



Explosivos & Voladuras

Revista Volumen I - 2021. Fecha 7 de agosto de 2021 ISSN 2745-2476



EDITADA POR:

ACPEV

Asociación Colombiana de Profesionales en
Explosivos y Voladuras

SUMARIO



Busca fortalecer, profesionalizar y fomentar, el empleo seguro y económico de los explosivos en todo el territorio colombiano, reuniendo en su seno, los mejores y más idóneos profesionales en el manejo de sustancias explosivas para actividades de Ingeniería Civil, Militar, Minera, química y Petrolera.

CONTACTO

-  3134133041
-  3134133041 - 3185579738
-  Asociación Colombiana de Profesionales en Explosivos y Voladuras - ACPEV
-  @Acpev_explosivos_y_voladuras
-  asociados@acpev.org
dir.acpev@gmail.com
-  www.acpev.org

• EDITORES	4
• LOS AUTORES.....	5
• ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PROFESIONALES EN EXPLOSIVOS Y VOLADURAS	7
• COMITÉS QUE INTEGRAN LA ASOCIACIÓN	9
• SALUDO DEL DIRECTOR GENERAL.....	10
• EDITORIAL	11
• ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE CÁMARAS DE AIRE EN LOS PROCESOS DE VOLADURA EN MINERÍA A CIELO ABIERTO	13
• VOLADURAS DE CONTORNO EN MINERÍA DE CARBÓN A CIELO ABIERTO	17
• ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE DETONADORES ELECTRÓNICOS EN EL PROCESO DE PERFORACIÓN Y VOLADURA EN MINERÍA A CIELO ABIERTO	23
• APLICACIÓN DE LA VOLADURA CONTROLADA LLAMADA CUSHION BLASTING A UN CASO DE ESTUDIO DE ALTO RIESGO	28
• FACTORES QUE INCIDEN EN EL CARGUE DE BARRENOS EN MINERÍA DE CARBÓN A CIELO ABIERTO	32
• ÚLTIMAS TENDENCIAS EN EQUIPOS DE PERFORACIÓN	36
• DISEÑO DE VOLADURA SUBTERRÁNEA ATENDIENDO AL RMR Y DEMÁS CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO Y DEL TIPO DE EXPLOSIVO	41
• CORRELACIÓN POTENCIA DEL EXPLOSIVO Y PROPIEDADES DINÁMICAS DE LA ROCA PARA UNA BUENA VOLADURA	46
• DISEÑO ÓPTIMO DE VOLADURAS EN TÚNELES Y GALERÍAS DE MEDIANA A GRAN SECCIÓN EN MACIZOS ROCOSOS COLOMBIANOS.....	53
• DISEÑO DE VOLADURAS EN TÚNELES, MODELOS PREDICTIVOS DE VIBRACIONES Y CONTROL DE DAÑO EN EL CONTORNO	63
• LA GEOTECNIA Y EL EMPLEO DE EXPLOSIVOS EN EL NUEVO MANUAL DE TÚNELES DE CARRETERA PARA COLOMBIA.....	73
• ANÁLISIS DEL ENTORNO EN COLOMBIA PARA LA PRESTACIÓN DE SERVICIO DE PROSPECCIÓN SÍSMICA CON EXPLOSIVOS.....	82
• LA HUELLA DE CARBONO DEL USO DE EXPLOSIVOS EN LA INDUSTRIA EXTRACTIVA.....	88
• INTERACCIÓN UNIVERSIDAD-EMPRESA EN EL PROCESO DE PRÁCTICAS INDUSTRIALES EN EL SECTOR DE EXPLOSIVOS.....	95
• ÉTICA EN LA ERA DIGITAL.....	99
• EXPLOSIVOS, UNA MARAVILLA POCO CONOCIDA EN LA MINERÍA COLOMBIANA.....	102
• HOMENAJE AL INGENIERO LUIS ALBERTO GARZÓN RODRÍGUEZ (QEPD)	107
• RECONOCIMIENTO AL INGENIERO NASSER MÁRQUEZ CONTRERAS.....	109

EDITORES

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PROFESIONALES EN EXPLOSIVOS Y VOLADURAS

REVISTA EXPLOSIVOS Y VOLADURAS EDITADA POR ACPEV

DIRECTIVOS

- Ing. civil Héctor Javier Alvarado Moreno
Director General ACPEV
- Ing. de Minas Nasser Márquez Contreras
Presidente Junta Directiva ACPEV
- Administrador Juan Felipe Lara Urrego
Vicepresidente Junta Directiva ACPEV
- Ing. Civil Hermes Mauricio Alvarado Sáchica
Secretario Junta Directiva ACPEV
- Ing. de minas Edna Teresa Parra Roza
Tesorera Junta Directiva ACPEV
- Ing. Civil Mario Ernesto Álvarez Gutiérrez
Coordinador General Junta Directiva ACPEV
- Ing. de Minas Álvaro de la Cruz Correa Arroyave
Coordinador Técnico Junta Directiva ACPEV
- Ing. Químico Fabian Enrique Ramírez Pacheco
Coordinador Administrativo Junta Directiva ACPEV

EDITOR

- Álvaro de la Cruz Correa Arroyave
Ing. de Minas y Metalurgia, Dr. Ingeniero en mecánica de rocas
Coordinador Comité Técnico ACPEV

CORRECCIÓN DE ESTILO

- Álvaro de la Cruz Correa Arroyave
Ing. de Minas y Metalurgia, Dr. Ingeniero en mecánica de rocas

COMITÉ EDITORIAL

- Ing. Civil Diego Aurelio Gantiva Arias
Universidad Militar Nueva Granada
- Ing. de Minas María Camila Barros Rivera
Asistente HSE en Drummond Ltd
- Ing. de Minas Alan José Daza Aragón
Supervisor Junior de perforación y voladura en Drummond Ltd.
- Abogado Jonnathan S. Zambrano Parada
Asesor y consultor
- Ing. Civil Rither Walther Mahecha Torres
Ingeniero Red Matriz Acueducto EAAB-ESP

COMITÉ CIENTÍFICO

- Álvaro de la Cruz Correa Arroyave,
Ingeniero de Minas y Metalurgia
- Jorge Enrique Rueda Parada, Físico. PhD
- Álvaro Orlando Pedroza Rojas, Ingeniero Civil
- Héctor Javier Alvarado Moreno, Ingeniero Civil
- Nasser Márquez Contreras, Ingeniero de Minas
- Sandra Liliana Cano Moya, Ingeniera Civil

DIAGRAMACIÓN

- Camilo Buitrago Ulloa
Diseñador Gráfico
camilobuitragoulloa@gmail.com
- Sebastián Uribe Fajardo
Comunicador Social y Periodista
sebastian.uribefajardo@gmail.com

FOTOGRAFÍA

- Portada
CAVOSA Excavación túnel de occidente
Atila Implosiones
Explo Energy

LOS AUTORES

Álvaro de la Cruz Correa Arroyave

Ingeniero de Minas y Metalurgia, Doctor-Ingeniero en Mecánica de Rocas, Especialista en Técnicas de voladuras para obras civiles y militares profesor Universidad Santo Tomás, Escuela de Ingenieros, Bogotá D.C.
alvarocorrea@usantotomas.edu.co
adcorrea@gmail.com

Carlos Agreda

Ph. Fundador Capítulo de la ISEE Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, Presidente IARSD en Perú.
drcarlosagreda@yahoo.ca

Rubén Darío Ochoa Arbeláez

Magíster en Ingeniería civil, Director General, Consejo Profesional Nacional de Ingeniería COPNIA.
rubenochoa@copnia.gov.co

Diego Andrés Rubio Contreras

Ingeniero de Minas, Universidad Francisco de Paula Santander, estudiante de la Especialización en técnicas de voladuras en obras de ingeniería civil y militar ESING.
diegoandresrc@ufps.edu.co

Fabian Enrique Ramírez Pacheco

Ingeniero Químico, Universidad del Atlántico, Supervisor de Perforación y Voladura.
framirez0372@gmail.com

Armando Sugobono

Profesional en Mercadeo
Sandvik Business Line Manager Underground Drilling Equipment
armando.sugobono@sandvik.com

Harry Ward

Ingeniero de Minas, Sandvik Business Line Manager Surface Drilling Equipment.
nasserata@hotmail.com

Hermes Mauricio Alvarado Sáchica

Ingeniero Civil, Máster en Gestión del Riesgo, Mayor (RA), Especialista en Técnicas de voladura, Especialista en Diseño de Vías, Gestor en regulación Técnica e Innovación INVIAS.
halvarado@invias.gov.co

Jefferson González

Mayor del Ejército Nacional, Profesional en Ciencias Militares Escuela Militar de Cadetes José María Córdoba.
jefferson.gonzalezoc@buzonejercito.mil.co

Jhonnathan Stephen Zambrano Parada

Abogado, Especialista en Derecho Minero Energético, Especialista en Derecho del Medio Ambiente, Especialista Tecnológico en Explosivos, Técnico Profesional en Explosivos.
jszp007@gmail.com

John Fernando Rincón Flórez

Ingeniero Industrial, Especialista en Técnicas de voladuras de obras de ingeniería civil y militar y Tecnológica de Explosivos, Docente Escuela de Ingenieros Militares, Bogotá, Colombia.
jfrinconf@gmail.com

Jorge Enrique Fonseca Becerra

Químico, Especialización Técnicas de voladuras de Obras Civiles y Militares ESING, Docente, Escuela de Ingenieros Militares, Bogotá, Colombia.
jorge.fonsecab@esing.edu.co

Jorge Eric Rueda Fonseca

Geólogo Universidad Industrial de Santander, Especialista en Técnicas de voladura en obras de ingeniería civil y militar, ESING.,
jorge.eric.rueda.fonseca@gmail.com



Juan David Moreno Peñuela

Ingeniero civil, Universidad Santo Tomás de Bogotá. Especialista en Técnicas de voladura en obras de ingeniería civil y militar, ESING.

jdmp_28@hotmail.com

Luis Humberto Pinto Morales

Ingeniero Geólogo. Especialista en Geotecnia Vial, Especialista en Perforación y Voladuras de Rocas, con énfasis en el Software JK Simblast, Chile. Especialista en Técnicas de voladuras en obras de ingeniería Civil y Militar, Msc. Ingeniería Geotécnica y Geomecánica aplicada en minería, Perú. Director I. Geosoftmine LTDA, Director Petroblast SAS.

h.pintomorales@gmail.com

petroblast.sas@gmail.com

María Camila Barros Rivera

Ingeniera de Minas, Fundación Universitaria del Área Andina, Ltd.

camilabr2601@gmail.com

María del Carmen Fuentes Fuentes

Ingeniera Geofísica. MSc. Gestión de la industria de los hidrocarburos, Universidad de Viña del Mar, Chile. Profesora asociada. Directora Grupo de Investigación Ingeofísica, Universidad Pedagógica y Tecnológica, Colombia.

Asistente HSE en Drummond

marcaf_geo@yahoo.com

Héctor Javier Alvarado Moreno

Ingeniero civil, coronel (ra), especialista en técnicas de Voladura en obras de ingeniería civil y militar, especialista en gestión ambiental y desarrollo comunitario, docente ESING, UMNG

hjam1968@gmail.com

Mario Ernesto Álvarez Gutiérrez

Ingeniero Civil, Especialista en Docencia Universitaria, Profesor Escuela de Ingenieros Militares.

m.alvarez@esing.edu.co

Nasser Márquez Contreras

Ingeniero de minas, especialista en técnicas de Voladura en obras de ingeniería civil y militar, especialista en pedagogía y docencia, Master en gerencia de proyectos, MBA en Gerencia de empresas, docente de la ESING.

nasserata@hotmail.com

Numas Martin Mendoza Mendoza

Ingeniero de Minas, Fundación Universitaria del Área Andina, supervisor senior en la empresa Drummond Ltd.

numasmendoza@gmail.com

Ricardo Alfonso Mateus Bravo

Geólogo. Especialista Perforación y Voladura CAMIPER. Analista Ingeniería de Voladuras en Carbones del Cerrejón LTD.

ricardo.mateus.b@hotmail.com

Sandra Liliana Cano Moya

Ingeniera civil, Docente Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

sandra.cano@correounivalle.edu.co

Xilena Mojica Rojano

Ingeniera de minas, Supervisor HSEQ en Drummond Ltd.

xile1994@hotmail.com

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PROFESIONALES EN EXPLOSIVOS Y VOLADURAS

QUIÉNES SOMOS

La Asociación es una organización sin ánimo de lucro de ámbito nacional, independiente, no gubernamental, que agrupa a los sectores implicados en todo lo relativo al uso de los Explosivos Industriales y militares, desde su fabricación, almacenamiento, transporte y distribución en los campos de la ingeniería civil, de minas, militar, industrial en voladuras y demoliciones; no persigue fines especulativos y su finalidad es la coordinación, representación, gestión, fomento, capacitación y defensa de los intereses profesionales, empresariales, generales y comunes de sus asociados, atendiendo sus necesidades de información, formación y asesoramiento, y que está dotada de personería jurídica y plena capacidad de obrar para el cumplimiento de sus fines.

La Asociación responde a principios democráticos en su organización y funcionamiento, dentro del marco de la Constitución y del resto del ordenamiento jurídico, garantizando la autonomía y pluralismo de los miembros asociados en sus respectivos ámbitos de interés específico, sin perjuicio del carácter vinculante que tienen los acuerdos adoptados válidamente por los órganos de gobierno de la Asociación en las materias que afecten a ésta y al interés común de sus afiliados.

La Asociación se rige por lo previsto en sus Estatutos y en todas aquellas disposiciones legales que le son de aplicación.

FINES Y COMPETENCIAS

La Asociación, tiene como fin principal, el de promover el uso seguro como herramienta ingenieril de explosivos, sustancias y mercancías peligrosas reguladas por el Estado, análisis de eventos con sustancias explosivas o artefactos explosivos, desarrollando actividades pedagógicas, capacitaciones, investigaciones, asesorías técnicas, acompañamiento profesional, publicaciones, difusión académica, estandarización de procedimientos, consultas técnicas y buenas prácticas. Lo anterior con el fin de promover la mejora en los procesos de manejo y uso de material explosivo de acuerdo con las técnicas modernas de voladura considerando políticas de sostenibilidad enmarcadas por altos estándares de seguridad, gestión del riesgo y seguridad nacional, brindando asesoría a las entidades gubernamentales y privadas, contribuyendo así en la profesionalización del uso de los explosivos, desminado operacional y humanitario; así como el manejo de sustancias y mercancías peligrosas.



Los servicios que en cumplimiento de sus estatutos puede brindar nuestra Asociación, se encuentran explicitados en el Artículo 2. Objeto, el cual se transcribe a continuación:

1. Asociar profesionales que usan los explosivos en Ingeniería Civil, Militar, Minera y Petrolera.
2. Ser gestor de buenas prácticas en manejo de explosivos.
3. Capacitar en temas de explosivos y voladuras.
4. Realizar estudios de caso y emisión de conceptos técnicos donde se usen explosivos.
5. Adelantar procesos de Gestión de Riesgos en proyectos donde se usen explosivos.
6. Organizar y llevar a cabo eventos académicos y gremiales afines con el objeto.
7. Constituirse en un órgano consultor en temas de explosivos y voladuras.
8. Recomendar el uso de nuevas tecnologías.
9. Adelantar procesos de investigación académica y científica.
10. Realizar campañas de publicidad y difusión de nuevos productos explosivos.
11. Construir y emitir manuales, revistas, catálogos, guías y compendios acerca del objeto de la Asociación.
12. Formalizar alianzas estratégicas a nivel nacional e internacional.
13. Apoyar eventos académicos, comerciales y afines con los explosivos y sustancias controladas.
14. Incentivar la pequeña y mediana empresa.
15. Producir análisis de información, estadísticas y recomendaciones, en los asuntos del objeto de la Asociación.
16. Realizar acompañamiento y asesoría a entidades gubernamentales y privadas en la toma de decisiones frente al uso de explosivos como herramienta ingenieril.
17. Realizar peritajes para investigaciones donde se realizan actividades con explosivos.
18. Promover y desarrollar investigaciones y estudios de alternativas que vayan en favor del desarrollo social, con la concertación y participación de la comunidad.
19. Asesorar en actividades de desminado operacional y humanitario.
20. Capacitar, entrenar, certificar conocimientos en el manejo seguro de explosivos comerciales.
21. Participar en todas las demás actividades y finalidades que se refieran a su objeto y que contribuyan a su cumplimiento.

Si su empresa requiere de alguno de los servicios consignados en nuestro objeto, no dude en consultarnos. En la asociación contamos con los especialistas que usted necesita.

Contáctenos

Sitio web: www.acpev.org

E-mail: asociados@acpev.org
dir.acpev@gmail.com

Celular: +57 313 413 3041 - +57 318 557 9738

COMITÉS QUE INTEGRAN LA ASOCIACIÓN

COMITÉ EJECUTIVO

- Héctor Javier Alvarado Moreno
- Miguel Andrés Guevara Nieto
- Joel Alexander González Rivera
- Harry Gabriel Bonilla Medina
- Nixon Andrés González moreno
- Rither Walther Mahecha Torres
- Fernando López Colmenares

COMITÉ DE COMUNICACIONES

- Juan Felipe Lara
- Sara Acosta Bernal
- Álvaro Rojas Higuera
- Keiver David Pérez Anaya
- Elkin David Palacios Rico
- Ricardo Villalobos Fierro
- Luis Javier Simancas Ramírez

COMITÉ DE GESTIÓN DE NEGOCIOS

- Nasser Márquez Contreras
- Yeiner Alexis Mendoza Guerra
- Jaime Mauricio Gutiérrez Mojica
- Andrés Pava Mendoza
- Erika Julieth Beltrán Méndez
- Yesid Leonardo Jácome Lindarte
- Jaime Gonzalo Torres Ojeda

COMITÉ DE GESTIÓN GUBERNAMENTAL

- Hermes Mauricio Alvarado Sáchica
- Numas Martín Mendoza Mendoza
- Zamir Fabian Caicedo Márquez
- Robert Alfonso Carrillo Jiménez
- María Camila Barros Rivera
- Rossbel Eduardo Palencia Bravo
- Paulo Andrés Mera Mosquera
- Jonnathan Stephen Zambrano Parada

COMITÉ DE BÚSQUEDA DE RELACIONES INSTITUCIONALES

- Mario Ernesto Álvarez Gutiérrez
- Cristian Herbey Nossa Calderón
- Adán Gamaliel Torres Tarazona
- Daniela Fragozo Bonilla
- Edison Alejandro Molina Ramírez
- José William Soledad Espíndola

COMITÉ TÉCNICO

- Álvaro de la Cruz Correa Arroyave
- Jorge Eric Rueda Fonseca
- José Luis Barrios Rangel
- Ricardo Mateus Bravo
- Javier Álvaro Rodríguez Ortíz
- Jhonathan Zambrano Parada
- Jaime Mauricio Gutiérrez Mojica
- Pablo Emmanuel Escobar Chavarriaga
- Álvaro Rojas Higuera



SALUDO DEL DIRECTOR GENERAL

Héctor Javier Alvarado Moreno

Para la Asociación Colombiana de Profesionales en Explosivos y Voladuras **ACPEV**, entidad sin ánimo de lucro creada el siete de agosto del año 2020, con el objetivo principal de promover el uso seguro como herramienta ingenieril de los explosivos, las sustancias y las mercancías peligrosas reguladas por el Estado y el análisis de eventos con sustancias explosivas o artefactos explosivos, desarrollando actividades pedagógicas, capacitaciones, investigaciones, asesorías técnicas, acompañamiento profesional, publicaciones, difusión académica, estandarización de procedimientos, consultas técnicas y buenas prácticas, es un gusto dirigirnos a ustedes por este medio.

ACPEV tiene como misión, ser la entidad que represente al gremio en actividades gubernamentales y privadas, donde se requiera su intervención para la formulación de programas, proyectos, eventos, estudios, interventorías, peritazgos y otras actividades relacionadas con el uso de explosivos en todos sus campos, así como el manejo de sustancias peligrosas.

Como Director General, es muy grato presentar la primera edición de nuestra revista "EXPLOSIVOS Y VOLADURAS EDITADA POR ACPEV", medio de comunicación que tiene como propósito crear expectativas principalmente en el público interesado por la ingeniería de los explosivos; este logro ha sido producto del esfuerzo de un grupo de personas que han tenido la intención de organizar y plasmar para el gremio, la academia y el público en general, una compilación de escritos dirigidos principalmente para el sector de la minería, la infraestructura y la ingeniería en general, enfocados en el manejo técnico, ético, seguro y responsable de los explosivos.

La revista está estructurada de tal modo que los lectores con o sin conocimientos técnicos aborden el tema del uso de los explosivos en diferentes ambientes y necesidades siempre utilizando la ciencia y métodos técnicos probados para hacer uso de esta herramienta de corte y fragmentación; así mismo, hemos decidido como estrategia resaltar las principales actividades desarrolladas y proyectadas en nuestra Asociación, algunas novedades que aporten al conocimiento, la investigación y la preparación en esta disciplina.

Aprovecho la oportunidad para agradecer a todos y cada uno de los asociados, autores de artículos, profesionales, tecnólogos y técnicos por ese apoyo demostrado a través de su vinculación y soporte ofrecido para llevar a cabo la conformación de un equipo, que no tiene otra intención diferente a la de aportar conocimientos, experiencias y avances con el propósito de trabajar por esta labor, para fortalecer, profesionalizar y fomentar el empleo seguro y económico de los explosivos en Colombia, orientándolo a las buenas prácticas, el respeto por el ambiente, la sostenibilidad y la sana competencia dentro de sus especialidades.

EDITORIAL

Comité Técnico ACPEV

Para ACPEV es muy grato poner en sus manos la primera revista técnica que recoge las últimas experiencias que se han tenido en el país sobre la temática de los explosivos y las voladuras, en todos los escenarios donde ellos se vienen practicando tanto a cielo abierto como subterráneo y en todo tipo de obras, mineras, civiles y militares. Con el decidido apoyo del Comité Técnico de ACPEV que trabajó arduamente para que este sueño fuera realidad, hoy lo estamos cumpliendo al entregar una revista de calidad incomparable, con estándares internacionales, reconocimiento nacional y debidamente inscrita en la Biblioteca Nacional de Colombia bajo la denominación ISSN 2746-2476 del 10 de junio de 2021

Cabe recordar que desde su fundación, la Asociación Colombiana de Profesionales en Explosivos y Voladuras viene realizando ingentes esfuerzos por aglutinar al gremio de profesionales que se desenvuelven en estos campos y que día a día adquieren más experiencia la cual desean compartir para convertirla en un multiplicador de las buenas prácticas que debe caracterizar esta actividad, la que cada día deja de ser una práctica rudimentaria, soportada en los errores y en los malos manejos a una técnica basada en principios científicos del conocimiento de las características de la roca intacta, del macizo rocoso, del explosivo y de la comprensión del proceso de la fragmentación.

Ya van quedando atrás las reglas de dedo que por mucho tiempo hizo carrera en nuestro medio, al igual que aquellas en las que se debía acudir a tablas referenciadas en la bibliografía internacional para caracterizar nuestras rocas y nuestros macizos a falta del conocimiento que deberíamos tener de las nuestras, porque no existieran en sus momentos laboratorios idóneos para su caracterización, o porque simplemente considerábamos que era

innecesario. Hoy día no solo existen los laboratorios sino igualmente los centros de capacitación que con idoneidad y regularidad vienen adiestrando a coterráneos y foráneos en el correcto manejo de las sustancias explosivas, haciendo hincapié en los conocimientos que la química de los explosivos, la mecánica del medio continuo y discontinuo, la geomecánica y en general la geotecnia vienen aportando al conocimiento de nuestros macizos. A propósito, conviene recordar que los explosivos son compuestos químicos conformados por sustancias combustibles y oxidantes, que por medio de reacciones de óxido-reducción son capaces de transformarse en productos gaseosos, moviéndose a velocidades entre los 2.000 y más de 7.000 m/s, llegando a ocupar hasta 10.000 veces su volumen inicial, generando temperaturas que alcanzan de los 1.550 hasta los 4.000 °C, desarrollando presiones entre los 2 y los 10 GPa y generando un tren de ondas sísmicas que se repiten con un movimiento ondulatorio que se replica por toda la masa explosiva semejando un micro temblor. (López Jimeno Carlos). Aquí vale la pena recordar que 0,5 kg de explosivo generan una liberación de energía del orden de los 630.000 ergios, equivalente a un terremoto de magnitud 0, y que 500 kg, desprenden 630*10⁹ ergios, lo que corresponde a un sismo de magnitud 4 (Tarbuck y Lutgens, Ciencias de la Tierra, 1999).

No debe olvidarse, tampoco, que el trabajo con explosivos debe cumplir una serie de cuidados, por lo que el mismo debe ser realizado por personal certificado, empleando siempre los protocolos y las medidas de seguridad, con el fin de evitar cualquier tipo de accidentes los cuales pueden llegar a ser catastróficos; así mismo no se debe caer en la rutina y especialmente en la confianza. Los accidentes con explosivos en las voladuras son más severos que los demás accidentes que se



EDITORIAL

Comité Técnico ACPEV

suceden en los frentes de trabajo; la detonación de explosivos libera grandes niveles de energía, por lo que cualquier error u omisión por mínimo que sea traerá consecuencias fatales. Se advierte que la mejor manera de evitar estos accidentes es la capacitación permanente del personal que labora con estas sustancias, ya que los trabajadores en todos sus niveles deben conocer los riesgos y procedimientos a realizar en caso de alguna eventualidad. Recuerde que cuando se trabaja con explosivos, “El primer error puede ser el último”.

Finalmente, en la revista que estamos compartiendo se presentan 16 artículos de los que se puede deducir algunos de los avances más significativos en el campo de la utilización de los explosivos, siempre buscando la racionalización de los mismos mediante diseños más eficientes que tengan en cuenta las propiedades de las rocas y los macizos rocosos a intervenir, pero controlando a su vez los efectos nocivos que tal práctica puede acarrear como vibraciones, ruido, material particulado y cortes inestables en el macizo.

Hemos organizado los artículos de tal forma que inicialmente se presentan aquellos relacionados con las voladuras a cielo abierto, seguidos de los dedicados a las voladuras subterráneas; posteriormente vienen aquellos alusivos a aspectos generales en el manejo de los explosivos, para finalmente dedicar una sección al reconocimiento de algunos de los miembros de la Asociación y personalidades que sin pertenecer a ella se han destacado en el país en el manejo de los explosivos y las voladuras haciendo un aporte significativo en la búsqueda de su utilización en el campo de la producción, la docencia, la difusión del conocimiento o en la práctica cotidiana.

Esperando que la calidad de los mismos cumpla con las expectativas del lector más exigente.



Álvaro de la Cruz Correa Arroyave
Ing. de Minas y Metalurgia

ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE CÁMARAS DE AIRE EN LOS PROCESOS DE VOLADURA EN MINERÍA A CIELO ABIERTO

Nasser Márquez Contreras

RESUMEN

Uno de los principales objetivos de las voladuras es generar una adecuada fragmentación de la roca al menor costo; para ello, es indispensable optimizar el aprovechamiento de la energía a través de diseños y mecanismos que permitan que la energía explosiva sea invertida para tal fin, y no se disipe en gran magnitud en forma de ruido, vibraciones y sobrepresión de aire. Desde finales del siglo XIX aparecieron las cámaras de aire, como una alternativa capaz de lograr mejoras significativas en la distribución de la energía en el interior del macizo, posibilitando excelentes resultados de fragmentación de roca con un menor consumo de explosivos y disminuyendo la sobreperforación. En este artículo se plantea el análisis de diferentes escenarios, con el fin de evaluar la efectividad de la implementación de cámaras de aire en el desarrollo de voladuras en minería a cielo abierto metalífera (oro, plata, cobre, etc.), carbón, caliza y materiales para la construcción.

Palabras claves: cámaras de aire, accesorios, voladura, ondas, fragmentación, minería.

ABSTRACT

One of the main objectives of blasting is to generate an adequate fragmentation of the rock at the lowest cost; for this, is essential to optimize the use of energy through designs and mechanisms that allow the explosive energy to be applied for this purpose, and not dissipates greatly in form of noise, vibrations and air overpressure. At the end of the 19th century, air decks appeared as an alternative capable of achieving significant improvements in the distribution of energy inside the massif, enabling excellent rock fragmentation results with less explosives consumption and reducing overdrilling. This article presents the analysis of different scenarios, in order to evaluate the effectiveness of the implementation of air decks in the development of blasting in metalliferous open pit mining (gold, silver, copper, etc.), coal, limestone and materials for construction.

Keywords: air deck, accessories, blasting, waves, fragmentation, mining.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de los procesos de voladura intervienen múltiples variables que son fundamentales para lograr resultados óptimos de fragmentación de la roca, como la litología, el patrón de perforación, el diseño de cargue, los agentes de voladura, la secuencia de encendido de las voladuras, los accesorios de voladuras disponibles, etc. Es indispensable realizar un control estricto sobre cada una de estas variables para alcanzar el éxito en este proceso; para esto se hace necesario ejercer lo que se conoce como la gerencia en la supervisión, la cual consiste en poner en práctica los conocimientos y competencias adquiridas durante la formación del especialista, sumado al esfuerzo que se requiere para conseguir la meta, y considerando que la actitud constituye el factor más importante para triunfar sobre cualquier objetivo propuesto. Este artículo se centra primordialmente en los diseños de cargue utilizando cámaras de aire, los cuales pueden ser aplicados en minería a cielo abierto metalífera (oro, plata, cobre, etc.),

carbón, caliza y materiales para la construcción, con el fin de evaluar la efectividad de las mismas en el mejoramiento de la fragmentación de la roca y/o mineral en el desarrollo de voladuras.

2. METODOLOGÍA

Para conocer la efectividad de las cámaras de aire en los diseños de cargue, se planteó el desarrollo de diversos ensayos. En primera instancia, se realizó una caracterización del macizo rocoso donde éstas se llevarían a cabo, encontrándose en mayor medida estratos de roca conformados por arcillolitas, areniscas y limolitas. En segunda instancia, se seleccionaron 3 tipos de accesorios de voladura que serían utilizados para la creación de las cámaras de aire en el interior de los barrenos. Estos accesorios son denominados en la industria como: a) Balón de aire, b) Paraplug® y c) Taponex, y se encuentran representados respectivamente en la Figura 1 [1]–[5]. Posteriormente, se definieron las voladuras espejos como mecanismo de evaluación de los ensayos, con el fin de comparar los resultados de las voladuras obtenidos a través de diseños de cargue de barrenos convencionales y mediante la implementación de estas cámaras de aire.

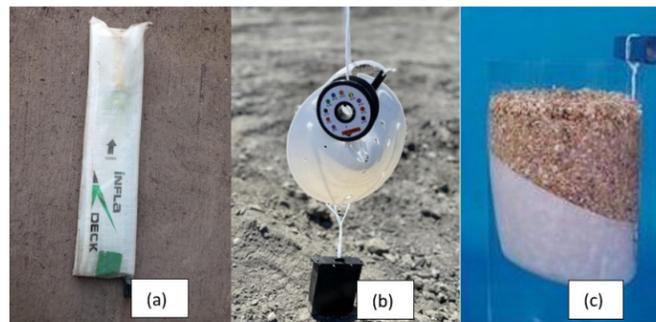


Figura 1. Accesorios para cámaras de aire (a) Balón de aire, (b) Paraplug® y (c) Taponex.

Se establecieron 4 tipos de escenarios para la ejecución de los ensayos, realizando un seguimiento riguroso de los parámetros de cargue, evaluando para cada uno los resultados de la fragmentación, la proyección de roca durante la detonación y el factor económico asociado al ahorro de explosivos [3].

3. RESULTADOS

La aplicación de las cámaras de aire aportó mejoras significativas en los resultados de las voladuras, alcanzando un mayor aprovechamiento de la energía explosiva y una mejor distribución de la presión de

detonación de los explosivos a través del macizo rocoso. El diseño de cargue con cámaras de aire permitió una reducción de la cantidad de material utilizado para el taco y un ahorro económico al no ser necesaria la sobreperforación para lograr el nivel deseado en el arranque del material en la voladura y una menor cantidad de explosivos requeridos en el cargue de los barrenos. En la Figura 2 se presenta el diseño de cargue con cámaras de aire utilizado en los ensayos.

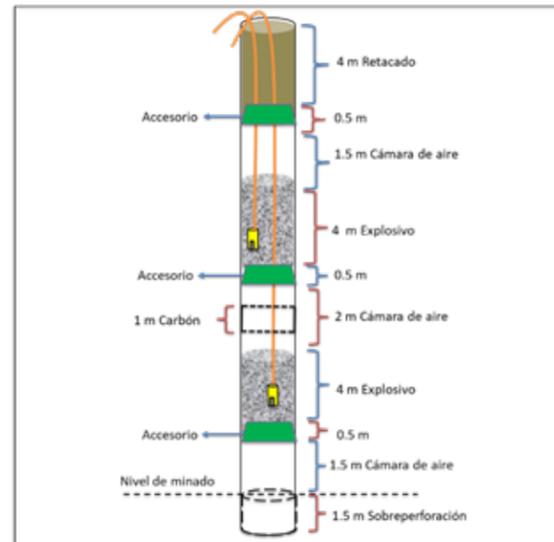


Figura 2. Diseño de cargue con cámaras de aire.

Es importante destacar, que la presencia de cámaras de aire en los barrenos favorece la interacción de ondas en el interior del macizo rocoso, teniendo en cuenta que las ondas de compresión que son generadas al momento de la detonación son convertidas en ondas de tensión al ser reflejadas cuando se presenta un cambio de medio, esto a su vez permite que existan múltiples interacciones entre las ondas de tensión con las ondas de compresión provenientes de la fuente energética en los diferentes barrenos, tal como se observa en la Figura 3.

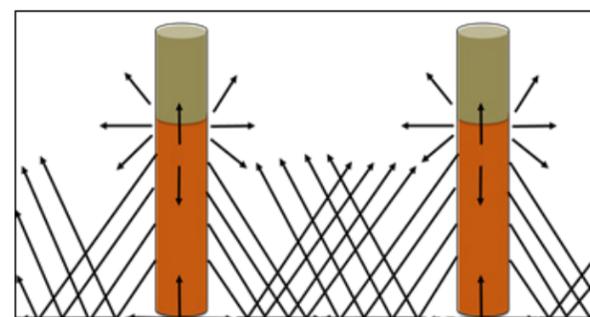


Figura 3. Interacción de barrenos con cámara de aire.

En la Tabla 1, se presenta la relación de ahorro de explosivos para cada uno de los escenarios que fueron evaluados. Como se puede evidenciar, existe un mayor ahorro de explosivo de acuerdo al porcentaje de uso de cámaras de aire utilizados en las voladuras. Por tanto, se obtuvo que al utilizar cámaras de aire en el 100% de los barrenos que conformaban el área de la voladura, se logró un ahorro de 14,3% en el consumo de emulsión y ANFO, como agentes de voladura.

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Número de barrenos	124	254	314	300
Barrenos con cámaras de aire	0	101	254	300
Barrenos con cámaras de aire (%)	0	40	81	100
Factor de carga (kg/m^3)	0,79	0,72	0,68	0,64
Consumo de Emulsión / ANFO con cámaras de aire (Kg)	39,441	82,132	92,813	86,823
Consumo Emulsión / ANFO sin cámaras de Aire (Kg)	39,441	86,984	105,015	101,311
Ahorro de Emulsión / ANFO (%)	0,00	5,58	11,62	14,30

Tabla 1. Escenarios evaluados en los ensayos realizados.

En la Figura 4, se presentan los resultados de una voladura convencional comparada con los resultados de una voladura con cámaras de aire. Indudablemente el efecto del accesorio favoreció en la mejora de la fragmentación y la disminución de la proyección de roca. Adicionalmente, no se generó una afectación del mineral de interés y la productividad de los equipos de cargue fue mayor.



Figura 4. Voladura convencional (Superior) / Voladura con cámaras de aire (Inferior).

4. CONCLUSIONES

La implementación de cámaras de aire en los diseños de cargue de barrenos arrojó beneficios importantes en las voladuras, teniendo en cuenta que se logró un mayor aprovechamiento de la energía reflejado en el mejoramiento de la fragmentación de la roca y la disminución de los niveles de vibración, ondas de aire y proyección de roca. Por otro lado, se logró una reducción en los costos de la operación asociado a la disminución en la sobreperforación y el consumo de explosivos. Otro de los grandes beneficios que aportaron las cámaras de aire fue la protección del mineral de interés o carbón, cuando se ejecutan las voladuras bajo manto, y la protección de los agentes de voladura frente a la contaminación, cuando se utiliza material inerte como separador o taco. Es importante destacar que con el uso de las cámaras de aire se reduce la cantidad de material inerte requerido como taco y se obtiene un mayor aprovechamiento de la velocidad de detonación (VOD).

REFERENCIAS

- [1] CENERG (2020), "Cenerg Global Tools, Infladeck blast hole plugs". [Online]. Available: http://www.cenerg.us/docs/infladeck_presentation.pdf.
- [2] ENAEX (2020), "TAPONEX - Accesorio para crear voladura tensional." p. 916.
- [3] N. Márquez Contreras (2021), Fundamentos técnicos y prácticos de voladuras en minas de carbón a cielo abierto.
- [4] Paraplug® (2019), "Drill hole blasting plugs". [Online]. Available: <https://www.paraplug.com/index.html>.
- [5] TAPONEX (2020), "Sistemas de voladura con cámaras de aire". [Online]. Available: <http://taponex.com/Default48d8.html?tabid=86>.

HACEMOS DE LA MINERÍA UN NEGOCIO MÁS RENTABLE

VOLADURAS DE CONTORNO EN MINERÍA DE CARBÓN A CIELO ABIERTO

Ricardo Alfonso Mateus Bravo

RESUMEN

La implementación adecuada de voladuras de contorno tiene un papel muy importante en la minería de carbón a cielo abierto. Trae diversos beneficios en la estabilidad de taludes, en seguridad de personas y equipos, en optimización de ángulos de las paredes, en el aseguramiento de reservas, en la calidad de la fragmentación y bajo impacto en dilución del carbón. Se han implementado voladuras tipo 70G o 60G dependiendo del ángulo buscado de pared y una tercera llamada de Contorno Footwall. Cada depósito minero es particular, lo que les permite a las diferentes empresas crear su propio ciclo PHVA como herramienta para mejorar sus procesos de manera continua. De igual forma es conveniente establecer estándares y procedimientos que le ayuden a ser consistentes en la planeación, ejecución y minado de todas las diferentes voladuras.

Algunas etapas o pasos para llevar a cabo las voladuras de contorno pueden incluir: un plan semanal de perforación y voladura, la conformación de polígonos de voladura, generación de líneas de precorte, buffer y productivos, un sistema de autorizaciones de voladura, la elaboración del diseño de la perforación para voladura, la aprobación del talud superior por geotecnia, el montaje del archivo AQM de perforación al servidor, la interpretación geológica y diseño de cargue, el cargue de barrenos, el diseño de la secuencia de disparo, el disparo de la voladura, la inspección postvoladura, la señalización de los límites, el minado de estéril y carbón hasta el límite temporal, el perfilado de la pared, el sellado de mantos y la ejecución de drenes horizontales.

ABSTRACT

The proper implementation of contour blasting plays an important role in open pit coal mining. It brings several benefits in slope stability, safety of people and equipment, wall angle optimization, reserve assurance, fragmentation quality and low impact on coal dilution. Blasting type 70G or 60G has been implemented depending on the desired wall angle and a third one called Footwall Contour. Each mining deposit is, which allows the different companies to create their own PHVA cycle as a tool to improve their processes continuously. It is also convenient to establish standards and procedures that help to be consistent in the planning, execution, and mining of all the different blasting operations.

Some stages or steps to carry out contour blasting may include: a weekly drill and blast plan, the conformation of blast polygons, generation of presplit, buffer and productive lines, a blast authorization system, elaboration of the blast drill design, the approval of the top slope by the Geotechnics Area, uploading the drill aqm file to the server, geological interpretation and loading design, well loading, firing sequence design, blast firing, post-blast inspection, boundary marking, tailings and coal mining up to temporary limit, wall profiling, sealing of seams and execution of horizontal drains.

Menos ruido y vibraciones

Mejora la fragmentación

Disminución de sobre-perforación

Ahorro de explosivo

Eliminación de fly-rocks

TAPONES IDEALES PARA CREAR
CÁMARAS DE AIRE EN
POZOS DE VOLADURA



CONTACTO:

TEL: +57 3178713601 / 3006144095

E-MAIL: manuel.estevezp@gmail.com / aestevezb5@gmail.com



WWW.IMZCOLOMBIA.COM



1. INTRODUCCIÓN

La pequeña y gran minería requieren llevar a cabo procesos que les permitan explotar de manera segura los recursos dentro de sus planes de largo y corto plazo. En la consecución de este objetivo, las voladuras de contorno juegan un papel importante, ya que ayudan a cumplir el diseño geométrico del tajo, y a disminuir el impacto negativo por vibración de los taludes del tajo en la minería a cielo abierto.

Para efectos de este artículo, se definirá una voladura de contorno (VC) como aquella que limita o define las paredes de los tajos, sean permanentes o temporales y que debe desarrollarse de manera más controlada. Se pueden efectuar en las paredes altas (highwalls, HW), paredes de avance (endwalls, EW) o en paredes bajas (footwalls, FW). Se pretende mostrar algunas prácticas y controles para ejecutar este tipo de voladura y procesos anexos, lo que permite mejorar en buena medida la calidad de sus paredes, facilitar un trabajo más seguro para trabajadores y equipos, así como recuperar tonelajes de carbón previstos.

Para la ejecución exitosa de estas voladuras intervienen de manera coordinada diversas áreas como programación minera, perforación & voladura, estándares operacionales, minería, geotecnia, manejo de aguas, topografía, entre otras.

2. CLASES IMPLEMENTADAS

Voladuras de Contorno FW [1]: están ubicadas en las paredes bajas, contienen solo barrenos productivos, sin barrenos de precorte ni buffer. En ellas no se carga por debajo del manto definido como FW y la inclinación del talud lo define el ángulo de buzamiento.

Voladuras 70G y 60G [1]: indican el ángulo aproximado de pared planeado conformar, llevan precorte, fila buffer y barrenos productivos. En las de 70G se hace precorte inclinado cuya boca de barreno coincide con el límite de minería; puede descender hasta 40 m continuos de talud y luego se deja un corredor de estabilidad de 20 o más m (configuración 40x20). La fila buffer va paralela al precorte a unos 7 u 8 m.

Las voladuras de 60G, se realizan en paredes definitivas con configuración 10x10 (10 m de talud y 10 de corredor) en rocas de baja calidad geomecánica; también en paredes de avances temporales o definitivas, generalmente en configuración 20x10. Se realizan precortes verticales a 6 m del límite de minería.

A manera de contexto se muestra un proceso general de minería, destacando el rol del Plan Integral de Minería (PIM) [2] que sirve de eje ya que reúne en un documento la programación de actividades para explotar de manera exitosa el estéril y el carbón, Figura 1.

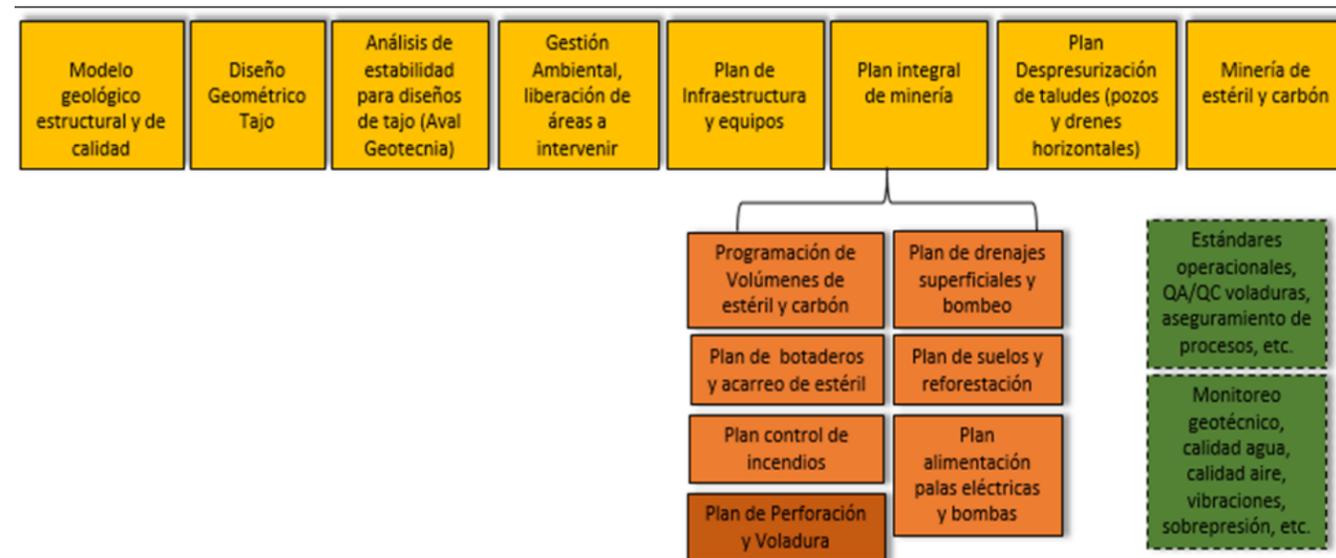


Figura 1. Esquema del Proceso General de Minería.

Ciclo PHVA – Voladuras de contorno en HW, EW y FW

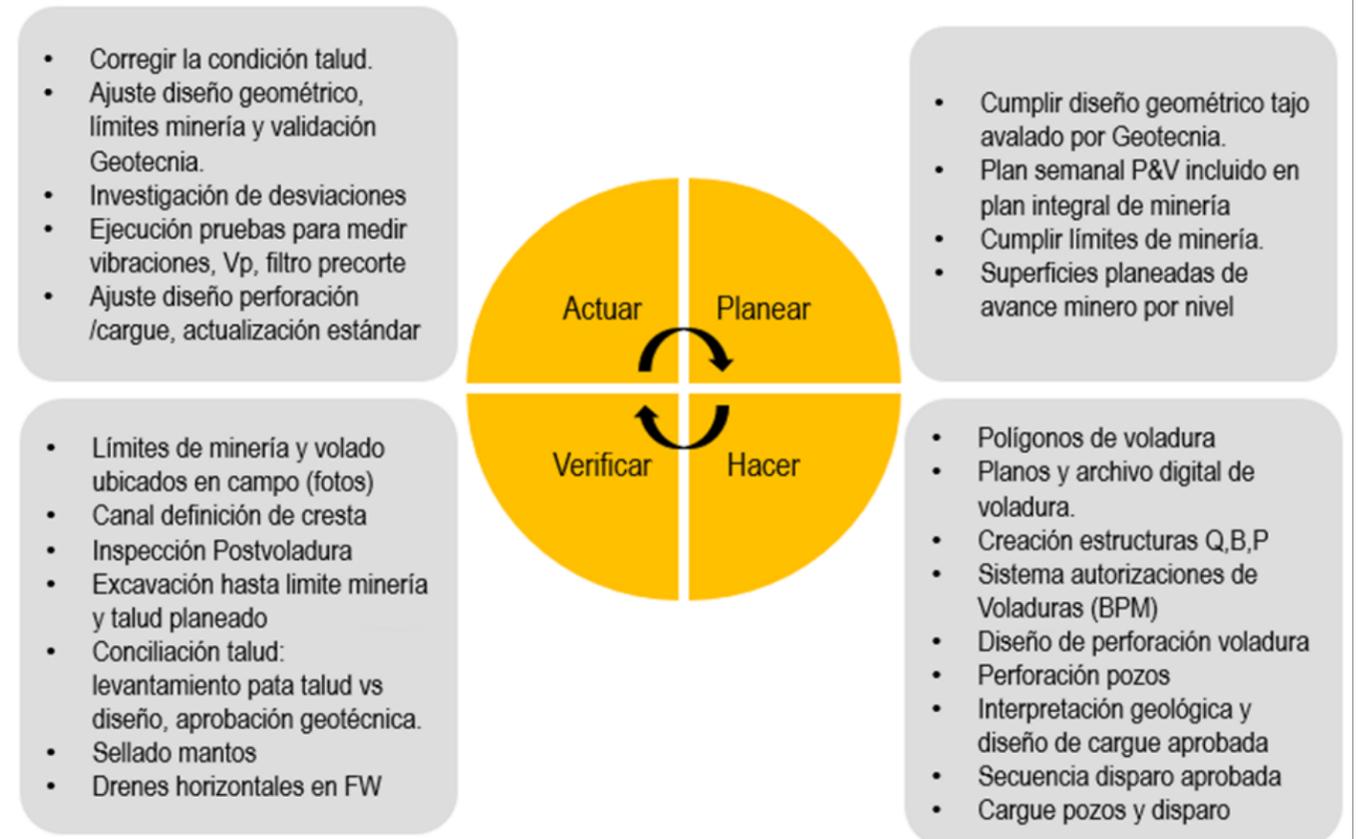


Figura 2. Ciclo PHVA de VC.

