

Optimización de la voladura con el uso de emulsión bombeable en minería subterránea y tunelería

Blasting optimization with the use of pumpable emulsion in underground mining and tunneling

Michael Cahuata Esquivel¹

Recibido: 23/02/2021 - Aprobado: 14/09/2021 – Publicado: 23/12/2021

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue mostrar la optimización generada por la implementación de la emulsión bombeable en minería subterránea y tunelería; teniendo como base científica los estudios técnicos realizados en las unidades mineras: Condestable, Pallancata, Huarón y Andaychahua. Con la finalidad de obtener: una reducción de costos operativos, mitigación de gases contaminantes y reducción del daño inducido al macizo rocoso; se planteó sustituir nuestra línea base Emulnor por un explosivo que permitiese alcanzar los objetivos anteriormente mencionados, concluyéndose tras diversas pruebas, que la mejor alternativa de optimización la brindaba el Emulfrag, puesto que en comparación a la línea base, nos permitió generar un ahorro de 26.9 USS/m para roca suave, 26.9 USS/m para roca media y 26.9 USS/m para roca dura; en lo que respecta a gases contaminantes se redujo en 55.3 % la emisión de monóxido de carbono y en un promedio de 70.2% de gases nitrosos, se logró la disminución de los gases por combustión de plástico; gracias al efecto deflagrante que produce el Emulfrag a 0.8 g/cm³, se logró que la zona de intenso fracturamiento se redujera en 30 cm y la zona de creación de nuevas fracturas se redujera en 10 cm.

Palabras claves: Daño; deflagrante; emulnor; emulfrag; mitigación; pruebas.

ABSTRACT

The objective of this work was to show the optimization generated by the implementation of the pumpable emulsion in underground mining and tunneling; having as scientific basis the technical studies carried out in the mining units: Condestable, Pallancata, Huarón and Andaychahua. In order to obtain: a reduction in operating costs, mitigation of polluting gases and reduction of the damage induced to the rocky massif; It was proposed to replace our Emulnor baseline with an explosive that would allow us to achieve the aforementioned objectives, concluding after various tests that the best optimization alternative was provided by Emulfrag, since compared to the baseline, it allowed us to generate savings of 26.9 USS / m for soft rock, 26.9 USS / m for medium rock and 26.9 USS / m for hard rock; Regarding polluting gases, the emission of carbon monoxide was reduced by 55.3% and by an average of 70.2% of nitrous gases, the reduction of gases from plastic combustion was achieved; Thanks to the deflagrating effect produced by Emulfrag at 0.8 g / cm³, the area of intense fracturing was reduced by 30 cm and the area of creation of new fractures was reduced by 10 cm.

Keywords: Damage; deflagrant; emulnor; emulfrag; mitigation; testing.

¹ Ingeniero de Minas graduado de la Universidad Nacional de San Antonio de Abad; Egresado de la Maestría en Ciencias Ambientales con mención en Desarrollo Sustentable en Minería y Recursos Energéticos de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.

Autor para correspondencia: michaelcahuata@gmail.com - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-1216-7162>

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la minería está creciendo a pasos agigantados, sin embargo, no se ha desarrollado técnicas alternativas que continúen con la optimización paulatina de la voladura; esta última es una de las operaciones unitarias más riesgosa e importante en el ámbito de la minería subterránea, puesto que el resultado óptimo de esta, determinara un ciclo de minado más productivo.

En los últimos años, tanto en minería como en tunelería, se han estado presentando malos resultados (bajo avance a alto costo, generación excesiva de gases contaminantes y daño excesivo al macizo rocoso post voladura), debido a un mal diseño de voladura, además de falta de monitoreo de gases y vibraciones.

Al estar relacionado a una empresa que busca estar en la vanguardia de la creación de explosivos, que se adapten a cualquier contexto geomecánico; se realizó un análisis comparativo de costo-productividad entre la “Emulsión Bombeable” y el resto de los explosivos en el mercado minero y civil.

II. MÉTODOS

Como se indicó en el apartado anterior, este trabajo investigativo, se realizó en las empresas mineras: Volcan (U.M. Andaychagua - Junín), Panamerican Silver (U.M. Huarón - Cerro de Pasco), Hochschild (U.M. Pallancata - Ayacucho) y Anddes (U.M. Condestable - Lima). Entre los años 2018 al 2020, se realizó diversos viajes y estudios técnicos a las mineras anteriormente mencionadas, junto al equipo de consultoría técnica en voladura subterránea de Famesa Explosivos.

Para el estudio, se seleccionaron labores de sección de 4.0 x 4.0 m, con avance en estéril, como lo son las rampas y cruceros; estas las visualizaremos en la Tabla 1.

Tabla 1. Labores de avance en estéril seleccionadas para el estudio

Mina	Labor
Condestable	AC 256
	AC 668
	CAB_662
	AC 683
Pallancata	CX 4180
	CX 5710
Andaychagua	Rp(+) 662
	Rp(-) 1018
	Rp(+) 668
	Rp(-) 1020
	CX 682
Huarón	CX 728
	CX 834
	CX 662
	RP(+) 530
	Rp(+) 534

Cada una de estas labores, está supeditada a la geomecánica de la mina a la cual pertenecen, por lo cual para encontrar los parámetros necesarios para estudios posteriores entorno a vibraciones, fue necesario realizar un estudio geomecánico en campo (utilizando martillo Smith, peine de Barton, wincha y picota de geólogo) y otro en laboratorio de Mecánica de Rocas (utilizando máquinas para ensayos de resistencias en testigos); en la Tabla 2 visualizamos la valoración geomecánica, impuesta tras el tratamiento de los datos obtenidos en campo.

