

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



**“EVALUACIÓN DEL AGENTE EXPLOSIVO QUANTEX EN
LOS RESULTADOS DE FRAGMENTACIÓN PARA LA
REDUCCIÓN DE LOS COSTOS DE VOLADURA EN TAJO DE
LA MINA TOQUEPALA”**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. FRANCISCO YANA YANA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PROMOCIÓN 2012-II

PUNO - PERÚ

2017



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
TESIS

“EVALUACIÓN DEL AGENTE EXPLOSIVO QUANTEX EN LOS
RESULTADOS DE FRAGMENTACION PARA LA REDUCCIÓN DE LOS
COSTOS DE VOLADURA EN TAJO DE LA MINA TOQUEPALA”

PRESENTADA POR:

Bach. FRANCISCO YANA YANA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 25-08-2017

APROBADA POR LOS JURADOS:

PRESIDENTE DEL JURADO :

Dr. Jorge Gabriel Durant Broden

PRIMER MIEMBRO :

Ing. Amilcar Giovanni Teran Dianderas

SEGUNDO MIEMBRO :

Ing. Lucio Raul Mamani Barraza

DIRECTOR/ASESOR :

Ing. Arturo Rafael Chayña Rodríguez

ÁREA: Ingeniería de Minas

TEMA: Análisis de Costos Mineros y Comercialización de Minerales

DEDICATORIA

Con mucho amor y cariño dedico mi trabajo de tesis, primordialmente a Dios por su gran bendición en mi vida diaria y a mis:

Padres: Atanacio M. Yana Roque, Agustina J. Yana de Yana y a mi hermano Alberto Yana Yana. Quienes me apoyaron a seguir adelante en la vida.

Y a la inspiración que tengo desde ahora en la vida, por tener más adelante.

A mis amigos y a mi familia por su gran apoyo integro.

Yana Yana, Francisco

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mi alma mater, a la Universidad Nacional del Altiplano - Puno, a mi Facultad de Ingeniería de Minas y a los Ingenieros y docentes, que me formaron profesionalmente en los aspectos teóricos y prácticos para seguir en el camino de la Minería.

Agradecimiento infinito a mis padres; Atanacio M. Yana y Agustina J. Yana, por el sacrificio incondicional que hicieron posible mi formación profesional.

Agradecer en forma especial a mi amigo Henry Chura Torres, por compartir sus conocimientos y experiencias de mina Toquepala de manera espontánea para poder realizar mi tesis.

A mi hermano y amigo Alberto Yana Yana, por su gran apoyo incondicional, quien me guía a pesar de mis errores.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS.....	xii
RESUMEN	13
ABSTRACT.....	14

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción del problema	15
1.2. Formulación del problema.....	16
1.2.1. Problema general	16
1.2.2. Problemas específicos.....	16
1.3. Objetivos de la investigación.....	16
1.3.1. Objetivo general	16
1.3.2. Objetivos específicos	17
1.4. Justificación de la investigación	17
1.5. Limitaciones de estudio	17
1.6. Viabilidad del proyecto	18

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación.....	19
2.2. Marco conceptual	21
2.3. Propiedades elásticas de las rocas	24
2.4. Explosivo Heavy Anfo	25
2.4.1. Descripción de Heavy Anfo	29
2.4.1.1. Densidad de Heavy Anfo.....	29
2.4.1.2. Velocidad de detonación de Heavy Anfo 55	30
2.4.1.3. Uso de emulsificantes	30
2.5. Agente explosivo Quantex.....	31
2.5.1. Componentes de la tecnología Quantex	32

2.5.2.	Descripción del agente explosivo Quantex 73.....	34
2.5.2.1.	Densidad de Quantex.....	34
2.5.2.2.	Velocidad de detonación Quantex.....	38
2.5.2.3.	Presión de detonación.....	38
2.5.2.4.	Densidad de copa.....	39
2.5.2.5.	Presión hidrostática en la columna explosiva.....	39
2.5.2.6.	Factor de esponjamiento de mezcla explosiva Quantex en taladros.....	41
2.5.2.7.	Estándar de partida en la mina Toquepala.....	43
2.5.2.8.	Control de la mezcla de explosivo Quantex.....	43
2.5.2.9.	Sistemas de carguío de Quantex.....	44
2.6.	Parámetros dimensionales de perforación.....	46
2.6.1.	Diámetro de taladro.....	46
2.6.2.	Burden.....	46
2.6.3.	Espaciamiento.....	47
2.6.4.	Altura de banco.....	47
2.6.5.	Malla de perforación.....	48
2.7.	Sistema de iniciación electrónico (I-Kon).....	48
2.8.	Secuencia de encendido.....	50
2.8.1.	Tiempo de retardo entre barrenos de la misma fila.....	51
2.8.2.	Tiempo de retardo entre filas.....	51
2.9.	Evaluación de voladura.....	52
2.9.1.	Vibraciones en voladuras.....	52
2.9.2.	Fragmentación de la roca.....	54
2.9.3.	Control de la generación de fly rocks.....	58
2.10.	Teoría de costos.....	60
2.10.1.	Función de costos.....	60
2.10.2.	Matriz de costos.....	60
2.10.3.	Costo de perforación (CP).....	60
2.10.4.	Costo de la mezcla explosiva (CM).....	61
2.10.5.	Costo total de perforación y voladura (CP&V).....	63
2.10.6.	Matriz de decisión de costo.....	63
2.11.	Planteamiento de hipótesis.....	63
2.11.1.	Hipótesis general.....	63
2.11.2.	Hipótesis específicos.....	64