3. BENEFICIOS

La planeación y ejecución controlada de las VCs contribuyen en:

Estabilidad de taludes: las VCs se diseñan en perforación, cargue y secuencia de disparo, buscando minimizar el impacto por vibración en las paredes de los tajos.

Seguridad: al tener taludes más estables, personas y equipos pueden trabajar cerca de los mismos con menor riesgo de accidentes por derrumbes o desprendimientos de material.

Optimización de ángulos: el cumplimiento de estándares y procedimientos establecidos para la planeación, ejecución de voladuras y su excavación, permite cumplir con los diseños geométricos y límites mineros establecidos. Esto ha permitido conseguir ángulos generales de tajo mayores a los obtenidos anteriormente.

Aseguramiento de reservas: cumpliendo con los ángulos de taludes y anchos de corredores planeados, permite alcanzar las profundidades planeadas extrayendo las reservas contempladas en los diseños geométricos de tajos. Igualmente, paredes más sanas han permitido disminuir pérdidas por auto combustión del carbón en HW y EW.

Calidad de la fragmentación y bajo impacto en dilución del carbón: las voladuras son perforadas con ayuda de GPS para mayor precisión de la ubicación de barrenos diseñados y buena distribución de la energía del agente explosivo. Con registros gamma se ubica la posición de los mantos y se diseña el cargue por encima y bajo manto.

Como herramienta de un sistema de gestión de calidad de las voladuras se puede diseñar un ciclo PHVA [3], Figura 2.

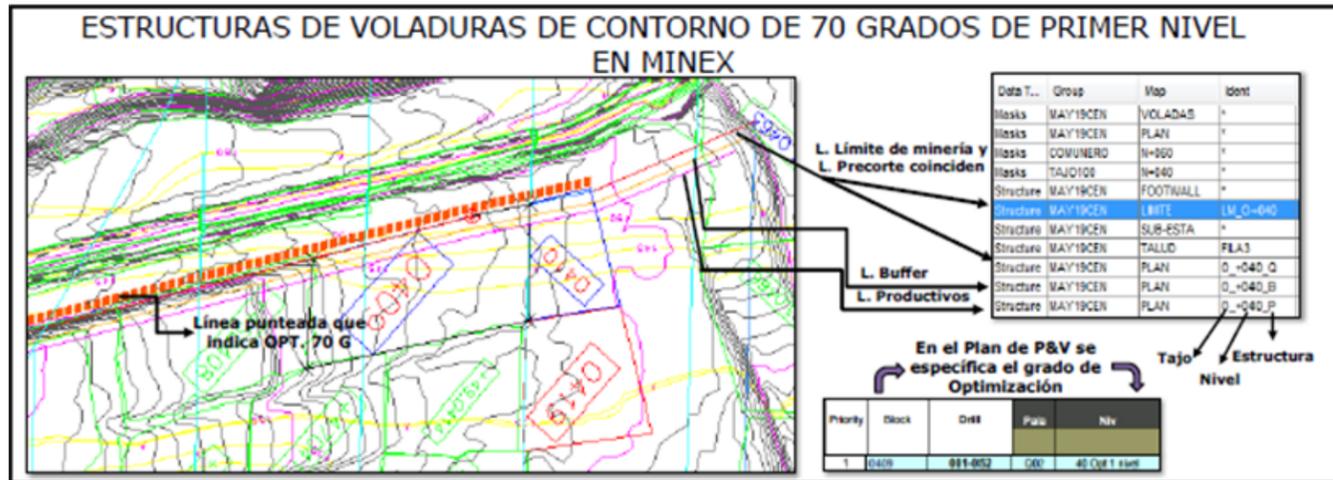


Figura 3. Página de la Guía de especificaciones de voladura de contorno

Algunas acciones y controles que permiten asegurar la calidad de la voladura y excavación posterior:

- Plan semanal de perforación y voladura (P&V): es acordado con clientes internos y externos al departamento. Contiene las voladuras a perforar y volar en la semana en curso, características, orden de ejecución, taladro asignado y fecha de disparo.
- Polígonos de voladura: en su configuración se tiene en cuenta el plan de avance minero, geometría del tajo, límites de minería, afloramiento de mantos, espacio liberado por palas en nivel superior, entre otros.
- Generación de estructuras o líneas Q (precorte), B (buffer) y P (productivos): su construcción parte del límite de minería y, varía según el tipo de voladura de contorno 70G, o 60G. La configuración de estas estructuras está definida según dominios geotécnicos establecidos para la mina y consignado en la Guía de especificaciones de voladuras de contorno [1], Figura 3.
- Autorizaciones de voladuras Business Process Management (BPM): es una herramienta para trazabilidad de las voladuras, donde existen unos usuarios con unos perfiles de validación de la información. En ella se diligencian: características de la voladura y validación del talud por geotecnia, igualmente se adjuntan archivos de perforación y cargue, autorización para cargar AQM a taladros y entrega de perfiles, etc.
- Diseño de perforación de voladura: para este se utiliza el polígono planeado, la guía de patrones, el modelo geológico, la superficie planeada de pala, la superficie del terreno y las líneas Q, B, P. Se genera

la plantilla con el diseño de la perforación, Figura 4, y el archivo en formato AQM con coordenadas y cota objetivo a perforar de cada barreno. La validación del analista pasa por una lista de chequeo y diligenciamiento en el BPM.



Figura 4. Plantilla diseño perforación de una voladura.

- Aprobación del talud superior por geotecnia: para liberar el diseño de perforación de una VC planeada, se requiere el aval de las condiciones del talud superior. Este debe cumplir con el ángulo planeado y las condiciones de seguridad, para lo cual se hace una conciliación de la pata excavada vs la planeada y una inspección al área por parte de geotecnia; luego se diligencia en el sistema BPM, Figura 5.
- Subir archivo AQM al servidor: el archivo se carga solo cuando el supervisor de perforación recibe conforme el área a perforar, arreglada por minería.

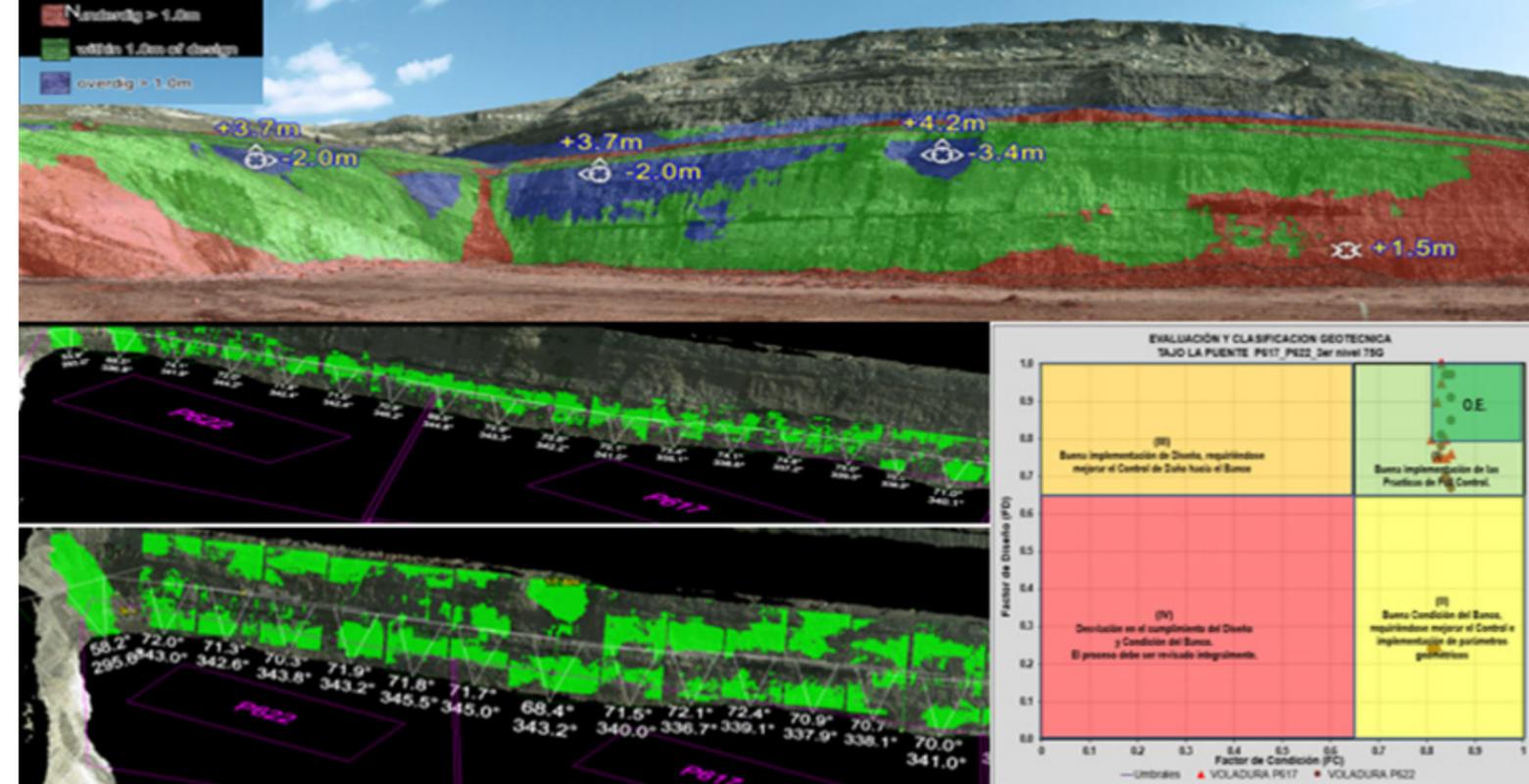


Figura 5. Conciliación geotécnica de un talud de 30 m con ayuda de escáner.

- Interpretación geológica y diseño de cargue: primero se leen los registros geofísicos, luego la interpretación geológica identificando techo y piso de mantos. Posteriormente, se hace el diseño del cargue generando un perfil para cada fila. Los diseños son validados y se da visto bueno en BPM para enviar a campo, Figura 6.

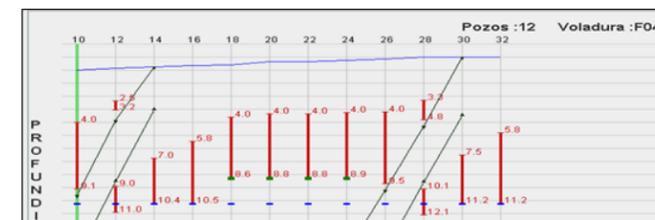


Figura 6. Perfil típico de una fila de cargue, con dos mantos de carbón.

- Cargue de barrenos: el líder de voladura en campo ejecuta los diseños de cargue. Cuando algunos barrenos no cumplen la profundidad tolerada vs el diseño, estos se reperfuran. El grupo QA/QC hace inspecciones en campo, verificando cumplimiento de perforaciones y cargue.
- Diseño de secuencia de disparo: el proveedor de detonadores hace el diseño siguiendo el estándar de diseño de secuencia de disparo establecido [4]. El analista solicita modificación cuando hay oportunidad de minimizar vibraciones en el macizo y afectación del carbón; luego envía el correo con la secuencia aprobada, Figura 7.

- Disparo: el día del disparo del tajo respectivo, se comunica vía correo, chat y radio, el sitio y hora de reunión, se asignan las responsabilidades siguiendo el protocolo bloqueo, evacuación y disparo (BED) y se define la hora de disparo. Igualmente, topografía levanta el perímetro de voladuras programadas a disparar.
- Inspección postvoladura: el grupo de QA/QC visita el área de voladuras disparadas, observa la fragmentación y la condición de los mantos. Si encuentra desviaciones relevantes en algún sector, toma sus coordenadas y genera un reporte para investigación del caso.

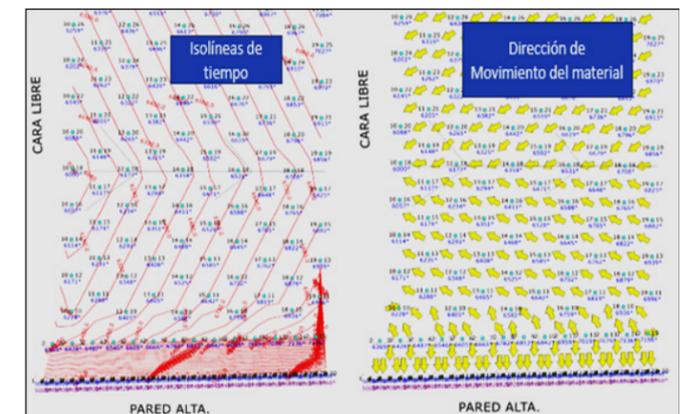


Figura 7. Ejemplo secuencia de disparo de una voladura 70G con precorte, buffer y productivos.

- Señalización de los límites: luego del disparo se ubican estacas con cinta amarilla para límite de minería, con cinta blanca-amarilla para el límite temporal de la pala frontal y con cinta roja para el perímetro volado, Figura 8.



Figura 8. Demarcación de límite de minería y límite de avance con pala frontal.

- Minado de estéril y carbón hasta límite temporal: con el fin de proteger el talud definitivo, la pala frontal solo avanza hasta el límite temporal (cinta blanco amarillo) ubicada unos metros antes del límite de minería.
- Perfilado de pared: con retroexcavadora se avanza hasta el límite de minería, buscando cumplir el ángulo de talud planeado. En los precortes de 70G se busca medias cañas, Figuras 9 y 10.



Figura 9. Retroexcavadora perfilando talud.



Figura 10. Vista general de un talud de 30 m ya perfilado.

- Sellado de mantos: en taludes definitivos o que vayan a durar varios meses, los mantos expuestos se impregnan con líquido especial con el fin de disminuir la posibilidad de auto combustión, que a futuro puede generar inestabilidad.
- Drenes horizontales: son barrenos perforados de más de 100 m de longitud en las paredes bajas

y programados por el área de hidrogeología/geotecnia. Su finalidad es drenar aguas subterráneas para disminuir la presión de poros y mantenerla dentro de los límites permitidos para una buena estabilidad del talud.

4. CONCLUSIONES

- Las voladuras de contorno y todo el proceso asociado desde la planeación hasta la excavación, tienen éxito en la medida que se cumplan los criterios de aceptación, verificación y niveles de aprobación.
- Las VC requieren de más tiempo para ser liberadas para perforación que las voladuras de producción convencional, especialmente si tienen taludes asociados, por lo que debe existir muy buena coordinación para que fluyan todas las revisiones y aprobaciones, y no se convierta en cuello de botella para la minería.
- La buena aplicación de procedimientos, guías y estándares facilita la ejecución, seguimiento y control, tanto en oficina como en campo.
- La tecnología, las comunicaciones y el software apropiado en geotecnia, diseño de voladura, topografía y monitoreo ambiental, son herramientas muy importantes para la ejecución y control de VC.
- El proceso expuesto es un ejemplo de lo que se puede implementar, pero cada mina puede construir su propio proceso para lograr los objetivos de recuperación de toneladas previstos, con seguridad para personal y equipos.
- Una caracterización geomecánica más detallada de las rocas, el empleo de simulaciones con softwares especializados, el monitoreo de vibraciones y la ejecución de pruebas piloto, permiten contribuir con el objetivo de ir mejorando el diseño de la perforación, el diseño de cargue y la secuencia de disparo de las voladuras de contorno.

REFERENCIAS

- [1] Departamento de Servicios Técnicos, Cerrejón. (2020). Guía de Especificaciones de Diseño de Voladuras de Contorno (Segunda Versión). Albania, La Guajira.
- [2] Departamento de Servicios Técnicos, Cerrejón. (2021). Plan Integral de Minería (PIM). Albania, La Guajira.
- [3] American Society for Quality (ASQ). (2021). What is the plan-do-check-act (PDCA) cycle? <https://asq.org/quality-resources/pdca-cycle>
- [4] Departamento de Servicios Técnicos, Cerrejón. (2019). Estándar de Diseño de Secuencia para Disparo de Voladura. Albania, La Guajira.

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE DETONADORES ELECTRÓNICOS EN EL PROCESO DE PERFORACIÓN Y VOLADURA EN MINERÍA A CIELO ABIERTO

Xilena Mojica Rojano

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo la evaluación de la viabilidad de la implementación de detonadores electrónicos en el proceso de perforación y voladura en minería a cielo abierto, con la finalidad de poder disminuir costos de operación, mejorar la fragmentación del material, disminuir vibraciones al momento de la realización de las voladuras, así como otros beneficios que se ven reflejados en otro ciclo del proceso productivo de las compañías. Para el desarrollo del mismo se realizaron aproximadamente veinticinco voladuras de las cuales seis fueron espejo (mitad detonadores electrónicos y la otra mitad detonadores exeles), obteniendo como resultado voladuras con fragmentación de tamaños muy finos, las cuales permitieron optimizar el ciclo de acarreo en minería, se redujeron significativamente las vibraciones por onda de voladuras, se obtuvieron paredes finales más acordes con los diseños, menores costos en la operación y un ahorro del 4% en todo el proceso de voladuras, con la implementación de los detonadores electrónicos. Se concluyó que la implementación de los detonadores electrónicos Ikon-II en minería de tajo abierto son viables ya que estos son capaces de optimizar la operación y generar muchos beneficios a este importante proceso dentro del ciclo de extracción de mineral.

Palabras claves: Voladura, Detonadores, Minería, Optimización, Perforación.

CONTENIDO

En muchas compañías a nivel mundial de minería a cielo abierto se vienen utilizando los detonadores pirotécnicos (Exel) hace muchos años; en este proceso de perforación y voladuras se tienen inconvenientes con algunos indicadores de productividad como: fragmentación de roca, proyección de roca, inseguridad, barrenos fallidos, improductividad de equipo, entre otros factores. Con el fin de mejorar en estos aspectos mencionados anteriormente se decide emplear este estudio de viabilidad de implementación de detonadores electrónicos y así poder determinar si es viable su ejecución en los procesos de perforación y voladura en minería a cielo abierto.

ABSTRACT

The main objective of this study was to evaluate the feasibility of implementing electronic detonators in the process of drilling and blasting in open pit mining, to reduce operating costs, improve the fragmentation of the material, reduce vibrations at the time of blasting, as well as other benefits that are reflected in another cycle of the production process of the companies. For the development of the same, approximately twenty-five blasting operations were carried out, of which six were mirror blasting (half electronic detonators and the other half exeles detonators), obtaining as a result blasting operations with fragmentation of very fine sizes, which optimized the hauling cycle in mining, significantly reduced vibrations by blasting wave, care of final walls, lower costs in the operation, and a savings of 4% in the entire blasting process with the implementation of electronic detonators. It was concluded that the implementation of Ikon-II electronic detonators in open pit mining is viable since they can optimize the operation and generate many benefits to this important process within the mineral extraction cycle.

METODOLOGÍA

Se define la Investigación de Enfoque Mixta como la representante de un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación que implican la recolección y el análisis de datos cuantitativos y cualitativos, así como su integración y discusión conjunta, para realizar inferencias producto de toda la información recabada y lograr un mayor entendimiento del fenómeno bajo estudio. (Sampieri, 2014). En el desarrollo de este proyecto se realiza un plan de consumo de los detonadores electrónicos donde fue necesario tener en cuenta aspectos como patrones de voladura, mantos de implementación, equipo de perforación, tipo de explosivos, geología de los bloques de las minas, etc. Entre otros aspectos se determinará cuáles son los mantos aptos para realizar las voladuras con detonadores electrónicos, patrón de ampliación, profundidades de mantos donde se utilizarán las pruebas, y para qué durezas de mantos. De acuerdo con lo anterior, se pondrá en marcha el plan de ejecución de consumo, donde se le hará seguimiento a los parámetros a evaluar: fragmentación de la roca, productividad de equipos, seguridad, diseño de voladuras, barrenos fallidos y ampliación de patrones de voladura. Para establecer la relación costo beneficio se tendrán en cuenta los siguientes parámetros evaluados de manera cualitativa o cuantitativa, Figuras 1 y 2.

- P_{80}
- Productividad de las palas
- Ampliación de la malla
- Proyección de rocas
- Costo

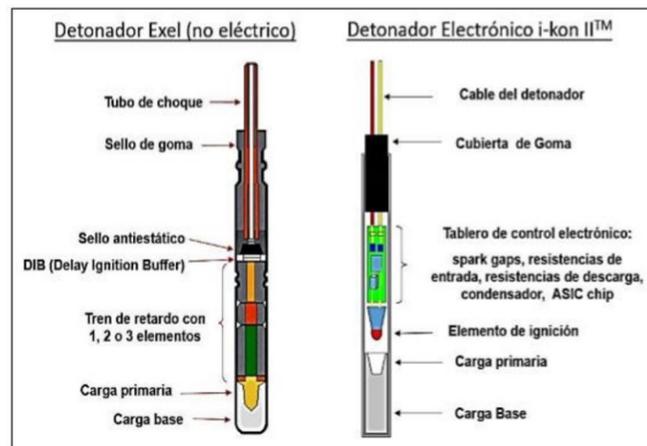


Figura 1. Diferencias de construcción. Fuente: Orica Mining Services.



Figura 2. Voladuras Exel vs. Ikon-II. Fuente: Orica Mining Service.

RESULTADOS

Para la implementación de las pruebas de los detonadores electrónicos fue necesario definir los parámetros de aplicabilidad de los detonadores electrónicos, para lo cual, junto al equipo del departamento de perforación y voladuras, se logró concluir que se realizara el desarrollo de las pruebas de los detonadores en mantos mayores a 40 ft de profundidad y mayores a 60 MPa de resistencia ya que parte del estudio arrojó que en mantos de menor resistencia y profundidad, no es rentable la implementación de los mismos partiendo del punto de vista económico.

El proyecto tuvo una duración de 5 meses; en el desarrollo de esta actividad se tuvieron en cuenta cuatro KPI o factores de rendimiento: ampliación de la malla, rendimiento del equipo, proyección de roca y fragmentación de roca o P_{80} , respectivamente, cada uno para cada manto. Con una media de una voladura con detonadores electrónicos por día y un promedio de 200 barrenos por voladura, se logró un consumo de 10.000 detonadores electrónicos en la totalidad de las pruebas para las fases I y II.

Igualmente se realizó un levantamiento topográfico con un equipo topográfico Topcon GR-3 de cada uno de los puntos de las diferentes mallas de perforación con el objetivo de medir la precisión de las perforaciones en cada una de las voladuras de las pruebas con detonadores electrónicos, donde se obtuvo como resultado que el 80% de las mallas perforadas correspondían en un 100% al patrón establecido para cada manto. El restante 20% tuvieron un margen de error de $\pm 1 - 2$ ft.

Los resultados de la fragmentación obtenida en las pruebas con los detonadores electrónicos fueron calculados mediante un software llamado PowerSilver 3, el diámetro más pequeño fue de 5,4 pulgadas y el mayor, de 24,5 pulgadas; este tamaño no resulta significativo con relación a la longitud del balde de los

cargadores y las tolvas de acarreo de los equipos usados en minería a cielo abierto, Figura 3.

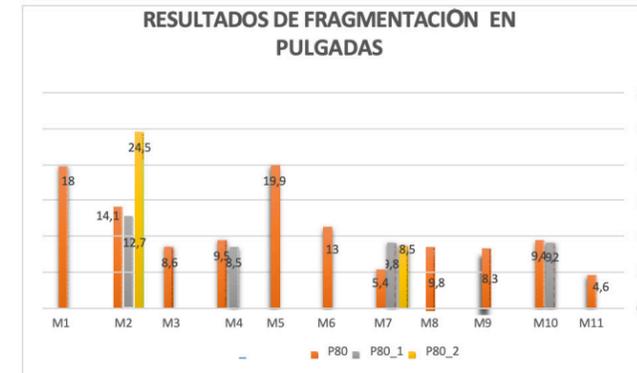


Figura 3. Porcentaje de fragmentación de roca. Fuente: Diseño propio.

Con respecto a la productividad de los equipos durante las pruebas de la implementación de los detonadores electrónicos estuvo determinada en estándares de productividad para las palas PC8000-6 Komatsu en 2400 bcm/h y para las palas Bucyrus en 1800 bcm/h según los estándares de la compañía donde se realizaron las pruebas; a estos datos se les hizo un seguimiento minucioso a los movimientos de las palas asociadas a cada una de las voladuras de pruebas y en conjunto con el departamento de despacho. La productividad de los equipos fue ascendente, entre intervalos de productividad, de 104,71% en la pala PC8000-6 Komatsu con 306 cargas. En el desarrollo de las pruebas con detonadores electrónicos, se tuvo un ahorro porcentual en intervalos entre el 3 y el 5% en cada una de las voladuras, esto justificado con la ampliación de las mallas donde se ahorró en la perforación de barrenos, carga explosiva, cables de fondo y de superficie. Los equipos fueron más productivos disminuyendo el tiempo de cargue y acarreo de la compañía; esto se determinó mediante una tabla de costo donde se establecieron los parámetros de costos para establecer el ahorro de cada voladura.

CONCLUSIONES

Con el desarrollo de las pruebas se pudo inferir que los detonadores electrónicos proporcionan una mayor seguridad porque al tener una conexión bilateral se asegura que el detonador está conectado a la malla a volar, al pasar por varios filtros de control de fugas, frecuencia y señal de los detonadores en fondo hasta el Blaster controlador; el disparo de las voladuras se puede realizar desde una distancia de 2,5 km evitando

así la presencia del personal haciendo la función de disparador dentro del área de influencia de la voladuras para personal encargado a 600 m de distancia.

Se puede evidenciar que la fragmentación de las voladuras con detonadores electrónicos está en escalas entre 24 y 4 pulgadas de diámetro, siendo ésta una fragmentación muy pequeña para los equipos de cargue con los que cuenta la compañía, se optimiza la fragmentación. En cuanto a la proyección de roca no se tuvo ningún tipo de inconvenientes ni afectaciones por impacto de material de voladuras; seguido de esto, en el desarrollo de 2 pruebas de voladuras de contorno se obtuvieron excelentes resultados de definición de paredes finales.

De acuerdo con lo anterior se pudo evidenciar el ahorro que se tiene en cuanto a algunos aspectos:

- Ahorro en ft perforados
- Ahorro en explosivos

La productividad de los equipos fue mayor debido a que la fragmentación de la roca resultó muy pequeña y esto hace que el ciclo de cargue y acarreo sea mucho más rápido y los tiempos logren reducirse optimizando la productividad de los equipos.

En respuesta a nuestra pregunta problema ¿los detonadores electrónicos pueden optimizar el proceso de perforación y voladura? es indudable el aporte que puede brindar la implementación de los detonadores electrónicos, en aspectos innegociables como la seguridad, la productividad de los equipos, y los costos. Es de resaltar la funcionalidad de estos detonadores ya que debido a sus flexibilidades en la asignación de tiempos pueden tener diversas aplicaciones en cualquier objetivo que pretendan las compañías en cuanto a diseños de voladuras.

REFERENCIAS

- [1] Ames L. V. Perforación y Voladura de Rocas I. Perú: UNCP, 4ta. Edición. 2012.
- [2] Ames L. V. Tecnología de Explosivos I. Perú: UNCP, 5ta. Edición. 2012.
- [3] Bernaola A.J., Castilla G.J., Herrera H. J. Perforación y Voladura de Rocas en Minería. Madrid. 2013.
- [4] Konya C.J. Diseño de Voladuras. 1988.
- [5] Mc Kenzie C. Estado del Arte de la Tronadura. Santiago, Chile. 1994.
- [6] Miranda S. Y. Estudio del Rendimiento entre Detonadores Electrónicos y no Electrónicos e Implicancia en Economía del Proceso y Seguridad en Tajo Abierto. Arequipa. 2009.
- [7] Orica Mining Services. Manual del Sistema Exel. Figura 1, Diferencias de construcción.
- [8] Orica Mining Services. Manual del Sistema I-kon.
- [9] Sampieri, R., Fernández Collado, C., Pilar, D., & Lucio, B. (n.d.). Metodología de la investigación Cuarta edición. Retrieved from website: <http://187.191.86.244/rceis/registro/Metodolog%C3%ADa%20de%20la%20Investigaci%C3%B3n%20SAMPIERI.pdf>
- [10] PC8000-6 | Komatsu Chile. (2018). Retrieved August 6, 2021, from Komatsulatinamerica.com website: <https://www.komatsulatinamerica.com/chile/productos/pc8000-6/>

NUESTRAS SOLUCIONES NIVELES DE SERVICIO



ADMINISTRACIÓN DE POLVORINES

Almacenamiento tracking y gestión de inventario

- Gestión Segura y trazabilidad de los productos en Polvorin.
- Confiabilidad de disponibilidad de producto.



ENTREGA EN EL FRENTE

Productos correctos y a tiempo

- Manipulación, gestión y entrega de los productos desde los polvorines a la zona de voladura (Equipos Operados por personal ORICA).



COS (CUSTOMER OPERATED SERVICE)

Voladura eficiente en sus manos

- Incremento de la eficiencia del cliente con un mínimo de personal de Orica.
- Equipos customizados para la entrega de explosivos de manera confiable en la frente.



DOWN THE HOLE (DTH)

Excelencia operacional de carga de pozos

- Eficiencia en el proceso de carguío de pozos calidad asegurada de carguío programación y voladura con alto estándar y confiabilidad de equipos MMUTM/ MCUTM (equipos operados por personal ORICA).



TOTAL LOADING SERVICES (TLS)

End to end Blast

- Productividad y Eficiencia aplicando los mejores estándares de la industria.
- Aseguramiento horario de voladura.
- Precisión de carguío para resultados esperados.



TOTAL LOADING SERVICE (TLS UG)

Productividad y eficiencia

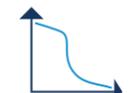
- Maxicharger™ y precisión en el caguío (PLC, retracción, inyección).
- Reducción de costos aplicando mejoras en diseño, tiempos de salida y tipos de explosivo.



ROCK ON GROUND (ROG)

Venta de roca quebrada por tonelada

- Foco en optimización de la planta y tasa de extracción.
- Optimización continua de voladura y aplicación de prácticas y productos innovadores (Vistis, Flexigel, double & Triple Layer multiple seed wave, etc.).



ROCK TO SPEC (R2S)

Entrega de beneficio neto

- Roca quebrada por tonelada según especificación.
- Garantías en performance (desde perforación a planta).
- Incremento de factores de llenado.
- Foco en Throughput acompañamiento de especialistas planta.



INNOVACIÓN ORICA INNOVACIONES RECIENTES



GESTIÓN DE INFORMACIÓN DE VOLADURA

La plataforma BlastIQ™, de próxima generación, está basada en una nube diseñada específicamente para permitir la mejora continua de los resultados de voladuras, mediante la integración de datos conectados digitalmente en todo el proceso de perforación y voladura.



EL PRIMER SISTEMA DE VOLADURA ELECTRÓNICO VERDADERAMENTE INALÁMBRICO DEL MUNDO

Sin las restricciones impuestas por las conexiones físicas, esta tecnología permite nuevas técnicas de voladura que aumentan la productividad y reducen los costos operativos.



EL SISTEMA DE VOLADURA ELECTRÓNICO MÁS SOFISTICADO DEL MERCADO

El sistema premium, i-kon™ III, está diseñado para mejorar la productividad, optimizando los tiempos de preparación de voladura tanto a pequeña como a gran escala. Además, es confiable en condiciones climatológicas adversas y reduce los retrasos en las voladuras.

Bulkmaster 7

EVOLUCIÓN EN CAPACIDAD DE ENTREGA

Este equipo mejora la productividad de perforación y voladura, resultando en una reducción del costo total de operación (\$ / t). Los resultados de voladura son predecibles y confiables, y los datos de rendimiento son transparentes. Todo esto en un entorno operativo más seguro.

NUESTRA PROMESA



SEGURIDAD
CERO ACCIDENTES.



SUMINISTRO CONFIABLE
PRODUCTOS DISPONIBLES EN EL MOMENTO REQUERIDO.



CALIDAD
LOS MEJORES PRODUCTOS DE SU CLASE Y UN SERVICIO DE EXCELENCIA.



VALOR AGREGADO
TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN QUE OPTIMIZAN SUS VOLADURAS Y MEJORAN LOS RESULTADOS.



Paulo Andres Mera M.
LIDER SISTEMAS DE INICIACION
Calle 110 No 9-25 oficina 614 Bogotá, Colombia
Código postal: 110111
Teléfono: +57 1 6581100
E-mail: paulo.mera@orica.com

APLICACIÓN DE LA VOLADURA CONTROLADA LLAMADA CUSHION BLASTING A UN CASO DE ESTUDIO DE ALTO RIESGO

Carlos Agreda

1. INTRODUCCIÓN

En este artículo se describen, analizan y discuten todos y cada uno de los problemas técnicos, económicos y ecológicos que se tuvieron que enfrentar y resolver para efectuar la voladura de la fracción de roca fracturada ubicada aproximadamente a 120 m cerro arriba de la Central Hidroeléctrica de Gorgor la cual posee dos grupos eléctricos de 350 kilovatios cada uno.

La selección del modelo matemático de la voladura controlada llamada (cushion blasting) fue analizada y discutida con mucho énfasis y detalle, concluyendo en la mejor alternativa de manera que al realizar la voladura de rocas se deberían también proteger las tuberías que conducen el agua cuyo diámetro era de $\phi = 24,0''$, siendo la longitud de las mismas de 289,0 m.

Por otro lado, cabe enfatizar que también se analizaron otras alternativas para fragmentar la roca problema, tales como:

- El uso del electrofrac system
- El uso del jet piercing system
- El uso del hydrofracturing system, etc.

2. CONTENIDO CENTRAL DEL ARTÍCULO

La Central Hidroeléctrica de Gorgor es administrada por ADINELSA que pertenece al Ministerio de Energía y Minas, estas plantas generadoras de energía eléctrica abastecen a 26 distritos de la provincia de Cajatambo, las cuales trabajan en 3 turnos de 8 horas.

La roca está ubicada a 120 m al S 64° W de la planta de Gorgor. Tiene una cota de 2886 msnm y está situada sobre un cerro de 72,5% de pendiente. La abertura

promedio de la fractura era de 13,0 cm y su longitud era de 13,70 m; el rumbo de la fractura era de S 25° W con un buzamiento vertical. La abertura de la fractura tenía un incremento de crecimiento de 0,75 cm/mes (razón de cambio promedio del incremento o aumento del ancho de la abertura).

La magnitud del problema puede deducirse de la observación cuidadosa de las Fotografías 1, 2, 3, 4, 5 y 6 en las se ilustra la ubicación de la roca fracturada con respecto a la Central Hidroeléctrica de Gorgor.

Una vez conceptualizado el real problema del riesgo que la roca fracturada representaba, con respecto a la C. H de Gorgor se tenía que determinar y/o buscar la metodología más adecuada técnico-económicamente hablando, para fracturar la roca en fragmentos pequeños y que sean manejables de tal manera de no causar ningún daño ni a las tuberías ni por supuesto a la C. H., utilizando la metodología anteriormente mencionada. Se contaba con la siguiente información de campo, tomada in-situ.

Observando las Fotografías 1, 3, 5 y 6, se puede notar que la roca fracturada se encontraba ubicada muy cerca de la cámara de carga de la C. H. de Gorgor y a 30 km del distrito del mismo nombre, de la provincia de Cajatambo, del departamento de Lima.

Los tipos de roca predominantes son brecha volcánica de composición dacítica y pórfido dacítico, con una densidad promedio de 2,44 t/m³. La forma de la roca era aproximadamente cónica. En las Tablas 1 y 2 se indican los datos de campo de los dos bloques rocosos a remover, los cuales estaban separados por la fractura. El bloque menor, localizado al sur, y el mayor al norte de esta.

Datos de campo	
Área de la base superior (m ²)	34,9
Altura promedio (m)	12,7 ≈ 13
Volumen (m ³)	443
Peso (t)	1.081
Densidad de la roca (t/m ³)	2,44
Factor de corrección por la parte de roca enterrada (%)	40
Peso total aproximado (t)	1.550 (1)

Tabla 1. Datos de campo del bloque menor de roca, al sur de la fractura

Datos de campo	
Área de la base superior (m ²)	211,0
Altura promedio (m)	12,7
Volumen (m ³)	2.679,7
Peso (t)	6.538,5
Factor de corrección por la parte de roca enterrada (%)	40
Peso total aproximado (t)	9.154 (2)
Peso total de los 2 bloques: 1 + 2 (t)	10.704

Tabla 2. Datos de campo del bloque mayor de roca, al norte de la fractura.

Mallas	No. de taladros
B x S = 0,8m (1.0m) = 0,80m ²	345,8/0,80 = 433
B x S = 1,0m (1.2m) = 1,2m ²	345,8/1,20 = 288
B x S = 1,2m (1.5m) = 1,8m ²	345,8/1,80 = 192 ≈ 200

Tabla 3. Cálculo del número de taladros para el primer bloque



Figura 1. Roca que representa el problema



Figura 2. Tubería que conduce el agua para generar la corriente eléctrica



Figura 3. Ubicación de la planta hidroeléctrica y el río Gorgor



Figura 4. Parte norte de las dos plantas hidroeléctricas de Gorgor



Figura 5. Fractura de la roca que representaba el problema.

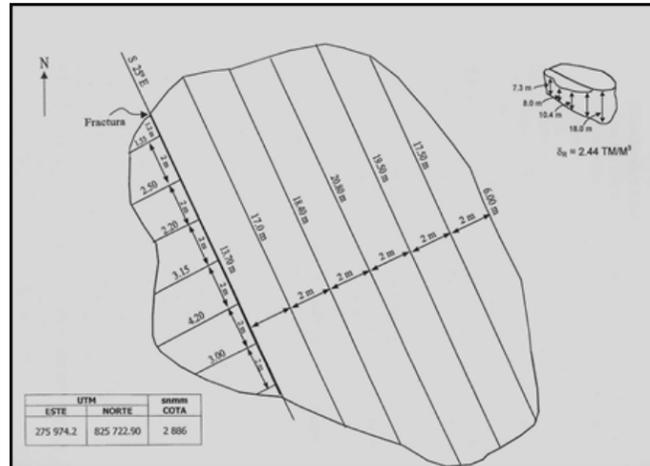


Figura 6. Dimensiones de la roca y del bloque de roca de la parte sur

3. DISEÑO DE LA CARGA EXPLOSIVA PARA LOS TALADROS QUE SE USARON EN EL PRIMER BLOQUE

De acuerdo con el número de taladros calculados anteriormente considerando una malla de perforación y voladura de: $B \times S = 1,2m \times 1,5m$, estos son 192 taladros; pero por seguridad; se consideraron aproximadamente 200 taladros para fracturar el primer bloque.

Por otro lado, el modelo de voladura controlada usada en este trabajo fue el de la técnica de “voladura suave” (cushion blasting). En la Figura 7 se muestra un taladro en el cual se puede observar su diseño de carga.

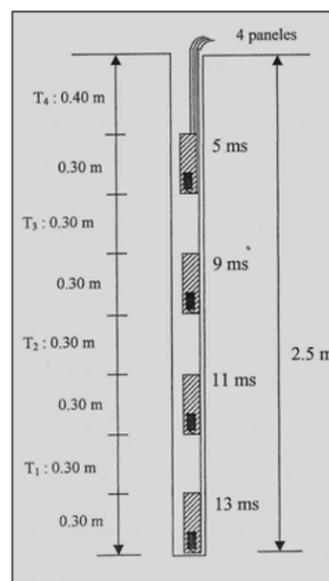


Figura 7. Diseño de carga

4. TRABAJOS PRELIMINARES

Mientras llegaban los explosivos y accesorios de voladura, el suscrito ordenó que se construyera una barricada para que en la eventualidad de que cualquier fragmento de roca que pudiera haberse producido por alguno de los disparos no pudiese llegar a la planta ni causarle ningún daño. También se construyeron algunas barricadas (recubrir las tuberías) en el área del disparo con sacos de arena a fin de evitar probables deterioros de las mismas por efecto de las voladuras.

5. CONCLUSIONES

1. Antes de tomar la decisión de usar voladura de rocas para dar solución al problema representado por la presencia de la roca y especialmente por su ubicación tan sui-generis, varias otras alternativas de solución fueron analizadas y discutidas.

2. El modelo de voladura controlada llamado “cushion blasting” fue elegido como la mejor alternativa para dar solución a este problema y esto ha quedado demostrado a través de esta investigación.

3. Los resultados de los 50 disparos primarios que tuvieron que efectuarse fueron excelentes ya que los mismos no produjeron:

- Excesivas vibraciones.
- Ni accidentes personales, ni ningún daño a las estructuras físicas de las plantas de la central hidroeléctrica.
- No se presentó ningún problema de lanzamiento de fragmentos de roca.

4. El costo total de perforación y voladura fue aproximadamente de: US\$30.000

5. Por otro lado, se debe informar que para agilizar los cálculos de los costos de perforación y voladura se usó un pequeño software que fue diseñado especialmente para efectuar los cálculos de la referencia. Los resultados obtenidos usando el software mencionado anteriormente se explican por sí mismos y de dichos resultados se puede deducir: Que el costo total para perforar, disparar y acarrear el material disparado proveniente de la porción de la roca fracturada a un sitio adecuado fue de US\$30.000.

6. RECOMENDACIONES

1. Usar los modelos matemáticos de la voladura controlada para llevar a cabo trabajos de alto riesgo, de tal manera a no causar daño alguno a las infraestructuras cercanas al disparo y/o accidentes fatales.

2. Construir en lugares adecuados cualquier infraestructura para evitar a futuro problemas similares a éste.

REFERENCIAS

[1] Agreda, C. (1992): “Introducción a la ingeniería de explosivos”. 1era Ed. Lima, Perú.
 [2] Agreda C. (1994): “Modelización matemática de la voladura de rocas” Lima-Perú.
 [3] Agreda, C. (2002): “Voladura controlada”, Teoría y aplicaciones. Lima – Perú.
 [4] Cook M. (1971): “The science of high explosives”. N, Y.
 [5] Holmberg, R. (2003): “Explosives and blasting techniques”
 [6] Person, P. A. et. al. (1997): “Rock blasting and explosives engineering”. N, Y.



DCCAE
 DEPARTAMENTO CONTROL
 COMERCIO DE ARMAS
 MUNICIONES Y EXPLOSIVOS

Realice todos sus Trámites
SIN TRAMITADORES
 SIN COSTO ALGUNO

163 **LÍNEA**
 DEL HONOR
 ANTICORRUPCIÓN

FACTORES QUE INCIDEN EN EL CARGUE DE BARRENOS EN MINERÍA DE CARBÓN A CIELO ABIERTO

María Camila Barros Rivera
Numas Martín Mendoza Mendoza

RESUMEN

En el presente artículo denominado Factores que inciden en el cargue de barrenos en minería de carbón a cielo abierto se describe como en la práctica de la perforación y voladura, se deben tener en cuenta diversos factores que influyen en esta actividad: la medición, el cargue de barrenos secos, los barrenos con agua, los barrenos satélites, los barrenos calientes, los barrenos dinámicos, el personal operativo y los equipos. Todo este proceso va a permitir conocer la importancia que tiene el cargue de barrenos para que exista una voladura eficiente.

Palabras claves: roca, voladura, carbón, cargue de barrenos.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de los procesos de voladura intervienen múltiples variables que son fundamentales para lograr resultados óptimos de fragmentación de la roca, como la litología, el patrón de perforación, el diseño de cargue, los agentes de voladura, la secuencia de encendido de las voladuras, los accesorios de voladuras disponibles, etc. Es indispensable realizar un control estricto sobre cada una de estas variables para alcanzar el éxito en este proceso; para esto se hace necesario ejercer lo que se conoce como la gerencia en la supervisión, la cual consiste en poner en práctica los conocimientos y competencias adquiridas durante la formación del especialista, sumado al esfuerzo que se requiere para conseguir la meta, y considerando que la actitud constituye el factor más importante para triunfar sobre cualquier objetivo propuesto. Este artículo se centra primordialmente en los diseños de cargue utilizando cámaras de aire, los cuales pueden ser aplicados en minería a cielo abierto metalífera (oro, plata, cobre, etc.)

Colombia es un país que posee un recurso potencial geológico minero valioso, lo que hace posible la explotación de una amplia variedad de productos de importancia económica como el carbón.

Para la extracción del carbón se desarrolla la fase de perforación y voladura de la roca contenida en el yacimiento y una de las más importantes dentro de esta actividad es el cargue de barrenos, el cual se realiza dependiendo de las necesidades que se encuentren en el área, pudiéndose resaltar algunos aspectos como: el cargue de barrenos secos, con agua, satélites, calientes, entre otros. La mayoría de estos barrenos son cargados de una manera muy particular teniendo en cuenta la profundidad, la medición, el retacado, la cantidad de agentes de voladura que requiere el barreno, etc. Sin embargo, existen diversos factores que inciden en el cargue de los barrenos.

ABSTRACT

The following article describe the loading of holes in open-pit coal mining; in the drilling and blasting area there are factors, there is influence the loading an holes, such as: holes measurement, loading wet or dry holes, satellites holes, hot holes, dynamic holes and personal and equipment require or this task. This whole process will allow us to know the importance of hole loading for the safe and efficient blasting.

Para la realización de este artículo, se evaluaron las diferentes características del cargue de barrenos, en un conjunto de visitas a campo; allí se observó el trabajo de los operadores en el momento del cargue, con el fin de conocer específicamente esta labor, lo que permitió el planteando de oportunidades de mejora para un cargue de material que garantice que lo equipos tengan un óptimo rendimiento.

2. CARGUE DE BARRENOS

2.1 Barrenos secos

El proceso de cargue de barrenos secos inicia cuando el operador de campo mide el barreno con la cinta (cuando la cinta sale seca, indica que el barreno no tiene humedad) y compara la profundidad del barreno con la profundidad del plan de perforación, se señalizan con objetos visibles los barrenos que sean necesarios reperfurar (se hace la reperfuración cuando el barreno no cumple con las medidas requeridas). Se cubren aquellos barrenos que no cumplen con las condiciones, por ejemplo: barrenos volados, pruebas con profundidad definida, etc. Si el barreno cumple con las condiciones para ser cargado, se coloca retrollenado, utilizando la pala manual. El operador verifica que el retrollenado tenga la medida correcta y procede a insertar el booster (después de 15 m se utilizan 2 booster en la columna de explosivos).

El operador del camión ubica el boom (brazo mecánico que contiene un sinfín, utilizado para descarga de explosivo dentro del barreno) en la boca del barreno, al momento de insertar el booster con el cable de fondo (cebado) se tiene en cuenta su ubicación dentro del barreno a 30 cm encima del retrollenado; finalmente se sujeta en superficie el extremo sobrante del cable de fondo.

Se abre el switch y se efectúa la descarga del agente de voladura Anfo (Agente de voladura a base de nitrato de amonio y aceites combustibles) y emulsión (Sistema que contiene dos fases líquidas una fase oxidante y una fase combustible) hasta la altura predeterminada, donde comienza el retacado. Mientras se carga el barreno se realizan mediciones consecutivas; la cinta debe tener un nudo que indica la altura del retacado. Luego se cierra el switch y se verifica la altura de la columna del agente de voladura. Se agrega agente de voladura en caso de ser necesario verificando la profundidad del retacado; en caso de que se sobrepasen las medidas correctas,

puede haber proyección de roca, por el contrario si queda incompleto podríamos tener roca sobre tamaño.

2.2 Barrenos con agua

En este proceso de cargue, el operador de campo revisa la profundidad del barreno, luego mide con la cinta y verifica la profundidad con el plan de perforación, se señalan los barrenos que no cumplen y se realiza la verificación siguiente. Se tapan aquellos barrenos que no cumplen con las condiciones de profundidad para el cargue.

Existen 4 labores que permiten en el proceso del cargue distinguir si el barreno se encuentra con agua:

- El operador del taladro al momento de la perforación identifica el barreno y se deja un retrollenado in-situ para no tocar el manto.
- En el área si no hay ruidos alrededor, se introduce una roca dentro del barreno, esta ayudará a identificar si el mismo tiene agua.
- El operador de campo mide con una cinta el barreno y al momento de sacarla, la cinta se encuentra húmeda.
- El detrito después de realizada la perforación se encuentra húmedo.

Después de ejecutar esta labor, el operador del camión ubica la manguera dentro del barreno, inserta el booster con el cable de fondo (cebado) hasta el fondo del barreno, luego se sube 0,91 m para que el booster quede inmerso en la columna de explosivos, finalmente se sujeta en superficie el extremo sobrante del cable de fondo.

Se abre el switch y se efectúa la descarga del agente de voladura, hasta la altura predeterminada, donde comienza el retacado. Mientras se carga el barreno se realizan mediciones, la cinta debe tener el nudo que indica la altura del retacado y se va sacando la manguera de forma lenta para que no queden vacíos en la columna de explosivos y se cierra el switch. Para finalizar el cargue se saca la manguera y se empieza el retacado, que se hace con pala manual; es necesario que el detrito entre al barreno de forma lenta para que el retacado quede compactado y de esta manera el agua sea desplazada del barreno; es preciso tener una revisión después de cargado el barreno, ya que el detrito puede descender y tocaría retacar el barreno de nuevo.

