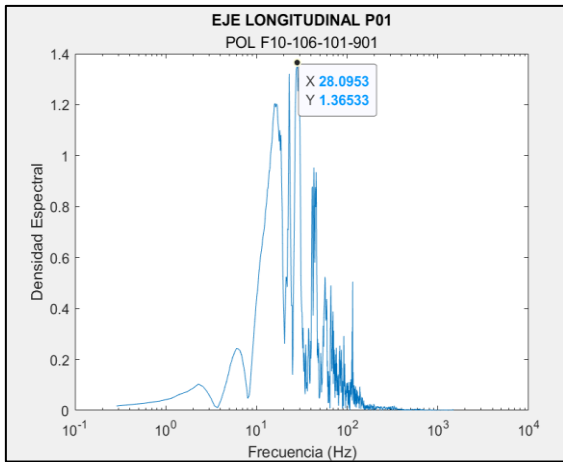
6.1 Punto N°1



6.2. Punto N°2



6.3. Punto N°3



6.4. Punto N°4