CAPÍTULO III**MATERIALES Y MÉTODOS**

3.1.	Tipo de investigación.....	65
3.2.	Diseño metodológico	66
3.3.	Población y muestra.....	67
3.4.	Unidad de muestreo	68
3.5.	Operacionalización de variables	68
3.5.1.	Variable independiente	68
3.5.2.	Variable dependiente	69
3.6.	Técnicas de recolección de datos.....	69
3.7.	Procesamiento de las técnicas de datos	69

CAPÍTULO IV**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1.	Caracterización del área de estudio	70
4.1.1.	Ubicación y acceso	70
4.1.2.	Limites	70
4.1.3.	División política	70
4.1.4.	Altitud.....	71
4.1.5.	Clima	71
4.1.6.	Topografía	72
4.1.7.	Actividad minera	72
4.1.8.	Desarrollo económico-productivo	74
4.2.	Aspecto geológico	74
4.2.1.	Geología regional	74
4.2.2.	La falla micalaco y el depósito de Toquepala	76
4.2.3.	Geología local.....	77
4.3.	Operaciones mina	83
4.3.1.	Perforación.....	83
4.3.2.	Voladura	84
4.3.3.	Carguío	84
4.3.4.	Acarreo	85
4.3.5.	Equipos auxiliares.....	85
4.3.6.	Chancado	86
4.3.7.	Depósitos lixiviables.....	86

4.4.	Programa de producción.....	87
4.5.	Característica geomecánica de la mina.....	87
4.6.	Evaluación de proyectos de voladura con uso de la mezcla explosiva Q73.....	89
4.6.1.	Evaluación de los agentes explosivos en tajo de fase 5.....	89
4.6.1.1.	Ubicación del proyecto 174.....	89
4.6.1.2.	Parámetros dimensionales del proyecto 174	90
4.6.1.3.	Costo por metro lineal en taladro de 12 ¼ de pulgada de diámetro	91
4.6.1.4.	Costo de taladros del proyecto 174.....	94
4.6.1.5.	Comparación de costo de voladura del proyecto 174.....	96
4.6.1.6.	Diseño de voladura	97
4.6.1.7.	Análisis de voladura	98
4.6.2.	Evaluación de los agentes explosivos en tajo de fase 4.....	105
4.6.2.1.	Ubicación del proyecto 146.....	105
4.6.2.2.	Parámetros dimensionales del proyecto 146	105
4.6.2.3.	Costo por metro lineal en taladro de 12 ¼ de pulgada de diámetro	106
4.6.2.4.	Costo de taladros del proyecto 146.....	109
4.6.2.5.	Comparación de costo de voladura de Heavy Anfo 55 y Quantex73.....	111
4.6.2.6.	Diseño de voladura	112
4.6.2.7.	Análisis de voladura	113
4.6.3.	Evaluación de los agentes explosivos en tajo de fase 3.....	120
4.6.3.1.	Ubicación del proyecto.....	120
4.6.3.2.	Parámetros dimensionales del proyecto 067	120
4.6.3.3.	Costo por metro lineal en taladro de 11 pulgadas de diámetro	121
4.6.3.4.	Costos de los explosivos HA55 y Quantex73 del proyecto 067.....	124
4.6.3.5.	Comparación de costo de voladura de Heavy Anfo 55 y Quantex73.....	126
4.6.3.6.	Diseño de voladura	127
4.6.3.7.	Análisis de voladura	128
4.6.4.	Resultados de costos de voladura de los proyectos de las fases 3,4 y 5.....	133
4.6.5.	Discusión de resultados	137
	CONCLUSIONES	139
	RECOMENDACIONES.....	140
	BIBLIOGRAFÍA	141
	ANEXOS.	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Muestra la estructura del anfo pesado	26
Figura 2. 2 Resistencia al agua de diferentes tipos de anfo pesado	27
Figura 2. 3 Variación de la potencia y densidad de un anfo pesado.....	28
Figura 2. 4 Variación de sensibilidad de anfo pesado con el porcentaje de emulsión....	28
Figura 2. 5 Figura de composición del Heavy Anfo 55.....	29
Figura 2. 6 Mezcla explosiva Quantex	32
Figura 2. 7 Nitrato de amonio de Quantex.....	33
Figura 2. 8 Composición del nuevo agente explosivo Quantex 73	34
Figura 2. 9 Densidad de MEQ-73 con 0.10% de nitrito de sodio.....	35
Figura 2. 10 Densidad de MEQ-73 con 0.12% de nitrito de sodio.....	35
Figura 2. 11 Densidad de MEQ-73 con 0.14% de nitrito de sodio.....	36
Figura 2. 12 Densidad de MEQ-73 con 0.16% de nitrito de sodio.....	36
Figura 2. 13 Densidad de MEQ-73 con 0.20% de nitrito de sodio.....	37
Figura 2. 14 Densidad de MEQ-73 con 0.30% de nitrito de sodio.....	37
Figura 2. 15 Densidad del Quantex - Toquepala	39
Figura 2. 16 Calculo de la presión en un punto dentro de la columna explosiva	40
Figura 2. 17 Cálculo de la densidad promedio real de la columna explosiva luego del esponjamiento	40
Figura 2. 18 Diseño para taladros de producción	41
Figura 2. 19 Diseño para taladros de amortiguación	42
Figura 2. 20 Diseño de taladros Trim	43
Figura 2. 21 Densidad de Quantex en diferentes partes del taladro – Toquepala.....	43
Figura 2. 22 Control de la mezcla Quantex - Toquepala	44
Figura 2. 23 Sistema vaciable	44
Figura 2. 24 Sistema bombeable.....	45
Figura 2. 25 Dimensiones del burden y espaciamento - Toquepala.....	47
Figura 2. 26 Diseño de malla de perforación.....	48
Figura 2. 27 Detonador electrónico	49
Figura 2. 28 Taco de taladro (Scaled Depth of Burial-SD)	59
Figura 2. 29 Profundidad escalada de enterramiento SD.....	59
Figura 3. 1 Estructura del diseño metodológico	67
Figura 4. 1 Alteración de Toquepala	80

