

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas



TESIS PROFESIONAL

**ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS OPERATIVOS DE LA VOLADURA PARA
EVITAR TIROS CORTADOS POR PRESIÓN DINÁMICA EN EL TAJO
QUECHER DE MINERA YANACOCCHA S.R.L**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PRESENTADO POR:

Bach. Jhenifer Jhoana Vásquez Zelada

ASESOR:

Ing. Victor Ausberto Arapa Vilca

Cajamarca – Perú

2021

AGRADECIMIENTO

A Dios por brindarme la vida y las fuerzas necesarias para cumplir cada una de mis metas trazadas.

Mi agradecimiento a mi alma mater, Universidad Nacional de Cajamarca, a la escuela académico profesional de Ingeniería de Minas, por los conocimientos impartidos durante mi etapa universitaria.

Y un especial agradecimiento a Minera Yanacocha S.R.L por permitirme desarrollar esta investigación, principalmente al área de Perforación y Voladura.

Jhenifer Vásquez

DEDICATORIA

A mis queridos padres Duber y María, ya que a pesar de la distancia siempre me motivaron a salir a delante sea cual sea las circunstancias que se me presente.

A mi hija Luciana, quien es mi principal motivo para seguir dando lo mejor de mí.

A mi hermana Thalía por su infinito amor y ser mi motivo especial para ser mejor persona cada día.

Jhenifer Vásquez

CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE FOTOS	xi
ABREVIATURAS	xii
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO	3
2.1. Antecedentes teóricos de la investigación.....	3
2.1.1. Internacionales	3
2.1.2. Nacionales	3
2.1.3. Locales	3
2.2. Bases teóricas	3
2.2.1. Presión Dinámica	3
2.2.2. Prueba Tipo Cráter	5
2.2.3. Prueba de Uso de Cordón Detonante para Iniciación de Voladuras en Tajo	5
2.2.4. Explosivos	7
2.2.5. Tipos de Reacción de los Explosivos en Función de la Cinética Química	7
2.2.6. Mecanismo de la Detonación	8

	Pág.
2.2.7. Propiedades y Características de los Explosivos	10
2.2.8. Clasificación de los Explosivos	19
2.2.9. Mecanismo de Fragmentación de Rocas	28
2.2.10. Sistemas de Iniciación - Fulminantes o Detonadores	33
2.2.11. Malla	38
2.3. Definición de términos básicos	38

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS	41
3.1. Generalidades	41
3.1.1. Ubicación	41
3.1.2. Accesibilidad.....	42
3.1.3. Geología Regional.....	43
3.1.4. Geología Local	43
3.1.5. Geología del Tajo Quecher	44
3.1.6. Alteraciones Geológicas.....	45
3.1.7. Ciclo de Minado.....	48
3.2. Metodología de la Investigación.....	60
3.2.1. Definición de Variables.....	60
3.2.2. Tipo, nivel, diseño y método de la investigación.....	61
3.2.3. Población de Estudio.....	61
3.2.4. Muestra.....	61
3.2.5. Unidad de análisis	61
3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	62

	Pág.
3.4. Procedimiento.....	63
3.4.1. Prueba Tipo Cráter	63
3.4.2. Prueba de Iniciación de Fulminantes Pirotécnicos en Adición a los Electrónicos.	66
CAPÍTULO IV	
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	80
4.1. Prueba Tipo Cráter.....	80
4.1.1. Análisis de la Prueba Tipo Cráter Nivel 4090 – Sílice Granular	80
4.1.2. Análisis de la Prueba Tipo Cráter Nivel 4080 – Argílico	82
4.2. Prueba de Iniciación de Fulminantes Pirotécnicos en Adición a los Electrónicos .	84
4.2.1. Análisis de la Primera Prueba	84
4.2.1. Análisis de la Segunda Prueba	86
4.3. Plan de Acción para Evitar Eventos de Tiros Cortados por Presión Dinámica.....	88
CAPÍTULO V	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
5.1. Conclusiones.....	91
5.2. Recomendaciones	92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
ANEXOS	94

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Asignación de Tiempos (Nonel de 3000 ms y dispersión incluida)	7
Tabla 2: Principales características de la dinamita	22
Tabla 3: Ventajas y desventajas del uso de la dinamita en voladuras	22
Tabla 4: Ventajas y desventajas del uso de la emulsión sensible en una voladura.....	25
Tabla 5: Principales características de los hidrogeles.....	25
Tabla 6: Explosivos especiales	27
Tabla 7: Accesibilidad a Minera Yanacocha S.R.L.....	42
Tabla 8: Equipos de perforación.....	49
Tabla 9: Tipos y nomenclatura de los taladros.....	51
Tabla 10: Parámetros de perforación y voladura utilizados en el tajo Quecher. (Diámetro de perforación de todas las mallas de 10 5/8").....	54
Tabla 11: Parámetros de perforación y voladura utilizados en el tajo Quecher. (Diámetro de perforación para las mallas de procedimiento y producción de 9 7/8" y 10 5/8" respectivamente).....	54
Tabla 12: Tabla de dureza del terreno de Minera Yanacocha	57
Tabla 13: Equipos de Carguío y Acarreo de Minera Yanacocha.....	59
Tabla 14: Variables de la investigación	60
Tabla 15: Resumen de las pruebas de campo realizadas en el Tajo Quecher de Minera Yanacocha	63
Tabla 16: Tiempos de detonación entre taladros de la Prueba Tipo Cráter	66
Tabla 17: Hoja de carguío de taladros en función de la longitud del taladro utilizada en la Primera Prueba.....	69
Tabla 18: Secuencia y tiempos de detonación de la malla de voladura – Primera Prueba	74
Tabla 19: Tiempos de Detonación asignados en la Primera Prueba.....	76
Tabla 20: Hoja de carguío de taladros en función de la longitud del taladro utilizada en la Segunda Prueba.....	78
Tabla 21: Secuencia de salida de la malla de voladura – Segunda Prueba.....	78
Tabla 22: Tiempos de Detonación asignados en la Segunda Prueba.....	79

	Pág.
Tabla 23: Determinación del costo que genera el evento de un tiro cortado para el tajo Quecher	88
Tabla 24: Controles operacionales para evitar eventos de tiros cortados por presión dinámica en el tajo Quecher de Minera Yanacocha.	89

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Fulminante electrónico con aplastamiento lateral debido a efectos de presión dinámica. (Dyno Nobel, 2017).....	5
Figura 2: Ejemplo de secuencia y tiempos de voladura. (Dyno Nobel, 2018).....	6
Figura 3: Tipo de reacción en función de la cinética química. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)	8
Figura 4: Zonas del proceso de detonación. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013).....	9
Figura 5: Presión de detonación (P_d) y presión de burbuja (P_e) de dos tipos de explosivo. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)	10
Figura 6: Poder Rompedor, método de Hess. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013).....	11
Figura 7: Prueba de Hess. (Exsa, 2012).....	12
Figura 8: Medida continua de la velocidad de detonación en el taladro. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)	14
Figura 9: Equipo de medida continua de la velocidad de detonación. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)	14
Figura 10: Ejemplo de medida continua de la velocidad de detonación. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013).....	15
Figura 11: Clasificación de los explosivos químicos. (Leiva, 2015).....	19
Figura 12: Fórmulas químicas desarrolladas de explosivos iniciadores. (Leiva, 2015).....	20
Figura 13: Clasificación de los explosivos industriales rompedores. (Leiva, 2015)	21
Figura 14: Composición de la dinamita. (Leiva, 2015)	22
Figura 15: Clasificación de las dinamitas según su contenido de nitroglicerina. (Leiva, 2015).....	23
Figura 16: Composición de un hidrogel sensible. (Leiva, 2015).....	24
Figura 17: Composición de una emulsión sensible. (Leiva, 2015).....	24
Figura 18: Composición del ANFO. (Leiva, 2015)	27
Figura 19: Etapas de la mecánica de fragmentación de rocas. (Exsa, 2019)	29
Figura 20: Teoría de reflexión. (Exsa, 2019).....	30
Figura 21: Teoría de expansión. (Exsa, 2019)	31
Figura 22: Modelo de flexión de la viga antes de la detonación. (Lara, 2012)	31

	Pág.
Figura 23: Modelo de flexión de la viga después de la detonación. (Lara, 2012)	32
Figura 24: Teoría combinada: Ondas de tensión, rotura por flexión y expansión de gas. (Lara, 2012)	33
Figura 25: Detonador ordinario. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013).....	34
Figura 26: Fulminante eléctrico instantáneo y de retardo. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013).....	35
Figura 27: Fulminante no eléctrico. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)	36
Figura 28: Corte longitudinal de un fulminante no eléctrico. (Exsa, 2019)	36
Figura 29: Estructura interna de un detonador electrónico. (Exsa, 2019)	37
Figura 30: Programador de Retardos – Iniciador de alta seguridad. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)	38
Figura 31: Mapa de Ubicación de Minera Yanacocha S.R.L	41
Figura 32: Ruta Cajamarca – Minera Yanacocha S.R.L.....	42
Figura 33: Plano geológico del tajo Quecher.....	46
Figura 34: Columna estratigráfica del tajo Quecher.	47
Figura 35: Alteraciones geológicas.....	48
Figura 36: Pantalla del HPGPS para controlar la calidad en posicionamiento del taladro.....	50
Figura 37: Pantalla del HPGPS para controlar la calidad en profundidad del taladro.....	50
Figura 38: Tipos de taladros empleados para las mallas de perforación.	51
Figura 39: Malla triangular	53
Figura 40: Flujograma para el diseño de voladuras.	55
Figura 41: Diagrama de los procesos operativos de voladura.	56
Figura 42: Diseño de carga para un taladro de Precorte.	57
Figura 43: Ubicación de la prueba Tipo Cráter – Tajo Quecher de Minera Yanacocha.	64
Figura 44: Diseño de perforación y voladura nivel 4090 de la prueba tipo cráter.....	65
Figura 45: Diseño de perforación y voladura nivel 4080 de la prueba tipo cráter.....	65
Figura 46: Ubicación de la Primera Prueba de Iniciación de Fulminantes Pirotécnicos en Adición a los Electrónicos.....	67
Figura 47: Geología de la zona de la primera prueba de Iniciación de Fulminantes Pirotécnicos en adición a los electrónicos.....	67

	Pág.
Figura 48: Diseño del carguío de taladros de la Primera Prueba	68
Figura 49: Primado de fulminantes con un booster	69
Figura 50: Primado de fulminantes con 02 booster	70
Figura 51: Primado completo de la malla de voladura	70
Figura 52: Amarre de fulminantes electrónicos.....	71
Figura 53: Testeo de detonadores electrónicos.....	71
Figura 54: Despliegue del cordón detonante en la malla de voladura	72
Figura 55: Conexión de los detonadores pirotécnicos al cordón detonante.....	72
Figura 56: Conexión del fulminante electrónico iniciador al cordón detonante.....	73
Figura 57: Etiquetado y conexión del detonador electrónico iniciador al cable de superficie	73
Figura 58: Secuencia de Salida de Fulminantes Electrónicos y Pirotécnicos – Primera Prueba.....	75
Figura 59: Ubicación de la Segunda Prueba de Iniciación de Fulminantes Pirotécnicos en Adición a los Electrónicos.....	76
Figura 60: Diseño del carguío de taladros de la Segunda Prueba.....	77
Figura 61: Secuencia de Salida de Fulminantes Electrónicos y Pirotécnicos – Segunda Prueba.....	79
Figura 62: Resultados en campo de la prueba Tipo Cráter Nivel 4090 del Tajo Quecher	81
Figura 63: Perfil de esponjamiento y rotura del Taladro 1 – Prueba Tipo Cráter Nivel 4090	81
Figura 64: Análisis de la distribución de energía generada por la carga del Taladro 1 en software JK – Simblast Prueba Tipo Cráter Nivel 4080	82
Figura 65: Resultados en campo de la prueba Tipo Cráter Nivel 4080 del Tajo Quecher	83
Figura 66: Perfil de esponjamiento y rotura del Taladro 1 – Prueba Tipo Cráter Nivel 4090	83
Figura 67: Análisis de la distribución de energía generada por la carga del Taladro 1 en software JK – Simblast Prueba Tipo Cráter Nivel 4080	84

ÍNDICE DE FOTOS

	Pág.
Foto 1: Resultado de la malla volada – Primera Prueba	86
Foto 2: Posición de los taladros extras replanteados por topografía post voladura	86
Foto 1: Resultado de la malla volada – Segunda Prueba.....	87

ABREVIATURAS

Kg/Tn	: Kilogramo por tonelada.
Kg/m ³	: Kilogramo por metro cúbico.
Kg/tal	: Kilogramo por taladro.
Km	: Kilómetro.
Kg	: Kilogramo.
QM	: Quecher Mine.
m/hr	: Metros/hora.
Mpa	: Mega pascal.
N°	: Número.
\$: Dólar.
Pág.	: Página.
KPI's	: Key Performance Indicator.
S.R.L	: Sociedad de responsabilidad limitada.
S.A	: Sociedad Anónima.
min	: Minuto.
Hr	: Hora.
ms	: Milisegundo.
m/s	: Metro por segundo.
Pd	: Presión de detonación.
Pe	: Presión de burbuja.
N°	: Número.
g	: Gramo.
mm	: Milímetro.
Ø	: Diámetro.
UNE-EN 13631-14:2003	: Una Norma Española: Explosivos para uso civil. Explosivos rompedores. Parte 14: Determinación de la velocidad de detonación.

Hz	: Medidas por segundo.
m	: Metro.
<=	: Menor o igual que.
>=	: Mayor o igual que.
g/cm ³	: Gramos por centímetro cúbico.
NO _x	: Gases nitrosos.
CO	: Monóxido de carbono.
CO ₂	: Anhídrido carbónico.
O	: Oxígeno.
N	: Nitrógeno.
Hg	: Mercurio.
Au	: Oro.
Pb	: Plomo.
“	: Pulgada.
%	: Por ciento.
HMX	: High Melting Explosive – Octógeno.
mg	: Miligramo.
Al	: Aluminio.
Cu	: Cobre.
TQ	: Tiro cortado.
B	: Burden.
E	: Espaciamiento.
B´	: Burden efectivo.
E´	: Espaciamiento efectivo.
<	: Menor.
g/m	: Gramos por metro.
HPGPS	: Sistema de alta precisión.

MEQ-73	: Mezcla explosiva quantex 73.
Und	: Unidad.
\$/Hr	: Dólar por hora.
\$/Taladro perforado	: Dólar por taladro perforado.
QA/QC	: Control de calidad / Aseguramiento de la calidad.
gr/tn	: Gramos por tonelada.
Queue	: Espera de la pala por cargar un camión.
Hang	: Espera en cola del camión para ser cargado.
Backup	: Respaldo de seguridad.
m.s.n.m.	: Metros sobre el nivel del mar.
Pit Viper 271	: Tipo de perforadora rotativa de marca Atlas Copco.
DML	: Tipo de perforadora rotativa de marca Ingersoll Rand.
Roc L8	: Tipo de perforadora rotopercutiva, para taladros de precorte.
T1	: Taladro uno.
T2	: Taladro dos.
TQ	: Tiro quedado o cortado.
UTM	: tipo de sistema de coordenadas en base a la proyección cartográfica transversa de Mercator.
BXH	: Brecha hidrotermal.
BXP	: Brecha freática.
UPHA	: Andesita superior.
ULT	: Tufo lítico superior.
TEUT	: Tufo eutaxítico.
TFT	: Tufo fino.
LA	: Andesita inferior.
ppb	: Partes por billón.
TD	: Equipo de perforación.

Ex	: Excavadora.
Digishot Plus	: Marca de fulminantes electrónicos.
Tagger CE4	: Tableta inalámbrica que forma parte de los accesorios adicionales usados para la programación de los fulminantes electrónicos.
5P	: 5 gramos de pentrita por metro lineal de cordón detonante.
J-Hook	: Conector que forma parte de los fulminantes pirotécnicos.
EXTRA	: Taladro extra.
N	: Norte.
S	: Sur.
E	: Este.
W	: Oeste.

RESUMEN

Uno de los tajos operativos de Minera Yanacocha que ha presentado eventos de tiros cortados por presión dinámica desde el inicio de su operación es el tajo Quecher, generando un peligro para el desarrollo seguro de sus operaciones. Es por lo antes mencionado que, la presente investigación tiene como objetivo analizar los parámetros operativos de la voladura que influyen en la ocurrencia de eventos de tiros cortados por presión dinámica en el Tajo Quecher de Minera Yanacocha, como lo son: la distancia mínima entre taladros y el factor de carga; además de comprobar la eficiencia del uso de cordón detonante para iniciar los fulminantes pirotécnicos utilizados como back up en un taladro como método para eliminar los eventos de tiros cortados por presión dinámica, ésto se hizo posible a partir de la ejecución de dos tipos de pruebas en campo: tipo cráter (una) y de iniciación de fulminantes pirotécnicos en adición a la de los electrónicos (dos), en las alteraciones de sílice granular y argílico del Tajo Quecher; con apoyo del software JK-Simblast, para el caso de la prueba tipo cráter, finalmente se determinó que la distancia mínima entre taladros son de 9 y 7 metros para las alteraciones de sílice granular y argílico respectivamente y que el factor de carga óptimo para ambas alteraciones debe oscilar entre 0.15 Kg/Tn a 0.20 Kg/Tn. Por otro lado con la prueba de iniciación de fulminantes pirotécnicos en adición a los electrónicos se validó la eficacia de usar cordón detonante para eliminar eventos de tiros cortados en zonas críticas producto de la presión dinámica.

Palabras Claves: Parámetros operativos de la voladura, tiros cortados, presión dinámica, factor de carga, cordón detonante, fulminantes pirotécnicos.

ABSTRACT

One of the operational pits of Minera Yanacocha that has presented events of shots cut by dynamic pressure since the beginning of its operation is the Quecher pit, generating a danger for the safe development of its operations. It is for the above mentioned that, the present investigation aims to analyze the operating parameters of the blast that influence the occurrence of events of shots cut by dynamic pressure in the Quecher Gorge of Minera Yanacocha, as they are: the minimum distance between drills and the load factor; in addition to checking the efficiency of the use of detonating cord to initiate the pyrotechnic fulminators used as a back-up in a drill as a method to eliminate the events of shots cut by dynamic pressure, this was made possible by the execution of two types of field tests: crater type (one) and initiation of pyrotechnic fulminants in addition to that of the electronics (two), in the alterations of granular silica and argylic of the Quecher River; with support of software JK-Simblast, in the case of the crater test, Finally, it was determined that the minimum distance between drills is 9 and 7 meters for granular and argylic silica alterations respectively and that the optimal load factor for both alterations should range between 0.15 Kg/Tn to 0.20 Kg/Tn. On the other hand, the initiation test of pyrotechnic fulminants in addition to electronics validated the effectiveness of using detonating cord to eliminate events of shots cut in critical areas due to dynamic pressure.

Key Words: Operational parameters of the blasting, cut shots, dynamic pressure, load factor, detonating cord, pyrotechnic arresters.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En ciertas condiciones particulares, los fulminantes electrónicos sufren malformaciones y ruptura de sus cápsulas provocando fallas en el circuito electrónico del fulminante, lo cual se traduce en cargas sin detonar durante la voladura, es decir eventos de tiros cortados, siendo la principal causa de este fenómeno la presión dinámica generada por las cargas explosivas en la vecindad del taladro donde se encuentra el detonador, debido a un diseño y/o implementación deficiente.

Minera Yanacocha no es ajena a estos eventos indeseados, muestra de ello es que se ha registrado desde el inicio de operaciones del tajo Quecher (agosto del 2018) un total de dos tiros cortados en cuatro meses de su operación, los cuales representan en términos de seguridad una condición crítica puesto que se tiene el potencial de afectar la integridad del personal y de los equipos.

Según los reportes de hallazgo de eventos de tiros cortados ocurridos en minera Yanacocha la causa radica en el efecto de presión dinámica, por lo que se formula la pregunta: ¿Cuáles son los parámetros operativos de la voladura que influyen en la probabilidad de ocurrencia de eventos de tiros cortados a causa de presiones dinámicas en el Tajo Quecher de Minera Yanacocha?, siendo su hipótesis: Los parámetros operativos de una voladura influyen en la probabilidad de ocurrencia de eventos de tiros quedados a causa de presiones dinámicas en el Tajo Quecher de Minera Yanacocha.

La presente investigación se justifica en la ejecución de pruebas experimentales en campo: tipo cráter e iniciación de fulminantes pirotécnicos en adición a la de los electrónicos en tajo abierto; para así determinar qué controles operativos se debe tener en consideración al momento de planificar y realizar una voladura para evitar eventos de tiros cortados por presión dinámica en el Tajo Quecher de Minera Yanacocha.

Parámetros operativos de la voladura como lo son: las distancias críticas (muy cortas) entre taladros, el factor de carga y las condiciones del macizo rocoso (presencia de agua y fracturamiento) influyen en la ocurrencia de eventos de tiros cortados y son analizados en la presente investigación.

La presente investigación posee como objetivo general analizar los parámetros operativos de la voladura para evitar tiros cortados por presión dinámica en el Tajo Quecher de Minera Yanacocha; mientras que como objetivos específicos se tiene: determinar la distancia crítica entre taladros y el factor de carga óptimo para las alteraciones con mayor presencia en el Tajo Quecher; además de comprobar si la iniciación de los fulminantes pirotécnicos en adición a los electrónicos evita la ocurrencia de tiros cortados por presión dinámica, y realizar un plan de acción para eliminar eventos de tiros cortados por presión dinámica en el Tajo Quecher de Minera Yanacocha.

La presente tesis está estructurada en cinco capítulos con sus correspondientes ítems detallados en el índice de contenido.

El Capítulo I aborda el planteamiento y formulación del problema, hipótesis, justificación, alcances y objetivos de la investigación.

El Capítulo II muestra los antecedentes teóricos de la investigación tanto internacionales, nacionales y locales junto a las bases teóricas y definición de términos básicos que se utilizaron para el correcto desarrollo de la presente investigación

El Capítulo III contiene la ubicación geográfica, accesibilidad, geología y ciclo de minado de la operación minera, presenta también la metodología y el procedimiento seguido en la investigación.

El Capítulo IV da a conocer el análisis de la investigación mostrando además la discusión de los resultados obtenidos de la misma.

El Capítulo V finalmente presenta las conclusiones a las cuales se ha llegado producto del desarrollo de la investigación además de presentar algunas recomendaciones para futuras investigaciones.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes teóricos de la investigación

2.1.1. Internacionales

Giltner & Garcia (2016), elaboraron la investigación: Mediciones de presión dinámica de voladuras en mina Yanacocha, la cual tuvo como propósito fundamental: cuantificar la presión dinámica utilizando sensores de presión de turmalina.

2.1.2. Nacionales

Gabriel (2017), desarrolló la investigación: La distancia mínima entre taladros para evitar los daños de los detonadores electrónicos por presión dinámica, en mina Lagunas Norte. Que se basó principalmente en la ejecución de pruebas de presión dinámica para tener en claro a qué distancia los fulminantes electrónicos no sufren ningún daño en el interior de su sistema; y pueda darse su detonación con normalidad.

2.1.3. Locales

Chilón & Aguilar (2017), llevaron a cabo la investigación: Estimación de presiones dinámicas inducidas por voladura para definir distancias críticas para fulminantes electrónicos Daveytronic en Tajo la Quinua Yanacocha. Investigación que buscó recolectar información de vibraciones, para luego ser ajustada a un modelo de amplitud de ondas sísmicas aplicando la formulación de Holmberg & Pearson.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Presión Dinámica

Todo cuerpo en la tierra está sometido a la acción de la presión atmosférica (estática) y cualquier presión adicional que sea ejercida sobre su superficie es denominada dinámica. (Lownds, 2000).

La presión total sobre un objeto impactado por cualquier fuerza es la suma de las presiones estática y dinámica. Bajo esta consideración, la presión dinámica es un fenómeno inherente al proceso de voladura, interpretado como la fuerza por unidad de área ejercida por la onda de choque, generada en el proceso de detonación del explosivo, esta presión se transmite a los taladros circundantes debido principalmente a 3 mecanismos: (Lownds, 2000).

1. Transmisión de la onda de choque a través del medio rocoso y la columna explosiva al interior de él(los) taladro(s) adyacente(s). La generación y transmisión de la onda de choque es un fenómeno intrínseco de la detonación de un explosivo sin importar el tipo de macizo rocoso por el cual se propague. La atenuación de su impacto, depende exclusivamente de las propiedades geológicas y geotécnicas de la roca.
2. Deformación del medio circundante y aprisionamiento de las cargas y el booster por desplazamiento del macizo (bloques preexistentes): La deformación de los taladros contiguos es un fenómeno típico en macizos con presencia de bloques preformados, estos debido a la deformación y expansión en volumen del taladro más cercano detonando, es capaz de desplazarlos pudiendo aplastar los booster y en consecuencia generar una falla sobre los detonadores electrónicos cercanos.
3. Transmisión de presión de gases por efecto de la detonación a altas presiones y temperaturas, que fluyen por fracturas existentes a través del medio rocoso: La transmisión de gases de un taladro a otro, es un fenómeno muy poco frecuente sobre un detonador. Ante la presencia de un macizo de mala calidad, con alto grado de agrietamiento y discontinuidades, el gas busca estas zonas de menor resistencia para evacuar, pudiendo afectar gravemente un detonador cercano. Es usual tener zonas más agrietadas en la parte superior de la voladura, producto de la pasadura de la voladura en el nivel superior.

Estos factores pueden verse resaltados, si el medio está constituido por rocas porosas, altamente fracturadas, débiles y/o saturadas en agua. Por otra parte, la presión afecta mayoritariamente a objetos vacíos. Para el caso de un detonador electrónico, en su estado de presión estática posee una diferencia entre la presión interior y exterior en la zona del circuito responsable de la iniciación. En el caso de una detonación cercana, la presión externa, puede llegar a ser tan grande en comparación a la interna del detonador, que la cápsula puede sufrir deformación, provocando serios daños al circuito interno. (Lownds, 2000).



Figura 1: Fulminante electrónico con aplastamiento lateral debido a efectos de presión dinámica. (Dyno Nobel, 2017)

2.2.2. Prueba Tipo Cráter

Prueba de campo utilizada en voladura con el objetivo de determinar en forma práctica la distancia crítica entre taladros para cada tipo de alteración, mediante la medición del efecto de daño causado por la detonación de una carga confinada alrededor de un taladro. Para tal efecto, luego de la detonación de cada carga se realiza el levantamiento topográfico de los perfiles de esponjamiento y rotura para cada caso. Esta información junto con el análisis de distribución energética, será utilizada para calcular los requerimientos energéticos asociados al tipo de alteración. (Exsa, 2018)

2.2.3. Prueba de Uso de Cordón Detonante para Iniciación de Voladuras en Tajo

Este método busca asegurar la voladura a través de la iniciación de los detonadores pirotécnicos (Nonel) ubicados dentro de los pozos, en caso de que algún detonador electrónico tenga problemas o no logre iniciarse con normalidad. (Dyno Nobel, 2018)

La regla principal que debemos considerar al momento de llevar a cabo los diseños de las voladuras es la siguiente: “Todos los detonadores electrónicos de la malla deben iniciarse antes que el primer detonador pirotécnico Nonel”. En otras palabras, los tiempos de los detonadores electrónicos no pueden superar el valor del retardo del detonador pirotécnico Nonel. Ahora bien, no debemos olvidar que los detonadores pirotécnicos tienen una dispersión, es decir, no

Tabla 1: Asignación de Tiempos (Nonel de 3000 ms y dispersión incluida)

Tiempo de inicio del detonador electrónico conectado al cordón detonantes (ms)	Tiempo de inicio del primer detonador electrónico de la malla de tronadura (ms)	Tiempo de inicio del último detonador electrónico de la malla de tronadura (ms)
0	500	2800
1000	1500	3800
2000	2500	4800
3000	3500	5800
7000	7500	9800

Fuente: Dyno Nobel, 2018

2.2.4. Explosivos

Los explosivos son una combinación de sustancias, combustibles y oxidantes, que, estimuladas correctamente, generan una reacción exotérmica, que origina una gran cantidad de productos gaseosos a alta temperatura y presión. (Exsa, 2019)

Estos explosivos son combinaciones químicas con algún grado de inestabilidad en los enlaces atómicos de sus moléculas que, ante ciertas condiciones o impulsos externos, genera una reacción acelerada de disociación y nuevo reagrupamiento de los átomos en configuraciones más estables. Esta reacción, generada térmicamente por los denominados “puntos calientes”, se le llama detonación y genera gases a muy elevada presión y temperatura, que de igual manera genera una onda de compresión que transita en el medio circundante. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.5. Tipos de Reacción de los Explosivos en Función de la Cinética Química

2.2.5.1. Combustión

La combustión es una reacción química de oxidación en la que normalmente se desencadena abundante energía. La velocidad de reacción es menor de 1 m/s y se puede ver a simple vista la reacción en forma de llama. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.5.2. Deflagración

Los elementos que componen un explosivo comúnmente se desintegran de una manera mucho más lenta que la velocidad del sonido del material sin ningún acceso a oxígeno atmosférico. Ello es conocido como una deflagración, y es generada por la liberación del calor de reacción, y la dirección de flujo de los resultados de la reacción es contrario al de la detonación. En determinadas ocasiones, la deflagración, puede transformarse en una reacción de detonación, por ejemplo, el accidente que aconteció en la ciudad de Texas en 1947 en que 3180 Ton de nitrato de amonio explotaron después de arder por varias horas. (Enaex S.A., 2014)

2.2.5.3. Detonación

La detonación es una reacción físico-químico exotérmica que se caracteriza por la velocidad de reacción del explosivo utilizado y la generación de muchos productos gaseosos a gran temperatura, que obtienen mucha fuerza expansiva que se convierte en presión sobre el área circundante. (Exsa, 2019)

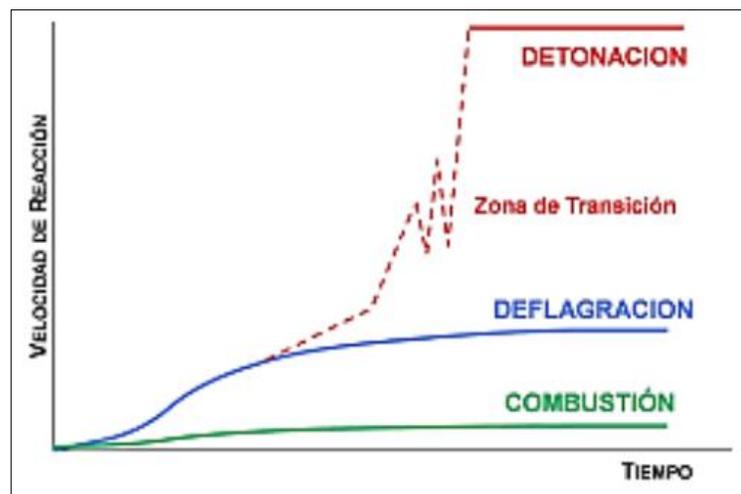


Figura 3: Tipo de reacción en función de la cinética química. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.6. Mecanismo de la Detonación

Para poder comprender el proceso para generar la detonación, es muy importante comprender cómo son las zonas de reacción que se generan en el proceso de la misma. Si tenemos una carga cilíndrica que se detona por unos de sus extremos, se logran diferenciar las zonas que a continuación se presentan

