

Vibraciones generadas por voladuras en obras subterráneas. Casos de estudio en Colombia

Vibrations due to underground blasting works. Case studies in Colombia

Luis Humberto Pinto-Morales¹, María del Carmen Fuentes-Fuentes²

¹PetroBlast S.A.S., Departamento de Boyacá, Colombia.

²Universidad Pedagógica y Tecnológica, Departamento de Boyacá, Colombia.

*Autor para la correspondencia: marcaf_geo@yahoo.com

Resumen

Se exponen en este artículo resultados obtenidos por la compañía PetroBlast S.A.S. durante el control de daño de las vibraciones generadas por voladuras entre túneles y galerías adyacentes, como parte de los casos de estudio. La investigación profundizó en el conocimiento del principio de vibraciones causadas por explosiones y su efecto sobre el contorno de las estructuras subterráneas, utilizando simulaciones numéricas a través de softwares aplicados a las señales sísmicas registradas. Se determinó que las velocidades de vibración y las tensiones dinámicas ejercen un efecto sobre diferentes posiciones del revestimiento del túnel, teniendo en cuenta que la velocidad máxima de partícula (VMP) influye directamente en el anverso del revestimiento y los esfuerzos de tensiones máximas, disminuyen con el aumento de la roca circundante. El umbral de seguridad recomendado de VMP es de 100 mm/s para revestimiento intacto. Sin embargo, en revestimientos con algún tipo de agrietamiento, los umbrales de seguridad recomendados están alrededor de los 25 mm/s y 50 mm/s de VMP. Estos resultados aportan experiencias importantes para investigaciones futuras donde sea necesario el control sísmico en las excavaciones subterráneas, considerando que en Colombia, por ser un país enclavado en la parte norte de la cordillera de los Andes suramericanos, es imprescindible realizar túneles viales para el acceso a gran parte del país.

Palabras clave: voladuras; vibraciones; obras subterráneas; simulación numérica; espectro principal de velocidad relativa; velocidad pico de partículas; Colombia.

Abstract

This study shows the results obtained by PetroBlast S.A.S. Company during the damage control vibrations generated by underground blasting in tunnels and adjacent galleries as part of case studies. The research studies in more details the knowledge of principle of vibrations caused by explosions and its effect on the contour of underground structures, using numerical simulations through software applied to the registered seismic signals. We conclude that vibration velocities and dynamic stresses have an effect on different positions of the tunnel lining, considering that the maximum particle velocity (VPM) directly influences the inland of covering and maximum stresses decrease with rising from the surrounding rock. The VPM recommended safety threshold is 100 mm/s for intact coating. However, in coatings with some type of cracking, the recommended safety thresholds will be around 25 mm/s and 50 mm/s of VPM. These results provide important experiences for future research where seismic control is necessary in underground excavations considering that Colombia is a country located in the northern part of the South American Andes, it is essential to make road tunnels to access to most of the country.

Keywords: blasting; vibrations; underground works; numerical simulation; main spectrum of relative velocity; peak particle velocity; Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

En varios proyectos viales que se desarrollan en Colombia en los últimos años está presente la propagación de ondas durante las voladuras entre túneles. Las vías de doble calzada en el país, por lo general, contemplan túneles paralelos, los cuales se excavan con desfase entre frentes, a través de perforaciones y voladuras. En algunos casos uno de los túneles ya está en operación y es necesario optimizar los diseños de las voladuras y controlar los efectos desde el principio.

La compañía PetroBlast S.A.S. ha intervenido en estos proyectos realizando estudios de monitoreo. Las excavaciones de un túnel por el método convencional con el uso de explosivos generan ondas longitudinales, transversales y verticales que se propagan en diferentes direcciones, provocando grandes esfuerzos que producen deformaciones en las rocas y por consiguiente, el daño en estructuras cercanas; esto, debido a la carga dinámica que genera la detonación de un explosivo confinado dentro de un pozo (Figura 1).

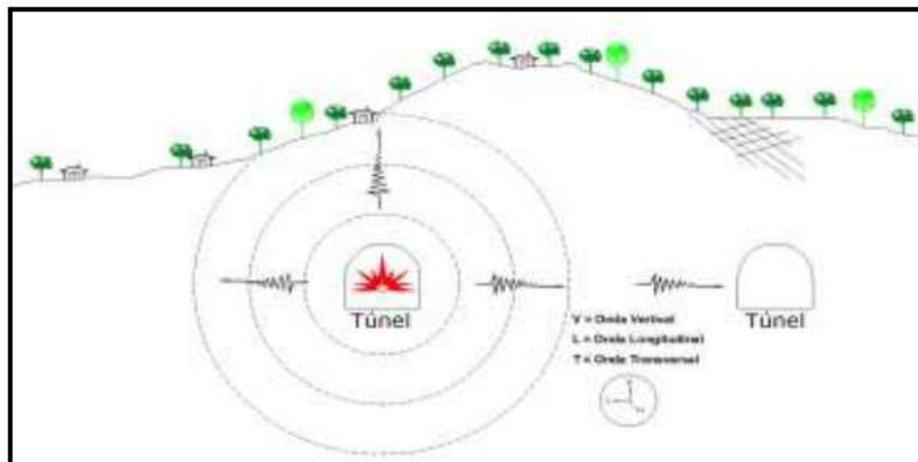


Figura 1. Generación de ondas por voladuras subterráneas.

La magnitud del daño causado depende de la cantidad máxima de carga del explosivo detonado instantáneamente en el mismo número de retardo, la distancia entre la voladura y las obras a evaluar, entre otros factores. La disipación y atenuación de las ondas está en función de las características físico-mecánicas de las rocas del entorno, donde cualquier alteración del macizo, ya sea por excavación mecánica (desconfinamiento del macizo) o por voladuras, afecta de alguna forma a las obras construidas (Chapot 1981; Pinto-Morales y Fuentes-Fuentes 2000, 2007, 2008, 2013, 2017, 2021).