Figura 4. 2 Sección geológica vertical central depósito de Toquepala.....	81
Figura 4. 3 Material de la mina de acuerdo a su destino	86
Figura 4. 4 Resultado de los ensayos de mina Toquepala	89
Figura 4. 5 Diseño de taladros con mezclas explosivos	93
Figura 4. 6 Secuencia de salida de tiempo para realizar la voladura	97
Figura 4. 7 Dirección de apilamiento del material.....	98
Figura 4. 8 Reportes de la fragmentación de pala n° 8 del proyecto 174	99
Figura 4. 9 Reporte de la pala n° 8 del material movido	101
Figura 4. 10 Control de fly rock del proyecto 174.....	102
Figura 4. 11 Humos anaranjados producidos por la mezcla explosiva HA 55.....	104
Figura 4. 12 Humos producidos por la mezcla explosiva Quantex 73	104
Figura 4. 13 Diseño de los taladros de HA55 y Q73	109
Figura 4. 14 Iniciación de voladura de filas y barrenos del proyecto 146.....	112
Figura 4. 15 Dirección del apilamiento del material del proyecto 146.....	113
Figura 4. 16 Reporte de fragmentación de la pala n° 7 del proyecto de 146 de fase 4. 114	
Figura 4. 17 Reporte de la pala n° 7 de material total removido	116
Figura 4. 18 Control de fly rock del proyecto 146.....	117
Figura 4. 19 Humos anaranjados producidos con Heavy Anfo 55	119
Figura 4. 20 Humos producidos con el explosivo Quantex 73	119
Figura 4. 21 Diseño de los taladros de 11 pulg de diámetro del proyecto 067.....	123
Figura 4. 22 Secuencia de iniciación de filas de taladros y barrenos del proyecto 067	127
Figura 4. 23 Diseño de apilamiento del material del proyecto 067	127
Figura 4. 24 Reporte de pala n°2, la fragmentación de la roca en el proyecto 067	128
Figura 4. 25 Material movido por la pala n° 2.....	130
Figura 4. 26 Control de Fly rock en el proyecto 067	131
Figura 4. 27 Humos anaranjados producidos por la voladura con HA55.....	133
Figura 4. 28 Humos producidos por la voladura con MEQ 73.....	133
Figura 4. 29 Diferencia de costos por metro lineal de HA55 y Q73	134
Figura 4. 30 Cantidad de explosivos por taladros según su longitud de carga.....	134
Figura 4. 31 Resultado de costo de explosivos por cada taladro de los proyectos	135
Figura 4. 32 Resultado de costo de taladro por malla.....	135
Figura 4. 33 Porcentaje de la reducción de los costos de los proyectos 174,146 y 067	135
Figura 4. 34 Resultados de la velocidad pico partícula	136
Figura 4. 35 Resultados de fly rock	137

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Densidad de diferentes tipos de Heavy Anfo - Toquepala	29
Tabla 2. 2 Velocidad de detonación de Heavy Anfo - Toquepala	30
Tabla 2. 3 Composiciones de una emulsión explosiva	31
Tabla 2. 4 Densidades finales del Quantex - Toquepala.....	38
Tabla 2. 5 Parámetros de sistema de carguío del Quantex - Toquepala	46
Tabla 2. 6 Daños por vibración en las voladuras.....	54
Tabla 2. 7 Factor “A” de Cunningham	56
Tabla 2. 8 Costo de primado - Toquepala.....	61
Tabla 3. 1 Unidades de medida.....	68
Tabla 4. 1 Yacimiento minero de Toquepala-producción de cobre.....	73
Tabla 4. 2 Distrito de Ilabaya transferencias de regalías mineras	73
Tabla 4. 3 Minero de Toquepala utilidades al III Trimestre	74
Tabla 4. 4 Litología de la mina Toquepala	77
Tabla 4. 5 Fases de la mina Toquepala, tipo y densidad de roca.....	78
Tabla 4. 6 Mineralogía de Toquepala	79
Tabla 4. 7 Principales alteraciones	80
Tabla 4. 8 Mineralogía del zoneamiento	82
Tabla 4. 9 Ubicación del proyecto 174	90
Tabla 4. 10 Datos del diseño del tajo del proyecto 174 de la fase 5.....	91
Tabla 4. 11 Costos unitarios de los componentes de los explosivos HA55 y Q73.....	92
Tabla 4. 12 Costo de los accesorios.....	92
Tabla 4. 13 Cantidad de los explosivos para cada taladro	92
Tabla 4. 14 Costo por cada taladro	93
Tabla 4. 15 Costo de HA 55 para cada taladro del proyecto 174	94
Tabla 4. 16 Costo de Q73 para cada taladro del proyecto 174	95
Tabla 4. 17 Porcentaje de reducción de los taladros (HA55 y Q73)	95
Tabla 4. 18 Costo total del proyecto 174 con HA55	96
Tabla 4. 19 Costo total del proyecto 174 con Q73	96
Tabla 4. 20 Costo total por taladro (US\$/TM).....	96
Tabla 4. 21 Resultados de la fragmentación de pala n° 8.....	99
Tabla 4. 22 Proyección de movimiento de material pala eléctrica n° 8.....	100
Tabla 4. 23 Diferencia de movimiento de material pala n° 8	101