: (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

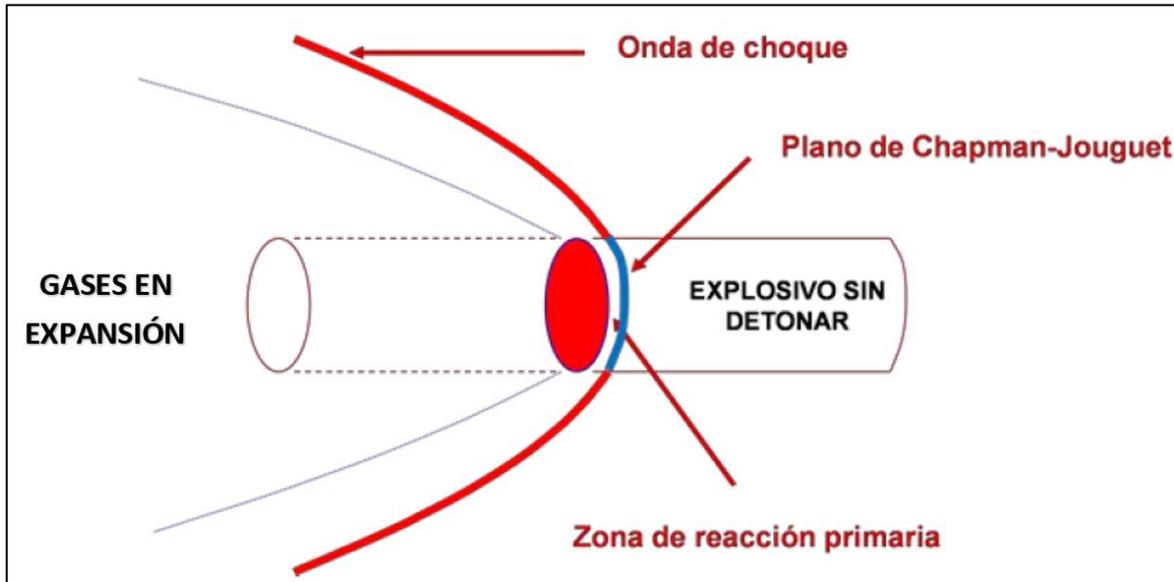


Figura 4: Zonas del proceso de detonación. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

- Se diferencia una zona de explosivo que aún no detona.
- Se diferencia también una zona de reacción primaria, que se extiende a una aceleración de elevados metros por segundo (velocidad de detonación), en la que se presentan las reacciones más rápidas y violentas, que generan un movimiento energético de las partículas cercanas. Es por eso que, este movimiento se extiende en forma de onda de choque de muy alta presión a todo el medio circundante. A esta presión se llama presión de detonación.
- Así mismo, se diferencia una zona de reacción secundaria, en la cual se almacenan los productos de explosión, más lentos en su desplazamiento que la onda de choque, y se generan una serie de reacciones añadidas que pueden generar a gran parte de los gases producidos en la reacción. Su principal característica es una presión inferior a la anterior, a la que se le llama presión de explosión o presión de burbuja, generada por la expansión de todos estos productos gaseosos.
- La superficie de separación entre las zonas primaria y secundaria, aunque no es necesariamente plana, se le nombra como “Plano de Chapman-Jouget”

La estructura y propiedades del explosivo, ente otras características, define la velocidad de detonación, también las presiones de burbuja y detonación. Así como se observa en la Figura

5, un explosivo de base nitroglicerina, por ejemplo, poseería alta velocidad de detonación, y asimismo alta presión de detonación. Por el contrario, el relativamente bajo volumen de gases que genera la detonación de la nitroglicerina decide que la presión de burbuja sea baja. Por el contrario, un explosivo de base nitrato amónico, cuya detonación es más lenta, pero genera mayor cantidad de gases, tendría una presión de detonación más baja, pero una presión de burbuja más alta. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

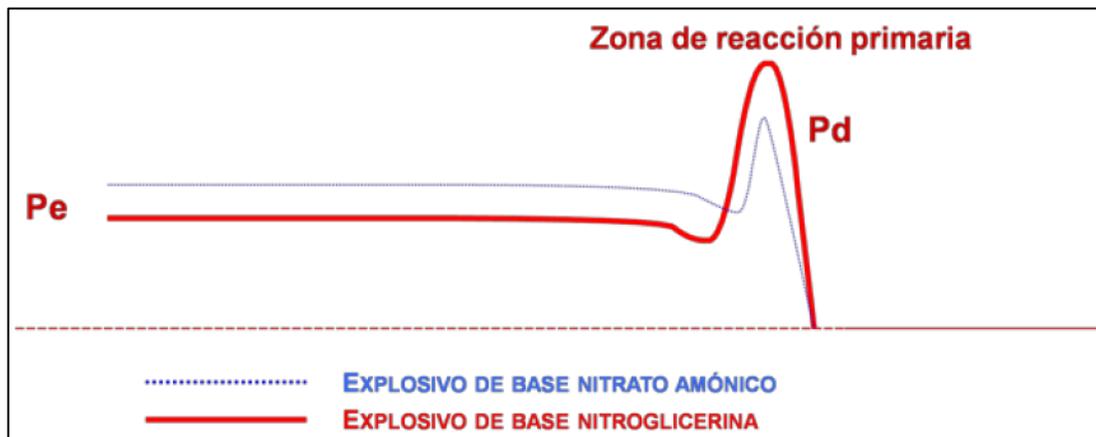


Figura 5: Presión de detonación (Pd) y presión de burbuja (Pe) de dos tipos de explosivo. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.7. Propiedades y Características de los Explosivos

Para la elección de un explosivo más adecuado para un fin exacto, precisa saber las propiedades de cada uno de los explosivos y luego, escoger el más apropiado al fin que se desee utilizar. Las propiedades que se tiene que conocer y que son básicas de un explosivo, son las que se muestran y enumeran seguidamente: (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

- Densidad del explosivo.
- Resistencia al agua.
- Sensibilidad.
- Potencia explosiva.
- Poder rompedor.
- Velocidad de detonación.
- Calidad de humos
- Estabilidad química

2.2.7.1. Potencia Explosiva

Podemos señalar a la potencia explosiva como la suficiencia que posee el explosivo para quebrantar y proyectar la roca. En realidad, se trata de la energía del mismo que se aprovecha en la tronadura. Esta característica obedece principalmente de la constitución del explosivo, que puede tener grandes resultados con utilización correcta de la técnica de voladura. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.7.2. Poder Rompedor

El poder rompedor es una propiedad del explosivo que señala la suficiencia de fragmentar la roca y esto generado únicamente por la onda de detonación y no al conjunto de la onda de detonación más la presión de los gases (que es medida de potencia). El poder rompedor es un indicador muy significativo para los explosivos de uso no confinado o desacoplado, cuyos gases no pueden generar grandes presiones. Es el caso de las cargas huecas y de las cargas para taqueo. Su caracterización se hace por intermedio del método de Hess (Figura 6), en el que se dispone la reducción de altura que genera la detonación de una determinada cantidad de explosivo en un cilindro de plomo. Asimismo, es un método más apropiado para explosivos sensibles al detonador y de diámetro crítico de tamaños pequeños. Es cierto que es un ensayo elaborado hace bastante tiempo y que los explosivos han mejorado en gran medida desde su desarrollo, sigue dando resultados muy buenos a pesar de que hay ideas de pensamiento que no aconsejan su uso. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

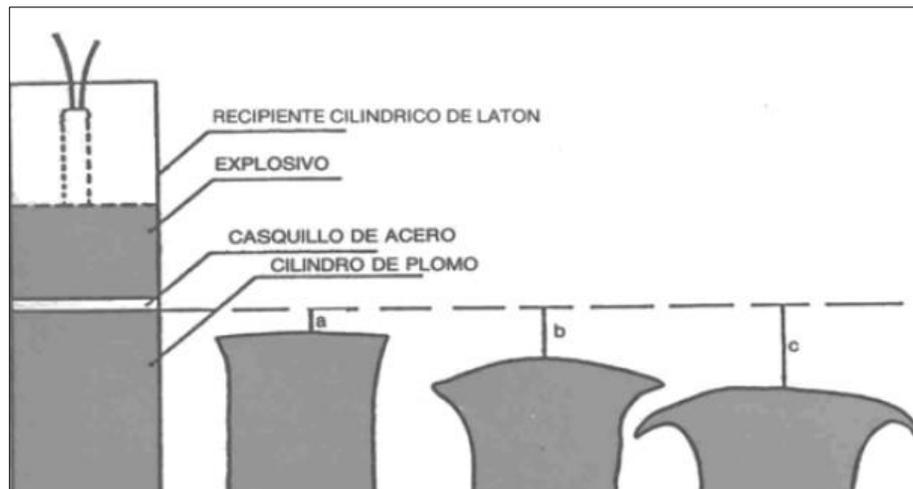


Figura 6: Poder Rompedor, método de Hess. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

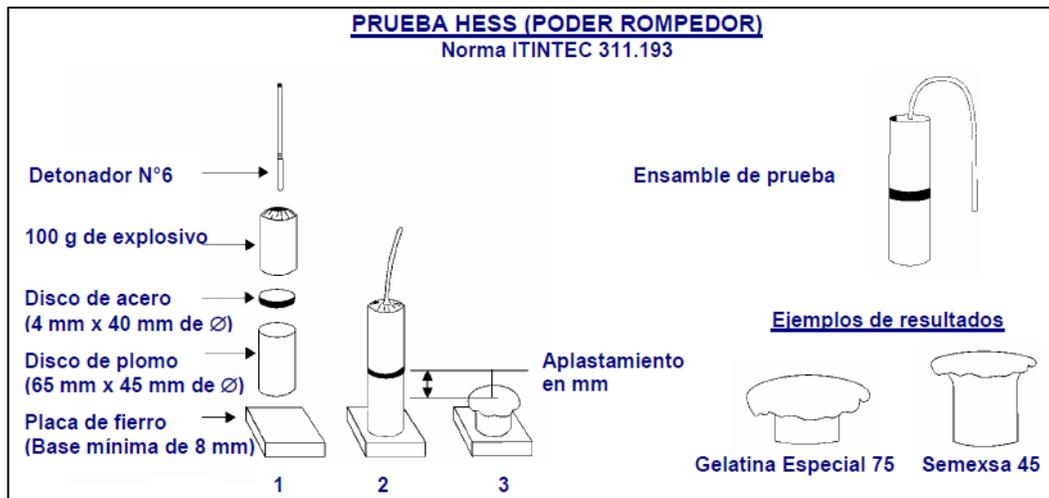


Figura 7: Prueba de Hess. (Exsa, 2012)

2.2.7.3. Velocidad de Detonación

La voladura de una columna continua de explosivo generará la variación del explosivo en un gran volumen de gases a gran temperatura y presión. La velocidad a la que se genera esta transformación se le llama velocidad de detonación, y la unidad de medida metros por segundo (m/s). Es significativo diferenciar entre la velocidad de detonación (de la reacción química) y de la onda de choque (transmisión física).

La velocidad de detonación es una propiedad que se debe de tener en cuenta en la elección del explosivo. Se escogerá a explosivos que detonan lentamente, dando lugar a que su energía se desarrolle de manera gradual, cuando se detonen rocas blandas o se desee una granulometría gruesa, mientras que se debe elegir explosivos que tengan una gran velocidad de detonación cuando se desee granulometrías más intensas en rocas duras.

Hay muchos métodos de medir la velocidad de detonación, es así que se puede diferenciar especialmente por el objeto de cada uno de ellos. Es de esta manera, que se pueden tener mediciones hechas en laboratorio y medidas hechas en campo. Es cierto que, los resultados obtenidos tendrían que ser muy similares o iguales, las mediciones hechas en campo ayudan a comprobar la evolución de la velocidad de detonación a través de todo el barreno, accediendo así, a ver la relación entre el comportamiento del explosivo en condiciones reales de aplicación. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.7.3.1. Ensayos de Laboratorio para Determinar la Velocidad de Detonación

Estos determinados ensayos de laboratorio se fundamentan en la toma de una muestra cilíndrica de explosivo, puesta en un cilindro de acero para hacer cierto efecto de confinamiento, sobre la cual se ponen dos sensores de fibra óptica alejados una distancia conocida que se conectan a un receptor de modo que cuando se detona el explosivo es factible observar el tiempo que demora en recorrer la detonación entre los dos captadores. Sabiendo la distancia exacta entre ellos, puede saberse la velocidad de detonación. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

Esta forma de ensayos posee la ventaja de que se hace de manera rápida y fácil y, sobre todo, es sencillamente reproducible, por lo que se ha tomado como un método normalizado y estándar de medición de la velocidad de detonación. Las bases de este método se conocen en la Norma UNE-EN 13631-14:2003 vigente. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.7.3.2. Ensayos de Campo para Determinar la Velocidad de Detonación

La mayor desventaja de los ensayos que se hacen en laboratorio es que no pueden darse con una cantidad parecida a la que se realiza en un taladro de voladura y mucho menos pueden observar cómo una columna de explosivo ha alcanzado el régimen de detonación. Razón por la cual se han creado métodos de medida continua de la velocidad de detonación en campo a través de sondas que se ponen dentro del barreno, las cuales registran las variaciones de velocidad de detonación a través de todo el taladro.

Para este método se coloca un cable coaxial de resistencia calibrada a lo largo del barreno cortocircuitando su parte inferior. El otro extremo de la sonda se conecta a un generador de corriente continúa generando así un circuito eléctrico sobre el cual es posible conocer su resistencia (Figura 8).

Mientras se realiza el ensayo, el equipo de registro, está grabando los valores de resistencia calculados a gran velocidad, incluso hasta 2000 Hz (2000 medidas por segundo) es así que, al momento de detonar el barreno, la resistencia del circuito va cambiando porque se quema la sonda junto con el explosivo, bajando así la resistencia del circuito. Con la resistencia calibrada de la sonda, se puede obtener la variación de resistencia del circuito en función del tiempo, y expresarla en metros de sonda destruidos por unidad de tiempo, o lo que es lo mismo, la velocidad de detonación del barreno. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

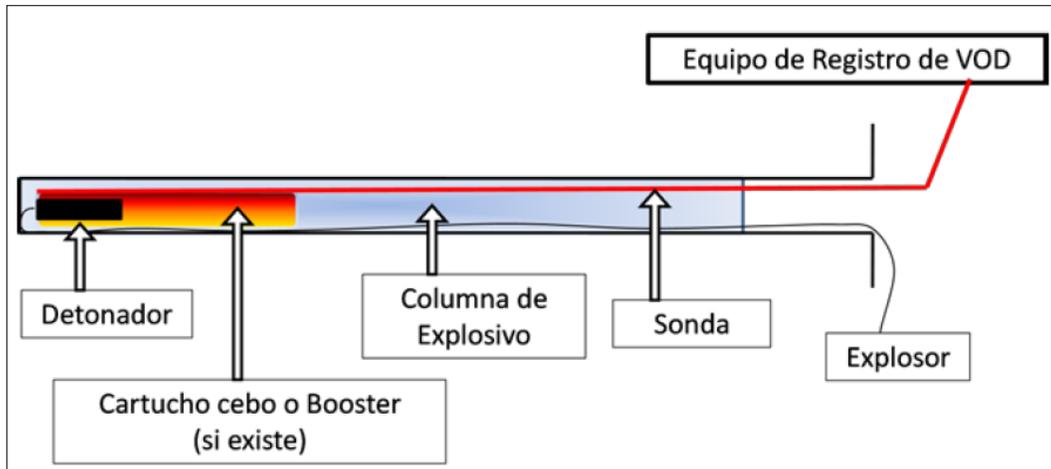


Figura 8: Medida continua de la velocidad de detonación en el taladro. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)



Figura 9: Equipo de medida continua de la velocidad de detonación. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

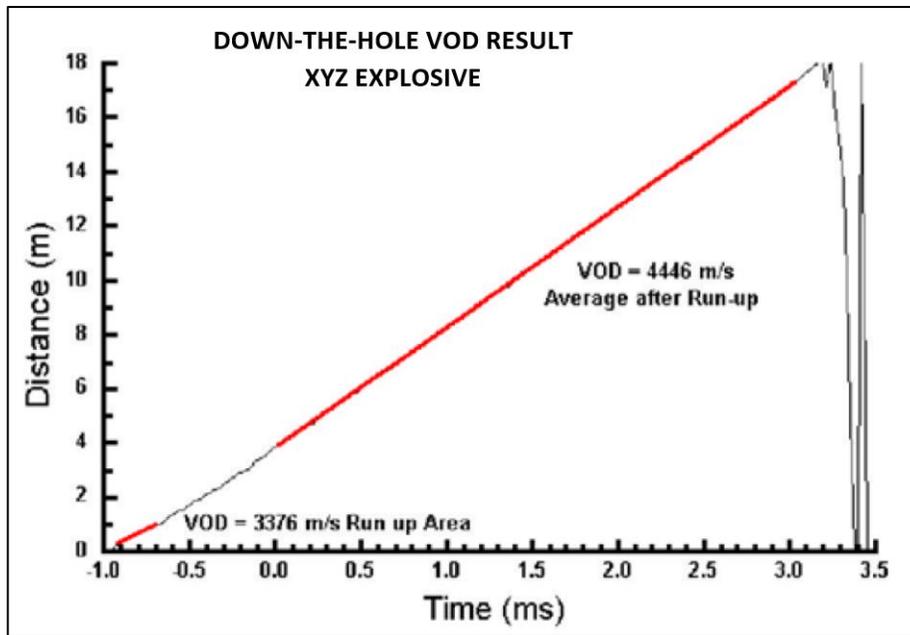


Figura 10: Ejemplo de medida continua de la velocidad de detonación. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.7.4. Densidad

Propiedad de explosivos industriales que depende de los componentes utilizados en su fabricación, ya que cuanto mayor es la densidad del explosivo, mayor es la concentración de carga para un diámetro de taladro determinado.

La densidad relativa de los explosivos abarca comúnmente entre 0,8 y 1,5. Sin embargo existen explosivos de menos densidad con empleos muy determinados y cuya utilización incluye una muy baja energía por unidad de volumen con aplicación en voladuras de precorte o también en determinadas aplicaciones muy concretas en voladuras de escollera.

La densidad es un parámetro muy importante para el carguío de taladros que contengan agua. La carga de explosivos de densidad inferior a $1,1 \text{ g/cm}^3$ en taladros con agua resulta muy trabajosa, ya que se hace muy complicado llenar totalmente los taladros dado que los cartuchos tienden a flotar. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.7.5. Diámetro Crítico

Diámetro de una carga cilíndrica explosiva que se encuentra por debajo del cual la onda de detonación no se propaga o lo hace a una velocidad muy por debajo a la nominal. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.7.6. Resistencia al Agua

Propiedad por la cual un explosivo, sin necesitar recubrimiento especial, conserva sus propiedades inalterables durante un periodo de tiempo al estar en contacto con el agua. Explosivos como las dinamitas gelatinosas, hidrogeles y emulsiones resisten correctamente al estar en contacto con el agua, por lo tanto su uso es posible en taladros con agua en su interior. Sin embargo productos pulverulentos y Anfos no resisten al agua por su carácter soluble del nitrato amónico.

La resistencia al agua se encuentra en función del estado de agregación de cada elemento de los explosivos. Por ejemplo, el nitrato amónico es poco resistente al pues se disuelve en ella con gran facilidad; sin embargo, en determinadas condiciones y en forma de emulsión o disolución saturada, es el componente más importante de algunos explosivos caracterizados por su buena resistencia al agua.

Para el caso de voladuras bajo agua, debe considerarse que, el explosivo a usar no solo debe ser resistente a la presencia del agua sin disolverse, sino que debe conservar su sensibilidad de iniciación y propagación en estas condiciones. Por lo que se recomienda que en estas situaciones, se deben usar explosivos hechos especialmente para este fin.

Ante la presencia de humedad, se pueden utilizar casi todos los tipos de explosivos siempre y cuando el tiempo del explosivo en el taladro sea por muy poco tiempo o bien se realice el tapado de los mismos si se trata de explosivos a granel como el anfo. Para disminuir este efecto, se han desarrollado productos específicos, tal es el caso del anfo resistente al agua, que adhiere aditivos que recubren el prill de nitrato amónico de tal manera que no se disuelva en agua por un determinado tiempo. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.7.7. Calidad de los Humos

Los humos residuales generados tras una voladura, vienen a ser productos gaseosos que son el resultado de la reacción de detonación del explosivo. Entre estos humos se tiene vapores nitrosos (NO_x), vapor de agua, monóxido de carbono (CO) y anhídrido carbónico (CO₂).

Los explosivos industriales presentan una composición de manera tal que las reacciones químicas que se producen, generan humos de voladura de bajo contenido en gases nocivos (CO y NO_x), lo que indica que se genera una reacción química muy completa.

Sin embargo las condiciones en campo se alejan de las condiciones teóricas, por lo que el nivel de gases tóxicos (CO, NO_x, etc.) generados en las voladuras es elevado, generando incomodidades e incluso muy graves intoxicaciones a las personas. Por lo que, se recomienda no acudir a un frente inmediatamente después de ser volado, sin tener la plena seguridad que se han ventilado los gases generados en la misma, ya sea por medición directa o cálculo. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.7.8. Sensibilidad

Hace referencia al mayor o menor grado de energía que hay que transferir a un explosivo para generar su iniciación y, seguidamente, su detonación. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

Es así que se puede considerar varios aspectos relativos a la sensibilidad de los explosivos; unas perjudican a la seguridad en la manipulación (fabricación, transporte y utilización) y otras a su iniciación en la voladura. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.7.8.1. Sensibilidad al Detonador

Los llamados explosivos industriales se pueden iniciar comúnmente a través de la detonación de una mínima carga de explosivo de alta potencia. Este explosivo puede estar ubicado en un detonador, en un cordón detonante, o en un multiplicador, dependiendo del procedimiento que se use para la iniciación. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

Se encuentra explosivos que no son sensibles al detonador. Es por ello que es común provocar su iniciación a través un multiplicador, que es una pastilla de explosivo de elevada potencia que de forma cilíndrica y que es sensible al fulminante. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.7.8.2. Sensibilidad a la Onda Explosiva

Capacidad de transmisión de la detonación entre los cartuchos de explosivo, ya sea puestos en línea, es decir, uno a continuación del otro o también separados una distancia específica entre ellos. Este fenómeno es conocido como “detonación por simpatía” (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.7.8.3. Sensibilidad al choque y al Rozamiento

Se menciona que hay explosivos industriales que se inician porque son sometidos a determinadas situaciones de impacto o fricción. Esta característica viene delimitada a través de ensayos, de esta forma todos los explosivos soportan sensibilidades mínimas determinadas. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

Para determinar la sensibilidad al choque de un explosivo se hacen ensayos normalizados, que se basan en dejar caer un martillo sobre la muestra del explosivo a ensayar para obtener la altura de caída mínima que genera la detonación de la misma. De igual manera, para determinar la sensibilidad al rozamiento, hay otro ensayo estandarizado para valorar la fuerza mínima de rozamiento que es capaz de aguantar el explosivo sin que se realice su detonación. Estos ensayos cuentan con relación directa con la mejora de la seguridad en la manipulación industrial de los productos explosivos y con la prevención y reducción de accidentes. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.7.9. Estabilidad Química

La estabilidad química de un explosivo es la capacidad para mantenerse químicamente inalterado con el pasar del tiempo. La estabilidad será inalterada si las condiciones y tiempo de almacenamiento son los adecuados, proporcionando al usuario un producto absolutamente seguro y fiable para los trabajos de voladura. El tiempo de almacenamiento prolongado o en condiciones inadecuadas de temperatura, humedad, y ventilación, provocan la desestabilización del explosivo y, por lo tanto, aceleran su descomposición. Ante esta situación las medidas de seguridad para la manipulación del mismo deben ser altas y se debe proceder a su destrucción. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

A estar expuesto a altas o bajas temperaturas un explosivo, se puede determinar las condiciones y tiempo máximo de su almacenamiento, ya que un explosivo muy higroscópico puede absorber

y retener humedad hasta el punto de ver dañada su estabilidad química. Es por esta razón que, la nitroglicerina puede descomponerse en ácidos nítrico y nitroso, con el riesgo de presentar una detonación espontánea. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.8. Clasificación de los Explosivos

2.2.8.1. Explosivos Químicos

Estos explosivos actúan por procesos de reacción química de detonación generados por una onda de choque. Los explosivos químicos tienen de igual forma la clasificación siguiente:

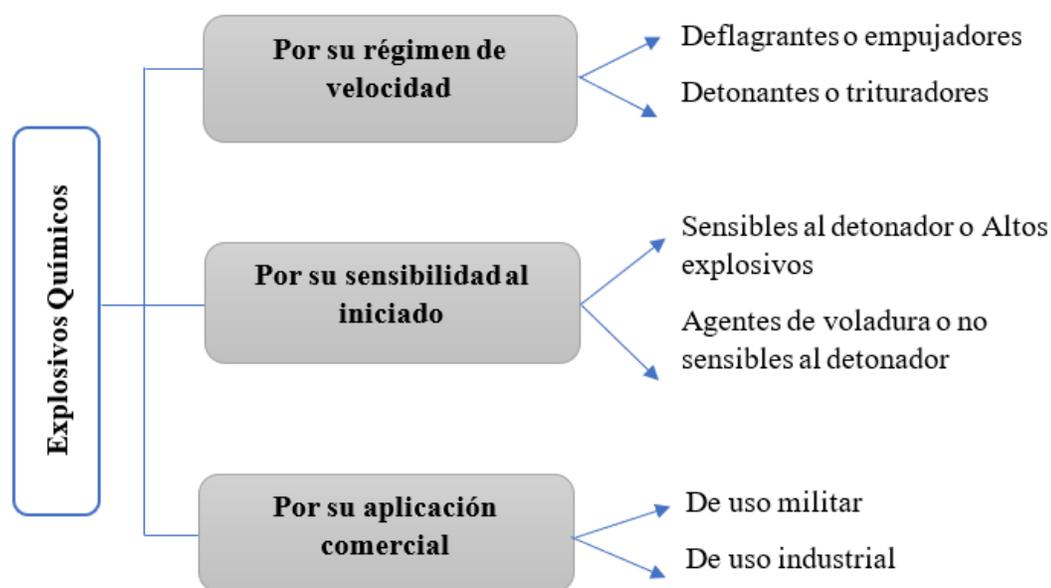


Figura 11: Clasificación de los explosivos químicos. (Leiva, 2015)

2.2.8.1.1. Explosivos Deflagrantes (<2.000 m/s)

En esta clasificación de explosivos encontramos a la pólvora que es contenida en la mecha de seguridad, en la que su onda de choque no llega al estado de detonación, razón por la cual su explosión es semejante a una combustión violenta. Se dividen según su régimen de velocidad en: (Leiva, 2015)

2.2.8.1.2. Explosivos Detonantes (2500 a 7000 m/s)

En este tipo de explosivos la onda de choque generada durante su detonación es supersónica y constante, lo que garantiza que la detonación sea de toda su masa. Se clasifican en: (Leiva, 2015)

2.2.8.1.3. Explosivos Primarios o Iniciadores

Los explosivos primarios que su proceso de detonación se genera por ignición simple de medios como: chispas, llamas, impacto, u otras fuentes primarias de calor. Se les llaman así a aquellos que tienen los detonadores, cordón detonante e iniciadores. (Enaex S.A., 2014)

Son los que, por la debilidad de sus enlaces, son muy sensibles e inestables. Una muestra de ello es que una muy pequeña cantidad de estas sustancias es ya sensible a la ignición.

Principalmente son utilizados en la fabricación de elementos iniciadores (fulminantes). Entre este tipo de explosivos es importante mencionar el fulminato de mercurio y la ácida de plomo. Los cuales se caracterizan por la debilidad de sus enlaces químicos O-N, O-Hg-O y N-Pb.

El trinitrorresorcinato de plomo también se debe señalar, el cual se usa en combinación de los anteriores para incrementar su sensibilidad, reduce la higroscopicidad del fulminato, que, por absorción de agua, pierde sensibilidad a la llama. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

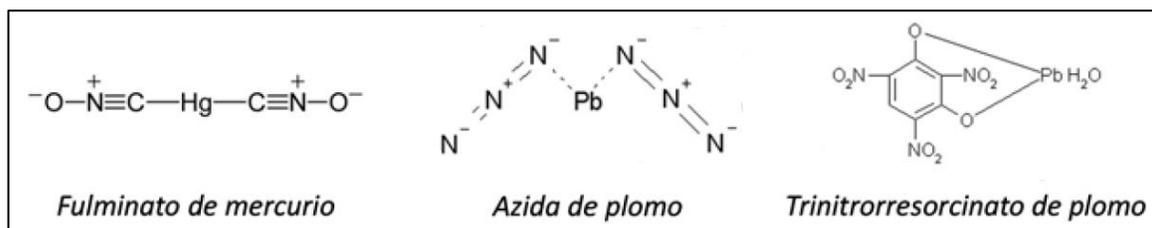


Figura 12: Fórmulas químicas desarrolladas de explosivos iniciadores. (Leiva, 2015)

2.2.8.1.4. Explosivos Secundarios o Rompedores

Los explosivos secundarios son los que la detonación es iniciada producto de la detonación de un explosivo primario. Esta reacción se origina en todos los explosivos utilizados para la fragmentación de rocas. (Enaex S.A., 2014)

Efectúan el arranque y rotura de la roca. Cabe indicar que son de menor sensibilidad que los primarios, sin embargo, desarrollan un mayor trabajo útil, por lo que se les llama rompedores. Se les puede clasificar de la siguiente manera:



Figura 13: Clasificación de los explosivos industriales rompedores. (Leiva, 2015)

2.2.8.1.4.1. Altos Explosivos

a) Dinamitas

Las dinamitas son altos explosivos que en su composición presenta un elemento sensibilizador (nitroglicerina u otro éster estabilizado con nitrocelulosa), junto con aditivos que proporcionan oxígeno (nitratos) y combustibles no explosivos (harina de madera) más algunos aditivos para corregir la higroscopicidad de los nitratos, todos en las proporciones adecuadas para mantener un correcto balance de oxígeno. En ellas todos sus componentes contribuyen energéticamente en el proceso de detonación. (Exsa, 2019)

Las dinamitas con mayor contenido de nitroglicerina y aditivos proporcionan un alto poder rompedor y buena resistencia al agua, se denominadas “fragmentadoras”. En el extremo opuesto, están las “empujadoras”, las cuales, su expansión de gases actúa sobre un mayor volumen de roca. (Leiva, 2015)



Figura 14: Composición de la dinamita. (Leiva, 2015)

Tabla 2: Principales características de la dinamita

Características Principales de la Dinamita	
Uso	En túneles, canteras, obras viales y pequeños diámetros.
Diámetro de los cartuchos	De 22 mm (7/8") hasta 75 mm (3")
Largo de cartuchos	De 180 mm (7"), 200 mm (8") y 340 mm (12")

Fuente: Leiva, 2015

Tabla 3: Ventajas y desventajas del uso de la dinamita en voladuras

Ventajas	Desventajas
Sensibles al fulminante N°6, 8 y otros iniciadores como el cordón detonante.	Sensibilidad a estímulos subsónicos con riesgo de reacción al impacto o calor extremo.
Potencia elevada (gran efecto triturador)	
Gran resistencia al agua y estabilidad química.	
Larga vida útil	Cefalea transitoria al inhalar su aroma o vapores
Buena capacidad de transmisión de detonación (simpatía) para carguío espaciado.	