2. METODOLOGÍA

En el monitoreo para la evaluación del daño de las vibraciones en las obras estructurales, inicialmente se recoge la información existente sobre la voladura a efectuar, rocas que componen el corte litológico, tipo y peso de la carga, la obra a monitorear, el sistema de excavación a emplear; y posteriormente, la incidencia en la formación de cuñas. Luego, se establecen los puntos de ubicación de los equipos para la recolección de los registros (Pinto-Morales y Fuentes-Fuentes 2000, 2007, 2013, 2017, 2021). Para seleccionar el sistema de excavación óptimo y de menor costo existen varias metodologías que se tuvieron en cuenta durante los estudios realizados por la empresa PetroBlast S.A.S. En la Figura 2 se muestra un ábaco diseñado por Franklin (1971) y ajustado por Pinto (2019) que permite determinar el sistema de excavación de una manera rápida y confiable.

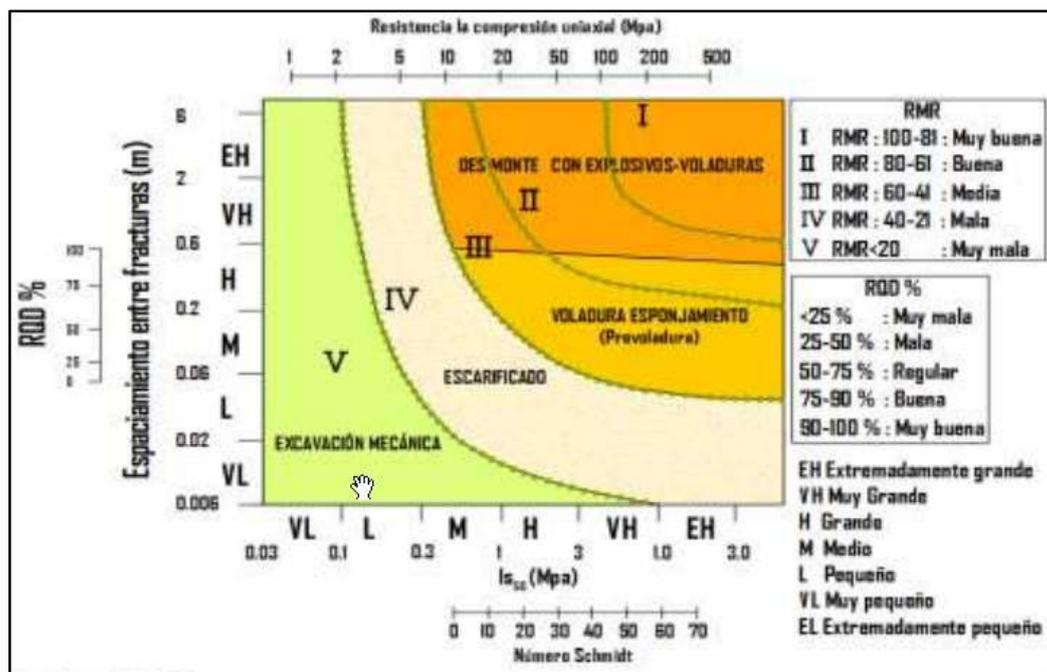


Figura 2. Ábaco diseñado por Franklin 1971, modificado por Pinto 2019 (PetroBlast S.A.S.).

La forma más rápida de excavar rocas resistentes y masivas es mediante la perforación y voladura (PyV) (Taylor & Francis Group. 2013). En este caso, se perfora horizontalmente la superficie del frente del túnel para el cargue de explosivos, que posteriormente son detonados en tiempos diferentes y, por lo general, se realizan en dos o tres secciones (Siskind 1980). En la Figura 3 se observan las fases de excavación de un túnel vial.



Figura 3. Sección típica de un túnel carretero (izq.) Sección del túnel en roca excavado con el método P&V -Norma ATM, PetroBlast 2019- (centro). Túnel vial con subterráneo de evacuación -Norma ATM, PetroBlast 2018-(der.)

Las cuñas son las fallas más comunes en túneles y obras subterráneas. Se presentan en los techos o hastiales; esto puede ser debido a que están influenciadas por el sistema estructural e intersección de diaclasas en cada dominio geotécnico, principalmente en el eje principal, ayudadas por la fuerza de gravedad (g), peso (W), resistencia al corte del relleno de diaclasas, etc., (Edwards y Northwood 1960; Langefors y Kihlstrom 1978). Dada esta

situación, cuando se van a realizar las voladuras, se debe tener especial atención en el diseño planteado. Con el fin de prevenir las cuñas, se obtiene previamente el plano de diaclasamiento estructural por el eje del túnel. De esta manera, se pueden conocer las intersecciones entre fracturas para el proceso óptimo de las voladuras, por ejemplo: si se presenta una cuña de 4 m de lado hacia el frente y se realiza una voladura de 3,5 m, lo más probable es que falle el techo. En contraposición a lo anterior, en esta misma situación, si se conoce la longitud de la cuña en el frente se puede realizar una voladura de 2 m de avance, lo cual permite excavar y fortificar la mitad de la cuña para seguir con la siguiente voladura. Es importante realizar un análisis estático y dinámico de las cuñas a través de softwares o de otras herramientas que le den al ingeniero una visión más amplia de la estructura con probabilidad de falla (Figura 4). De esta forma se pueden tomar mejores decisiones en la etapa de excavación y fortificación ya sea empleando concreto, perno localizado o sistemático, mallas, entre otros (Siskind 1980).