Tabla 4. 24 Ubicación del proyecto 146	105
Tabla 4. 25 Datos del diseño del tajo del proyecto 146	106
Tabla 4. 26 Costos unitarios de los componentes de HA55 y Quantex73	107
Tabla 4. 27 Costo de los accesorios de voladura	107
Tabla 4. 28 Cantidad de explosivo para cada taladro	108
Tabla 4. 29 Costo por cada taladro	108
Tabla 4. 30 Costo de HA 55 para cada taladro del proyecto 146	109
Tabla 4. 31 Costo de HA 55 para cada taladro del proyecto 146	110
Tabla 4. 32 Porcentaje de la reducción de los taladros del proyecto 146	111
Tabla 4. 33 Costo total del proyecto 146 con HA55	111
Tabla 4. 34 Costo total del proyecto 146 con Q73	111
Tabla 4. 35 Costo total del proyecto 146 (US\$/TM)	112
Tabla 4. 36 Resultados de la fragmentación de la pala n° 7	114
Tabla 4. 37 Proyección de movimiento de material pala n° 7	115
Tabla 4. 38 Diferencia de movimiento de material pala n° 7	116
Tabla 4. 39 Datos del proyecto 067	120
Tabla 4. 40 Datos del diseño del tajo del proyecto 067	121
Tabla 4. 41 Costos unitarios de los componentes de HA55 y Quantex73 (11 pulg. ϕ)	122
Tabla 4. 42 Costo de los accesorios de la voladura	122
Tabla 4. 43 Cantidad de explosivos por taladros del proyecto 067	122
Tabla 4. 44 Costo por cada taladro	123
Tabla 4. 45 Costo de HA 55 para cada taladro del proyecto 067	124
Tabla 4. 46 Costo de Q73 para cada taladro del proyecto 067	125
Tabla 4. 47 Porcentaje de la reducción de los taladros del proyecto 067	125
Tabla 4. 48 Costo total del proyecto 067 con HA55	126
Tabla 4. 49 Costo total del proyecto 067 con Q73	126
Tabla 4. 50 Costo total del proyecto 067 (US\$/TM)	126
Tabla 4. 51 Resultados del promedio de la fragmentación de la fase 3	128
Tabla 4. 52 Proyección de movimiento de material pala eléctrica n° 2	129
Tabla 4. 53 Diferencia de movimiento de material pala eléctrica n° 2	130

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

CM	: Costo de la mezcla explosiva
CN	: Costo de nitrato
CV	: Costo de voladura
CONASEV	: Comisión nacional supervisora de empresas y valores del Perú
DCL	: Densidad de carga lineal
kg/TM	: Kilogramos por tonelada métrica
kg/MT	: Kilograms per metric ton
g/cc	: Gramos por centímetro cubico
HA55	: Heavy Anfo 55
Mpa	: Megapascal
MEQ73	: Mezcla explosiva Quantex 73
ms	: Milisegundos
mm/s	: Milímetros por segundo
MT/h	: Metric ton per hour
m ² /día	: Metro cuadrado por día
NW	: Nor-Oeste
Q73	: Quantex 73
PPV	: Velocidad pico partícula
TRB	: Tiempo de retardo entre barrenos de la misma fila
TRF	: Tiempo de retardo entre filas
SPCC	: Southern Peru Copper Corp.
SD	: Scaled Depth of Burial
SUNAT	: Superintendencia nacional de aduanas y de administración tributaria
SE	: Sur Este
TMF	: Tonelada métrica fina
TM/h	: Tonelada métrica por hora
TM/día	: Tonelada métrica por día
US\$/TM	: Dólares por tonelada métrica
US\$/MT	: Dollars per metric ton
VOD	: Velocidad de detonación