Fuente: Leiva, 2015

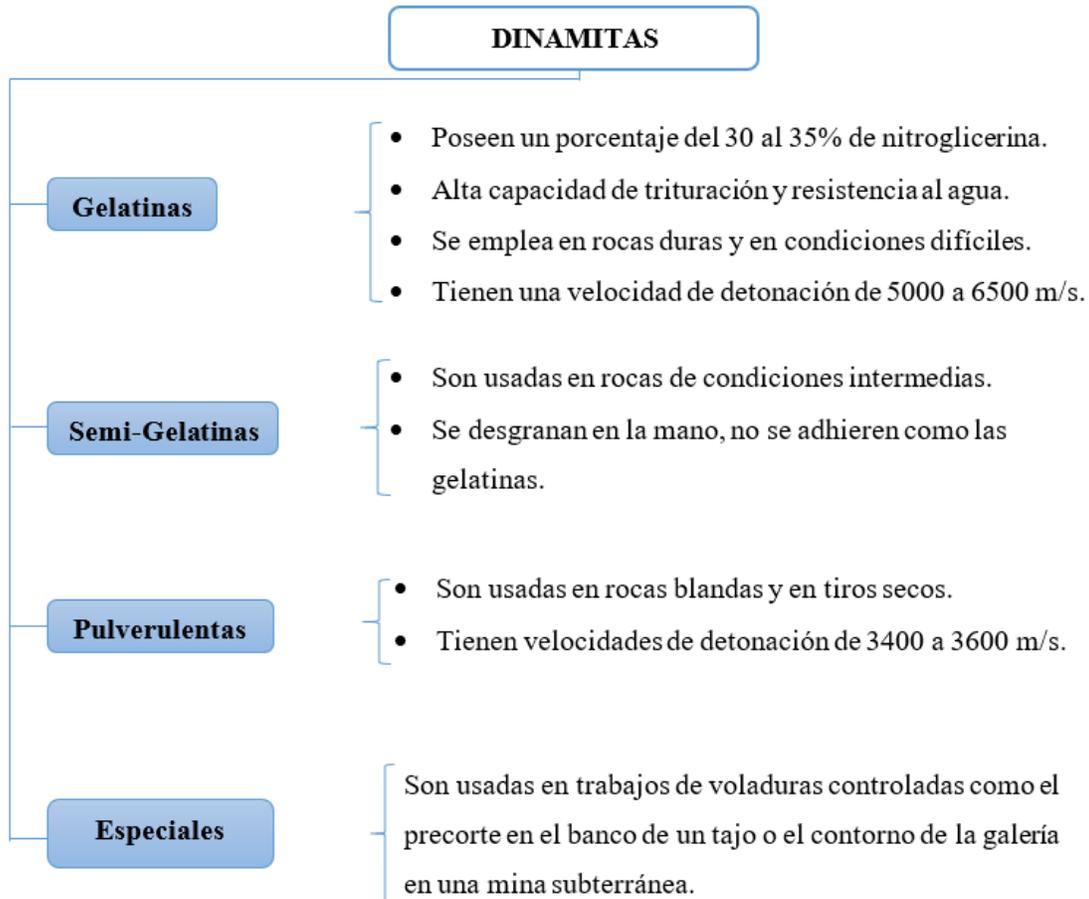


Figura 15: Clasificación de las dinamitas según su contenido de nitroglicerina. (Leiva, 2015)

b) Hidrogel Sensible

Los hidrogeles son compuestos por una fase continua, que es una solución acuosa de sales oxidantes saturada a temperatura ambiente y gelificada por gomas hidrosolubles; y por una fase dispersa de partículas sólidas, gotitas líquidas o ambas. En el caso de un líquido disperso, la composición pertenece simultáneamente al grupo de las emulsiones de tipo “aceite en agua” (Exsa, 2012)

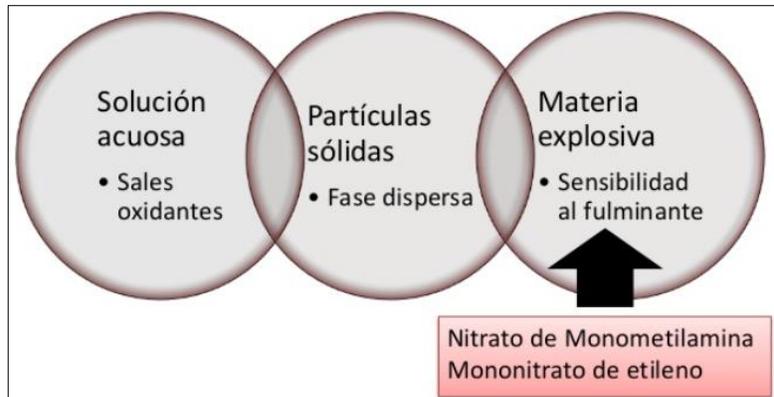


Figura 16: Composición de un hidrogel sensible. (Leiva, 2015)

En cuanto a la vida útil de las dinamitas es corta debido principalmente a:

- La división de las fases, una tendencia natural.
- El aumento de su densidad por el desplazamiento de sus burbujas de gas.

La densidad de un cartucho de dinamita no debe ser superior a 1.25 g/cm^3 , puesto que si no se cumple con ello puede perder su capacidad de detonación. (Leiva, 2015)

c) Emulsión Sensible

Son emulsiones explosivas de tipo inversado, es decir, “agua en aceite”, compuesta de dos fases líquidas, una continua formada por una mezcla de hidrocarburos y otra dispersa, que son microgotas de una solución acuosa de sales oxidantes, con el nitrato de amonio como fundamental componente. (Exsa, 2019)

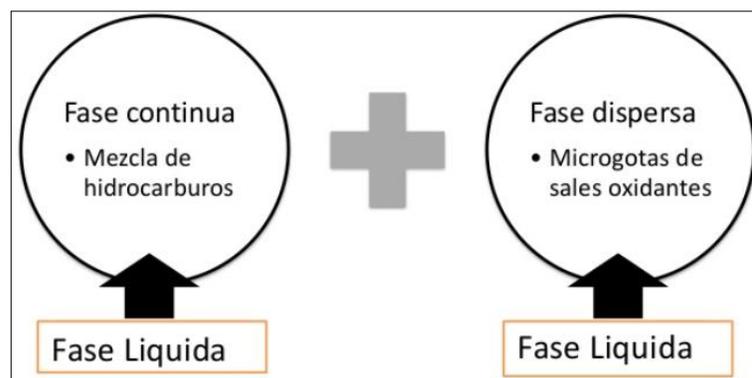


Figura 17: Composición de una emulsión sensible. (Leiva, 2015)

Tabla 4: Ventajas y desventajas del uso de la emulsión sensible en una voladura

Ventajas	Desventajas
Alta velocidad de detonación y potencia.	Menor vida útil (6 meses según su tipo)
Excelente resistencia al agua	Menor capacidad de transmisión en condiciones adversas en el tiro.
Menor sensibilidad a la manipulación	Su sensibilidad al iniciador y su simpatía son más susceptibles a fallas que las dinamitas.

Fuente: Leiva, 2015

2.2.8.1.4.2. Agentes de Voladura

A) Acuosos

a) Hidrogeles o Slurries

Los slurries o hidrogeles que no contiene materia explosiva en su composición no son sensibles al fulminante y se les llama “agentes de voladura hidrogel, slurries o papillas explosivas”, requiriendo de un cebo reforzado o primer-boosters para poder iniciar con su detonación de velocidad estable; sin embargo, no inician o lo hacen a bajo régimen con velocidades transientes con un muy bajo rendimiento energético, por la que en un inicio se les llamaba explosivos de seguridad, también son conocidos como wáter gels. (Exsa, 2019)

Tabla 5: Principales características de los hidrogeles.

Características de los Slurries o Hidrogeles	
Aplicación	Taladros de mediano a gran diámetro, tanto de carga de fondo para reforzar taladros muy confinados o nivelar pisos o, como carga completa en taladros con agua.
Textura	Permite que se contenga en barrenos altamente fisurados, sin pérdidas por filtración.
Densidad	Su alta densidad desplaza fácilmente el agua presente en los taladros.
Viscosidad	Es incompatible para el carguío mecanizados por bombeo y para la mezcla con ANFO.

Fuente: Leiva, 2015

b) Emulsiones

En forma parecida, los agentes de voladura como la emulsión no contienen un elemento explosivo en su composición (eventualmente se sensibilizan con micro esferas) razón por la cual necesitan ser iniciadas con un cebo o prima reforzador de alta presión de detonación. Su utilización generalmente se da en taladros de mediano a gran diámetro, como carga de fondo de alta densidad o como carga de columna (total o espaciada) en taladros con agua, o perforados en roca muy competente.

Distinto a los hidrogeles su viscosidad puede ser graduada desde una emulsión líquida parecida a una leche de magnesia hasta una viscosidad semejante a una margarina, lo que permite su carga al taladro, tanto de manera encartuchada como a granel mecanizada, por bombeo directo al fondo del mismo para desplazar al agua.

Una de las ventajas de las emulsiones es su gran facilidad de mezclarse con el ANFO para formar ANFO pesado. En cuanto a su vida útil es menor que la de los hidrogeles. (Exsa, 2019)

c) ANFO Pesado

Es la mezcla de emulsión y ANFO en diferentes proporciones que permiten:

- Disminuir el costo y potencia de una emulsión pura, generalmente usado en voladuras de rocas difíciles, secas o húmedas.
- Proporcionar resistencia al agua al ANFO, al saturar con emulsión los espacios libres entre los prills o perlas del nitrato.

Estos ANFOs pesados se preparan en diferentes proporciones de acuerdo a los requerimientos de la voladura y la presencia de agua, entre 10% a 90% de emulsión y la diferencia ANFO, siendo los ratios más difundidos 30-70, 50-50, 60-40 y 80-20.

Normalmente las mezclas que contienen un porcentaje de emulsión menor al 50% no son resistentes al agua, pero se incrementa notablemente la potencia del explosivo, mientras que las mezclas con mayores de 50% de emulsión son progresivamente más resistentes al agua.

Se pueden comercializar encartuchados en mangas de polietileno o al granel, preparándolos in situ en camiones mezcladores – cargadores. (Exsa, 2019)

B) Secos

a) ANFO

El ANFO viene a ser un agente de voladura puesto que tiene la particularidad de ser insensible al detonador N°8 y requiere de un cebo o prima para detonar, presentando una detonación baja, sin embargo, esta lentitud de reacción le permite generar un buen volumen de gases, por lo que son buenos “expansores”. Su principal limitación es su nula resistencia al agua. (Leiva, 2015)

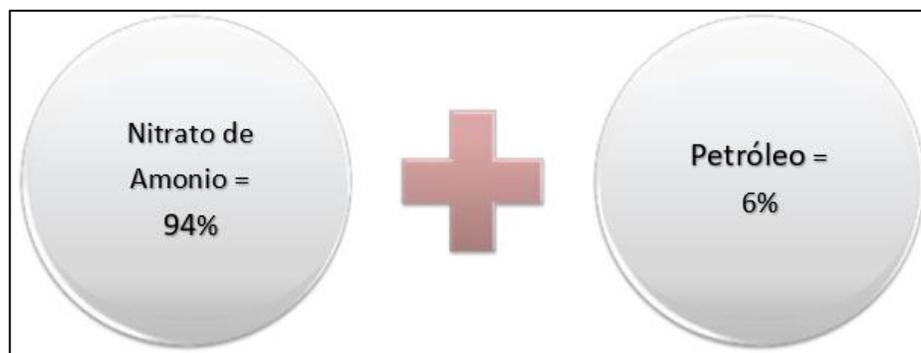


Figura 18: Composición del ANFO. (Leiva, 2015)

Explosivos Especiales

Productos fabricados para un trabajo en específico o para ser usado en condiciones fuera de las normales. Su composición básica es muy variada y se encuentra en función de su objetivo. (Leiva, 2015)

Tabla 6: Explosivos especiales

Explosivos Especiales	Aplicación
Geodit	Para prospección sísmica.
Exsacorte	Voladuras controladas en las paredes de los bancos.
Softron	Voladuras controladas de contornos de galerías subterráneas.
Plastex-E	Para cachorreos (voladuras secundarias)

Fuente: Leiva, 2015

2.2.8.2. Explosivos Nucleares

Estos explosivos están vinculados a la desintegración de materiales radioactivos, desprendiendo grandes cantidades de energía. (Leiva, 2015)

2.2.9. Mecanismo de Fragmentación de Rocas

En la detonación de un explosivo al interior del macizo rocoso se pueden distinguir dos fases de acción: primero se genera un fuerte impacto producto de la formación de la onda de choque y segundo actúan gran cantidad de gases a gran volumen y elevada temperatura.

Las ondas de choque producidas en la detonación del explosivo genera un efecto de compresión que se propaga a través del macizo rocoso circundante, y al encontrar un espacio vacío (cara libre), ese esfuerzo se refleja como esfuerzo de tracción.

La primera onda de choque generada en la detonación del explosivo recorre la roca circundante a velocidades entre 3.000 y 5.000 m/s, mientras la resistencia a la tracción de la roca es del orden de 10 a 100 veces menor que su resistencia a compresión. Por consiguiente, éste esfuerzo de compresión y tracción hacen que el macizo rocoso se fracture alrededor del taladro. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

Tras la generación de la onda de choque, los gases producto de la descomposición del explosivo se expanden a alta presión y temperatura, generando que las fisuras se extiendan y desplazan a la roca fragmentada. (Romero, 2016)

La fragmentación de rocas producto de una voladura se origina por la acción de un explosivo y a la consecuente respuesta del macizo rocoso circundante, en la que se involucran diferentes factores de tiempo, energía termodinámica, ondas de presión, mecánica de rocas y otros, en un rápido y complejo mecanismo de interacción. (Exsa, 2019)

Una explicación fácil y normalmente aceptada, que sintetiza varios de los conceptos considerados en estas teorías, indica que el proceso ocurre en varias fases que se desarrollan casi simultáneamente en un tiempo extremadamente corto, es decir de pocos milisegundos, periodo de tiempo, en el cual ocurre la completa detonación de una carga confinada, comprendiendo desde la fragmentación hasta el total desplazamiento del material volado, mostrándose a continuación: (Exsa, 2019)

Etapas de la Mecánica de Fragmentación de Rocas

1. Generación de la onda de choque, una vez iniciada la detonación del explosivo.
2. Transferencia de la onda de choque a la masa de la roca iniciando su agrietamiento.
3. Generación y expansión de gases a alta presión y temperatura que provocan la fracturación y movimiento de la roca.
4. Desplazamiento de la masa de roca triturada para formar la pila de escombros o detritos.
5. Formación de la pila de escombros, como fase final de una voladura convencional.

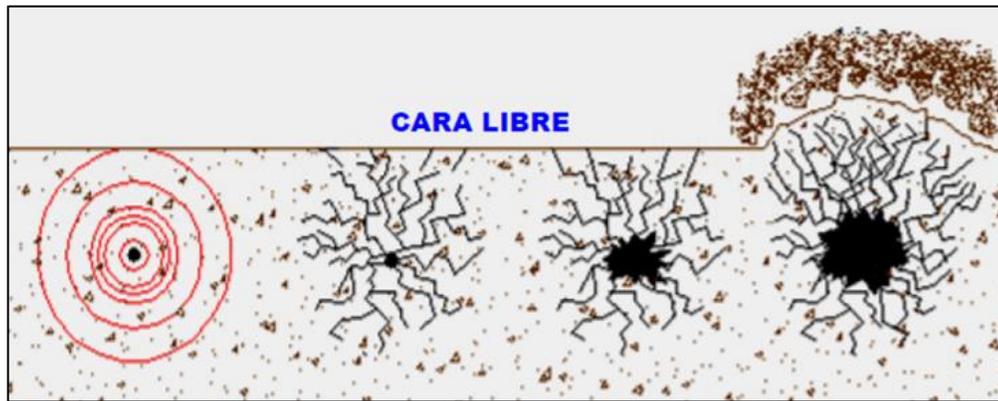


Figura 19: Etapas de la mecánica de fragmentación de rocas. (Exsa, 2019)

2.2.9.1. Teoría de la Reflexión

Asume que las ondas de compresión generadas por la detonación del explosivo se propagan mediante el macizo rocoso y al momento de alcanzar una cara libre, se reflejan como ondas de tracción. Cabe indicar que las ondas de compresión agrietan mínimamente al macizo rocoso, mientras que las ondas de tracción son las principales responsables de la fragmentación y el desplazamiento del material fragmentado. (Romero, 2016)

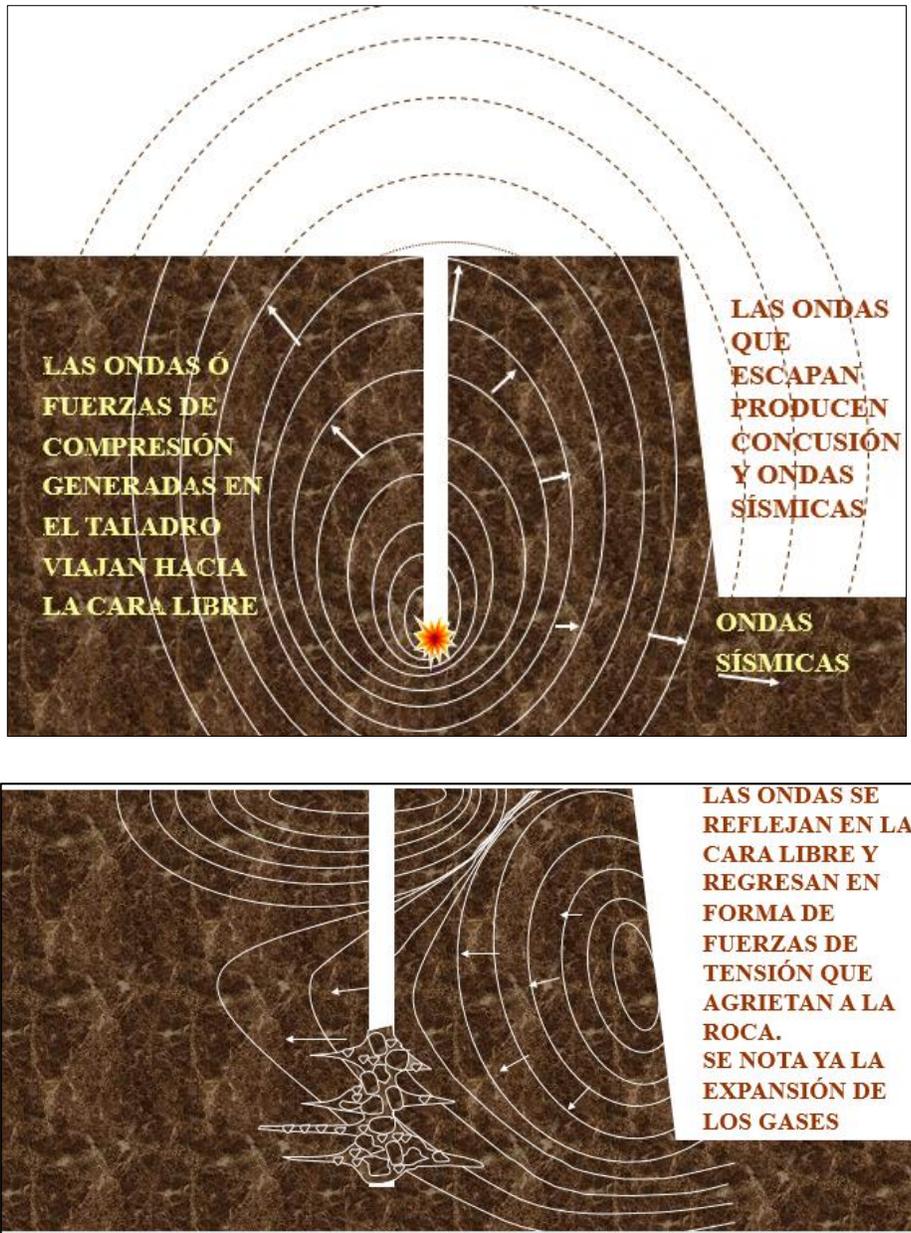


Figura 20: Teoría de reflexión. (Exsa, 2019)

2.2.9.2. Teoría de la Expansión de los Gases

Son dos puntos que destaca esta teoría producidos por la presión de los gases en expansión. Primero, las grietas se inician a una distancia de 2 taladros radiales fuera del taladro y estas grietas se extienden hacia el centro del taladro y hacia la cara libre. Segundo, el desplazamiento

del material fragmentado, por la acción de los gases en gran volumen, se da una vez que las grietas llegan a la cara libre. (Romero, 2016)

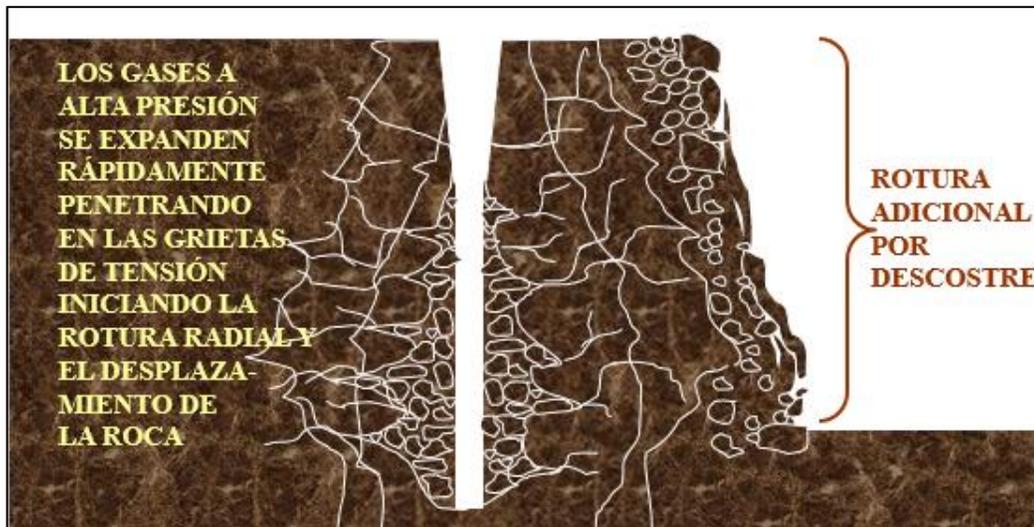


Figura 21: Teoría de expansión. (Exsa, 2019)

2.2.9.3. Rotura por flexión

Explica la fragmentación del macizo rocosos tratando a la roca como una viga rectangular que trata de doblarse o quebrarse. Donde la presión generada en el taladro se produce por un pequeño intervalo de tiempo. Mientras que la presión de gas se sostiene más largamente y es el encargado del 90% de la energía para fragmentar a la roca. (Romero, 2016)

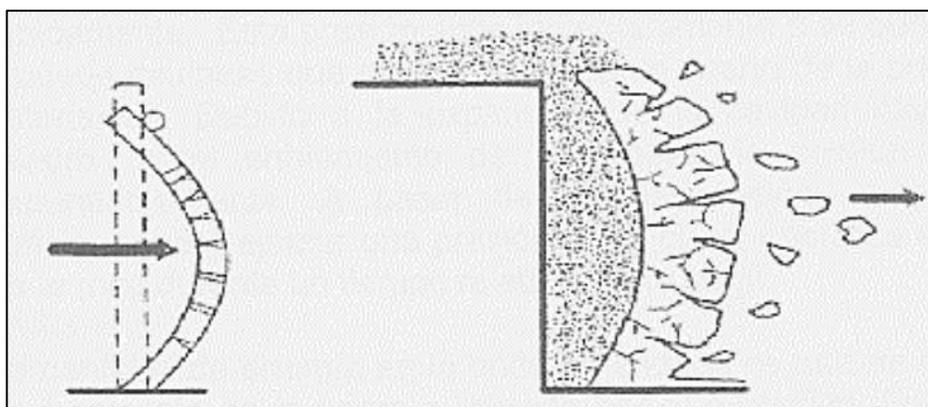


Figura 22: Modelo de flexión de la viga antes de la detonación. (Lara, 2012)

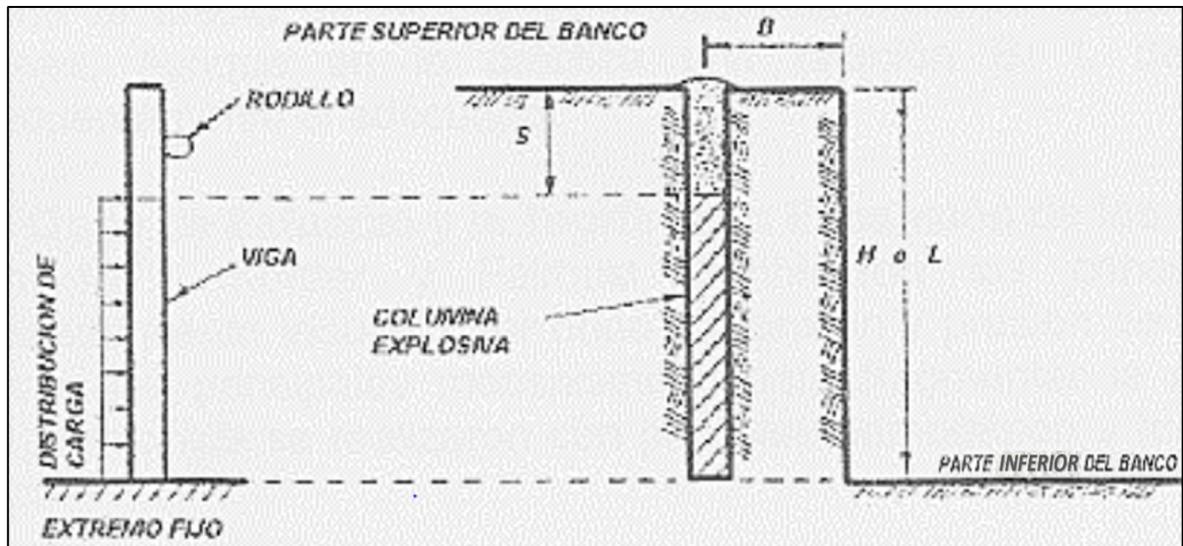


Figura 23: Modelo de flexión de la viga después de la detonación. (Lara, 2012)

2.2.9.4. Teoría combinada

Viene a ser la combinación de las tres teorías previamente descritas. En la cual primero, el explosivo detona y la elevada presión del taladro agrieta el área circundante al taladro. En seguida, las ondas de compresión al alcanzar una cara libre se reflejan en ondas de tensión. Y Finalmente, la presión de los gases en expansión amplía las grietas primarias y desplazan al material fragmentado formándose la pila volada. Sin embargo, en todas las teorías se pueden identificar los siguientes fenómenos que suceden uno tras otro en paralelo con intervalos de tiempo imperceptibles: (Romero, 2016)

- Detonación del explosivo
- Propagación de la onda de choque por el macizo rocoso
- Expansión de gas a altas presión y temperatura
- Movimiento de material o masa rocosa fragmentada

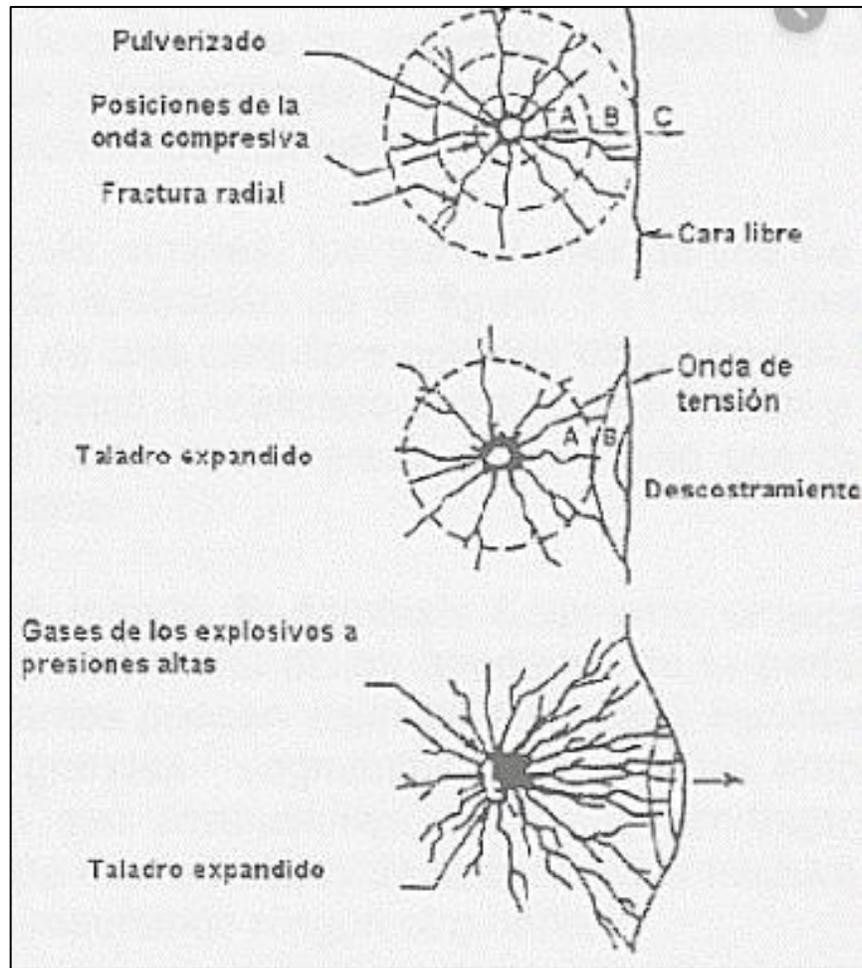


Figura 24: Teoría combinada: Ondas de tensión, rotura por flexión y expansión de gas. (Lara, 2012)

2.2.10. Sistemas de Iniciación - Fulminantes o Detonadores

Accesorio explosivo utilizado para iniciar a otros tipos de materiales explosivos y/o dispositivos de explosión, además son elementos de control en una voladura. (Exsa, 2012)

Los varios sistemas de iniciación, llamados también detonadores o fulminantes, pueden utilizarse tanto en voladuras a cielo abierto como en subterránea y la finalidad es la de iniciar los explosivos dentro del barreno, o bien el cartucho cebo o multiplicador que desencadene la detonación en el interior del mismo. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

Todos los detonadores de uso civil utilizados comúnmente tienen en similitud que contienen aproximadamente la misma carga explosiva, siendo el elemento que les diferencia el modo de iniciación de la carga. En términos generales, tienen de una cápsula metálica de aluminio, o

cobre, donde se aloja un explosivo iniciador, originando la llamada carga primaria (compuesta por trinitrorresorcinato de plomo y azida de plomo), y una carga base (compuesta por pentrita). Esta carga explosiva se inicia por medio de una píldora inflamable (en detonadores eléctricos, no eléctricos o electrónicos) o bien directamente por efecto de una llama (detonadores ordinarios). (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.10.1. Fulminante Convencional o Pirotécnico

Está constituido por una cápsula de aluminio. Este elemento se activa por chispa de ignición a la ácido de plomo o carga primaria y la ácido de plomo acciona a la pentrita (carga base). (Exsa, 2012)

Los fulminantes convencionales son iniciados con la mecha lenta. La cual, se ingresa en el extremo abierto de una cápsula de aluminio que aloja la carga explosiva del detonador y se engarza mediante unas tenazas especiales, de modo que se evite que la mecha se salga durante su manipulación. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

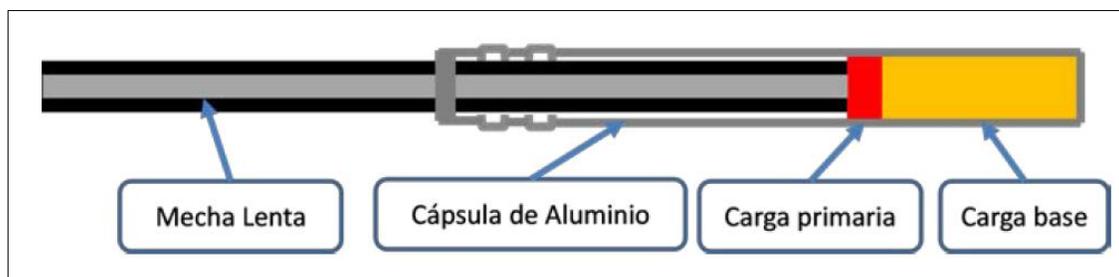


Figura 25: Detonador ordinario. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.10.2. Fulminantes Eléctricos

En este caso, el fulminante eléctrico utiliza la energía eléctrica para su iniciación. Posee un inflamador pirotécnico (denominado comúnmente “cerilla”), por medio del cual circula la corriente eléctrica, que inicia la carga explosiva. El inflamador o cerilla es una pequeña resistencia recubierta de pasta explosiva.