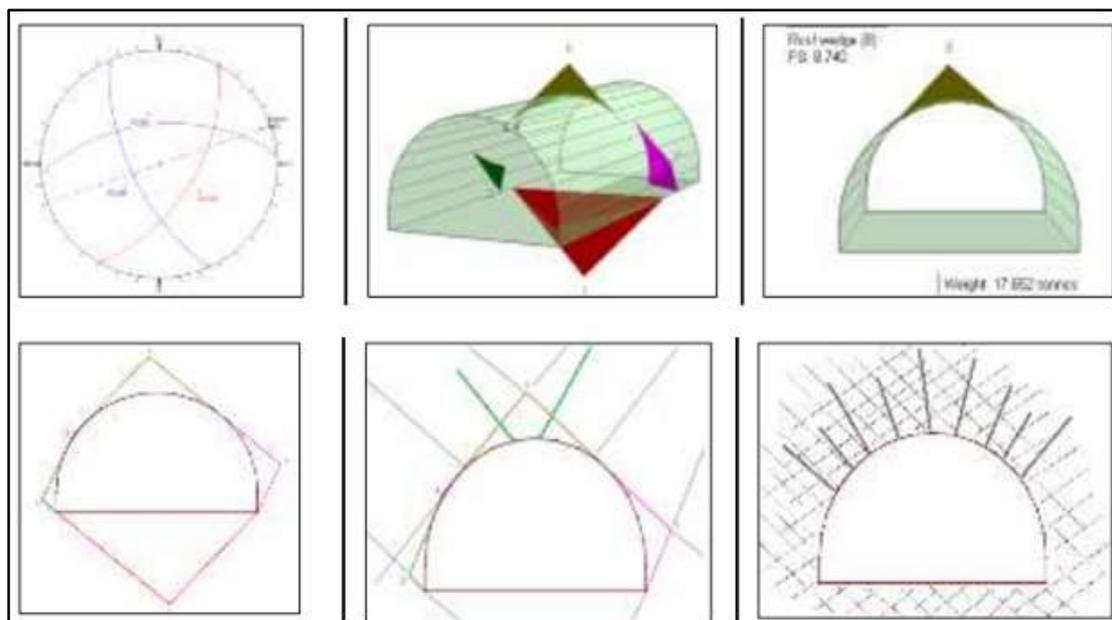


Figura 4. Familia de diaclasas (arriba, izq). Cuñas en 3D (arriba, centro). Peso de la cuña (arriba, der). Sección de las cuñas perimetrales (abajo, izq). Perno localizado (abajo, centro). Perno sistemático (abajo, der).

3. RESULTADOS

En las Figuras 5 y 6 se muestra una sección transversal de obras subterráneas, las isóneas de velocidad (mm/s), propagación de vibraciones y redistribución de esfuerzos por desconfinamiento durante la excavación mecánica de un túnel. Los valores altos de velocidad se detectaron en las cercanías de las obras.

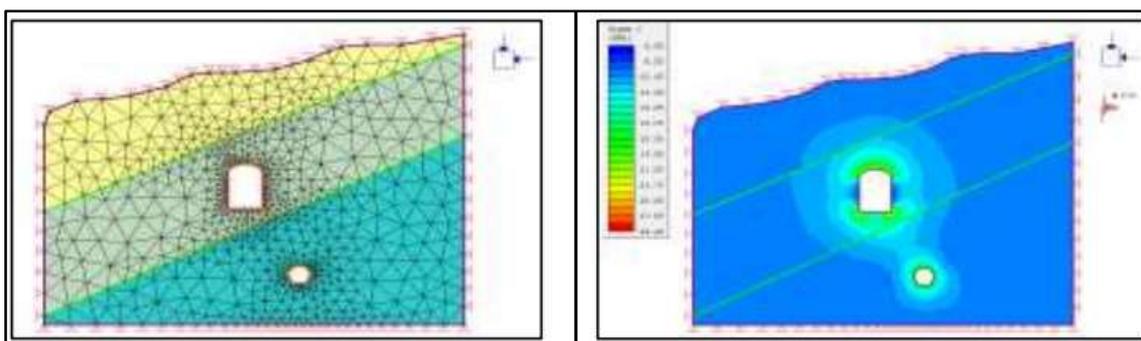


Figura 5. Sección transversal de obras subterráneas producidas por voladuras en una mina en superficie (izq). Isolíneas de vibración PPV (mm/s), por voladuras en superficie (der).

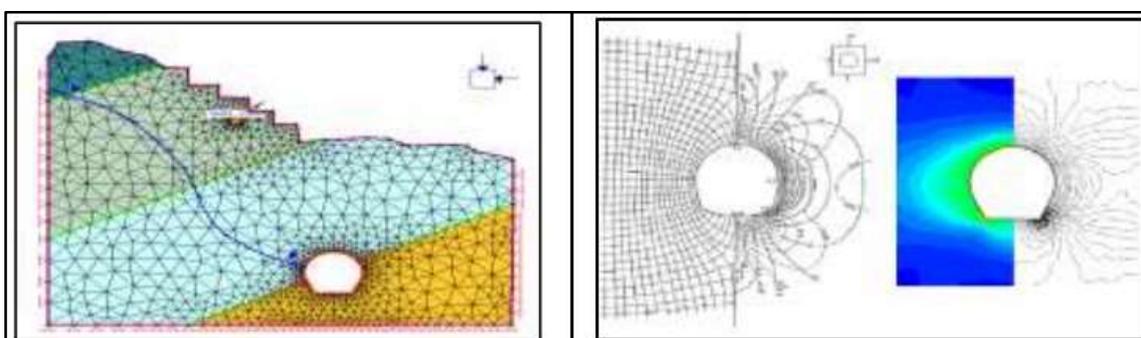


Figura 6. Propagación de vibraciones generadas en superficie PPV (mm/s), hacia túneles y obras subterráneas (izq). Redistribución de esfuerzos por desconfinamiento durante la excavación mecánica de un túnel (der).

La propagación de las ondas generadas por una voladura a cielo abierto y su incidencia hacia un túnel localizado a 80 m por debajo de una cantera se ilustra en la Figura 7.