RESUMEN

El presente trabajo de investigación trata sobre, la comparación de los costos de Heavy Anfo y Quantex, la voladura representa el 20% de todo el costo de explotación minera en las fases de la mina Toquepala; las desventajas que tiene Heavy Anfo al realizar la voladura; tiene una menor velocidad de detonación, su densidad no cambia (es estable), su longitud de carga no varía y en los taladros con presencia de agua se utiliza más cantidad de la emulsión y el nitrato de amonio baja su densidad perdiendo la fuerza de detonación, donde el costo del explosivo aumenta. El movimiento del material proyectado en las palas no se cumplen las TM/h estimados, porque no se obtiene una fragmentación adecuada con la voladura, genera mayor vibración y produce humos anaranjados. El objetivo de esta investigación es determinar los costos de los dos explosivos para evaluar el porcentaje de la reducción de voladura y obtener la mejor fragmentación de roca con la aplicación del explosivo Quantex. La empresa SPCC ha decidido cambiar y probar el uso del Quantex. El explosivo destaca cómo uno de los casos de la innovación, donde este producto ha sido bien recibido en la minería peruana porque ha demostrado reducir el costo de voladura y mejorar la fragmentación. El Quantex es un explosivo igual que el Anfo pesado con la diferencia que es de tipo "gasificable" esta propiedad permite que el Quantex, tenga una ventaja en comparación al Heavy Anfo. La prueba que se realizó en la fase 4 del proyecto 146, en roca dacita porfírica con el explosivo Quantex, con la dimensión de una malla de 7m x 7m, se evalúa el costo unitario y el tonelaje de cada taladro que debe romper es de 1654.97 TM/tal, con un factor de carga en taladros de producción de 0.54 kg/TM y amortiguación de 0.48 kg/TM, con un costo por taladro de producción es (0.31 US\$/TM) y amortiguación (0.27 US\$/TM). Y al final se obtiene el costo total de los 334 taladros aplicando; el explosivo Heavy 55 es 0.322 US\$/TM y el Quantex73 es 0.298 US\$/TM, con una reducción de 7.39% a favor del explosivo Quantex. Y porcentaje de la reducción de la fragmentación es 1.02%. Y además de otros beneficios que se genera el explosivo de obtener una menor vibración, menor fly rock y el cuidado del medio ambiente. El mayor beneficio es la reducción de costo de voladura en las fases de la mina Toquepala.

Palabras claves: Quantex, Heavy Anfo, evaluación, fragmentación, costos de voladura, nitrato de amonio, esponjamiento.

ABSTRACT

The present research deals about costs comparison of Heavy Anfo and Quantex, blasting represents 20% of all cost of mining exploitation in phases of Toquepala mine. Disadvantages that Heavy Anfo had showed are: Lower detonation velocity, its density does not change (it is stable), its load length does not vary and drills with water presence is used more quantity of emulsion and the ammonium nitrate lowers its density losing detonation force thus explosive costs increase. Projected material movement on the shovels do not meet MT/h estimated, because do not reach suitable fragmentation in blasting, it generates more vibrations and produces orange fumes. This research goal is to determine costs of this two explosives and evaluate reduction percentage of blasting, obtaining an adequate rock fragmentation applying Quantex explosive. Company SPCC has decided to change and try out Quantex. This explosive highlighted as an innovation, this product has been well received in Peruvian mining because prove reducing blasting costs and improve fragmentation. Quantex is an explosive like Heavy Anfo with the difference that it is “gasifiable” this property allows that Quantex has an advantage compared to Heavy Anfo. Tests were carried out in phase 4 of project 146 on porphyritic dacite rock with Quantex explosive, with a mesh size of 7m x 7m, evaluated where the unit costs and tonnage of each drill to break is 1654.97 MT/h, with powder fact in production drills of 0.54 kg/MT and damping of 0.48 kg/MT with cost per production drill 0.31 US\$/MT and damping 0.27 US\$/MT. Finally, total costs obtained from 334 drills by applying Heavy Anfo 55 is 0.322 US\$/MT and applying Quantex 73 is 0.298 US\$/MT with a reduction of 7.39% in Quantex explosive favor and fragmentation reduction percentage is 1.02 %. In addition, other benefits that it will generate is lower vibration, less fly rock and care the environment. The greater benefit is blasting costs reduction in phases of Toquepala mine.

Keywords: Quantex, Heavy Anfo, evaluation, fragmentation, blasting costs, ammonium nitrate, swell.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción del problema

Dentro del ciclo de minado que se realiza a diario en mina Toquepala, afrontan los problemas de costos de voladura y fragmentación. Donde juegan un rol importante al principio de realizar la extracción y movimiento del material y necesitan ser resueltos con el fin de asegurar la producción de mineral y desmonte de 600 000 TM/día, donde tiene una ley mínima de 0,40 % de Cu y 0,035 % de Mo. En un área de explotación promedio de 30 000 m²/día.

Al ver los tipos del macizo rocoso que se encuentran en diferentes niveles de la mina son: rocas extrusivas o volcánicas, rocas intrusivas y brechas, según las pruebas geomecánicas el promedio de las rocas son de dureza medio, y por eso se realiza la voladura con el Heavy Anfo 55 (50% de nitrato de amonio y 50% de emulsión), y el resultado de fragmentación debe ser menor a P₈₀. Al momento de cargar el explosivo Heavy Anfo en los taladros, se observa que el mayor costo es en la emulsión, la emulsión en cantidades menores mantiene una densidad inicial 1.27 g/cc al HA55 y es deficiente en los taladros con presencia de agua y produce una menor velocidad de detonación al utilizar el 50% de emulsión. Por tal motivo buscamos reducir el costo de Heavy Anfo 55 y reducir el tamaño de bolones en las fases de la mina.

Aplicando la voladura con el explosivo Quantex 73 (30% de nitrato de amonio, 70% de emulsión y 0.14% de nitrito de sodio), en las fases de la mina, se mejoraría la resistencia del explosivo en los taladros con presencia de agua, tendríamos un mayor

porcentaje de emulsión para que genere mayor velocidad de detonación, mejorar la fragmentación de la roca y reducir los bolones. La ventaja de Quantex, tiene una cualidad de esponjarse y su densidad es variable en la columna de carga, al añadir el 0.14% de nitrito de sodio; genera un esponjamiento en la columna de carga y llega a una densidad final de 1.14 g/cc. Al generarse el esponjamiento del Quantex73, nos reduce el costo del explosivo.