2.3 Barrenos satélites

Son barrenos adicionales a los normales ubicados de forma estratégica dependiendo del espesor de la roca, para garantizar una buena fragmentación y desprender el material duro de un estrato de roca dura que puede encontrarse en la capa superior de un banco. [1] El cargue de estos barrenos se puede realizar con cargas puntuales (es un agente de voladura distribuido de tal forma que solo afecta una parte del macizo rocoso) y hacen parte de la columna de explosivos; pueden realizarse con boom, booster o bolsas.

El procedimiento para cargar barrenos con cargas puntuales es el siguiente: se introduce la carga puntual en la parte superior para fragmentar la roca. Se debe iniciar la carga puntual antes de la columna explosiva principal para que no salga proyectada.

2.4 Barrenos calientes

Los barrenos calientes son terrenos calientes o rocas reactivas. Rocas reactivas es un término usado para describir las reacciones espontáneas exotérmicas que puede sufrir la roca cuando entra en contacto con el nitrato que contienen los explosivos. Esta alta temperatura es causada por gradientes geotérmicos, capas de carbón, condiciones ambientales naturales y oxidación de los sulfuros. [2]

Los ingenieros elaboran un mapa delimitando las áreas calientes. Cuando se identifican estas áreas, las perforaciones se inician del área más lejana a la más cercana progresivamente al área caliente, como medida de seguridad todos los barrenos deben ser perforados antes de iniciar el cargue; se perfora el primer barreno hasta tocar carbón y se monitorea la temperatura del barreno con la termocupla.

Los barrenos no deben cargarse enseguida sino una hora antes de la voladura; se selecciona el agente de voladura y se previene que no haya derrames de éste para evitar que el producto se deteriore o haya un accidente [3].

Los barrenos con temperatura superiores a 65,5°C serán cargados así:

- Todo el personal involucrado será informado que un barreno en el área caliente será cargado.
- Personal que haya recibido formación y entrenamiento deberá realizar el cargue.

- Los equipos deben mantenerse distanciados al momento del cargue.

2.5 Barrenos dinámicos

Son barrenos con agua con demasiada presión y tienen constantemente descargas de agua. Para cargar este tipo de barrenos, es necesario perforar un barreno al lado para aliviar la presión y el barreno que se va a cargar es el que tenga menos presión.

3. FACTORES QUE INCIDEN EN EL CARGUE EXITOSO DE BARRENOS

Para que exista una voladura exitosa, se debe realizar un cargue y un cebado adecuado, correspondiente a los factores que se encuentren en el área:

3.1 Mediciones

Al iniciar el cargue de barrenos, el operador de campo debe comparar la profundidad real del barreno con la estipulada en el plan de perforación, total de metros perforados; si toca el carbón, este tipo de información permite detectar la condición del barreno.

Si se encuentran barrenos subestándares en el área que no tengan la profundidad requerida tales como: barrenos volados, perforados, colapsados, que les haya caído detrito o barrenos abiertos que el medio circundante causa que se tapen, el operador debe reportar al supervisor ya que no cumplen las condiciones estándares de los requerimientos establecidos para el cargue.

3.2 Cargue de barrenos con agua

En este procedimiento el operador de campo debe comparar la profundidad real del barreno con la estipulada en el plan de perforación. Al momento del cargue la manguera es lubricada con agua para que circule el explosivo y no quede pegado en sus paredes.

Por otra parte, cuando se extrae la manguera del barreno, se debe hacer de forma lenta para que no queden vacíos en la columna de explosivos; nunca llevan deck (segmento de detrito entre 1,2 m y 1,5 m que divide la columna de explosivos en 2 partes, con la finalidad de ahorrar agentes de voladura) y el retacado se hace de forma lenta para que el agua que se encuentra al interior siga saliendo. Por lo tanto, se debe tener en cuenta las profundidades ya que en los barrenos de menor profundidad se realiza un cargue especial.

3.3 Cargue de barrenos secos

En este tipo de cargue el operador de campo no puede utilizar la manguera, sino el boom, porque permite que el trabajo sea mucho más rápido; el operador de campo debe comparar la profundidad real del barreno con la estipulada en el plan de perforación. Además, cuando se encuentran barrenos mayores de 15 m se utiliza un deck. Por otro lado, en barrenos secos pocos profundos, no se debe utilizar material inerte y cuando se necesita precisión en este tipo de cargue, se empaacan agentes de voladura en bolsas debidamente pesadas y empacadas.

3.4 Barrenos calientes

Este tipo de barrenos es un peligro inminente, debido a las altas temperaturas en la que se encuentran y pueden ocasionar que las personas sufran quemaduras. Por otra parte, el barreno debe ser identificado, es decir que, si este paso no se realiza y el barreno es cargado, se puede presentar una detonación espontánea no controlada.

3.5 Barrenos satélites

Este tipo de barrenos se encuentra dentro del rango de los barrenos menores de 5 m, su cargue debe ser realizado de acuerdo al plan de perforación y los equipos deben estar a distancias pertinentes al momento de la voladura.

3.6 Barrenos dinámicos

Si al barreno dinámico no se le realiza un barreno al lado, la presión del agua puede expulsar la columna de explosivos.

3.7 Supervisores

Deben ser los encargados de hacerle el seguimiento al procedimiento de cargue de los barrenos, para garantizar que el operador de campo esté realizando el paso a paso de esta actividad debido a que éstos pueden omitir algunos pasos y así habrá mejoras en el proceso.

3.8 Camión de explosivos

La operación del camión de explosivos es importante para el cargue de barrenos, ya que este trabajo en equipo lo realizan el operador del camión y el operador de campo; ambos analizan el área y toman las medidas de seguridad necesarias antes de iniciar el cargue. El camión debe cargar fila por fila, y nunca hacer giros entre filas; debe transitar paralelo a las líneas o a la inclinación del terreno para mayor estabilidad del camión y hacer los giros en áreas planas. El operador del camión debe estar muy atento para que los cordones

de profundidad no se adhieran a las llantas, o de lo contrario, se puede producir el “efecto aplauso” que puede ocurrir con el estiramiento del tubo de choque, generando que el HMX que contienen en su interior, se caliente y produzca la iniciación del explosivo contenido en el barreno. Así mismo, cuando hay barrenos con difícil acceso de cargue o no alcance el boom, éstos deberán ser cargados con manguera.

4. CONCLUSIONES

- Se identificaron aspectos relevantes en el análisis que se realizó al cargue de barrenos, uno de ellos es la formación y entrenamiento del personal que se encuentra dentro del área de perforación y voladura, es decir, que toda voladura debe generar una buena fragmentación, con efectos negativos mínimos de flyrock, no debe causar pérdidas y debe agregar un valor económico rentable, debido a un cargue eficiente.
- Los operadores de campo deben estar en constante actualización de los conocimientos en todo lo relacionado con los explosivos.
- Las personas encargadas tendrán en cuenta el seguimiento a los barrenos, la medición de sus dimensiones y el explosivo que van a utilizar, para lograr el objetivo del plan de voladura.

REFERENCIAS

[1] ICI Australia Operations., & ICI Explosives., & Technical Services. (1993). Safe and Efficient Blasting in Surface Coal Mines. Orica mining service. Nicholson Street, Melbourne, Australia. p87

[2] P Bellairs, “Explosive Ground Reactivity Indicators and Strategies to Overcome This Phenomena”, International Society of Explosives Engineers, 1997.

[3] Paul W Cooper, “Explosives Engineering”, Wiley-VCH, New York, 1996; p 303

ÚLTIMAS TENDENCIAS EN EQUIPOS DE PERFORACIÓN

Armando Sugobono
Harry Ward

RESUMEN

A lo largo de los años la minería en Colombia se ha convertido en una expresión necesaria para el crecimiento y desarrollo del país. No es casual, que diferentes analistas aseguren que la misma es un motor de las finanzas, la generación de empleo, el aumento de las exportaciones y el progreso de los municipios, entre otras variables que hacen de ella una de las claves para la reactivación económica. Sin embargo, aquello no sería posible sin las estrategias y los equipos que son parte de cada una de las etapas del ciclo minero.

ABSTRACT

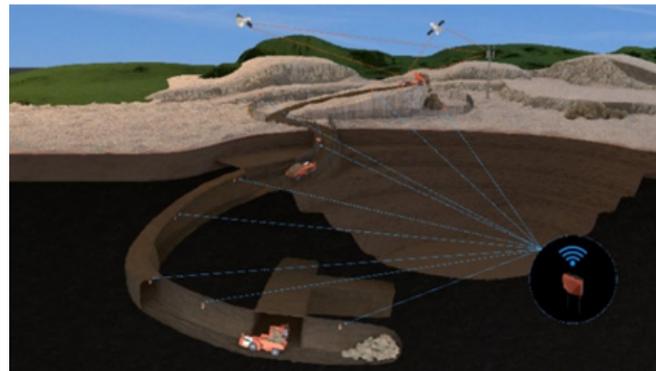
Throughout the years, mining in Colombia has become a necessary endeavor to the growth and development of the country. It is no accident that different analysts claim that mining is an engine for finances, the job creation, the increase of exports, and the municipalities' progress, among other variables that make it a key factor to the economic reactivation. However, none of this would be possible without the strategies and teams of each stage of the mining cycle.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la minería le aporta a la economía del país \$5 billones anuales en impuestos y regalías; representa el 2% del PIB y el 27% de las exportaciones. Además, genera más de 1'250.000 empleos entre directos e indirectos. Y no menos importante, es que ha disminuido el porcentaje de las necesidades básicas insatisfechas de los municipios mineros en más de 30 puntos (Ministerio de Minas y energía, Portafolio), Fotografía 1, digitalización en Minería.

Y para este año (2021), el Ministerio de Minas y Energía decidió priorizar 33 proyectos minero-energéticos, que generarán en los próximos dos años 54.000 empleos y \$36 billones en inversión.

Teniendo en cuenta lo anterior, es imprescindible para cualquier empresario o ingeniero apostarle a equipos cada vez más futuristas, que les permitan optimizar del ciclo de minado con el fin de incrementar la productividad diaria y no acarrear mayores costos, tiempo y grandes peligros para los mineros en la etapa de la perforación y voladura.



Fotografía 1. Digitalización en Minería. Fuente Sandvik

2. EQUIPOS EN LA INDUSTRIA MINERA

La tendencia en equipos alrededor del mundo es a incursionar en aquellos que implementan tecnologías de automatización y tienen la capacidad de operación tele remota ya que la mayoría de ellos, van a generar beneficios en cuanto a la velocidad de operación.

Estos le han ofrecido al empresario la capacidad de optimizar su ciclo, alcanzando mayores niveles



EL PODER DE LA AUTOMATIZACIÓN LLEVANDOTE KILOMETROS MAS LEJOS

AutoMine® para camiones continúa estableciendo el estándar de la industria con el transporte de camiones autónomos desde el interior de la mina hasta la superficie.

Ayudan en la reducción de daño de los equipos y los trabajos de reparación, con los niveles más altos de eficiencia y utilización de la flota, lo que genera un menor costo por tonelada y hace que su operación sea más productiva y segura.

Son escalables para diferentes aplicaciones mineras y se pueden supervisar desde ubicaciones remotas. Convierte a los camiones mineros inteligentes de Sandvik en robots no tripulados, robots que siguen funcionando.



ROCKTECHNOLOGY.SANDVIK/AUTOMINE-FOR-TRUCKS



de utilización y productividad y reduciendo significativamente costos de mantenimiento al generar menores daños sobre los equipos, Fotografía 2, operación remota.



Fotografía 2. Operación remota. Fuente Sandvik

En ese orden de ideas, empresas como Sandvik han diseñado equipos de carga, acarreo y perforación que incorporan tecnología de vanguardia y que cumplen con las necesidades actuales de cada proyecto.

Entre una gran variedad, una de las que más se utiliza en Colombia, en proyectos de construcción como la Ruta 40, es la serie de equipos de perforación de superficie Ranger DX 600, DX700, DX800, en donde la diferencia entre uno y otro equipo recae en el martillo que utiliza; pero también, otro de gran demanda, es el DI650I.

Entre toda la gama de productos de esta línea, una de las más utilizadas en el país es la DX700, la cual ha sido diseñada para mantener una estabilidad operativa incluso en las condiciones más difíciles. Su superestructura giratoria le permite tener una excelente cobertura de perforación, una innovadora solución de contrapeso que produce mayor estabilidad y un sistema de control de perforación tipo Rock Pilot+. La cobertura de perforación de estas máquinas es de 17,6 m² (opcionalmente 26,4 m²) y puede trabajar 12 horas continuas debido a su sofisticado motor. La DX700 funciona a través de un motor de bajo consumo y bajas emisiones Tier4 Final o Tier3 y tiene un paquete ecológico de Sandvik. En la Fotografía 3 se presenta un equipo Ranger DX800 de perforación con martillo autónomo en cabeza.



Fotografía 3. Ranger DX800 equipo de perforación con martillo autónomo en cabeza. Fuente Sandvik

La potencia, precisión y versatilidad del equipo Ranger lo hace una opción ideal para operaciones de construcción, explotaciones y minería de superficie, sin olvidar, que ha sido diseñado para priorizar la seguridad del operador, con una cabina que tiene certificación ROPS y FOPS.

El DI650I, es un equipo que se destaca por su perforación inteligente, autocontenido, montado sobre oruga, con martillo de fondo y motor diésel, diseñado para aplicaciones de perforación de producción exigentes y de gran capacidad en minería de superficie, además de aplicaciones a gran escala en canteras. La perforadora está equipada con una cabina del operador, brazo fijo, colector de polvo seco, intercambiador de columna de perforación y tiene un diseño innovador que proporciona una clara y mejora en la visibilidad de la zona donde se está realizando el trabajo. La Fotografía 4 ilustra un Leopard™DI650i equipo de perforación con martillo de fondo.



Fotografía 4. Leopard™DI650i equipo de perforación con martillo de fondo. Fuente Sandvik

Esta máquina se podría considerar revolucionaria, ya que guía al operario en todas las etapas del proceso de perforación, teniendo en cuenta detalles como la precisión, el trazado y el posicionamiento; hasta le permite elaborar informes.

Todas las mediciones se realizan mediante robustos sensores integrados en los cilindros hidráulicos y las antenas de los satélites están montadas sólo en el soporte, lo que las hace menos expuestas a las vibraciones y al polvo.

3. OTRAS OPCIONES PARA TRABAJOS SUBTERRÁNEOS

De acuerdo con la Agencia Nacional de Minería (ANM), de los 114 millones de hectáreas del territorio nacional, sólo el 5% están tituladas para la actividad minera, de las cuales el 2,3% están en exploración, el 1,6% en construcción y montaje, y el 1,1% en explotación.

Actualmente hay más de 9.602 títulos mineros vigentes en Colombia, una cifra positiva ya que demuestra el propósito de hacer minería legal por parte de las empresas. Entre todas ellas, se abarcan más de 10 tipos de mineral, siendo algunos de los más explotados los de construcción, que acapara un 57% de la minería, seguido del carbón que representa un 17%, los metales preciosos (11%), las calizas (5%), los minerales Industriales (4%), las piedras preciosas (4%) y otros Metales (2%).

Esto demuestra también que el sector cada vez es más importante para la vida de los colombianos, ya que muchos dependen económicamente de esta actividad y se benefician de la utilidad que les deja y los ingresos generados por sus exportaciones.

Sin embargo, para nadie es un secreto que esta es una actividad peligrosa y que suma una variedad de riesgo a la hora de practicarla. Diferentes registros, detallan que desde el 2005 hasta el 2020 han muerto en total 1.612 personas en 1.447 accidentes; es decir, que cada año fallecieron en promedio cien mineros.

Como uno de los grandes objetivos que tiene Sandvik con sus equipos está el de proteger a los trabajadores de aquellos peligros inherentes por medio de tecnologías que les permitan hacer trabajos de una forma más segura. La automatización y operación tele remota

busca simplificar la tarea de los operadores, reducir su fatiga y procurar que realicen una labor más eficiente, Fotografía 5, Jumbo DD422iE de dos brazos a batería.



Fotografía 5. Jumbo DD422iE de dos brazos a batería. Fuente Sandvik

No necesitamos estar en el futuro para imaginar que durante cada cambio de guardia las máquinas pueden seguir operando autónomamente y eso les permite incrementar la productividad en la labor de cada proyecto. De acuerdo con un estudio realizado por la empresa, la automatización de estos equipos aumenta en un 30% las horas de producción efectivas.

Otro punto para resaltar de la automatización es la reducción de costos operacionales, los diagnósticos precisos y el monitoreo constante de los equipos desde la superficie. De esta manera, equipos como el LH518B o el DL422iE, son claves en tiempos donde aquellos mecanismos pueden salvar vidas y ayudar en la optimización dentro de las minas, Fotografía 6, Cargador LH518B a batería de 18 toneladas.



Fotografía 6. Cargador LH518B a batería de 18 toneladas. Fuente Sandvik

La LH518B es la cargadora a batería de 18 toneladas más grande del mercado. Sus dimensiones son iguales a las de la clase de tamaño de 14 toneladas métricas, lo que le permite ingresar en un túnel de 4,5 m x 4,5 m.

Los potentes motores eléctricos que tiene y la innovadora línea de transmisión eléctrica junto con los neumáticos más pequeños en la parte trasera en comparación con la parte delantera, dan como resultado un equipo con una alta capacidad de carga útil y una mayor visibilidad.

La LH518B utiliza baterías de última generación basadas en la composición química de fosfato de litio-hierro (LiFePO₄), gracias a lo cual no se producen emisiones de gases de escape subterráneas y eso permite reducir significativamente el calor que muchas veces producen motores diésel tradicionales. También logra cumplir objetivos en cuanto a la sostenibilidad, ya que mediante este proceso se reducen las emisiones de CO₂.

Otra ventaja que tiene este tipo de maquinaria es el Auto Swap, un sistema patentado de auto intercambio de la batería Sandvik, que tiene un proceso rápido y fácil el cual casi no necesita ser manipulado. De esta manera, no se requiere ninguna infraestructura pesada en la mina, como grúas aéreas o carretillas elevadoras para elevar o mover las baterías; todo lo que se necesita es un muelle de paso o un antiguo muelle de limpieza, Fotografía 7, Jumbo DL422iE a batería y de operación remota para barrenos largos.



Fotografía 7. Jumbo DL422iE a batería y de operación remota para barrenos largos. Fuente Sandvik

Este equipo fue diseñado para minería masiva subterránea en galerías de producción de 4,0 m x 4,0 m y mayores. Cuenta con una tecnología que le permite operar continuamente y sin la necesidad de personal. Recopila y transfiere datos a través de redes inalámbricas, garantizando así una mejor utilización y productividad de los equipos. Además, de ser capaz de perforar abanicos verticales e inclinados y barrenos simples o paralelos de Ø89 a 127 mm de largo hasta 54 m de profundidad utilizando barras de tubo ST58 y ST68.

Con una frecuencia de impacto de 40-45 Hz y una dinámica de percusión optimizada para los tubos ST68, el DL422iE ofrece un contacto óptimo entre la broca y la roca para una mejor transferencia de energía.

El taladro está equipado con una línea de transmisión eléctrica y un sistema que incluye un paquete de batería y motor eléctrico para generar cero emisiones mientras se desplaza en un entorno de trabajo más seguro para el personal subterráneo.

4. CONCLUSIÓN

Los datos del sector dan cuenta que el futuro de la minería es prometedor y lleno de desafíos. Colombia, necesita poder crecer después de uno de los años más duros, tras la pandemia del Covid-19 y las empresas tienen la obligación de desarrollar más proyectos de minería teniendo en cuenta la seguridad, la no contaminación y los costos.

Por ello, Sandvik ha creado alternativas más limpias, efectivas y seguras, utilizando todos sus años de experiencia en el campo para sumarle mucho más valor a la propuesta que puede ofrecer para cada proyecto y sin duda un distintivo en el mercado colombiano es su post venta con cerca de 50 técnicos entrenados y con experticia para soportar técnicamente toda su flota de máquinas.

REFERENCIAS

- Diario El Tiempo, 01 de octubre 2020, El potencial económico que tiene la minería colombiana en cifras, [www.eltiempo.com](https://www.eltiempo.com/mas-contenido/las-cifras-mas-importantes-de-la-mineria-en-colombia-538715). (<https://www.eltiempo.com/mas-contenido/las-cifras-mas-importantes-de-la-mineria-en-colombia-538715>)
- Diario Portafolio, 25 de febrero de 2020, Minería bien hecha, una 'joya' para la economía colombiana, [www.portafolio.co](https://www.portafolio.co/economia/mineria-bien-hecha-una-joya-para-la-colombiana-526780) (<https://www.portafolio.co/economia/mineria-bien-hecha-una-joya-para-la-colombiana-526780>)
- Agencia Nacional de Minería, Así es nuestra Colombia minera, www.anm.gov.co (<https://www.anm.gov.co/?q=Asi-es-Colombia-minera#:~:text=Los%209.602%20t%C3%ADtulos%20mineros%20vigentes,cada%20mineral%2C%20y%20su%20explotaci%C3%B3n.>)
- RCN Radio, 29 de septiembre de 2020, Accidentes mineros han causado la muerte de 130 personas este año, www.rcnradio.com (<https://www.rcnradio.com/recomendado-del-editor/accidentes-mineros-han-causado-la-muerte-de-130-personas-este-ano>)

DISEÑO DE VOLADURA SUBTERRÁNEA ATENDIENDO AL RMR Y DEMÁS CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO Y DEL TIPO DE EXPLOSIVO

Álvaro Correa Arroyave
Jorge Eric Rueda Fonseca

RESUMEN

La clasificación de masas rocosas de Bieniawski, RMR -Rock Mass Classification- es, junto con la Q de Barton y el GSI de Hoek, los tres sistemas de clasificación más frecuentemente utilizados en muchos países incluyendo a Colombia, como ayuda para determinar un sinnúmero de propiedades del macizo rocoso. Estas características permiten prever los tiempos de autososte de una excavación subterránea, así como su tipo de sostenimiento, velocidad de avance y complejidad de construcción y con base en ellos determinar costos y tiempos de excavación bastante aproximados de estas estructuras, y aunque se recomienda utilizar el método de avance de perforación y voladura para macizos rocosos con RMR de I, II y III, en la bibliografía no se encuentra ninguna relación directa entre el RMR y las dimensiones del burden, del espaciamiento ni del retaque.

Los resultados de la investigación que venimos realizando nos permite proponer una expresión que conlleva las propiedades dinámicas a tracción del macizo rocoso; además, estamos considerando el nivel de acoplamiento de las cargas, las dimensiones de la sección del túnel, sus condiciones de confinamiento y el RMR en el que se encuentra inmerso.

El presente artículo corresponde al segundo avance de una investigación que se viene adelantando en el seno de la Universidad Santo Tomás y la Escuela de Ingenieros Militares en el campo de la utilización racional de los explosivos, bajo la coordinación del profesor Álvaro Correa Arroyave. Ambos artículos pueden consultarse in-extenso en la Revista BISTUA de la Universidad de Pamplona bajo las denominaciones indicadas en la bibliografía (1) y (2).

Palabras claves: RMR, Burden, Espaciamiento, Indugel Plus AP, ANFO, Resistencia a tracción dinámica, Roca intacta, Macizo rocoso.

ABSTRACT

Bieniawski's rock mass classification, RMR -Rock Mass Classification- is, together with Barton's Q and Hoek's GSI, the three most frequently used classification systems in many countries including Colombia as an aid to determine several rock mass properties. These characteristics allow predicting the self-supporting times of an underground excavation, as well as its type of support, speed of advance and complexity of construction and based on them determine costs and excavation times of these structures as accurately as possible, and although it is recommended to use the drilling and blasting advance method for rock massifs with RMR of I, II and III, in the literature no direct relationship is found between the RMR and the dimensions of the burden, spacing or the stemming. The results of the research we have been carrying out allow us to propose an expression that considers the dynamic tensile properties of the rock mass; in addition, we are considering the level of explosive load coupling, the dimensions of the tunnel section, its confinement conditions and the RMR in which it is immersed.

This article corresponds to the second advance of a research that is being carried out at the Universidad Santo Tomás and the School of Military Engineers in the field of the rational use of explosives, under the coordination of Professor Álvaro Correa Arroyave. Both articles can be consulted in-extenso in the BISTUA Magazine of the University of Pamplona under the names indicated in the bibliography (1) and (2).

Keywords: RMR, Burden, Spacing, Indugel Plus AP, ANFO, Dynamic tensile strength, Intact rock, Rock mass.

1. INTRODUCCIÓN

De las expresiones citadas por Carlos López Jimeno (3), para la determinación del burden nos hemos detenido en la de Pearse, para la cual Borquez propuso una metodología muy interesante a fin de determinar el Kv (4) y ratifica la necesidad de determinar la resistencia a la tracción dinámica de la roca. En buena medida, esta expresión sirvió de punto de partida para nuestra investigación, considerando parámetros dinámicos del macizo rocoso (no de la roca intacta) a más de otros parámetros asociados con la sección y la profundidad del túnel. Su expresión es la siguiente:

$$B = K_v \cdot 10^{-3} \cdot D \cdot \left(\frac{PD}{RT}\right)^{\frac{1}{2}}$$

El avance en nuestra investigación, particularmente en lo referente a las propiedades dinámicas del macizo rocoso y las condiciones de desacoplamiento de las cargas, así como la validación de los valores de las constantes, nos ha permitido proponer la siguiente expresión, la cual desarrollaremos en el presente artículo.

$$B = \frac{K_A \cdot K_{SRF} \cdot K_{RMRb} \cdot D}{1000} \sqrt{\frac{Pb}{\sigma_{tdmr}}}$$

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las expresiones que gobiernan los diseños de voladura subterránea deben considerar no solo las características de los explosivos y de la roca intacta, sino también las condiciones reales del macizo rocoso y el factor de acoplamiento de las cargas, lo cual hará que dicho diseño sea más eficiente y eficaz, reduciendo los consumos específicos y minimizando los impactos negativos de las voladuras.

3. OBJETIVO

Proponer una expresión que permita calcular el burden, y mediante él, otros parámetros de una voladura subterránea.

4. METODOLOGÍA

Este trabajo de investigación documental se soporta en una metodología de búsqueda en la bibliografía técnica, la cual permitió la identificación de cuatro importantes variables: las características de la roca intacta, las del

macizo rocoso, las del explosivo y los parámetros del túnel relacionados con su sección y profundidad.

5. DESARROLLO DE LA EXPRESIÓN

5.1. Resistencia a la tracción dinámica de la roca intacta

Las propiedades de la roca intacta que influyen en los procesos de perforación y voladura incluyen muy particularmente la densidad, la velocidad de las ondas en ese medio y la resistencia a la compresión y a la tracción, pero muy particularmente la resistencia a la tracción dinámica, propiedad esta última que es bastante difícil de determinar, por lo que se recurrió a una búsqueda bibliográfica, en la que encontramos la siguiente expresión citada por Borquez (4):

$$\sigma_{tdri} = 4,5 \sigma_{teri}$$

Otra expresión, propuesta por Yoandro Diéguez-García et al. (5) determina el límite de resistencia a la tracción dinámica ante cargas explosivas mediante un índice de dinamicidad que modifica la resistencia a la tracción estática de la roca intacta y que está definido con base en la velocidad sónica y el peso unitario de la misma, mediante la relación:

$$[\sigma_{tdri}] = K_{tdri} [\sigma_{teri}] \quad \text{con} \quad k_{tdri} = 3.44 - 0.2 \times 10^{-10} \rho_r V_r^2$$

Nos acogimos a esta expresión tanto para la determinación de la resistencia a tracción dinámica de la roca intacta, como para la del macizo rocoso.

5.2. Resistencia a la tracción dinámica del macizo rocoso

Las propiedades que deben tenerse en cuenta cuando se trata de enfrentar un problema de perforación y voladura de rocas, compete a las propiedades del macizo rocoso, es por ello por lo que nos dimos a la tarea de investigar sobre la forma de determinar la resistencia a la tracción estática del macizo rocoso, a partir de la resistencia a la tracción estática de la roca intacta. Después de una exhaustiva búsqueda dimos con las siguientes expresiones que nos permitieron resolver dicha incógnita (6).

$$\sigma_{temr} = \sigma_{teri} \cdot e^{\left(\frac{RMR-100}{27}\right)}$$

$$\sigma_{tm} = \frac{\sigma_{ci}}{2} \left(m_b - \sqrt{m_b^2 + 4s} \right) \quad \sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b}$$

Para hallar σ_{tdmr} utilizamos la constante k_{tdmr} a partir de la k_{tdri} al considerar la Tabla 1 en la que las

propiedades del macizo rocoso en su densidad y velocidad longitudinal se modificaron en función del valor de su RMR. De esta forma se obtiene el valor de la resistencia a la tracción dinámica del macizo rocoso, mediante la expresión:

$$[\sigma_{tdmr}] = k_{tdmr} [\sigma_{temr}]$$

RMR	Reducción de la ρ_r	ρ_r Kg/m ³	Reducción de la VI	VI m/s	
Granito ρ_r : 2650 kg/m ³		VI: 5250 m/s			
Ia	91-100	5%	2518	5%	4988
Ib	81-90	10%	2385	10%	4725
IIa	71-80	15%	2253	15%	4463
IIb	61-70	20%	2120	20%	4200
IIIa	51-60	25%	1988	25%	3938
IIIb	41-50	30%	1855	30%	3675

Tabla 1. Modificación de la densidad y velocidad longitudinal del macizo rocoso en función de su RMR. Caso de un granito

En la Tabla 2 ilustramos algunas propiedades físico-mecánicas de algunos tipos litológicos de rocas, citadas por González de Vallejo (5), los cuales pueden servir de guía para determinar los parámetros de una voladura eficiente. Este ejercicio lo tuvimos que realizar con estos datos, debido a la dificultad de hallar en la bibliografía colombiana una caracterización tan completa de roca intacta que permitiera el que dichos resultados fueran tenidos en cuenta para realizar el ejercicio válido para nuestro medio.

En todo caso, siempre hemos insistido en el conocimiento de nuestras rocas y nuestros macizos para que de esta forma podamos tener datos más acertados. Se insiste a quien esté interesado en utilizar nuestras expresiones el que comience caracterizando sus rocas, siguiendo la normatividad presentada en el texto Caracterización de Rocas, ensayos de laboratorio, traducido y complementado por Álvaro Correa Arroyave y publicado por la Sociedad Colombiana de Geotecnia, 2013.

Propiedades físico-mecánicas de algunos tipos de rocas									
1. Litología	2. ρ_r	3. σ_{cert}	4. σ_{teri}	5. VI	6. σ_{temr}	7. σ_{temr}	8. K_{tdri}	9. K_{temr}	10. σ_{tdmr}
Arenisca	2450	97,5	13	2800	39,78	13	3,06	3,11	40
Basalto	2800	140	15	5500	26,25	3	1,75	2,73	8
Caliza	2450	100	17	4250	43,35	17	2,55	2,68	46
Cuarcita	2650	260	20	5750	33,8	20	1,69	1,94	39
Diabasa	2900	295	55	6250	64,35	55	1,17	1,5	83
Dolomia	2550	130	15	5500	28,5	15	1,9	2,12	32
Gabro	3050	245	22	5500	34,98	22	1,59	1,86	41
Gneiss	2850	130	13	4300	31,07	13	2,39	2,54	33
Granito	2650	135	16	5250	31,68	9	1,98	2,19	20
Mármol	2700	160	13	4750	28,86	13	2,22	2,4	31
Lutita	2400	30	6	2200	19,26	6	3,21	3,24	19
Pizarra	2600	95	14	4250	35	14	2,5	2,63	37
Yeso	2300	25	2	3500	5,76	2	2,88	2,96	6

Tabla 2. Propiedades físico-mecánicas de algunos tipos de rocas

- litología
- Densidad, ρ_r , Kg/m³
- Resistencia a compresión simple, σ_{cert} , Mpa
- Resistencia a la tracción, σ_{teri} , Mpa
- Velocidad de propagación, VI, m/s
- Resistencia a la tracción dinámica de la roca intacta σ_{tdri} , Mpa
- Resistencia a la tracción estática del macizo rocoso σ_{temr} , Mpa
- Constante de transformación roca intacta, k_{tdri} , kg/m³s²
- Constante de transformación para el macizo rocoso, k_{tdmr} , kg/m³s²
- Resistencia a la tracción dinámica del macizo rocoso σ_{tdmr} , Mpa

5.3. Caracterización del explosivo

El tipo de explosivo y cargue de los barrenos, es el tercer parámetro de importancia en este estudio pues de su Poder de Detonación, función de su densidad y velocidad de detonación, así como de su nivel de acoplamiento, dependerá su poder rompedor. Al respecto, consultamos el Manual para explosivos industriales, INDUMIL, 2018 (7), Tabla 3, a partir del cual tomamos las propiedades de algunos explosivos para realizar un ejercicio que servirá para convalidar los resultados de nuestra propuesta.

TIPO DE EXPLOSIVO					
ANFO		Indugel Plus AP		Emulind-E	
Densidad, g/cm ³	Velocidad m/s	Densidad, g/cm ³	Velocidad m/s	Densidad, g/cm ³	Velocidad m/s
0,85 ± 0,05	3000 ± 300	1,20 ± 0,003	4500 ± 500	1,16 ± 0,06	4600 ± 600

Tabla 3. INDUMIL Características de algunos explosivos, 2018

Las expresiones que permiten tener en cuenta estos parámetros son:

$$PD = 0.25 \cdot \rho_e \cdot VI^2 \cdot 10^{-3} \quad Pb = PD \cdot \left(\frac{\rho_e}{\rho_b}\right)^3$$

5.4. Expresión propuesta

Después de determinar los valores para las propiedades que ingresarían a la expresión buscada, y teniendo en mente que atrás se indicó que habíamos partido de la expresión de Pearse, concluimos que la expresión propuesta es de la forma:

$$B = \frac{K_A \cdot K_{SRF} \cdot K_{RMRb} \cdot D}{1000} \sqrt{\frac{Pb}{\sigma_{tdmr}}}$$

En la cual:

Pb: Presión de barreno, Mpa

σ_{tdmr} : Resistencia a la tracción dinámica del macizo rocoso

ϕ_b : Diámetro del barreno, mm

ϕ_e : Diámetro del explosivo, mm

K_A , K_{SRF} y K_{RMRb} : Constantes para la sección del túnel, su profundidad y la influencia del RMR

5.5. Valoración de las constantes K_A , K_{SRF} y K_{RMRb}

K_A es el indicador del efecto de la sección del túnel sobre los parámetros de diseño de la voladura. Este

parámetro varía entre 1,0 (túneles de sección pequeña) y 1,2 (túneles de gran sección), Tabla 4.

Descripción	Sección del túnel, m ²	Valores de K _A
Túneles de muy pequeña sección	< 20	1,00
Túneles de pequeña sección	20 - 40	1,05
Túneles de mediana sección	40 - 60	1,10
Túneles de gran sección	60 - 80	1,15
Túneles de muy grande sección	> 80	1,20

Tabla 4. Valoraciones del K_A

K_{SRF} es el indicador del efecto de la profundidad, el cual se encuentra directamente relacionado con el estado de confinamiento del macizo rocoso. Su rango varía entre 1,0 (túneles profundos) y 1,3 (túneles superficiales), Tabla 5.

VALORES para K _{SRF}			
Descripción	SRF	Prof. m	Valores de K _{SRF}
Cerca de la superficie	---	0 - 300	1,30
Niveles de esfuerzos bajos	2,5	300 - 600	1,20
Niveles de esfuerzos medios	1,0	600 - 900	1,10
Niveles de esfuerzos altos	0,5	> 900	1,00

Tabla 5. Valoraciones del K_{SRF}

K_{RMRb} corresponde al indicador por el estado del macizo rocoso conforme la clasificación de Bieniawski 1989. Fluctúa entre 1,0 (RMR = I) y 1,10 (RMR = III), Tabla 6.

Descripción	RMRb	Valores de K _{RMRb}	
Macizo rocoso muy bueno	80-100	I	1,00
Macizo rocoso bueno	60-80	II	1,05
Macizo rocoso regular	40-60	III	1,10
Macizo rocoso malo	20-40	IV	N/A*
Macizo rocoso muy malo	0-20	V	N/A*

Tabla 6. Valoraciones del K_{RMRb}
*N/A: No Aplica

Este comportamiento se deduce de innumerables escritos del Profesor Bieniawski y los ratifica el profesor Carlos López Jimeno en su libro Manual de voladuras en túneles (8) el cual fue de obligada consulta en la presente investigación; de dicho texto extraemos la Tabla 7.

Sección del túnel m ²	Número de barrenos por pega	
	Roca Débil*	Roca Dura*
10	23-27	35-50
25	45-50	60-70
50	75-85	95-110

Tabla 7. V Número de barrenos versus sección del túnel y tipo de roca.
*Roca Débil: roca blanda o muy fracturada. Roca Dura: roca muy resistente o masiva

Finalmente, con el burden definido, los coeficientes para el espaciado y el retaque se ilustran en la Tabla 8, así como la longitud de perforación recomendada.

RMRb	I	II	III
β (Constante de espaciado)	0,90	0,95	1,00
ζ (Constante de retaque)	0,60	0,70	0,80
* Longitud promedio recomendada de Avance, m	5-4	4-3	3-2

Tabla 8. Coeficientes para el espaciado y el retaque en función del RMRb
*Para túneles de gran sección

Estos coeficientes fueron definidos después de muchos intentos en los que confrontamos la sensibilidad de los resultados con tablas, gráficas y expresiones (8) que dan cuenta del número de barrenos según algunas variables como sección del túnel, tipo de roca o volabilidad.

5.6. Convalidación de resultados

La convalidación de los resultados hallados según la expresión que venimos de proponer se fundamentó en confrontarlos con algunos datos referenciados en la bibliografía disponible y muy particularmente las gráficas que aparecen en la bibliografía (8), capítulo 4, en el que el autor presenta una serie de gráficas, a partir de las cuales diseñamos las Tablas 9 y 10, así como algunos patrones de voladura citados en la bibliografía después de analizar las características tenidas en cuenta para su diseño.

	Número de barrenos en función de la sección y el diámetro de perforación.						
	Sección						
	<20m ²	20m ²	40m ²	60m ²	80m ²	100m ²	>100m ²
φ = 50mm	26	32	50	63	75	84	88
φ = 40mm	30	37	58	73	87	97	102
φ = 32mm	35	43	67	85	100	112	117

Tabla 9. Número de barrenos versus sección y diámetro de perforación

	Número de barrenos en función de la sección y el tipo de roca.				
	Sección				
	<20m ²	20m ²	40m ²	60m ²	80m ²
Mica Esquistos	40	58	72	78	80
Granitos	35	52	66	70	73
Areniscas	31	47	60	65	66
Pizarra	29	42	55	60	61

Tabla 10. Número de barrenos versus sección y tipo de roca

5.7. Patrones de voladura

En la Figura 1 se ilustran las variaciones que sufren los patrones de voladura según los diversos parámetros en los que se soporta la expresiwn propuesta.

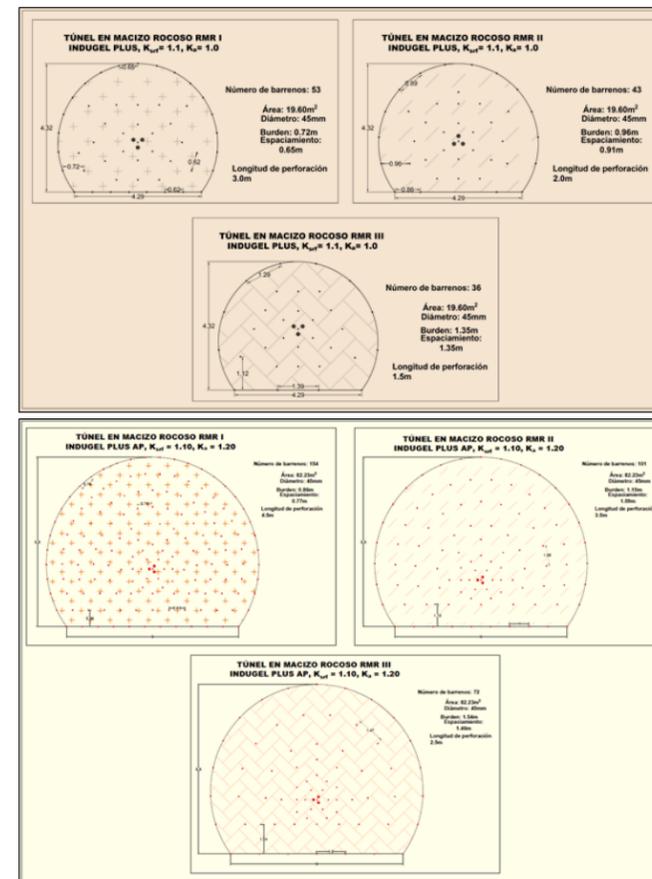


Figura 1. Esquemas de perforación y voladura para diferentes tipos de RMR y secciones de túnel.

6. CONCLUSIONES

La expresión propuesta, la cual demanda de un buen conocimiento del macizo a intervenir, conlleva resultados muy ventajosos para el constructor de túneles al disminuir el número de barrenos y por lo tanto el consumo de explosivos y sus consecuentes efectos adversos, a la vez que disminuye los tiempos de perforación y cargue, así como los costos por perforación y voladura, permitiendo también un buen manejo de los tiempos de retardo.

7. RECOMENDACIONES

Si bien es cierto los análisis realizados en el presente documento se llevaron a cabo para una voladura tradicional con el fin de confrontar el número de barrenos con secciones y tablas disponibles en la literatura técnica, recomendamos que siempre se lleve a cabo el precorte, pues es el único que puede garantizar

un buen perfil, lo cual estaría aumentando el número de barrenos en aproximadamente unos 15, dependiendo del RMR y de la sección; esto es, los barrenos del perfil se estarían multiplicando por 2, aproximadamente.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CORREA A., Álvaro, Jorge RUEDA F. y Fabián RODRÍGUEZ B. (2021). "Expresión propuesta para el diseño de voladuras en túneles de carretera. Caso colombiano". BISTUA Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, Vol.19, No.1, (2021).
- (2) CORREA A., Álvaro y Jorge RUEDA F. (2021). "El RMR y el tipo de explosivo y su incidencia en las voladuras subterráneas". BISTUA Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, Vol.19, No.1, (2021), Artículo invitado.
- (3) LÓPEZ JIMENO Carlos. (1994) "Manual de perforación y voladura de rocas". Instituto Tecnológico GeoMinero de España
- (4) BORQUEZ-PEARSE. Aplicación de Estudios Sobre Factor de Volabilidad - Scribd <https://es.scribd.com/doc/APLICACION-DE-ESTU>. Descargado del internet, junio 2021
- (5) DIÉGUEZ-GARCÍA Yoandro et al. (2013). "Campo tenso-deformacional para voladuras con cordón detonante en el laboreo de túneles". Revista Minería y Geología / v.29 n.3 / julio-septiembre, p. 38-55
- (6) HOEK EVERT. (2000). "Rock Mass Properties". En Practical Rock Engineering
- (7) INDUMIL. (2018). "Manual para explosivos Industriales"
- (8) LÓPEZ JIMENO Carlos. (2010) "Manual de voladuras en túneles". E.T.S.I. Minas - Universidad Politécnica de Madrid, España



CORRELACIÓN POTENCIA DEL EXPLOSIVO Y PROPIEDADES DINÁMICAS DE LA ROCA PARA UNA BUENA VOLADURA

Juan David Moreno Peñuela
Álvaro de la Cruz Correa Arroyave

RESUMEN

El estudio del poder de detonación de un explosivo y su relación con la energía necesaria para romper una roca (o mejor, un macizo rocoso) es de vital importancia para garantizar diseños óptimos y efectos nocivos mínimos generados por la onda explosiva.

En esta investigación se realizó un análisis comparativo para determinar la relación entre la potencia del explosivo y la resistencia dinámica de la roca con el fin de optimizar el consumo energético para una buena fragmentación, esta correlación se basa en estudios que demuestran la relación entre la resistencia a la compresión estática y a la tracción estática utilizados como parámetro indicativo de la aptitud de la roca a la voladura, definida por Hino en 1959 como índice de volabilidad (R_c/R_t) donde R_c = resistencia a compresión uniaxial y R_t = resistencia a tracción de modo que a un mayor valor resultaría más fácil fragmentar la roca [2].

La metodología para correlacionar la potencia del explosivo con la resistencia dinámica, se fundamenta en la recopilación y análisis de estudios que tienen como objetivo identificar parámetros claves a tener en cuenta tales como las propiedades mecánicas de las rocas intactas, antes mencionadas, así como las constantes recomendadas para hallar sus correspondientes características dinámicas para la roca en investigación, y, de esta forma, contrastar dichos parámetros con los datos de la roca investigada, la cual proviene del macizo rocoso de Norcasia: se trata de una cuarcita y un gneis wollastonítico.

Finalmente, se realizó una serie de pruebas de impacto dinámico.

ABSTRACT

The study of the detonation power of an explosive and its relation to the energy required to break a rock (or rather, a rock mass) is of vital importance to ensure optimal designs and minimum harmful effects generated by the blast wave.

In this research, a comparative analysis was carried out to determine the relationship between explosive power and dynamic rock strength to optimize energy consumption for good fragmentation. This correlation is based on studies that demonstrate the relationship between static compressive strength and static tensile strength used as an indicative parameter of the rock's suitability for blasting, defined by Hino in 1959 as the blastability index (R_c/R_t) where R_c = uniaxial compressive strength and R_t = tensile strength, so that the higher the value, the easier it is to fragment the rock [2].

The methodology to correlate the explosive power with the dynamic resistance is based on the compilation and analysis of studies that aim to identify key parameters to be taken into account such as the mechanical properties of intact rocks, mentioned above, as well as the recommended constants to find their corresponding dynamic characteristics for the rock under investigation, and, in this way, to contrast these parameters with the data of the rock under investigation, which comes from the Norcasia rock massif: it is a quartzite and a wollastonitic gneiss.

Finally, a series of dynamic impact tests were performed.

1. INTRODUCCIÓN

En una detonación existe una respuesta química/física seguida de una liberación de energía exotérmica caracterizada por la velocidad del explosivo y la formación de una gran variedad de productos volátiles a elevada temperatura, que logran una gran potencia expansiva que se convierte en presión sobre el área próxima. Tras liberar esta energía de choque, se produce una energía traducida en gases a altas temperaturas; ambas energías generan una presión sobre el macizo rocoso circundante, presión que es aprovechada para fragmentar. A su vez L. Jimeno aclara, que "cuando la intensidad de la onda de choque supera la resistencia dinámica a la compresión $R_c d$, se produce la trituración de la roca circundante a las paredes del barreno por colapso de la estructura intercrystalina" [2], no obstante, este aplastamiento no ayuda a la fragmentación y provoca un desperdicio de energía.

Teniendo en cuenta lo anterior, en las labores con explosivos actúan cargas dinámicas sobre el macizo debido a que varían de cero a un determinado valor en poco tiempo lo cual obliga a considerar la resistencia dinámica; estas energías aumentan, según Rinehart y Persson, con el índice de carga; alcanzando un rango entre 5 y 13 veces superiores a las estáticas. De igual forma vale considerar el uso de la energía de los explosivos como lo estudió Hagan quien sostiene que solamente un 15% de la energía total generada en la voladura es aprovechada como trabajo útil; finalmente, Rascheff y Goemans han establecido que la energía aprovechada del explosivo varía entre el 5% y 50% de la energía total, dependiendo del tipo y la clase de explosivo utilizado [2].

Por lo anterior, es primordial estudiar la interacción de la sustancia explosiva con las propiedades dinámicas de la roca intacta (y las del macizo rocoso), en aras a proporcionar una mejor relación energética para facilitar la fragmentación, lo cual puede contribuir a aumentar la productividad y reducir costos, así como disminuir el impacto ambiental sobre el medio en el cual se desarrollan los trabajos de una voladura, por lo que nos dimos a la tarea de investigar la relación entre la potencia del explosivo y la resistencia dinámica de la cuarcita y el gneis wollastonítico provenientes del macizo rocoso de Norcasia.

2. DESARROLLO TEÓRICO

La investigación aborda dos líneas: la mecánica de roca y los explosivos haciendo un recorrido sobre avances tecnológicos y metodológicos; respecto al primer campo, en líneas generales se puede dividir el efecto sobre una roca, de dos maneras: falla de corte (la cual responde al criterio de ruptura de Mohr-Coulomb o al de Hoek) y falla por tracción bajo carga dinámica (objeto de la presente investigación).

Sin embargo, un macizo rocoso en una obra de ingeniería que está sujeta a un gran esfuerzo de compresión en una dirección, pero permanece libre o bajo un ligero esfuerzo de compresión en la dirección ortogonal, sufre una deformación de tracción lateral sustancial debido al efecto de Poisson. Debido a la baja resistencia a la tracción que presenta el macizo rocoso con respecto a la resistencia a compresión, el daño por tracción durante actividades de ingeniería puede producirse fácilmente [3].