Tabla 2. Clasificación y parametrización generalizada de las labores estudiadas

Clasificación del Macizo Rocosos	RMR Promedio	Resistencia a la Compresión (MPa)
Buena (II)	68	161
Regular A (III _A)	57	68
Regular B (III _B)	46	49
Mala A (IV _A)	34	24
Mala B (IV _B)	25	4

Posterior a esto se recolecto los avances generados con las mallas de voladura a base del explosivo Emulnor; estos los apreciamos en la Tabla 3.

Tabla 3. Labores investigadas y su avance lineal con respecto a la Línea Base Emulnor

Labor	Avance lineal promedio por disparo (metros)
AC 256	3.47
AC 668	3.45
CAB_662	3.55
AC 683	3.50
CX 4180	3.55
CX 5710	3.54
Rp(+) 662	3.56
Rp(-) 1018	3.47
Rp(+) 668	3.52
Rp(-) 1020	3.55
CX 682	3.55
CX 728	3.56
CX 834	3.52
CX 662	3.55
RP(+) 530	3.58
Rp(+) 534	3.56

Al analizar los resultados generados por la línea base, se observó los siguientes problemas: bajo avance lineal, excesiva sobrerotura, alto factor de avance, excesivo tiempo de carguío, demasiada contaminación y alto costo de voladura (Famesa Explosivos, 2020).

En primera instancia se buscó solucionar el problema de sobrerotura, por lo cual se implementó el Famecorte E-20 como mejor alternativa. Sin embargo, aún quedaba por solucionar el aspecto de un mayor avance a bajo costo,

debido a esto se decidió implementar el anfo SuperfamDos en los taladros de producción, satisfaciendo de esta manera el aspecto anteriormente mencionado (Famesa Explosivos, 2019).

Si bien, se obtuvo un mayor avance a bajo costo, se volvió a incurrir en el excesivo daño al macizo rocoso producto de la excesiva energía liberada por el anfo, además de generar una excesiva cantidad de gases contaminantes. Debido a esto, se planteó sustituir el SuperfamDos por el Emulgran Qhana, este último nos proporcionó un mayor avance a un costo similar, mayor aceleración en el tiempo de carguío, menor sobrerotura, mucha menor contaminación y facilidad de almacenamiento gracias a la instalación de isotanques.

Los resultados obtenidos por el uso del Emulgran Qhana fueron muy satisfactorios; sin embargo, la actividad minera es un proceso de mejora continua, por lo cual, se volvieron a exigir mejoras en los estándares de rendimiento y calidad; debido a esto se planteó usar la

emulsión bombeable gasificada Emulfrag, como sustituto. Ya que esta presentaba dos propiedades sumamente importantes:

- Variabilidad de la densidad, la cual permite controlar la sobrerotura en la labor, sin la necesidad de utilizar un explosivo especializado en control de excedencia de vibraciones (Famecorte E-20); se observa en la Figura 1 (Famesa Explosivos, 2010).
- Esponjamiento de la emulsión, la cual permite un aumento de volumen según la densidad que esta posea; se observa en la Figura 2 (Guerra Sanabria, 2013).

III. RESULTADOS

Uno de los principales problemas a los fue el excesivo daño al macizo rocoso generado por las voladuras basadas en el explosivo Emulnor.



Figura 1. Control de la densidad del Emulfrag mediante PLC

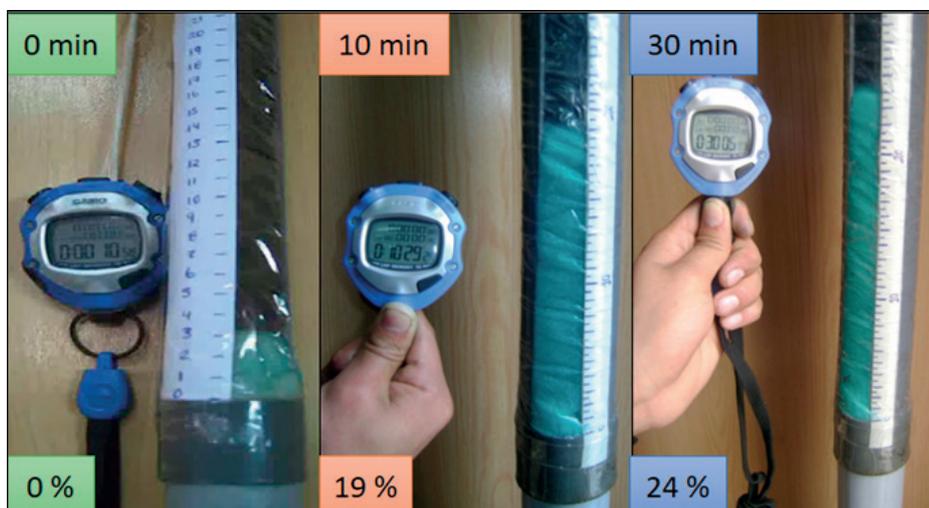


Figura 2. Simulación de la variación del esponjamiento del Emulfrag

Debido a lo anteriormente mencionado, procedí a realizar un monitoreo de vibraciones en las labores donde se realizó la investigación

Los datos captados y registrados por el sistema de monitoreo fueron tratados en Ms. Excel mediante una regresión exponencial, con el fin de obtener la constante de velocidad (K) y la constante de regresión (α) para cada tipo de explosivo.

3.1. Método de Regresión Exponencial

Mediante este método estadístico, buscaremos obtener la ecuación exponencial ($Y= K \cdot X^\alpha$) y su gráfica, en base a la correlación de la distancia escalar (eje X) y sus respectivas vpps (eje Y) (Ticlia Amador, 2019).