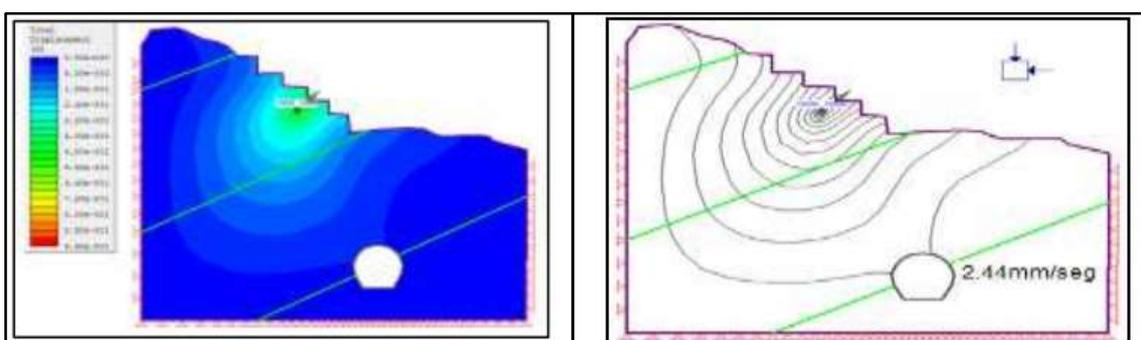


Figura 7. A la izquierda, propagación de ondas generadas por una voladura en superficie PPV (mm/s). A la derecha, isolíneas de vibración PPV (mm/s), voladura en superficie, Carga operante: 45 Kg, PPV: 3,24 mm/s.

La voladura de prueba a cielo abierto empleó 86 barrenos, en areniscas, h: 8 m, diámetro: 4,5 pulgadas, carga máxima: 65 Kg Anfo, Nonel 25, 42 ms. Se instaló un sismógrafo (Minimate Plus, InstanTel) en el techo del túnel (dimensiones 5 m x 7 m, sin revestimiento primario), a través de un

perno en roca, obteniendo una vibración máxima de 2,44 mm/s, que está dentro del rango permisible, lo que indica que no se presentaron daños en el techo del túnel (Figura 8).

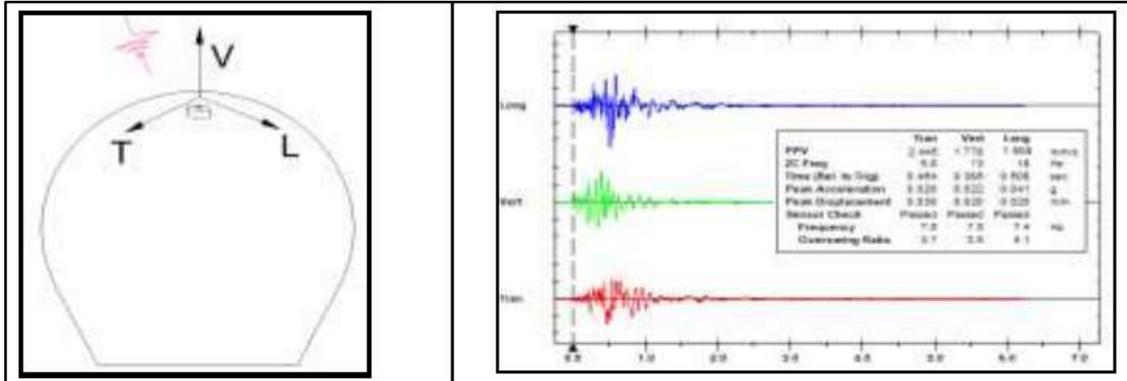


Figura 8. Sismógrafo instalado en el techo del túnel. A la derecha, el registro de vibración obtenido a 80m de la voladura $V_{m\acute{a}x}$: 2,44 mm/s.

A partir de la información obtenida en proyectos desarrollados en las cordilleras andinas de Colombia, se presentan tres casos de estudio correspondientes a túneles viales.

Túnel Pamplona

El proyecto se desarrolló en un túnel vial al norte de Colombia, localizado en el municipio de Pamplona, Departamento Norte de Santander, el cual se excavó paralelamente con una galería de evacuación. La excavación se realizó con voladuras desfasadas (20 m), entre frentes del túnel principal respecto a la galería. El túnel tiene una longitud de 1 360 m y una distancia horizontal entre tubos de 25 m a 35 m. Las mediciones se realizaron con voladuras de producción que fueron previamente diseñadas con el fin de controlar los daños entre túneles (agente de voladura Emulind 38 mm y 32 mm, accesorios de voladuras: Nonel MS y LP, 4 barrenos rimados dispuestos en rombo de 4"). Se excavó utilizando perforaciones y voladuras, con una galería de escape paralela, por lo que se generaron vibraciones de ambos frentes (tanto del túnel como de la galería). Por lo tanto, deben realizarse mediciones de control en las dos direcciones (Dowding; Murray y Amatzidis 1981). Los parámetros de diseño de las voladuras aparecen en la Tabla 1. Las Figuras 9 y 10 ilustran la entrada del túnel así como el diseño y la secuencia de la voladura monitoreada en la galería de evacuación.

Tabla 1. Parámetros de diseño de la voladura túnel Pamplona

Parámetro	Valor
Profundidad de perforación	3 m
Diámetro de perforación	45 mm
Tipo de roca	Areniscas
Explosivo	Emulind de 38 destroza y 32 mm contorno
Retardos	Toda la numeración Nonel MS y LP
Barrenos de alivio (rimados)	4 en rombo de 4"
Número de barrenos	71
Carga operante	12,6 kg
Vibración a 30 m	4,49 mm/s canal longitudinal