El inflamador o cerilla es una minúscula resistencia recubierta de pasta explosiva, llamada también como “puente de incandescencia”, que va conectada a los hilos de conexión y, mediante ellos, recibe la corriente eléctrica. Si la intensidad es lo suficientemente grande el

puede calentarse, hasta alcanzar una temperatura que produce la inflamación de la pasta explosiva de la cerilla.

Hay dos importantes grupos de fulminantes eléctricos: los fulminantes instantáneos y los temporizados. La diferencia entre ellos, es que los fulminantes eléctricos temporizados tienen un casquillo entre el inflamador que posee una pasta pirotécnica que quema a una velocidad determinada. Este casquillo es llamado portarretardo, siendo el compuesto que lleva en su interior la carga de retardo. De esta manera, con la combinación de varias longitudes y composiciones de la carga de retardo, es posible obtener detonadores que se inician a diferentes tiempos de detonación, proporcionando así las combinaciones necesarias para la secuenciación de taladros de una voladura. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

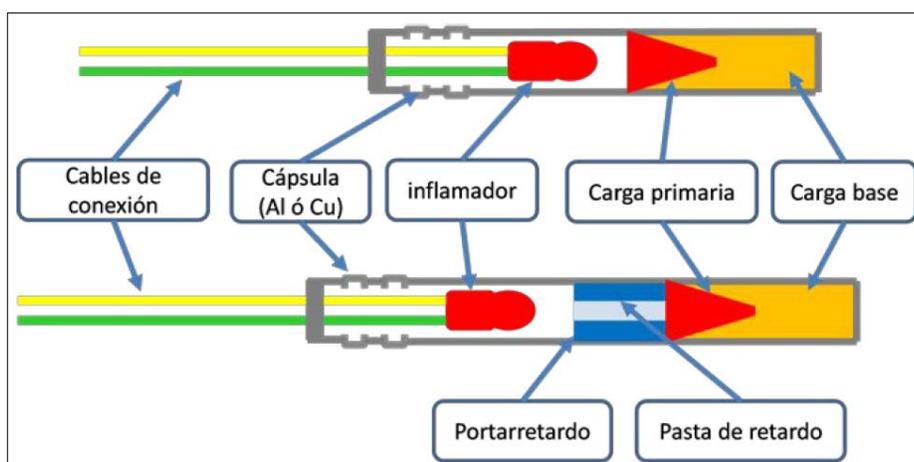


Figura 26: Fulminante eléctrico instantáneo y de retardo. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.10.3. Fulminantes no Eléctricos

Los llamados detonadores no eléctricos, se distinguen porque no interviene ningún tipo de corriente eléctrica en su iniciación. La parte explosiva es similar a los detonadores eléctricos, con la diferencia de que en lugar de un inflamador pirotécnico la carga portarretardo se inicia por medio de una onda de choque de baja energía que se transmite a través de un tubo de transmisión. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

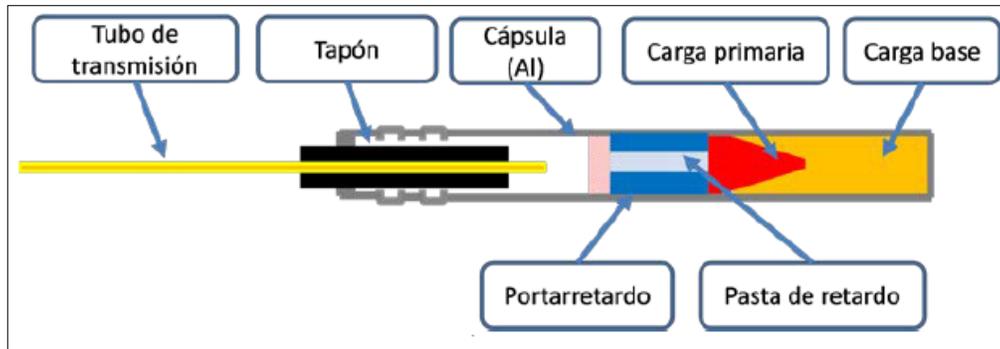


Figura 27: Fulminante no eléctrico. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

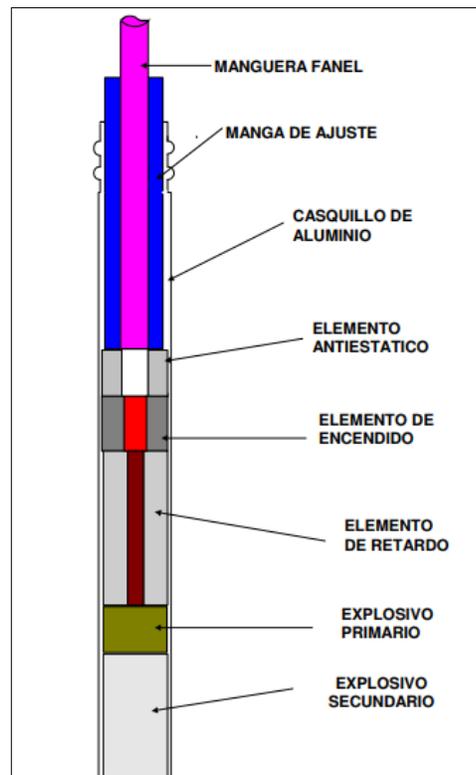


Figura 28: Corte longitudinal de un fulminante no eléctrico. (Exsa, 2019)

El tubo de transmisión se encuentra constituido por plástico y en su interior contiene una mínima cantidad de material reactivo (aproximadamente 14 mg por metro lineal de tubo), compuesto de hexógeno (HMX) y Aluminio.

Este tubo está adherido en el fulminante permitiendo que la onda de baja energía transmitida por su interior incida como un “dardo” sobre la carga primaria o la carga de retardo. La

velocidad de transmisión de esta onda es de 2.000 m/s. Esta onda de choque, se propaga con toda fiabilidad por medio del tubo de transmisión.

Esta onda de detonación no influye en la columna de explosivo contenida en el taladro, generando así la iniciación en el fondo del mismo, ya que la cantidad de materia reactiva contenida en él es tan pequeña que la superficie exterior del tubo queda intacta durante el paso de la mencionada onda de detonación. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.10.4. Fulminante Electrónico

Es un sistema que tiene un programa de diseño de secuencia de disparo para voladuras de acuerdo a las necesidades. Posee un microchip que recibe la orden desde un equipo, la que acciona la cabeza inflamable en el tiempo que fue programado, luego acciona a la ácido de plomo y luego ésta acciona a la pentrita. En este caso el microchip reemplaza al compuesto químico de retardo. (Exsa, 2012)

Está integrado por los siguientes componentes electrónicos:

- Detonador programable
- Programador de retardos
- Iniciador de alta seguridad

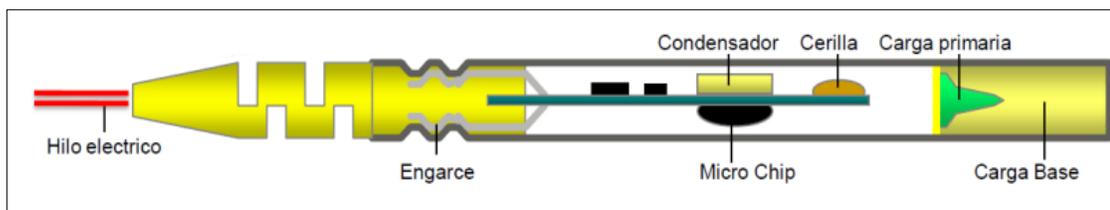


Figura 29: Estructura interna de un detonador electrónico. (Exsa, 2019)



Figura 30: Programador de Retardos – Iniciador de alta seguridad. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

2.2.11. Malla

Malla es la manera en la que se colocan en campo los barrenos de una voladura, teniendo en cuenta básicamente la relación de burden y espaciamiento y su directa vinculación con la profundidad de taladros. En el diseño de una voladura de banco se puede aplicar diferentes trazos para la perforación, denominándose malla cuadrada, rectangular y triangular o alterna, basándose en la dimensión del burden.

Distintas formas de amarre de los accesorios y diferentes tiempos de encendido de los taladros se aplican para obtener la más conveniente fragmentación y forma de acumulación de los detritos, para las posteriores operaciones de carguío y transporte del material volado.

Los diseños de amarre de las conexiones entre taladros de los trazos de perforación anteriores, determinan el diseño de mallas de salida, siendo las más empleadas la longitudinal, cuña, diagonal (Echelón) trapezoidal y las combinadas. (Exsa, 2019)

2.3. Definición de términos básicos

Tiro Cortado: Toda carga y/o accesorios clasificados como explosivos los que, atendiendo a diferentes motivos no hayan detonado de manera total, o parcial, después de la iniciación de un disparo. El caso más común de TQ corresponde a tiros o restos de explosivos en su interior aún en condiciones de detonar, detectados posiblemente luego del disparo o en el proceso de carguío de la pila de material fragmentado. (Leiva & Pallomari, 2015)

Burden y Burden Efectivo: Distancia lineal entre el taladro y la cara libre, midiéndose perpendicular a la dirección de la línea de taladros que forman una fila. El término burden efectivo se refiere a la dimensión lineal entre el taladro y la posición de la cara libre más cercana al tiempo de la detonación del taladro, y toma en consideración la dirección de la iniciación. Para una malla equilátera de taladros, el burden es igual a 0.87 veces el espaciamiento, mientras que para una malla equilátera con iniciación en V, el burden efectivo es igual a 0.29 veces el espaciamiento. (Enaex S.A., 2014)

Espaciamiento y Espaciamiento Efectivo: Distancia lineal entre taladros adyacentes una malla de voladura que forman una fila, midiéndose comúnmente paralelo a la cara libre. Mientras que, espaciamiento efectivo hace referencia a la distancia lineal entre taladros que detonan sucesivamente, y toma en consideración la dirección de la cara libre. (Enaex S.A., 2014)

Factor de Carga: Cantidad de explosivo que se usa para fragmentar un volumen de roca. El factor de carga se expresa en unidades de Kg/m^3 o Kg/Tn . (Exsa, 2019)

Proyección de Rocas: Desplazamiento no deseado de roca de un área de la voladura. La proyección de rocas está estrechamente relacionada a la elaboración de un buen diseño de carguío de los taladros, para así minimizar la ocurrencia de proyección, pero no puede garantizar su eliminación. La proyección de rocas puede ser causada por el sobre confinamiento de cargas, o sobrecarga debido a la presencia de cavidades o fracturas abiertas en la roca. (Enaex S.A., 2014)

Secuencia de Iniciación: Hace referencia al orden en que los taladros detonan dentro de una malla de voladura. (Enaex S.A., 2014)

La selección de la secuencia de iniciación de una malla de voladura depende de los siguientes factores: número de caras libre, dirección preferencial de desplazamiento del material fragmentado, la orientación de las familias de diaclasas principales y el cuidado de los taludes adyacentes a la malla de voladura. (Enaex S.A., 2014)

Accesorios de Voladura: Los accesorios de voladura son productos utilizados en voladuras de rocas para: las etapas de iniciación, amarre y secuencia de salida de un proyecto de voladura

con la finalidad de obtener resultados eficientes bajo condiciones de seguridad, fragmentación, estabilidad de paredes finales y precortes. (Exsa, 2012)

Booster: Es un accesorio para voladura que en su composición tiene una mezcla de explosivos de alta densidad y cuando es activado por medio de un agente externo desarrolla una alta velocidad y gran presión de detonación. Estas características permiten que los explosivos activados dentro del taladro por intermedio del booster, desarrollen sus verdaderos niveles de energía, aspecto que permitirá un mejor aprovechamiento de los mismos. (Exsa, 2012)

Cordón Detonante: Es un accesorio para la voladura, el cual tiene un núcleo de pentrita, recubierto con fibras sintéticas y forrado con material plástico. Una de las propiedades es su alta velocidad de detonación (7,000 m/s). Se utiliza para iniciar el booster, dinamitas, emulsiones, tubo de choque. (Exsa, 2012)

Camión Fábrica: Equipo mecanizado utilizado para el transporte de agentes de voladura, fabricación in situ de explosivo y posterior carguío de taladros de una malla de voladura. Posee dos sistemas: bombeable y vaciable; de los cuales el primero es usado para el carguío de taladros con presencia de agua mientras el segundo para el carguío de taladros secos. (Exsa, 2012)

Esponjamiento: Fenómeno causado producto de la voladura, que consiste en el aumento del volumen de la roca tras ser volada, en comparación con su volumen in situ. (Colombia, 2003)

Iremita Pre-split: Emulsión encartuchada de diámetro angosto, utilizada principalmente para el carguío de taladros de precorte en minería a cielo abierto, su envase está formado por mangas continuas de polietileno, engrapadas cada 20 pulgadas. En toda su longitud tiene adosado un cordón detonante de 10 g/m que produce una iniciación lateral y simultánea. (Exsa, 2012)

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Generalidades

3.1.1. Ubicación

Minera Yanacocha S.R.L. viene a ser una de las minas de oro a tajo abierto que se encuentra ubicada en la provincia y departamento de Cajamarca; a una distancia de 32 Km al norte de la ciudad de Cajamarca aproximadamente. Actualmente cuenta con 3 tajos operativos: Tapado Oeste, Yanacocha y Quecher, además del proyecto underground Chaquicocha.

El tajo Quecher, que es el tajo en estudio, es un depósito epitermal de alta sulfuración de Au localizado en la zona este del Distrito Minero de Yanacocha, entre los 4000 y 4200 m de elevación sobre el nivel del mar, a unos 45 Km al noreste de la ciudad de Cajamarca, en la cordillera de los andes centrales del norte del Perú. Se ubica en las siguientes coordenadas en el sistema UTM, Datum WGS – 84: Longitud: 778042E, Latitud: 9226880N y Cota absoluta: 4100 m.s.n.m

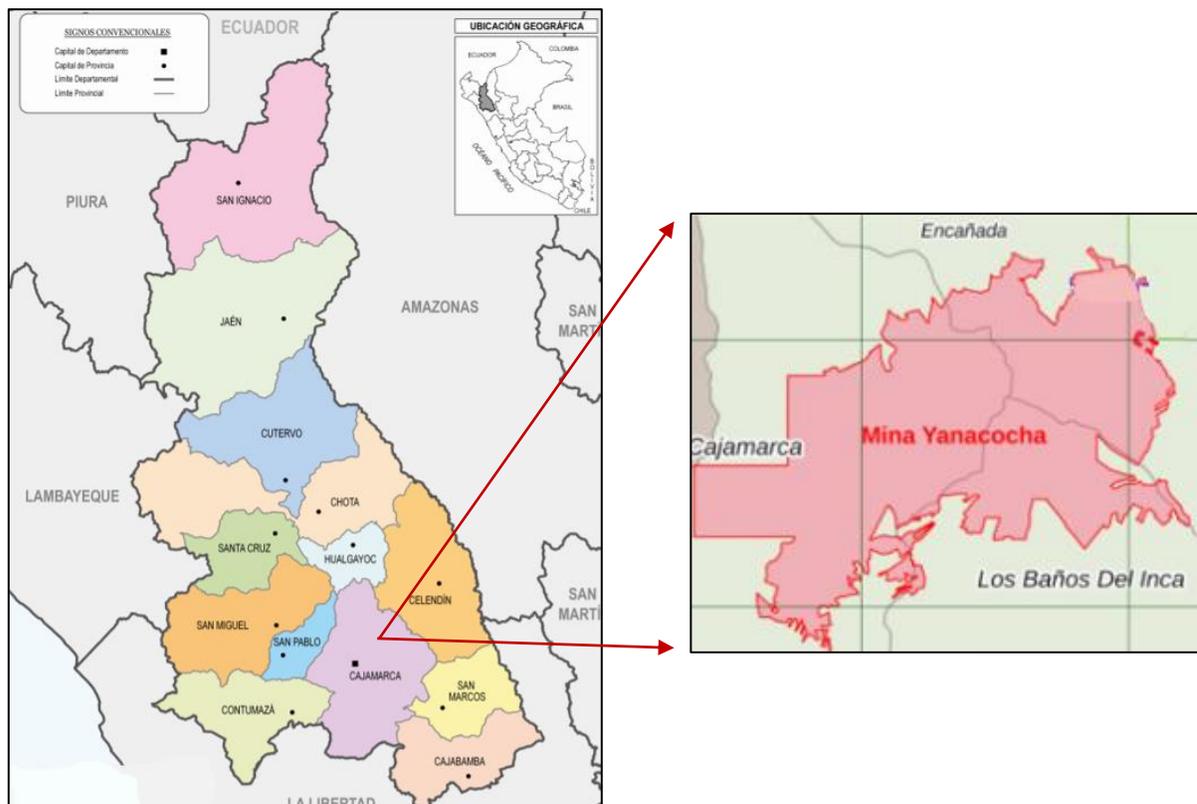


Figura 31: Mapa de Ubicación de Minera Yanacocha S.R.L

3.1.2. Accesibilidad

El acceso al área de operaciones de Minera Yanacocha S.R.L desde la ciudad de Lima hasta el departamento de Cajamarca puede realizarse vía terrestre o aérea, y de Cajamarca hacia las operaciones de Minera Yanacocha S.R.L se accede mediante la carretera Cajamarca – Bambamarca, la cual se encuentra pavimentada y en condiciones medianamente favorables. El mencionado tramo va desde la ciudad de Cajamarca hasta el campamento minero ubicado en el Km 24.5 de dicha carretera; aproximadamente a 1 hora y 30 minutos de Cajamarca.

Tabla 7: Accesibilidad a Minera Yanacocha S.R.L

Tramo	Vía	Distancia (Km)	Tiempo (Hr)
Lima – Cajamarca	Terrestre (carretera asfaltada)	860	14
Lima – Cajamarca	Aérea	-	1
Cajamarca – Minera Yanacocha	Terrestre (carretera asfaltada)	32	1.5



Figura 32: Ruta Cajamarca – Minera Yanacocha S.R.L

3.1.3. Geología Regional

El distrito Yanacocha se encuentra dentro del lineamiento norte-sur en el cinturón volcánico del Cretáceo a Cuaternario que se extiende a lo largo de los Andes Peruanos.

Las unidades volcánicas que albergan los depósitos de Yanacocha han sido denominadas Complejo Volcánico Yanacocha, siendo una secuencia equivalente a la formación Porculla, que comprende una gruesa secuencia basal de lavas andesíticas con aisladas intercalaciones de niveles piroclásticos, estas rocas infrayacen a una secuencia predominantemente fragmental, la cual incluye unidades piroclásticas y depósitos freáticos con algunas intercalaciones de flujos de lavas; numerosos domos, diatremas, diques e intrusiones poco profundas también ocurren en esta parte de la sección. Al norte, oeste y sur-este, el Complejo Volcánico Yanacocha está cubierto a lo largo de un contacto transicional por una secuencia interestratificada de flujos de lavas andesíticas y rocas piroclásticas localmente alteradas de la formación Regalado. Al nor-este del distrito, la sección volcánica Paleógeno Neógeno está cubierta por una secuencia de ignimbritas andesíticas a dacíticas del miembro Los Frailones de la Formación Huambos, que se extiende regionalmente. (Oblitas, 2016)

3.1.4. Geología Local

Minera Yanacocha presenta una geología conformada por rocas volcánicas pertenecientes a la era terciaria que recubren un basamento cretácico e incluyen: piroclásticos, tobas volcánicas e intrusiones andesíticas que han sido clasificadas en cinco unidades principales: (Minera Yanacocha , 2006)

- Intrusivos y piroclásticos jóvenes.
- Andesita superior.
- Piroclásticos ricos en líticos, compuesta de una combinación de sedimentos ricos en sílice, piroclásticos, rocas volcanoclásticas y precipitados de sílice.
- Piroclásticos principales, en su mayoría compuesta por tobas volcánicas de espesor variable y alteradas por procesos hidrotérmicos.
- Andesita inferior.

Estas unidades se encuentran ubicadas en capas horizontales; sin embargo, existen fallas que ocasionan desplazamientos, siendo las principales Encajón y la Quinua, que tienden al noreste

– suroeste y noroeste – sureste respectivamente. Cabe indicar que la mineralización tiene lugar principalmente en las unidades piroclásticas principales y ricas en líticos. (Minera Yanacocha , 2006)

También existen depósitos glaciales y fluviales ubicados en las cuencas situadas justo al oeste y sur del tajo Yanacocha denominados “La Quinoa” que se encuentran principalmente en el tajo la Quinoa y se extienden cuesta arriba hacia el tajo Yanacocha. Estos depósitos fueron originalmente morrenas glaciales y sedimentos aluviónicos que han sido reprocesados en diferentes grados y redepositados en cuencas deposicionales que rodean las áreas altas. (Minera Yanacocha , 2006)

Los depósitos glaciales y fluviales cerca de la falla la Quinoa alcanzan hasta 340 metros y han sido clasificados en cuatro unidades principales: (Minera Yanacocha , 2006)

- Flujo de lodo superior
- Ferricreta, caracterizada por abundante goetita y hematita.
- Flujo de lodo arcilla
- Flujo de lodo arcilla – pirita.

Las unidades de flujo de lodo están compuestas en su mayoría de capas deficientemente clasificadas de arcilla a fragmentos del tamaño de guijarros de rocas piroclásticas obtenidas de la erosión de la roca madre original. (Minera Yanacocha , 2006)

3.1.5. Geología del Tajo Quecher

La geología de Quecher es conformada principalmente por secuencias volcánicas, cuerpos intrusivos y complejos de brechas, las cuales configuran un escenario favorable para la generación de un sistema epitermal. La columna volcánica está conformada por 04 unidades volcánicas; el LA es la unidad más antigua la cual es conformada por secuencias de flujo piroclástico de composición andesítica, seguida de esta unidad se presenta un nivel poco potente denominado TFT interceptado en pocos sondeos asociado a un nivel lacustrino, principalmente se ha definido como un tufo fino de composición andesítica, seguido se presenta la unidad Teut que es la unidad volcánica de mayor desarrollo con más de 300m de potencia reconocidos, generalmente es un tufo rico en cristales de composición andesítica, y finalmente la unidad más reciente denominada Ult en el topo de la secuencia, definido como un tufo lítico principalmente

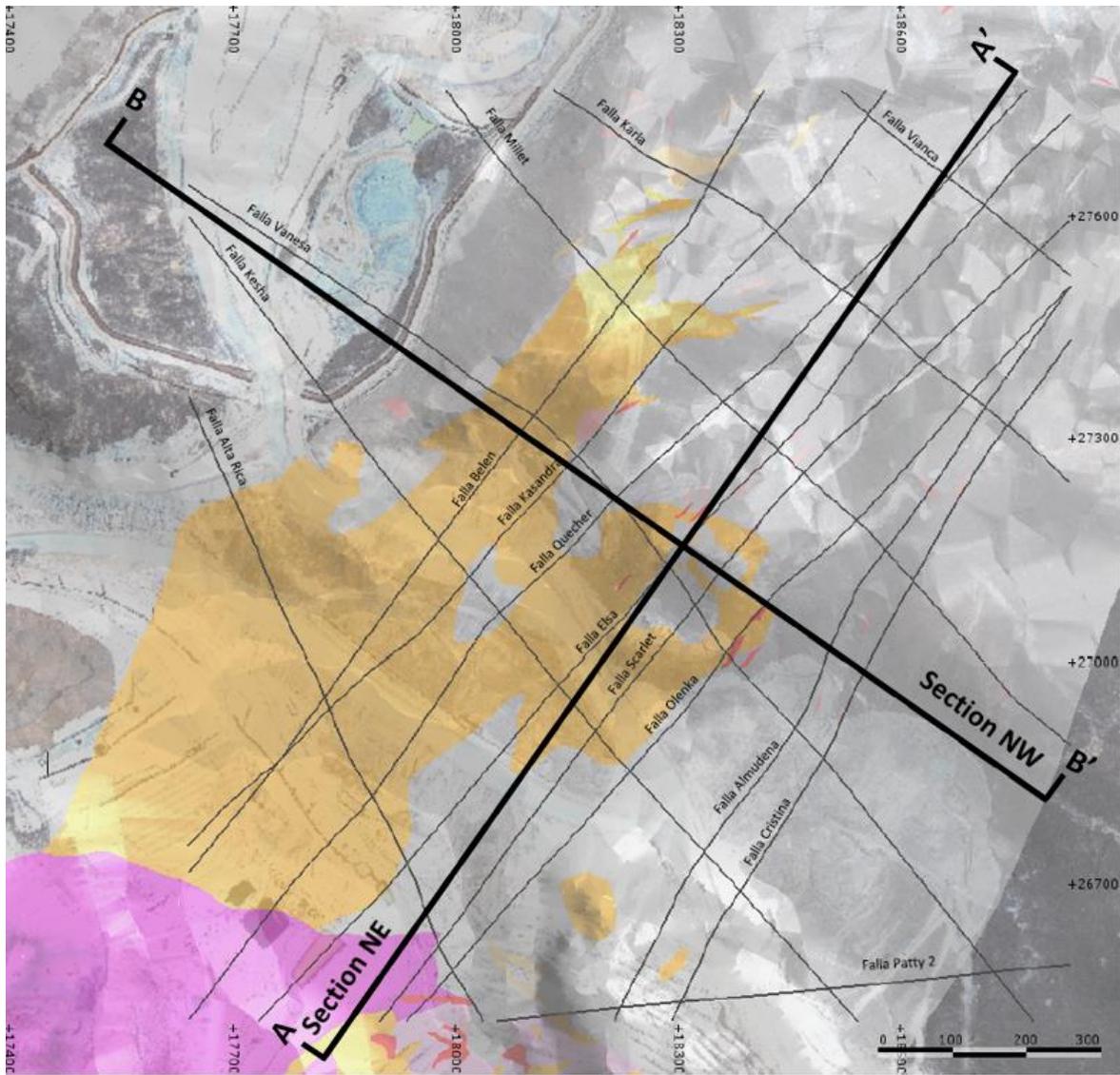
de composición andesítica a dacítica. Toda la secuencia volcánica es intruída por cuerpos subvolcánicos denominados UphA, principalmente son flujos andesíticos de textura porfirítica de grano medio, presentando su mayor desarrollo en la parte norte. Finalmente cortando a todas estas unidades se desarrolla un complejo de brecha conformada por 02 componentes un freático (BXP) y uno hidrotermal (BXH), los cuales presentan mayor correlación con la presencia económica de Au. (Oblitas, 2016)

3.1.6. Alteraciones Geológicas

Los principales tipos de alteraciones del área Minera de Yanacocha son:

- Sílice granular
- Sílice masiva
- Argílica avanzada,
- Argílica
- Propilítica

La alteración silícica cambia a sílice más alunita y luego se gradúa a alteración argílica avanzada a argílica con sílice más grandes cantidades de arcillas, como caolinita, montmorillonita, nontronita e illita. La alteración argílica también ocurre en intrusiones andesíticas, pero es menos extendida que en los piroclásticos. También ocurre una menor cantidad de alteración de propilítica pero no es común en las áreas. (Minera Yanacocha , 2006)



Leyenda

- | | | | | | |
|---|-------------------------|---|---------------------------|---|------------------|
|  | BXH: Brecha hidrotermal |  | ULT: Tufo lítico superior |  | Falla |
|  | BXP: Brecha freática |  | TEUT: Tufo eutaxítico |  | Línea de sección |
|  | UPHA: Andesita superior |  | TFT: Tufo fino | | |
| | |  | LA: Andesita inferior | | |

Figura 33: Plano geológico del tajo Quecher.
Fuente: Minera Yanacocha 2018.

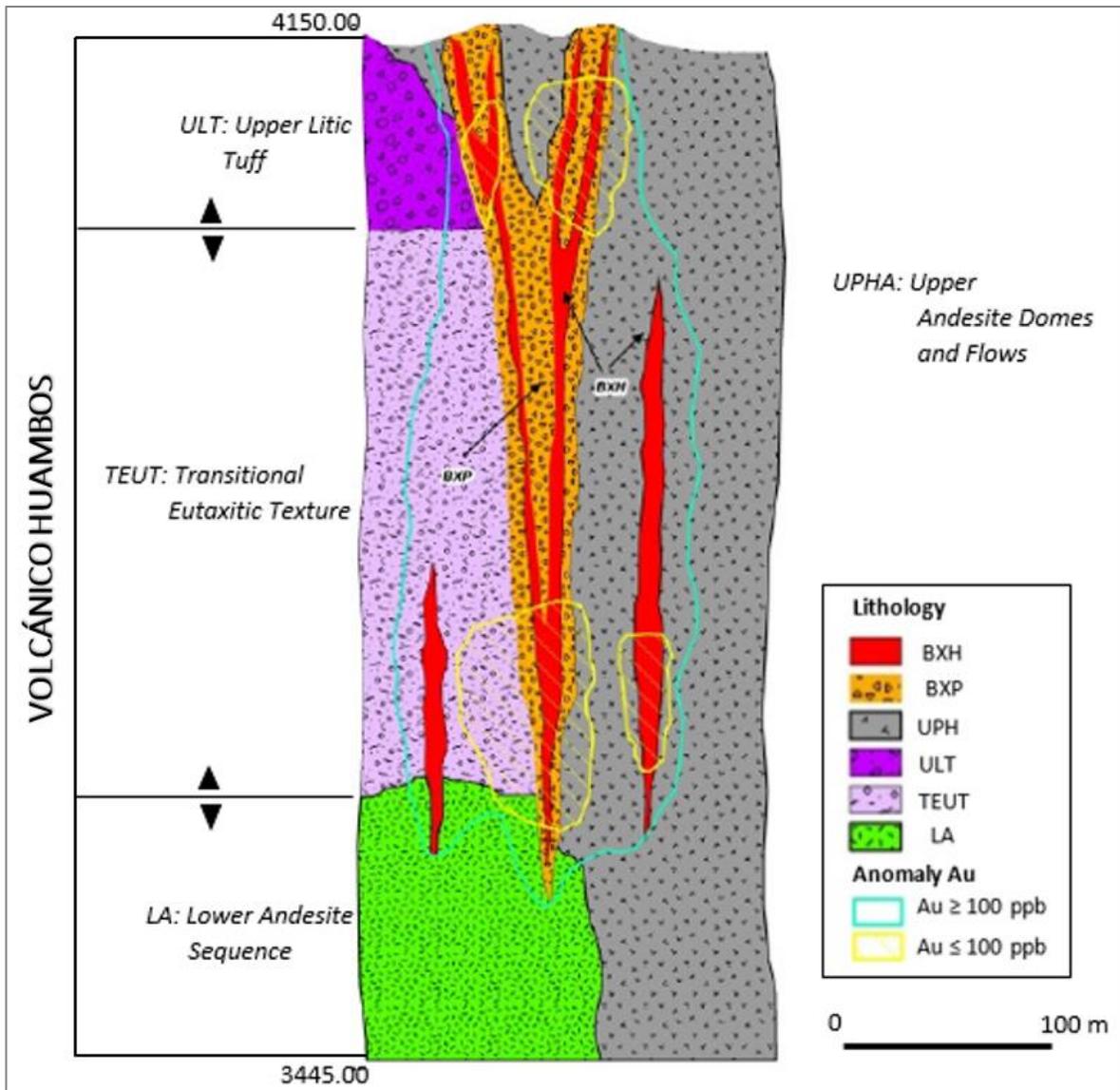


Figura 34: Columna estratigráfica del tajo Quecher.

Fuente: Minera Yanacocha 2018.



Figura 35: Alteraciones geológicas.
Fuente: Minera Yanacocha 2018.