En vista de lo anterior, la rotura de las rocas es un tema que ha despertado el interés general de la comunidad científica teniendo en cuenta que hoy los avances no llegan a una modelación con total precisión que explique el arranque de las rocas para el diseño de voladuras más eficientes. En Cuba por ejemplo investigaciones han dirigido sus esfuerzos en temas de voladura en obras subterráneas al considerar que estas labores tienen algunas particularidades: variabilidad de las condiciones geológicas a medida que se avanza en el frente, exigencias de seguridad, salubridad y un frente de trabajo limitado, entre otras [7].

Las características físico-mecánicas de la roca intacta (y del macizo rocoso) que intervienen en una voladura, son, básicamente:

- Peso unitario de la roca (ρ_0).
- Masa volumétrica (ρ).
- Resistencia a compresión simple estática (σ_c^e).
- Resistencia a tracción estática (σ_t^e).
- Velocidad de las ondas elásticas longitudinales (V_l)

En la que la resistencia dinámica de las rocas ante cargas explosivas, citada por Borovikov y Vaniagil y propuesta por Ionov responde a las siguientes ecuaciones. [6].

Límite de resistencia a tracción dinámica ante cargas explosivas (σ^d).

$$\sigma^d = Kdt * \sigma^e \quad (1)$$

Kdt = coeficiente de dinamicidad a la resistencia a tracción.

σ^e = Resistencia a la tracción estática-Ensayo brasilero.

$$Kdt = 4.81 - 0.97x10^{-11} * \rho_0 * V^2 \quad (2)$$

El límite de la resistencia a compresión y tracción dinámica ante cargas explosivas (σ^d), responde a las ecuaciones propuestas por Ionov, [8].

$$\sigma^d = Kdc * \sigma^e \quad (3)$$

Kdc = coeficiente de dinamicidad a la resistencia a compresión.

σ^e = Resistencia a compresión estática-Ensayo compresión uniaxial.

$$Kdc = 16.38 - 0.9 * 10^{-11} * \rho_0 * V^2 \quad (4)$$

Coeficiente de dinamicidad a la resistencia a tracción (Kd^t), para rocas agrietadas o alteradas por el intemperismo

$$Kdt = 3.44 - 0.2 * 10^{-10} * \rho_0 * V^2 \quad (5)$$

- Para rocas monolíticas no alteradas por procesos de intemperismo:

$$Kdt = 4.81 - 0.97x10^{-11} \rho_0 * V^2 \quad (6)$$

Posteriormente P. Rodríguez [4] realizó una modificación sobre el coeficiente de dinamicidad a la resistencia a compresión (Kdc) para determinar el límite de resistencia a compresión dinámica Ec.3, cuya modificación es la siguiente:

$$Kdc = 16.38 - 0.9 * 10^{-10} \rho_0 * V^2 \quad (7)$$

Kdc = coeficiente de dinamicidad a la resistencia a compresión.

3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ROCA INTACTA

Las muestras de roca que investigamos para el presente trabajo corresponden a rocas metamórficas del tipo cuarcita y gneis con intercalaciones de esquistos cuarzo-micáceos, pertenecientes al complejo metamórfico oriental del norte de Caldas; sus características físico-mecánicas se ilustran, así: cuarcita, Tablas 1 y 2 y gneis, Tablas 3 y 4.

Medidas de dispersión	Resistencia compresión simple estática Rce MPa	Velocidad Sónica (Vl) m/s	Peso unitario (Po) g/cm ³	Módulo de Young (E) GPa
Mediana	172,67	5322,32	2,86	85,27
Moda	-	-	2,85	-
Varianza de la muestra	6202,80	256241,45	0,01	793,88
Desviación Estándar	78,76	506,20	0,09	28,18
Coefficiente de variación	0,44	0,09	0,03	0,33
Número de datos	16	16	16	16
Máximo	325,09	6190,00	3,01	139,42
Mínimo	58,93	4600,38	2,72	30,38
Rango	58,93-325,09	4600,38-6190	2,72-3,01	30,38-139,42
Promedio	179,46	5399,98	2,85	85,15

Tabla 1. Medidas de dispersión ensayo de compresión simple estática velocidad sónica y peso unitario de la cuarcita. Fuente: Propia.

Medidas de dispersión	Resistencia tracción indirecta estática (Rte) MPa	Peso unitario (Po) (g/cm ³)
Mediana	14,31	2,85
Moda	-	-
Varianza de la muestra	28,77	0,05
Desviación Estándar	5,36	0,22
Coefficiente de variación	0,36	0,08
Número de datos	19	13
Máximo	27,19	3,21
Mínimo	6,84	2,52
Rango	6,84-27,19	2,52-3,21
Promedio	14,96	2,84

Tabla 2. Medidas de dispersión ensayo de tracción indirecta estática y peso unitario de la cuarcita. Fuente: Propia.

Medidas de dispersión	Resistencia compresión simple estática (Rce) MPa	Velocidad Sónica Vl (m/s)	Peso unitario Po (g/cm ³)	Módulo de Young (E) GPa
Mediana	204,72	5899,77	2,74	88,61
Moda	-	-	2,72	-
Varianza de la muestra	5730,14	159916,19	0,01	689,27
Desviación Estándar	75,70	399,90	0,09	26,25
Coefficiente de variación	0,34	0,07	0,03	0,29
Número de datos	14	14	14	14
Máximo	391,92	6678,07	3,04	134,94
Mínimo	132,02	5136,79	2,67	47,06
Rango	132,02-391,92	5136,79-6678,07	2,67-3,04	47,055-134,935
Promedio	224,29	5888,05	2,76	89,10

Tabla 3. Medidas de dispersión ensayo de resistencia a la compresión simple estática, velocidad sónica y peso unitario del gneis. Fuente: propia.

Medidas de dispersión	Resistencia tracción indirecta estática (Rte) MPa	Peso unitario (Po) g/cm ³
Mediana	14,37	3,73
Moda	-	-
Varianza de la muestra	43,19	3,13
Desviación Estándar	6,57	1,77
Coefficiente de variación	0,39	0,47
Número de datos	6	2
Máximo	28,29	4,98
Mínimo	10,73	2,48
Rango	10,73-28,29	2,48-4,98
Promedio	16,66	3,73

Tabla 4. Medidas de dispersión ensayo de tracción indirecta estática y peso unitario del gneis. Fuente: propia.

4. PROPIEDADES DINÁMICAS CALCULADAS DE LA ROCA INTACTA

Los datos utilizados para determinar las propiedades dinámicas corresponden a los promedios obtenidos del análisis de medidas de dispersión para cada uno de los ensayos realizados para la cuarcita y el gneis, Tabla 5.

Roca	Peso unitario Po g/cm ³	Velocidad Sónica Vl m/s	Resistencia compresión simple estática Rce MPa	Resistencia tracción indirecta estática Rte MPa
Cuarcita	2,85	5400	179	15
Gneis	2,76	5888	224	17

Tabla 5. Promedio resistencias estáticas a compresión y tracción, peso unitario y velocidad sísmica para la cuarcita y el gneis. Fuente: Propia.

Con los datos de la Tabla 5 se determinan los límites de resistencia dinámica a compresión y tracción, teniendo en cuenta las respectivas ecuaciones. Estos resultados se indican en la Tabla 6.

Roca	Coefficiente dinamicidad a la compresión (Kdc) Ec.7	Coefficiente dinamicidad a la tracción, roca no monolítica o alterada (Kdt) Ec.5	Coefficiente dinamicidad a la tracción, roca monolítica (Kdt) Ec.6	Límite de Resistencia compresión dinámica ante carga explosiva Rcd Ec.3, MPa	Límite de Resistencia a tracción dinámica ante carga explosiva- Rtd (roca alterada), MPa	Límite de Resistencia a tracción dinámica ante carga explosiva Rtd roca sana), MPa
Cuarcita	8,9	1,8	4,01	1600	27	60
Gneis	7,8	1,5	3,9	1745	25	65

Tabla 6. Coeficientes de dinamicidad y límites de resistencia dinámica para la cuarcita y el gneis. Fuente: Propia.

5. POTENCIA DEL EXPLOSIVO

Para el desarrollo de la potencia del explosivo se hizo uso de la metodología adoptada por R. Fernández y J. Pedraza [5]. El desarrollo de esta metodología asocia la potencia del explosivo con los siguientes parámetros:

$$Nex = Qe * \rho * A * Vd \quad (8)$$

- Nex = Potencia explosiva, W.
- Qe = Calor de explosión, J/kg.
- Vd = Velocidad de detonación m/s.
- ρ = Densidad del explosivo, kg/m³.
- A = área de la sección transversal de la carga, m².

Cabe resaltar que el valor Qe, de la expresión anterior corresponde al valor de la potencia absoluta en peso AWS que se encuentra en la guía del explosivista o fichas técnicas de INDUMIL utilizadas en Colombia.

En la Figura 1 se presentan los resultados obtenidos para los materiales explosivos en Colombia y el tipo de explosivo Senatel Magnafrac (Emulsión) y el cordón detonante Cordtex que son explosivos utilizados por el mercado cubano.

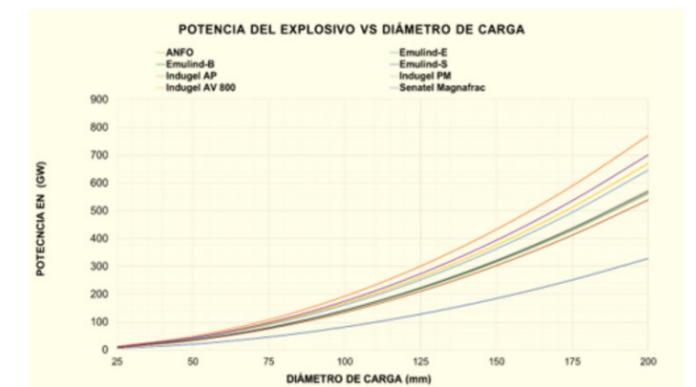


Figura 1. Curva Potencia del explosivo vs diámetro de la carga. Fuente: Propia.

Además, se obtuvo el valor del poder explosivo por medio de las siguientes ecuaciones:

-Fórmula propuesta por R. Fernández y J. Pedraza. [5], que para efectos prácticos se llamará (Pdi):

$$Pdi = Qe * p \quad (9)$$

- Qe = Calor de explosión, J/kg.
- ρ = Densidad del explosivo, kg/m³.
- Pdi = Presión de detonación, Pa.

El valor anterior se contrasta con la siguiente ecuación comúnmente aceptada para el poder de detonación L. Jimeno, J. Pernía, F. Ortiz, E. Jimeno [2].

$$Pd = \frac{Pe * Vd^2}{4} \quad (10)$$

Pd = Presión de detonación, kPa.

Pe = Densidad del explosivo (g/cm³)
Vd = Velocidad de detonación (m/s)

A continuación, se presenta un resumen de propiedades de los explosivos junto con el poder de detonación de L. Jimeno (Pd) y el poder de detonación de R. Fernández y J. Pedraza (Pdi), Tabla 7.

Tipo de explosivo	Poder de detonación (Pd) R. Fernández y J. Pedraza, GPa	Poder de detonación (Pd) López Jimeno, GPa	Peso unitario, g/cm ³	Velocidad de detonación (Vod), m/s	Potencia Absoluta en Peso, J/kg
ANFO	3,17	1,91	0,85	3000	3730000
Emulind-E	4,90	7,88	1,26	5000	3890000
Emulind-B	3,65	7,88	1,26	5000	2900000
Emulind-S	3,88	9,52	1,26	5500	3080000
Indugel AP	4,57	6,13	1,21	4500	3780000
Indugel PM	3,97	6,08	1,20	4500	3310000
Indugel AV 800	4,52	4,80	1,20	4000	3770000
Senatel Magnafrac	3,43	6,94	1,11	5000	3093200
Cordón detonante Cordtex 42 g/m	5,01	17,11	1,62	6500	3093200

Tabla 7. Resumen propiedades de los explosivos. Fuente: Propia.

6. CORRELACIÓN ENTRE PROPIEDADES DINÁMICAS DE LA ROCA Y PODER DE DETONACIÓN

La metodología para correlacionar las características del material explosivo con las propiedades del macizo rocoso, están basadas en los resultados obtenidos para las características dinámicas de diferentes tipos de roca, tomadas de L. González, M. Ferrer, L. Ortuño, C. Otero [1] y del macizo rocoso de Norcasia: se trata de una cuarcita y un gneis wollastonítico.

Estas características se compararon con el poder de detonación del material explosivo de L. Jimeno, J. Pernía, F. Ortiz, E. Jimeno [2], se asume que la carga se encuentra totalmente acoplada al barreno, a su vez, se considera un 20% del poder de detonación, Pd, para correlacionarlo con la resistencia a la tracción dinámica de las rocas σ_t^d .

Los resultados proyectaron que la ecuación que mejor se ajusta al conjunto de valores es de tipo lineal de primer grado, Ecuación 11. La variable dependiente (Y), corresponde al poder de detonación (Pd) y la variable independiente (X), corresponde a la resistencia a tracción dinámica de la roca (Kdt). A su vez la gráfica se dividió en cuatro zonas que interceptan la línea de tendencia de los datos correlacionados, Figura 2.

El conjunto de datos presenta un coeficiente de correlación, R de 0,877 y un coeficiente de determinación, de 0,769.

$$Y = 0,0233x + 0,2635 \quad (11)$$

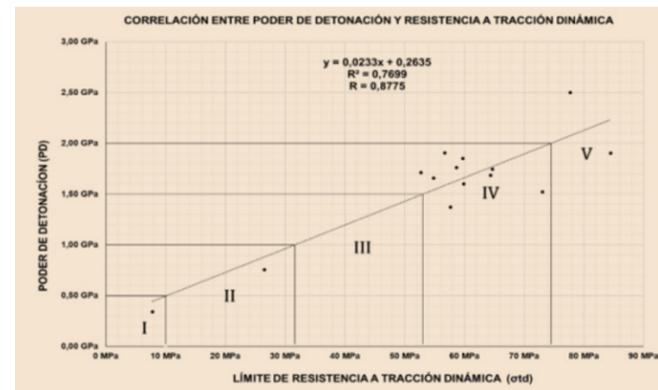


Figura 2. Correlación entre poder de detonación (Pd) y resistencia a tracción dinámica de la roca (Kdt). Fuente: Propia.

zona	rango	[] MPa	Límite de Resistencia a Tracción Dinámica (Kdt)
zona I	rango	[00,00-10,15]	MPa
zona II	rango	[10,15-31,60]	MPa
zona III	rango	[31,60-53,06]	MPa
zona IV	rango	[53,06-74,52]	MPa
zona V	rango	[>74,52]	MPa

Los cuatro grupos por los cuales se dividió la gráfica tienen como objetivo recomendar para cada sección un diferente material explosivo según su poder de detonación y la resistencia a tracción dinámica de la roca, Tabla 8. Para el poder de detonación del explosivo se tomó el 20% puesto que la mayoría de los investigadores aceptan que éste es el porcentaje realmente utilizado en la fragmentación de la roca.

Explosivo	Poder de detonación (Pd) López Jimeno 20%, GPa	Máxima Resistencia a tracción dinámica (Kdt), MPa	Grupo
ANFO	0,52	11	I
Indugel AV 800	0,96	30	I y II
Indugel PM	1,22	41	III
Indugel AP	1,23	41	III
Senatel Magnafrac	1,39	48	III
Emulind-E	1,58	56	III y IV
Emulind-B	1,58	56	III y IV
Emulind-S	1,90	70	IV
Cordón detonante Cordtex 42 g/m	3,42	136	V

Tabla 8. Poder de detonación, resistencia a tracción dinámica y grupo según el tipo de explosivo. Fuente: Propia.

7. ENSAYO DE IMPACTO DINÁMICO

El ensayo consta de una esfera de acero con un peso conocido que se deja caer libremente a una distancia (x) sobre una muestra de roca con unas dimensiones y peso conocidos, con el fin de aplicar las fórmulas de

caída libre y conocer la energía de impacto que genera un fracturamiento en la roca.

Materiales del ensayo

1. Esfera de acero de 0,445 kg y un diámetro de 48 mm, la esfera fue tomada del ensayo de abrasión de la máquina de los ángeles (Ensayo para medir degradación del agregado grueso) ASTM C 131.
2. Escala para medir la distancia (x) desde la muestra hasta la esfera de acero.
3. Cámara fotográfica para evidenciar el comportamiento de las muestras con cada impacto.
4. Flexómetro o pie de rey para medir las dimensiones de la muestra.

Procedimiento del ensayo

1. Medir las dimensiones de la muestra y realizar su descripción analizando: tipo de roca, familia a la que pertenece, etc.
2. Pesar la muestra de roca y la esfera.
3. Ubicar el centro geométrico sobre la cara de la muestra que se fallara.
4. Ubicar la esfera a una altura determinada y tomar registro de la altura.
5. Dejar caer la esfera de la altura determinada.
6. Inspeccionar la muestra luego del impacto de la esfera.
7. Realizar registro fotográfico de la muestra fallada.

Consideraciones del ensayo

Las pruebas se realizaron situando la muestra de roca sobre una superficie nivelada de concreto cepillado; la altura inicial de la cual se dejó caer la esfera es de 30 cm y se incrementa de 10 en 10 cm; la prueba continuaba si la muestra no presentaba grietas visibles o su destrucción. A continuación, se muestra un esquema del ensayo, Figura 3.

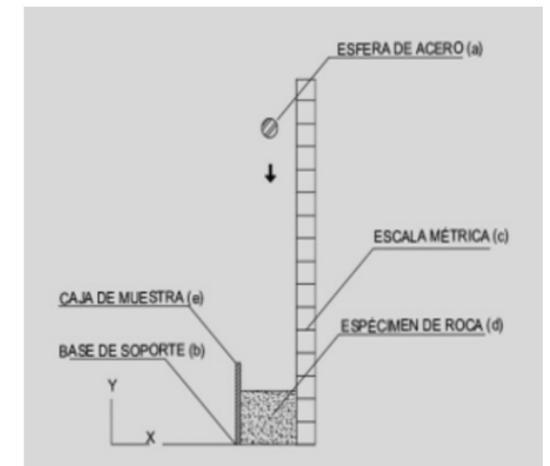
El objetivo del ensayo es medir la energía de impacto que es capaz de resistir la muestra de roca sometida al golpe sucesivo de la esfera de acero a alturas diferentes. Para hallar la energía de impacto se recurre a las ecuaciones de caída libre:

$$V_f = V_o + gt \quad (12)$$

$$V_f^2 = V_o^2 + 2gh \quad (13)$$

$$h = V_o t + \frac{gt^2}{2} \quad (14)$$

El ensayo se realizó sobre seis muestras diferentes, la muestra 1, 2 y 3 corresponden a rocas sedimentarias de tipo arenisca, la muestra 4 y 6 corresponden a rocas ígneas de tipo granito y la muestra 5 corresponde a una roca metamórfica de tipo cuarcita.



Esfera de acero de 0,445g (a), base de soporte nivelada (b), Escala para medir altura de caída (c), Muestra de roca ensayada (d), caja para la muestra (e).

Figura 3. Esquema ensayo de impacto dinámico. Fuente: Propia.

A continuación, se presenta la energía de impacto para cada una de las muestras del ensayadas, Figura 4.

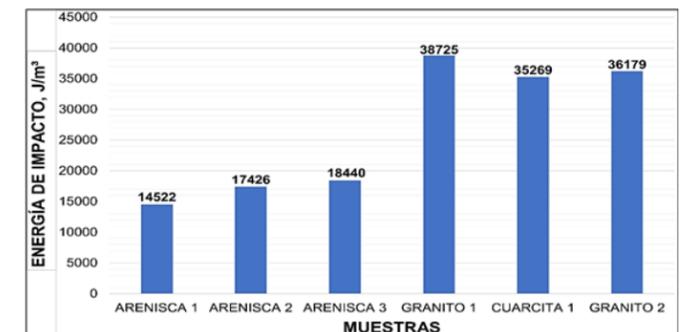


Figura 4. Energía de impacto por metro cúbico de cada muestra. Fuente: Propia.

De igual forma se presenta la altura a la cual se fracturó la roca, Figura 5.

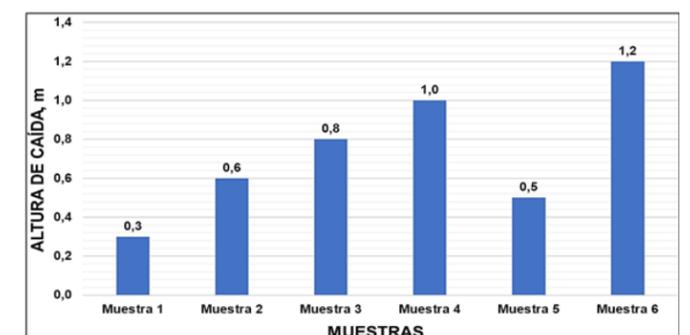


Figura 5. Altura de caída de la masa sobre la muestra. Fuente: Propia.

8. CONCLUSIONES

Se identificó que para el gneis del macizo rocoso de Norcasia el valor de resistencia dinámica a tracción corresponde a 3,9 veces la resistencia a tracción indirecta con un valor de 65 MPa para roca sana y para la cuarcita del macizo de Norcasia el valor de resistencia dinámica a tracción corresponde a 4 veces la resistencia a tracción indirecta con un valor de 60 MPa para roca sana.

Se identificó que la resistencia dinámica a compresión para el gneis del macizo rocoso de Norcasia es de 7,8 veces la resistencia estática a compresión con un valor de 1,7GPa y para la cuarcita la resistencia dinámica a compresión es de 8,9 veces la resistencia estática a compresión con un valor de 1,6 GPa. Estos valores concuerdan con el rango citado por Rinehart y Persson que consideran que el valor de la resistencia dinámica se encuentra en el rango de 5 a 13 veces la resistencia estática [2].

El factor de correlación entre el poder de detonación (Pd) y la resistencia a tracción dinámica de las rocas (Kdt), está representado por la ecuación lineal de primer grado:

$Y = 0,0233 X + 0,2635$. La variable dependiente (Y), corresponde al poder de detonación (Pd) y la variable independiente (X), corresponde a la resistencia a tracción dinámica de la roca (Kdt), el conjunto de datos presenta un coeficiente de correlación positivo, R de 0,877 y un coeficiente de determinación, de 0,769.

Al considerar el tipo de material explosivo se recomienda seleccionar un explosivo cuya onda de choque sea igual o inferior a la resistencia dinámica, para evitar una pérdida de energía; al iniciar la acción del material explosivo la roca es sometida a una acelerada compresión circular que a su vez desarrolla tensiones tangenciales de tracción al encontrarse una junta abierta rellena de aire o una cara libre. Dicha onda al ser reflejada representa la fragmentación de la roca debido a su baja resistencia a tracción; por ello al comparar el poder de detonación de los explosivos (Pd) L. Jimeno [2], el ANFO alcanza un valor de Pd = 1,91 GPa el cual corresponde al valor más cercano al límite de resistencia dinámica compresión del macizo rocoso, debido a que en el macizo rocoso de Norcasia el gneis tiene un valor de resistencia a compresión

dinámica de 1,6 GPa y de 1,75 GPa para la cuarcita, sin embargo si consideramos un 20% del poder de detonación el Emulind E, Emulind B y Emulind S serían los más adecuados como lo demuestra el grupo de uso para la correlación, ver tabla 8. Este valor de poder de detonación puede variar con el aprovechamiento de la energía del explosivo para ello se recomienda realizar pruebas en campo para determinar el grado de aprovechamiento energético del mismo, así como la interacción del explosivo con las discontinuidades del macizo rocoso y evitar disminución en la energía del explosivo.

Se realizó una serie de ensayos para determinar la resistencia de una muestra de roca a un impacto dinámico, obteniendo resultados que representan la energía por metro cúbico (J/m^3) que resiste el material a una carga dinámica. Sin embargo, se necesita profundizar en la mecanización y mejora de la propuesta, así como la obtención de mayor número de datos para para conocer en detalle su comportamiento. De igual manera se recomienda utilizar cámaras de alta velocidad para estudiar la propagación de fisuras ante la acción repetida de cargas dinámicas.

REFERENCIAS

- [1]. L. González. M. Ferrer, L. Ortuño, C. Otero. (2002). Ingeniería Geológica, vol 1. Pearson Prentice Hall, pp. 153-430. Madrid
- [2]. L. Jimeno, J. Pernía, F. Ortiz, E. Jimeno. (2002). Manual de Perforación y Voladura de Rocas: ETIMSA, pp.180-250. Madrid
- [3]. N. Wu, Z. Zhu, Y. Zhou, S. Gao. (2018). A Comparative Study on Rock Properties in Splitting and Compressive Dynamic Tests. Hindawi. Shock and Vibration, vol.2018, ArticleID 2861537, 12 pages. Disponible: <https://doi.org/10.1155/2018/2861537>
- [4]. P. Rodríguez, (2015). Diseño de Voladuras de Cargas Compactas en Rocas Calizas. Sexta Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias'2015. (p.1-8). Cuba: MIN7-P11. Cuba: MIN7-P11
- [5]. R. Fernández, J. Pedraza. (2012). Propuesta de fórmula y método para la expresión de la potencia explosiva. Minería y Geología. [en línea]. v.28 n.4, pp. 72-86. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223524909005>
- [6]. S. Romero. (2003). "Criterios para el Diseño de Voladuras en el Laboreo de Excavaciones Subterráneas", PhD. Tesis, Depto. Minería, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba.
- [7]. S. Romero, J. Batista. (2005). Mecanismo de rotura de las rocas en el cuele en cuña. Minería y Geología. [en línea]. v.24. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223516052002>
- [8]. Y. Diéguez. (2014). "Metodología para el Diseño de Voladuras de Contorno en el Laboreo de Excavaciones Subterráneas Horizontales". PhD. Tesis, Depto. Minería, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba

DISEÑO ÓPTIMO DE VOLADURAS EN TÚNELES Y GALERÍAS DE MEDIANA A GRAN SECCIÓN EN MACIZOS ROCOSOS COLOMBIANOS

Luis Humberto Pinto Morales
María del Carmen Fuentes Fuentes
Álvaro de la Cruz Correa Arroyave

RESUMEN

El presente artículo describe el diseño de un frente subterráneo a partir de un cuele cilíndrico simétrico de cinco secciones, utilizando cuatro barrenos quemados dispuestos en rombo, demostrando su aplicabilidad en túneles y galerías de mediana y gran sección en rocas de resistencia media a dura (rango 55 a 110 MPa, y 110 a 220 MPa según la Clasificación Ingenieril de Rocas de Deere y Miller, 1966) de origen ígneo, sedimentario y metamórfico. Se utilizan las expresiones propuestas por investigadores como Langefors, Kihlström (1963), Holmberg (1982), Olofsson (1990), Konya (1995) y Persson (2001), entre otros. Se presenta, finalmente, un diseño aplicado por la compañía PetroBlast S.A.S., en más de 3000 voladuras.

Palabras clave: Voladuras, vibraciones, espectro principal de velocidad relativa, velocidad pico de partículas.

ABSTRACT

This paper describes a design of a underground face from a five-section symmetrical cylindrical burn cut, using four burned holes arranged in rhombus, demonstrating its applicability in tunnels and galleries of medium and large section in hard and competent rocks, of igneous, sedimentary and metamorphic origin. The expressions proposed by researchers such as Langefors, Kihlström (1963), Holmberg (1982), Olofsson (1990), Konya (1995) and Persson (2001), among others, are used. Finally, a design applied by PetroBlast S.A.S. in more than 3000 blasting operations is presented.

Keywords: Blasts, vibrations, relative speed main spectrum, peak particle velocity.

1. INTRODUCCIÓN

Los cueles y barrenaciones son fundamentales en todos los frentes de desarrollo subterráneo que, por lo general, no cuentan con una cara libre, y se utilizan métodos de excavación con el uso de explosivos por medio de una abertura en el terreno sólido, generalmente en el centro de la cara a una profundidad tal que permita el avance efectivo del disparo. Esta abertura, conocida como "cuele o cuña", conforma la parte más importante de una voladura subterránea. Por esta razón, se realizan cálculos enfocados a obtener un diseño óptimo de una cuña práctica y sencilla de utilizar en rocas de resistencia media que son las que más abundan en la geología colombiana, (Barkley R. C. et al., 1983).

Un cuele está definido como la zona de mayor energía de un frente subterráneo, cuya función es generar una cara libre la cual desconfina el frente dando alivio y salida a las demás secciones que conforman el frente del túnel: el contra cuele, la destroza (producción), el contorno (hastiales y techo) y el piso (zapateras, pateros), complementan las secciones en las que se dividen los frentes de arranque, Figura 1.

EN ENAEX COLOMBIA CONTAMOS CON SOLUCIONES INTEGRALES PARA LA FRAGMENTACIÓN DE ROCA

**Mejoramos los indicadores de desempeño,
rendimiento, seguridad y económicos en la
operación con uso de explosivos comerciales.**

SERVICIOS

- Acompañamiento legal para la gestión de cupo de explosivos.
- Gestión de cupo de explosivos y sustancias químicas controladas (Plasma 4TH®).
- Gestión de compra y suministros de explosivos y accesorios de voladura.
- Gestión de transportes y escoltas para el movimiento de explosivos.
- Administración y control de material explosivo.
- Servicios de voladura en cielo abierto y operación subterránea (diseño, cargue y optimización).
- Operación de equipos de cargue mecanizado para Canteras UBC.
- Perforación a Cielo Abierto.
- Modelamiento, predicción y control de fragmentación, vibraciones, onda aérea y fly rocks.
- Dronex.
- Blast Site Watch.
- Accesorios para optimización de uso de explosivos MTI.

SOMOS EL MEJOR ALIADO PARA LA EJECUCIÓN DE SUS PROYECTOS

PRODUCTOS

- Detonadores Electrónicos Davey Bickford®
 - Underground - UG
 - Openpit - OP
 - Superpit - SP
 - Butterfly
- Plasma 4TH®



Nos sentimos orgullosos en ser la primera compañía en pertenecer a la Asociación Colombiana de Profesionales en Explosivos y Voladura - ACPEV

SEGMENTOS

-  Infraestructura & Obras Civiles
-  Minería Subterránea
-  Minería Superficie
-  Canteras

Si desea conocer más sobre nuestros productos y servicios comuníquese con nosotros:

+57 1 704 7876

atencionalcliente.colombia@enaex.com



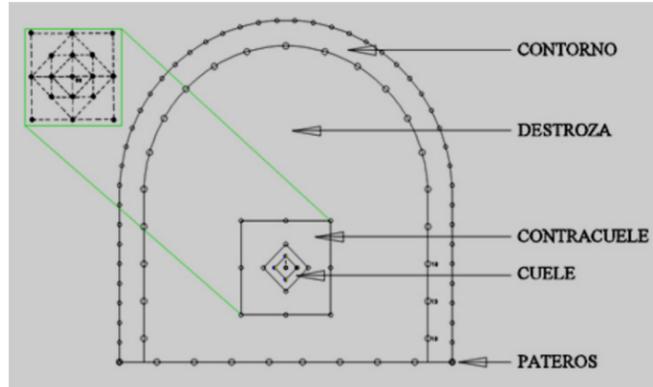


Figura 1. Zonas que conforman el frente de una voladura en sección completa.

Los cueles cilíndricos con una cuña simétrica de cinco secciones que se presentan en esta investigación, fueron aplicados en la excavación de túneles viales y galerías tanto mineras como viales e hidroeléctricas de mediana a gran sección. Las secciones medias van de los 12 a los 30 m² y las grandes estarían por encima de los 30 m². Los diámetros de perforación varían entre los 27 y los 51 mm según la sección del túnel y el tipo de roca a excavar. Igualmente, los barrenos de alivio o rimados para cueles cilíndricos varían de 3" a 3,5" y 4", Figura 2.

DIÁMETROS	SECCIONES	SISTEMAS DE PERFORACIÓN
27 - 40 mm	<10 m ²	
35 - 45 mm	10-30 m ²	
38 - 51 mm	> 30 m ²	

Figura 2. Diámetros de perforación, según las áreas a excavar y sistemas de perforación típicos.

2. METODOLOGÍA

En esta investigación se determinaron los sitios de ubicación y tipo de cueles según las características de las rocas, luego se seleccionaron los diseños del mismo a emplear, posteriormente se efectuaron los cálculos, escogiendo los parámetros para los diseños que más adelante serían aplicados en las voladuras efectuadas,

(Bollinger G.A., 1971; Scherpenisse, Carlos & Adamson, W.R. 2004; Dowding C.H., Murray P.D. & Amatzidis D.K., 1981, Cunningham, C.V.B. & Goetzche, A. F. 1996, Pinto Morales, L. H. & Fuentes, M.C., 2000, 2007, 2008, 2013, 2017, 2021). Los métodos de cuele corresponden a las formas de efectuar el disparo en la primera fase para crear la cavidad de corte; ellos pueden ser, Figura 3:

1. Cueles con barrenos en paralelo.
2. Cueles con barrenos en ángulo o en diagonal, (en V y en abanico).

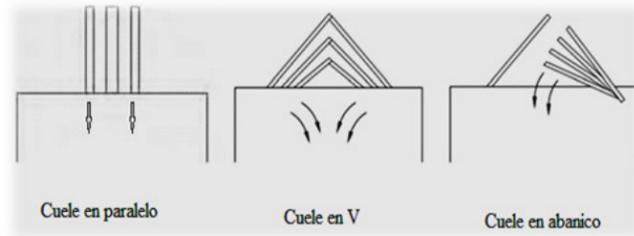


Figura 3. Tipos de cueles más comunes.

El cuele se puede posicionar en diferentes áreas del frente del túnel, en función de la calidad de la roca, (Edwards A.T. & Northwood T.D., 1960). Si la roca es homogénea, por lo general el cuele se localiza en el centro y puede ser un corte simétrico inferior o un corte simétrico superior.

Las principales posiciones de los cueles son:

1. A un costado
2. Con simetría inferior
3. Con simetría superior. Esta posición es la más frecuente, debido a la configuración de la pila de escombros que se obtiene y al grado de fragmentación. En general, una posición baja del cuele, genera menos proyecciones, una granulometría más gruesa y una cantidad abundante de roca volada más compacta, Figura 4.



Figura 4. Posiciones de cueles.

El corte se realiza escalonado por tajadas horizontalmente variables de acuerdo con las condiciones de la roca y con la experiencia lograda en diversas aplicaciones en túneles de la región. El esquema básico para el tipo de cortes se resume en la Figura 5.

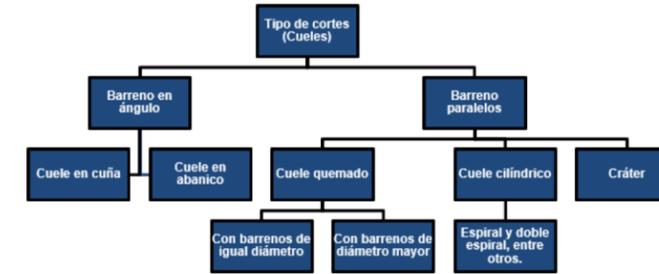


Figura 5. Tipos de cueles según el corte.

El corte con barrenos paralelos, es el que se seleccionó para efectuar los cálculos y el diseño expuesto en la presente investigación.

2.1 CORTE O CUELE QUEMADO

Está conformado por un grupo de perforaciones de igual diámetro, ubicadas a distancias cercanas entre sí, con distintos esquemas de distribución. Algunos de estos barrenos no contienen carga explosiva (huecos vacíos), de modo que actúan como caras libres para dar alivio a los demás barrenos que detonan. El diseño más simple es el de un rombo con cinco barrenos, cuatro vacíos en los vértices y uno cargado al centro, Figura 6a. Sin embargo, para rocas frágiles o plásticas se emplea la configuración de la Figura 6b.



Figura 6. a) Cuele quemado; b) Cueles para rocas frágiles o plásticas.

2.2 CORTE O CUELE CILÍNDRICO

El cuele cilíndrico se considera como un perfeccionamiento del cuele quemado, (Barton, N. & Hansteen, H. 1979). Este tipo de corte mantiene distribuciones similares a las del corte quemado, pero con la diferencia que incluye uno o más barrenos

centrales vacíos de mayor diámetro que los adyacentes cargados, lo que facilita la creación de una cara libre, por la salida escalonada de estos barrenos, y, por lo general, permite mayores avances.

En este tipo de arranque, el burden (B_1 + distancia entre los grandes barrenos vacíos y el más próximo cargado), es muy importante y se puede estimar por la siguiente expresión $B = 0,7 \cdot D$ (D: diámetro del barreno central -45 mm-). Una regla práctica indica que la distancia entre barrenos debe ser de 2,5 veces el diámetro. Los barrenos se perforan con brocas escariadoras acopladas al mismo varillaje de perforación del frente, habitualmente con jumbos dotados con ayudas automáticas que garantizan su paralelismo.

El cuele de cuatro (4) secciones es un tipo de cuele cilíndrico incluido en el método sueco, empezó por ser un método empírico de diseño de voladuras subterráneas y es empleado para túneles de sección superior a 10 m². Este tipo de cuele de barrenos paralelos fue establecido en Suecia, por Langefors y Kihlström (1963), finalizado por Holmberg (1982), simplificado por Olofsson (1990) y renovado por Persson et al, (2001).

Al igual que el cuele quemado el diseño más simple es el de un rombo con cinco (5) barrenos, cuatro (4) vacíos en los vértices y uno (1) cargado en el centro (en este nos centraremos en la presente investigación), pero con barrenos vacíos de mayor diámetro (3", 3.5" y 4"), lo cual es una combinación entre cuele quemado y cilíndrico, Figura 7a y Figura 7b.



Figura 7. a) Cuele cilíndrico; b) Tipos de cueles cilíndricos más comunes

3. RESULTADOS

Aplicando el método tradicional para cueles quemados o cilíndricos de cuatro (4) secciones, recomendados por Langefors y Kihlström (1963) y realizando los cálculos comparativos del cuele cilíndrico de cuatro (4) o cinco (5) secciones y cuatro (4) barrenos rimados (vacíos), de 4" en rombo, se utilizarían las siguientes expresiones, Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3.

Sección No.	Burden (B)	Cut Radius (R)	Cut Size (X)	S. Length
1	$B_1 = 1.5D_0$	$R_1 = B_1$	$X_1 = \sqrt{2}B_1$	R_1
2	$B_2 = \sqrt{2}B_1$	$R_2 = \frac{\sqrt{2}}{2}R_1 + B_2$	$X_2 = \sqrt{2}B_2 \times 1.5$	$\frac{\sqrt{2}}{2}R_1$
3	$B_3 = \sqrt{2}B_2 \times 1.5$	$R_3 = \frac{\sqrt{2}}{2}R_2 + B_3$	$X_3 = \sqrt{2}B_3 \times 1.5$	$\frac{\sqrt{2}}{2}R_2$
4	$B_4 = \sqrt{2}B_3 \times 1.5$	$R_4 = \frac{\sqrt{2}}{2}R_3 + B_4$	$X_4 = \sqrt{2}B_4 \times 1.5$	$\frac{\sqrt{2}}{2}R_3$

Tabla 1. Fórmulas para el cálculo de las secciones de un cuele cilíndrico.

Sección No.	1	2	3	4
B	0,153	0,216	0,459	0,973
R	0,153	0,324	0,688	1,459
Sc	0,216	0,459	0,973	2,063
T	0,153	0,108	0,230	0,487
REVISE $Sc \geq \sqrt{L}$	$Sc \geq 1,9m$	$Sc \geq 1,9m$	$Sc \geq 1,9m$	$Sc \geq 1,9m$

Tabla 2. Cálculo de las secciones de un cuele cilíndrico.

Sección	Burden	Lado (Sc)
1	$B_1 = 1.5DH$ 1.50DH 304,8	$Sc_1 = \sqrt{2}B_1$ 2.12DH 431.1
2	$B_2 = \sqrt{2}B_1$ 2.12DH 431.1	$Sc_2 = \sqrt{2}B_2 + 1.5$ 4.50DH 914.4
3	$B_3 = \sqrt{2}B_2 + 1.5$ 4.50DH 914.4	$Sc_3 = \sqrt{2}B_3 + 1.5$ 9.54DH 1939.7
4	$B_4 = \sqrt{2}B_3 + 1.5$ 9.54DH 1939.7	$Sc_4 = \sqrt{2}B_4 + 1.5$ 20.23DH 4114.8
5	$B_5 = \sqrt{2}B_4 + 1.5$ 20.23DH 4114.8	$Sc_5 = \sqrt{2}B_5 + 1.5$ 43.00DH 8728.8

Tabla 3. Cálculo del burden y el Lado por el método tradicional recomendado por Langefors, Kihlström (1963) y Konya (1995).

Comparando el cuele calculado por el método tradicional para cuatro barrenos de 4" en rombo, con los mismos cuatro barrenos vacíos de 4" ($D_H = 203,2$ mm), por el método simétrico utilizando un burden, $B_1 = 0.30$ m, se obtuvieron en los cálculos, por el método tradicional para cueles con cuatro barrenos de gran diámetro (4"), para las secciones 4 y 5, valores no aplicables en un frente de túneles de gran sección, y mucho menos aplicables a secciones de mediana y pequeña sección, pues el área del cuele supera el 20 % del área del frente del túnel, lo cual no es aplicable, Figura 8 y Tabla 4.

En el caso del cálculo del cuele con cuatro (4) barrenos vacíos en rombo de 3", el lado (Sc), de la cuarta sección mide 3,08 m, y el de la quinta sección, 6,546 m; es por esta razón que se optó por el cálculo de la cuña simétrica, de cuatro (4) barrenos vacíos de 4" en rombo, la cual puede presentar un consumo específico (Sc, kg/m³), un poco más elevado. Sin embargo, la recomendación es aplicable a frentes con rocas duras y competentes. Técnicamente, los cálculos recomendados serían aplicables para cueles paralelos cilíndricos con una única perforación vacía central de gran diámetro.

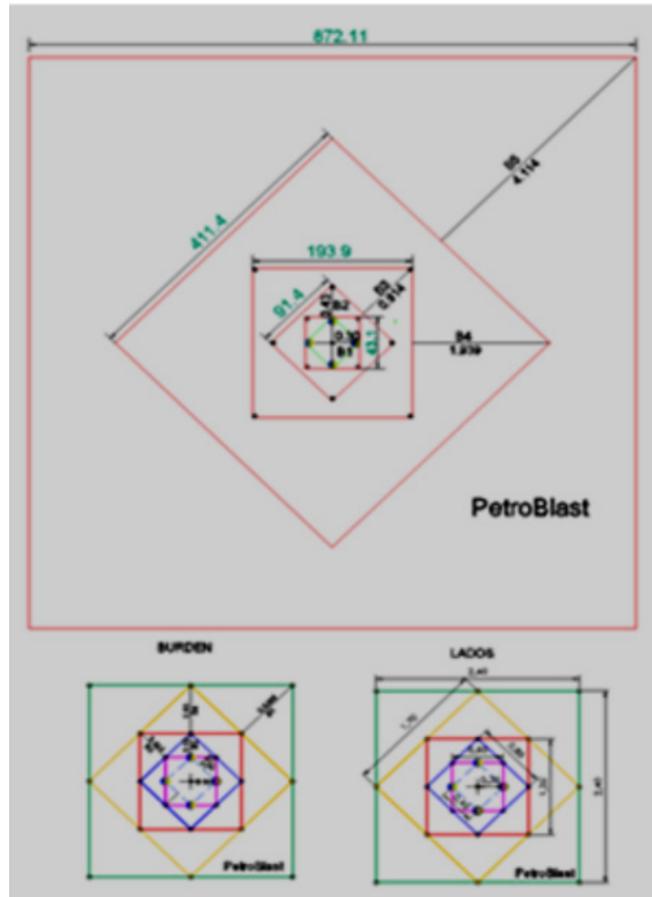


Figura 8. Diferencia del lado (Sc), entre el cuele calculado por el método tradicional y el cuele simétrico de cinco (5) secciones.

Ø taladro de alivio: 3 pulg.		D _H : 152,4mm				
Burden	1	2	3	4	5	
B	228,6	323,3	685,8	1454,8	3086,1	
Sc	323,3	685,8	1454,8	3086,1	6546,6	

Ø taladro de alivio: 3½ pulg.		D _H : 177,8mm				
Burden	1	2	3	4	5	
B	266,7	377,2	800,1	1697,3	3600,5	
Sc	377,2	800,1	1697,3	3600,5	7637,7	

Ø taladro de alivio: 4 pulg.		D _H : 203,2mm				
Burden	1	2	3	4	5	
B	304,8	431,1	914,4	1939,7	4114,8	
Sc	431,1	914,4	1939,7	4114,8	8728,8	

Tabla 4. Cálculo de cuele cilíndrico de cinco (5) secciones por el método tradicional para diferentes diámetros de barrenos vacíos (3", 3.5" y 4" pulgadas).

El diseño del cuele simétrico cilíndrico de cinco (5), secciones con barrenos de alivio de 4" en rombo, para túneles de mediana y gran sección, parte del cálculo del primer burden B1, el cual se calcula a través de diferentes expresiones; seguidamente se proyectan líneas entre centros de cuadros y rombos hasta llegar a la quinta sección, Figura 9 y Figura 10.

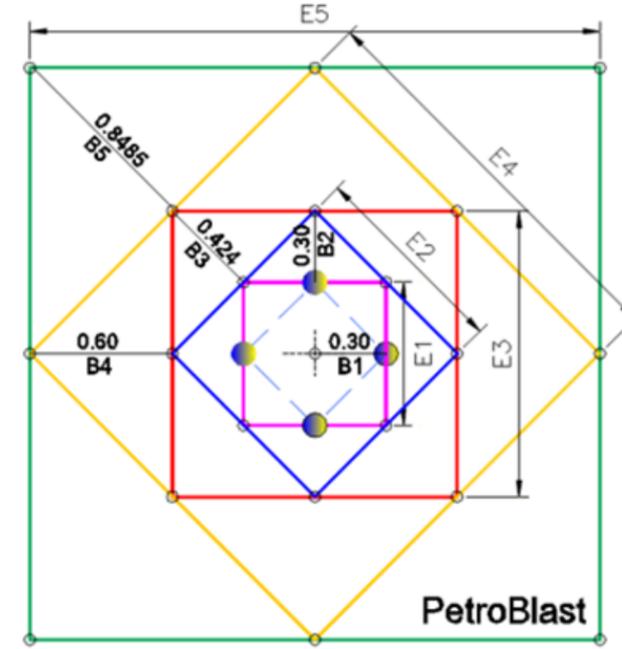


Figura 9. Diseño del cuele de cuatro (4) barrenos en rombo de 4".

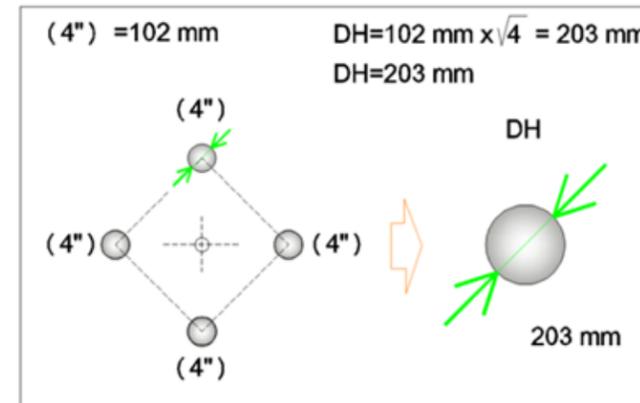


Figura 10. Diseño del cuele de cuatro (4) barrenos en rombo de 4".

La distancia entre centros de la perforación vacía de gran diámetro y el barreno cargado más próximo se calcula según la expresión:

$$L = 0,7 \cdot \text{diámetro de taladro cargado}$$

$$L = 0,7 \cdot 0,45 \text{ mm} = 0,31 \text{ m}$$

Luego, los cálculos se realizan por simetría hasta llegar a la sección 5.

El cálculo del burden (B_1) y la concentración lineal de carga para un diámetro equivalente, ($D_H = 203$ mm), utiliza las Figura 11 y Figura 12.

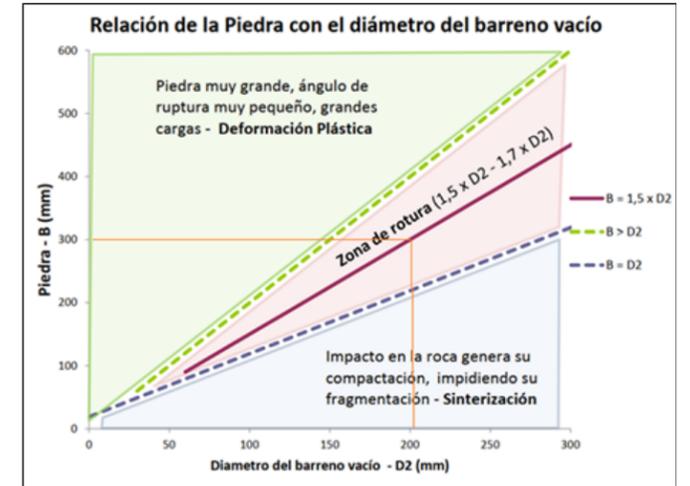


Figura 11. Relación del burden con el diámetro del barreno de expansión, (López Jimeno, Carlos, 2004).