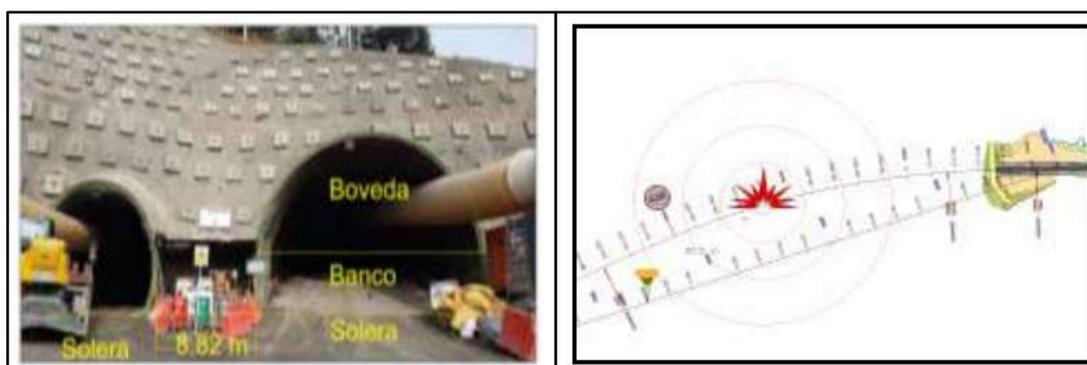


Figura 9. Portales de entrada del túnel Pamplona y representación gráfica de la voladura en el túnel principal monitoreado en la galería.

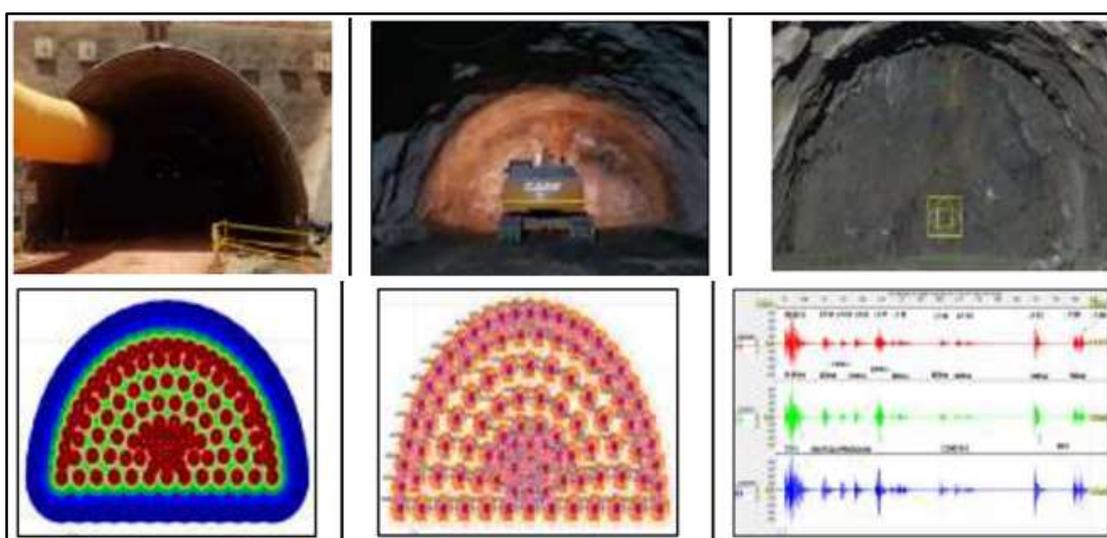


Figura 10. Portal de entrada del túnel principal Pamplona (arriba izq), frente principal (arriba centro), y perforación del frente de voladura (arriba der). Las imágenes inferiores muestran, de izquierda a derecha, la

distribución de la energía del explosivo en el frente; la secuencia de disparo de la voladura; y los registros en la galería (distancia de registro 35 m. PPV = 7,17 mm/s).

El diseño y la secuencia de la voladura realizada en la galería y monitoreada en el túnel Pamplona se muestran en las Figuras 11 y 12. Se observa la distribución del explosivo en el frente, la energía y la intensidad de las vibraciones que pueden generar las cargas aplicadas en las rocas y en túneles cercanos.

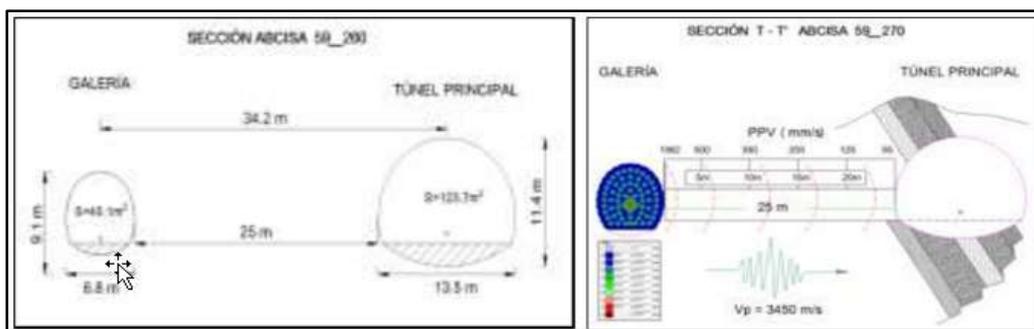


Figura 11. Distancia (izq) y vibraciones (der) entre túneles.