La Figura 3, muestra la correlación entre las vpps generadas por el explosivo Emulnor 1000 (1 $\frac{1}{4}$ x 12") con

espaciamiento de 0.30 metros entre sí y sus respectivas distancias escalares, por monitoreo de taladros de coronas y hastiales.

La Figura 4, muestra la correlación entre las vpps generadas por el explosivo Famecorte E-20 y sus respectivas distancias escalares, por monitoreo de taladros de coronas y hastiales.

La Figura 5, muestra la correlación entre las vpps generadas por el explosivo SuperfamDos y sus respectivas distancias escalares, por monitoreo de taladros de producción.

La Figura 6, muestra la correlación entre las vpps generadas por el explosivo Emulfrag a una densidad de 0.8 $\frac{g}{cm^3}$ y sus respectivas distancias escalares, por monitoreo de taladros de coronas y hastiales.

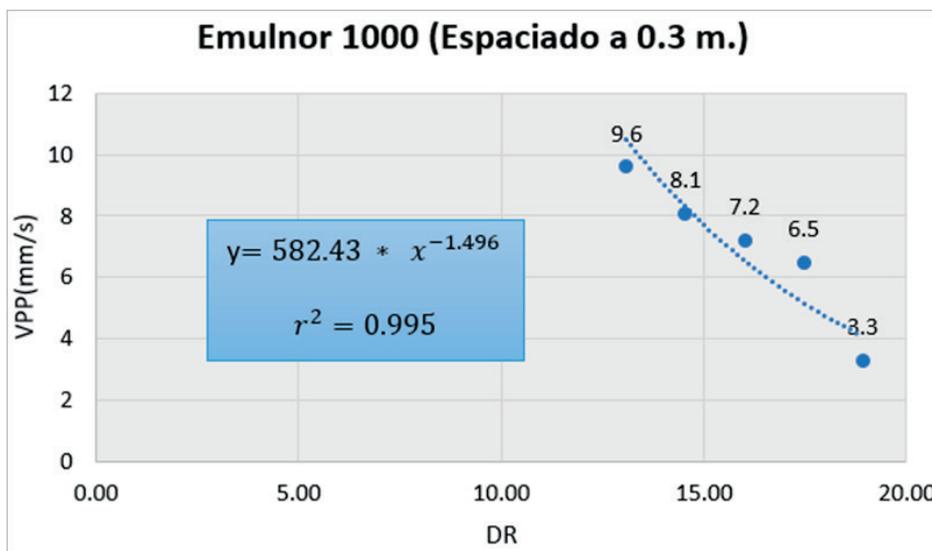


Figura 3. Ley de atenuación usando el Emulnor 1000 con carga espaciada a 0.30 m.

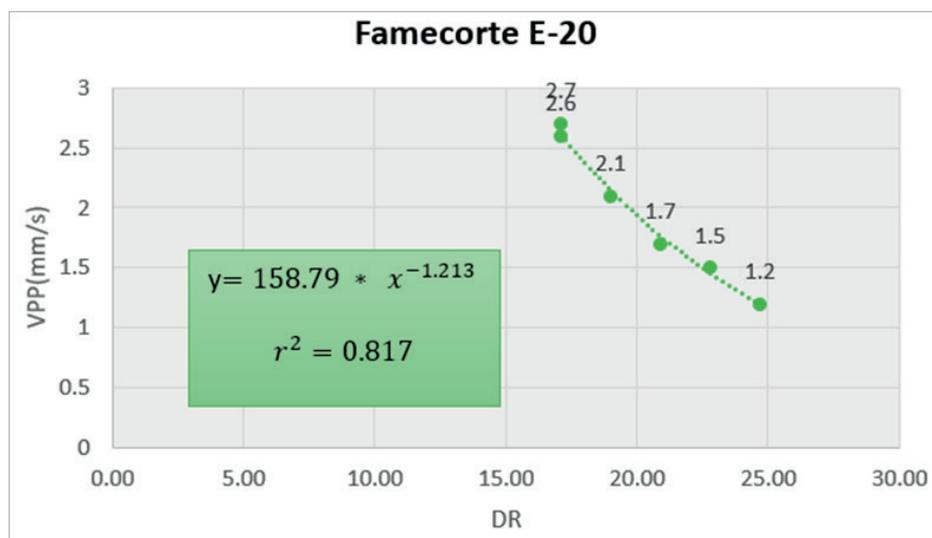


Figura 4. Ley de atenuación usando el Famecorte E-20.

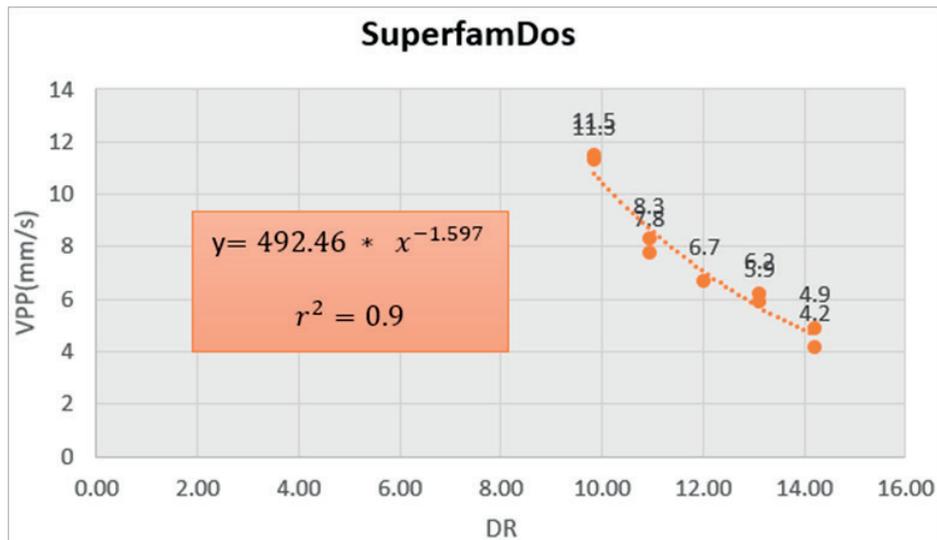


Figura 5. Ley de atenuación usando el SuperfamDos.