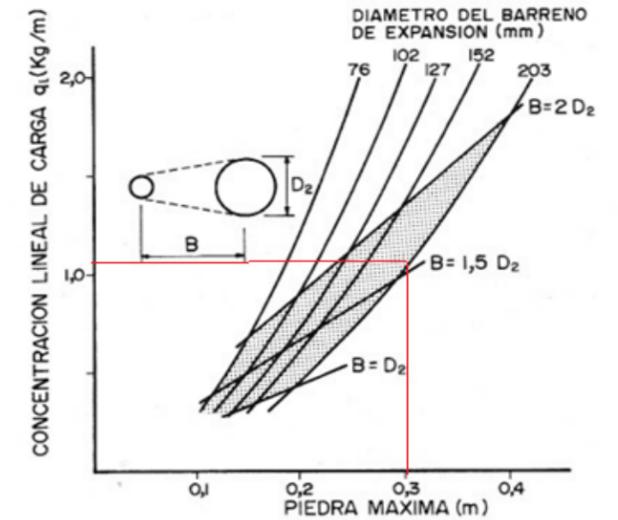


Figura 12. Relación entre la concentración lineal de carga y el burden máximo para diferentes diámetros de barrenos de expansión, (Taylor & Francis Group, 2013).

El diseño parte del cálculo del primer burden, B1, el cual se obtiene según la distancia entre centros de los barrenos grandes vacíos, (en este caso cuatro (4), de 4"), y el más próximo cargado, que en nuestro caso es de 45 mm cargado con Emulind E, de 38 mm. Para lograr la salida secuenciada del cuele se utilizan tiempos de retardo de corto periodo tipo MS, por lo general, utilizando el MS1 (25 milisegundos) al MS10 (300 milisegundos). En la Tabla 5 y Figura 13, Figura 14, Figura 15 y Figura 16 se encuentran las dimensiones del burden y del lado de la cuña calculados.

Sección	1	2	3	4	5
B	0,21	0,30	0,42	0,60	0,85
Sc	0,60	0,85	1,20	1,70	2,40

Tabla 5. Cálculo del burden y lado de la sección.

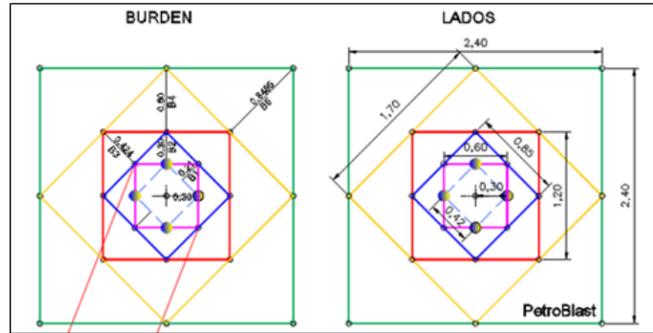


Figura 13. Generación de ondas por voladuras.



Figura 14. Zona de energía y expansión en la detonación de un barreno.

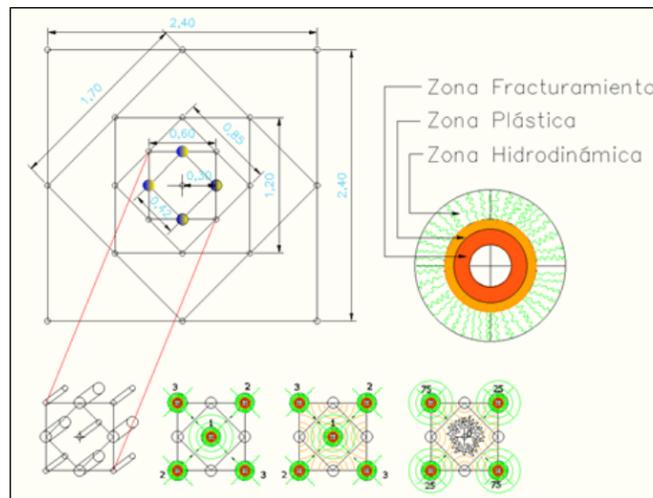


Figura 15. Secuencia de detonación de barrenos cargados en el cuele.

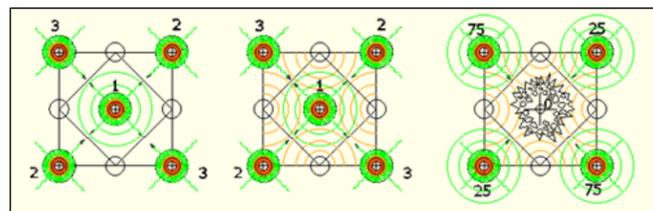


Figura 16. Detalle de la generación de ondas y rompimiento que se presenta entre barrenos secuenciados, en milisegundos.

4. APLICACIONES

A continuación, se muestran dos aplicaciones de la detonación del barreno central con mayor carga y longitud, generando ondas de compresión y tracción reflejadas en los barrenos vacíos. Los tiempos de detonación secuenciados y cruzados de las esquinas de cada sección permiten que la roca fragmentada desaloje y se proyecte hacia el frente de la cara libre, dejando espacios que permiten la salida subsecuente de las demás secciones del cuele y contra cuele, Figura 17, Figura 18, Figura 19 y Figura 20 (aplicación 1) y Figura 21, Figura 22 y Figura 23 (aplicación 2).

4.1 TÚNEL DE PASO VIAL DE CALZADA ÚNICA (PASO DE VEHICULOS EN LOS DOS SENTIDOS) APLICACIÓN 1

Las características de la roca y del diseño de la voladura son las siguientes: macizo rocoso tipo I, Roca: gneis, RUC > 120 Mpa; $\rho_r = 2,9 \text{ Ton/m}^3$; $V_p = 4500 \text{ m/s}$. Sección del túnel: 6,5 m x 7,0 m; longitud de perforación: 3,2 a 3,5 m; diámetro de perforación: 51 mm; explosivo: Emulind E de 38 mm; barrenos vacíos de 4 pulg, perforados en rombo; recorte perforado a 0,3 m de distancia entre barrenos; retardos tipo Nonel MS (cuña y parte de la destroza) y LP (destroza y recorte), toda la enumeración.

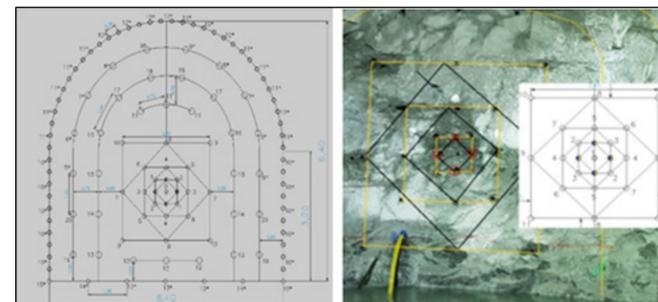


Figura 17. a) Diseño de voladura; b) Localización de la cuña en el frente.

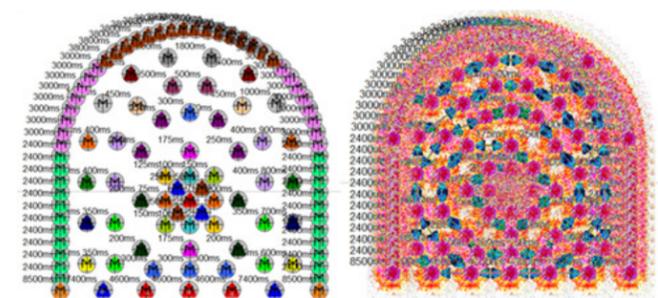


Figura 18. a) Tiempos de retardo; b) Detonación.

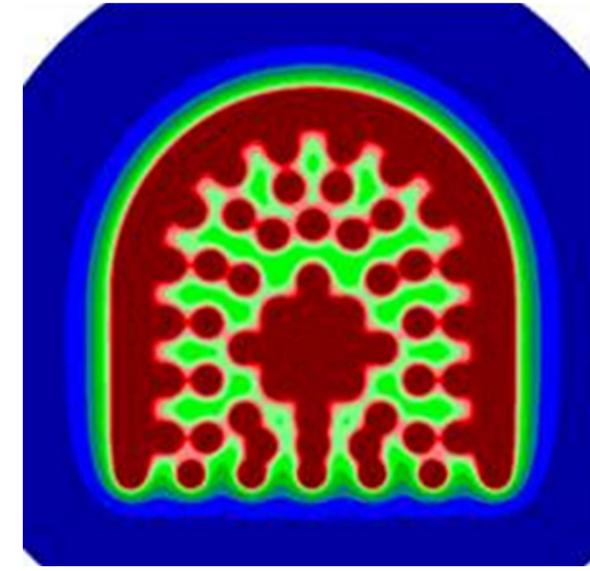


Figura 19. La distribución de la energía del explosivo (kg/t), se ve bien distribuida; la voladura es teóricamente buena.

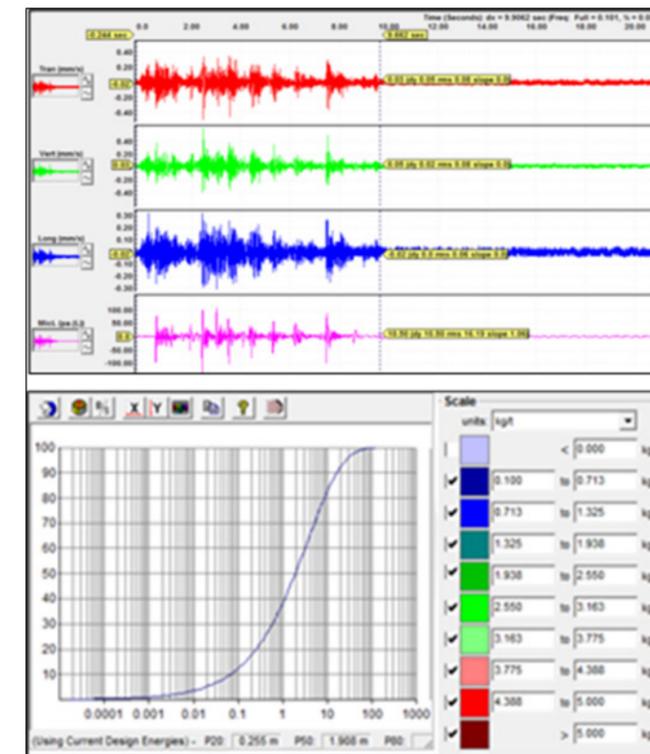


Figura 20. Vibración y fragmentación.

4.2 TÚNEL CARRETERO, SECCIÓN SUPERIOR. APLICACIÓN 2

Las características de la roca y del diseño de la voladura son las siguientes: macizo rocoso tipo I, Roca: arenisca cuarzosa de Pamplona, RUC > 110 Mpa; $\rho_r = 2,7 \text{ Ton/}$

m^3 ; $V_p = 4200 \text{ m/s}$. Sección del túnel: 11,5 m x 8,0 m; longitud de perforación: 3,2 a 3,5 m; diámetro de perforación: 51 mm; explosivo: Emulind E de 38 mm; barrenos vacíos de 4 pulg, perforados en rombo; recorte perforado a 0,3 m de distancia entre barrenos; retardos tipo Nonel MS (cuña y parte de la destroza) y LP (destroza y recorte), toda la enumeración.

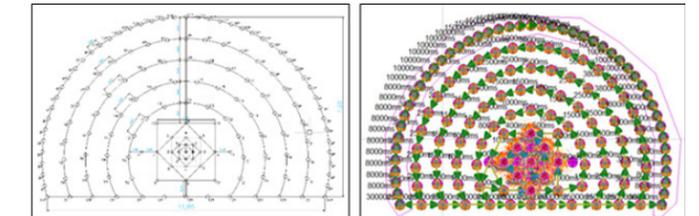


Figura 21. a) Diseño de voladura; b) Esquema de tiro.

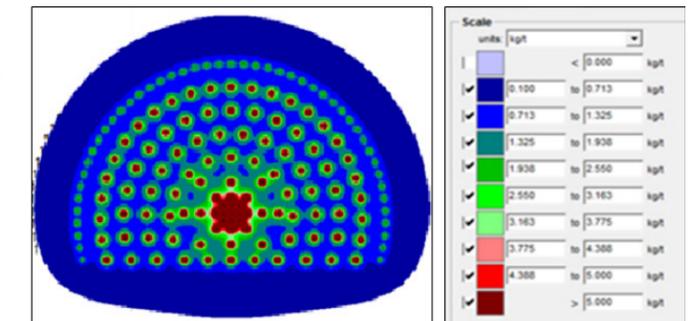


Figura 22. a) Distribución de la energía del explosivo en el frente; b) Energía, kg/t.

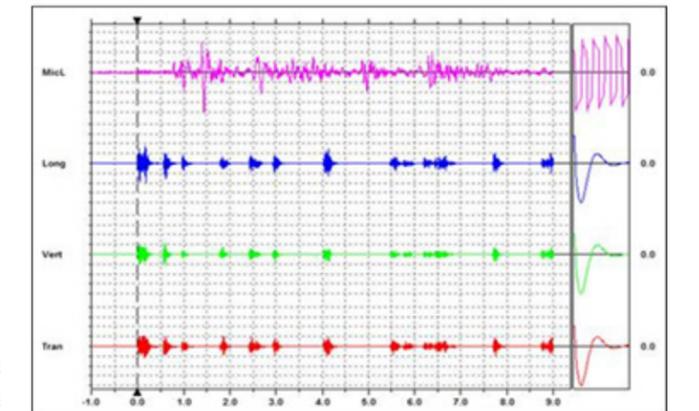
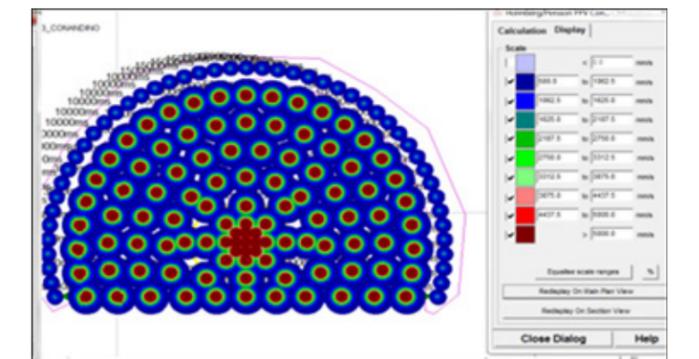


Figura 22. a) La vibración va de 5000 mm/s (color ocre) a 550 mm/s (color azul); b) Registro de vibraciones a 30 m. $\rho_r = 2,7 \text{ t/m}^3$; long perf = 2,5 m.

5. CONCLUSIONES

1. Los cueles quemados se diferencian de los cueles cilíndricos por el diámetro de los barrenos vacíos.

2. Los cortes cilíndricos hacen posible aumentar la profundidad de perforación mucho más que los cueles con cuñas en ángulo, ayudados por una buena distribución de los retardos localizados en los vértices de cada sección. Sin embargo, hay que tener cuidado y no confundir el cuele quemado con el cuele paralelo, pues existe una gran variedad de nombres que se aplican para cortes en paralelo. Si los barrenos de arranque y alivios son del mismo diámetro se denomina corte quemado; en contraste, cuando se combinan barrenos de arranque de menor diámetro con barrenos de alivio de mayor diámetro, se denomina corte paralelo.

3. El cuele cilíndrico de cinco (5) secciones puede presentar un mayor consumo específico, kg/m^3 , sin embargo, se hace necesario para rocas duras y competentes de túneles o galerías de medias o grandes secciones; esto permite mayores avances y una buena fragmentación, (longitud de la perforación 3,8 m; avance promedio 3,5 m).

REFERENCIAS

BOLLINGER G.A., 1971. Análisis de Vibración Explosiva. CUNNINGHAM, C.V.B. & GOETZCHE, A. F. 1996. The specification of blast damage limitations in tunnelling contracts Tunnelling and Underground Space Technology. DOWDING C.H., Murray P.D. & 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 (ST7): 1233-1249.

EDWARDS A.T. & Northwood T.D., 1960. Experimental studies of the effects of blasting on structures. The Engineer 210: 538.

FOGELSON D.E., 1971. U.S. Bureau of Mines research on vibration from blasting. Revue de l'Industrie Minière, n. spécial, p. 158-165.

LANGFORS U.; Kihlström, B., 1978. The modern technique of rock blasting. Almqvist & Wiksell, Estocolmo, 3ra. ed., 438 p.

LÓPEZ J., Carlos. Dr. Ing. de Minas. Catedrático de proyectos ITGE, López Jimeno Emilio, Bermúdez García Pilar. 2004. Manual de perforación y voladura de rocas, Manual de minería en túnel y a cielo abierto. ETSIM Madrid, España.

PINTO Morales, L. H. & 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, Vol. 7, No.2, diciembre de 2008, p.26- 38.

PINTO Morales, L. H. & Fuentes M.C., diciembre 2017. Estudio de vibraciones generadas por vibro camiones para la compañía VECTOR GEOPHYSICAL en el proyecto sísmico VSM 2D 2017, de la Agencia Nacional de Hidrocarburos - ANH, en Coyaima, Departamento del Tolima, p.p. 73.

PINTO Morales, L. H. & Fuentes M.C., (enero-marzo) 2021. Efecto de las voladuras sobre el comportamiento estructural de viviendas cercanas a sitios de explotación minera en Colombia. Vol. 37 No.1, p. 58-73.

SCHERPENISSE, Carlos & Adamson, W.R. 2004. Asesoría técnica en monitoreo de vibraciones para el modelamiento y control de daño, ASP. Blastronics.

SISKIND D.E, et al, 2003. Respuesta de la estructura y daños producidos por la vibración del suelo por voladura superficial, Informe de investigación 8507, Bureau of Mines U.S. Washington, 74p.

TAYLOR & FRANCIS Group. 2013. TUNNELLING IN ROCK BY DRILLIN AND BLASTING_ Spathis & Gupta (Eds), London

DISEÑO DE VOLADURAS EN TÚNELES, MODELOS PREDICTIVOS DE VIBRACIONES Y CONTROL DE DAÑO EN EL CONTORNO

Luis Humberto Pinto Morales
María del Carmen Fuentes Fuentes
Álvaro de la Cruz Correa Arroyave

RESUMEN

Los diseños de voladuras subterráneas en sección completa generan mayores vibraciones inclusive contemplando la metodología de recorte o precorte con barrenos de amortiguación, en este caso se quiso analizar los resultados utilizando galería piloto y ensanche, con la finalidad de evaluar el daño radial y la vibración generada a diferentes distancias del frente hasta los 30 m; en general, una mala práctica de voladuras induce daño radial a la roca, es por esto que los análisis contemplan un diseño de voladura con barrenos de amortiguación en ayudantes y el perímetro. Finalmente, se hace una comparación entre varios diseños de voladura controlada empleando el concepto de límite práctico de daños por excesos de vibración en el contorno.

Palabras clave: Voladura, Vibraciones, Mega Julios, MJ, Velocidad de Partícula Pico, PPV

ABSTRACT

The designs of underground blasting in full section generate greater vibrations including contemplating the methodology of cutting or pre-cutting with damping holes, in this case we wanted to see the results using pilot tunnel and widening (trimming), in order to evaluate radial damage and vibration generated at different distances from the front up to 30 meters, in general a bad practice of blasting induces radial damage to the rock, which is why the analyzes contemplate a blasting design with damping holes in helpers and the perimeter. Finally, a comparison was made between several controlled explosion designs and the concept of practical damage limit due to excessive vibration in the contour.

Keywords: Blast, vibrations, Megajoule Mj, PPV Pick Particule Velocity.

1. INTRODUCCIÓN

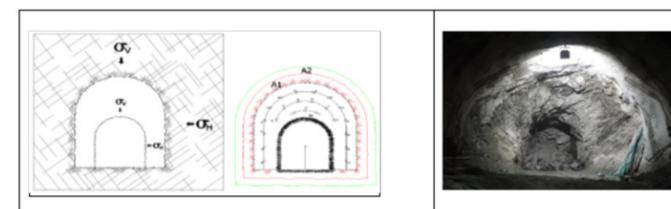


Figura 1. Generación de ondas por voladuras subterráneas, esfuerzos principales, zonas de sobre quiebre y generación de grietas.

Este artículo desarrolla el concepto de voladuras de prueba error con control perimetral para aplicaciones en centrales hidroeléctricas y minas metálicas y no metálicas, centradas en la importancia de los barrenos de amortiguación en sección completa, túneles piloto y ensanche amortiguado. El nuevo concepto de diseño

de voladura aplica la comprensión del daño radial causado por la carga de columna en el barreno. El daño radial se define por una práctica límite de daño aplicado a la roca que se encuentra entre los barrenos de amortiguación y el perímetro, Figura 1.

El artículo analiza las voladuras subterráneas utilizando dos metodologías con registro en campo y con simulación en software que permiten calcular y comparar las vibraciones producidas (PPV) y realizar un análisis de control perimetral en túneles de diferentes secciones y diferentes usos en Colombia; de esta manera se presentan algunas recomendaciones y se enfatiza en la importancia de diseñar barrenos de amortiguación en una malla de voladura. El objetivo va enfocado a evitar el daño

BLASTECHMINING
Soluciones técnicas en voladura

Somos expertos en voladura para minería a cielo abierto o canteras.

Contáctanos y agenda
una consultoría

mario@blastechmining.com

+573164760202

radial causado por el exceso de explosivo en el cargue de barrenos adyacentes al perímetro del túnel.

2. MECANISMO DE VIBRACIÓN DEL SUELO

Cuando una carga explosiva detona en el barreno de expansión, se crean intensas tensiones dinámicas a su alrededor debido a la aceleración repentina de la masa de roca al detonar la presión de gas en la pared del barreno.

Las ondas de tensión transmitidas a la roca circundante crean un movimiento ondulatorio en el suelo. La energía de deformación generada por estas ondas fragmenta la masa de roca debido a diferentes mecanismos de rotura, tales como aplastamiento, grietas radiales y ondas de choque reflejadas en la cara libre. La zona aplastada y la zona de fractura radial abarcan un volumen de roca deformada permanentemente. Cuando la intensidad de la onda de tensión disminuye hasta el nivel en el que no se produce una deformación permanente en la masa rocosa (es decir, más allá de la zona de fragmentación), las ondas de tensión se propagan a través del medio como ondas elásticas, permitiendo la oscilación de las partículas a través de las cuales viajan.

En la zona elástica, estas ondas se conocen como vibraciones del suelo, y se asocian estrechamente al comportamiento viscoelástico. El movimiento ondulatorio se extiende concéntricamente desde el lugar de la explosión en todas direcciones y se atenúa debido a la difusión de la energía fija sobre una mayor masa de material y lejos de su origen. Aunque la vibración del suelo se atenúa exponencialmente con la distancia, debido a la gran cantidad de explosivos, aún puede ser lo suficientemente alta como para causar daños a las edificaciones y otras estructuras artificiales y naturales al causar tensiones dinámicas que exceden la resistencia del material.

3. METODOLOGÍA Y OBJETIVOS

1. Definir las velocidades críticas (PPV_{crit}), para el control de daños en el macizo rocoso en función de los parámetros físico-mecánicos de las rocas.

2. Obtener las constantes del terreno K y α , para poder simular la propagación de ondas utilizando las

expresiones de Duvall, Fogelson y Devine (1968), para análisis de velocidad de partícula pico (PPV).

3. Simular, con las constantes K y α , las vibraciones en el contorno del túnel, mediante la utilización del software 2DFace, el cual emplea el modelo de H & P Holmberg-Persson, en campo cercano.

4. Diseñar las mallas de voladura túneles en sección completa, galería piloto y ensanche, teniendo en cuenta macizos rocosos de buena calidad (clasificadas geotécnicamente según el RMR, como tipos I, II y III), esto con la finalidad de levantar curvas de isovelocidades alrededor de cada sección, calculando la ley de propagación de ondas en el macizo rocoso.

5. Simular voladuras y vibraciones en el contorno, utilizando el software 2DFace para diferentes secciones de túneles y de esta manera estimar las velocidades máximas (PPV_{max}), en el campo cercano del túnel (0,5 a 1,5 m de distancia de la periferia).

6. Comprobar la confianza y exactitud del software 2DFace, para realizar simulaciones y predicciones de propagación de ondas en voladuras subterráneas, en el campo cercano, cuando no se cuenta con instrumentación sísmica en el frente.

4. VIBRACIONES

La intensidad de las vibraciones y el ruido en un punto determinado pueden causar algún tipo de molestias en las viviendas más cercanas al punto de voladura, las cuales varían de acuerdo con la fuente de generación y la distancia. En este caso se está evaluando el comportamiento de las vibraciones generadas por voladuras en túneles. A continuación, se describen las principales normas para control de daños en estructuras y en el macizo rocoso mismo.

Obtención de las curvas carga-distancia

Las ecuaciones empíricas que relacionan la carga máxima operante con la distancia al sitio de detonación fueron propuestas por varios investigadores quienes llegaron a diversas relaciones entre carga y distancia. La forma general que relaciona la carga y la distancia se describe de la siguiente manera:

$$V = KQ^{\alpha} D^b \quad (1)$$

Donde:

V: velocidad de vibración de la partícula, mm/s

Q: carga máxima operante, kg

D: distancia del sitio de detonación al sitio de monitoreo, m

k, b: constantes que dependen de factores como: litología, dirección de propagación, tipo de explosivo, etc.

Las relaciones entre carga máxima y distancia más conocidas y utilizadas son:

Hendron: adoptó la relación $D/Q^{1/3}$, planteando los datos de detonaciones involucrando cargas operantes desde 14 a 145 kg.

Devine: adoptó una relación $D/Q^{1/2}$; actualmente esta relación es la más aceptada y utilizada. Históricamente la relación de Devine está basada en observaciones de detonaciones en barrenos donde la carga está distribuida a lo largo de un cilindro, como sucede comúnmente en bancadas, y que ofrece mayor seguridad en el análisis de los datos.

Langefors: adoptó la relación $D/Q^{3/2}$, después de realizar detonaciones con cargas operantes relativamente pequeñas (menores a 100 kg), en pequeñas distancias, diferentes a las dos anteriores. En algunos casos esta relación es de gran validez para analizar dos datos obtenidos. Esta relación es más aplicada en los países nórdicos, especialmente en Suecia.

USBM Duvall and Fogelson, Devine (1962):

$$V = K \left[D/Q^{1/2} \right]^b \quad (2)$$

Ambraseys-Hendron (1968):

$$V = K \left[D/Q^{1/3} \right]^b \quad (3)$$

Langefors-Kihlstrom (1978):

$$V = K \left[D/Q^{3/2} \right]^b \quad (4)$$

5. DETERMINACIÓN DE LA LEY DE VIBRACIÓN Y TABLA CARGA-DISTANCIA

5.1. Modelo de vibración

La fórmula de escalamiento, que relaciona la velocidad de partícula pico (PPV) con la distancia escalada, ha sido desarrollada a través de 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:

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

V: Velocidad de partícula pico, 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 se determinan a partir de un gráfico logarítmico de la velocidad de partícula versus la distancia escalada, donde m corresponde a la pendiente y k es el intercepto a la distancia escalada de 1. El más utilizado en minería subterránea y cielo abierto es el Modelo de Devine:

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

Donde:

PPV: Velocidad de partícula pico, mm/s

W: Peso de la carga explosiva, kg

d: Distancia entre el punto de medición y la carga explosiva detonada, m

K: Factor de Velocidad

α : Factor de Atenuación

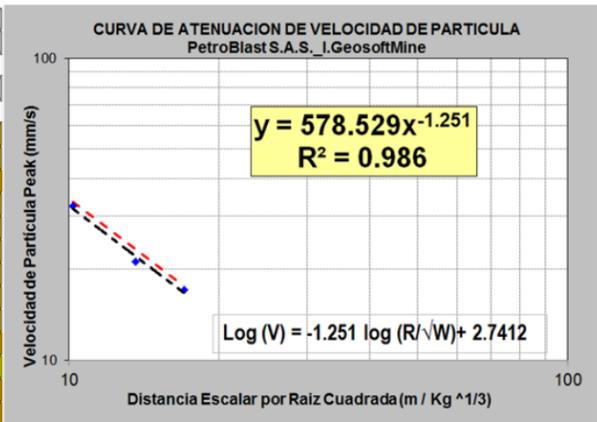
Teóricamente este criterio es el que mejor representa el comportamiento de la vibración en el campo lejano para cargas cilíndricas, donde el análisis dimensional sugiere que las distancias deben ser corregidas dividiéndolas por la raíz cuadrada de la carga. En la campaña de monitoreo se utilizan geófonos o canales de arreglos triaxiales distribuidos estratégicamente dentro del área de influencia del proyecto; estos transductores sísmicos son capaces de transmitir los niveles de vibraciones generados por las voladuras detonadas a diferentes distancias. La señal detectada por estos geófonos se transmite por cable al monitor de vibraciones. La información recolectada es grabada en archivos digitales los que posteriormente son analizados para identificar diferentes aspectos de la

PetroBlast S.A.S.									
Cálculo Ajuste Modelo de Vibración de Devine (Regresión Lineal)								Porcentaje Conf.	85%
$V = K * \left(\frac{D}{W^{0.2}}\right)^\alpha$								611,72	
								-1,251	
EQUIPO	Dist	Explosivo	(Raiz Cuadrada) DE	Transversal Peak	Vertical Peak	Longitudinal Peak	PPV Peak	PPV Modelo	
	[m]	[kg]	[m/kg ^{1/2}]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	
BE 19334	30,00	8,670	10,19	25,290	21,490	32,300	32,300	33,51	α -1,251
BE 19334	40,00	8,670	13,58	20,207	19,430	21,160	21,160	23,38	K Promedio 578,53
BE 19334	50,00	8,670	16,58	15,826	17,140	14,300	17,140	17,68	K -85% 611,72
									Correlación (R2) 0,986

Tabla 1. Valores de vibración triaxial, carga máxima y distancia de registro.

Kilos	EMULIND 38 mm				
	2.00	4.00	6.00	8.00	8.67
Dist [m]	PPV [mm/s]				
0.5	2246.8	3466.6	4467.6	5348.6	5624.7
1	943.8	1456.2	1876.7	2246.8	2362.8
1.5	568.3	876.8	1129.9	1352.8	1422.6
2	396.5	611.7	788.4	943.8	992.5
2.5	299.9	462.7	596.3	713.9	750.7
3	238.7	368.3	474.7	568.3	597.6
3.5	196.8	303.7	391.4	468.6	492.8
4	166.5	257.0	331.2	396.5	416.9
4.5	143.7	221.8	285.8	342.1	359.8
5	126.0	194.4	250.5	299.9	315.4
30	13.4	20.7	26.6	31.9	33.5
40	9.3	14.4	18.6	22.2	23.4
50	7.1	10.9	14.0	16.8	17.7

Tabla 2. Carga de explosivo, kg, versus distancia, m, para calcular velocidades (mm/s)



señal, como tiempos de arribo, picos de amplitud de la vibración y frecuencia.

Las velocidades obtenidas en los diferentes puntos de registro en función de la carga por retardo aplicada en cada barrenos de prueba, es utilizada para determinar la ley de propagación de las ondas en el macizo: A manera de ejemplo se presentan los siguientes resultados obtenidos en una voladura con tres puntos de medición, Tablas 1 y 2.

5.2. Criterios de prevención y límites de daño en macizos rocosos

5.2.1. Estimación de la velocidad crítica para macizos rocosos

Los altos niveles de vibración pueden desestabilizar el macizo rocoso, produciéndose fracturas nuevas o extendiendo y dilatando fracturas existentes. La vibración en este contexto puede ser considerada como un esfuerzo o deformación del macizo rocoso. Con bajos niveles de vibración, tales como los presentes a grandes distancias de las voladuras, las deformaciones son muy pequeñas para inducir un fracturamiento en

el macizo rocoso. De la ley de Hooke y asumiendo un comportamiento elástico del macizo rocoso, la roca y los concretos, la velocidad de partícula máxima (crítica), PPV_c, que puede ser soportada por el macizo rocoso, la roca o el concreto antes de que ocurra el fallamiento por tensión, se estima conociendo su resistencia a la tracción σ_t , módulo de Young, E, y velocidad de propagación de la onda P, V_p, Tabla 3, usando la Ecuación:

$$PPV_c = (\sigma_t * V_p) / E$$

PARÁMETROS	Roca*
Resistencia a la compresión, MPa	90
Resistencia a la tracción, MPa	8,4
Densidad, g/cm ³	2,7
Módulo de Poisson	0,25
Módulo de Young dinámico, GPa	25 (25000 Mpa)
Velocidad de onda P, V _p , m/s	3.754
PPV _c , mm/s	1.261,34
Intenso fracturamiento	4*VPP _c , zona fracturada 5.045 mm/s
Creación de nuevas fracturas	1*VPP _c , zona perturbada 1.261 mm/s
Extensión de fracturas preexistentes	1/4*VPP _c , sin daño 315 mm/s

*Téngase en cuenta que estos datos corresponden a roca intacta, para el macizo rocoso, sus resultados son sensiblemente menores.

Tabla 3. Parámetros físico mecánicos promedio para rocas tipo I, II.

5.2.2. Criterio de daño

Los criterios de daño recomendados por los investigadores son como sigue:

1. Intenso fracturamiento: $4*VPP_c$
2. Creación de nuevas fracturas. $1*VPP_c$
3. Extensión de fracturas preexistentes. $1/4*VPP_c$

6. VOLADURAS

En general se pueden presentar tres tipos de daño asociados a voladuras subterráneas, el primero es el daño al macizo rocoso inmediato, el segundo es el daño que se puede producir a obras subterráneas adyacentes y el tercero son los daños exteriores o en superficie los cuales pueden ser a taludes, obras de infraestructura o viviendas; en el presente trabajo nos enfocaremos al primero. Para lo cual se realizan mediciones a 30 m del frente de voladuras, con sismógrafos Minimate Plus, lo que permite obtener la ley de propagación de las ondas en el macizo al levantar una tabla y posteriormente graficar la carga utilizada versus la distancias al sitio de disparo, de esta manera se pueden determinar las vibraciones promedio desde un metro de distancia de la voladura hasta varios cientos de metros en superficie; igualmente y con base en la Tabla 1, se realiza la predicción de la vibración a diferentes distancias del contorno del túnel, Figura 2.

7. DISEÑO DE VOLADURAS. CÁLCULO DEL CUELE (CUÑA 2,4 m), UTILIZANDO DETONADORES NO ELÉCTRICOS TIPO NONEL

Obtenidas las constantes K y α del macizo, se procede a modelar las vibraciones que se generarían en el contorno de la excavación; a manera de ejemplo se diseñan diferentes secciones de túneles utilizando parámetros similares en el diseño de la voladura como tipo de roca, elección de tiempos de retardo tipo Nonel (barrenos por tiempo: 6), diseño del cuele, diámetro del barrenos vacío, diseño de la destroza (barrenos de producción y ayudas) y cargue del contorno con explosivo desacoplado, tipos de explosivo, carga operante, longitud de perforación (2 o más m), etc.

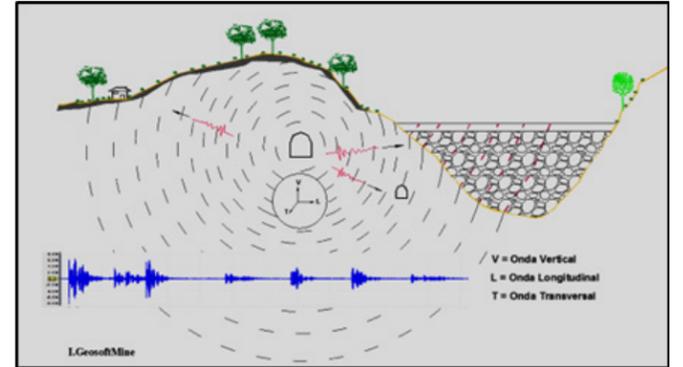


Figura 2. Generación de ondas por voladuras subterráneas

Los análisis se realizan para voladuras subterráneas de sección completa; además, para voladuras especiales donde se necesita minimizar al máximo las vibraciones, se proponen diseños de galería piloto con la finalidad de modelar el alcance de las ondas hacia el macizo rocoso mediante el uso del software 2DFace.

A continuación, se presenta el cálculo de un cuele paralelo (PetroBlast S.A.S.), el cual se utilizó para todos los análisis, cuele o cuña con cuatro barrenos de alivio (vacíos) de 3 1/2" a 4" y cinco secciones, Figura 3.

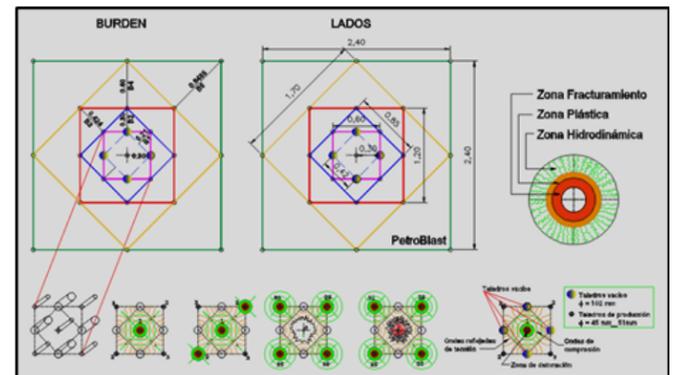


Figura 3. Cuele paralelo de cinco secciones. Diseño PetroBlast-I, GeosoftMine.

Para el cálculo del burden y espaciamiento de la destroza (producción), se utilizó la fórmula de Kelvin Konya, igualmente se pueden tener en cuenta las recomendaciones que se presentan en la Tabla 4.

$$B = 0.012((2SG_e/SG_r) + 1.5)D_e$$

Donde:

SG_e : Densidad del explosivo, g/cm³

SG_r : Densidad de la roca, g/cm³

D_e : Diámetro de barrenos cargados, pulg

Burden: regla práctica 2 pies (ft), por cada pulgada del diámetro de perforación.

Sección	Burden según tablas	Burden según Konya	Burden General
Cuña	15 a 20 cm		
Destroza	50 a 90 cm	Burden calculado para diferentes diámetros de perforación B 26 mm = 0,735 m B 38 mm = 1,0748 m	2 veces el diámetro de perforación
Cuadradores	50 a 70 cm		

Tabla 4. Fórmula y recomendaciones para cálculo del burden.

8. SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE 2DFACE, EN CAMPO CERCANO EL CUAL APLICA EL MODELO DE HOLMBERG & PERSSON

El estudio hace referencia al modelo de Holmberg-Persson como uno de los métodos ingenieriles más usados para modelar la atenuación de las ondas de choque.

Music (2007) justificó el uso ingenieril del modelo Holmberg & Persson, utilizando el software JKSimBlast (2DFace), en un estudio para la optimización de barrenos horizontales en la Mina El Teniente, el cual marcó un precedente en la utilización del modelo como una herramienta vigente y de uso en las operaciones subterráneas diarias. El modelo de daños de Holmberg & Persson (1994), esquematiza una carga explosiva de longitud H, con una densidad de carga lineal a lo largo del barreno perforado, a fin de conocer la perturbación generada en un punto P situado a una distancia r_0 de la columna explosiva. Se asume que en cualquier punto del espacio alrededor de la carga, la velocidad de vibración de la partícula pico producto de la detonación es aditiva, Figura 4.

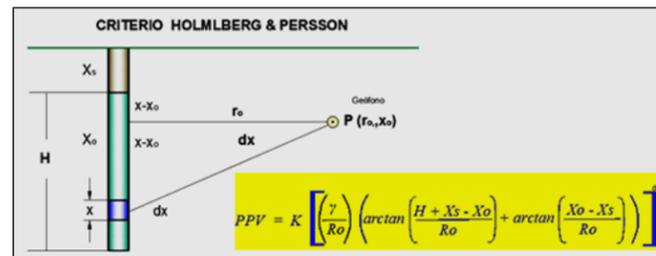


Tabla 4. Fórmula y recomendaciones para cálculo del burden.

El objetivo es analizar el comportamiento de la velocidad de partícula pico en secciones diferentes de túneles en Colombia realizadas por la firma PetroBlast Colombia S.A.S., medidas en el campo lejano (distancias mayores de dos veces la longitud de los barrenos). Para los análisis de las diferentes secciones de túnel,

se utilizaron las mismas constantes del terreno K y α , calculadas para el presente ejercicio, con la finalidad de verificar la variación y alcance de la vibración en el contorno de las secciones presentadas a continuación; igualmente se asumen rocas similares.

8.1. VOLADURA EN SECCIÓN COMPLETA - TÚNEL DE CONDUCCIÓN

Para este primer ejemplo se tienen los siguientes datos: voladura en sección completa (Nonel MS, LP) y simulación de vibraciones $k_{85\%} = 611,72$; $\alpha = -1,251$; registro de vibraciones a 30 m del frente; sección 7,6 m x 8,0 m; longitud de perforación 3,5 m; explosivo: Emulind E (32, 38 mm), Fotografía 1 y Figuras 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11.



Fotografía 1. Túnel de conducción.

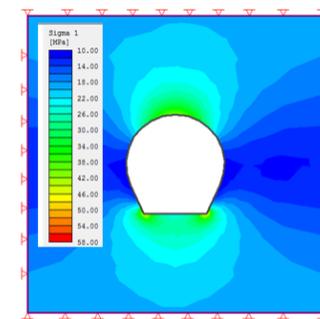


Figura 5. Esfuerzos radiales

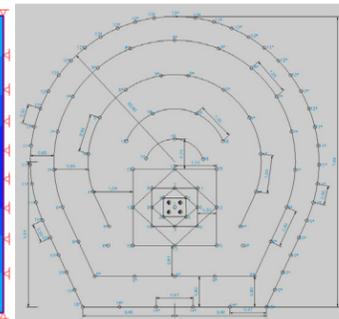


Figura 6. Malla de voladura sección completa

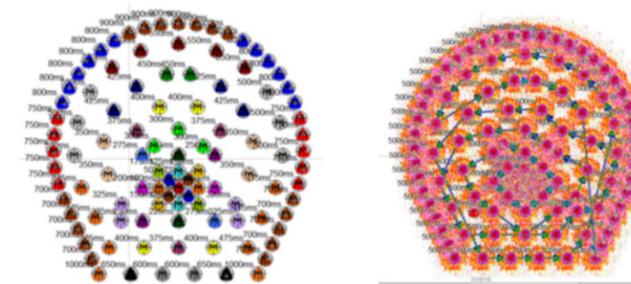


Figura 7. a) Tiempos de retardo, tipo Nonel, MS y LP; b) Detonación del frente, amarre del frente con cordón detonante de 3 g

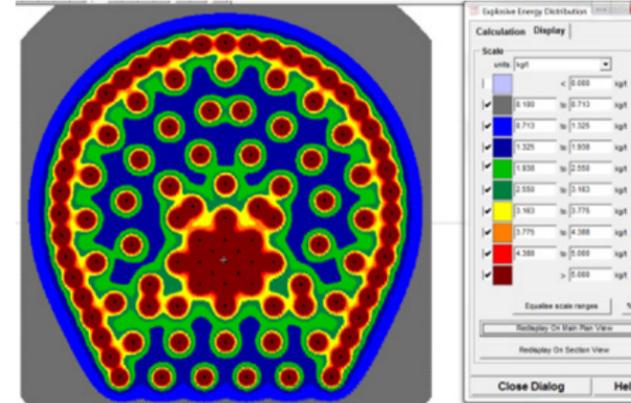


Figura 8. Distribución de energía, MJ/t, barreno a barreno y en todo el frente de voladura. La energía del explosivo va de 4,380 MJ (color rojo) a 0,130 MJ (color gris)

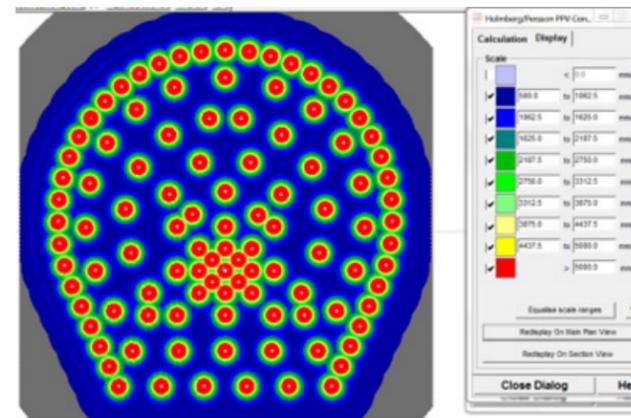


Figura 9. Velocidad de partícula pico. El color rojo representa la zona de mayor vibración (4000-5000 mm/s); la zona azul es la de menor vibración (500 - 1000 mm/s)

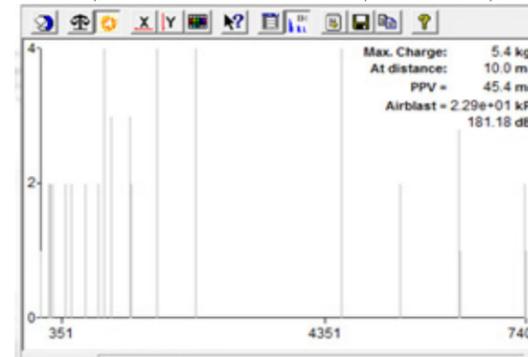


Figura 10. Roca tipo II. RUC > 90 MPa; $pr = 2,7 \text{ t/m}^3$; $V_p = 3754 \text{ m/s}$. $PPV_{max}(2DFace) = 3,93 \text{ mm/s}$

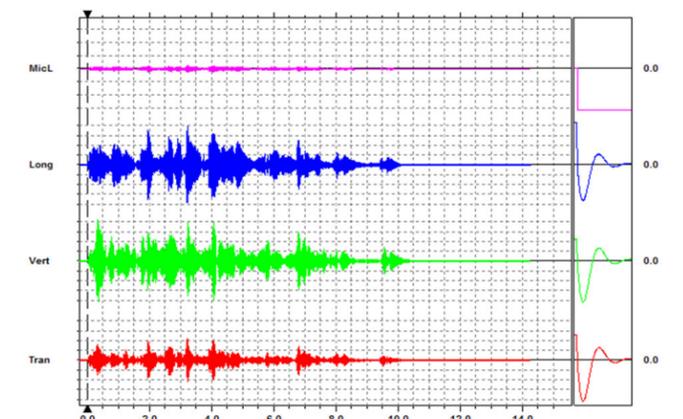


Figura 11. Registro de vibraciones a 30 m. $pr = 2,7 \text{ t/m}^3$; long. Perforación = 2,5 m; carga operante: 23 kg; explosivo: Emulind E; $PPV = 3,93 \text{ mm/s}$; $PPV_{cal}(2DFace) = 5,93 \text{ mm/s}$

8.2. TÚNEL PILOTO, SECCIÓN 4 X 5

Para este segundo ejemplo se tienen los siguientes datos: voladura con galería piloto (Nonel MS, LP); perforación en línea del contorno (sin carga) y simulación de vibraciones entre el extremo de la galería piloto y el contorno del túnel principal; registro de vibraciones a 30 m del frente, Figuras 12, 13, 14, 15, 16 y 17.

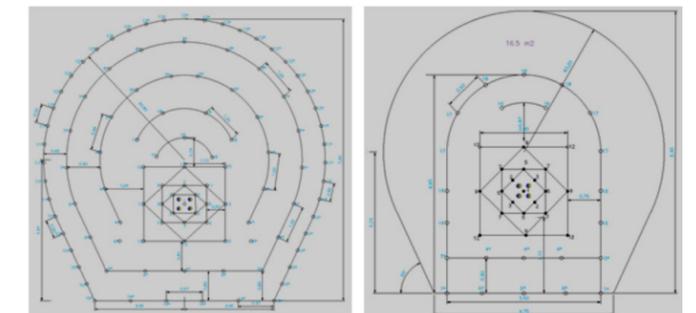


Figura 12. a) Diseño de la malla de voladura en sección completa; b) Diseño de la malla de voladura en la galería piloto.

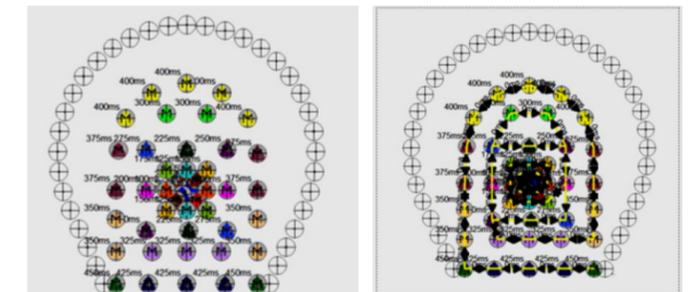


Figura 13. a) Tiempos de retardo, tipo Nonel, MS y LP; b) Amarre del frente con cordón detonante de 3 g

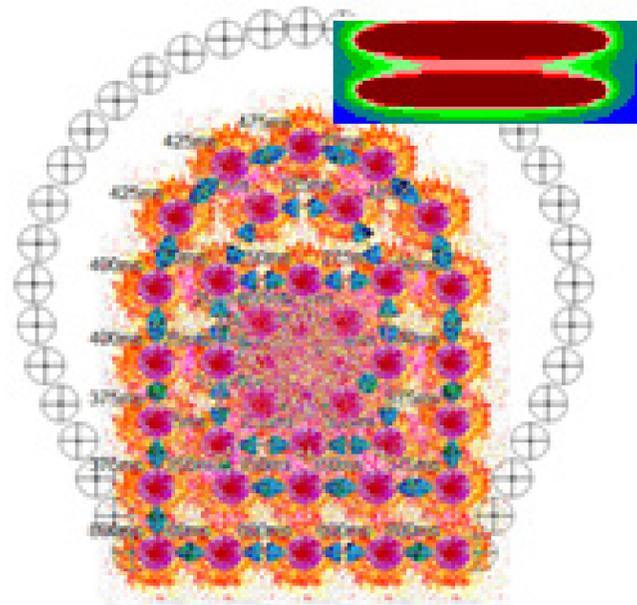


Figura 14. Detonación de la galería piloto.