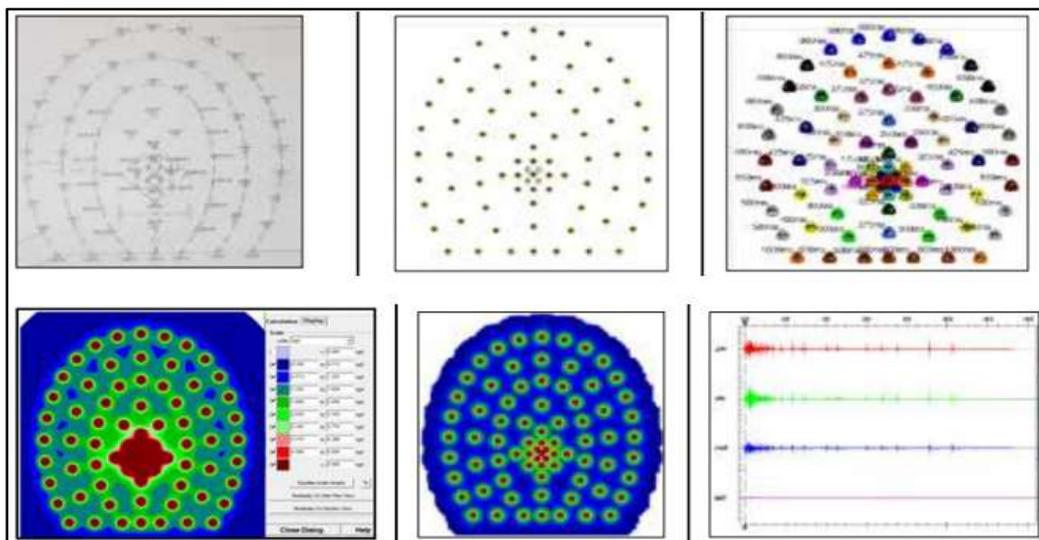


Figura 12. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se representan: Diseño de voladura en la galería; Diseño de la perforación en el frente; Tiempos de retardo; Energía de velocidad de partícula PPV; Distribución de energía del explosivo; Registros obtenidos a 35 m, PPV = 6,24 mm/s.

Túnel 8 - Ruta del Sol

El proyecto se desarrolló en la Ruta del Sol, sector 1, túnel 8, en el municipio de Guaduas, departamento de Cundinamarca; longitud 1 864 m, con dos tubos paralelos a 50 m uno del otro. Los parámetros de diseño de las voladuras y registros de vibraciones entre túneles se observan en la Tabla 2 y las Figuras 13 y 14.

Tabla 2. Parámetros de diseño de voladura Túnel 8 – Ruta del Sol

Parámetro	Valor
Profundidad de perforación	3,5 m
Diámetro de perforación	45 mm
Tipo de roca	Areniscas, arcillolitas y limolitas
Explosivo	Emulind de 38 destroza y 32 mm contorno
Retardos	Toda la numeración Nonel MS y LP
Barrenos de alivio (rimados)	4 en rombo de 4"
Número de barrenos	85
Carga operante	12,1 kg
Vibración a 30 m	3,9 mm/s



Figura 13. Localización de sismógrafos (izq) y ubicación de estos en los portales de entrada (der).

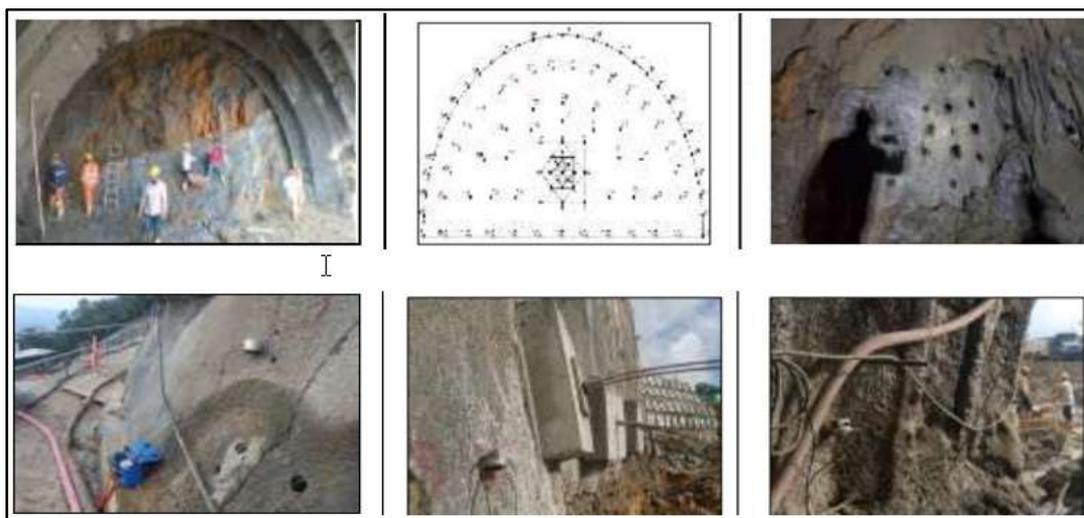


Figura 14. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se pueden visualizar: Portal Guaduas; Malla de perforación; Cuña con 4 barrenos vacíos de 4"; Sismógrafo 1, ubicado a 22 m de la voladura; Sismógrafo 2, ubicado a 35 m de la voladura; Sismógrafo 3, ubicado a 55 m de la voladura.

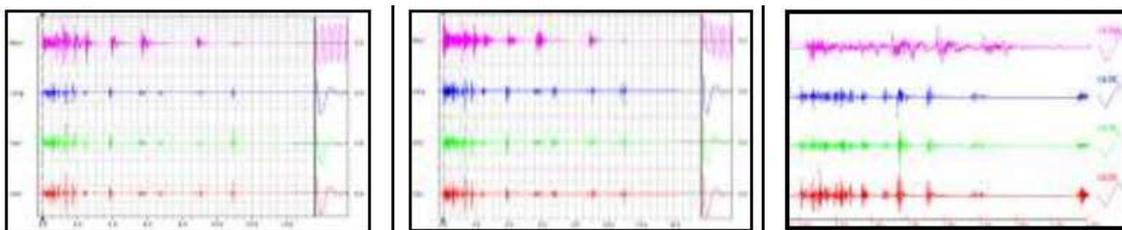


Figura 15. Registros de la voladura: a 22 m, 35 m y a 55 m (PPV = 393 mm/s en los tres casos).

Túnel Buenavista y Túnel 7

El proyecto está localizado en la doble calzada Bogotá–Villavicencio, sector Buenavista. El trabajo se desarrolló durante la excavación de túnel 7 el cual es paralelo al túnel Buenavista, con una longitud de 4 800 m. El sector presenta una geología compleja con rocas de calidad buena, regular y mala. Los monitoreos de voladuras se realizaron en el portal Bogotá en los primeros 700 m en rocas competentes del túnel 7. Los parámetros de diseño de las voladuras y registros de vibraciones entre túneles se observan en la Tabla 3 y las Figuras 16, 17 y 18.