3.1.7. Ciclo de Minado

3.1.7.1. Perforación

En Minera Yanacocha como en todo ciclo de minado en minería superficial, la perforación es la operación unitaria que da inicio a éste; y cuyo nivel de detalle y criterio con que se ejecute influirá finalmente en la eficiencia del desarrollo de las demás operaciones unitarias de mina.

Actualmente el área de Perforación y Voladura de Minera Yanacocha cuenta con cinco equipos de perforación como se muestra en la Tabla 8. Estos equipos perforan diámetros de 5", 9 7/8" y 10 5/8" con profundidades de 10 a 24 metros dependiendo del tipo de malla de perforación que se esté realizando en campo: precorte, procedimiento o producción.

Tabla 8: Equipos de perforación.

Equipo	Modelo	Nombre	Diámetro de Perforación	Profundidad de Perforación	Cantidad
Perforadoras	PIT VIPER	TD024	10 5/8"	12 m	3
	271 - Atlas	TD027			
	Copco	TD028			
	DML – Ingersoll Rand	TD012	9 7/8"	10 m	1
Roc L8 – Atlas Copco	TD032	5"	6m - 24 m	1	

Fuente: Minera Yanacocha 2018.

La calidad en la perforación de los taladros generalmente se encuentra determinada por los siguientes parámetros: diámetro, longitud, rectitud y posicionamiento; los cuales dependen principalmente de la buena nivelación de los pisos, habilidad del operador y el sistema de alta precisión HPGPS que se encuentra instalado en todas las perforadoras Pit Viper 271.

Este sistema permite tener un mejor control en cuanto a la calidad de posicionamiento y profundidad de los taladros que para Minera Yanacocha se tiene como margen aceptable 0.15 m en posicionamiento y ± 0.15 m en profundidad; además mediante este sistema también se puede visualizar en las pantallas instaladas en las perforadoras todos los parámetros y KPI's de perforación en tiempo real.

Las perforadoras DML – Ingersoll Rand y L8 – Atlas Copco para poder iniciar su perforación deberán ser marcados por topografía todos los puntos de perforación previamente ya que carecen del sistema de alta precisión.

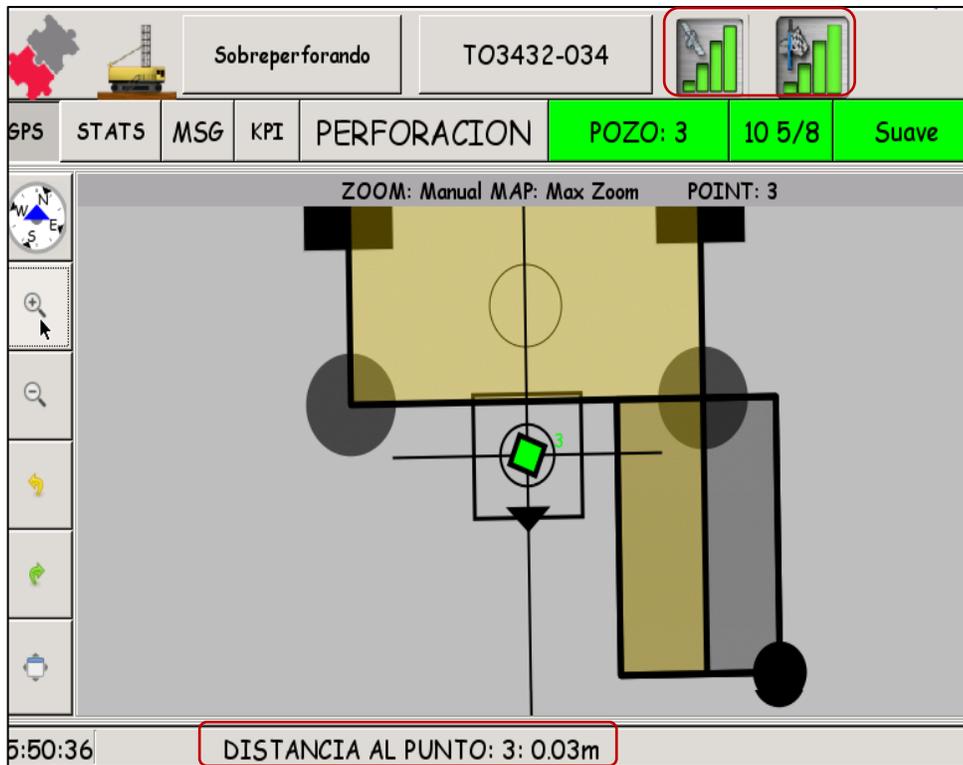


Figura 36: Pantalla del HPGPS para controlar la calidad en posicionamiento del taladro.
Fuente: Minera Yanacocha 2018.



Figura 37: Pantalla del HPGPS para controlar la calidad en profundidad del taladro.
Fuente: Minera Yanacocha 2018.

3.1.7.1.1. Tipos de Taladros

El área de Perforación y Voladura de Minera Yanacocha divide los taladros de sus mallas de perforación en 3 tipos: precorte, procedimiento y producción; con una nomenclatura como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9: Tipos y nomenclatura de los taladros.

Tipo de Taladro		Numeración
Precorte		Inicio: 900 – 999
		800 - 899
Procedimiento	Adyacente	700 al 799
	1° Producción	600 al 699
	2° Producción	500 al 599
Producción		1 al 499

Fuente: Minera Yanacocha 2018.

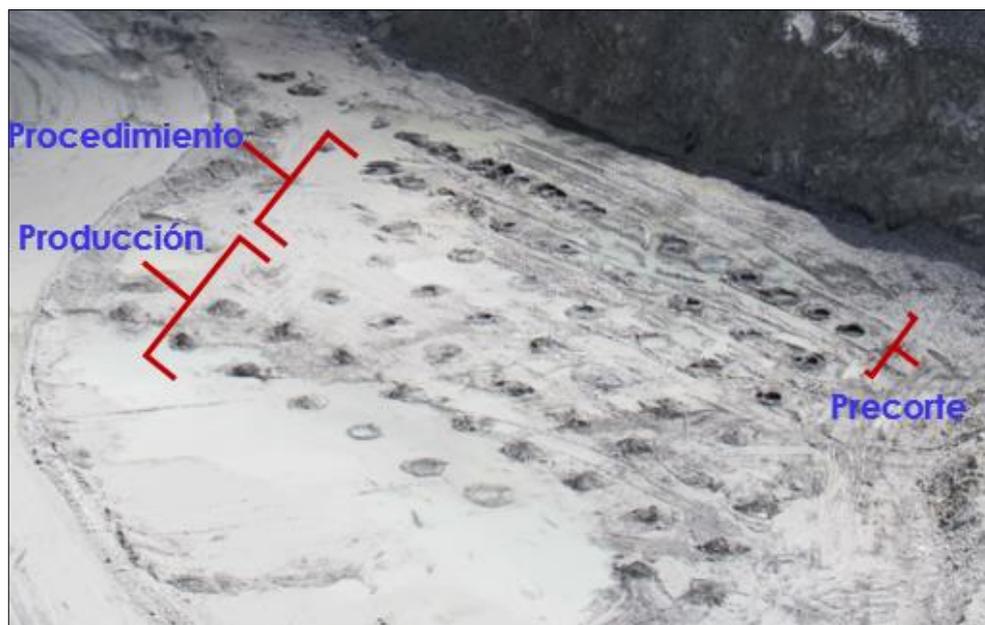


Figura 38: Tipos de taladros empleados para las mallas de perforación.

Fuente: Minera Yanacocha 2018.

A) Taladros de Precorte

Este tipo de taladros tienen como finalidad crear un plano o sección de falla para así minimizar las vibraciones hacia la zona de los taludes.

En Minera Yanacocha se hace uso de dos tipos de precorte:

- **Precorte Inclinado**

Taladros con un diámetro de 5", inclinaciones que oscilan de 65° a 75° y un espaciamiento entre taladros de 1.5 metros. En cuanto a la perforación de estos taladros se realiza con el equipo Roc L8 – Atlas Copco, mientras que el carguío o no con explosivos de los mismos dependerá finalmente de la competencia de la roca.

Este tipo de precorte es usado en los límites de fase en un tajo.

- **Precorte Vertical**

Son perforados con equipos Pit Viper 271 y DML de diámetros de 10 5/8" y 9 7/8" respectivamente; espaciados 2 metros, y no son cargados con explosivo.

Este precorte se ejecuta cuando la malla de perforación no se encuentra ubicada en los límites de una fase de un tajo.

B) Taladros de Procedimiento

Tienen como objetivo fragmentar la roca con la menor carga explosiva posible, para ayudar en la reducción de vibraciones hacia los taludes junto a los taladros de precorte.

Para minera Yanacocha este paquete de taladros está conformado por tres filas denominadas: adyacente, primera de producción y segunda de producción, con un diámetro de 9 7/8" (perforados con el equipo DML – Ingersoll Rand) o 10 5/8" (perforados con las perforadoras Pit Viper 271) y con parámetros específicos de perforación y voladura como se indican en las Tablas 10 y 11.

C) Taladros de Producción

La perforación de estos taladros es realizada con las perforadoras Pit Viper 271, con un diámetro de 10 5/8" y con parámetros de perforación y voladura como se indica en las Tablas 10 y 11.

En cuanto a la profundidad de perforación varía según el tajo oscilando de 10 a 13 metros, para el caso del tajo Quecher, que es el tajo en estudio, tiene un valor de 10 metros.

La finalidad de estos taladros es fragmentar el macizo rocoso correctamente para entregar el material roto a los equipos de carguío.

El tipo de malla utilizado en la perforación de taladros en minera Yanacocha es del tipo triangular, la cual permite una mejor distribución y aprovechamiento de la energía del explosivo. Los valores de burden y espaciamento de dichas mallas dependen del tipo de alteración a perforar y se detallan en las Tablas 10 y 11.

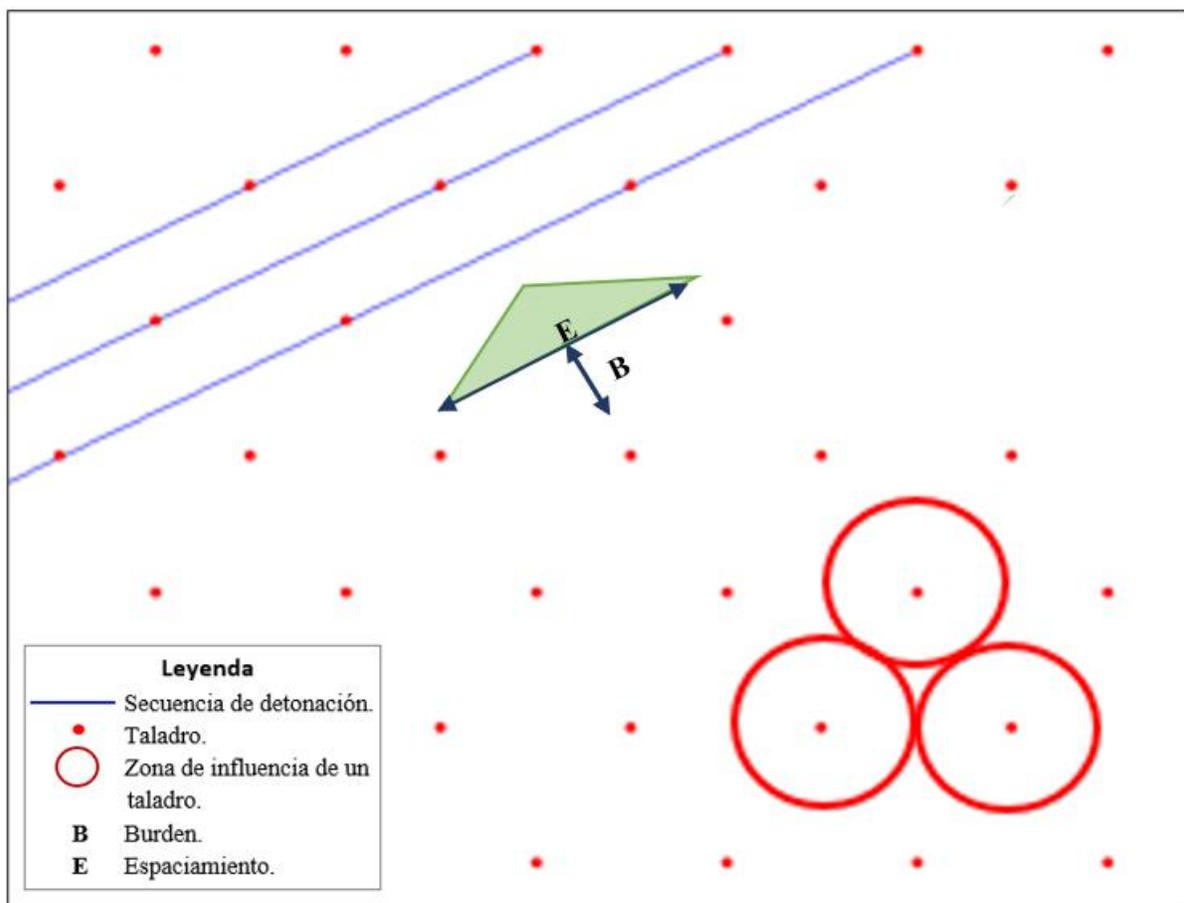


Figura 39: Malla triangular

Tabla 10: Parámetros de perforación y voladura utilizados en el tajo Quecher. (Diámetro de perforación de todas las mallas de 10 5/8")

	Malla de Perforación					
	Procedimiento			Producción		
	Adyacente	1° Producción	2° Producción	Argílico Suave	Argílico Duro	Silíce Granular
Subdrill	0 m	-1 m	-1 m	1 m		
Burden	3.5 m	5.2 m		8 m	7 m	8 m
Espaciamiento	5 m	6.5 m		9 m	8 m	9 m
Ó Perforación	10 5/8"					
Profundidad Taladro	10 m					

Fuente: Minera Yanacocha 2018.

Tabla 11: Parámetros de perforación y voladura utilizados en el tajo Quecher. (Diámetro de perforación para las mallas de procedimiento y producción de 9 7/8" y 10 5/8" respectivamente)

	Malla de Perforación					
	Procedimiento			Producción		
	Adyacente	1° Producción	2° Producción	Argílico Suave	Argílico Duro	Silíce Granular
Subdrill	0 m	-1 m	-1 m	1 m		
Burden	3.3 m	4.5 m		8 m	7 m	8 m
Espaciamiento	4.8 m	6.5 m		9 m	8 m	9 m
Ó Perforación	9 7/8"			10 5/8"		
Profundidad de Taladro	10 m					

Fuente: Minera Yanacocha 2018.

3.1.7.2. Voladura

Es una operación unitaria minera complementaria a la perforación, cuyo propósito es el de fragmentar la roca y desplazar el material quebrado, enmarcados en parámetros operativos, económicos y medioambientales.

En minera Yanacocha ambos procesos son soportados por las áreas de: Geotecnia, Geología y Planeamiento, quienes, a través de una serie de coordinaciones y evaluaciones, definen la zona a perforar, muestrear y disparar, tal como se detalla en la Figura 40.

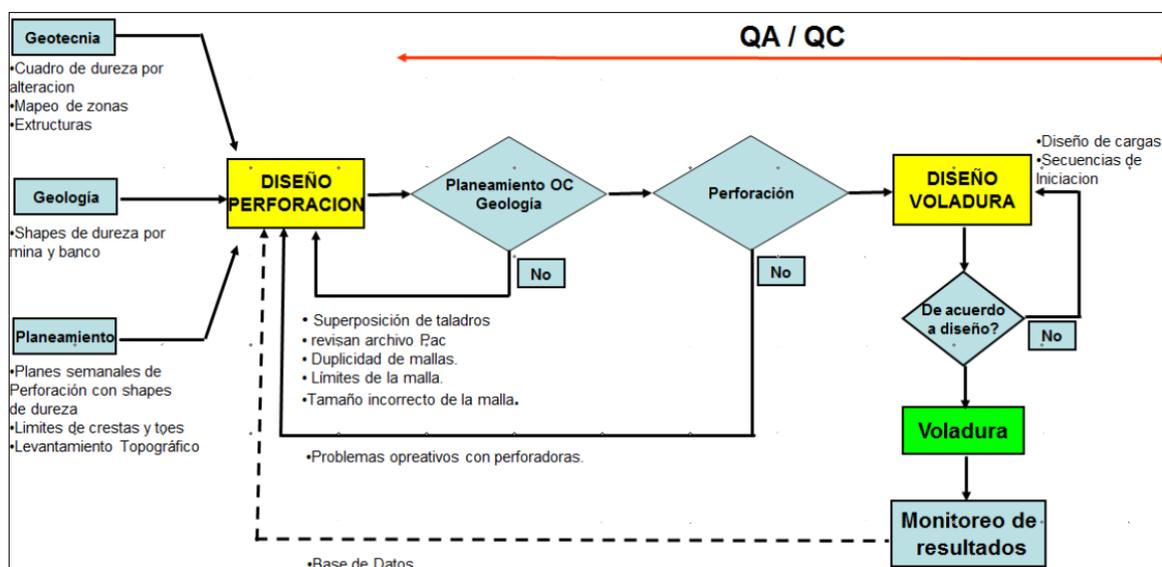


Figura 40: Flujograma para el diseño de voladuras.

Fuente: Minera Yanacocha 2018.

Actualmente el área operativa de voladura en Yanacocha se encuentra a cargo de la empresa contratista EXSA S.A. con el continuo seguimiento de la supervisión del área de Perforación y Voladura de Minera Yanacocha. Los procesos a cargo de esta área operativa comprenden desde el abastecimiento de explosivo y agentes de voladura a la cancha de nitrato y emulsión; y de accesorios de voladura a los polvorines; hasta el análisis post voladura de todas las mallas voladas. Todos estos procesos se detallan en la Figura 41.

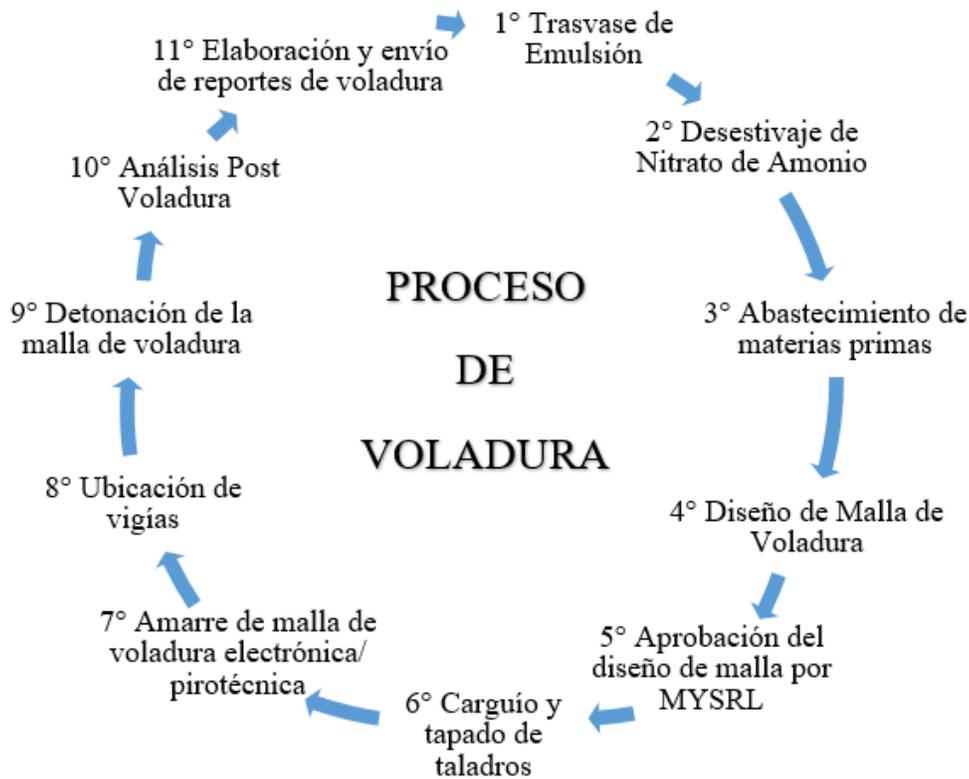


Figura 41: Diagrama de los procesos operativos de voladura.

Fuente: Minera Yanacocha 2018.

3.1.7.2.1. Diseño de Cargas de Voladura

La selección del tipo de explosivo se basa generalmente en la economía y la confiabilidad del abastecimiento. Sin embargo, existen factores técnicos que se pueden aplicar para determinar el explosivo más efectivo para un tipo de roca en particular y el requerimiento de voladura.

Estos factores que influyen en la selección del explosivo incluyen:

- La presencia de agua subterránea (dinámica o estática).
- El diámetro del taladro.
- Las propiedades in situ del macizo rocoso.
- Los requerimientos de voladura (fragmentación o perfil de la pila).

El área de Perforación y Voladura en Minera Yanacocha, clasifica la dureza del terreno a ser fragmentado en tres tipos: duro, medio y suave; basándose en datos de Geotecnia para definir

la resistencia a la compresión uniaxial (MPa); y de Perforación para determinar la velocidad de perforación aplicada en cada taladro (m/hr) como se detalla en la Tabla 12.

Tabla 12: Tabla de dureza del terreno de Minera Yanacocha

ISRM	M/Hr	Mpa	Clasificación
R6	0 – 20	>250	DURO
R5	0 – 20	100 a 250	
R4	21 – 30	50 a 100	
R3	31 – 50	25 a 50	MEDIO
R2	>51	5 a 25	SUAVE
R1	>51	1 a 5	
R0	>51	0.25 a 1	

Fuente: Minera Yanacocha 2018.

Minera Yanacocha realiza su diseño de carga de voladura según el tipo de taladro que corresponda: precorte, procedimiento o producción.

Para el caso de los taladros de precorte, son generalmente cargados con emulsión encartuchada (iremita pre – split) e iniciados con cordón detonante.

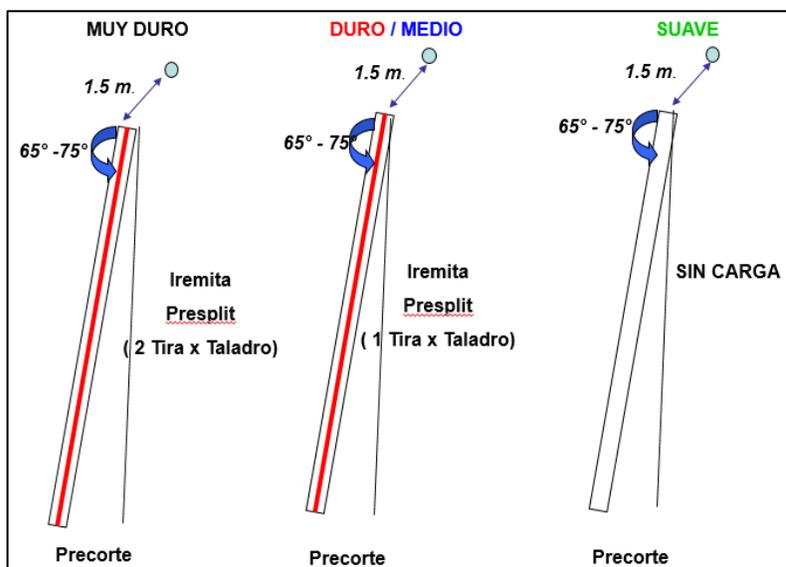


Figura 42: Diseño de carga para un taladro de Precorte.

Fuente: Minera Yanacocha 2018.

Para el carguío de los taladros de procedimiento generalmente la carga oscila entre el 40 al 60% de los kilos por taladro de producción; y el carguío de estos taladros junto a la de los taladros de producción suelen estar conformados por: cámaras de aire, Emulsión Quantex 73, booster, detonador electrónico y nonel; mientras que el diseño de ambos tipos de taladros va a depender de un conjunto de variables que se podría dividir en dos grupos:

Variables Controlables

Geométricas

- Equipo de Perforación
- Altura de Banco
- Diámetro de taladro
- Burden
- Espaciamiento
- Sobre-Perforación
- Longitud de carga

Físico Químicas

- Tipo de mezcla explosiva
- Densidad de la mezcla explosiva
- Detonación

De Tiempo

- Tipos y tiempos de retardo
- Tipos y secuencia de salida

Variables no Controlables

- Naturaleza y condiciones del macizo rocoso.
- Geología regional, local y estructural (Presencia de fallas geológicas).
- Hidrogeología (Nivel freático, aguas dinámicas)
- Condiciones climáticas

3.1.7.3. Carguío y Acarreo

Estas operaciones corresponden a la extracción y desplazamiento del material previamente fragmentado; desde el frente de trabajo hacia sus destinos finales, lo cual dependerá del tipo de material a trasladar. En Minera Yanacocha el material fragmentado presenta los siguientes destinos finales:

- **Pads de lixiviación;** corresponden a estructuras en las cuales se apila el mineral extraído para ser lixiviado y extraer el oro existente.
- **Planta Gold Mill;** procesa mineral que no puede tratarse por lixiviación (por el alto contenido de finos) y mineral con leyes mayores a 1gr/Ton.

- **Stocks;** pilas que acumulan mineral con leyes por debajo del cut off para ser tratado en un futuro o para realizar el cabeceo.
- **Botaderos;** estructuras similares a los pads que almacenan material de desmonte.
- **Lastre;** material de desmonte destinado principalmente para el mantenimiento de vías y habilitación de plataformas de los equipos de carguío en el frente de minado.

Para la ejecución de estas operaciones se hace uso de equipos, que dependiendo de la producción de la mina y otros factores geométricos como altura de banco de los tajos se define finalmente la capacidad de éstos.

Actualmente Minera Yanacocha realiza estas dos operaciones unitarias, con los siguientes equipos:

Tabla 13: Equipos de Carguío y Acarreo de Minera Yanacocha

Equipo	Modelo	Cantidad
Carguío	EX 5500	2
	EX 2500	3
	Cat 994D	1
	Cat 994F	1
Acarreo	Cat 793C	31
Equipo Auxiliar	Cat 24H	3
	Cat 785 WT	2
	Cat 793 LB	1
	Cat 844	2
	Cat D11	4

Fuente: Minera Yanacocha 2018.

Todos estos equipos son controlados mediante un sistema de gestión de flota que teniendo en cuenta la prioridad de los equipos de carguío, la ruta óptima, el rendimiento y tamaño de los equipos; permite administrar eficientemente las operaciones de carguío y acarreo.

El sistema de despacho permite hacer un seguimiento y controlar los tiempos productivos, demoras, tiempos inoperativos, tiempos en mantenimiento de los equipos; con la finalidad de

no tener tiempos muertos, evitando la formación de colas Queue – Hang y aumentando la productividad de los equipos. Además de este sistema Minera Yanacocha cuenta con un programa de fatiga dirigido a los operadores de los equipos de carguío y acarreo el cual consiste en enviar un mensaje al operador después de 2 horas y media para consultar al operador si puede continuar con su tarea asignada.

3.2. Metodología de la Investigación

3.2.1. Definición de Variables

En la investigación se han identificado las siguientes variables:

❖ Variables Independientes

Distancia entre taladros: Espacio existente entre dos taladros adyacentes dentro de una malla de voladura.

Factor de carga: Cantidad de explosivo que se requiere para romper una tonelada de material.

Condiciones del macizo rocoso: Propiedades del macizo rocoso principalmente alta saturación y fracturamiento; que finalmente influyen en la probabilidad de que exista daños por presión dinámica en una voladura.

Secuencia de detonación: Orden de salida en cuanto a detonación de los taladros, teniendo en consideración el tiempo entre taladros y filas de una malla de voladura.

❖ Variable Dependiente

Presión Dinámica: Fenómeno inherente al proceso de voladura interpretado como la fuerza por unidad de área ejercida por la onda de choque, generada en el proceso de detonación del explosivo

Tabla 14: Variables de la investigación

VARIABLES INDEPENDIENTES	VARIABLE DEPENDIENTE
Distancia entre taladros	
Factor de carga	
Condiciones del macizo rocoso	Presión Dinámica
Secuencia de Detonación	

3.2.2. Tipo, nivel, diseño y método de la investigación

❖ Tipo de investigación:

Exploratoria: busca realizar una evaluación de qué parámetros operativos de una voladura pueden generar tiros cortados a causa de presión dinámica, en la cual se tiene dudas y no se ha abordado antes.

Descriptiva: describe los parámetros operativos a considerar en las voladuras del tajo en estudio, que influyen en la ocurrencia de eventos de tiros quedados por presión dinámica.

Correlacional: existe una relación entre los parámetros operativos de una voladura con la ocurrencia de tiros cortados, y de estos últimos con la presión dinámica.

❖ Nivel de investigación:

Explicativo, ya que pretende explicar la relación existente entre los parámetros operativos de una voladura y la ocurrencia de eventos de tiros cortados por presión dinámica.

❖ Diseño de la investigación:

Longitudinal; se puede tomar varias medidas de la variable dependiente a lo largo del tiempo.

❖ Método de la investigación:

El método empleado para la investigación es empírica, ya que se centra en predecir lo que va a suceder en el futuro si, en esa situación de la realidad, se hace un determinado cambio; basándose en la ejecución de dos tipos de pruebas en campo en el tajo Quecher de Minera Yanacocha.

3.2.3. Población de Estudio

El tajo Quecher de Minera Yanacocha.

3.2.4. Muestra

Cuatro mallas de voladura en las alteraciones más predominantes del tajo Quecher: dos en alteración argílica y dos en sílice granular.

3.2.5. Unidad de análisis

Factor de carga, condiciones del macizo rocoso y eventos de tiros cortados.

3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.3.1. Técnicas

Análisis documental: permitió recopilar información acerca de los diferentes hallazgos de eventos de tiros cortados, las alteraciones geológicas más predominantes, y todo el proceso de voladura llevado a cabo en el tajo Quecher.

Observación directa: consistió en la verificación en campo de los resultados obtenidos producto de la ejecución de las pruebas realizadas.

3.3.2. Instrumentos de recolección de datos

Libretas de campo: en el caso de la prueba tipos cráter, para anotar la distancia, tiempo de detonación de los taladros; además de los datos del levantamiento topográfico del perfil del esponjamiento y rotura originado por cada taladro de prueba. En cuanto a la prueba de iniciación de fulminantes pirotécnicos en adición a la de los electrónicos; se anotó los tiempos de detonación de los taladros.

3.3.3. Equipos

GPS diferencial: utilizado para el levantamiento topográfico del perfil de esponjamiento y rotura originado por cada taladro en la prueba tipo cráter, además de su uso para la delimitación post voladura de las dos mallas voladas de la prueba de iniciación de fulminantes pirotécnicos en adición a la de los electrónicos.

Celular: para obtener evidencias fotográficas.

Laptop: usada para el procesamiento de la información, elaboración de planos,

EPP: casco, lentes de seguridad, zapatos de seguridad, guantes, chaleco reflectivo.

3.3.4. Materiales

Estacas y cinta roja: para delimitar las áreas voladas.

3.3.5. Softwares

JK-Simblast, microsoft Office 2013, View Shot

3.4. Procedimiento

Para la presente investigación se realizaron pruebas experimentales en campo una de tipo cráter y dos de iniciación de fulminantes pirotécnicos en adición a la de los electrónicos.

La prueba de tipo cráter se llevó a cabo en las alteraciones geológicas más predominantes del tajo Quecher teniendo como objetivo final determinar la distancia crítica (muy corta) entre los taladros y el factor de carga óptimo.

En cuanto a las pruebas de iniciación de fulminantes pirotécnicos en adición a la de los electrónicos, en la primera ejecución se preparó en campo las condiciones para que existan eventos de tiros cortados por presión dinámica en lo que respecta a presencia abundante de agua y distancia corta entre taladros; y en la segunda se cumplió con los diseños de voladura establecidos por el área de perforación y voladura de Minera Yanacocha; cabe indicar que el propósito final de ambas ejecuciones fue corroborar si la iniciación de los fulminantes pirotécnicos (usados como back up en un taladro) con cordón detonante además de la iniciación de los fulminantes electrónicos permiten eliminar la existencia de eventos de tiros cortados en una malla de voladura.