Estas consideraciones nos llevan a la obtención de lograr un aporte en su solución del problema antes planteada a inferir la necesidad de superar esta deficiencia de costos de voladura y mejorar la fragmentación de la roca, por lo que planteamos las siguientes preguntas de investigación.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo Influirá la aplicación del agente explosivo Quantex en los resultados de fragmentación para reducir los costos de voladura en el tajo de la mina Toquepala?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo determinaremos los costos comparativos de los dos explosivos para evaluar el porcentaje de la reducción de voladura en las fases de la mina Toquepala?
- ¿Cómo mejorar la fragmentación de roca con la aplicación del agente explosivo Quantex en el tajo de la mina Toquepala?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la aplicación del agente explosivo Quantex en los resultados de fragmentación para reducir los costos de voladura en el tajo de la mina Toquepala.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar los costos comparativos de los dos explosivos para evaluar el porcentaje de la reducción de voladura en las fases de la mina Toquepala.
- Obtener la mejor fragmentación de roca con la aplicación del agente explosivo Quantex en el tajo de la mina Toquepala.

1.4. Justificación de la investigación

En la actualidad toda empresa minera debe ser competitivo para ello la compañía minera SPCC, ha realizado pruebas de voladura en su unidad minera Toquepala con la finalidad de reducir el costo de voladura y mejorar la fragmentación de las rocas diorita y brechas con yeso, con la aplicación del explosivo Quantex, nos proporciona obtener los resultados que deseamos a nivel de costos y que nos brinde mejores resultados de fragmentación, que este dentro del rango de P_{80} , la ventaja del explosivo Quantex, tiene una resistencia al agua, debido a que contiene un mayor porcentaje de emulsión y reduce los costos debido a que produce un esponjamiento en la longitud de carga de los taladros de producción y amortiguación, y nos brinda mejor resultado que el explosivo Heavy Anfo.

Esperando siempre que la investigación del explosivo Quantex, sirva como consulta y ayuda para los futuros profesionales de Ingenieros de Minas, por otro lado hacer posible una contribución viable y positiva a otras empresas mineras y en particular al desarrollo de la minería en Perú.

1.5. Limitaciones de estudio

La principal limitación del presente trabajo de investigación del explosivo Quantex, se realizan en zonas de mineral, solo se aplicaron taladros de producción y amortiguación y/o contorno, en donde la información de las pruebas geomecánicas de la mina Toquepala, no se encuentran al alcance del personal técnico de voladura, solo se considera los datos geomecánicos de las investigaciones anteriormente realizadas, para tomar referencias de las clasificaciones del macizo roco de la mina. Y los resultados del tamaño de la fragmentación son analizados por el área de voladura.

También las variaciones de los costos de los componentes del Quantex y accesorios, en donde cada empresa proveedora de los accesorios de voladura tiene una variación de los precios, en donde se tomara los precios que se considera de diciembre del 2015.

1.6. Viabilidad del proyecto

El proyecto de investigación es viable porque se demuestra que su aplicación del agente explosivo Quantex en los tajos de las fases 3, 4 y 5, nos muestra los resultados favorables en costo de voladura, donde el personal técnico que lleva un control minucioso de la densidad y de la coloración del Quantex, al momento de carga a los taladros de producción y amortiguación, al mezclar un porcentaje del nitrito de sodio, según las pruebas realizados en el laboratorio en 25 minutos llega a su densidad final el Quantex.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación

Se han evaluado investigaciones, libros, tesis, manuales que nos han permitido comprender la evaluación del agente explosivo Quantex, en los resultados de fragmentación para la reducción de los costos de voladura en el tajo de la mina Toquepala, así tenemos:

Ames, L. V. (2008), en su Tesis Titulado: “*Diseño de las Mallas de Perforación y Voladura Utilizando la Energía Producida por las Mezclas Explosivas*”, en sus objetivos indica: Analizar el rendimiento de los explosivos con el uso del factor de energía. Y mejorar el grado de fragmentación de las rocas. En sus métodos aplica el (análisis y comparación) y (observación y medición), para la elaboración de este trabajo se tomó como referencia el artículo “More Power to the Pop” escrito por W. Crosby y M. Pinco. En sus conclusiones indica: Los resultados presentados anteriormente se puede deducir que el cambio del Anfo Pesado, por el Anfo ha llevado a obtener resultados satisfactorios en el aspecto técnico porque se puede apreciar que en la primera prueba el 69% de los fragmentos tenían dimensiones menores a 0,15 m y en la segunda prueba el 90,7% de los fragmentos eran menores que dicha tamaño, los cuales son adecuado para el tratamiento por lixiviación del mineral fragmentado. Respecto a los resultados económicos la diferencia de US\$/TM es 0,014 a favor del Anfo Pesado y si el movimiento de material es 36 500 TM/día el ahorro sería de US\$ 183 960. En lo concerniente a la evaluación ecológica se tendrá que implementar un programa riguroso

para las inspecciones semanales de los kits anti derrames y otros para evitar el impacto del uso del Anfo Pesado.”