Tabla 3. Parámetros de diseño de voladura Túnel Buenavista y Túnel 7

Parámetro	Valor
Profundidad de perforación	2 m
Diámetro de perforación	45 mm
Tipo de roca	Limolitas y arcillolitas
Explosivo	Emulind de 38 destroza y 32 mm contorno
Retardos	Toda la numeración Nonel MS y LP
Barrenos de alivio (rimados)	4 en rombo de 4"
Número de barrenos	78
Carga operante	1,79 kg
Vibración a 40 m	2,9 mm/s

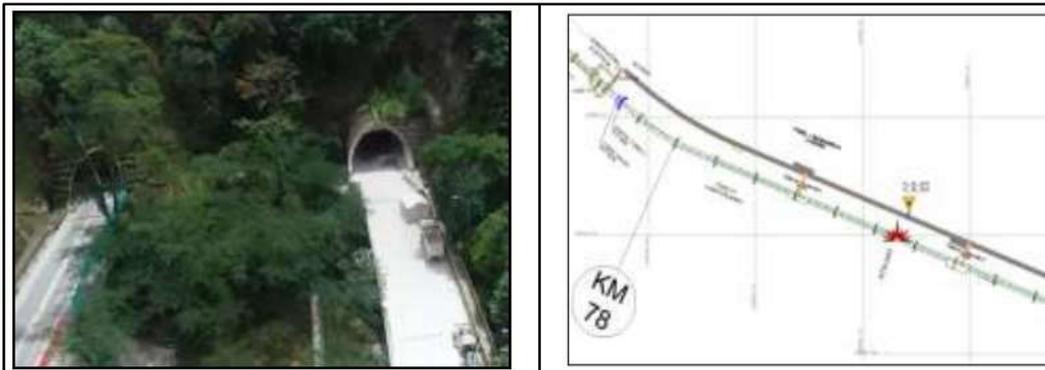


Figura 16. Portal Bogotá, túneles Buenavista y Túnel 7. A la derecha, esquema de localización de sismógrafos 1, 2 y 3 en los túneles.

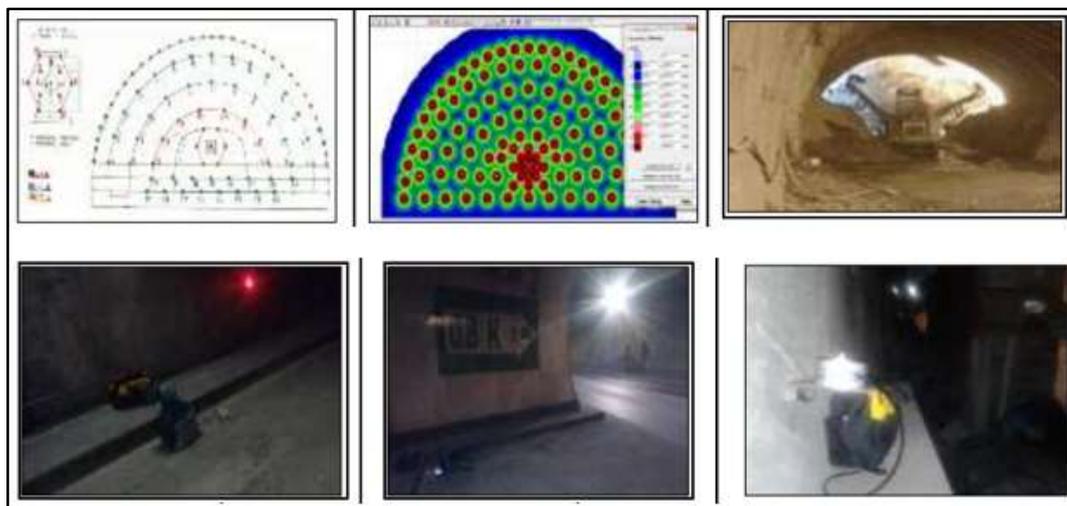


Figura 17. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se distinguen: Diseño de voladura; Diseño de voladura con software 2D Face; Perforación del frente de excavación Túnel 7; Localización de los sismógrafos 1, 2 y 3.

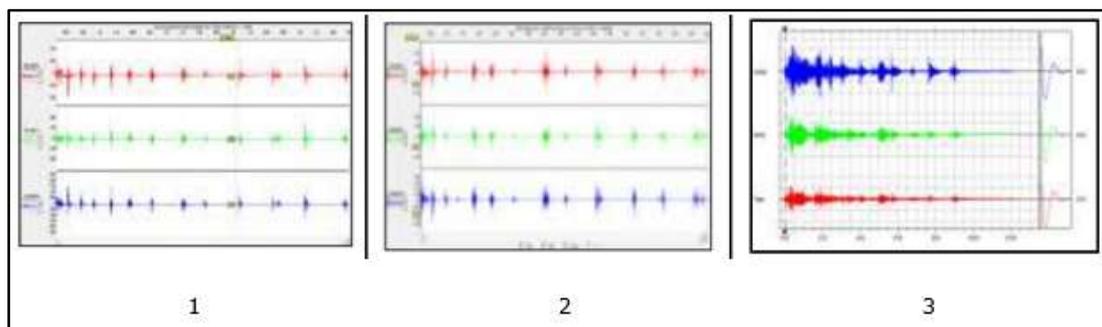


Figura 18. Registros obtenidos con cada sismógrafo 1. ubicado a 20 m, PPV = 2979 mm/s. 2. ubicado a 40 m, PPV = 2995 mm/s. 3. ubicado a 80 m, PPV = 2132 mm/s.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las vibraciones inducidas podrían poner en peligro la seguridad de los túneles o galerías que se excavan paralelamente, o los túneles en servicio, causando

desprendimientos, fisuras, grietas, cuñas del techo y hastiales de túneles cercanos en construcción, inclusive, contribuirían al colapso de los revestimientos. Para reducir los costos de construcción y minimizar el daño al medio ambiente, la distancia entre túneles debe ser lo más corta posible. La velocidad pico de vibración de la partícula PPV, registrada entre túneles, es una variable decisiva para adelantar los análisis de daños en las rocas y en los concretos de revestimiento en las obras subterráneas. Por esta razón, la mayoría de las normas emplean umbrales de seguridad relacionados con el potencial de daños por estremecimientos generados por vibraciones utilizando la velocidad de vibración como variable básica.