Tabla 15: Resumen de las pruebas de campo realizadas en el Tajo Quecher de Minera Yanacocha

Prueba	Nº de Prueba	Fecha	Nivel	Tipo de Alteración	Objetivo
Tipo Cráter	1	28/09/2018	4080	Argílico	Determinar la distancia crítica (muy cortas) entre los taladros y el factor de carga óptimo según la alteración geológica.
			4090	Sílice Granular	
Iniciación de fulminantes pirotécnicos en adición a los electrónicos.	1	15/11/2018	4070	Sílice Granular	Comprobar la validez de esta prueba, es decir si con ella se puede evitar eventos de tiros cortados por presión dinámica.
	2	01/12/2018	4070		

3.4.1. Prueba Tipo Cráter

Se ejecutó el día 28 de setiembre del 2018 en los niveles 4080 y 4090 del Tajo Quecher de Minera Yanacocha, y consistió en la detonación de 4 taladros confinados (Ver Figura 43), 2 en cada nivel. Estos taladros fueron perforados en sectores de alteración argílico y sílice granular

para el nivel 4080 y 4090 respectivamente; que corresponden a las dos alteraciones geológicas con mayor presencia en el Tajo Quecher de Minera Yanacocha.

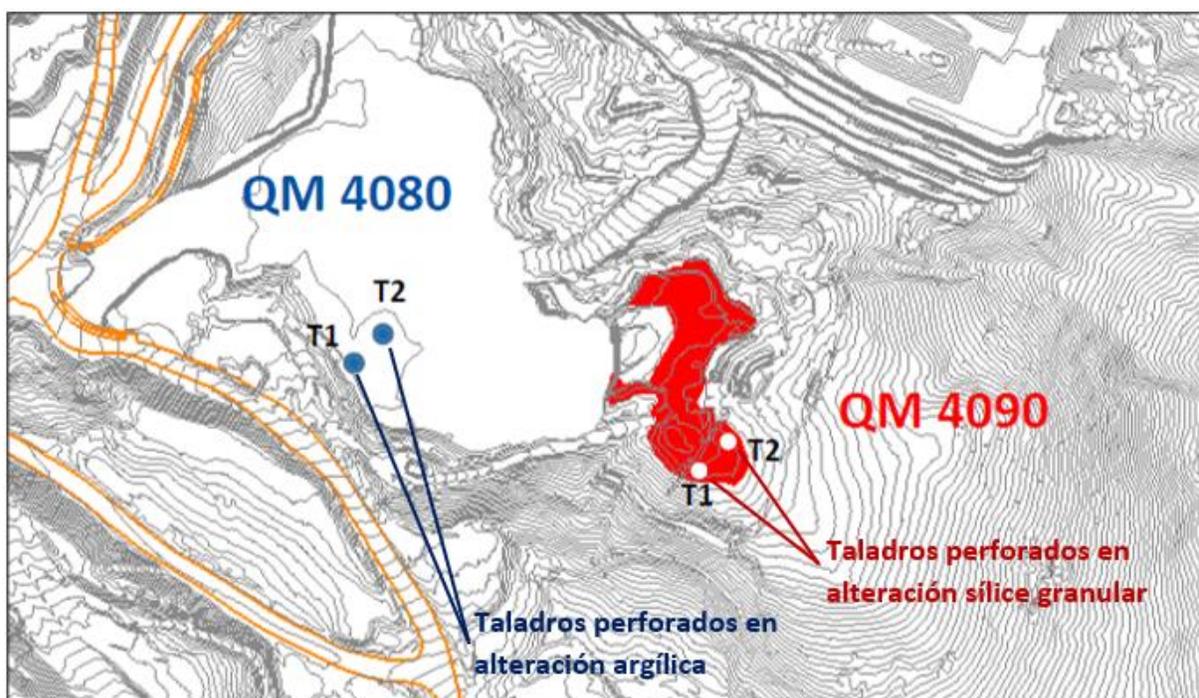


Figura 43: Ubicación de la prueba Tipo Cráter – Tajo Quecher de Minera Yanacocha.

El diseño de perforación y de carguío de explosivo de los taladros de prueba según el nivel correspondiente se muestra en las Figuras 44 y 45, donde se puede apreciar que en promedio estos taladros cumplieron con un factor de carga de 0.21 kg/ton, una malla de perforación de 8.5mx9.5m y una carga de 350 kg de mezcla Quantex 70/30 (densidad de 1.1 g/cm³) a excepción de un taladro (Tal 02) detonado en el nivel 4080 al cual se le añadió 50 Kg de mezcla adicional debido a posible agrietamiento/ deformación en el interior del taladro.

En cuanto a la secuencia de detonación de los taladros, primero se detonaron los situados en el nivel 4090 y enseguida los del nivel 4080; para así tener un mayor control de posibles daños en los taludes cercanos a la prueba. El tiempo de detonación considerado entre taladros en cada nivel fue de 200 ms y el tiempo de detonación entre niveles de 100 ms, como puede mostrarse en la Tabla 16.

Nivel 4090

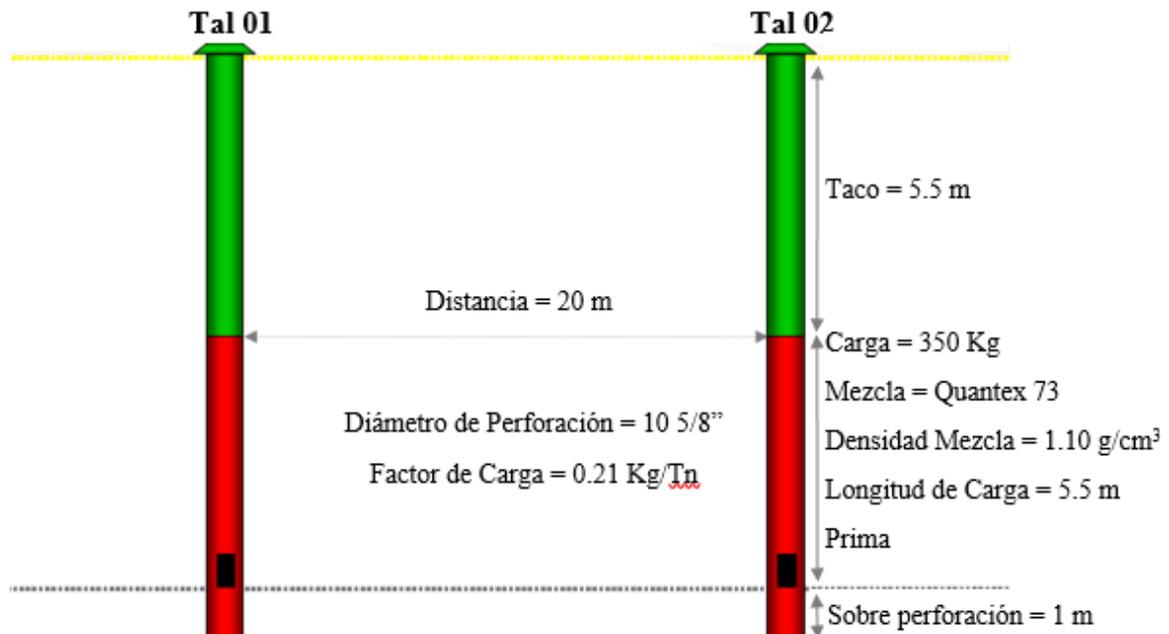


Figura 44: Diseño de perforación y voladura nivel 4090 de la prueba tipo cráter

Nivel 4080

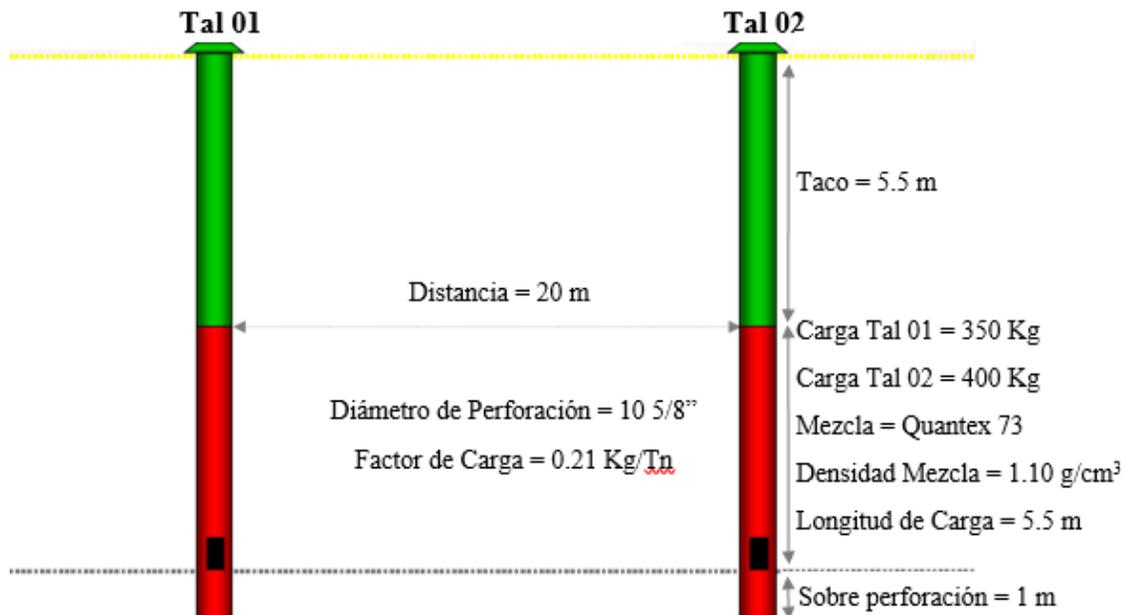


Figura 45: Diseño de perforación y voladura nivel 4080 de la prueba tipo cráter

Tabla 16: Tiempos de detonación entre taladros de la Prueba Tipo Cráter

Nivel	Identidad del Taladro	Tiempo de Detonación (ms)
4090	Tal 01	0
	Tal 02	200
4080	Tal 01	300
	Tal 02	500

3.4.2. Prueba de Iniciación de Fulminantes Pirotécnicos en Adición a los Electrónicos

El área de Voladura de Minera Yanacocha en sus diseños de carguío de taladros tiene como buena práctica usar siempre un fulminante pirotécnico adicional al electrónico(s) que según diseño se haya establecido, esto con la finalidad de que funcione como backup en caso el fulminante electrónico sufriese algún daño. Este fulminante pirotécnico se hace iniciar inmediatamente después que se haya conocido el daño en el fulminante electrónico con ayuda de cordón detonante y un fulminante electrónico que inicia a dicho cordón. Se suele siempre detonar primero el taladro que tiene backup y grabar el disparo con una cámara de alta para así asegurarnos de su detonación. Cabe indicar que este procedimiento se lleva a cabo siempre y cuando se detecte el daño en el detonador electrónico antes de realizar el disparo de la malla de voladura; sin embargo, existe ocasiones en que no se detecta el daño antes ya que podría darse durante el disparo, como el caso de los efectos de la presión dinámica, es por ello que con esta prueba se aseguraría la detonación de todos los fulminantes pirotécnicos adicionales (backup) en cada taladro y por ende el disparo de todos los taladros y la no existencia de eventos de tiros cortados.

Como se indicó en el párrafo anterior la presente prueba busca asegurar la detonación de todos los taladros de una malla de voladura a través de la iniciación de los fulminantes pirotécnicos (Nonel) ubicados dentro de los taladros, permitiendo así la ejecución de voladuras seguras en sectores complejos, como, por ejemplo, en lugares donde existe una alta probabilidad de corte o daño del cable descendente del fulminante electrónico y/o en sectores donde la presencia de agua es elevada donde el fulminante puede sufrir daños producto de la presión dinámica que se pueda generar.

3.4.2.1. Primera Prueba

Se desarrolló el 15 de noviembre del 2018 en el Tajo Quecher Nivel 4070, en una zona de alteración sílice granular.

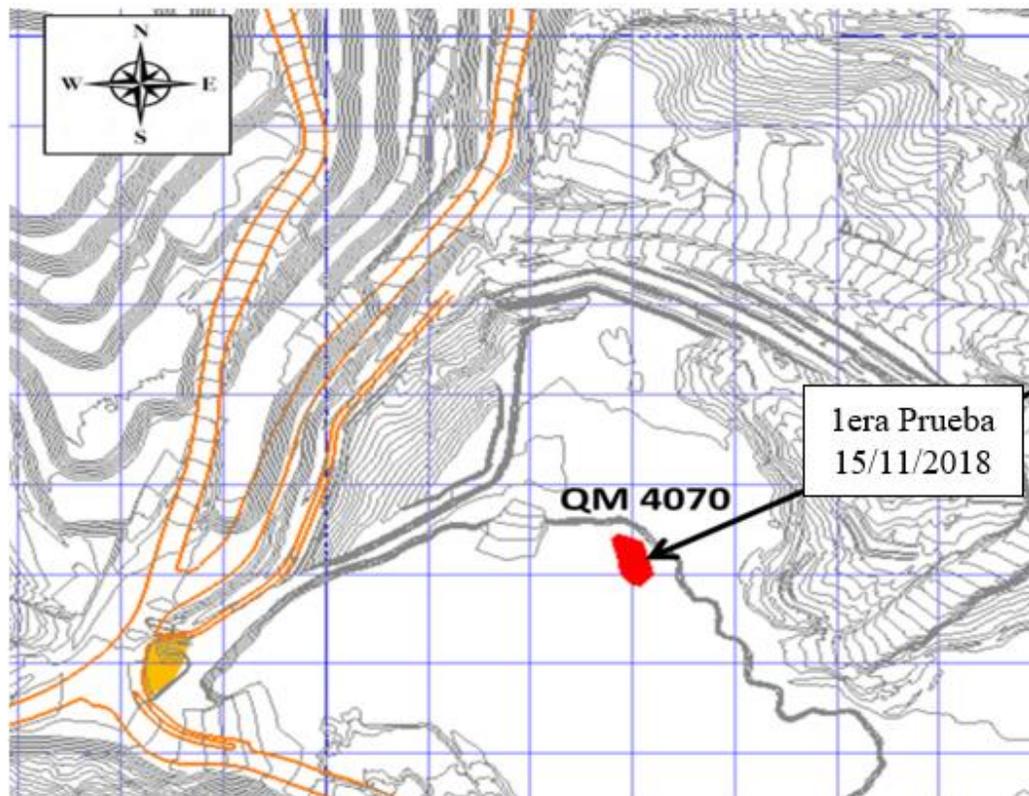


Figura 46: Ubicación de la Primera Prueba de Iniciación de Fulminantes Pirotécnicos en Adición a los Electrónicos

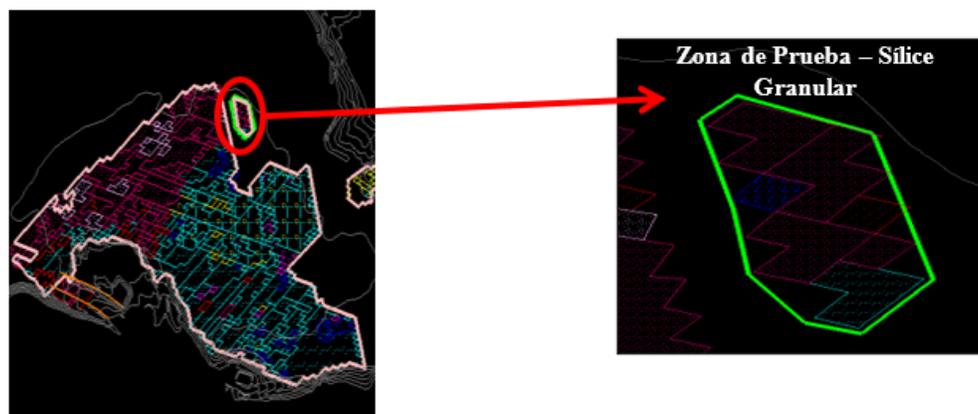


Figura 47: Geología de la zona de la primera prueba de Iniciación de Fulminantes Pirotécnicos en adición a los electrónicos.

El objetivo de esta prueba fue comprobar si el uso del cordón detonante como iniciador del Backup de los taladros elimina los eventos de tiros cortados por presión dinámica en un disparo de una malla de voladura, por lo cual en la ejecución de esta prueba se generó una condición que incrementa la probabilidad de tiros cortados por presión dinámica, la cual fue perforar dos taladros extras, es decir intermedios entre algunos taladros dentro una malla de producción con B x E de 8.0 x 9.0 y diámetro de perforación de 10 5/8”.

El diseño del carguío de taladros planteado por el área de voladura de Minera Yanacocha teniendo en cuenta el tipo de alteración y la presencia de agua del terreno fue el siguiente:

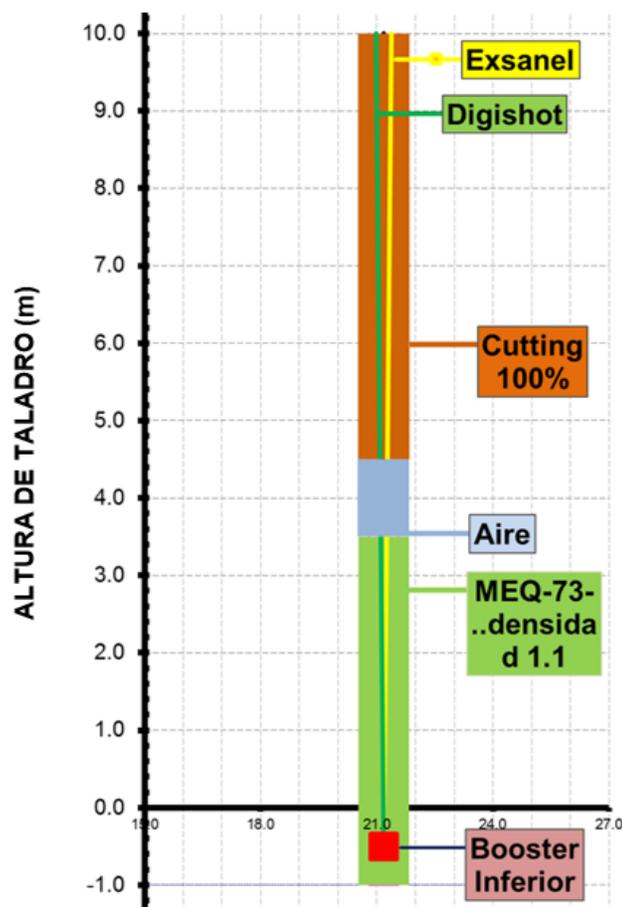


Figura 48: Diseño del carguío de taladros de la Primera Prueba

Tabla 17: Hoja de carguío de taladros en función de la longitud del taladro utilizada en la Primera Prueba.

Longitud Taladro (m)	Taco Final Cutting (m)	Carga Superior Final (m)	Carga Inferior Final (m)	Aire hacia el Taco (m)	Aire al fondo (m)	FC (Kg/Ton)	kg/tal	SD	Carga Inferior Inicial (m)	Taco Inicial Cutting (m)
9.5	4.5	0.0	5.0	0.0	0.0	0.226	314.10	1.06	4.1	5.4
10.0	5.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.226	314.10	1.15	4.1	5.9
10.5	5.5	0.0	5.0	0.0	0.0	0.226	314.10	1.24	4.1	6.4
11.0	6.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.226	314.10	1.33	4.1	6.9
11.5	6.0	0.0	5.0	0.5	0.0	0.226	314.10	1.33	4.1	7.4
12.0	6.0	0.0	5.0	1.0	0.0	0.226	314.10	1.33	4.1	7.9
12.5	6.0	0.0	5.0	0.5	1.0	0.226	314.10	1.33	4.1	7.4

Para la ejecución de esta prueba se perforaron, cargaron y detonaron 13 taladros considerando el siguiente procedimiento:

A) Primado de Fulminantes

Durante la etapa de primado, cada booster o prima contiene 02 tipos de detonadores: 1 detonador electrónico y 1 pirotécnico, como se muestra en la Figura 49. En ocasiones y dependiendo de las condiciones del terreno un taladro puede contener 02 booster o primas como se observa en la Figura 50.

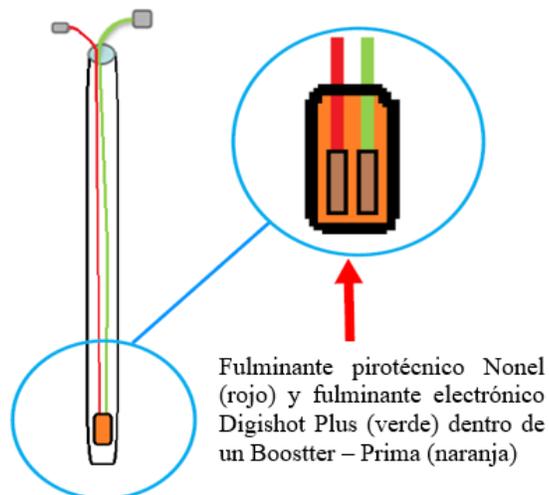


Figura 49: Primado de fulminantes con un booster

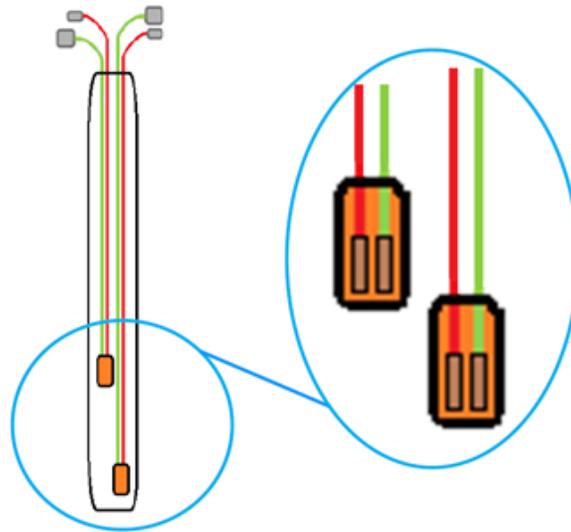


Figura 50: Primado de fulminantes con 02 booster

Para el caso de la prueba según el diseño de carguío de taladros el primado realizado fue como se indica en la Figura 49 un solo booster, un fulminante electrónico y uno pirotécnico.

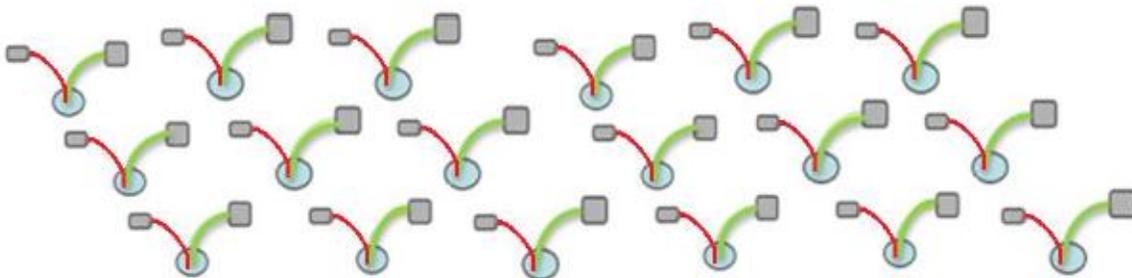


Figura 51: Primado completo de la malla de voladura

Finalizado el primado de toda la malla de voladura se procedió a cargar los taladros con mezcla explosiva Quantex73 con densidad final de 1.1g/cm^3 . A la par se realizó la asignación de cada fulminante electrónico de los taladros con ayuda del equipo Tagger, esto según la fila y posición del taladro dentro de la malla de voladura. Esta asignación nos permitirá identificar más adelante si es que hubiese alguna fuga la ubicación exacta del fulminante que presenta dicha fuga.

B) Amarre y Testeo de Fulminantes Electrónicos

Una vez cargado todos los taladros de la malla de voladura se realizó el amarre de todos los fulminantes electrónicos con el cable de superficie Digishot Plus, ver Figura 52. Finalizado esto se testeó todos los fulminantes electrónicos con el equipo tagger, con la finalidad de detectar la existencia de fuga en alguno de los fulminantes de la malla, ver Figura 53; se verificó así la no existencia de fuga en la ejecución de la prueba.

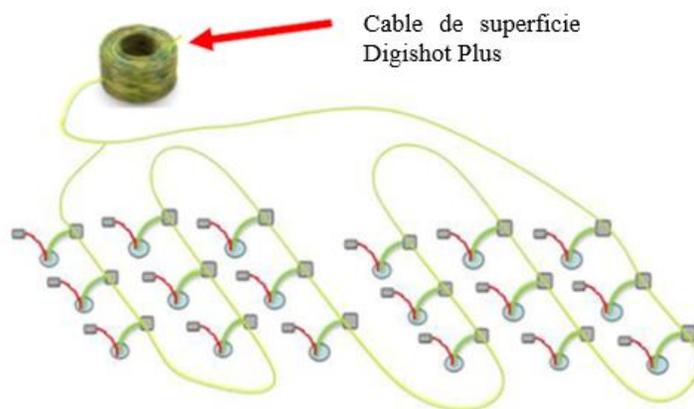


Figura 52: Amarre de fulminantes electrónicos

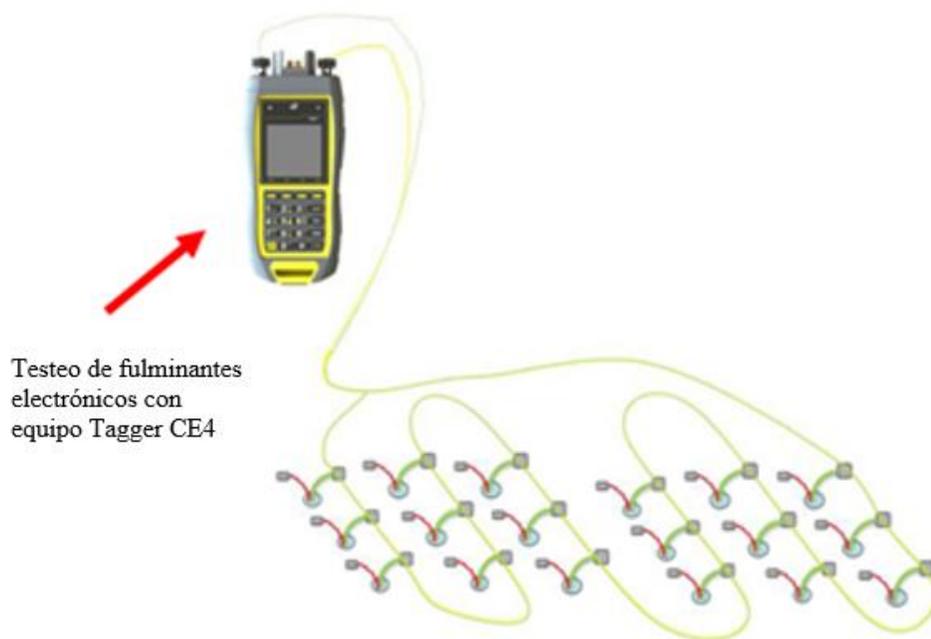


Figura 53: Testeo de detonadores electrónicos

C) Despliegue del Cordón Detonante

Una vez culminada la verificación de la no existencia de fuga en todo el proyecto a disparar, se procedió al despliegue del cordón detonante (azul) a lo largo de toda la malla de voladura, el mismo que dará inició a los fulminantes pirotécnicos utilizados como backup en cada taladro. Cabe mencionar que para el caso de la presente prueba se usó cordón detonante 5P.

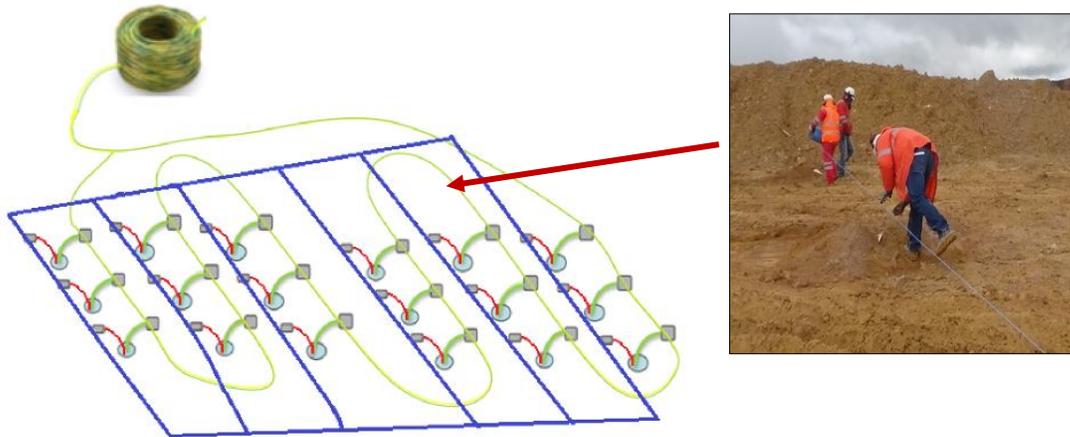


Figura 54: Despliegue del cordón detonante en la malla de voladura

D) Conexión de los Fulminantes Pirotécnicos al Cordón Detonante

Terminado el despliegue del cordón detonante en toda la malla de voladura se conectó los fulminantes pirotécnicos al cordón detonante, esto se realizó con ayuda de los conectores J-Hook de los fulminantes pirotécnicos tal como se aprecia en la Figura 55.

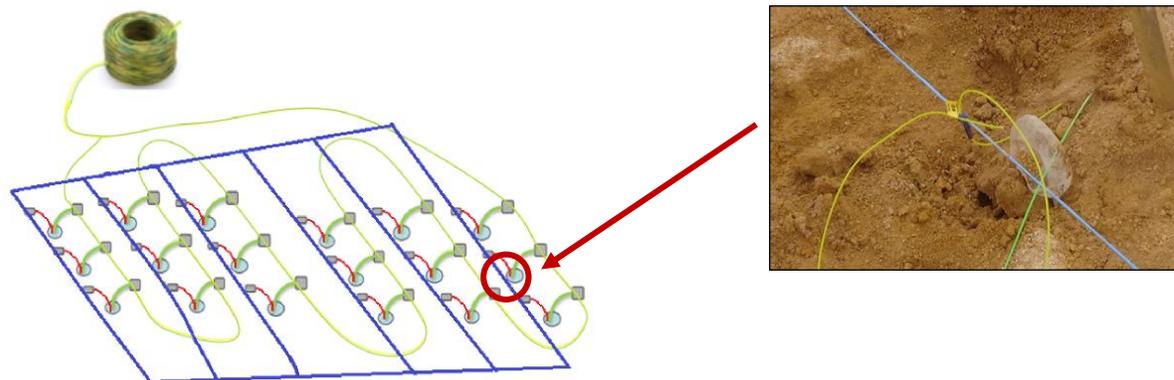


Figura 55: Conexión de los detonadores pirotécnicos al cordón detonante.

E) Conexión del Fulminante Electrónico Iniciador al Cordón Detonante

Una vez conectados todos los fulminantes pirotécnicos al cordón detonante, se buscó iniciar a éste para lo cual se hizo uso de un fulminante electrónico en superficie, cuya correcta instalación para dar inicio al cordón se aprecia en la Figura 56.