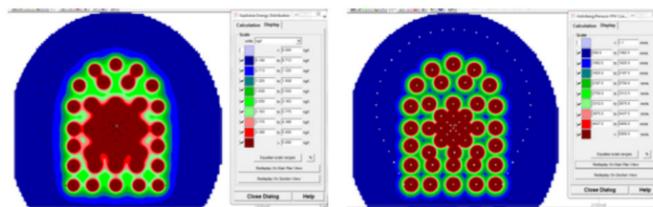


Figura 15. a) Distribución de energía (MJ/t, kg/t) entre barrenos y en todo el frente de voladura. La energía del explosivo va de 4,380 MJ (color rojo) a 0,713 MJ (color gris); b) Valores de velocidad de partícula. El color más oscuro representa la zona de mayor vibración (4000-5000 mm/s), la zona azul representa la zona de menor vibración (500 – 1000 mm/s).

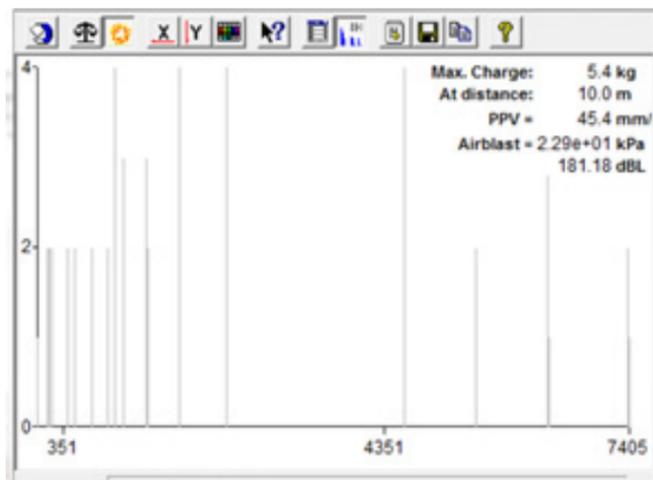


Figura 16. Cálculo de PPV. Roca tipo II; RUC > 90 Mpa; $\rho_r = 2,7 \text{ t/m}^3$; $V_p = 3754 \text{ m/s}$. $PPV_{\text{max}}(2DFace) = 3,93 \text{ mm/s}$

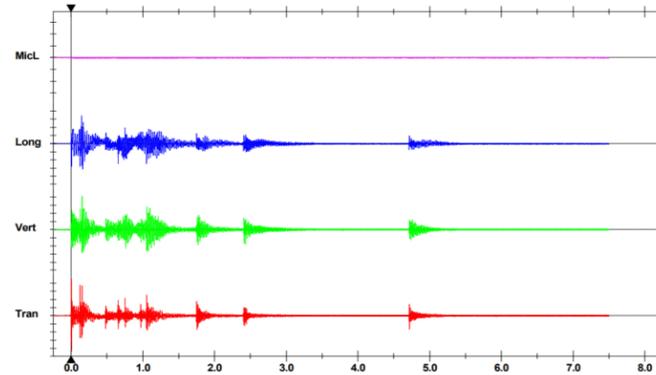


Figura 17. Registro de vibraciones a 30 m. $\rho_r = 2,7 \text{ t/m}^3$; long. Perforación = 2,5 m; carga operante = 23 kg; explosivo: Emulind E; $PPV = 3,93 \text{ mm/s}$

8.3. VOLADURA DE ENSANCHE

Para este segundo ejemplo se tienen los siguientes datos: voladura para ensanche (Nonel MS, LP); contorno cargado con Indugel de 26 mm desacoplado (detonación uno si otro no) y simulación de vibraciones hacia el contorno del túnel principal; registro de vibraciones a 30 m del frente, Figuras 18, 19, 20, 21, 22 y 23.

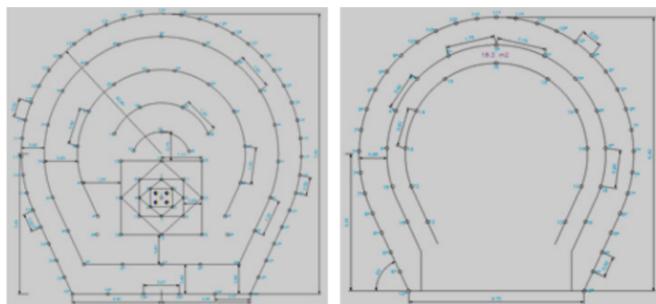


Figura 18. a) Diseño de la malla de voladura en sección completa; b) Diseño de la malla de voladura para ensanche.

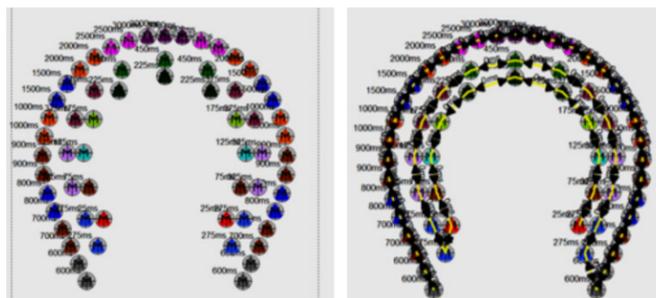


Figura 19. Tiempos de retardo, tipo Nonel, MS y LP; b) Amarre del frente con cordón detonante de 3 g

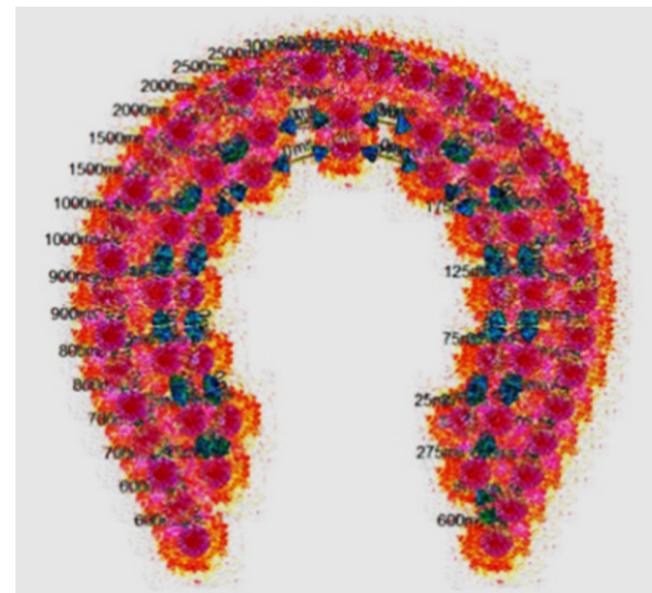


Figura 20. Detonación de la voladura para ensanche.

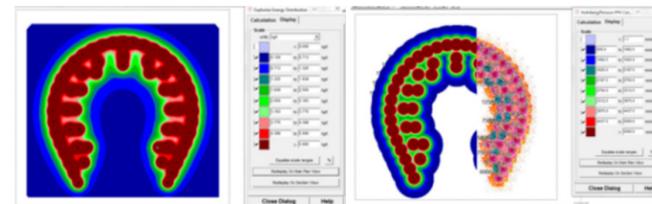


Figura 21. a) Distribución de energía (MJ/t) barreno a barreno y en todo el frente de voladura. La energía del explosivo varía de 4,380 MJ (color rojo) a 0,713 MJ (color gris); b) Generación de vibraciones (mm/s), barreno a barreno y en todo el frente de voladura. La vibración va de 5000 mm/s (color ocre) a los 550 mm/s (color azul)

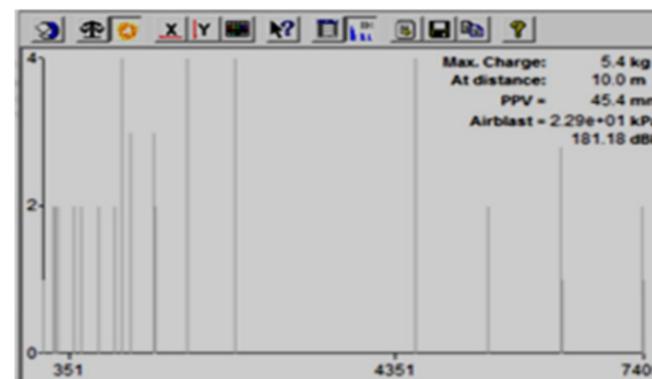


Figura 22. Cálculo de PPV. Roca tipo II; RUC > 90 Mpa; $\rho_r = 2,7 \text{ t/m}^3$; $V_p = 3754 \text{ m/s}$; $PPV_{\text{max}}(2DFace) = 3,93 \text{ mm/s}$

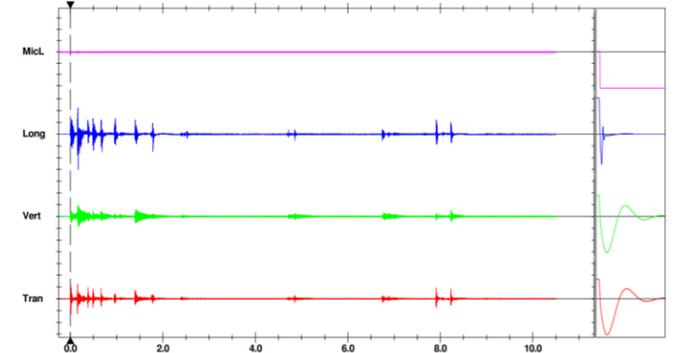


Figura 23. Registro de vibraciones a 30 m. $\rho_r = 2,7 \text{ t/m}^3$ Long. Perforación = 2,5 m. Carga operante = 23 kg. Explosivo: Emulind E; $PPV = 3,93 \text{ mm/s}$

9. RESULTADOS

Obtenidas las constantes del terreno se procede a simular las diferentes secciones de túneles, para obtener las velocidades máximas en el contorno del túnel (0,5 a 1,0 m de distancia de la periferia del túnel). Como se puede observar, con la misma carga operante las vibraciones disminuyen, con el procedimiento de excavación de la galería piloto ($PPV = 18 \text{ mm/s}$) y ensanche ($PPV = 11 \text{ mm/s}$) respecto a la excavación de sección completa ($PPV = 46 \text{ mm/s}$), Figuras 24, 25 y 26.

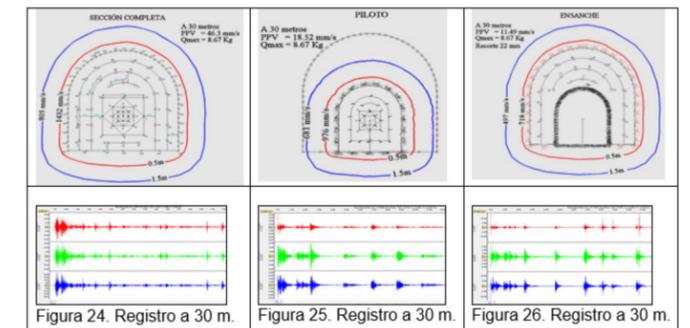


Figura 24, 25 y 26. Registro de vibraciones a 30 m de la voladura para el caso de un túnel excavado a sección completa; con galería piloto, y en ensanche

Comentarios.

En las Figuras 24, 25 y 26, se observa un ejercicio donde se presenta un diseño de voladura en túnel en sección completa, utilizando explosivo de precorte Indumil el cual tiene un diámetro de 18 mm y trabaja desacoplado en barrenos de 45 mm, más adentro de la sección se observa una línea de ayudas amortiguadas (ayudantes de costura, línea buffer), con menor carga los cuales ayudan al recorte del contorno, generando un amortiguamiento entre la última fila de barrenos y el

macizo rocoso, allí las vibraciones se limitan muy cerca al extremo del barrenado (zona de menores vibraciones), esto permite que el precorte trabaje solo, arrojando buenos resultados.

10. CONCLUSIONES

1. En el ejercicio del túnel de conducción para todas las pruebas se utilizó una carga operante de 8,67 kg, con monitoreo de vibraciones a 30 m del frente; se puede concluir que las voladuras en sección completa produjeron una vibración de 46,3 mm/s, un 12% más que las que genera una voladura con galería piloto (frente confinado), y un 10% más que las vibraciones que produce un ensanche de la misma sección, (frente desconfinado por la galería piloto).

2. Teniendo en cuenta los valores de velocidad de partícula pico, PPV, obtenidos por las dos metodologías, a) Con medición de vibraciones directamente en campo b) Simulación de la misma voladura con software 2DFace, se concluye que los valores obtenidos son similares, luego la simulación de vibraciones mediante el software 2DFace es confiable. Los valores registrados y comparados con voladuras registradas en campo presentan un porcentaje de error cercano al 8%, el cual es bajo.

3. Trabajar voladuras en frontones con galería piloto-ensanche es una muy buena opción para minimizar vibraciones en el contorno del túnel; esto permite utilizar mayor número de retardos tipo Nonel, con la posibilidad de disminuir la carga operante, kg/tiempo de retardo.

4. Las detonaciones en secciones completas producen, por lo general, mayores vibraciones en el contorno y por ende mayores esfuerzos y deformaciones en el macizo.
5. Según el criterio de daño estimado para el macizo rocoso, se concluye que las vibraciones están dentro del rango permisible para no extender fracturas preexistentes el cual es de 315 mm/s (ver Tabla 3).

REFERENCIAS

[1] DOWDING, C. H.; MURRAY, P. D.; 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 (ST7): 1233-1249.

[2] DUVALL, W. I. Y FOGELSON, D. E. 1962. Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations. U.S. Bureau of Mines Report of Investigation 5968, Washington, 19 p.

[3] EDWARDS, A. T.; NORTHWOOD, T. D. 1960. Experimental studies of the effects of blasting on structures. The Engineer 210: 538.

[4] FOGELSON, D. E. 1971. U. S. Bureau of Mines research on vibration from blasting. Revue de l'Industrie Minérale, n. spécial, p. 158-165.

[5] 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.

[6] LANGEFORS, U.; KIHLSSTROM, B. 1978. The modern technique of rock blasting. Almqvist & Wiksell, Estocolmo, 3a. ed., 438 p.

[7] SISKIND, D. E. et al. 1980. Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. U. S. Bureau of Mines Report of Investigation 8507, Washington, 74p.



INSCRÍBASE

ESCANEANDO EL QR O INGRESANDO EN EL ENLACE



<https://forms.gle/3CpJPNUWkiFcbZy67>

LA GEOTECNIA Y EL EMPLEO DE EXPLOSIVOS EN EL NUEVO MANUAL DE TÚNELES DE CARRETERA PARA COLOMBIA

Hermes Mauricio Alvarado Sáchica

RESUMEN

Colombia se ha convertido en un país de túneles, en la misma medida que es un territorio cuya cordillera de los Andes la divide de sur a norte, alejando los centros de producción de bienes y alimentos, de los principales centros de consumo, obligando a recorrer a viajeros y carga, extensos tramos de vía con pendientes pronunciadas y tortuosos trayectos, haciendo que el Gobierno Nacional asuma como una prioridad, la implementación de más y mejores carreteras, a través de la construcción de túneles viales como estrategia en favor de cada usuario de la vía, para reducir el tiempo de viaje, el consumo de combustible y el costo de carga, logrando a la vez túneles más sostenibles.

En la medida que esto sucede, se hace necesario la implementación de un manual de túneles, que defina la política pública y lineamientos en materia de diseño, construcción, operación y mantenimiento de Túneles de carretera, documento que ve en la geotecnia y el estudio del terreno, el pilar fundamental para optimizar los recursos destinados al proyecto, a través de reducir la incertidumbre geológica y el diseño de esquemas de voladura dentro del sistema de excavación, que reducen la sobre excavación, tienen mayor control de las vibraciones y mejoran las condiciones estructurales del túnel a ser revestido e implementado con sus sistemas electromecánicos para la futura operación.

ABSTRACT

Colombia has become a country of tunnels, to the same extent that it is a territory whose Andes mountain range divides it from south to north, distancing the centers of production of goods and food, from the main centers of consumption, forcing people to travel to travelers and cargo, extensive stretches of road with steep slopes and tortuous routes, making the National Government assume as a priority, the implementation of more and better roads, through the construction of road tunnels as a strategy in favor of each user of the road, to reduce travel time, fuel consumption and loading cost, while achieving more sustainable tunnels.

As this happens, it is necessary to implement a tunnel manual, which defines public policy and guidelines regarding the design, construction, operation and maintenance of road tunnels, a document that is seen in geotechnics and the study of the terrain, the fundamental pillar to optimize the resources allocated to the project, through reducing geological uncertainty and the design of blasting schemes within the excavation system, which reduce over-excavation, have greater control of vibrations and improve structural conditions of the tunnel to be lined and implemented with its electromechanical systems for future operation.

1. INTRODUCCIÓN A LA GEOTECNIA Y EL EMPLEO DE EXPLOSIVOS

Al pasar del oficio del carguero por los caminos de herradura sobre las montañas de Colombia a las autopistas con óptimos niveles de servicio, a través de obras de ingeniería con viaductos y túneles, es necesario recordar cómo ha sido la evolución de la infraestructura vial, en particular estas obras subterráneas en nuestro país y cómo se ha logrado atravesar las montañas, intentando entender el comportamiento del terreno, por medio del estudio de la geotecnia, como parte de la geología aplicada, introducida hace más de un siglo por Karl Von Terzaghi y el empleo de los explosivos, como herramienta de corte de roca en su excavación.

Primordialmente se debe entender la geotecnia como la aplicación de las ciencias que estudian el comportamiento de la roca y el suelo, es decir, la mecánica de rocas y la mecánica de suelos, respectivamente, con el fin de predecir el comportamiento del terreno cuando se construye sobre éste o se hacen túneles en su interior [2].

Así mismo, una vez conocido el terreno, esto es, la clasificación del macizo rocoso, para emprender proyectos de túneles, el profesional especializado en explosivos y voladuras selecciona el tipo de carga (explosivos y detonadores permisibles), con la cual se piensa vencer la resistencia del terreno; en esa mecánica interacción entre la resistencia de la roca y la energía del explosivo, donde este último se utiliza de manera racional, logra diseñar técnicas modernas de voladura, que no solo permiten excavar para construir el túnel, sino también hacerlo con economía, seguridad y sostenibilidad ambiental.

2. EVOLUCIÓN DE LOS TÚNELES DE CARRETERA EN COLOMBIA

Las condiciones geomorfológicas y topografía del territorio nacional, sumado a la ubicación de las principales poblaciones y puertos en Colombia, son los principales factores que determinaron la construcción de los caminos y carreteras que conforman la red vial nacional del pasado. No es para menos, las antiguas vías fueron construidas en el afán de unir las principales ciudades, con el resto del país, que, dicho sea de paso,

son zonas pobladas que están en cinco pisos térmicos sobre las montañas y valles de las tres cordilleras que surcan el territorio colombiano de sur a norte.

Para conocer de cerca la necesidad de atravesar cordilleras hay que revisar la historia de los túneles en Colombia, la cual comienza en el año 1875, cuando en el departamento de Antioquia, ya se construía una vía férrea desde Medellín hasta el río Magdalena, con el propósito de transportar pasajeros y mercancías a través del proyecto del “Ferrocarril de Antioquia.” Para inicios del siglo XX, en desarrollo de los trabajos, se presenta el desafío de atravesar las montañas y se prevé la necesidad de construir su primer túnel, de manera que permita completar este sueño y lograr unir esta importante vía férrea en su parte más alta, labores que se acercaban a cumplir ya 50 años de arduo trabajo y aún no se lograba empatar el trayecto con mayor dificultad por la montaña que separa el Municipio de Cisneros, del Municipio de Santo Domingo, allí en Antioquia.

Lo narra el ingeniero Ignacio Arbeláez Restrepo en su escrito “La entraña de la montaña,” cuando cuenta, que fue el visionario Alejandro López Restrepo, ingeniero antioqueño, con el aporte que hizo en su tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil [4], proponiendo la construcción del “Túnel de La Queiebra,” junto con su asesor de tesis el General Pedro Nel Ospina; fueron objeto de críticas tratando el proyecto como una utopía, no solo por la dificultad geotécnica que esto significaba, sino por la falta de presupuesto, Fotografía 1.



Fotografía 1. Foto Facultad de Minas Universidad Nacional de Medellín y Fundación Santiago del Túnel, homenaje 90 años del Túnel de la Queiebra 2019, video <https://youtu.be/6arUFsJtnQA>

Finalmente, fue la firma canadiense Frasser, Bracer & Co., la que por un costo de US\$ 3 millones (tres millones de

dólares), con dineros provenientes de la indemnización de Panamá por el tema del canal (Ordenanza N.º 4 del 15 de marzo de 1926) y el diseño y participación del mismo ingeniero Alejandro López, quienes luego de cerca de tres años de trabajo de cientos de lugareños, construyeron el denominado “Túnel de La Queiebra”, inaugurado oficialmente el 7 de agosto de 1929, el cual, con sus 3.742 m de longitud, la remoción de cerca de 110.532 m³ de roca, 540.000 libras de dinamita y 7.540 barriles de cemento importado, logró completar el proyecto del “Ferrocarril de Antioquia” llegando a ser el segundo túnel más largo en América Latina y el séptimo en el mundo en su momento.

Posteriormente y a través de años de evolución en la infraestructura vial colombiana, pasando de los caminos de herradura a las grandes autopistas; de vías muy angostas, a la doble calzada; de vías tortuosas con altas pendientes, a la construcción de túneles que acortan distancias; de curvas con largos recorridos, a la construcción de viaductos; del uso del pico y la pala, al empleo de moderna maquinaria; del uso de la pólvora y la dinamita, al uso de explosivos y accesorios de voladura seguros; de la mecha lenta a los detonadores electrónicos, y del empirismo con los explosivos, al trabajo profesional, con el diseño de técnicas modernas de voladura por parte de especialistas; acometiendo proyectos viales y túneles durante el presente siglo, inicialmente desde el Fondo de Caminos Vecinales y hoy día con el Instituto Nacional de Vías INVIAS, desde donde se genera la regulación técnica y actualización normativa, propendiendo por la modernidad de la red vial nacional, mientras aparece en el escenario la Asociación Colombiana de Profesionales en Explosivos y Voladuras ACPEV haciendo lo propio, velando por el trabajo técnico, seguro, económico y especializado de las sustancias explosivas, se han logrado llevar a cabo los proyectos viales que hoy disfrutamos.

Debido a la necesidad de acortar distancias y mejorar las condiciones de movilidad y seguridad vial sobre la accidentada topografía nacional, el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras del año 2008, en su capítulo siete, “Diseño geométrico de casos especiales”, numeral “7.2. Diseño geométrico de túneles”, establece: “En los casos en que la topografía obligue al diseño de desarrollos del eje de la vía bastante extensos y tortuosos para el cruce de accidentes geográficos como cordilleras y serranías, y como resultado de diferentes análisis de tipo técnico - económico, podrá resultar

favorable la construcción de túneles viales como alternativa de diseño dentro del proyecto”.

Evidentemente es el caso de las carreteras colombianas, por lo que durante los últimos quince años se han generado grandes inversiones en infraestructura vial, adelantando importantes proyectos de construcción de túneles de carretera para reducir las distancias de recorrido y tiempo de viaje, incluyendo procesos específicos para su diseño, construcción, operación y mantenimiento, a través del fomento integral y sostenible de nueva infraestructura vial de cuarta y quinta generación, garantizando el desarrollo económico y social del país. Es así como en septiembre de 2012, llega el programa de Concesiones Viales para la construcción de carreteras, conocido como vías de Cuarta Generación (4G), que propone nuevos retos en materia de conectividad terrestre y transporte intermodal, haciendo más evidente la necesidad de contar con una regulación técnica y normativa en materia de túneles, en particular la adopción de un manual.

3. NUEVO MANUAL DE DISEÑO, CONSTRUCCIÓN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE TÚNELES DE CARRETERA

Puesto que Colombia no contaba con un manual para túneles adoptado por resolución, que tuviera la connotación de ser una política pública para su diseño, construcción, operación y mantenimiento, el Instituto Nacional de Vías, mediante un convenio con la Universidad del Quindío, redactó y publicó una primera versión de un Manual de Túneles en diciembre de 2015, con un importante componente técnico, basado en conceptos austriacos, innovadores y muy globalizados, que ha servido de guía para diferentes proyectos, sin ser de obligatorio cumplimiento en sus inicios.

En los últimos cinco años de consulta, este manual fue objeto de recomendaciones, comentarios y observaciones que le han venido bien, gracias a lo cual fue actualizado conforme avances tecnológicos y consideraciones de sostenibilidad, a través de un equipo estructurador, compuesto por el mismo Instituto Nacional de Vías INVIAS, la Sociedad Colombiana de Ingenieros SCI y la Asociación Colombiana de

Túneles y Obras Subterráneas ACTOS, así como el trabajo colaborativo de la Asociación Colombiana de Profesionales en Explosivos y Voladuras ACPEV, la academia, los diferentes gremios del sector, la industria y expertos en el tema, aunado al bagaje de conocimientos adquiridos con la reciente construcción del Túnel de la Línea, obra que ha dejado lecciones por aprender y una gran experiencia. Hoy se dispone de una versión actualizada al año 2021.

El Manual para el Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Túneles de Carretera para Colombia, Fotografía 2, es un documento que evoluciona hacia la construcción de proyectos sostenibles y con una mayor vida útil, donde la geotecnia juega un papel muy importante, dada la orientación que tiene hacia los estudios del terreno y el diseño de excavación con el uso de explosivos por parte de tecnólogos y profesionales con posgrado en explosivos y voladuras. En general, hay que enfatizar que el Manual de túneles contiene un capítulo de sostenibilidad que incorpora la gestión ambiental, social y predial, acorde con los Lineamientos de Infraestructura Verde Vial LIVV [5], articulada con la ley de Gestión del Riesgo (Ley 1523 de 2012 y Decreto 2157 de 2017) y con la Reglamentación y Normatividad vigente en este campo.



Fotografía 2. Manual para el Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Túneles de Carretera para Colombia

Este nuevo Manual de Túneles armoniza la gestión ambiental y la geotecnia en su conjunto, destacando que, el conocimiento de los materiales de la corteza terrestre es indispensable, no sólo en la aplicación de métodos científicos, principios de ingeniería, solución de problemas de movilidad vial terrestre y diseño de túneles, si no en la prevención y mitigación de los posibles impactos que se puedan ocasionar al ambiente, al presupuesto total del proyecto y al tiempo de ejecución de la obra, así como también pueden generar condiciones de riesgo de desastres. En ese orden de ideas, el Manual de Túneles, particularmente en los capítulos de exploración e investigación, de sostenibilidad y de Gestión del Riesgo, describe el estudio de los materiales y sus propiedades mediante la aplicación de principios científicos de la mecánica de suelos y la mecánica de rocas, que permiten predecir y evaluar el posible comportamiento que éstos puedan llegar a tener antes, durante y después de la ejecución de un proyecto de túneles y permite anticipar los impactos que éste puede generar en su entorno, especialmente sobre los recursos de aire, agua y suelo, así mismo sobre la biodiversidad en la zona de influencia de una obra subterránea.

En los temas de exploración e investigación del terreno, así como del diseño del túnel y sus diferentes componentes, relacionados en los capítulos 5 y 6 respectivamente, el manual recomienda implementar el método de “Estimación del estado de esfuerzos en macizos rocosos mediante velocidades de ondas elásticas”, donde resalta su importancia para el diseño de túneles de carreteras, tomado de los estudios realizados en el kilómetro 58 de la vía Bogotá Villavicencio, como un aporte de la academia a la ingeniería nacional.

Particularmente, el proceso de excavación de túneles representa una afectación de los esfuerzos in-situ de los materiales, llevándolos a ciclos de carga-descarga que, dependiendo de su relación entre los esfuerzos inducidos y la resistencia del material, pueden generar condiciones de desconfinamiento a medida que avanzan las tareas de excavación, que, aun cuando la obra no colapse, sí puede inducir líneas, planos o puntos en donde el material alcance la envolvente de falla. El cálculo de los estados de esfuerzos es una práctica común en otros países, la cual se desarrolla mediante técnicas comunes de estimación de esfuerzos (v.g. fracturación hidráulica, Overcoring Test, Dorstopper Test, Flat Jack Test, etc.), pero estas técnicas poco se utilizan en Colombia, por

lo que el manual difunde este conocimiento alternativo que trabaja con aproximaciones mediante la medición de velocidades de ondas elásticas (V_p y V_s).

Con ésta medición, la cual se realiza a través técnicas geofísicas como reflexión o refracción sísmica a nivel superficial, o down-hole, up-hole y cross-hole en perforaciones, como en laboratorios sobre testigos de roca o muestras de suelo, mediante ultrasonido, es factible determinar el módulo de deformación horizontal (E_h) el cual debe expresarse en términos estáticos, de donde se obtienen las correlaciones con las velocidades de ondas elásticas, las cuales deben interpretarse con el uso de correlaciones en la literatura, entre módulos dinámico y estático. Dichas correlaciones deben ser validadas en el contexto geológico – geomorfológico – geotécnico en el área de influencia del proyecto de interés. Por supuesto hay que aclarar que esta técnica obedece a la estimación de los estados de esfuerzos teóricos, y el Manual de Túneles permite su implementación durante las fases preliminares de los estudios (prefactibilidad y factibilidad), no para diseños definitivos, en donde se deben aplicar métodos validados por instancias técnico-científicas.

De esta manera, a través de un conocimiento detallado del terreno, se busca emprender la excavación del túnel con menor grado de incertidumbre geológica, como se dijo, para evitar condiciones de desconfinamiento o pérdida de estructura del macizo rocoso, dejando claro que, los estudios geotécnicos son fundamentales para el desarrollo de las etapas de excavación y construcción de un túnel, desde la evaluación temprana de las propiedades de dichos materiales en su etapa de prospección y estudios preliminares, hasta la entrega de la obra para su operación, cumpliendo un papel fundamental en el conocimiento de las propiedades ingenieriles de los materiales (roca y suelo), pues éstos inciden también en el seguimiento de la estabilidad de los portales y del túnel en general.

La geotecnia en el Manual de Túneles, especifica toda la gama de estudios técnicos que permiten evaluar las propiedades de la roca cortada (destroza), así como el posterior manejo o disposición o utilización de los mismos en ZODMES (Zonas de Disposición de Materiales de Excavación) [1], configurando así, una gama de oportunidades para la comunidad aledaña a los proyectos y para la misma obra adyacente al túnel, de manera que se deban implementar planes y programas

para la utilización de los materiales MERI (Materiales de Excavación de Reutilización Industrial) producidos durante la excavación, para suplir necesidades de infraestructura locales, garantizando así la estabilidad del proyecto con túneles más sostenibles para sí y para su entorno, Fotografía 3.

Ahora bien, los métodos de diseño y construcción de túneles, tales como el método empírico, el método analítico, el método numérico y el método observacional del seguimiento y la auscultación, se fundamentan en los estudios geotécnicos para dar como resultado diseños acordes con las características del macizo rocoso, unido a la selección de los esquemas de voladura y por ende de la cantidad de energía de explosivo necesaria a medida que avanzan las tareas de excavación y cambia el tipo de roca, apuntándole a definir con anterioridad los problemas en la excavación y construcción de las obras en general, permitiendo aportar datos técnicos muy valiosos para determinar con una buena aproximación los tiempos de construcción del túnel, así como sus costos, que es lo que finalmente quisiera tenerse en mente, al momento de concesionar la construcción de este tipo de obras subterráneas.



Fotografía 3. Túnel de La Línea (Oso de Anteojos), 3 de septiembre de 2020

Con base en el conocimiento del terreno y las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la roca a excavar, el Manual de Túneles da parámetros claros a los profesionales especializados en el manejo de explosivos, para el diseño del esquema de perforación y voladura a la vez que recomienda los aspectos fundamentales para la selección de equipos de perforación y diámetros de varillas para la configuración del diseño general de la voladura, como sistema tradicional de excavación y sugiere la posible posición de los barrenos del cuele para la apertura de la cara libre inicial y propone a los especialistas, los esquemas de voladura en relación al RMR (Rock Mass Rating) de la roca a cortar y el empleo

de explosivos como el INDUGEL PLUS AP, fabricado en la Industria Militar INDUMIL [3].

De ahí la importancia de un buen estudio geotécnico como lo propone el Manual de Túneles, de manera que se permita diseñar unas mallas de perforación y voladura, que preserven la estabilidad de las paredes del túnel, controlando las vibraciones y garantizando el uso eficiente de la energía de los explosivos, como método de excavación en terrenos de los tipos I, II y III, de la Clasificación de Bieniawski, denominado RMR, como se ha dicho. En términos generales, todas las operaciones que tienen que ver con el estudio del macizo y sus materiales, así como la apertura del túnel y su sostenimiento, son operaciones que tienen como fundamento los estudios geotécnicos, eso queda perfectamente claro en el Manual para el Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Túneles de Carretera para Colombia.

También queda claro en el manual de túneles, la necesidad del correcto manejo de los explosivos desde el mismo cumplimiento de la normatividad colombiana, hasta la adopción de buenas prácticas, tanto administrativas como de seguridad física de estas sustancias químicas, dados los antecedentes en los cuales estas sustancias también son utilizadas por los grupos armados al margen de la ley para cometer actos terroristas en contra de la población y la misma Fuerza Pública; el control que se debe ejercer del uso de los explosivos, está en función de la seguridad misma de su manejo y por lo tanto, le asiste la garantía legal de evitar la pérdida de los mismos, los cuales muy seguramente, pueden llegar a ser empleados como arma letal por parte del terrorismo; de ahí la importancia del perfil profesional especializado en explosivos y voladuras, que deben tener las personas que cumplen roles en estos procesos.

Ahora bien, para el diseño de túneles en general (excavación, sostenimiento, estructura y sistemas electromecánicos), se puede entender que la geotecnia, no puede desligarse de la geología y en particular, de la geología para ingeniería, puesto que la geología describe, la geotecnia evalúa. Por tal motivo, la ingeniería subterránea del manual, introduce la obligación de presentar un Informe de Diseño Geotécnico para cada túnel a construir en el país, donde se exige una exploración geotécnica mínima y válida para tomar decisiones sobre la construcción y para la elaboración

de un modelo de diseño numérico, con el objetivo de trascender de los diseños conceptuales a los diseños aplicados y construidos en entornos de modelación de condiciones y escenarios geotécnicos con hipótesis basadas en evidencias de campo.

4. CONCLUSIONES

Las nuevas incorporaciones y conceptos que contiene el Manual permiten que los proyectos tuneleros se integren perfectamente en la filosofía de diseño geométrico global que debe existir entre las vías adyacentes y el túnel como tal, de hecho, con el diseño y construcción de los portales, para esto, se debe conocer detalladamente el terreno a través de la geotecnia y se deben emplear correctamente las técnicas de voladura en el proceso de excavación, empleando los explosivos técnicamente.

En este sentido el manual de Túneles deja claro que toda intervención sobre el entorno trae consigo impactos ambientales y que estos pueden ser positivos o negativos conforme el enfoque con que se manejen, por lo tanto, el acercamiento a las características de las zonas de intervención, el destacado estudio del terreno y su conocimiento, en general la geotecnia, permiten desarrollar obras complejas con menor afectación al ambiente.

Así las cosas, se busca obtener una eficiente excavación del túnel, con mejor estructura, mejor sostenimiento, menor sobre excavación y menor afectación al entorno geotécnico, de manera que las labores de revestimiento, impermeabilización e implementación de sistemas electromecánicos en general, garanticen el cumplimiento del alcance pactado en los proyectos: que los túneles se entreguen en el tiempo indicado, dentro del presupuesto previsto y con la calidad requerida por los usuarios de la vía, derivando también en una infraestructura vial que alcance una mayor vida útil y menor intervención a la movilidad por excesivas reparaciones.

En la actualidad Colombia construye más y mejores túneles, en la medida en que crece su economía y avanza su infraestructura vial, especialmente en momentos en los cuales se afianza el conocimiento técnico y experiencia en el diseño, construcción y operación de túneles, presentando su propio manual, uniéndose a



Fotografía 4. Túnel Barranqueros, cruce cordillera central

las naciones que ya lo han implementado, Tabla 1, para definir y generar política pública en aquellos aspectos técnicos que propenden por tener obras más seguras, sostenibles, con lineamientos de infraestructura verde vial, fomentando la generación de nuevas tecnologías y la utilización de energías limpias; túneles diseñados y construidos con ingeniería colombiana, la cual gana espacio en el ámbito internacional, en la medida que también genera nuevo conocimiento.

COLOMBIA		ESTADOS UNIDOS		FRANCIA		JAPÓN	
CHILE		ESPAÑA		INGLATERRA		KOREA	
MÉXICO		ALEMANIA		NORUEGA		NUEVA ZELANDA	
PERÚ		AUSTRIA		CHINA		AUSTRALIA	

Tabla 1. Países en el mundo, que cuentan con un Manual de Túneles

Colombia es referente regional en infraestructura de túneles viales; en la actualidad cuenta con 131 túneles, a los cuales se sumarán 31 que están en construcción (20 a cargo de Invias), contando con el más largo de Latinoamérica, el Túnel de La Línea con 8,6 km de longitud, ahora viene el Túnel del Toyo con 9,73 km, próximo al servicio como el de mayor longitud del continente, con la connotación importante de estar ad portas del desarrollo de las vías de quinta generación (5G), dentro del programa del Gobierno Nacional de "Vías para la legalidad y la reactivación," las cuales generarán nuevos proyectos para los colombianos y mayor desarrollo para la nación.

Así es como la ingeniería nacional se une a las quince naciones del mundo que ya han adoptado un manual de túneles (ver Tabla 1), precisamente es el quinto país del continente en lograrlo, gracias a ser el territorio con la mayor cantidad de túneles de América Latina y tener los de mayor longitud, ahora es una fortaleza técnica entre los ingenieros colombianos dedicados a los túneles y los profesionales especializados en manejo de explosivos.

REFERENCIAS

- [1] Correa, A. D. C., 2019, Revista Anales de Ingeniería, Sociedad Colombiana de Ingenieros, ed. 944, artículo Materiales de Excavación de Reutilización Industrial MERI, página 36.
- [2] Harvey J. C., primera edición 1987, Geología para ingenieros geotécnicos, Cambridge University press, Editorial Limusa, México, 153 páginas.
- [3] Industria Militar INDUMIL, 2019, Manual para explosivos industriales, 19 páginas. <https://www.indumil.gov.co/wp-content/uploads/2019/04/INDUMIL-MANUAL-PARA-EXPLOSIVOS-INDUSTRIALES.pdf>
- [4] López, A., 1899, Tesis, Paso de la Quebra en el Ferrocarril de Antioquia, Escuela Nacional de Minas, Facultad de Matemáticas e Ingeniería, Medellín Antioquia, 62 páginas.
- [5] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Fundación para la Conservación y Desarrollo Sostenible FCDS, 2020, Lineamientos de Infraestructura Verde Vial, 102 páginas. https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/infraestructura_verde_b23_c9_safe_oct2020.pdf

SHOTPLUS™

SOFTWARE DE DISEÑO Y MODELAMIENTO DE VOLADURA PARA OPTIMIZAR CADA DETONACIÓN



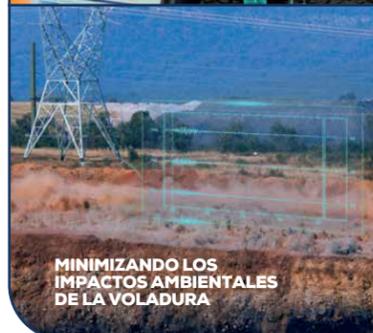
OPTIMIZANDO LA FRAGMENTACIÓN PARA LA EFICIENCIA EN EL PROCESO POSTERIOR



VIBRATION CONTROL



CONTROL COMPLETO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO DE DETONACIONES



MINIMIZANDO LOS IMPACTOS AMBIENTALES DE LA VOLADURA

FRAGTRACK™

CAPTURA Y REPORTE AUTOMATIZADOS DE LOS DATOS DE FRAGMENTACIÓN

FRAGTrack™ es una herramienta de última generación de medición de fragmentación, que utiliza tecnologías avanzadas de visión artificial, permitiendo la medición y el análisis automatizados post- detonación.

Disponible en ambas configuraciones, con base de pala y faja transportadora. Ofrece datos de fragmentación en línea, puntos de referencia e información almacenada. Estos elementos garantizan mejoras sostenibles y rentables en el rendimiento de las detonaciones en sus operaciones.

orica.com/FRAGTrack

CONTROL DE FRAGMENTACIÓN

orica.com/FragmentationControl

Nuestra solución de control de fragmentación proporciona la captura y el reporte de datos de fragmentación, lo que permite mejoras en los resultados de la misma. La tecnología ha sido conceptualizada y diseñada para realizar la medición, tanto en correas transportadoras de material, como directamente desde los equipos de excavación.

GESTIÓN AVANZADA DE VIBRACIONES (AVM)

orica.com/AVM

Predicción y optimización de los resultados de la voladura para reducir los impactos de las vibraciones. La gestión avanzada de vibraciones puede ofrecer mejoras sostenibles que:

CONTROL DE VOLADURAS

orica.com/BlastControl

BlastIQ™ ofrece un control de calidad completo del proceso de perforación y voladura. Fomenta el ahorro de costos y una mejora constante de rendimiento a través de la optimización de los diseños y el control en la ejecución.

CONTROL DE VIBRACIÓN Y AIR-PRESSURE

orica.com/VibrationControl

La solución BlastIQ™ para el control de la Vibración y Air-Pressure garantiza la licencia para operar y optimiza la productividad de la voladura en entornos difíciles al proporcionar las herramientas para diseñar, modelar, implementar y medir las voladuras de acuerdo a los límites de vibración.



BLASTIQ™ NUEVA GENERACIÓN



SOLUCIONES TECNOLÓGICAS INTEGRADAS PARA OPTIMIZAR TODO TIPO DE VOLADURA

La Plataforma BlastIQ™ de nueva generación es una plataforma diseñada específicamente para permitir la mejora continua de los resultados de voladura al integrar datos e información a partir de tecnologías conectadas de forma digital durante los procesos de perforación y voladura.

Desde el modelamiento pre voladura hasta la medición y análisis post voladura, la Plataforma BlastIQ™ entrega los datos, parámetros y conocimientos necesarios para garantizar mejoras rentables y sostenibles en el desempeño de la voladura en sus operaciones.

orica.com/BlastIQ

GROUNDPROBE MONITOREO GEOTÉCNICO



Soluciones para monitoreo geotécnico de taludes subterráneos y a cielo abierto en minería y obras de infraestructura civil.



Encuétranos en:

www.orica.com

Paulo Andres Mera M.
LIDER SISTEMAS DE INICIACION
Calle 110 No 9-25 oficina 614 Bogotá, Colombia
Código postal: 110111
Teléfono: +57 1 6581100
E-mail: paulo.mera@orica.com

ANÁLISIS DEL ENTORNO EN COLOMBIA PARA LA PRESTACIÓN DE SERVICIO DE PROSPECCIÓN SÍSMICA CON EXPLOSIVOS

Jorge E. Fonseca B.
John F. Rincón F.

RESUMEN

El artículo presenta el estudio del contexto colombiano en cuanto la evolución de la sísmica para la prestación del servicio de prospección sísmica en Colombia y la aplicación de herramientas gerenciales en el macroentorno y microentorno PESTEL y las Fuerzas de Porter. Posteriormente se presentan los fundamentos generales y la evolución de la prospección sísmica con explosivos en Colombia, al igual, los resultados del macroentorno y microentorno mediante las herramientas PESTEL y Fuerzas de Porter para el análisis y factibilidad en relación con la implementación de la prestación del servicio de prospección sísmica en Colombia.

ABSTRACT

The paper presents the study of the Colombian context regarding the evolution of seismic for the provision of seismic prospecting service in Colombia and the application of management tools in the macro-environment and micro-environment as they are; PESTEL and Porter forces. Subsequently, the general foundations and evolution of seismic prospecting with explosives in Colombia are presented, as well as the results of the macroenvironment and micro-environment through the PESTEL tools and porter forces for the analysis and feasibility in relation to the implementation. of the provision of the seismic prospecting service in Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

El artículo de investigación comienza con el estudio del contexto colombiano en cuanto a la evolución de la sísmica para la prestación del servicio de prospección sísmica en Colombia y la aplicación de herramientas gerenciales en el macroentorno y microentorno PESTEL y las Fuerzas de Porter. Lo anterior, con miras a identificar la oportunidad de crecimiento, diversificación y requisitos necesarios para la prestación del servicio en las variables tanto del entorno externo e interno. Llevando lo anteriormente mencionado a plantear el siguiente interrogante de investigación ¿Es factible la implementación y prestación del servicio de prospección sísmica en Colombia mediante las herramientas gerenciales PESTEL y Fuerzas de Porter?

Seguidamente, el artículo en el estado del arte presenta los fundamentos generales y la evolución de la prospección sísmica con explosivos en Colombia, el análisis del macroentorno con la herramienta PESTEL y el microentorno con las Fuerzas de Porter. Después, se presentan los resultados del análisis descriptivo macroentorno con la finalidad de evaluar la planificación estratégica y los factores principales de una organización que pueda prestar el servicio a nivel político, económico, social, tecnológico, entorno ambiental y legal.

Finalmente, termina el artículo con el análisis descriptivo del microentorno, con la tarea de comprender y estudiar la competencia de los posibles proveedores para la prestación del servicio de prospección sísmica con explosivos y su ofrecimiento para la búsqueda/exploración de yacimientos de hidrocarburos en Colombia.

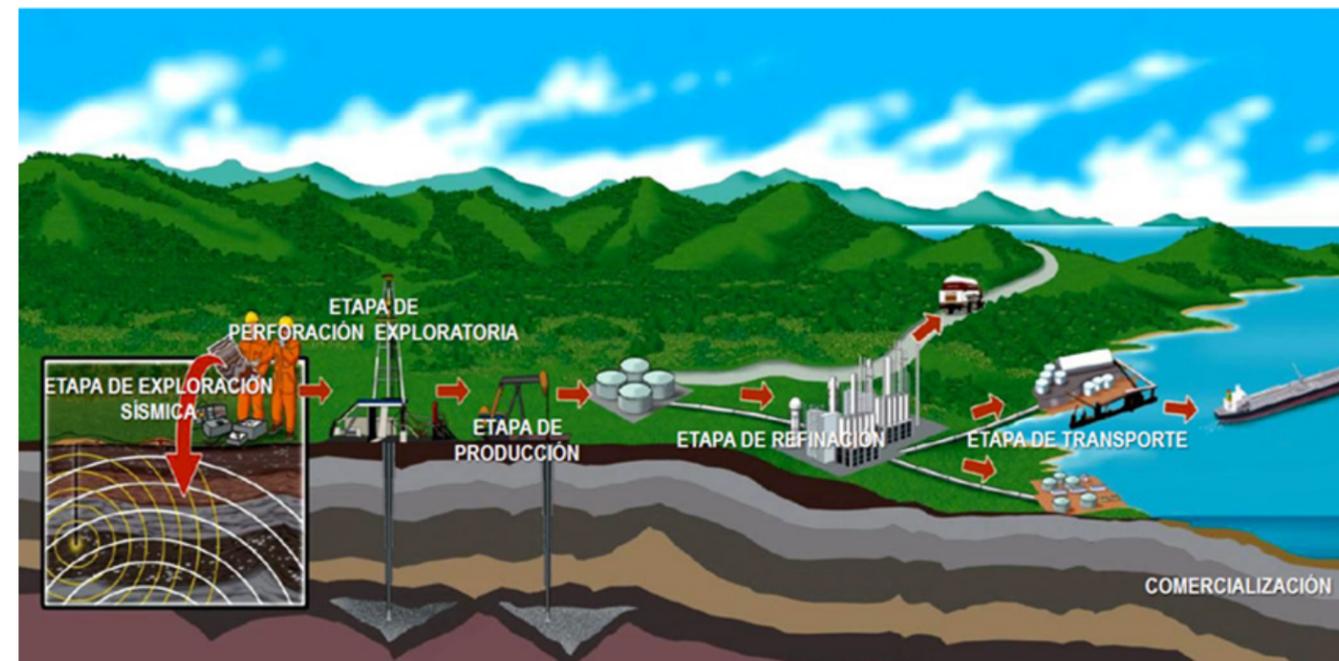


Figura 1. Cadena productiva de los hidrocarburos. Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2015, p. 8

2. ESTADO DEL ARTE

Prospección sísmica con explosivos

De acuerdo con Gutiérrez y Gall (2002), la prospección sísmica es la técnica geofísica más utilizada para realizar la exploración de petróleo (sísmica de reflexión), por cuanto permite obtener una imagen directa de la estructura geológica de las cuencas exploradas. La sísmica es una de las herramientas más importantes en el descubrimiento de un yacimiento. Esta técnica consiste en emitir ondas elásticas (una vibración) en la superficie del terreno (con explosivos enterrados en el suelo o con camiones vibradores). Para el caso de exploración en tierra, las ondas se transmiten a través de las capas del subsuelo y se reflejan cada vez que se presenta un cambio importante en el tipo de roca (Carvajal, 2015).