Los registros se tomaron para voladuras con profundidades de perforación de 2m a 3,5 m y con diseños óptimos de cuñas que permitieron el desconfinamiento del frente, dando alivio a la salida secuenciada de la voladura.

En los resultados de los registros de vibración entre túneles se puede observar que la utilización de toda la numeración de retardos de los explosivos Nonel, es efectiva para controlar el daño entre tubos localizados a distancias mayores a 40 m. La utilización de accesorios NONEL (no eléctrico), con toda la numeración MS (22 retardos, máximo 1 400 ms) y LP (15 retardos, máximo 9 600 ms) es suficiente para mitigar los daños en el macizo rocoso y, en especial, sobre túneles y obras subterráneas adyacentes.

De acuerdo con lo anterior, los resultados de las voladuras realizadas, apoyados con estudios sismológicos de control, aportan que estos materiales son confiables y seguros, y que pueden ser empleados como un complemento necesario para optimizar las voladuras y controlar vibraciones (PPV) entre las obras subterráneas. El diseño de cuña recomendado consiste en emplear, como mínimo, cuatro taladros rimados de 4", con diámetros de explosivos de 38 mm en la destroza y 26 mm en el contorno.

5. CONCLUSIONES

- Monitorear las vibraciones por voladuras permite analizar la incidencia de la propagación de ondas en el macizo, siendo una herramienta útil para determinar y prevenir los posibles daños en techos o hastiales en túneles y demás obras subterráneas.
- Los análisis empíricos a través de softwares, con parámetros y data geotécnica de rocas friables, permiten realizar simulaciones de propagación de ondas (isolíneas de velocidad) e intensidad de llegada de las ondas sobre la clave del túnel, donde precisamente se pueden presentar fallas por colapso de cuñas u otras estructuras.

- Las velocidades de vibración y las tensiones dinámicas ejercen un efecto sobre diferentes posiciones del revestimiento del túnel, teniendo en cuenta que la velocidad máxima de partícula (PPV) influye directamente en el anverso del revestimiento y los esfuerzos de tensiones máximas, disminuyen con el aumento de la roca circundante.
- El umbral de seguridad recomendado de PPV es de 100 mm/s para revestimiento intacto. Sin embargo, si el revestimiento presenta algún tipo de agrietamiento, los umbrales de seguridad recomendados de PPV estarán alrededor de los 25 mm/s - 50 mm/s.

6. REFERENCIAS

- Chapot, P. 1981: Étude des vibrations provoquées par les explosifs dans les massifs rocheux. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. *Rapport de Recherche*, 105: 1-56.
- Dowding, C. H.; Murray, P. D. and Amatzidis, D. K. 1981: Dynamic properties of structures subjected to blasting vibrations. *Journal of the Structural Division, Proceedings of the American society of Civil Engineers*, 107(7): 1233-1249.
- Edwards, A. T. and Northwood, T. D. 1960: Experimental studies of the effects of blasting on structures. *The Engineer*, 210: 538.
- Franklin, J. A. 1971: Triaxial strength of rock materials. *Rock mechanics*, 3: 86-98.
- Langefors, U. and Kihlstrom, B. 1978: *The modern technique of rock blasting*. 3a ed. Estocolmo: Almqvist & Wiksell. 438 p.
- Pinto-Morales, L. H. y Fuentes-Fuentes, M. C. 2000: Estudio sismológico por efecto de vibraciones en Nobsa-Boyacá. Proyecto Dirección de Investigaciones, UPTC, Tunja, Boyacá, p. 250.
- Pinto-Morales, L. H. y Fuentes-Fuentes, M. C. 2007: Determinación de los modelos de velocidad de partículas en voladuras. *Revista Ingeniería, investigación y desarrollo*, 4(1): 13-18.
- Pinto-Morales, L. H. y Fuentes-Fuentes, M. C. 2008: Propuesta de guía de regulación colombiana para el control de vibraciones por voladuras de rocas en áreas urbanas. RCOLVV.09. *Revista Ingeniería, investigación y desarrollo*, 7(2): 26-38.
- Pinto-Morales, L. H. y Fuentes-Fuentes, M. C. 2013: Monitoreo y control de vibraciones por efectos de voladuras en el túnel de Sumapaz, Concesión Bogotá-Girardot. *Revista Ingeniería, investigación y desarrollo*, 13(2): 15- 22.
- Pinto-Morales, L. H. y Fuentes-Fuentes, M. C. 2017: Estudio de vibraciones generadas por vibrocamiones para la compañía VECTOR GEOPHYSICAL

en el proyecto sísmico VSM 2D 2017. Agencia Nacional de Hidrocarburos – ANH. Coyaima, Departamento del Tolima. p. 73.

Pinto-Morales, L. H. y Fuentes-Fuentes, M. C. 2021: Efecto de las voladuras sobre el comportamiento estructural de viviendas cercanas a sitios de explotación minera en Colombia. *Minería y Geología*, 37(1): 58-73.

Siskind, D. E. 1980: *Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting*. Vol. 8507. Washington: U. S. Bureau of Mines. 74 p.

Taylor & Francis Group. 2013: *Tunnelling in rock by drillin and blasting*. London: Spathis & Gupta (Eds).

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores no tienen conflictos de intereses que declarar

Contribución de los autores

Ambos autores contribuyeron por igual

ORCIDs

HPM, <https://orcid.org/0000-0001-5606-0326>

MCFE, <https://orcid.org/0000-0002-0599-613X>

Recibido: 5/03/2022

Aceptado: 12/09/2022