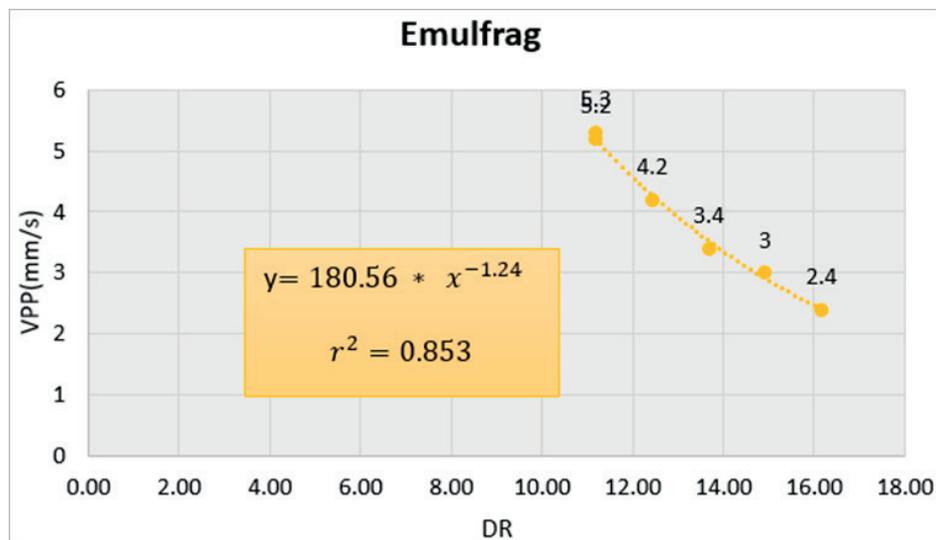


Figura 6. Ley de atenuación usando el Emulfrag.

Cabe resaltar que, para un buen monitoreo de vibraciones, la distancia promedio a la cual coloqué los geófonos fue de 20 metros.

3.2. Criterio de Cameron Mckenzie

Para su determinación, fue necesario introducir en MS Excel, la data geomecánica expresada en la Tabla 2, obteniéndose los siguientes criterios:

- El criterio para roca suave, expresa que: para un vpp mayor a 207.85 mm/s, se generará una leve propagación de fracturas preexistentes; para un vpp mayor a 831.4 mm/s, se generará creación de nuevas fracturas y para un vpp mayor a 831.4 mm/s, se generará intenso fracturamiento.
- El criterio para roca media, expresa que: para un vpp mayor a 410.2 mm/s, se generará una leve propagación de fracturas preexistentes; para un

vpp mayor a 1640.79 mm/s, se generará creación de nuevas fracturas y para un vpp mayor a 6563.16 mm/s, se generará intenso fracturamiento.

- El criterio para roca dura, expresa que: para un vpp mayor a 820.23 mm/s, se generará una leve propagación de fracturas preexistentes; para un vpp mayor a 3280.92 mm/s, se generará creación de nuevas fracturas y para un vpp mayor a 820.23 mm/s, se generará intenso fracturamiento.

3.3. Análisis por teoremas de Campo Lejano y Cercano

3.3.1. Daño inducido por Emulnor 1000 para roca suave

Mediante el análisis gráfico-estadístico por campo lejano, se obtuvo que: entre los 0.0-0.5 metros se dará un intenso fracturamiento, entre los 0.5-1 metros se generará creación

de fracturas y a partir de los 1 m. hacia adelante se generará una leve propagación de fracturas preexistentes.

Posteriormente procedimos a realizar el análisis por campo cercano en corona y hastiales, teniendo en cuenta dos tipos de vistas.

Para la vista de perfil observamos que el máximo intenso fracturamiento vertical se dará en 0.35 m. fuera del taladro; mientras que para la vista en planta el máximo intenso fracturamiento horizontal se dará en 0.35 m. a las laterales del taladro

3.3.2. Daño inducido por Emulnor 1000 para roca media

Mediante el análisis gráfico-estadístico por campo lejano, se obtuvo que: entre los 0.0-0.4 metros se dará un intenso fracturamiento, entre los 0.4-0.8 metros se generará creación de fracturas y a partir de los 0.9 m. hacia adelante se generará una leve propagación de fracturas preexistentes.

Posteriormente procedimos a realizar el análisis por campo cercano en corona y hastiales, teniendo en cuenta dos tipos de vistas.

Para la vista de perfil observamos que el máximo intenso fracturamiento vertical se darán en 0.15 m. fuera del taladro; mientras que para la vista en planta el máximo intenso fracturamiento horizontal se dará en 0.15 m. a las laterales del taladro.

3.3.3. Daño inducido por Emulnor 1000 para roca dura

Mediante el análisis gráfico-estadístico por campo lejano, se obtuvo que: entre los 0.0-0.3 metros se dará un intenso fracturamiento, entre los 0.3-0.5 metros se generará creación de fracturas y a partir de los 0.5 m. hacia adelante se generará una leve propagación de fracturas preexistentes.

Posteriormente procedimos a realizar el análisis por campo cercano en corona y hastiales, teniendo en cuenta dos tipos de vistas.