1) Prospección sísmica

De esta manera, la sísmica halla su importancia en la cadena productiva de los hidrocarburos, Figura 1. Esta cadena está compuesta por cinco etapas: exploración (prospección sísmica), perforación exploratoria, refinación, transporte y comercialización (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2015). Según el marco normativo sectorial colombiano el dueño del área a explorar (subsuelo) es el estado colombiano y su administración es función de la Agencia Nacional

de Hidrocarburos (ANH). Es decir, su función es la concesión en la modalidad contractual, frente a la asignación del subsuelo a empresas operadoras nacionales o extranjeras.

Cabe resaltar que los ejercicios y/o actividades relacionadas con extracción o exploración petrolera, deben realizarse bajo un modelo de administración y manejo responsable de todos los efectos a generar, ya sean naturales o sociales. Es decir, garantizando el cumplimiento de los deberes legales, la responsabilidad social y el compromiso de sostenibilidad con el medio ambiente (Fernández, González y Santos, 2015).

2) Evolución

La finalidad del servicio de prospección sísmica es la obtención de información sísmica durante el proceso exploratorio en la búsqueda de hidrocarburos (Checa, Hocol, Rodríguez y Explorasur, 2017). Esta información es producto de la actividad exploratoria, alcanzando en Colombia un fuerte dinamismo a principios de la década de los años 2000. Dicho dinamismo es consecuencia de factores como el aumento del precio internacional del petróleo y de la reforma estatal a la política petrolera. De hecho, se reflejó en el aumento de compañías para la prestación de servicio de prospección sísmica y en el incremento en la cantidad de kilómetros de perfil sísmico terrestre año tras año. Igualmente, para el año

2009 ya se contaba con más de 30 empresas para la adquisición de los datos sísmicos; en el sector nunca hubo más de diez, y para el 2010 se registraba el máximo valor pico de prospección sísmica terrestre con 19.986 km. (Checa et al., 2017).

Después de 2010, en Colombia se registra una reducción exploratoria producto de variables como la conflictividad social, manifestándose ello a través de paros y protestas y reivindicaciones por otorgamiento de beneficios económicos a nivel ambiental. Lo anterior condujo a la reducción de compañías de prospección sísmica (Checa et al., 2017). Otro hecho fue la no inversión de compañías petroleras, reduciendo con ello las inversiones en adjudicación de nuevos proyectos de exploración. Por consiguiente, disminuyeron los programas de prospección sísmica por las compañías en 2013-2019 (Dinero, 2019).

La solución al tema de la conflictividad social fue dada por el gobierno mediante la sentencia de la Corte Constitucional “coordinación y concurrencia” del 2018, la cual obliga al gobierno central y a comunidades de los territorios a lograr acuerdos sobre los proyectos en materia de exploración de hidrocarburos. Con esta solución la ANH, hoy en día, expide el procedimiento para superar la incertidumbre jurídica y permitir así el retorno de la inversión de compañías extranjeras en la búsqueda y exploración de hidrocarburos (Dinero, 2019).

3) Explosivo

El explosivo para prospección sísmica es producido únicamente por la Industria Militar (Indumil) y controlado por el Departamento de Control Comercio Armas Municiones y Explosivos (DCCA). El explosivo para uso y manejo en prospección sísmica en Colombia es el Sismigel, el cual es un material tipo hidrogel, con sustancias gelificantes para evitar la segregación de los ingredientes oxidantes y combustibles en la mezcla (Industria Militar, 2019). Tanto Indumil como el DCCA participan únicamente en la cadena de suministro de explosivo al cliente en las etapas de producción y adquisición.

Para la prestación del servicio de prospección sísmica se deben tener en cuenta los lineamientos y legislación de la ANH, Indumil y del DCCA.

A. Análisis del macroentorno

1. PESTEL

De acuerdo con Rodríguez (2017), el análisis del macroentorno de la empresa es fundamental, ya que desde allí se desprenden las estrategias organizacionales que permiten competir en un ambiente empresarial cada vez más exigente. El macroentorno es el último estrato del entorno de una empresa y reagrupa el conjunto de las variables que ejerce una influencia en la mayoría, independientemente de su ámbito: político, económico, sociocultural, tecnológico, ecológico y legal (Johnson, Scholes y Whittington, 2008). La herramienta que debe emplearse para llevar a cabo el estudio del macroentorno es el PESTEL. En la Tabla 1, se presentan sus factores.

Factor	Descripción
Político	Factores relacionados con el estilo de gobierno del escenario nacional, es decir, el entorno de la empresa. Estabilidad o inestabilidad política, consecuencias políticas, acciones gubernamentales, cambios en políticas nacionales, etc.
Económico	Factores relacionados con el análisis de las variables económicas que pueden llegar a impactar la empresa. Producto Interno Bruto (PIB), tasas de interés, índice de inflación, niveles de desempleo, tasas de cambios. Este factor es decisivo para la determinación de la viabilidad de ejecución de un proyecto. En este caso, para un plan de empresa.
Social	Factores asociados al análisis de los aspectos socioculturales. Tradiciones, aspectos culturales, normas, mitos, valores religiosos, etc.
Tecnológico	Factores asociados a la evolución técnico-científica. Infraestructura técnica, competitividad, productividad, actualizaciones, etc.
Entorno ambiental	Factor asociado a condiciones del medio biótico y abiótico (ecológico/natural) que rodea la empresa y al compromiso que debe tener la empresa con adaptarse a su entorno sin deteriorarlo. Compromiso ambiental, sostenibilidad, aspectos ambientales, etc.
Legal	Factor asociado al conjunto de regulaciones, principios, lineamientos, y normas.

Tabla 1. Factores del PESTEL Fuente: propia (2019)

B. Análisis del microentorno

1. FUERZAS PORTER

En esencia, el trabajo del estratega es comprender y enfrentar la competencia (Porter, 2015). Entender el microentorno es esencial, ya que es concebido como las fuerzas cercanas a una organización, las cuales afectan directamente a su disponibilidad para servir a sus clientes y generar ganancias (Gangwar, 2018). Para realizar el análisis del microentorno a la empresa, se emplea el modelo de las Fuerzas de Porter, el cual evalúa el ambiente de competitividad en la industria al contemplar cinco fuerzas individuales: rivalidad entre competidores, amenaza de entrada de nuevos competidores, amenaza de productos sustitutos,

poder de negociación de los proveedores y poder de negociación de los consumidores (Krause, 2013). En la Tabla 2, se sintetizan las características de cada una de las Fuerzas de Porter referidas y se describen las variables del modelo y su relación con la propuesta del servicio de prospección sísmica con explosivos.

Fuerza	Descripción
Rivalidad entre competidores	Es la primera fuerza competitiva y entre más se incrementa su intensidad, menores serán el atractivo del sector y las utilidades (Porter, 2015)
Amenaza de entrada de nuevos competidores	Es la segunda fuerza competitiva y su resultado permite establecer estrategias de competitividad para dar respuesta a las presiones que pueden ser causadas por la entrada de nuevos competidores.
Amenaza de productos sustitutos	Es la tercera fuerza competitiva y su análisis permite establecer estrategias de competitividad frente a productos que puedan llegar a sustituir el ofrecido.
Poder de negociación de los proveedores	Es la cuarta fuerza competitiva y su análisis permite establecer estrategias frente a los costos por concepto de proveedores.
Poder de negociación de los consumidores	Es la quinta fuerza competitiva y su análisis permite establecer estrategias de competitividad para ofrecer servicios en términos de calidad, costo y oportunidad a los consumidores (Villada, 2017).

Tabla 2. Fuerzas de Porter para el servicio de prospección sísmica. Fuente: propia (2019)

3. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de los instrumentos de evaluación asociados a la determinación de la factibilidad de inclusión del servicio de prospección sísmica correspondientes al análisis del macro y microentorno: PESTEL, en el primer caso y Fuerzas de Porter, en el segundo.

3.1 PESTEL

Frente a los factores de PESTEL, en materia de exploración y explotación de hidrocarburos, se tienen los siguientes resultados:

3.1.1 Político

a) La reforma tributaria artículo 365 de la Ley 1819 de 2016, la cual estableció la posibilidad de entrega de un incentivo a ciertas empresas que aumenten sus inversiones para exploración de hidrocarburos en el país; b) La expedición de un Certificado de Reembolso Tributario (CERT) otorgado por el Gobierno al contribuyente para que incremente sus inversiones en los conceptos de descubrimiento de nuevas reservas de hidrocarburos, la adición de reservas probadas o la incorporación de nuevas reservas (Congreso de Colombia, 2016), y c) El reglamento de asignación de

áreas enmarcado en el acuerdo 02 de 2017, expedido por la ANH. Por medio de éste se fijan las reglas para la asignación de áreas y para adoptar criterios para contratar la exploración y explotación de los hidrocarburos propiedad de la nación.

3.1.2 Económico

Se manifiesta en el consumo interno y dinamismo de la demanda externa en relación con los precios de los hidrocarburos. Los resultados se evidencian en los indicadores de carácter laboral y social (Unidad de Planeación Minero-Energética, 2017).

3.1.3 Social

Una vez asignados los programas a las compañías operadoras, la ANH realiza un seguimiento a los contratos y convenios de exploración y producción de hidrocarburos, en cuanto a aspectos sociales como el Programa de Beneficio a las Comunidades (PBC), el cual es brindado por la compañía operadora y busca mejorar la calidad de vida de los habitantes (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2015)

3.1.4 Tecnológico

La búsqueda de hidrocarburos se realiza mediante dos técnicas: a) con explosivos y b) mediante el uso de vibradores transportados en camiones. No obstante, el análisis de las variables superficiales que involucra al método sísmico es similar en todos los países. Para determinar si el levantamiento sísmico es viable se estudia la topografía, la geología superficial y los aspectos climáticos. La topografía es uno de los aspectos que define la fuente de energía a emplear: el vibrador debe utilizarse en terrenos llanos solamente y los explosivos en cualquier zona. En terrenos montañosos y/o rugosos afecta la implementación de patrones receptores (geófonos). La identificación previa de las vías de acceso, zonas pobladas, restricciones culturales, pozos, líneas de flujo, nacimientos de agua, etc. tienen gran influencia en las operaciones de exploración de hidrocarburos (Herrera y Cooper, 2010).

3.1.5 Entorno ambiental

Frente al entorno ambiental, se encuentra principalmente: a) la deforestación por apertura de la trocha y la construcción de helipuertos y campamentos a un desarrollo positivo para la comunidad, Garrido (2018) y b) el ruido ocasionado por el efecto de las actividades sísmicas. Durante la prospección sísmica se producen niveles de ruido de gran magnitud, debido

a las detonaciones de explosivos que se hacen cada 6 m, así como al ruido producido por los helicópteros que suplen de materiales y alimentación a los trabajos sísmicos (Ribón, 2017).

3.1.6 Factor legal

Las publicaciones de leyes, decretos, resoluciones y acuerdos para el ejercicio o prestación del servicio de prospección sísmica. Entre estas, principalmente la legislación existente para la asignación de áreas de explotación y producción, y la adquisición, uso y control de los explosivos.

3.2 FUERZAS DE PORTER

De acuerdo con Franco y Gonzáles (2016), el modelo de análisis de Porter muestra que existen cinco fuerzas que rigen las consecuencias de rentabilidad a largo plazo de un mercado o de alguno de sus segmentos. Principalmente se basa en la idea de que la empresa debe evaluar sus objetivos y recursos frente a cinco fuerzas que rigen la competencia industrial.

3.2.1 Rivalidad entre competidores

La rivalidad de competidores es insuficiente por la poca cantidad de empresas consolidadas en el sector de los explosivos que ofrece la prospección sísmica. Ello debido a la falta de conocimiento, experiencia y formación del personal en la manipulación de explosivos. También, a la ausencia de conocimiento y experiencia de personal en geofísica para la interpretación de la información obtenida de fenómenos físicos de reflexión y refracción que experimentan las ondas al ser captadas por geófonos. En relación con los explosivos, es importante la elección del tipo y sistema de iniciación, para asegurar la máxima generación de energía en forma de ondas de choque para la búsqueda de hidrocarburos. En términos del procesamiento geofísico, la correcta y precisa interpretación de la información obtenida en los geófonos provenientes de los fenómenos físicos de reflexión y refracción que experimentan las ondas al viajar por diferentes medios toma gran importancia en términos de calidad de servicio. La información de las señales captadas permite definir los materiales presentes o ausentes del subsuelo por medio de los contrastes de velocidad en las ondas (International Society of Explosives Engineers, 2008).

3.2.2 Amenazas de entrada de nuevos competidores

El sector de prospección sísmica con explosivos no

presenta una alta amenaza de nuevos competidores debido a las barreras de entrada como la poca oferta de personal idóneo para la prestación del servicio y la amplia gama de requisitos legales que deben ser cubiertos. Es decir, a la escasa formación académica en universidades del país en programas de explosivos y/o de geofísica y el cumplimiento de requisitos legales y reglamentarios para la cadena de suministro de explosivos presentando un límite importante. Todo lo mencionado anteriormente propicia el desconocimiento existente de las organizaciones en temas de explosivos y geofísica. También, por el cumplimiento de requisitos legales en la cadena de adquisición de explosivos y la alta capacidad financiera a contar. Finalmente, es favorable ofrecer y prestar servicios de prospección sísmica con explosivos a precios relativamente poco competitivos (altos).

3.2.3 Amenazas de productos sustitutivos

Frente a los productos sustitutivos, son dos las técnicas empleadas para la producción de ondas. Una el uso de los explosivos y otra el uso de sistema vibros (empleo de vibradores con camiones) para la búsqueda de hidrocarburos. Al ser comparadas estas modalidades, la más versátil y económica y de fácil uso en topografía montañosa es la fuente de energía de producción de ondas mediante el uso de explosivos, pues permite el desplazamiento de la fuente de energía (explosivo) para la producción de ondas en el subsuelo. La clave como estrategia diferenciadora frente a los productos sustitutivos es ofrecer el estudio de prospección con explosivos, incluyendo la interpretación de los datos. En consecuencia, entregar así un servicio personalizado con precio, calidad y oportunidad.

3.2.4 Poder de negociación de los proveedores

Baxter (2019) define a los proveedores como aquellos que pueden ejercer poder de negociación sobre los titulares de una industria, al aumentar los precios o al reducir la calidad de los bienes y servicios adquiridos. El proveedor principal es Indumil, quien entrega la cantidad necesaria de explosivos y accesorios a usar para la prestación del servicio de prospección sísmica por kilómetro cuadrado. En programas de exploración es de suma importancia la previa aprobación y control del DCCA en el tema de los explosivos. Su poder es alto, ya que un suministro no oportuno de explosivo genera un alto costo de las empresas operadoras en programas de sísmica, impidiendo la realización de las etapas de perforación y la adquisición de datos de sísmica

en la fase de registro. La selección y evaluación de proveedores será entonces un factor determinante para garantizar el suministro oportuno de los materiales a costos competitivos y con la calidad requerida (Jafari, Miri, Gholami, Reza y Nia, 2015).

3.2.5 Poder de negociación de los consumidores

La principal presión o poder que ejercen los clientes en las empresas operadoras de programas de sísmica es su gran capacidad financiera, ya que son capaces de realizar la adquisición y suministro de explosivos al sitio de trabajo. En consecuencia, impiden la oportunidad de prestación del servicio de prospección sísmica por empresas con conocimiento en explosivos, en relación con su uso y manipulación. Ahora bien, para que las empresas del sector de explosivos puedan ser operadoras o ejecutoras de programas sísmicos requieren un promedio de USD\$ 66.720 por km², de acuerdo con la Asociación Colombiana de Ingenieros de Petróleo (Checa et al., 2017). Lo anterior explica la necesidad y el alto riesgo financiero que corren las empresas operadoras de programas de prospección sísmica, al tener que contar con altos flujos de caja de manera eficiente, robusta y oportuna. Ello teniendo en cuenta siempre la posibilidad de obtener resultados tanto positivos como negativos, frente a la presencia o ausencia de hidrocarburos en los pozos exploratorios. Las dificultades anteriores muestran la poca oferta de empresas operadoras, en oposición a programas de prospección sísmica, generando baja demanda de servicios en esta disciplina, usando como fuente de energía los explosivos

4. CONCLUSIONES

1. A nivel macroentorno, la herramienta PESTEL muestra una favorabilidad en la competencia directa del servicio de prospección sísmica, en especial la variable política y social. Política, por el apoyo del gobierno a través de la reforma tributaria del año 2016, y programas sociales mediante su seguimiento por parte de la ANH. Referente a las otras variables: económicas, tecnológicas y legales, son de obligado cumplimiento, a excepción de la económica, que depende principalmente del precio internacional del hidrocarburo.

2. A nivel microentorno, se resalta la importancia de la ventaja competitiva de los competidores. Herramientas como Fuerzas de Porter, resaltan el conocimiento

y cumplimiento legal en el uso y adquisición de explosivos. Por el contrario, muestra su debilidad en geofísica para la adquisición e interpretación de datos de sísmica. Por otra parte, se muestra la importancia de la capacidad financiera y el establecimiento de estrategias principales, como la fidelización de clientes (compañías operadoras), evitando por parte de ellos la adquisición de explosivos.

V. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2015). Cadena productiva de hidrocarburos. Recuperado <http://www.anh.gov.co/Ninos/Cartillas/cadenaProductivaHidrocarburos.pdf>.
- Baxter, G. (2019). A strategic analysis of Cargolux Airlines International. Infrastructures, 4 (1), pp. 2-8.
- Carvajal, M. (2015). Diagnóstico ambiental preliminar de condiciones socioambientales para un estudio de impacto ambiental de un área de perforación exploratoria del bloque CPO8 sur, ubicado en el departamento del Meta y Vichada. Bogotá, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada.
- Checa, J., Hocol, J., Rodríguez, J. y Explorasur. (2017). Los dolores de la sísmica: costos operativos diarios por kilómetro cuadrado de programa sísmica. Bogotá, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada.
- Dinero. (2019). La apuesta de Colombia para encontrar más petróleo. Recuperado de <https://www.dinero.com/edicion-impresa/pais/articulo/que-proyectos-petroleros-hay-en-colombia-en-2019/266410>
- Fernández, A. C., González, S. A. y Santos, M. P. (2015). Impactos ambientales generados por la exploración sísmica en la industria petrolera colombiana. El Centauro, 7 (10), pp. 69-80.
- Gangwar, S. (2018). A study of importance for analyzing and understanding the firm's external environment in Delhi. Journal of Advances and Scholarly Researches in Allied Education (JASRAE), pp. 471-475.
- Gutiérrez, M. y Gall, J. (2002). Prospección de hidrocarburos en la plataforma continental de Asturias. Oviedo, España: Universidad de Oviedo.
- Herrera, Y. y Cooper, N. (2010). Manual para la adquisición y procesamiento de sísmica terrestre y su aplicación en Colombia. Recuperado de <http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Documents/Manual%20Tecnicas%20Sismica%20Terrestre.pdf>
- Industria Militar Colombiana (2019). Manual para Explosivos Industriales. Recuperado de <https://www.indumil.gov.co/wp-content/uploads/2019/04/INDUMIL-MANUAL-PARA-EXPLOSIVOS-INDUSTRIALES.pdf>
- International Society of Explosives Engineers. (2008). Manual del especialista en voladura. 17va edición. Cleveland, Estados Unidos: International Society of Explosives Engineers
- Jafari, M., Miri, M., Gholami, S., Reza, H. y Nia, S. (2015). Factors affecting the competitiveness of the food industry. Journal of Asian Scientific Research, 5 (4), pp. 185-197.
- Johnson, G., Scholes, K. y Whittington, R. (2008). Dirección estratégica. Nueva Jersey, Estados Unidos: Prentice Hall.
- Krause, J. (2013). Impact of the analysis of the microenvironment: an example of distillery in the Czech Republic. Food science and quality management, pp. 26-31.
- Porter, M. (2015). Estrategia competitiva. Técnicas para el análisis de los sectores industriales y de la competencia. México: Grupo Editorial Patria.
- Ribón, Y. (2017). Impacto ambiental generado por empresas contratistas del sector hidrocarburos. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Rodríguez, B. (2017). Estudio de mercado receptor. Herramientas informáticas de gestión y comunicación de proyectos. Alicante, España: Legis.
- Unidad de Planeación Minero-Energética. (2017). Plan Nacional de Desarrollo Minero con Horizonte a 2025. Bogotá, Colombia: Ministerio de Minas y Energía.



LA HUELLA DE CARBONO DEL USO DE EXPLOSIVOS EN LA INDUSTRIA EXTRACTIVA

Sandra Cano
Jefferson González
Diego Rubio
Mario Álvarez

RESUMEN

En la actualidad, las industrias extractivas buscan sistemáticamente la reducción del consumo de energía que requiere una mina, así como la reducción de las Emisiones de Gases Efecto Invernadero (EGEI) como consecuencia de su actividad productiva. Esta reducción se lleva a cabo, principalmente, para responder a la exigencia de contribuir a la mejora del medio ambiente afectado por esta actividad, lo que redundará en la reducción del impacto ambiental. Se busca minimizar las emisiones hasta lograr un punto neutro, lo que se denomina Carbono Neutro (CN). En este sentido, el uso de explosivos en el proceso de producción emite Gases Efecto Invernadero (GEI), para lo cual es importante la implementación de prácticas con las cuales se reduzcan para aportar al logro de CN. En este trabajo se realiza una revisión preliminar de referencias que permiten una aproximación al entendimiento de la problemática e identificar algunas de estas prácticas. Se evidencia la necesidad de implementar mejoras en el proceso de producción de las actividades mineras, incluido el uso de explosivos, para reducir las EGEI.

Palabras clave: Huella de carbono, carbono neutro, descarbonización, explosivos, contaminación atmosférica, riesgos a la salud, prácticas de reducción y mitigación.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático en la vida del planeta ha sido un proceso natural, sin embargo, en las últimas décadas se viene presentando un aumento acelerado de la temperatura comparado con otros periodos. Este aumento de temperatura genera calentamiento global acentuado por elevados niveles de emisiones de GEI como Metano (CH₄), Dióxido de Carbono (CO₂) y Ozono (O₃), que son los mayores responsables de este fenómeno generado por la actividad humana [1]. En el informe, IDEAM, PNUD, ONU-REDD (2016) se indica que el 36% de las EGEI corresponden al uso de combustibles fósiles en centrales termoeléctricas y a la quema de combustibles

ABSTRACT

At present, the extractive industries systematically seek to reduce the energy consumption required by a mine, as well as the reduction of Greenhouse Gases (GHG) emissions due to their productive activity. This reduction is carried out mainly to respond to the requirement to contribute to the improvement of the environmental effects from such activities, which end up in the reduction of environmental impact. It seeks to minimize emissions until reaching a neutral point or net zero, which is called Carbon Neutral (NC). In this sense, the use of explosives in the production process emits Greenhouse Gases (GHG), hence the importance to implement practices to reduce and contribute to net zero target. A preliminary review of references is carried out that allows an approach to the understanding of the problem and how to identify some of these practices. There is evidence of the need to implement improvements in the production process of mining activities, including the use of explosives, to reduce GHG emissions.

Keywords: Carbon footprint, decarbonization, neutral carbon, atmospheric pollution, health hazards, reduction, and mitigation technologies.

en la producción y refinación de petróleo y gas. Adicionalmente, presenta lo que denomina emisiones de “CH₄ y CO₂ - fugitivas en minería de carbón”, en las cuales se incluyen las producidas por las voladuras con explosivos. Estas emisiones fugitivas se presentan como “... emisiones por venteo (exposición de las emisiones al viento), quema en antorcha y fugitivas durante las actividades de extracción, procesamiento, producción, almacenamiento y distribución de combustibles...”, sin embargo, en dicho informe no hay una referencia precisa sobre el aporte de las EGEI debido a las voladuras.

En las actividades extractivas es común el uso de explosivos, los cuales se denominan materiales de alta densidad de energía (HEDM, por sus siglas en inglés), en razón a la eficiencia que estos aportan a la productividad. Los HEDM, explosivos, propulsores y pirotecnia, generan alta temperatura y presión debido a reacciones exotérmicas rápidas que se desarrollan en la detonación [2]. Agentes explosivos como emulsiones, slurries y ANFO (Nitrato de amonio con petróleo combustible) entre otros, se utilizan masivamente debido a que sus propiedades ofrecen condiciones seguras, eficientes y efectivas para las operaciones de transporte, cargue y voladura. Es en el proceso de producción del explosivo y en la voladura, en donde se produce la contaminación atmosférica causada por la emisión de polvo y óxidos de nitrógeno (NO_x).

Las actividades que se desarrollan en un proyecto de extracción impactan el medio ambiente en diferentes ámbitos: las EGEI, el consumo de energía en la operación minera, la afectación a la biomasa y a los recursos hídricos de la zona a intervenir, la afectación a comunidades cercanas al sitio de la voladura, entre otras. Todos estos efectos deben ser cuantificados para establecer acciones de mitigación y reducción del impacto de la actividad productiva. Es así como, respecto del uso de explosivos, es importante responder a preguntas como: ¿Qué acciones realizan las empresas mineras para reducir la huella de carbono en el uso de explosivos, para apoyar la neutralidad de carbono? y ¿Qué acciones asociadas con el uso de explosivos debe realizar una empresa que se quiera comprometer con el logro de ser carbono neutro?

2. LA PROBLEMÁTICA

De acuerdo con el informe “The Carbon Majors Report”, [3] se afirma que el 71% de las emisiones globales

desde 1988 se concentran en 100 empresas. Asimismo, de acuerdo con el análisis de emisiones entre los años 1988 y 2015, realizado por la Revista Semana (2017), se evidencia que la producción petrolera y de carbón son las responsables de más del 50% de la contaminación mundial. Esta información, junto con la expectativa de incremento de la extracción de los recursos naturales para el año 2100, prevé que la temperatura global podría aumentar hasta en 4°C trayendo consecuencias como extinción de especies animales y vegetales, una crítica escasez de alimentos y afectación en las principales cuencas hidrográficas. Este panorama podría ser más optimista si estas empresas reducen sus emisiones, logrando un equilibrio entre la rentabilidad del negocio en el corto plazo y alcanzar un punto de EGEI neutro. En el reporte mencionado, se identifica que 18 empresas de las 100 relacionadas con la producción de carbón emiten alrededor del 40% de los GEI. Si estas empresas establecieran acciones decididas para su reducción, ofrecerían un importante beneficio para el medio ambiente, lo cual empieza por la estimación de las emisiones directas e indirectas debidas a la actividad productiva. Esta estimación se realiza con ayuda del método de la Huella de Carbono (CF) el cual se introduce a continuación [4]. El cálculo de la CF presenta desafíos al sector minero para mejorar la eficiencia en el aspecto ambiental respecto de los componentes que se utilizan para la explotación con el uso de explosivos.

2.1 La Huella de Carbono

La Huella de Carbono (CF, por sus siglas en inglés) es el método utilizado para estimar la producción de GEI emitidos directa o indirectamente en la producción de bienes y/o servicios. Con el método de la CF se cuantifica la contribución del proceso de producción al cambio climático debido a las EGEI. Respecto del producto, el indicador se denomina “Huella de Carbono del Producto”, [5], [6], [7]. Se considera el proceso desde la extracción de las materias primas hasta su disposición final, [8].

La CF incluye el aporte de todas las EGEI que contribuyen al calentamiento global; de esta manera el cálculo de emisiones de cada gas se reporta en CO₂ equivalente, como una medida exclusiva de la cantidad total de las emisiones de dióxido de carbono asociadas a una actividad productiva, o se acumula en las etapas de vida de un producto, incluyendo todas las emisiones directas e indirectas, [9].

2.2 Huella de Carbono de las organizaciones

De acuerdo con [10] Lister, (2018) el cálculo de la CF de una compañía es muy importante para conducir sus actividades y relaciones comerciales. Las empresas deben determinar sus EGEI en tres alcances de acuerdo con los estándares de cálculo de la CF basados en los alcances de The World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) y The World Resource Institute (WRI) del año 2004 [11] y [12]:

- Alcance 1: Emisiones producidas y controladas directamente por la organización,
- Alcance 2: Emisiones producidas como consecuencia de las actividades de la institución que se producen en lugares externos a ésta,
- Alcance 3: Emisiones producidas por terceros que están prestando un servicio o entregan un bien a la organización.

2.3 Hacia empresas mineras con carbono neutro

Las 30 principales compañías mineras globales se encuentran en proceso de cambio, describiendo planes para alcanzar emisiones de carbono neutro a partir de la evaluación de los objetivos de la industria en julio del 2020. Estas compañías están listadas como las más grandes mineras por capitalización de mercado a septiembre 30 del 2020; en esta lista no se incluyen empresas chinas. En el Anexo 1 se presenta el listado de estas empresas y sus compromisos respecto a los alcances mencionados previamente. De estas empresas, las expectativas hacia carbono neutro son las siguientes:

- El 37% de las empresas tienen metas globales específicas del año en el que serán neutrales en emisiones de carbono
- Las empresas con metas de carbono neutro definidas representan el 56% del valor de mercado de las 30 principales analizadas
- La industria primaria de extracción metálica y minera representa el 43% del valor de mercado, pero solo el 34% declaran fechas específicas para convertirse en carbono neutro
- Las dos mineras más grandes, BHP y Río Tinto, representan más del 25% del valor total de capitales. Estas empresas cuentan con fechas y metas ya definidas para ser carbono neutro
- La tercera parte de las empresas estudiadas no disponen de metas definidas aún para convertirse en carbono neutro en cualquiera de sus alcances,

por el contrario, sí cuentan con indicadores de algún compromiso al respecto

- Únicamente la empresa Vale S.A. ha realizado compromisos de disminuir en el Alcance 3 para el 2035
- Solo una empresa, Wheaton Precious Metals Corp., reportó ser ya carbono neutro
- 5 empresas de las 30 analizadas están comprometidas para ser carbono neutro antes del 2050: cuatro antes del 2040 y una en la segunda mitad del siglo XXI
- Las empresas mineras están estableciendo objetivos aspiracionales para reducir la intensidad de los GEI del orden del 5 al 8%

3. EL TRABAJO DE VOLADURA CON EXPLOSIVOS Y SU IMPACTO AMBIENTAL

De la bibliografía [2] se extrae que una de las preocupaciones ambientales de la industria extractiva es la contaminación atmosférica causada por la emisión de polvo y óxidos de nitrógeno (NOx) por la detonación de los explosivos (el factor de emisión promedio es de 5kg por tonelada de nitrato de amonio de uso en explosivo).

El exceso de gases en la voladura se produce por:

- a. Detonación deficiente por un iniciador débil o que no es el adecuado
- b. Mezcla inadecuada de los agentes explosivos
- c. Voladura de barrenos con nivel freático alto con explosivos no resistentes al agua
- d. Degradación del explosivo por envejecimiento
- e. Deficiente confinamiento con escape de GEI
- f. Voladura de barrenos sin taco sellador o con explosivo hasta su boca

La actividad minera debe avanzar hacia la reducción del consumo de energía y de las emisiones de GEI frente al reto de llegar a depósitos más profundos. La minería de superficie utiliza tres fuentes principales de energía: diésel para maquinaria móvil, electricidad para máquinas fijas y explosivos para fracturar y mover las rocas. En la Tabla 1, a continuación, se presenta la emisión de CO2 equivalente de acuerdo con estas fuentes de energía.

En este contexto, debe tenerse en cuenta que la fabricación de nitrato de amonio produce, comparativamente con las operaciones mineras, una mayor cantidad de GEI. Por ejemplo, al obtener ácido

nítrico y nitrato de amonio de las plantas de producción de Envinox Omnia Group, se elimina el 98% del N2O de la torre de absorción de la instalación, lo cual garantiza sostenibilidad ambiental a sus clientes (Alcance 3).

Cabe anotar que el Alcance 3 es difícil de lograr, debido al limitado control que se tiene como compañía minera sobre el uso y fabricación de las materias primas involucradas en sus procesos particulares, así como lo relativo al uso de explosivos altos y mezclas explosivas. Se necesita trabajar en esta vía con organizaciones que tengan el mismo enfoque y metas, de lo contrario no será fácil lograr este Alcance.

Actividad	Producción de CO ₂
Funcionamiento de maquinaria diésel	3 ton de CO ₂ por cada tonelada de diésel consumido
Generación de electricidad	1 ton de CO ₂ por cada Megavatio/ hora consumida
Detonación de explosivos	1 ton de CO ₂ por cada 5 toneladas de explosivo consumido
Fábrica de nitrato de amonio	1 – 4 ton de CO ₂ por cada tonelada de explosivo producido

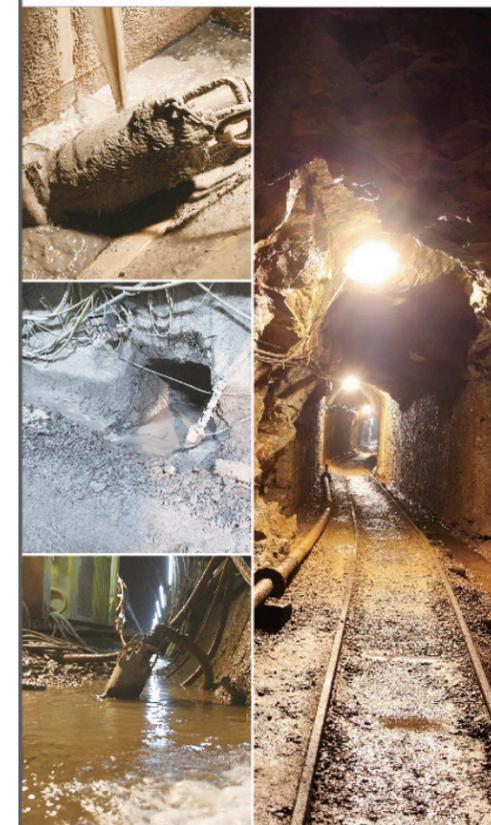
Tabla 1. Producción de CO₂ por fuente de energía en la mina. Fuente: Elaboración propia basada en [11].

Las empresas mineras deben trabajar con los objetivos de las entidades gubernamentales los cuales evolucionarán sus políticas y estarán en cambio continuo que muy probablemente se impondrán a un ritmo que no van a estar en sincronía con las inversiones del sector minero. Se necesita pues enfocarse con estas agencias en la claridad sobre cuál sería la trayectoria hasta el 2050 y más allá, y concertar con ellas sobre cuáles serán las implementaciones, en lugar de esperar que éstas les sean impuestas. La búsqueda de nuevas materias primas, o tecnologías para su reemplazo, están siendo exploradas actualmente, como la tecnología que implica la transformación de una solución de electrolito en un pozo mediante energía eléctrica en plasma de alta presión y temperatura [13].

Las empresas consumidoras de N2O deben exigir a los fabricantes de nitratos la certificación de reducción del N2O en las instalaciones de producción para ser reportados en los informes de sostenibilidad, lo que contribuye en la mejora del Alcance 3. En la Figura 1, se presentan los valores de emisiones de GEI en la operación de extracción de carbón de superficie por tonelada de carbón extraído, [14].

Los cambios en la formulación y composición de los explosivos modernos a granel más comúnmente utilizados resultan en una pequeña variación de los GEI producidos en su detonación [15]. Los principales cambios en la intensidad de los GEI pueden llevarse a cabo en el proceso de manufactura del nitrato de amonio, pero, aunque éstos no afectan las emisiones de voladura en la mina están relacionados con el Alcance 3 para las operaciones mineras.

De la figura 1, se aprecia que los cambios para el perfil de emisiones de los explosivos que se detonan están impactando menos del 1% del problema. Aún, si las EGEI provenientes de la detonación de explosivos a granel se pudiesen reducir a la mitad, el impacto de la mina en la intensidad de los



Bombas sumergibles para aplicaciones de minería y tunelería

Robustez, Durabilidad y Confiabilidad
Calidad Japonesa



GEI sería del orden del 0,5% o menos. Aunque parezca pequeña esta reducción, sí aporta al esfuerzo de reducir las EGEL.

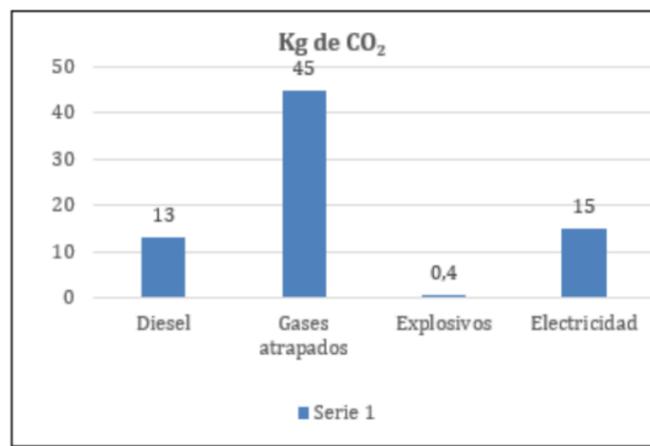


Figura 1. Emisión de GEI de la extracción de carbón. Fuente: Elaboración propia, basada en [14]

Más aún, considerando que el proceso de fragmentación de roca es uno de los primeros del inicio del ciclo minero, el uso óptimo de los productos explosivos y sus capacidades tiene la habilidad de impactar significativamente el perfil y emisiones en procesos mineros posteriores. Una adecuada voladura contribuye a una operación de minado más eficiente ya sea al exponer más mineral usando virtualmente la misma cantidad de energía, o de otro modo, maximizando la recuperación de mineral con la misma cantidad de consumo de energía. El diseño de voladuras optimizado en operaciones de carbón con dragalinas puede aumentar hasta en un 6% el material que no necesitará mover el equipo de cargue. Para operaciones en minas metálicas a cielo abierto, el proceso de molienda utiliza hasta un 60% del total de energía consumida por la mina. Voladuras que produzcan una mejor fragmentación para la molienda, ayudan a reducir la intensidad de los GEI aún más allá de las metas actuales de las compañías, con el potencial de beneficios en lucro significativo.

4. BENEFICIOS DE LA REDUCCIÓN DE LA CF EN LA UTILIZACIÓN DE EXPLOSIVOS PARA VOLADURAS

La CF es un indicador que ayuda a las empresas a determinar las EGEL que producen en cada uno de sus procesos. Conocer la CF permite que las empresas desarrollen proyectos para reducir sus costos de operación por medio de la optimización de procesos, lo

que trae beneficios corporativos además de contribuir a la preservación del medio ambiente [16]. [17] citado por [18], menciona cuatro ventajas de la aplicación de la CF para las organizaciones que hacen uso de explosivos en su actividad productiva:

- Promocionar las buenas prácticas en la reducción de emisiones, que les proporcione aceptación social, permitiendo armonía entre el proyecto y la comunidad en la que se encuentra inmersa.
- Permitir el desarrollo de estrategias de mejoramiento y seguimiento al cumplimiento de recomendaciones para disminuir la CF.
- Mejorar el ranking comercial y demostrar a los entes de control ambientales su compromiso con la mejora de la calidad del aire.
- Diferenciar su organización de otras al contar con indicadores y una mejora continua de procedimientos.

5. HACIA CARBONO NEUTRO EN EL USO DE EXPLOSIVOS

La importancia que presenta la aplicación de la CF como método de medición de este impacto ambiental en las voladuras, desafía a las empresas a generar opciones, métodos o técnicas de voladuras que conlleven a la reducción de estas emisiones manteniendo o aumentando la producción. Países como Chile y Australia, están adoptando medidas para optimizar las voladuras sin afectar el medio ambiente, entre éstas:

- Transición de detonadores pirotécnicos a detonadores electrónicos. Éstos permiten un control mucho más efectivo de la energía explosiva
- Realización de estudios con el uso de modelos predictivos de fragmentación para estudiar las emisiones de GEI en cada diseño de voladura utilizado
- Utilización de emulsiones gasificantes las cuales ofrecen un mejor balance de oxígeno en la mezcla explosiva, minimizando la presencia de gases nitrosos post voladuras

6. CONCLUSIONES

Los procesos de voladura en la industria minera producen contaminantes que son transportados hacia la atmósfera contribuyendo al cambio climático, los GEI son procedentes de la quema de combustibles, dióxido de carbono, metano y material particulado. Para lograr

la disminución progresiva en la huella de carbono del sector minero, hasta alcanzar una condición de carbono neutro, es preciso el mejoramiento de las técnicas de producción para ser más amigables con el medio ambiente.

Las grandes empresas mineras están tomando conciencia del impacto de sus operaciones en el cambio climático, su nivel de compromiso va en ascenso y ya han establecido fechas específicas de su transformación a carbono neutro en su mayoría para el año 2050.

La generación de GEI por el uso de explosivos es una porción relativamente pequeña respecto del total generado por la minería, sin embargo, las empresas deben dar importancia a la disminución que estas emisiones suman al esfuerzo de transformarse en carbono neutro.

Las buenas prácticas operacionales son definitivas en el control y uso de la energía liberada por los explosivos. Tales prácticas incluyen la optimización de las técnicas de voladuras, enfocándose en la combinación adecuada de material explosivo y el mejoramiento en el diseño de voladuras. El uso de detonadores electrónicos para un menor consumo de explosivos, estrictos programas de control de calidad (QA/QC) tanto en la producción de explosivos como en las mejores prácticas de campo para evitar la generación de gases nitrosos, son responsables de un menor consumo de energía en los procesos posteriores al lograr una mejor productividad de los equipos de cargue, triturado y lixiviación del material tratado.

Es importante resaltar que el diseño de voladuras para lograr una adecuada reducción de los GEI por causa de los explosivos debe tener en cuenta las características de la roca, el macizo y el explosivo, así como los procedimientos de cargue, entre otros.

En lo relativo al difícil manejo del Alcance 3, proveer y consumir nitratos producidos de plantas modernas que certifiquen sus esfuerzos de reducción de emisiones de óxidos nitrosos al medio ambiente durante el proceso mismo, es clave para poder demostrar también el compromiso de la industria minera en la escogencia de proveedores de materias primas.

Vital el manejo conjunto con las diferentes entidades gubernamentales, la trayectoria de las futuras implementaciones para cada uno de los alcances. Tales

nuevas regulaciones podrían no estar en sincronía con las inversiones del sector minero, así pues, debe enfocarse de manera activa con estas agencias cuál va a ser la trayectoria hasta el 2050 y más allá.

REFERENCIAS

- [1] Ahmed, M. (2020). Introduction to Modern Climate Change. Andrew E. Dessler: Cambridge University Press, 2011, 252 pp, ISBN-10: 0521173159. Science Of the Total Environment, 734, 139397. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139397
- [7] Balaguera, A., Carvajal, G., Albertí, J., & Fullana-i-Palmer, P. (2018). Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review. Resources, Conservation and Recycling, 132, 37-48. doi: 10.1016/j.resconrec.2018.01.003
- [4] Bhoyar, S., Dusad, S., Shrivastava, R., Mishra, S., Gupta, N., & Rao, A. (2014). Understanding the Impact of Lifestyle on Individual Carbon-footprint. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 133, 47-60. doi: 10.1016/j.sbspro.2014.04.168
- [18] Cárdenas, D.B. 2017. Cálculo de Huella de Carbono del Archivo Central Hochschule Mining sede Lima 2016 a través del Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte. Informe Profesional para optar el Título Profesional de Licenciado en Bibliotecología y Ciencias de la Información, Universidad Mayor de San Marcos. Lima, Perú. 141 p.
- [17] Catalá G. (2013). Diseño y validación de un procedimiento de cálculo de la huella de carbono en una administración local. Tesis para optar el grado de Doctor, Universidad Miguel Hernández de Elche, Elche, España.
- [15] Chacón, E., (2018), Utilización de emulsión gasificable en voladura para optimizar factores ambientales, técnicos y económicos en minería a tajo abierto (pp 2-3). Arequipa, Perú.
- [5] Fullana, P., Betz, M., Hischer, R., & Puig, R. (2009). Life Cycle Assessment applications: results from COST action 530. European Science Foundation, AENOR ediciones, 15, 184.
- [6] Fullana-i-Palmer, P., Puig, R., Bala, A., Baquero, G., Riba, J., Raugei, M., 2011. From life cycle assessment to life cycle management. J. Ind. Ecol. 15 (3), 458-475.
- [16] Ganda, F. & Milondzo, K. (2018). The Impact of Carbon Emissions on Corporate Financial Performance: Evidence from the South African Firms. Sustainability, 10(7), 2398. doi: 10.3390/su10072398
- [3] Griffin, P. (2017). The Carbon Majors Database. CDP Carbon Majors Report 2017. Climate Accountability Institute.
- [13] Labriola, A (2009). Unearthing the carbon footprint. Aust. Min. 2009, 101, 34-35.
- [10] Lister, J., (2018). The Policy Role of Corporate Carbon Management: Co-regulating Ecological Effectiveness. Global Policy Volume 9, Issue 4, November 2018. University of Durham and John Wiley & Sons, Ltd.
- [12] Matthews, H. S.; Hendrickson, C. T.; Weber, C. L. The Importance of Carbon Footprint Estimation Boundaries. Environ. Sci. Technol. 2008, 42, 5839-5842.
- [2] Oluwoye, I., Dlugogorski, B.Z., Gore, J., Oskierski, H.C. and Altarawneh, M. (2017) Atmospheric emission of NOx from mining explosives: A critical review. Atmospheric Environment, 167. pp. 81-96.
- [14] Oswani, 2016.
- [8] Secretaría Distrital de Ambiente Subdirección de Políticas y Planes Ambientales (SDASPPA). (2015). Guía para el cálculo y reporte de Huella de Carbono Corporativa (pp. 8-26). Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.
- [13] Singh, S. P., Plasma Blasting Technique - Blasting Without Explosives. The Indian Mining & Engineering Journal, Vol. 59, No.12, December 2020, pp.29-30 Printed in India, @ IME Publications, ISSN 0019-5944
- [11] World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) and World Resources Institute (WRI). (2004). The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. Revised version. Switzerland, Geneva.
- [9] Wiedmann, T.; Minx, J. A Definition of Carbon Footprint; Integrated Sustainability Analysis UK: Durham, UK, 2007; pp 1-11.

INTERACCIÓN UNIVERSIDAD-EMPRESA EN EL PROCESO DE PRÁCTICAS INDUSTRIALES EN EL SECTOR DE EXPLOSIVOS

María Camila Barros Rivera
Fabian Enrique Ramírez Pacheco

RESUMEN

El siguiente artículo da a conocer la experiencia de pasantías por parte de estudiantes universitarios pertenecientes a la facultad de ingeniería de minas en el área de explosivos y voladura, referencia situaciones a las que están expuestos y analiza la relación empresa-universidad y como esta interacción beneficia de manera positiva al pasante y le da oportunidad de combinar la formación adquirida en la academia con la obtenida en campo.

Palabras clave: Estudiante, universidad, empresa, explosivos, aprendizaje, experiencia.

ABSTRACT

The following article depicts the internship experience of Mining Engineering students in the explosives and blasting area, referencing situations to which they are exposed, and analyzes the relationship company-university and how this interaction benefits the intern student and gives him/her the opportunity to combine the knowledge acquired in classroom with that obtained in the field.

1. INTRODUCCIÓN

La educación es uno de los componentes más importantes a nivel personal, la formación adquirida en el ámbito académico no tiene únicamente una aplicación profesional. Los estudios ofrecen una formación para la vida puesto que el conocimiento no está limitado a aspectos meramente académicos, por lo tanto, el estudiante se enfrenta a diferentes situaciones que ayudan en su formación como persona. La práctica profesional en el área de perforación y voladura integra al estudiante en un contexto de escenarios reales de aprendizaje relacionados con la práctica del rol profesional por desempeñar, haciendo posible la adquisición de los conocimientos, las habilidades y las competencias necesarias para el ejercicio profesional. No sólo se movilizan competencias adquiridas en la academia, también se aprenden nuevos conocimientos y nuevas formas de abordar los problemas a partir de situaciones reales, sobre todo en ambientes complejos e inciertos. (Carey y Vargas, 2016, como se citó en Chan, Mena, Escalante, Rodríguez, 2018).