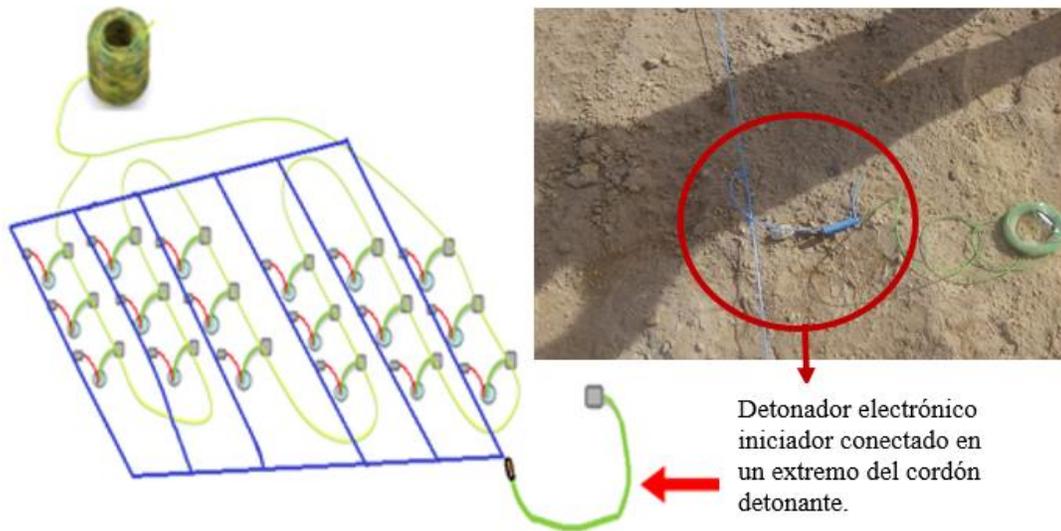


Figura 56: Conexión del fulminante electrónico iniciador al cordón detonante.

F) Etiquetado y Conexión del Fulminante Electrónico Iniciador al Cable de Superficie

Conectado el fulminante electrónico iniciador al cordón detonante, se le asigna una posición con el tagger para finalmente conectarlo al cable de superficie y brindarle su tiempo de detonación correspondiente.

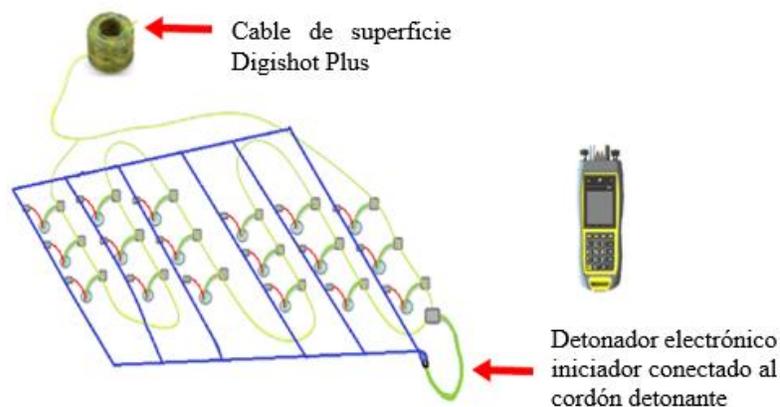


Figura 57: Etiquetado y conexión del detonador electrónico iniciador al cable de superficie

G) Secuencia y Tiempos de la Voladura

Culminado el amarre y testeado de todos los fulminantes electrónicos de la malla de voladura se procedió al diseño de la secuencia y tiempos de salida de cada taladro teniendo como regla principal que: **“Todos los fulminantes electrónicos de la malla de voladura deberían detonar antes que el primer fulminante pirotécnico”**.

Cumpliendo la regla antes mencionada y considerando que el tiempo de retardo de los fulminantes pirotécnicos utilizados en la presente prueba fue de 600 ms y que todo fulminante pirotécnico posee un grado de dispersión positiva que va de los 600 – 620 ms y negativa que oscila entre los 580 a 600 ms; se determinó finalmente que el tiempo de salida del último detonador electrónico debería ser como máximo a los 580 ms más el tiempo que se le asigne al fulminante iniciador que para nuestro caso se le asignó 600 ms, es decir 1180 ms.

Establecido ya el tiempo de detonación óptimo del último fulminante electrónico se procedió a determinar los tiempos de salida entre taladros: 2, 3 y 5 ms y entre filas: 104 ms de la malla de voladura; esto según el diseño de la secuencia de salida de los taladros que para nuestro caso se optó por una secuencia de salida en “V” debido principalmente a las condiciones del terreno en campo y a los requerimientos de la orientación del desplazamiento del material volado por parte del área de carguío.

Tabla 18: Secuencia y tiempos de detonación de la malla de voladura – Primera Prueba

Orden de Detonación	ID de Taladro	Tiempo de Salida Pirotécnico (ms)	Tiempo de Salida Electrónico (ms)
1	119	1180	800
2	118	1180	803
3	110	1180	909
4	109	1180	912
5	120	1180	914
6	102	1180	1018
7	EXTRA 1	1180	1021
8	111	1180	1023
9	101	1180	1024

Tabla 19: Tiempos de Detonación asignados en la Primera Prueba

Fulminante Iniciador (ms)	Fulminantes Pirotécnicos (ms)	Primer Fulminante Electrónico (ms)	Último Fulminante Electrónico (ms)
600	1180	800	1133

De la Figura 58 y las Tablas 18 y 19 se puede observar que se cumplió con la regla principal antes mencionada puesto que el último fulminante electrónico detona en el 1133 ms, que es menor al tiempo de detonación de los fulminantes pirotécnicos que es 1180ms (580 ms del detonador pirotécnico + 600 ms del detonador electrónico iniciador del cordón detonante).

3.4.2.2. Segunda Prueba

Se ejecutó el 01 de diciembre del 2018 en el nivel 4070 del Tajo Quecher de Minera Yanacocha, en un terreno formado por una alteración argílica según lo indicado por el área de Geología.

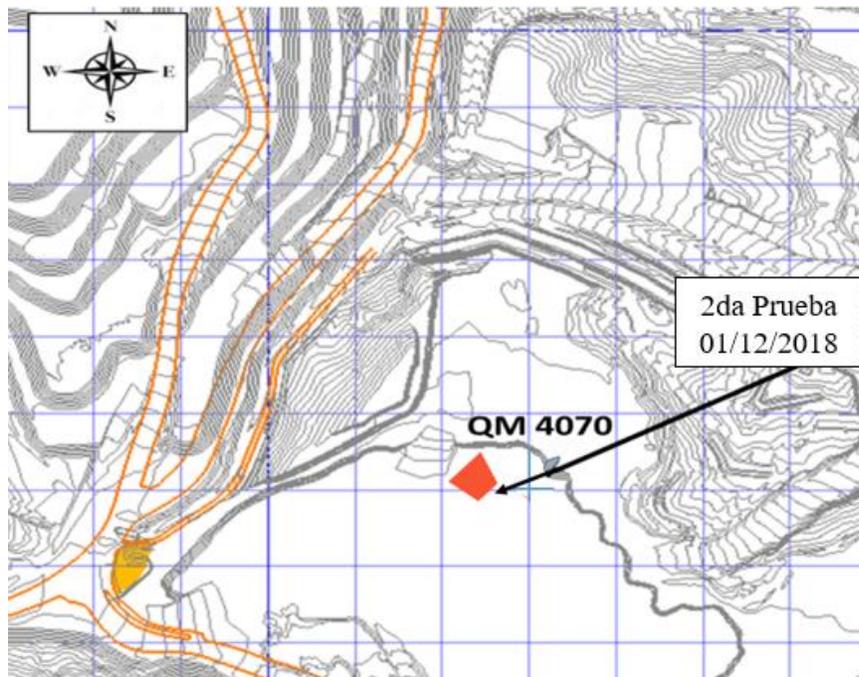


Figura 59: Ubicación de la Segunda Prueba de Iniciación de Fulminantes Pirotécnicos en Adición a los Electrónicos

La presente prueba se desarrolló en una malla de voladura de BxE de 8x9 metros con un diámetro de perforación de 10 5/8” y un diseño de carga como se detalla en la Figura 60.

En esta prueba se detonó 17 taladros sin crear condiciones que aumenten la probabilidad de daño a los fulminantes electrónicos por presión dinámica; es decir, no se perforaron taladros extras con distancia menores a la distancia mínima que debe existir entre taladros para Minera Yanacocha, sino más bien se desarrolló en una malla de voladura que cumplió con los estándares normales de perforación de Minera Yanacocha.

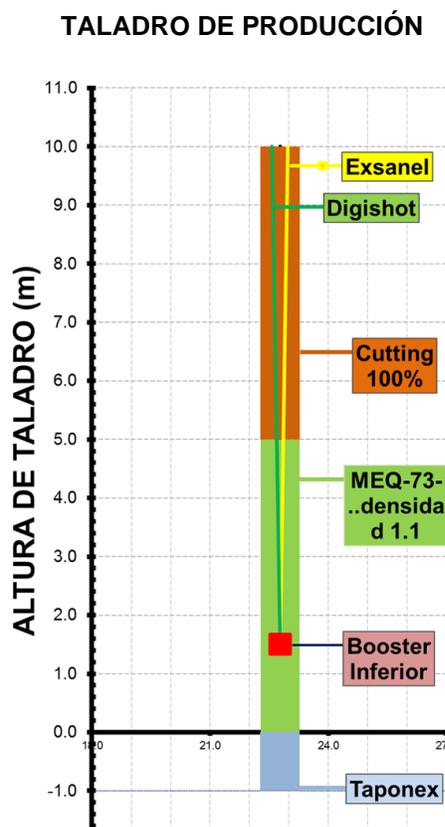


Figura 60: Diseño del carguío de taladros de la Segunda Prueba

El procedimiento que se llevó a cabo para esta prueba es similar al desarrollado en la primera prueba desde el primado de fulminantes hasta el etiquetado y conexión del fulminante electrónico iniciador al cable de superficie; ya en lo que respecta la secuencia y tiempos de salida de la voladura se desarrolló de la manera siguiente:

Se determinó que el tiempo de detonación del último fulminante electrónico debería ser menor que 1180 ms, que es el resultado del tiempo que se le asignó al fulminante iniciador del cordón detonante (600 ms) más el tiempo de retardo de los fulminantes pirotécnicos que para este caso fue también de 580 ms (incluida su grado de dispersión negativa). Ya con ello se procedió a

diseñar la secuencia de salida de la malla de voladura en “V” utilizando 3 ms entre taladros y 104 ms entre filas, esto debido principalmente a las condiciones del terreno en campo.

Tabla 20: Hoja de carguío de taladros en función de la longitud del taladro utilizada en la Segunda Prueba.

Longitud Taladro (m)	Taco Final Cutting (m)	Carga Superior Final (m)	Carga Inferior Final (m)	Aire hacia el Taco (m)	Aire al fondo (m)	FC (Kg/Ton)	kg/tal	SD	Carga Inferior Inicial (m)	Taco Inicial Cutting (m)
9.5	4.5	0.0	5.0	0.0	0.0	0.210	314.10	1.06	4.1	5.4
10.0	5.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.210	314.10	1.15	4.1	5.9
10.5	5.5	0.0	5.0	0.0	0.0	0.210	314.10	1.24	4.1	6.4
11.0	6.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.210	314.10	1.33	4.1	6.9
11.5	5.5	0.0	5.0	0.0	1.0	0.210	314.10	1.24	4.1	6.4
12.0	6.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.210	314.10	1.33	4.1	6.9

Tabla 21: Secuencia de salida de la malla de voladura – Segunda Prueba

Orden de Detonación	ID de Taladro	Tiempo de Salida Pirotécnico (ms)	Tiempo de Salida Electrónico (ms)
1	525	1180	800
2	515	1180	909
3	516	1180	912
4	524	1180	914
5	505	1180	1018
6	506	1180	1021
7	514	1180	1023
8	507	1180	1024
9	523	1180	1026
10	495	1180	1127
11	496	1180	1130
12	504	1180	1132
13	497	1180	1133
14	513	1180	1135
15	498	1180	1136
16	522	1180	1138

Orden de Detonación	ID de Taladro	Tiempo de Salida Pirotécnico (ms)	Tiempo de Salida Electrónico (ms)
17	494	1180	1141

Tabla 22: Tiempos de Detonación asignados en la Segunda Prueba

Fulminante Iniciador (ms)	Fulminantes Pirotécnicos (ms)	Primer Fulminante Electrónico (ms)	Último Fulminante Electrónico (ms)
600	1180	800	1141

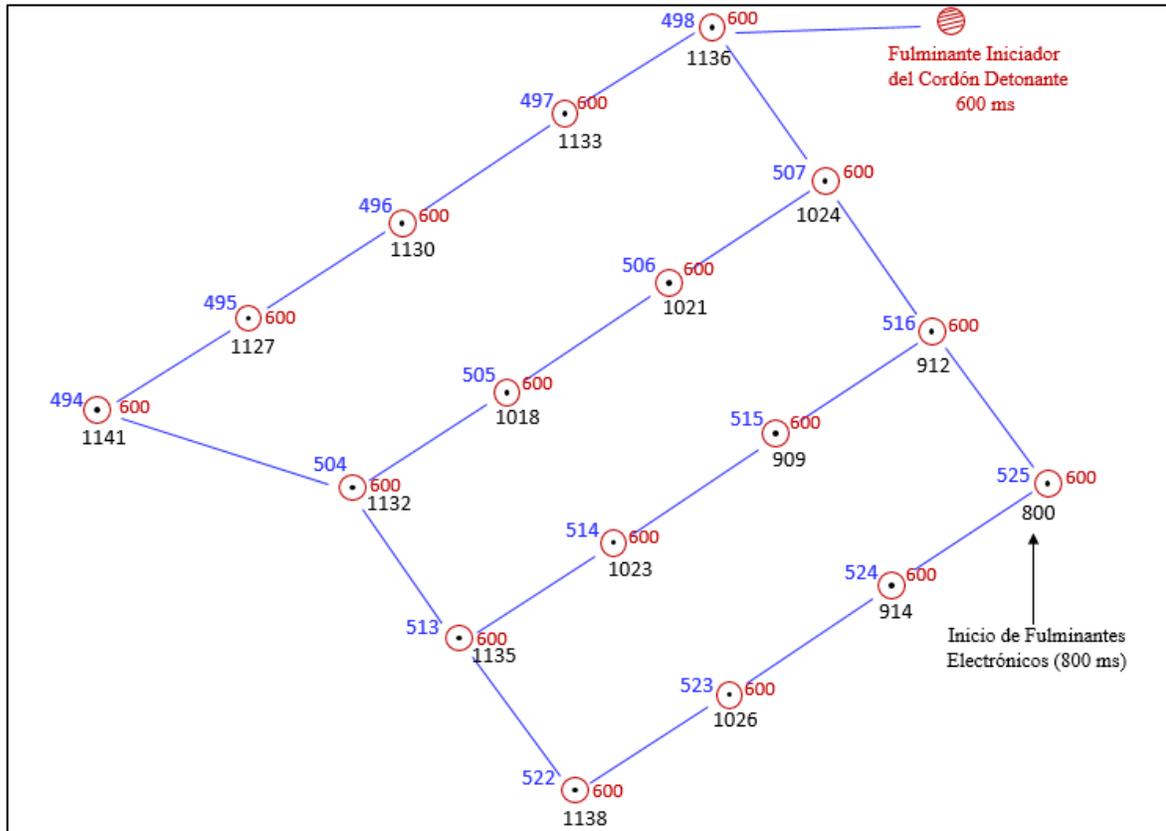


Figura 61: Secuencia de Salida de Fulminantes Electrónicos y Pirotécnicos – Segunda Prueba

De la Figura 61 y las Tablas 21 y 22 se puede observar que se cumplió con la regla principal ya que el último fulminante electrónico detona en el 1141 ms, que es menor al tiempo de detonación de los fulminantes pirotécnicos que es 1180ms.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Prueba Tipo Cráter

El objetivo de esta prueba fue determinar en forma práctica la distancia mínima posible entre taladros y el factor de carga óptimo para las alteraciones más predominantes del Tajo Quecher de Minera Yanacocha, mediante la medición del efecto de daño causado por la detonación de una carga confinada alrededor de un taladro. Para tal efecto, luego de la detonación de cada carga, en los niveles correspondientes se realizó el levantamiento topográfico de los perfiles de esponjamiento y rotura generados por cada taladro, para que con esta información determinar la distancia mínima entre taladros por tipo de alteración; y además junto con el análisis de distribución energética realizada con el software JK-Simblast, calcular finalmente los requerimientos energéticos asociados a cada tipo de alteración.

4.1.1. Análisis de la Prueba Tipo Cráter Nivel 4090 – Sílice Granular

En este nivel tras la voladura se pudo observar que el taladro dos (Tal 02) no logró alcanzar el esponjamiento adecuado de su carga a diferencia del taladro uno (Tal 01) como se observa en la Figura 62; esto puede explicarse debido a una pérdida del confinamiento del explosivo por deformación del taladro, por la detonación de la primera carga, 200 ms antes. Impactando directamente al desarrollo normal de su detonación y por ende al performance del explosivo. Durante la voladura se apreció claramente la eyección del taco del taladro uno precisamente porque su detonación fue sin cara libre.





Figura 62: Resultados en campo de la prueba Tipo Cráter Nivel 4090 del Tajo Quecher

A partir del levantamiento topográfico del perfil del esponjamiento y rotura alcanzado por el taladro uno (Tal 01), ver Figura 63, se determina que el efecto de rotura/daño del cráter formado sobre el macizo rocoso, influenciado por la eyección del taco del taladro uno, abarca alrededor de los 18 metros de diámetro, es decir el radio de influencia del taladro (distancia mínima entre taladros) sería 9 metros.



Figura 63: Perfil de esponjamiento y rotura del Taladro 1 – Prueba Tipo Cráter Nivel 4090

En la Figura 64 se observa la distribución de energía del explosivo para el taladro uno en el software JK Simblast; donde se aprecia que una buena distribución de energía se alcanza para valores de 0.15Kg/Tn a 0.2 Kg/Tn en la alteración sílice granular.

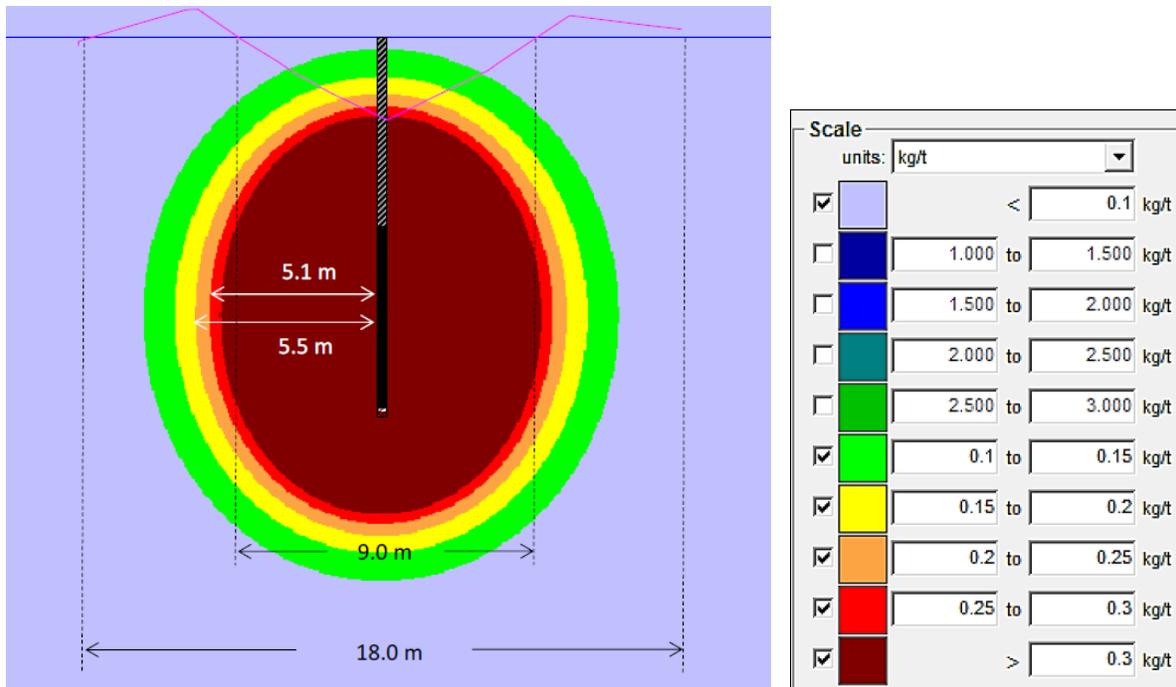


Figura 64: Análisis de la distribución de energía generada por la carga del Taladro 1 en software JK – Simblast Prueba Tipo Cráter Nivel 4080

4.1.2. Análisis de la Prueba Tipo Cráter Nivel 4080 – Argílico

Posterior a la voladura de los taladros del nivel 4080; se registró que el taladro uno (Tal 01) logró un esponjamiento adecuado, no produciéndose eyección en su taco a pesar de no contar con cara libre; esto se explica principalmente a que el tipo de alteración argílica es menos competente que la sílice granular. En cuanto al taladro dos (Tal 02) este produjo un esponjamiento mínimo; como se puede apreciar en la Figura 65; a pesar de que se le agregó 50 Kg más de mezcla explosiva; esto puede ser posible debido a agrietamientos en el interior del taladro, lo cual provocó la pérdida de explosivo durante el carguío.



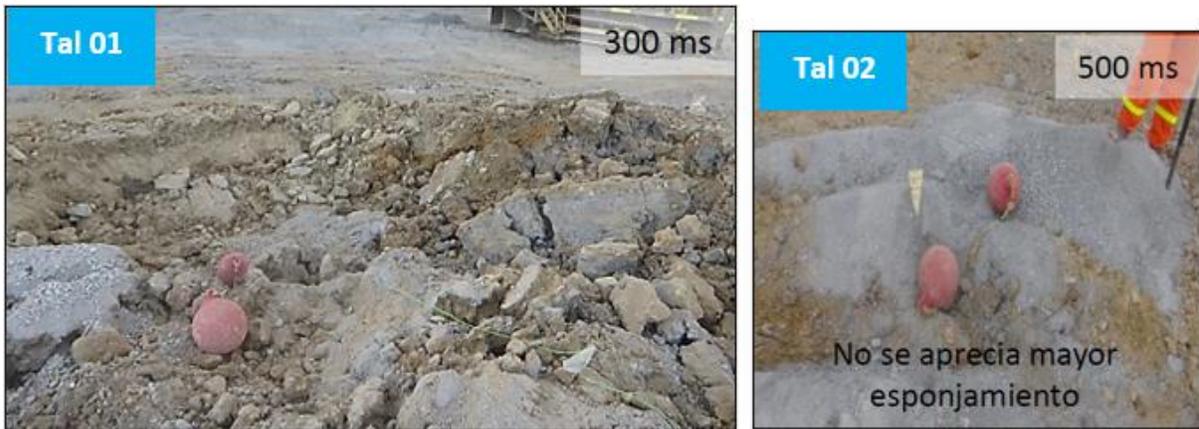


Figura 65: Resultados en campo de la prueba Tipo Cráter Nivel 4080 del Tajo Quecher

Ya realizado el levantamiento topográfico del perfil del esponjamiento y rotura alcanzado por el taladro uno (Tal 1), ver Figura 66, se determinó que el efecto de rotura/daño del cráter formado sobre el macizo rocoso, sin eyección del taco, abarca alrededor de los 13.8 m de diámetro para el taladro uno, es decir el radio de influencia del taladro (distancia mínima entre taladros) sería 6.9 metros.

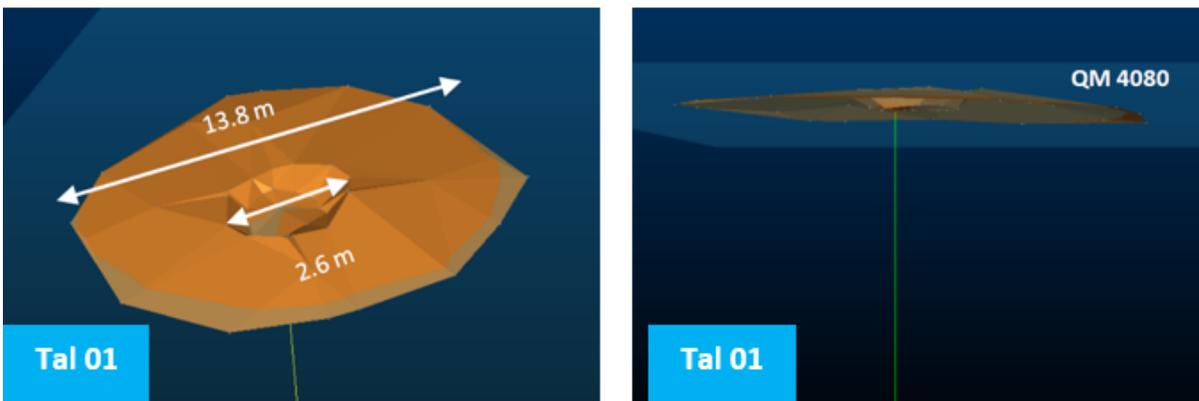


Figura 66: Perfil de esponjamiento y rotura del Taladro 1 – Prueba Tipo Cráter Nivel 4090

En la Figura 67 se observa la distribución de energía del explosivo para el taladro uno en el software JK Simblast; donde se aprecia que una buena distribución de energía se alcanza para valores de 0.15Kg/Tn a 0.2 Kg/Tn en la alteración argílica.

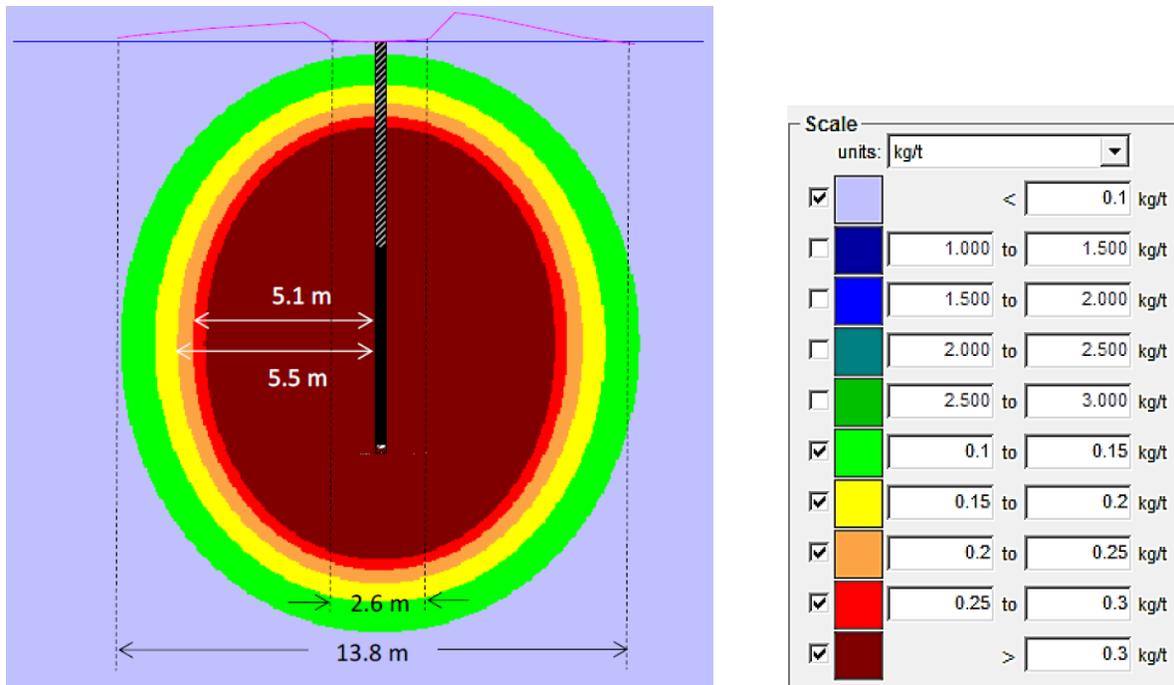


Figura 67: Análisis de la distribución de energía generada por la carga del Taladro 1 en software JK – Simblast Prueba Tipo Cráter Nivel 4080

4.2. Prueba de Iniciación de Fulminantes Pirotécnicos en Adición a los Electrónicos

Prueba que tuvo como objetivo comprobar la eficacia del uso del cordón detonante para iniciar a los fulminantes pirotécnicos utilizados como back up en un taladro dentro de una malla de voladura; por lo que se realizó dos pruebas cuyo análisis de resultados se llevó a cabo a partir de la observación en campo del resultado de ambas voladuras.

4.2.1. Análisis de la Primera Prueba

El resultado obtenido en campo de esta prueba muestra un adecuado esponjamiento de aproximadamente de 2.5 metros generado por la malla volada, tal como puede apreciarse en la Foto 1.

Además, con ayuda del área de topografía se pudo replantear la ubicación de los taladros extras volados (ver Foto2); para así corroborar la detonación de los mismos y el correcto funcionamiento del uso del cordón detonante para la detonación de fulminantes pirotécnicos para la no existencia de algún tiro cortado por presión dinámica, teniendo como resultado en campo un esponjamiento en ambos puntos replanteados lo que indica la posible detonación de

los mismos, sin embargo, esto se podrá confirmar totalmente cuando la pala mine esta zona y no se haya encontrado ningún accesorio de voladura, por lo que se delimitó esta área por seguridad.



Foto 2: Resultado de la malla volada – Primera Prueba



Foto 3: Posición de los taladros extras replanteados por topografía post voladura

Cabe mencionar que, al momento de minar la pala esta zona, no se reportó ningún hallazgo de accesorios de voladura, lo cual comprueba la eficiencia del uso de cordón detonante para iniciar los fulminantes pirotécnicos de una malla de voladura y evitar eventos de tiros cortados por presión dinámica.

4.2.1. Análisis de la Segunda Prueba

El resultado de la detonación de la malla de voladura de esta prueba nos dio un esponjamiento de 1.8 metros aproximadamente, ver Foto 4. Así mismo no se reportó ningún hallazgo de accesorios de voladura por parte del área de carguío y acarreo, lo que finalmente nos indicó la detonación efectiva de todos los fulminantes pirotécnicos usando cordón detonante y con ello la no existencia de eventos de tiros cortados.