Para la vista de perfil observamos que el máximo intenso fracturamiento vertical se darán en 0.05 m. fuera del taladro; mientras que para la vista en planta el máximo intenso fracturamiento horizontal se darán en 0.05 m. fuera del taladro.

3.3.4. Daño inducido por Famecorte E-20 para roca suave

Mediante el análisis gráfico-estadístico por campo lejano, se obtuvo que: entre los 0.0-0.2 metros se dará un intenso fracturamiento, entre los 0.2-0.4 metros se generará creación de fracturas y a partir de los 0.4 m. hacia adelante se generará una leve propagación de fracturas preexistentes.

Posteriormente procedimos a realizar el análisis por campo cercano en corona y hastiales, teniendo en cuenta dos tipos de

Para la vista de perfil observamos que la creación de nuevas fracturas verticales se dará en 0.15 m. fuera del

taladro; mientras que, en la vista en planta, la creación de nuevas fracturas horizontales se dará en 0.15 m. a las laterales del taladro.

3.3.5. Daño inducido por Famecorte E-20 para roca media

Mediante el análisis gráfico-estadístico por campo lejano, se obtuvo que: entre los 0.0-0.2 metros se generará creación de fracturas y a partir de los 0.2 m. hacia adelante se generará una leve propagación de fracturas preexistentes.

Posteriormente procedimos a realizar el análisis por campo cercano en corona y hastiales, teniendo en cuenta dos tipos de vistas.

Para la vista de perfil observamos que las creaciones de nuevas fracturas verticales se darán en 0.05 m. fuera del taladro; mientras que, en la vista en planta, la creación de nuevas fracturas horizontales se dará en 0.05 m. a las laterales del taladro.

3.3.6. Daño inducido por Famecorte E-20 para roca dura

Mediante el análisis gráfico-estadístico por campo lejano, se obtuvo que: entre los 0.0-0.1 metros se generará creación de fracturas y a partir de los 0.1 m. hacia adelante se generará una leve propagación de fracturas preexistentes.

Posteriormente procedimos a realizar el análisis por campo cercano en corona y hastiales, teniendo en cuenta dos tipos de vistas.

Para la vista de perfil y en planta, se dará leve propagación de las fracturas preexistentes en los alrededores del taladro.

3.3.7. Daño inducido por SuperfamDos para roca suave

Mediante el análisis gráfico-estadístico por campo lejano, se obtuvo que: entre los 0.0-1 metros se dará un intenso fracturamiento, entre los 1-1.5 metros se generará creación de fracturas y a partir de los 1.5 m. hacia adelante se generará una leve propagación de fracturas preexistentes.

Posteriormente procedimos a realizar el análisis por campo cercano en corona y hastiales, teniendo en cuenta dos tipos de vistas.

Para la vista de perfil observamos que el máximo intenso fracturamiento vertical se dará en 0.55 m. fuera del taladro; mientras que, en la vista en planta, el máximo intenso fracturamiento horizontal se dará en 0.35 m. a las laterales del taladro.

3.3.8. Daño inducido por SuperfamDos para roca media

Mediante el análisis gráfico-estadístico por campo lejano, se obtuvo que: entre los 0.0-0.6 metros se dará un intenso fracturamiento, entre los 0.6-0.9 metros se generará creación de fracturas y a partir de los 0.9 m. hacia adelante se generará una leve propagación de fracturas preexistentes.

Posteriormente procedimos a realizar el análisis por campo cercano en corona y hastiales, teniendo en cuenta dos tipos de vistas.

Para la vista de perfil observamos que el máximo intenso fracturamiento vertical se dará en 0.35 m. fuera del taladro; mientras que, en la vista en planta, el máximo intenso fracturamiento horizontal se dará en 0.25 m. a las laterales del taladro.

3.3.9. Daño inducido por SuperfamDos para roca dura

Mediante el análisis gráfico-estadístico por campo lejano, se obtuvo que: entre los 0.0-0.3 metros se dará un intenso fracturamiento, entre los 0.3-0.6 metros se generará creación de fracturas y a partir de los 0.6 m. hacia adelante se generará una leve propagación de fracturas preexistentes.

Posteriormente procedimos a realizar el análisis por campo cercano en corona y hastiales, teniendo en cuenta dos tipos de vistas.

Para la vista de perfil observamos que el máximo intenso fracturamiento vertical se dará en 0.25 m. fuera del taladro; mientras que, en la vista en planta, el máximo intenso fracturamiento horizontal se dará en 0.15 m. a las laterales del taladro.

3.3.10. Daño inducido por Emulfrag para roca suave

Mediante el análisis gráfico-estadístico por campo lejano, se obtuvo que: entre los 0.0-0.2 metros se dará un intenso fracturamiento, entre los 0.2-0.6 metros se generará creación de fracturas y a partir de los 0.6 m. hacia adelante se generará una leve propagación de fracturas preexistentes.

Posteriormente procedimos a realizar el análisis por campo cercano en corona y hastiales, teniendo en cuenta dos tipos de vistas.

Para la vista de perfil observamos que el máximo intenso fracturamiento vertical se dará en 0.15 m. fuera del taladro; mientras que, en la vista en planta, se dará leve propagación de las fracturas preexistentes. a las laterales del taladro.

3.3.11. Daño inducido por Emulfrag para roca media

Mediante el análisis gráfico-estadístico por campo lejano, se obtuvo que: entre los 0.0-0.1 metros se dará un intenso fracturamiento, entre los 0.1-0.4 metros se generará creación de fracturas y a partir de los 0.4 m. hacia adelante se generará una leve propagación de fracturas preexistentes.

Posteriormente procedimos a realizar el análisis por campo cercano en corona y hastiales, teniendo en cuenta dos tipos de vistas.