Las empresas en búsqueda de ajustarse a los continuos cambios en los mercados y ser más competitivas, requieren de personal altamente calificado para poder satisfacer estas necesidades, de aquí que la estrecha interacción con el sector universitario es clave para formar los perfiles que las empresas de hoy requieren. Las competencias laborales se basan en las cualidades de las personas para desempeñarse productivamente en una situación de trabajo y no sólo dependen de las situaciones de aprendizaje escolar formal, sino también del aprendizaje derivado de la experiencia en situaciones concretas de trabajo; estos constituyen patrones que permiten comprobar si un trabajador es competente o no (Enros y Farley, M., 1986, como se citó en Zambrano y Aguilar, 2013).

El propósito de este artículo es analizar los objetivos y actividades de las prácticas profesionales, a partir de la interacción universidad-empresa en el sector de los explosivos, con una visión conjunta que permitan ser mejor aprovechadas por los estudiantes y generar un beneficio para las empresas.

NOMBRE	Industria Primaria	1*	2	3. CN	4	5	6	7	8	9	10
BHP Group	Metálica y Minería	120,34	14,1%	SI	2050	2050	100	2050	100	N/A	N/A
Río Tinto	Metálica y Minería	100,05	11,7%	SI	2050	2050	100	2050	100	N/A	N/A
Vale S. A.	Acero	53,97	6,3%	SI	2050	2050	100	2050	100	2035	15
Newmont Corp.	Oro	51,01	6,0%	SI	2050	2030	30	2030	30	N/A	N/A
Fortescue Metals Group Ltd.	Acero	35,96	4,2%	SI	2040	2040	100	2040	100	N/A	N/A
Anglo American PLC.	Metálica y Minería	29,94	3,5%	SI	2040	2030	30	2030	30	N/A	N/A
Glencore PLC.	Metálica y Minería	27,52	3,2%	SI	2050	2035	40	2035	40	N/A	N/A
Wheaton Precious Metals Corp.	Oro	22,01	2,6%	SI	2020	2020	100	2020	100	N/A	N/A
Anglo American Platinum Ltd.	Metales Preciosos y Gemas	17,97	2,1%	SI	2040	2030	30	2030	30	N/A	N/A
Kumba Iron Ore Ltd.	Acero	9,53	1,1%	SI	2040	2030	30	2030	30	N/A	N/A
Sumitomo Metal Mining Co. Ltd.	Metálica y Minería	8,45	1,0%	SI	2075	2050	50	2050	50	N/A	N/A
Barrick Gold Corp.	Oro	49,91	5,9%	NO	N/A	2030	10	2030	10	N/A	N/A
PJSC Norilsk Nickel Co.	Metálica y Minería	38,22	4,5%	NO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Southern Copper Corp.	Cobre	35,00	4,1%	NO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PJSC Polyus.	Oro	28,10	3,3%	NO	N/A	2020	15	2020	15	N/A	N/A
Franco-Nevada Corp.	Oro	26,62	3,1%	NO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Freeport-McMoRan Inc.	Cobre	22,71	2,7%	NO	N/A	2030	15	N/A	N/A	N/A	N/A
Grupo México SAB de CV.	Metálica y Minería	19,84	2,3%	NO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Agnico Eagle Mines Ltd.	Oro	19,24	2,3%	NO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Newcrest Mining Ltd.	Oro	18,24	2,1%	NO	N/A	2030	30	2030	30	N/A	N/A
Saudi Arabian Mining Co.	Metálica y Minería	13,70	1,6%	NO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Kirkland Lake Gold Ltd.	Oro	13,42	1,6%	NO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Antofagasta PLC.	Cobre	13,05	1,5%	NO	N/A	2022	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Hindustrian Zinc Ltd.	Metálica y Minería	12,06	1,4%	NO	N/A	2025	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Fresnillo PLC.	Metales Preciosos y Gemas	11,41	1,3%	NO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Kinross Gold Corp.	Oro	11,10	1,3%	NO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
AngloGold Ashanti Ltd.	Oro	10,82	1,3%	NO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Gold Fields Ltd.	Oro	10,77	1,3%	NO	N/A	2030	N/A	2030	N/A	N/A	N/A
Polymetal International PLC.	Oro	10,31	1,2%	NO	N/A	2023	5	N/A	N/A	N/A	N/A
PAO Severstal	Acero	10,30	1,2%	NO	N/A	2023	3	N/A	N/A	N/A	N/A
		851,57	100%								

*1. Valor de mercado, US\$ miles de millones; 2. Porcentaje del valor de mercado del total de empresas reportadas; 3. Objetivo existente de cero emisiones netas; 4. Año objetivo de cero emisiones netas; 5. Alcance 1; 6. Porcentaje reducción alcance 1; 7. Alcance 2; 8. Porcentaje reducción alcance 2; 9. Alcance 3; 10. Porcentaje reducción alcance 3.

Anexo 1. Metas climáticas de las 30 principales compañías mineras por su valor de capital

2. RELACIÓN EMPRESA-UNIVERSIDAD: PUNTO DE VISTA UNIVERSITARIO

Frente a la relación empresa-universidad (Gibbons, 1994, como se citó en Zambrano y Aguilar, 2013) mostraron cómo la universidad se ha ido transformando y a su vez ha ido cambiando la manera de generar conocimiento, hasta llegar a afirmar que el conocimiento se puede generar en el contexto de la aplicación atendiendo a las necesidades explícitas de algún agente externo, bien sea la industria, el gobierno o la sociedad en general (Vega Jurado, 2007, como se citó en Zambrano y Aguilar 2013). Con referencia a lo anterior (Etzkowitz, 1990, como se citó en Zambrano y Aguilar, 2013) habla de una "segunda revolución académica" que, al igual que la primera en la que la Universidad empuja la construcción de nuevo conocimiento en su estructura tradicional de pasar o reinterpretar el conocimiento preexistente a una actividad complementaria, no sin pocos contradictores, la universidad aprovecha procesos de interacción externa como un mecanismo de búsqueda de nuevos problemas de conocimiento o búsqueda de respuestas a nuevas necesidades del entorno (Enros y Farley, 1986, como se citó en Zambrano y Aguilar, 2013)

Las universidades buscan generar grandes impactos en las regiones, que sean reconocidas nacionalmente y contribuyan a la transformación social. Esto a través de proyectos y/o semilleros de investigación, conferencias, cursos de actualización y programas de postgrado con modalidad virtual y presencial para graduados y egresados, por lo que es necesario el apoyo económico no solo del gobierno sino también de las empresas, las que al realizar un aporte de recursos, obtienen beneficios; el puente para lograrlo son las prácticas profesionales las cuales constituyen una pequeña inversión que genera grandes beneficios a largo plazo para ambas partes.

3. RELACIÓN EMPRESA-UNIVERSIDAD A NIVEL DE PASANTÍAS

Las pasantías son una extensión académica para que el estudiante aplique en un contexto laboral real todos aquellos conocimientos y habilidades que desarrolló durante su programa académico; estas se convierten en una socialización laboral en donde el estudiante debe adaptarse con estas organizaciones, sus procedimientos,

sus técnicas y cultura. Sin embargo, las empresas siempre están en constantes oportunidades de mejoras y soluciones de sus procesos; en esta parte el estudiante participa activamente de acuerdo a las necesidades del área, las que pueden ser administrativas, ambientales, de seguridad o en la parte social como a través de proyectos de grados, investigaciones, monografías, entre otros. Las experiencias de estas prácticas se llevan a cabo en empresas nacionales y multinacionales y pueden ser pagas, y son de carácter temporal.

4. PROCESOS DE PASANTÍAS DESDE LA UNIVERSIDAD

En las prácticas empresariales la universidad tiene en cuenta ciertos parámetros para hacer la selección de un estudiante y enviarlo a cualquier empresa, la cual debe ceñirse primero por el consejo de la facultad donde se reglamenta la opción de grado como una modalidad de trabajo académico que el estudiante debe cumplir. Al momento de hacer la práctica el estudiante debe estar activo en la universidad, haber cumplido con un porcentaje de los créditos del programa que se encuentra cursando y tener el promedio requerido por algunas empresas; en algunos casos, la universidad ofrece seminarios de comportamiento organizacional, para que el estudiante adquiera una adaptación al medio empresarial.

Los estudiantes interesados en desempeñar las prácticas deben acercarse a la decanatura o a la coordinación del programa; una vez allí, la universidad evalúa la calificación del estudiante. El estudiante presenta su hoja de vida a la universidad y ésta la envía a la empresa en donde participa en el proceso de selección establecido. Cuando el estudiante entra en un proceso de selección de una empresa, se notifica a la universidad inmediatamente. La universidad envía al estudiante con carta de aval a la empresa a realizar las entrevistas y gestionar los trámites pertinentes. Una vez el estudiante es entrevistado y completa todos los procedimientos de inscripción, ingresa como practicante a laborar en la empresa. Al oficializarse la práctica, la universidad nombra un asesor quien realizará un acompañamiento al estudiante en su proyecto de grado hasta su sustentación.

5. PROCESOS DE PASANTÍAS DESDE LAS EMPRESAS

Actualmente las empresas cuentan con convenios que realizan con universidades, estas alianzas promueven visitas de campo de estudiantes a las áreas de las empresas, capacitaciones para el personal de las empresas, proyectos conjuntos de responsabilidad social, etc.

La empresa solicita a la universidad estudiantes para pasantías; ésta le envía los datos de aquellos que están agendados para prácticas; los jefes del área que requieren al estudiante realizan la entrevista teniendo en cuenta las competencias y destrezas como aptitudes y actitudes, los cursos que desarrolló en la universidad, si tiene dominio de otros idiomas, cuáles son sus planes y proyectos a futuro; igualmente se les plantean ejemplos de algunas situaciones que pueden suceder dentro del área y más, cuando son mujeres y van a estar en contacto con hombres. Además, el estudiante se encuentra en la obligación de realizarse exámenes de tipo médico exigidos por la empresa para conocer su estado de salud. Durante la etapa de aprendizaje se le otorga una ayuda económica mensual al estudiante por parte de la empresa para su sostenimiento.

6. PROCESOS DE PASANTÍAS DE LOS ESTUDIANTES EN EL SECTOR DE LOS EXPLOSIVOS

En las aulas de clase el estudiante universitario, adquiere sus conocimientos en distintas asignaturas, pero siempre existirá un enfoque hacia una en particular, es el caso de los explosivos; el alumno siente inclinación hacia esta temática, cómo se realiza una voladura, los explosivos que se utilizan, qué tipo de maquinaria perfora y carga esos barrenos, qué tipos de amarres se realizan dentro del área, etc. Todo este conocimiento genera una motivación en el estudiante con la finalidad de formarse y estar en el área de perforación y voladura de cualquier empresa minera. En las prácticas empresariales los estudiantes realizan múltiples actividades en el área de voladuras con el fin de afianzar y adquirir nuevos conocimientos.

Todo practicante debe analizar cómo son los procesos de perforación y voladura, ver qué situación necesitan mejoras o qué temáticas de cambio pueden surgir para

el área y la empresa, ese será su proyecto de grado, el cual beneficiará a la empresa y quedará anexado como investigación en la universidad; deberá trabajarlo por varios meses; la empresa le dará apoyo en toda la información que requiera, ya sea en trabajos de campo o en la parte administrativa, tendrá que trabajar de la mano de sus jefes o tutores designados, generando así amplios canales de comunicación.

El estudiante a partir de reuniones coordinadas con sus jefes, realiza socializaciones, evaluaciones, divulgaciones, entrega de folletos con temas relacionados a voladuras; la mayoría de estas actividades son hechas en campo, en donde se hacen inspecciones, caminatas, toma de evidencias fotográficas y videos para luego ser trabajados en la parte administrativa; el estudiante hace grandes aportes de su conocimiento e interactúa con distintos profesionales, aprendiendo y reconociendo el comportamiento del personal que se encuentra en su entorno, muchas veces viviendo la experiencia de eventos adversos que le van a permitir reconocer sus debilidades y fortalezas.

Muchas veces el estudiante siente cambios del ambiente universitario al ambiente laboral, las horas de trabajo en voladuras son fuertes, la presión que ejerce el trabajar en equipo y la forma en que éste reaccionará ante la orden de un superior. Por otra parte, la empresa le da importancia al tiempo dedicado a ejecutar una actividad por parte del personal. Uno de los factores que afecta el estado emocional del estudiante y de todo trabajador, es el ambiente familiar. Este último oscila entre periodos de estabilidad y de cambio, que son necesarios para propiciar su desarrollo. Una de las causas que afectan el rendimiento laboral de un practicante es el estrés familiar, originando consecuencias inmediatas que inciden directamente en sus niveles de atención, falta de sueño, motivación o mal carácter, desembocando en un incremento de errores a la hora de ejecutar una actividad.

Al finalizar las pasantías, el estudiante debe haber concluido el proyecto de grado y realizar una sustentación ante sus jefes del área y en la universidad con los docentes asignados. Los jefes evalúan todo el desempeño del estudiante, su productividad, calidad de trabajo, eficiencia, formación adquirida y objetivos conseguidos. Según sean sus habilidades y desempeño, se tiene en cuenta para trabajar en la empresa cuando tengan vacantes disponibles.

7. CONCLUSIÓN

Las pasantías son una experiencia que marca la vida profesional del estudiante siendo éste uno de los pilares en el que se sostiene la relación existente entre empresa-universidad, además, se genera una conexión entre los conocimientos adquiridos en la academia y los obtenidos en el campo laboral dando como resultados soluciones que se pueden aplicar en el área de trabajo destinada para el estudiante como es el caso de los explosivos en donde se hizo uso de evidencia fotográfica, inspecciones y trabajos de campo con la finalidad de evitar riesgos laborales y la mejora continua en el área.

REFERENCIAS

- Montoya Ríos, F. and Aguilar Zambrano, J., 2013. La Relación Universidad-Empresa en las Prácticas Empresariales: Un Modelo Conceptual desde las Técnicas de Generación de Ideas. Journal of Technology-Management and innovation, (Volumen 8), p.197.
- Chan Pavón, M., Mena Romero, D., Escalante Euan, J. and Rodríguez Martín, M., 2018. Contribución de las Prácticas Profesionales en la formación de los Estudiantes de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de Yucatán (México). Formación Universitaria, (Vol. 11 N 1), p.54.

ÉTICA EN LA ERA DIGITAL

Rubén Darío Ochoa Arbeláez

En un nuevo espacio que se abre en la revista de la ASOCIACION COLOMBIANA DE PROFESIONALES EN EXPLOSIVOS Y VOLADURAS, con el agradecimiento a todos sus directivos por la invitación que me hacen como ingeniero civil y actual director del Consejo Profesional Nacional de Ingeniería – COPNIA, quiero orientar este artículo a la reflexión y el trabajo preventivo que venimos realizando en cumplimiento de la función misional de la Entidad, de proteger a la sociedad del eventual mal ejercicio profesional de los ingenieros, profesionales afines y auxiliares y sobre todo, en la tarea, lenta pero segura, de reconstruir la cultura ética en el ejercicio profesional como hilo conductor en los proyectos realizados con idoneidad y recalcar en los actuales y futuros ingenieros la ética y la reflexión sobre los efectos que pueden provocar sus decisiones.

Cuando se analizan hechos ocurridos recientemente como el edificio Space, el Viaducto de Chirajara, el Puente Hisgaura, la Hidroeléctrica de Ituango, Hidroituango, el Edificio Acuarela o el Edificio Blas de Lezo, entre otros, se piensa que el tema no es de tecnología o de innovación, si no de la forma en que estamos tomando las decisiones y cómo se están privilegiando factores económicos por encima de los técnicos, sociales, ambientales, éticos y debo orientar mi participación con este artículo a esa arista, entendiendo que el cambio cultural debemos seguirlo generando entre todos los actores, con la oportunidad que el caso demanda, para evitar que el país se siga desangrando.

Los ingenieros somos la clave del desarrollo económico, político, social e industrial y necesitamos innovar, reformar la educación en ingeniería, para responder mejor a los desafíos globales, al desarrollo sustentable, al uso responsable y consciente de los recursos naturales, entendiendo los valores de la vida, la

libertad, la equidad social, la solidaridad y el respeto a la naturaleza, con certeros principios de sostenibilidad, generando conciencia de actuación correcta en cada una de las actividades a nosotros encomendadas.

Los constructos morales en los que se basa el ejercicio de la ciudadanía son una responsabilidad de los profesionales; debemos sistematizar el ejercicio constante de analizar si el tipo de prácticas con que se pretende lograr el desarrollo comunitario son las moralmente adecuadas; si mantienen el respeto a las normas y a la libre competencia, es el cuestionamiento, la reflexión, la visión universal que analiza los actos de un individuo en comunidad, pues para la ética no importa que al interior del grupo o contexto social la norma sea bien vista y aceptada, sino que busca que sea lo correcto desde una visión universal.

“El obrar ético comporta siempre un aspecto de moralidad personal: porque tanto la decisión para la acción como la aceptación consciente y/ o crítica de las normas se logran con la intervención de la conciencia y el juicio personales. Por otra parte, los valores morales se encarnan en la personalidad, como rasgos visibles de carácter, como "virtudes".

El ámbito profesional se visualiza como un entorno altamente complejo. Al momento de confrontar el ejercicio profesional se enfrentarán dilemas éticos que obligarán a esa reflexión sobre los actos morales de los grupos sociales, así como a discernir entre la idea de una sociedad feliz, o una intervención certera, con juicio crítico, a la luz de una reflexión ética, que permita acompañar, organizar o dirigir, las metas y objetivos de los proyectos con un fin real de beneficio a la comunidad. La transformación digital se asocia a la tecnología, pero en realidad es una transformación de la forma



Elaborada por la Dirección de Riesgos Laborales del Ministerio del Trabajo, tiene el objetivo de brindar orientaciones técnicas respecto al uso seguro de explosivos y prevención de los riesgos en labores de voladuras bajo tierra y a cielo abierto, descárguela aquí.

GUÍA TÉCNICA DE SEGURIDAD

PARA EL USO Y MANEJO DE EXPLOSIVOS EN VOLADURAS BAJO TIERRA Y A CIELO ABIERTO



El empleo es de todos

Mintrabajo



en la que las personas nos comunicamos, actuamos, nos relacionamos, es un cambio en la forma como nos comportamos.

La historia de la tecnología ya ha dado la razón sobre que una actitud ética ante la tecnología no solo es más útil a largo plazo para las personas, sino que además es incluso más rentable para las empresas. Steve Jobs defendía radicalmente en sus postulados el innovar como la mejor acción y la más ética. La innovación radical y la guerra y denuncia a los tramposos comerciales de la innovación tecnológica se convirtieron para Jobs en su leitmotiv vital. El tiempo le ha dado la razón. La innovación radical no solo es más ética, sino también más rentable y sostenible en el tiempo. La potencia actual de Apple es la prueba y su mejor legado.

En este momento de pandemia y de aislamiento social, que nos ha hecho pensar queramos o no, sale a flote que no podemos actuar sin valorar, que, en los seres humanos, nuestra acción es intencional, orientada a fines, pero también recordemos que valorar requiere una actitud mental con consecuencias positivas o negativas, casi nunca indiferentes. Ahí interviene la ética, como ese conjunto de normas que están en nuestro interior y que le da vida a la expresión de José Julián Martí Pérez, escritor cubano, quien sostuvo que ayudar al que lo necesita no sólo es parte del deber, sino de la felicidad.

Visto desde el área de explosivos y voladuras, los principios de la práctica de la buena ingeniería deben satisfacer regulaciones aplicadas que busquen minimizar los riesgos y las afectaciones sociales y ambientales que demandan la aplicación clara del criterio profesional con sentido de la ética.

En la Universidad deben florecer sociedades de discursos y prácticas que busquen alternativas al orden social vigente, donde la ética no sea un curso de décimo semestre, sino que se busque la homogenización y el disfrute de la vida cotidiana y la reedificación de la familia y de la conciencia. Considerar la formación de profesionales preocupados por instaurar una sociedad democrática no basada en simples deseos de consumo o como una forma de ganar dinero, si no, interesados en hacer algo útil organizando y mejorando con cálculos y planeamiento, con nuevos conocimientos, buenas prácticas y a la vanguardia de los adelantos tecnológicos hacia cada sector de la ingeniería.

La ética debe ser un soporte de actuación correcta; un saber obrar personal y profesional para fomentar actitudes comprometidas frente a los altos índices de corrupción, al enriquecimiento rápido, solo llevado por una sociedad de consumo, Es preciso asumir la reflexión sobre el obrar humano, sus circunstancias y complejidad. ¿Cómo vivir la vida, de manera más humana, más digna y feliz?

El buen ejercicio profesional en temas relacionados con el uso, apropiación y aprovechamiento de la tecnología debe incluir necesariamente controles, revisión permanente a exposición de datos, y seguimiento continuo a los riesgos y amenazas cibernéticas. En la era digital los ingenieros de áreas relacionadas con nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones tienen un reto muy grande frente al tema de seguridad de la información y prevenir riesgos de sus aplicaciones.

Con estas ideas en la mente, se hace necesario que pensemos cómo vamos a lograr que el trabajo ético de los profesionales en todas sus disciplinas sea la convicción del día a día y logremos generar conciencia del alcance que tendrán las acciones que se llevan a cabo y de las implicaciones que tienen las decisiones que se tomen como profesional.

Éstas son solo algunas reflexiones que dejo a consideración de los lectores, con la finalidad de llamar a la reflexión, insistiendo en la frase que ojalá se mentalice, que el verdadero concepto de la ética, más que códigos y tratados es “La voluntad férrea de hacer las cosas bien”



ABRIENDO ESPACIOS HACIA EL FUTURO



SOMOS EXPERTOS EN

- » FRACTURACIÓN DE ROCA
- » USO DE EXPLOSIVOS
- » PERFORACIÓN
- » EXCAVACIÓN PARA CAISSON
- » DEMOLICIÓN DE CONCRETO Y PILOTES
- » UN EQUIPO DE PROFESIONALES CAPACITADOS Y COMPROMETIDOS.

 Cra. 62 N° 70B - 16 Of. 204
 (57) 310 754 9209 - (57) 312 524 4270 - (57+1) 467 2669
 Bogotá D.C. - Colombia

www.exteccc.com.co

www.exteccc.com.co



EXPLOSIVOS, UNA MARAVILLA POCO CONOCIDA EN LA MINERÍA COLOMBIANA

Jhonnathan Stephen Zambrano Parada

RESUMEN

Los explosivos son en general la maravilla moderna más grande que se ha inventado, a través de ellos la humanidad ha crecido de forma exponencial en comparación a los tiempos en los cuales no existían, en materia de obras civiles, mineras y petroleras. Colombia es rico en minerales por lo cual el utilizar explosivos se hace vital para la adecuada explotación de los mismos, siendo de esta manera uno de los pilares por no decir que el pilar más importante dentro de la industria minera.

Palabras clave: Explosivos, licencia Ambiental, título minero, SG-SST.

ABSTRACT

Explosives are generally the greatest modern wonder that has been invented, through them humanity has grown exponentially compared to the time when there were no such thing as civil works, mining and oil industry. Colombia is rich in minerals, so the use of explosives is essential for the proper exploitation of minerals, being thus one of the pillars not to say that the most important pillar within the mining industry.

Keywords: Explosives, Environmental license, mining license, SG-SST.



1. INTRODUCCIÓN

Los explosivos son la maravilla moderna dentro de la industria de la evolución de las ingenierías y siendo poéticos, del mundo; pese a que no son muy conocidos por todos, se podría decir que el avance de la infraestructura vial, civil, minera, petrolera y demás de un país, se puede medir por la cantidad de material explosivo que utiliza. Para el caso colombiano, los explosivos son mayormente utilizados en actividades petroleras, mineras, civiles y militares. Dentro del presente artículo hablaremos de los explosivos enfocados al sector minero, dando a conocer el por qué los explosivos son un pilar tan importante dentro del sector antes mencionado, teniendo la misma o mayor importancia en comparación con los pilares mineros, ambiental y SG-SST. Para esto debemos conocer la génesis del tema, la cual se presenta brevemente a continuación.

Aún cuando en sus inicios con el descubrimiento de la pólvora por los chinos, fue utilizada para la pirotecnia, la evolución de los explosivos ha ido a pasos agigantados, donde pasamos de estabilizar la nitroglicerina, por Alfred Nobel al patentar la dinamita, a la creación del Trinitrotolueno (TNT), hasta llegar a la actualidad donde tenemos explosivos a base de Nitratos, emulsiones, hidrogeles, ANFO, entre otros; sumado a esto los dispositivos de iniciación han evolucionado de la misma forma ya que en sus inicios se utilizaba mecha rápida y detonadores a base de fulminatos (de ahí el nombre que reciben en algunas regiones de Colombia, el llamar a los detonadores “fules”), luego pasamos a una época donde se utilizaba mecha de seguridad y detonares comunes número ocho, posteriormente se utilizaron los detonadores eléctricos, cuya característica son sus micro retardos y de largo período (MS y LP) que marcarían un gran progreso en las labores con los explosivos y que se utilizan hasta la fecha; luego se utilizaron los detonadores no eléctricos, teniendo como una de sus principales características que utiliza dos explosivos dentro de su sistema, uno al interior del tubo plástico y la carga primaria que posee el detonador hasta que llegamos a los sistemas electrónicos, donde los detonadores son programados por un software según las cadencias de su detonación.

2. CONTENIDO CENTRAL

Colombia es un país en extremo rico en minerales, lo que lo hace un gran consumidor de materiales explosivos para su explotación, es así como uno de los atractivos de la época de la conquista fueron el oro y las esmeraldas que producían nuestros territorios. Con el pasar del tiempo nada ha cambiado, seguimos siendo un atractivo para los inversionistas extranjeros al poseer tantos recursos naturales renovables y no renovables en todo nuestro territorio nacional; dentro de estos recursos podemos encontrar minerales como carbón, del cual encontramos térmicos (utilizado principalmente para la generación de energía), clasificado según su capacidad calórica; metalúrgico (utilizado luego de su transformación en coque, en la fabricación de acero), éste lo encontramos clasificado en altos, medios y bajos, teniendo en cuenta sus características de materia volátil y por último contamos con antracitas (se utilizan en tecnología), sus mayores características son su alto contenido de carbono, pasando por la semiantracita hasta llegar al grafito.

Contamos con grandes extensiones de suelo ricos en oro, principalmente en Antioquia, Nariño y Huila, manejando tenores en ocasiones de hasta 32gr/t, algo que es económicamente muy rentable. Somos el segundo productor de esmeraldas del mundo, teniendo las más puras y de mayor calidad, en la región del occidente de Boyacá y en el oriente del mismo departamento con el descubrimiento en los últimos años de las esmeraldas azules. Y un sin número de minerales que aun poseemos en nuestro territorio y que se buscan sean extraídos de una manera técnica y sostenible con el medio ambiente.

Teniendo en cuenta lo anterior, Colombia es un país por tradición ancestral minero, a diferencia de lo que muchos argumentan, ya que nuestros antepasados indígenas realizaban labores mineras para la adquisición de minerales y piedras preciosas, las cuales eran ofrecidas a los diferentes dioses. Como podemos evidenciar tenemos más de 400 años de experiencia en minería.

Bajo los argumentos antes mencionados y la breve reseña histórica realizada, llegamos a la actualidad de nuestro país, donde la minería se ha convertido en una actividad de utilidad pública, enmarcados en los artículos 58, Constitucional y 13 de la Ley 685 de 2001, pero que debe ir directamente relacionada y soportada por la protección del medio ambiente resguardada

por la normatividad que así lo permite y por último la salud y seguridad de los trabajadores. Es así como en este momento podemos evidenciar cuatro pilares importantes dentro de todo proyecto minero: el pilar minero, el pilar ambiental, el pilar de seguridad y salud en el trabajo y, finalmente, el pilar del uso de las sustancias explosivas, que a continuación explicaremos.

2.1 Pilar Minero

Este pilar está fundamentado en el artículo 332 de la Constitución Política de Colombia el cual indica que *“El Estado es propietario del subsuelo y de los recursos naturales no renovables, sin perjuicio de los derechos adquiridos y perfeccionados con arreglo a las leyes preexistentes”* [1], leyes como la Ley 685 de 2001 (Código de Minas), el Decreto 4134 de 2011, emanado por el Ministerio de Minas y Energía, mediante el cual se crea la Agencia Nacional de Minería (ANM) y la Resolución 271 de 2013, creada por la Agencia Nacional de Minería, por medio de la cual le conceden a la Gobernación de Antioquia las funciones de *“tramitación y celebración de los contratos de concesión, así como aquellas funciones de seguimiento y control que no correspondan al Ministerio de Minas y Energía, en su calidad de autoridad minera (...)”* [2].

Este pilar se encarga de estudiar y otorgar las concesiones mineras, las cuales tienen un tiempo máximo de 30 años prorrogables por otros 30, dentro de los cuales deben cumplir las etapas de exploración, construcción y montaje, explotación y por último cierre y abandono. Durante todo este tiempo las labores mineras deben estar encausadas y/o definidas dentro de un Programa de Trabajos y Obras (PTO), el cual es aprobado mediante resolución emanada por la Agencia Nacional de Minería o en su defecto por la secretaria de Minas del departamento de Antioquia, ésta debe ser cumplida según lo proyectado.

A su vez, tanto la Agencia Nacional de Minería o la secretaria de minas del departamento de Antioquia, son las llamadas a velar por los intereses del estado, al fiscalizar de manera directa los aspectos técnicos y jurídicos de todas y cada una de las concesiones mineras otorgadas a las personas naturales o jurídicas.

En esta parte es de resaltar algo tan importante como lo son el pago de regalías definido por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), unidad que está regida directamente por la Ley 143 de 1994 y

el Decreto 1258 de 2013, cuya misión es *“Planear el desarrollo minero-energético, apoyar la formulación e implementación de la política pública y generar conocimiento e información para un futuro sostenible”* [3]. Pero muchos se preguntarán en este punto ¿Qué son las regalías?

Las regalías son una contraprestación económica que toda persona natural o jurídica a la que se le haya otorgado un título minero debe pagar al estado, esto amparado en los artículos 58, 332 y 360 Constitucional y en el artículo 227 del Código de Minas, el cual indica que *“toda explotación de recursos naturales no renovables de propiedad estatal genera una regalía como contraprestación obligatoria. Esta consiste en un porcentaje, fijo o progresivo, del producto bruto explotado objeto del título minero y sus subproductos, calculado o medido al borde o en boca de mina, pagadero en dinero o en especie. También causará regalías la captación de minerales provenientes de medios o fuentes naturales que técnicamente se consideren minas (...)”* [4]. Como podemos ver, el pilar de la minería es muy importante dentro de la industria minera, por una parte, su aporte técnico-científico y por otra, los aportes que recibe el estado para las distintas obras que se construyen gracias al pago de las regalías.

2.2 Pilar Ambiental

Dentro de este pilar tenemos enmarcados todos los aspectos de protección al medio ambiente, buscando que los impactos negativos a los ecosistemas colindantes con los proyectos mineros sea el menor, ya que toda actividad realizada por el hombre (hasta caminar o simplemente respirar) genera un impacto al medio ambiente.

Colombia es conocida a nivel internacional como una de las primeras constituciones ambientales de América, dando pie a otras como la ecuatoriana o la boliviana, que son completamente ambientales al considerar como objeto de derecho a la *“Pachamama”*. En nuestro país contamos con un código de los recursos naturales, bajo el Decreto 2811 de 1974 y luego de pasar por distintos decretos, ordenanzas y demás, en la actualidad contamos con algunas leyes, como por referenciar, la Ley 1333 de 2009 *“por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones”*, la Ley 99 de 1993, en la cual le dan funciones a las distintas Corporaciones Autónomas Regionales para *“Otorgar concesiones, permisos, autorizaciones*

y licencias ambientales requeridas por la Ley para el uso, aprovechamiento o movilización de los recursos naturales renovables o para el desarrollo de actividades que afecten o puedan afectar el medio ambiente. Otorgar permisos y concesiones para aprovechamientos forestales, concesiones para el uso de aguas superficiales y subterráneas y establecer vedas para la caza y pesca deportiva” [5].

Lo antes referenciado nos impulsa a decir que la protección al medio ambiente en Colombia es tomada con mucha seriedad y responsabilidad. De esta forma y bajo la importancia que le da el Estado al pilar ambiental, ningún proyecto minero puede realizar labores de explotación, sin la respectiva licencia ambiental, otorgada por una Corporación Autónoma Regional (para pequeña y mediana minería) o por la Autoridad de Licencias Ambientales ANLA (para gran minería). Dentro de este permiso se establece una línea base, que no es otra cosa que observar y documentar como se encuentra un ecosistema antes de iniciar un proyecto minero y con base en esto se estructuran los parámetros y medidas para la mitigación de un daño o impacto ambiental.

Posterior a un licenciamiento, tanto las Corporaciones Autónomas Regionales como la Autoridad de Licencias Ambientales mantienen una fiscalización constante y estricta sobre todas aquellas licencias otorgadas, en las cuales el componente técnico y jurídico realizan distintas visitas a campo, con el fin de determinar el cumplimiento de lo establecido dentro de la licencia ambiental y evidenciar que el impacto ambiental sea el menor, logrando de esta manera que la actividad minera sea amigablemente sostenible con el medio ambiente.

2.3 Pilar Sistema de Gestión-Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST)

Este pilar se remonta a la Organización Internacional del Trabajo (OIT), cuyos inicios datan del año 1919 en Ginebra, Suiza, momento en el cual es incorporada a la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y desde ese momento a través de distintos convenios y protocolos que luego fueron ratificados por nuestro país (téngase en cuenta que estos convenios o protocolos ratificados por Colombia, ingresan a nuestro ordenamiento jurídico con fuerza de Ley al estar enmarcados dentro del bloque de constitucionalidad), se establecen parámetros para el desarrollo de cuidados laborales optimizando de esta forma las condiciones de todos los trabajadores.

Por otro lado, en Colombia se han generado varias leyes, decretos y resoluciones que buscan mejorar las condiciones laborales de todo trabajador, en los aspectos físicos, psicológicos, ergonómicos, sociales, ambiente laboral, investigación de incidentes o accidentes, entre otros.

Para el caso que nos asiste es preciso indicar que las condiciones de seguridad y salud en el trabajo dentro del sector minero son de vital importancia para las labores diarias desempeñadas, iniciando con las charlas de seguridad que se realizan al iniciar una jornada, pasando por los elementos de protección personal y aquellos obligatorios según la regulación teniendo en cuenta el tipo de minería (Decreto 1886 de 2015 Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas y Decreto 2222 de 1993 Higiene y Seguridad en las Labores Mineras a Cielo Abierto) como son la obligación del uso de auto rescatadores, multidetectores, líneas de vida, reflectivos entre otros, ya que las actividades que se realizan en la minería se catalogan como actividades de alto riesgo para la salud del trabajador [6], lo que les permite a su vez obtener una pensión de vejez, antes del tiempo establecido para todos los colombianos, cuando estos ejecutan una cotización especial durante por lo menos 700 semanas.

2.4 Pilar uso de sustancias explosivas

Ahora queremos dar a conocer un pilar que, sumado a los anteriores, es de vital importancia para el sector extractivo de la minería, pero que, por su complejidad, malas prácticas y algunos atentados terroristas, la mayoría de las personas lo referencian como algo dañino; hablamos de las sustancias explosivas.

Nuestro país posee un monopolio en cuanto a la fabricación, venta y comercialización de explosivos respaldado por el artículo 223 de la Constitución Política de Colombia, que a la letra reza *“Solo el Gobierno puede introducir y fabricar armas, municiones de guerra y explosivos. Nadie podrá poseerlos ni portarlos sin permiso de la autoridad competente. Este permiso no podrá extenderse a los casos de concurrencia a reuniones políticas, a elecciones, o a sesiones de corporaciones públicas o asambleas, ya sea para actuar en ellas o para presenciarlas (...)”*; bajo este lineamiento normativo, son dos las instituciones que realizan el trámite para la venta y fiscalización del material explosivo, por un lado tenemos al Departamento Control Comercio de Armas Municiones y Explosivos (DCCAEE), el cual se encarga

de autorizar los cupos para la posterior venta, luego de cumplir con varios requisitos y por otro lado está la Industria Militar Colombiana (INDUMIL) empresa encargada de fabricar los explosivos en Colombia, teniendo en cuenta las especificaciones técnicas de cada proyecto minero.

INDUMIL posee para el sector de la minería y de obras civiles, varios productos que permiten a los especialistas en perforación y voladura o a los especialistas tecnológicos en explosivos, crear mallas de voladura de manera técnica y científica necesarias para el trabajo a realizar, para esto se tienen productos como: ANFO, Indugel AV800, Indugel Plus AP, Indugel Plus PM, Emulind B, Emulind S, Emulind E, Pentofex, Sismigel, Cordón Detonante, Mecha de Seguridad [7], entre otros. Cada uno de estos con unas características físico-químicas únicas que permiten realizar detonaciones de forma controlada.

Según la Agencia Nacional de Minería, en la actualidad nuestro país cuenta con 9.602 títulos mineros [8], de los cuales la gran mayoría utiliza materiales explosivos, para los avances de sus Programa de Trabajos y Obras, en distintas presentaciones y según sea el tipo de minería, por ejemplo, la minería a cielo abierto puede utilizar emulsiones a granel o encartuchada, ANFO con multiplicadores de pentofex e iniciadores electrónicos; por el contrario, la minería subterránea que cuenta con otras condiciones como la presencia de gases y segundas detonaciones (minería de carbón que tiene altos contenidos de gas metano) utilizan distintos cartuchos de Indugel y emulsiones encartuchas con el fin de evitar que el explosivo pierda sus características físico-químicas al contacto con el agua que se produce bajo tierra, característica que es conocida como higroscopicidad del material explosivo, que no es otra cosa que *"La propiedad de algunas sustancias de absorber y exhalar la humedad según el medio en que se encuentran"*[9].

3. CONCLUSIÓN

Como se puede deducir, los explosivos en Colombia son más utilizados de lo que podemos imaginar; a través de estas cortas palabras, hemos conocido que en nuestro país, una de las industrias más importantes que genera gran cantidad de empleos, que realiza grandes aportes para el desarrollo de todos los municipios del país, es la

minería, la cual es impulsada por algo tan importante y necesario como son los explosivos, ya que sin ellos no existiría avance dentro del proyecto minero, si no existe avance no hay producción de mineral, si no hay mineral no hay pago de salarios y ni de regalías, si no hay pago de salarios y ni de regalías aumenta la tasa de desempleo y no se podrán realizar las distintas obras que se hacen con las regalías; esto es una cadena que es directamente proporcional al progreso. Es por lo que podemos concluir diciendo que los explosivos, son una maravilla poco conocida en la minería colombiana.

REFERENCIAS

- [1] Constitución Política de Colombia (1991) Art 332.
- [2] ANM (2013), Tomado 11 de Julio de 2021. https://www.anm.gov.co/sites/default/files/res_0271_18_abril_2013.pdf
- [3] UPME (2013). <https://www1.upme.gov.co/Entornoinstitucional/NuestraEntidad/Paginas/Quienes-Somos.aspx>
- [4] Ley 685 (2001) Art 227.
- [5] Ley 99, 1993 Numeral 9 Art 31.
- [6] Ley 2090 (2003) Numeral 1 Art 2.
- [7] INDUMIL (2016) Tomado 11 de Julio de 2021. https://www.indumil.gov.co/wpcontent/uploads/2016/03/Catalogo_general.pdf
- [8] ANM (2021). Tomado 11 de Julio de 2021. https://www.anm.gov.co/?q=Asi-es-Colombia_minera#:~:text=Los%209.602%20t%C3%ADtulos%20mineros%20vigentes,cada%20mineral%2C%20y%20su%20explotaci%C3%B3n.
- [9] RAE (2020). <https://dle.rae.es/higroscopicidad>

HOMENAJE AL INGENIERO LUIS ALBERTO GARZÓN RODRÍGUEZ (QEPD)



Luis Alberto Garzón Rodríguez, persona de cualidades excepcionales; destacado en lo académico, con un concepto firme de los valores morales, de principios muy sólidos en lo ético; comprometido con las responsabilidades asumidas y sobresaliente en lo profesional.

Nacido en la ciudad de Paipa (Boyacá), el 16 de febrero de 1955, séptimo de ocho hermanos; realizó sus estudios primarios en el Liceo Miguel Jiménez López y su bachillerato en el Instituto Técnico Agrícola de Paipa donde se graduó como Bachiller en 1975. Posteriormente, graduado como Ingeniero Químico de la Universidad Nacional de Colombia en el año 1982 e inmediatamente, vinculado a la Industria Militar, en la fábrica de explosivos, FEXAR, en donde desempeñó inicialmente, el cargo de profesional.

Por su excelente desempeño es promovido a diferentes cargos entre los que se destaca en varias oportunidades la Dirección de la Fábrica de Explosivos Antonio Ricaurte, en varias oportunidades. Durante su vida laboral, adelantó estudios de Especialización en Gerencia de Producción en la Universidad de la Sábana;

además de innumerables cursos y diplomados, todos orientados a fortalecer sus conocimientos y proyección en lo que lo apasionaba, los explosivos.

34 años de su vida los dedica a brindar sus sólidos conocimientos profesionales, a la Industria Militar INDUMIL, durante los cuales obtiene los más altos reconocimientos por sus logros de parte de sus jefes inmediatos, así como de sus compañeros de trabajo. También se desempeñó como docente de la Escuela de Ingenieros Militares en las especializaciones de técnicas de voladura y tecnológica en explosivos. Se retira de la Fabrica en 2017 y pasa a su período de pensión; producto de una enfermedad desafortunadamente fallece en la ciudad de Bogotá D.C. en el mes de julio de 2018.

Luis Alberto siempre será ejemplo de emular por las nuevas generaciones de profesionales y por los jóvenes que hoy caminan en busca del éxito.

Lo recordaremos siempre. Hasta pronto Ingeniero Luis Alberto.

Entre sus cargos y logros en la Industria Militar y por ende en el desarrollo de la ingeniería de los explosivos se destacan:

1983-1987 - Jefe de Turno Planta de Concentración de Ácidos

- Estabilización del proceso.
- Balances de materia y energía del proceso real.
- Cálculo de bombas de transporte y dinámica de fluidos de la planta.

1987-1991 - Jefe de Planta de Nitroderivados

- Balance de materiales y estándares de la planta.
- Producción de gelatina explosiva (mastermix) para exportación al Ecuador.

- Producción de ácido nítrico al 69% para exportación al Ecuador.
- Mejoramiento de costos y calidad de la gelatina explosiva.
- Determinación y disminución de desperdicios de los productos de la planta.
- Procedimientos documentados para el Premio Nacional de la Calidad en 1989.

1991-1992 - Jefe de División de Control de Calidad

- Implantación de recepción de materiales por MIL-STD 414.
- Norma de pruebas testigo de los productos.
- Iniciación del programa de medición de los costos de calidad.

1992-2018 - Jefe de División de Producción

- Participación en el cambio de tecnología para sustituir las dinamitas.
- Participación en el desarrollo de nuevos productos.
- Participación en el desarrollo de pólvora doble base.
- Participación en la implementación de los planes de calidad para las diferentes líneas de producción.
- Participación en la implementación del sistema de aseguramiento de calidad para la certificación en el año 2000.
- Participación en la actualización de la norma NTC ISO 9001:2000 de Sistema de Gestión de Calidad de Indumil.
- Auditor Interno de Calidad desde el año 1999, Auditor Líder desde el año --2002.
- Mejoramiento de los procesos productivos de Fexar.
- Diseño y puesta en marcha de la columna de destilación empacada para aumentar la eficiencia del proceso de recuperación de acetona usada en la refinación de pentrita.
- Conferencista del Seminario Internacional de Explosivos del año 2003.
- Conferencista Seminario Internacional de Explosivos del año 2005.
- Patente de Emulind-S año 2005
- Diseño de Ingeniería Básica, Ingeniería de Detalle, Planta de Producción CERRMATOSO.S.A.
- Puesta en marcha Planta de Emulsiones CMSA. 2005
- Participación puesta en marcha Planta de Emulsiones DRUMMOND - 2006
- Diseño ampliación capacidad Planta Concentración Ácidos. 2008

- Participación en el Diseño nueva planta de TELLEX - 2013
- Participación Diseño planta SOSE. 2014-2015

Tributo a lo anterior la Asociación Colombiana de Profesionales en Explosivos y Voladuras ha querido destacar la noble labor desempeñada por el Ingeniero Luis Alberto Garzón Rodríguez en beneficio del gremio colombiano que utiliza los explosivos, los agentes de voladura y sus accesorios en el desarrollo de diferentes labores de la ingeniería. Por tal razón la Junta Directiva de ACPEV creó un premio anual, que llevará su nombre, al mejor trabajo realizado con el uso de los explosivos. Esta premiación se hará los 7 de agosto de cada año con motivo de la celebración del aniversario de la Asociación.

ACTOS



Asociación Colombiana de Túneles y Obras Subterráneas

RECONOCIMIENTO AL INGENIERO NASSER MÁRQUEZ CONTRERAS



Nasser Márquez Contreras es un profesional de la ingeniería de minas que ha dedicado alrededor de 35 años de su vida al ejercicio de la minería, de los cuales 30 años han sido específicamente en el desarrollo de voladuras en minas a cielo abierto. Su amplia experiencia en los procesos productivos y sus diversos estudios de posgrados le han permitido participar como expositor en múltiples congresos nacionales e internacionales de explosivos y voladuras, además de ser un docente destacado que ha contribuido en la formación de nuevos profesionales en el campo de la perforación y voladura.

Su capacidad de liderazgo, compromiso, disciplina y pasión por lo que hace, lo han motivado a publicar su primer libro titulado **Fundamentos técnicos y prácticos en voladuras de carbón a cielo abierto**. Esta obra es el fruto de más de dos años de trabajo

arduo, en los cuales el ingeniero Nasser ha tomado como base las anotaciones diarias logradas de la experiencia a lo largo de su vida profesional, a partir de la elaboración de diversos diseños y la ejecución de múltiples pruebas de campo, algunas con resultados exitosos y otras que sirvieron de guía para implementar mejoras en los procesos, con el fin de lograr voladuras seguras, eficientes y productivas bajo el marco legal colombiano.

Este libro se caracteriza por plasmar los conceptos científicos, técnicos y prácticos para el diseño de voladuras en minas de carbón a cielo abierto, considerando las variables y parámetros indispensables que deben ser tenidos en cuenta para alcanzar los resultados esperados. También se menciona acerca de la importancia de desarrollar la gerencia en la supervisión como mecanismo para conformar equipos de trabajo sólidos mediante la promoción de valores y la generación de confianza. Esta a su vez se convierte en una herramienta vital para la planificación, evaluación e innovación en el ámbito laboral a través del pensamiento crítico, posibilitando la mejora continua de los procesos, la implementación de buenas prácticas y la consecución de las metas planteadas por la organización.



El COPNIA protege a la ciudadanía del eventual mal ejercicio de los ingenieros, profesionales afines y auxiliares.

Decálogo Ético de la Ingeniería



- 1.** Proteja el patrimonio, el entorno humano, el medio ambiente y los recursos.
- 2.** Cuide el buen prestigio de la profesión, respetando las disposiciones legales y denunciando las transgresiones al Código de Ética.
- 3.** Mantenga la confidencialidad, respeto e imparcialidad con sus clientes y colegas.
- 4.** Dedique su aptitud, diligencia y probidad a los asuntos encargados.
- 5.** No permita ni apoye el ejercicio ilegal de la profesión.
- 6.** No acepte sobornos ni prebendas ilícitas.
- 7.** Cumpla con las obligaciones civiles, comerciales y laborales, adquiridas en el ejercicio profesional.
- 8.** No preste sus servicios a proyectos cuyo objeto sea de dudoso o imposible cumplimiento, o que vayan en contra de la Ley.
- 9.** No permita el inicio de obras sin obtener autorización de la autoridad competente.
- 10.** Cumpla con los requerimientos y solicitudes del COPNIA.

FEXAR

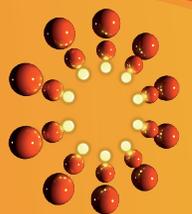
FÁBRICA DE EXPLOSIVOS ANTONIO RICAURTE



¿Necesita operaciones con Explosivos?

Más de 10 años de experiencia en Ingeniería Especializada en Explosivos.

- ✿ Voladuras controladas de mantos rocosos.
- ✿ Monitoreo de vibraciones en actividades de voladura.
- ✿ Implosiones de estructuras.
- ✿ Transporte especializado de explosivos.
- ✿ Asesoría y acompañamiento profesional para la adquisición de explosivos.
- ✿ Diseño y construcción de polvorines.
- ✿ Servicios de sísmica y cañoneo.
- ✿ Voladuras subacuáticas.
- ✿ Capacitación en seguridad industrial en manipulación de explosivos.
- ✿ Operaciones mineras de voladura para cielo abierto y subterráneas.
- ✿ Voladura para mantenimiento, apertura de vías y túneles.
- ✿ Manejo integral de pólvora.



**VOLADURAS
CONTROLADAS
DE COLOMBIA**

f VoladurasControladasDeColombiaSas
v Voladuras Controladas de Colombia
i voladurascontroladas
t @VoladurasS
311 851 7310

www.voladurascontroladas.com