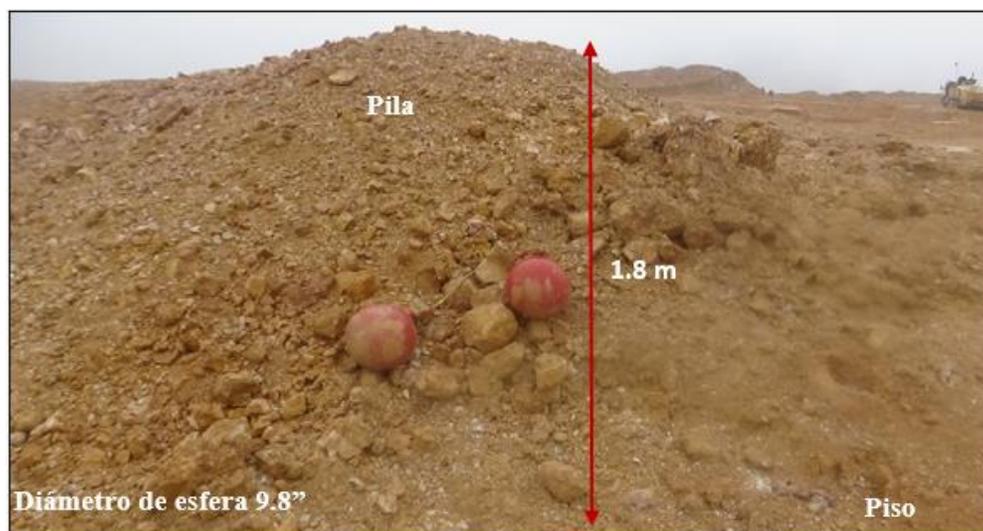


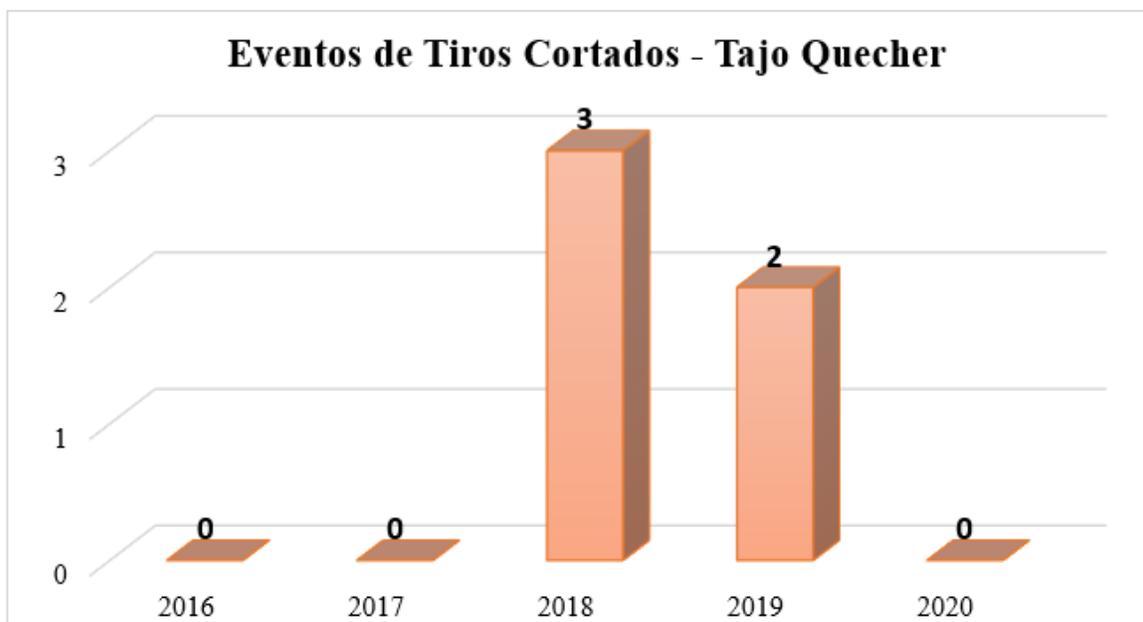
Foto 4: Resultado de la malla volada – Segunda Prueba

La eficacia de la ejecución de ambas pruebas se ve reflejada finalmente en las estadísticas de eventos de tiros cortados en los últimos 4 años en Minera Yanacocha tal como se muestra en los Gráficos 1 y 2, donde se observa claramente que, a partir del año 2019 en adelante, año en el que se inició esta práctica de usar cordón detonante para iniciar a los fulminantes pirotécnicos con la finalidad de evitar eventos de tiros cortados por presión dinámica, existe una disminución casi total de dichos eventos y con ello la ejecución de voladuras más seguras para la operación; además de una disminución en los costos de voladura ya que la desactivación de un tiro cortado conlleva un costo adicional que deberá ser asumido por el área de voladura.

El costo generado por evento de un tiro cortado en un taladro de producción en minera Yanacocha asciende a 12,428.88 dólares, monto que se determina según como se detalla en la Tabla 23.



Gráfica 1: Total de hallazgos de tiros cortados en los últimos 4 años en Minera Yanacocha.



Gráfica 2: Total de hallazgos de tiros cortados en el Tajo Quecher.

Tabla 23: Determinación del costo que genera el evento de un tiro cortado para el tajo Quecher

Costos por Tiros Cortados				
Costo por Taladro	Unidad	P.U \$	Cantidad	Costo Total
Emulsión	Kg	0.46	219.87	101.26
Nitrato de Amonio	Kg	0.43	94.23	40.10
Fulminante Pirotécnico	Und	2.15	1	2.15
Fulminante Electrónico	Und	19.95	1	19.95
Cable de Conexión	m	0.19	0.5	0.09
Boaster 1lb	Und	3.74	1	3.74
Taponex	Und	5.13	1	5.13
			Total	172.43
Costo por Desactivación				2.5
Desactivación (Hr)				
Mano de Obra	Unidad	Costo	Costo Total	
Supervisor	\$/Hr	13.61	34.02	
Operario de voladura	\$/Hr	1.79	4.47	
Ayudante	\$/Hr	1.79	4.47	
			Total	42.95
Equipo	Modelo	Hr	\$/Hr	Costo Total
Excavadora	CAT 336	3.5	106	371.00
Costo Total en Voladura				215.38
Costo en Perforación				
Cantidad de TQ	Unidad	Costo	Costo Total	
1	\$/Taladro perforado	82.5	82.5	
			Total	82.5
Costo en Carguío				
Equipo	Modelo	Hr	\$/Hr	Costo Total
Pala	Ex 5500	3.5	3,360	11,760.00
			Total	11,760.00
Costo Total por Tiro Cortado (\$)				12,428.88

4.3. Plan de Acción para Evitar Eventos de Tiros Cortados por Presión Dinámica

Para la ejecución de un plan de acción para evitar eventos de tiros cortados producto de la presión dinámica en el tajo en estudio, ver Tabla 24, es necesario determinar qué condiciones

en campo incrementan la probabilidad de ocurrencia de estos eventos y determinar a estas áreas como zonas críticas del Tajo.

Se considera una zona crítica si esta presenta un macizo rocoso de moderadamente a altamente fracturado y con moderada a alta presencia de agua.

Tabla 24: Controles operacionales para evitar eventos de tiros cortados por presión dinámica en el tajo Quecher de Minera Yanacocha.

Responsable	Acciones
<i>Supervisión</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Se debe realizar una supervisión focalizada, con presencia en campo de las áreas responsables de la caracterización del macizo rocoso, diseño de voladura e implementación en campo. • El personal de ingeniería de mina encargado del diseño de mallas de perforación, debe recibir una re-inducción respecto a mejores prácticas de diseño con enfoque de voladura, así como las restricciones de perforación en la zona crítica.
<i>Perforación</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Se establece como nuevo valor de distancia crítica 6m entre taladros cercanos, a la hora de tomar la decisión de distribuir el factor de carga entre ellos o dispararlos con el mismo tiempo de retardo como medida de control para evitar eventos de presión dinámica.
<i>Carguío</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Se reducirá el factor de carga en un 20% para el caso de los taladros correspondientes a límites del proyecto. Del mismo modo para el caso de taladros que presenten una longitud mayor o igual a 4m de agua. • El carguío de explosivo por taladro será completado teniendo como referencia los kilos indicados en el diseño y mas no de acuerdo a la subida del explosivo y/o cumplimiento del taco de diseño. • Se realizará la identificación de primas mediante etiquetado.

Responsable	Acciones
<i>Secuenciamiento y Post Voladura</i>	<ul style="list-style-type: none"> • La secuencia de iniciación se diseñará siempre hacia la cara libre, se debe evitar en lo posible el confinamiento de cargas explosivas, sobre todo para el caso de los taladros de buffer. • De preferencia se implementará la secuencia variando los tiempos de retardo; entre taladros en 3 ms y los tiempos entre filas en forma incremental entre 100ms y 300ms.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Con la ejecución de la prueba tipo cráter finalmente se determinó que la distancia mínima entre taladros para la alteración argílica es de 7 metros, mientras que para sílice granular es de 9 metros. Además de que el factor de carga óptimo tanto para la alteración argílica como la sílice granular oscila entre 0.15 - 0.20 Kg/Tn.

Las pruebas de iniciación de los fulminantes pirotécnicos en adición a los electrónicos comprueban la eficacia del uso de cordón detonante para iniciar los fulminantes pirotécnicos utilizados como back up en un taladro y así eliminar eventos de tiros cortados que puedan ocurrir en zonas críticas.

Desde el año 2019, no se ha registrado eventos de tiros cortados en el tajo Quecher, lo cual indica que se tiene voladuras más seguras y se ha eliminado el costo adicional que genera la desactivación de un tiro cortado, que para un taladro de producción es de 12,429 dólares.

5.2. Recomendaciones

Con los resultados de daño medidos a partir de la prueba tipo cráter, se recomienda a la empresa minera Yanacocha validar el potencial de ampliación de malla en el tajo Quecher para las alteraciones argílico y sílice granular, con mayor opción para el caso de sílice granular.

Debido al funcionamiento óptimo del uso de cordón detonante para iniciar fulminantes pirotécnicos en zonas críticas del tajo Quecher se recomienda a minera Yanacocha hacer de su uso una práctica continua en dichas zonas para así evitar eventos de tiros cortados por presión dinámica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bernaola, Castilla, & Herrera. (2013). Perforación y Voladura de Rocas en Minería. Madrid.
- Bickford, D. (2015). Estimación de presiones dinámicas inducidas por voladura para definir condiciones críticas para los detonadores electrónicos Daveytronic - Tajo Tapado Oeste.
- Chilón, & Aguilar. (2017). Estimación de presiones dinámicas inducidas por voladura para definir condiciones críticas para los detonadores electrónicos Daveytronic en Tajo la Quinua Yanacocha. Cajamarca.
- Colombia, M. d.-R. (2003). Glosario Técnico Minero. Bogotá D.C.
- Dyno Nobel. (2017). Información Técnica Digishot Plus.4G. DYNO.
- Dyno Nobel. (2018). Uso de cordón detonante para iniciación de tronadura sajo abierto.
- Enaex S.A. (2014). Manual de Tronadura Enaex S.A. Gerencia Técnica Enaex S.A.
- Exsa. (2012). Accesorios de Voladura. Accesorios de voladura como producto terminado, 5.
- Exsa. (2018). Prueba de Cráter. Cajamarca.
- Exsa. (2019). Manual Práctico de Voladura EXSA.
- Gabriel, B. C. (2017). La distancia mínima entre taladros para evitar los daños de los detonadores electrónicos por presión dinámica, en mina Lagunas Norte . Trujillo.
- Giltner, S., & Garcia, A. (2016). Mediciones de Presión Dinámica de Voladuras en Mina Yanacocha.
- Lara, A. (2012). Perforación y Voladura de Rocas I.
- Leiva, & Pallomari. (2015). El problema de los tiros quedados en minas a cielo abierto. Manual Enaex, 5.
- Leiva, A. (2015, 12 11). SlideShare. Retrieved from <https://es.slideshare.net/camiloeroman/3-clasificacin-de-los-explosivos>
- Lownds, M. (2000). Between-hole shock pressures in Blasting for various hole.
- Minera Yanacocha . (2006). Estudio de Impacto Ambiental Yanacocha Oeste. MWH PERÚ S.A.
- Oblitas, M. (2016). Alteración Hidrotermal Asociado con el Depósito Epitermal de Au: "Quecher Main", Cajamarca, Perú: Mineralogía, Geoquímica e Implicancias de Exploración. Minera Yanacocha S.R.L., Cajamarca.
- Romero, R. (2016, Noviembre 01). Voladura de Rocas. Retrieved from <http://royer92voladura.blogspot.com/2016/11/teoria-de-voladura-fragmentacion-de-la.html>
- Varas Leiva, C., & Berger Pallomari, E. (2015). El problema de los tiros quedados en minas a cielo abierto. Manual Enaex, 5.

ANEXOS

ANEXO 1: Autorización para elaborar tesis profesional por parte de Minera Yanacocha SRL.

ANEXO 2: Plano de secuencia de salida de la malla de voladura – Primera prueba.

ANEXO 3: Plano de alivio de la malla de voladura – Primera prueba.

ANEXO 4: Plano de secuencia de salida de la malla de voladura – Segunda prueba.

ANEXO 5: Plano de alivio de la malla de voladura – Segunda prueba.

ANEXO 6: Resumen de datos históricos de eventos de tiros cortados en Minera Yanacocha.



Cajamarca, 7 de Diciembre del 2020.

Ing. Marco Hoyos Saucedo.
Director de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería de Minas - Universidad Nacional de Cajamarca.
Presente. –

De nuestra consideración:

Sirva la presente para saludarlo y manifestarle nuestro agradecimiento a nombre de Minera Yanacocha por habernos considerado como una opción para el desarrollo y crecimiento profesional de sus estudiantes.

Respecto a la solicitud, recibimos frecuentemente formatos de su representada referidos al otorgamiento de autorización para el uso de información de Minera Yanacocha en la elaboración de temas de tesis en curso ante ustedes, en tal sentido queremos aprovechar la oportunidad para precisarles que en cualesquiera de tales casos, debido a su carácter privilegiado o confidencial, *autorizamos el uso de la información para fines académicos*, debiéndose guardar la reserva correspondiente, a salvo del acto público de sustentación. En igual sentido, desde ya hacemos notar que la publicación o divulgación por cualquier medio de la tesis, en tanto maneja información que nos es privativa, requerirá el consentimiento escrito y expreso de Minera Yanacocha S.R.L. para lo cual el/la tesista deberá suscribir con nuestra empresa el compromiso correspondiente conforme a nuestros formatos.

Asimismo, quisiéramos confirmar que mi representada, ha decidido aceptar el desarrollo del tema de tesis "ANÁLISIS DE LOS PARAMETROS OPERATIVOS DE LA VOLADURA PARA EVITAR TIROS CORTADOS POR PRESIÓN DINÁMICA EN EL TAJO QUECHER DE MINERA YANACOCCHA S.R.L." en el área de Mina, elaborada por su estudiante, Bachiller de la carrera de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional de Cajamarca:

- Jhenifer Jhoana Vásquez Zelada – DNI N° 72763412.

La referida aceptación se ha formulado en el marco de lo señalado precedentemente con las limitaciones expresadas.

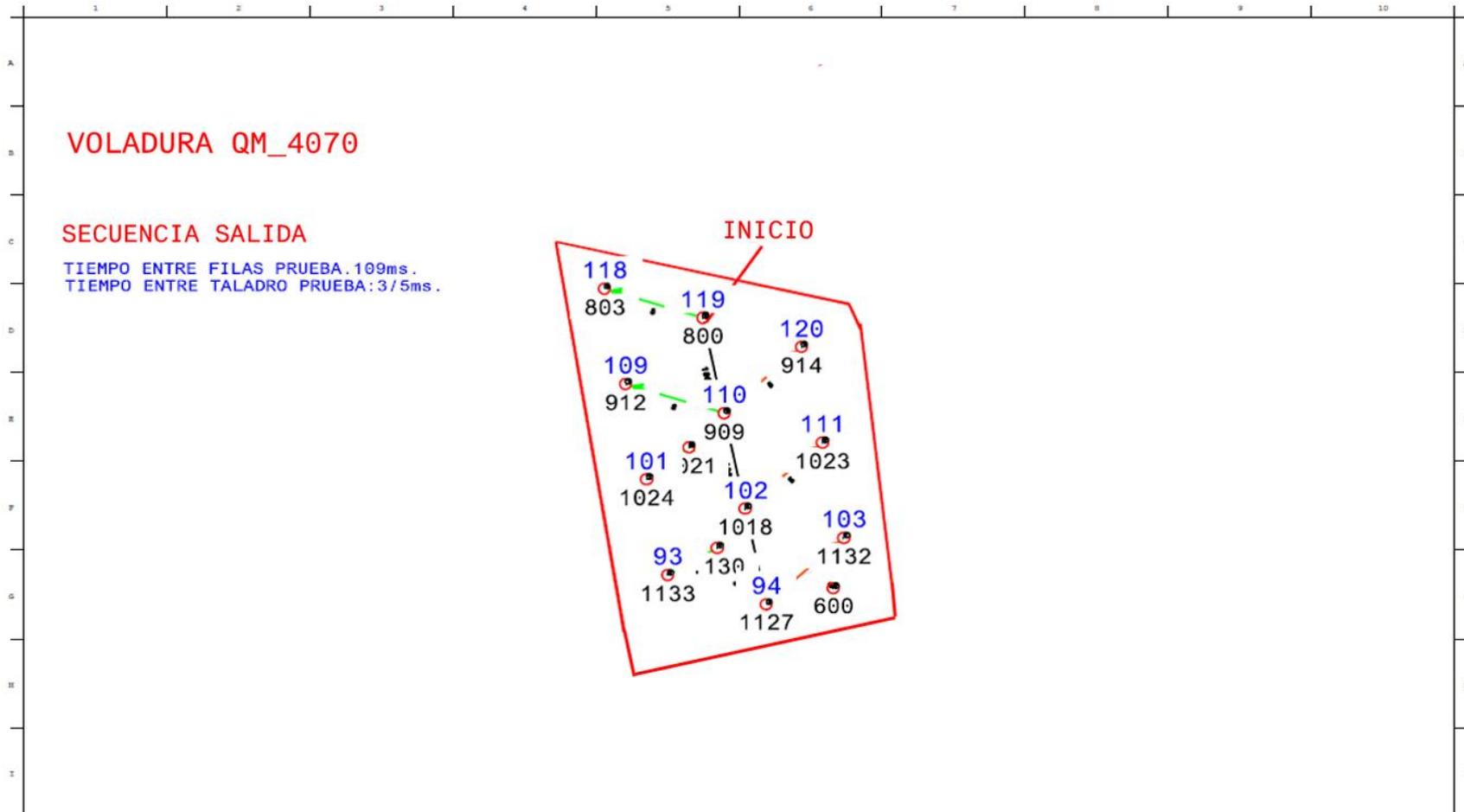
Igualmente debemos expresarle que, con fines de uniformizar la gestión de las referidas autorizaciones, estas deberán ser solicitadas ante nuestra Área de Políticas Públicas y Relaciones Gubernamentales, para un adecuado control de estas, mediante una acreditación de su representada.

Finalmente queremos reiterarle nuestro agradecimiento por su interés en considerarnos como parte de sus opciones de colaboración con la formación de sus estudiantes, y le extendemos nuestros deseos de éxito y consideración.

Atentamente,

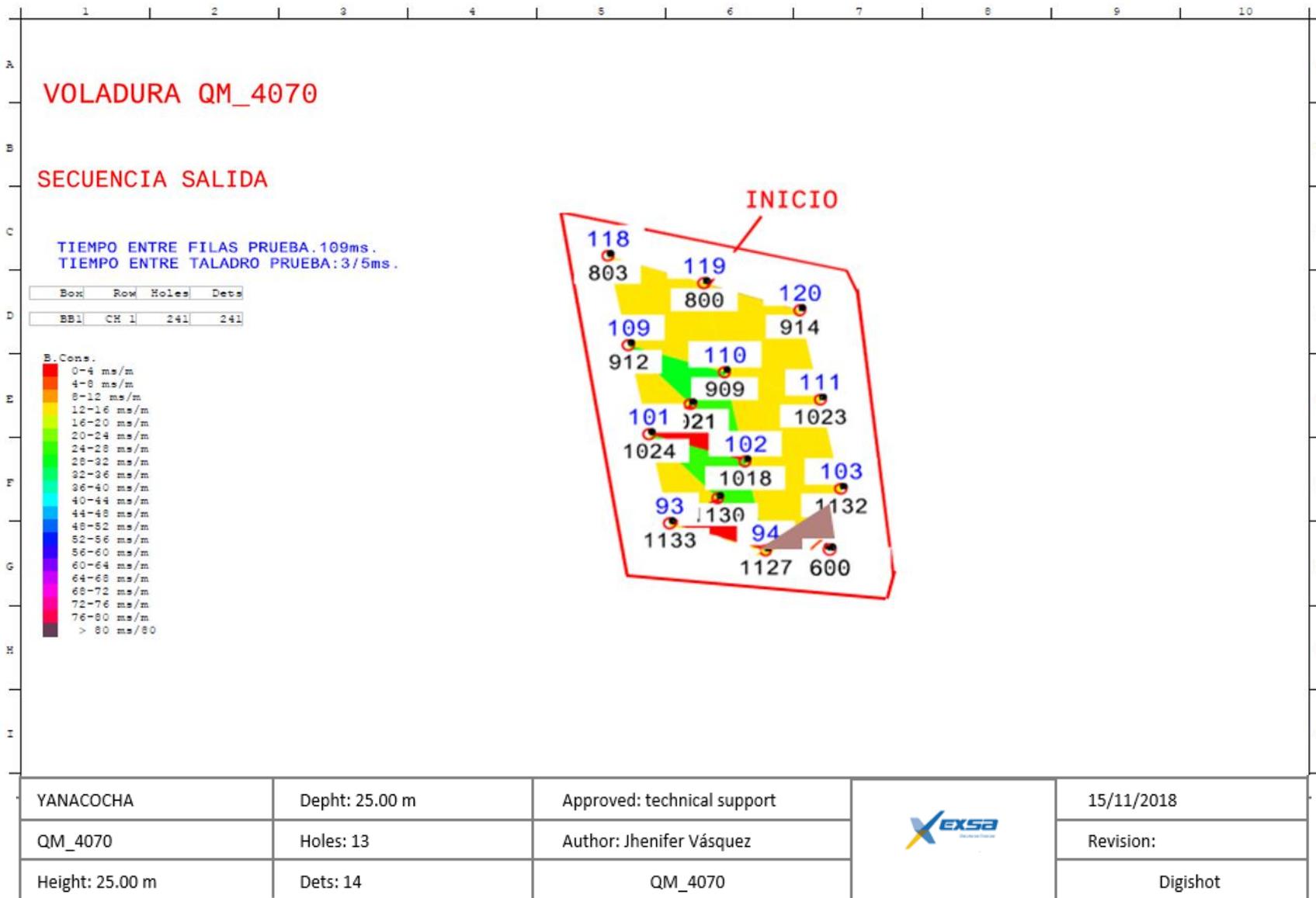
Nahil Hirsh Carrillo
Gerente Senior Políticas Públicas y Relaciones Gubernamentales

ANEXO 2: Plano de secuencia de salida de la malla de voladura – Primera prueba.

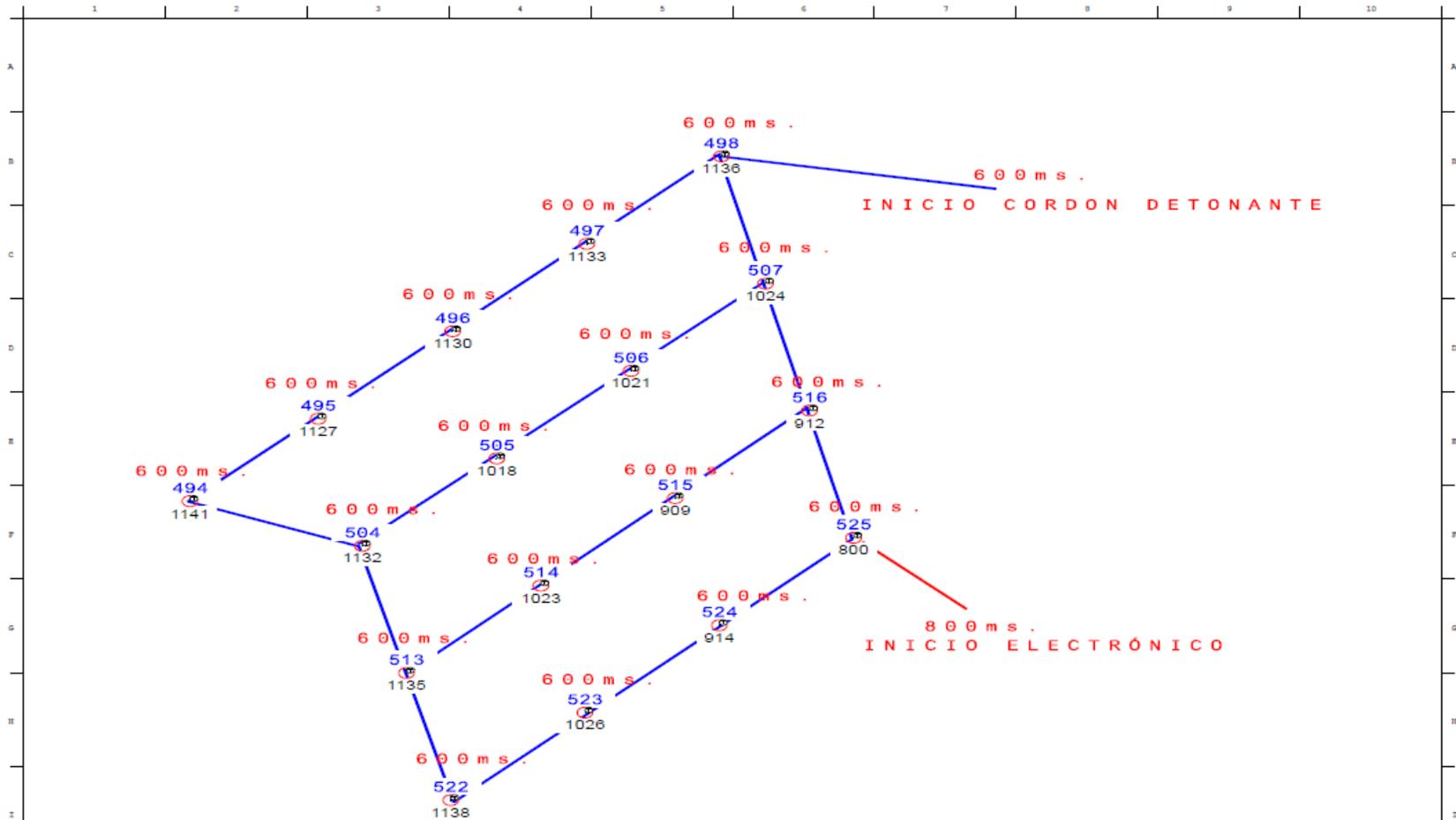


YANACOCHA	Depth: 25.00 m	Approved: technical support		15/11/2018
QM 4070	Holes: 13	Author: Jhenifer Vásquez		Revision:
Height: 25.00 m	Dets: 14	QM 4070		Digishot

ANEXO 3: Plano de alivio de la malla de voladura – Primera prueba.

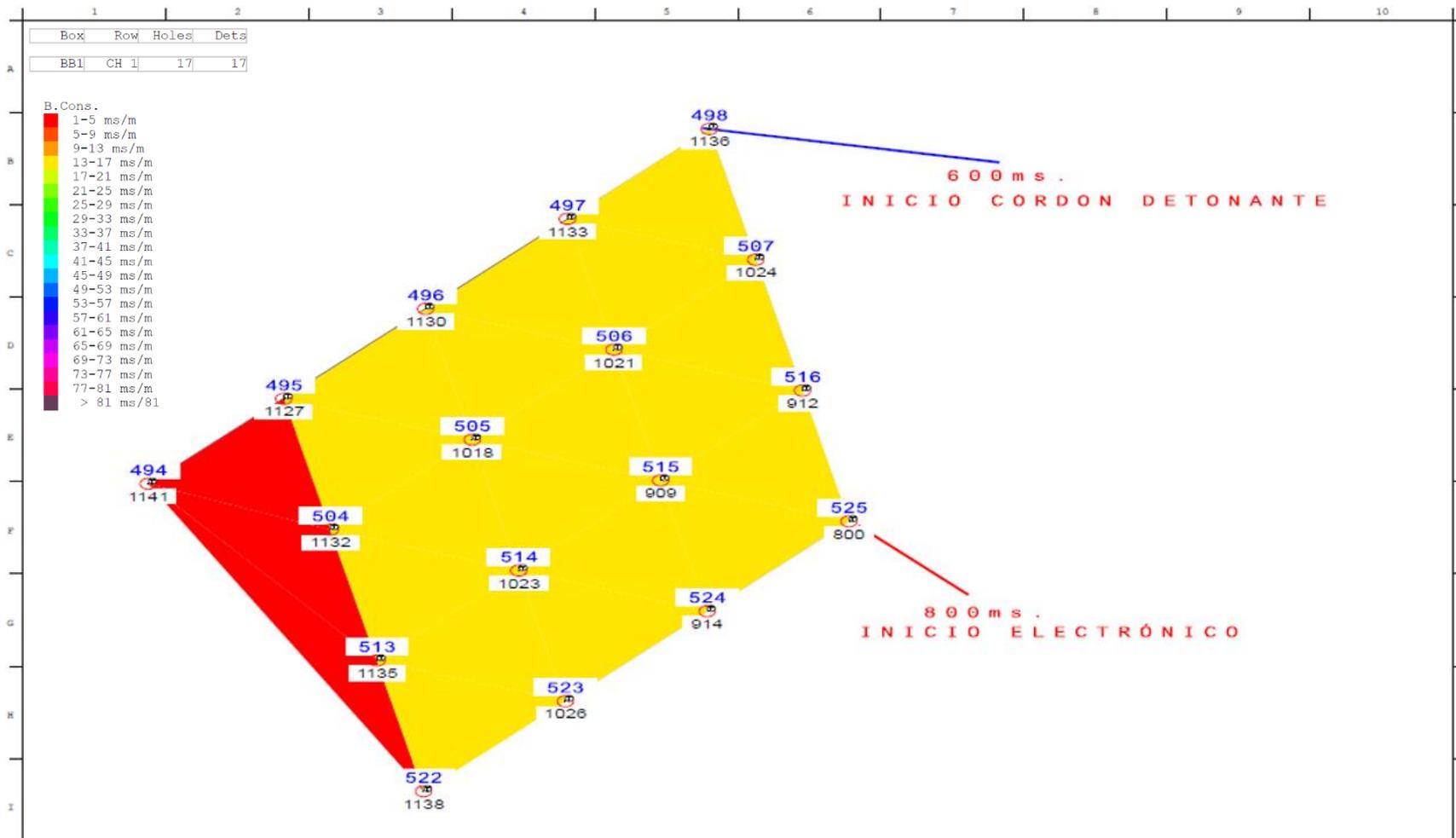


ANEXO 4: Plano de secuencia de salida de la malla de voladura – Segunda prueba.



YANACOCHA	Depth: 25.00 m	Approved: technical support		01/12/2018
QM_4070	Holes: 17	Author: Jhenifer Vásquez		Revision:
Height: 25.00 m	Dets: 17	QM_4070		Digishot

ANEXO 5: Plano de alivio de la malla de voladura – Segunda prueba.



YANACOCHA	Depht: 25.00 m	Approved: technical support		01/12/2018
QM_4070	Holes: 17	Author: Jhenifer Vásquez		Revision:
Height: 25.00 m	Dets: 17	QM 4070		Digishot

ANEXO 6: Resumen de datos históricos de eventos de tiros cortados en Minera Yanacocha.

Fecha Voladura	Fecha Hallazgo	Tajo	Nivel	Personal Dañado	Circunstancias	Primas Recuperadas	Det. Electrónicos Recuperados	Posible Causa
18/06/2016	26/06/2016	TO	3468	Ninguno	Durante el minado	2	2	Presión dinámica
24/06/2016	29/06/2016	TO	3468	Ninguno	Durante el minado	1	1	Presión dinámica
15/08/2016	4/09/2016	TO	3456	Ninguno	Berma del nivel 3468	1	2	Presión dinámica
10/01/2018	19/01/2018	TO	3348	Ninguno	Durante el minado	2	2	Presión dinámica
27/02/2018	27/02/2018	TO	3324	Ninguno	Durante el minado	1	1	Presión dinámica
3/03/2018	4/03/2018	TO	Lift 7	Ninguno	Durante el minado	1	1	Presión dinámica
28/05/2018	7/06/2018	TO	3300	Ninguno	Durante el minado	1	1	Presión dinámica
1/07/2018	5/07/2018	TO	3288	Ninguno	Durante el minado	2	2	Presión dinámica
29/07/2018	16/08/2018	QM	4090	Ninguno	Durante el minado	1	1	Presión dinámica
28/09/2018	15/10/2018	QM	4090	Ninguno	Durante el minado	1	1	Presión dinámica
28/09/2018	23/10/2018	QM	4090	Ninguno	Durante el minado	2	1	Presión dinámica
30/04/2019	21/05/2019	QM	4050	Ninguno	Durante el minado	1	1	Presión dinámica
06/05/2019	14/05/2019	QM	4060	Ninguno	Durante el minado	1	1	Presión dinámica