Para la vista de perfil observamos que el máximo intenso fracturamiento vertical se dará en 0.05 m. fuera del taladro; mientras que, en la vista en planta, se dará leve efecto de propagación de vibraciones.

3.3.11. Daño inducido por Emulfrag para roca media

Mediante el análisis gráfico-estadístico por campo lejano, se obtuvo que: entre los 0.0-0.1 metros se dará un intenso fracturamiento, entre los 0.1-0.4 metros se generará creación de fracturas y a partir de los 0.4 m. hacia adelante se generará una leve propagación de fracturas preexistentes.

Posteriormente procedimos a realizar el análisis por campo cercano en corona y hastiales, teniendo en cuenta dos tipos de vistas.

Para la vista de perfil observamos que el máximo intenso fracturamiento vertical se dará en 0.05 m. fuera del taladro; mientras que, en la vista en planta, se dará leve efecto de propagación de vibraciones.

3.3.12. Daño inducido por Emulfrag para roca media

Mediante el análisis gráfico-estadístico por campo lejano, se obtuvo que: entre los 0.0-0.2 metros se generará creación de fracturas y a partir de los 0.2 m. hacia adelante se generará una leve propagación de fracturas preexistentes.

Posteriormente procedimos a realizar el análisis por campo cercano en corona y hastiales, teniendo en cuenta dos tipos de vistas.

Para la vista de perfil observamos que el máximo intenso fracturamiento vertical se dará en 0.05 m. fuera del taladro; mientras que, en la vista en planta, se dará leve efecto de propagación de vibraciones.

3.4. Mitigación de gases

Es de suma importancia resaltar este aspecto, puesto que los excesivos gases nocivos producidos tras las voladuras no solo producen retrasos operativos y exceso de costos en ventilación, sino que también afectan la salud del personal minero, así como al medioambiente.

3.4.1. Cantidad de gases producidos en roca suave

La cantidad de monóxido de carbono, para: la línea base Emulnor generó 0.65 Kg, el SuperfamDos generó 1.48 Kg, el Emulgran Qhana generó 0.43 Kg y el Emulfrag generó uno de 0.29 Kg.

La cantidad de monóxido de nitrógeno, para: la línea base Emulnor generó 0.44 Kg, el SuperfamDos generó 0.70 Kg, el Emulgran Qhana generó 0.22 Kg y el Emulfrag generó uno de 0.14 Kg.

La cantidad de dióxido de nitrógeno, para: la línea base Emulnor generó 0.64 Kg, el SuperfamDos generó 0.80 Kg, el Emulgran Qhana generó 0.29 Kg y el Emulfrag generó uno de 0.18 Kg.

3.4.2. Cantidad de gases producidos en roca media

La cantidad de monóxido de carbono, para: la línea base Emulnor generó 0.71 Kg, el SuperfamDos generó 1.69 Kg, el Emulgran Qhana generó 0.46 Kg y el Emulfrag generó uno de 0.32 Kg.

La cantidad de monóxido de nitrógeno, para: la línea base Emulnor generó 0.49 Kg, el SuperfamDos generó 0.80 Kg, el Emulgran Qhana generó 0.24 Kg y el Emulfrag generó uno de 0.15 Kg.

La cantidad de dióxido de nitrógeno, para: la línea base Emulnor generó 0.85 Kg, el SuperfamDos generó 1.94 Kg, el Emulgran Qhana generó 0.31 Kg y el Emulfrag generó uno de 0.36 Kg.

3.4.3. Cantidad de gases producidos en roca dura

La cantidad de monóxido de carbono, para: la línea base Emulnor generó 0.85 Kg, el SuperfamDos generó 1.94 Kg, el Emulgran Qhana generó 0.53 Kg y el Emulfrag generó uno de 0.37 Kg.

La cantidad de monóxido de nitrógeno, para: la línea base Emulnor generó 0.58 Kg, el SuperfamDos generó 0.92 Kg, el Emulgran Qhana generó 0.27 Kg y el Emulfrag generó uno de 0.18 Kg.

La cantidad de dióxido de nitrógeno, para: la línea base Emulnor generó 0.84 Kg, el SuperfamDos generó 1.05 Kg, el Emulgran Qhana generó 0.36 Kg y el Emulfrag generó uno de 0.24 Kg.

Estas variaciones en la cantidad de gases emitidos pudieron ser corroboradas, gracias al equipo de monitoreo de gases "Altair". A continuación, mostramos las diversas medidas tomadas durante las pruebas, en dos escenarios uno ventilando y otro sin ventilar.

Tras 1 hora y 7 minutos, sin ventilar tras un disparo de la rampa (+) 662, se obtuvo las siguientes concentraciones:

- La cantidad de monóxido de carbono, para: la línea base Emulnor generó 263.3 ppm, el SuperfamDos generó 622.5 ppm, el Emulgran Qhana generó 170.5 ppm y el Emulfrag generó uno de 119.6 ppm.
- La cantidad de dióxido de nitrógeno, para: la línea base Emulnor generó 154.6 ppm, el SuperfamDos generó 200 ppm, el Emulgran Qhana generó 68 ppm y el Emulfrag generó uno de 15.2 ppm.

Tras 1 hora y 10 minutos, ventilando tras un disparo de la rampa (+) 668, se obtuvo las siguientes concentraciones:

- La cantidad de monóxido de carbono, para: la línea base Emulnor generó 41.2 ppm, el SuperfamDos generó 97.5 ppm, el Emulgran Qhana generó 26.7 ppm y el Emulfrag generó uno de 18.7 ppm.
- La cantidad de dióxido de nitrógeno, para: la línea base Emulnor generó 1 ppm, el SuperfamDos generó 1.3 ppm, el Emulgran Qhana generó 0.4 ppm y el Emulfrag generó uno de 3.4 ppm.