Palomino, V. J. (2013), en su Tesis Titulado: “*Diseño de Mallas de Perforación y Voladura Para Optimizar la Fragmentación en el Tajo Jessica-CIA Minera Arasi SAC*”, en sus objetivos indica: Relacionar los resultados de la metodología de diseño de mallas de perforación y voladura con el grado fragmentación. Y optimizar la fragmentación en el tajo Jessica. En sus conclusiones indica: “Al realizar varios disparos consecutivos en los proyectos de tajo Jessica, se obtuvo como resultado la fragmentación en un 70% de 1 1/2 a 2 pulg, tomando en cuenta los parámetros que se deben tener en cuenta para iniciar la voladura. El resultado de una fragmentación se encuentra también en función del diseño de malla, diseño de carga, tipo de roca, estructura geológica y del diseño de amarre del disparo.

Huangal, C. C. (2014), en su Tesis Titulado: “*Evaluación Técnica Económica del Uso del Sang en Mina – La Arena*” en sus objetivos indica: evaluar el costo comparativo entre los dos tipos de explosivos. Y evaluación de factores de potencia para cada proyecto de voladura por tipo de explosivo, en sus métodos empleados indica: al contar con la asistencia técnica se obtiene la medición de VOD, vibraciones, control de densidades y fragmentación, en sus conclusiones indica: la evaluación económica se ha realizado durante los meses de junio y julio, periodo en el que se ha registrado los costos que involucra por tonelada de roca disparada, en el registro se puede observar que existe un ahorro de 0.02 US\$/TM en el tajo calaorco y 0.01 US\$ en el tajo Ethel respectivamente al usar San-G y Heavy Anfo. Se ha obtenido de los registros que se puede ahorrar un 7.41% en el consumo de explosivos usando SAN-G. Se ha realizado el análisis granulométrico con el software Wipfrag en el proyecto de voladura N° 47 donde para una pasante de 4 pulgadas, se encuentra en 89% para SAN-G y 57.2% para HA/55 respectivamente.

Medina, C. R. (2014), en su Tesis Titulado: “*Evaluación Técnico-Económica-Ecológica de los Resultados de las Pruebas Realizadas Usando Emulsiones Gasificadas en Cuajone-Southern Peru*”, en sus objetivos indica: llevar a cabo una evaluación económica en US\$/TM disparada usando una emulsión gasificada vs anfo pesado. Y analizar y evaluar la fragmentación obtenida. En su metodología indica: este trabajo de

investigación presenta una metodología descriptiva, mostrándose gráficamente las comparaciones entre las diversas diferencias técnicas y económicas de las mezclas explosivas comerciales usadas, los datos tomados para el desarrollo de la presente tesis vienen de las pruebas que actualmente se están desarrollando en la mina Cuajone. Sus conclusiones indica: Usando la emulsión gasificada en la mezcla AP-73Q, se obtuvieron mejores resultados en términos de fragmentación y uniformidad, el P80 disminuyo en un 21.5% comparado con los resultados de los análisis realizados en proyectos disparado con HA 45/55. De las pruebas realizadas en Cuajone, se puede determinar que se obtuvieron mejores resultados en fragmentación, uniformidad y apilamiento del material volado con respecto a los resultados de las voladuras usando la mezcla explosiva HA 45/55.

2.2. Marco conceptual

a) Macizo rocoso

Conjunto de matriz rocosa y discontinuidades. Presenta carácter heterogéneo, comportamiento discontinuo y normalmente anisótropo, consecuencia de la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad, que condicionan su comportamiento geomecánico e hidráulico (Duno et al. 2009).

b) Agente explosivo Quantex

Es una mezcla explosiva de alta energía y baja densidad de nitrato de amonio, diseñada para maximizar las ganancias del negocio minero y civil, mejorando la fragmentación de roca y la seguridad de las personas y reduciendo el impacto en la huella de carbono (Exsa, 2014).

c) Perforación

A la perforación se puede definir como la combinación de las siguientes acciones:

- **Percusión:** son los impactos producidos por los golpes del pistón, los que originan ondas de choque que se transmiten a la broca.

- **Rotación:** es aquella que hace girar la broca para que los impactos sobre la roca se produzcan en distintas posiciones.
- **Empuje:** es la fuerza necesaria para mantener en contacto la broca con la roca.
- **Barrido:** el fluido del barrido permite extraer el detrito del fondo de perforación. Y tiene como finalidad de abrir unos huecos en los cuales serán introducidos una serie de cargas explosivas y sus accesorios iniciadores (Guillen, 2014).

d) Voladura

Es la primera etapa de conminución del material in situ, siendo de vital importancia aprovechar al máximo la energía química del explosivo, para así obtener una fragmentación adecuada con el menor costo; elevándose la productividad en las labores de carguío, acarreo y chancado, dando como resultado un mejor costo global de minado (Guillen, 2014).

e) Fragmentación

Por definición, la voladura consiste en el uso de explosivos para la reducción de tamaño, por lo que la fragmentación es uno de principales objetivos en todo proceso de voladura. El grado de éxito de la fragmentación tiene relación directa con la eficiencia y calidad de los procesos que se desarrollarán posteriormente, como son el carguío, transporte y procesamiento del mineral y el vaciado en botaderos del estéril o lastre.