Además de mitigar los gases producidos por los componentes de los explosivos, también se logró disminuir los gases por la combustión de plástico; puesto que las emulsiones encartuchadas poseen una cubierta de plástico, mientras que las bombeables no hacen uso de

este recubrimiento, Por lo tanto, se evita producir más cantidad de gas metano y óxido de etileno, de la que ya se produce por la combustión de accesorios de voladura, cuya composición se basa en plástico; evitando así el mayor calentamiento del ambiente de trabajo, malestares respiratorios y enfermedades cancerígenas.

3.5. KPIS de voladura

A continuación, visualizaremos la optimización que tuvieron los diferentes KPIS de voladura, según la variación del explosivo, para cada tipo de roca.

Cabe resaltar que los avances lineales para los diferentes tipos de roca fueron: la línea base Emulnor generó $3.5 \frac{m}{disparo}$, de igual manera el Emulnor + Famecorte, mientras que el SuperfamDos generó $3.5 \frac{m}{disparo}$, el Emulgran Qhana generó $3.7 \frac{m}{disparo}$ y el mayor avance lineal se obtuvo con la utilización del Emulfrag, el cual generó $3.8 \frac{m}{disparo}$.

3.5.1. KPIS de voladura para roca suave

Los factores de avance, para: la línea base Emulnor generó $26.23 \frac{Kg}{metro}$, el Emulnor + Famecorte generó $25.65 \frac{Kg}{metro}$, el SuperfamDos generó $22.93 \frac{Kg}{metro}$, el Emulgran Qhana generó $22.99 \frac{Kg}{metro}$ y el Emulfrag generó uno de $18.36 \frac{Kg}{metro}$.

La cantidad de taladros cargados, para: la línea base Emulnor fue 36, el Emulnor + Famecorte fue 38, el SuperfamDos fue 35, el Emulgran Qhana fue 35 y el Emulfrag fue 35.

El tiempo de carguío, para: la línea base Emulnor fue 59 minutos, el Emulnor + Famecorte fue 54 minutos, el SuperfamDos fue 49 minutos, el Emulgran Qhana fue 40 minutos y el Emulfrag fue 42 minutos.

La Sobrerotura, para: la línea base Emulnor fue 12.9 %, el Emulnor + Famecorte fue 10.3 %, el SuperfamDos fue 15.6 %, el Emulgran Qhana fue 8.9 % y el Emulfrag fue 6.3 %.

El costo de voladura, para: la línea base Emulnor fue 258.96 USS, el Emulnor + Famecorte fue 276.93 USS, el SuperfamDos fue 199.49 USS, el Emulgran Qhana fue 187.75 USS y el Emulfrag fue 178.96 USS.

3.5.2. KPIS de voladura para roca media

Los factores de avance, para: la línea base Emulnor generó $29.03 \frac{Kg}{metro}$, el Emulnor + Famecorte generó $27.75 \frac{Kg}{metro}$, el SuperfamDos generó $26.11 \frac{Kg}{metro}$, el Emulgran Qhana generó $24.98 \frac{Kg}{metro}$ y el Emulfrag generó uno de $20.44 \frac{Kg}{metro}$.

La cantidad de taladros cargados, para: la línea base Emulnor fue 40, el Emulnor + Famecorte fue 41, el SuperfamDos fue 39, el Emulgran Qhana fue 38 y el Emulfrag fue 38.

El tiempo de carguío, para: la línea base Emulnor fue 65 minutos, el Emulnor + Famecorte fue 59 minutos, el

SuperfamDos fue 53 minutos, el Emulgran Qhana fue 45 minutos y el Emulfrag fue 46 minutos.

La Sobrerotura, para: la línea base Emulnor fue 12.9 %, el Emulnor + Famecorte fue 10.3 %, el SuperfamDos fue 16.9 %, el Emulgran Qhana fue 8.9 % y el Emulfrag fue 8.9 %.

El costo de voladura, para: la línea base Emulnor fue 283.72 USS, el Emulnor + Famecorte fue 295.71 USS, el SuperfamDos fue 191.54 USS, el Emulgran Qhana fue 199.6 USS y el Emulfrag fue 173.09 USS.

3.5.3. KPIS de voladura para roca dura

Los factores de avance, para: la línea base Emulnor generó $34.54 \frac{Kg}{metro}$, el Emulnor + Famecorte generó $33.19 \frac{Kg}{metro}$, el SuperfamDos generó $29.99 \frac{Kg}{metro}$, el Emulgran Qhana generó $28.80 \frac{Kg}{metro}$ y el Emulfrag generó uno de $23.61 \frac{Kg}{metro}$.

La cantidad de taladros cargados, para: la línea base Emulnor fue 47, el Emulnor + Famecorte fue 49, el SuperfamDos fue 45, el Emulgran Qhana fue 44 y el Emulfrag fue 44.

El tiempo de carguío, para: la línea base Emulnor fue 73 minutos, el Emulnor + Famecorte fue 68 minutos, el SuperfamDos fue 58 minutos, el Emulgran Qhana fue 47 minutos y el Emulfrag fue 48 minutos.

La Sobrerotura, para: la línea base Emulnor fue 12.9 %, el Emulnor + Famecorte fue 10.3 %, el SuperfamDos fue 16.9 %, el Emulgran Qhana fue 8.9 % y el Emulfrag fue 8.9 %.

El costo de voladura, para: la línea base Emulnor fue 331.40 USS, el Emulnor + Famecorte fue 348.03 USS, el SuperfamDos fue 218.71 USS, el Emulgran Qhana fue 228.51 USS y el Emulfrag fue 190.79 USS.

Se observa que la mejor optimización de los KPIS se da mediante la implementación del Emulfrag.

3.6. Proyección Económica

Realizaremos una proyección económica para un avance de 1000 metros lineales; como se observa en la Figura 7. donde tendremos en cuenta que:

En roca suave, el utilizar la línea base Emulnor tiene un costo de voladura de $73.99 \frac{USS}{metro}$, mientras que al usar el Emulfrag se genera un costo de $47.09 \frac{USS}{metro}$.

En roca media, el utilizar la línea base Emulnor tiene un costo de voladura de $81.06 \frac{USS}{metro}$, mientras que al usar el Emulfrag se genera un costo de $45.55 \frac{USS}{metro}$.

En roca dura, el utilizar la línea base Emulnor tiene un costo de voladura de $94.69 \frac{USS}{metro}$, mientras que al usar el Emulfrag se genera un costo de $50.21 \frac{USS}{metro}$.

IV. CONCLUSIONES

1. La emulsión bombeable gasificable Emulfrag, es la mejor opción puesto que: genera un gran avance a bajo costo, permitiendo un ahorro de $26.9 \frac{USS}{m}$ para roca suave, $35.5 \frac{USS}{m}$ para roca media y $44.5 \frac{USS}{m}$ para roca dura.
2. En lo que refiere a la generación de gases tóxicos se redujo en promedio un 55.3% el monóxido de carbono, en un 68.7 % el monóxido de nitrógeno y en un 71.7% el dióxido de nitrógeno, al realizarse el cambio del explosivo convencional a la emulsión bombeable gasificable Emulfrag; adicional este mismo al no utilizar el plástico que recubre dichas emulsiones encartuchadas, también estamos eliminando otros gases de efecto invernadero como los son el metano y el óxido de etileno.

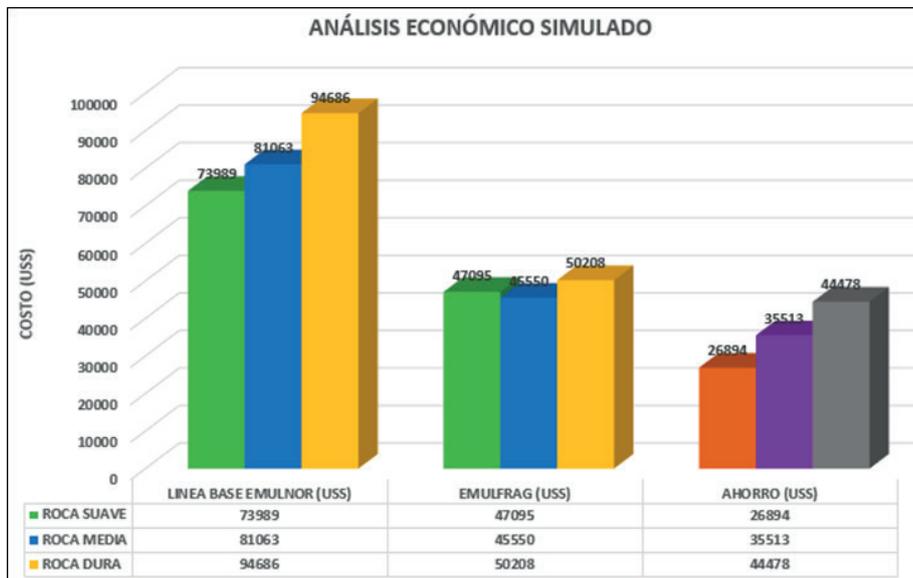


Figura 7. Proyección económica del ahorro obtenido por la voladura

3. En lo que respecta al daño del macizo rocoso, al realizar el respectivo análisis comparativo entre el cambio de usar el explosivo convencional a utilizar el Emulfrag, se obtuvo que tanto para los tres tipos de roca (suave, media y dura) se redujo la zona de intenso de fracturamiento en 30 cm y la zona de creación de nuevas fracturas en 10 cm.

V. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por su bendición, deo constancia mi agradecimiento al Magister Mariano Pacheco Ortiz, quien en todo momento me brindó sus consejos para la elaboración del presente trabajo, también a mi Señor Padre Sixto Cahuata Caballero, al Dr. Rolando Reategui Director de Postgrado de la Facultad de ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica; que gracias a sus consejos he logrado culminar el presente trabajo de tesis de post grado.

Finalmente, a los trabajadores de Unidad Argentum, Arcata, Pallancata, Huaron, Andaychagua quienes apoyaron en la toma de muestras y agradecer infinitamente a los miembros de la alta dirección de la empresa Famesa Explosivos, por haberme brindado las facilidades para obtener las muestras del proceso para el trabajo de investigación.

VI. REFERENCIAS

- Famesa Explosivos. (2010). *Carguío Mecanizado con Emulsión a Granel*. <https://es.scribd.com/document/496548033/REPORTE-1>
- Famesa Explosivos. (2019). *Beneficios de Emulsión Bombeable*. <https://es.scribd.com/document/496550819/FCORT20>
- Famesa Explosivos. (2020). *Tecnología Bombeable a granel en minería Subterránea*. <https://es.scribd.com/document/496548878/ACCES2>
- Guerra Sanabria, R. G. (2013). *Uso de emulsión gasificable para reducir costos de perforación-voladura en minería superficial y subterránea* [Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/10636>
- Ticlia Amador, L. A. (2019). *Análisis y modelamiento de vibraciones para selección optima de explosivo y carga máxima para reducir los costos por voladura en la rp Patrick v zona Valeria v nv 2220 – Marsa 2018* [Universidad Nacional de Trujillo]. <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/13227>