Cuando se evalúa la fragmentación es importante determinar el tamaño promedio de la roca y su distribución (porcentaje de material fino y grueso). Esta evaluación debe hacerse tomando en consideración el equipo de carguío y transporte que será utilizado y particularmente las dimensiones del balde (carguío) y la tolva del camión (transporte). Con la evaluación de estas variables se determinara si será necesario utilizar una tronadura secundaria o de reducción para poder efectuar el transporte del material.

En síntesis, para evaluar la fragmentación se debe considerar lo siguiente:

- Equipos de carguío y transporte

- Medición del tamaño medio del material fragmentado (en forma manual o con fotografías).
- Distribución de tamaños existente (cantidad de material fino y grueso). Para poder controlar la fragmentación, es necesario considerar.
- Aspectos del entorno, en especial las características de la roca, presencia de agua y tendencia estructural.

VARIABLES DE DISEÑO, EN ESPECIAL LAS RELACIONES CON EL TIPO DE EXPLOSIVO, DIÁMETRO DE PERFORACIÓN, BURDEN Y TIEMPOS ENTRE POZOS, TIEMPOS ENTRE FILAS Y SECUENCIA DE ENCENDIDO (Codelfo educa, 2015).

f) Tajo

Sitio hasta donde llega en su faena la cuadrilla de operarios que trabaja avanzando sobre el terreno: como la de mineros, segadores, taladores, etc. (Real academia española, 2014).

g) Costo

El término costo, también llamado coste, es el gasto económico ocasionado por la producción de algún bien o la oferta de algún servicio. Este concepto incluye la compra de insumos, el pago de la mano de trabajo, los gastos en la producción y la administración, entre otras actividades (Concepto de costo, 2015).

h) Evaluación

se denomina evaluación al proceso dinámico a través del cual, e indistintamente, una empresa, organizarlo o institución académica puede conocer sus propios rendimientos, especialmente sus logros y flaquezas y así reorientar propuestas o bien focalizarse en aquellos resultados positivos para hacerlo aún más rendidores (Definición de evaluación, 2007).

2.3. Propiedades elásticas de las rocas

a) Módulo de Young e índice de Poisson

La relación de Poisson y el módulo de elasticidad son determinados por ensayos de laboratorio. El módulo de Young es la relación entre la tensión normal y la deformación unitaria longitudinal para cada material elástico y se determina de la siguiente manera:

E. Lab: que es determinado en laboratorio.

Es: conocido como modulo elástico de deformación, se calcula in-situ.

De: Modulo dinámico de deformación, que se determina mediante velocidades sísmicas (Hinostroza, 2014).

b) Módulo de deformación o rigidez

Conocido el módulo de Young (E), y el índice de Poisson (μ), se puede determinar el módulo de rigidez (G) (Hinostroza, 2014).

$$G = \frac{E}{2} (1 + \mu) \quad \text{Ecuación 2. 1}$$

c) Velocidad de onda longitudinal

La velocidad de onda o de compresión, en geofísica se denomina velocidad sísmica y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$VP = \left(E * g * \frac{(1 - \mu)}{\rho} * (1 + \mu)(1 - 2\mu) \right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 2. 2}$$

Dónde:

E : Modulo de elasticidad (kg/cm²)

g : aceleración de la gravedad (9.8 m/s²)

μ : Índice de Poisson

ρ : Densidad del material (kg/m^3) (Hinostroza, 2014).

d) Velocidad de onda transversal

Se denomina ondas transversales, debido a que el movimiento de las partículas forma un ángulo recto respecto a la dirección de propagación de las ondas. La velocidad transversal o corte (V_s) se determina con la siguiente ecuación.

$$V_s = \left(\frac{G * g}{\rho} \right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Dónde:

G : Modulo de rigidez (kg/m^2)

g : Aceleración de la gravedad (9.8 m/s^2)

ρ : densidad del material (kg/m^3) (Hinostroza, 2014)

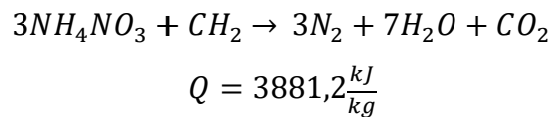
2.4. Explosivo Heavy Anfo

En la tecnología de voladura es incuestionable, que el anfo constituye el explosivo básico. Diversos intentos se han dirigido hacia la obtención de una mayor energía de este explosivo, desde la trituración de los prills de nitrato amónico de alta densidad hasta el empleo de combustibles líquidos de alta energía, como las nitroparafinas, el metanol y el nitropropano, pero comercialmente no han prosperado.

El anfo pesado, que es una mezcla de emulsión base con anfo, abre una nueva perspectiva en el campo de los explosivos.

El Anfo presenta unos huecos intersticiales que pueden ser ocupados por un explosivo líquido como la emulsión que actúa como una matriz energética como se muestra en la Figura 2.1. (Tecnología y seguridad minera, 1994).

La mezcla del nitrato de amonio con un combustible, como el diesel, en porción estequiométrica, da la siguiente reacción de descomposición: (Mori y Canchucaya, 2011).



La porosidad permite a los combustibles líquidos mezclarse más íntimamente con el nitrato de amonio y, al exponer una mayor parte de su superficie a la reacción química, se reduce el diámetro crítico, incrementándose su sensibilidad a la detonación con el estímulo de un iniciador, los cuales son cartuchos de dinamita (Mori et al. 2011).

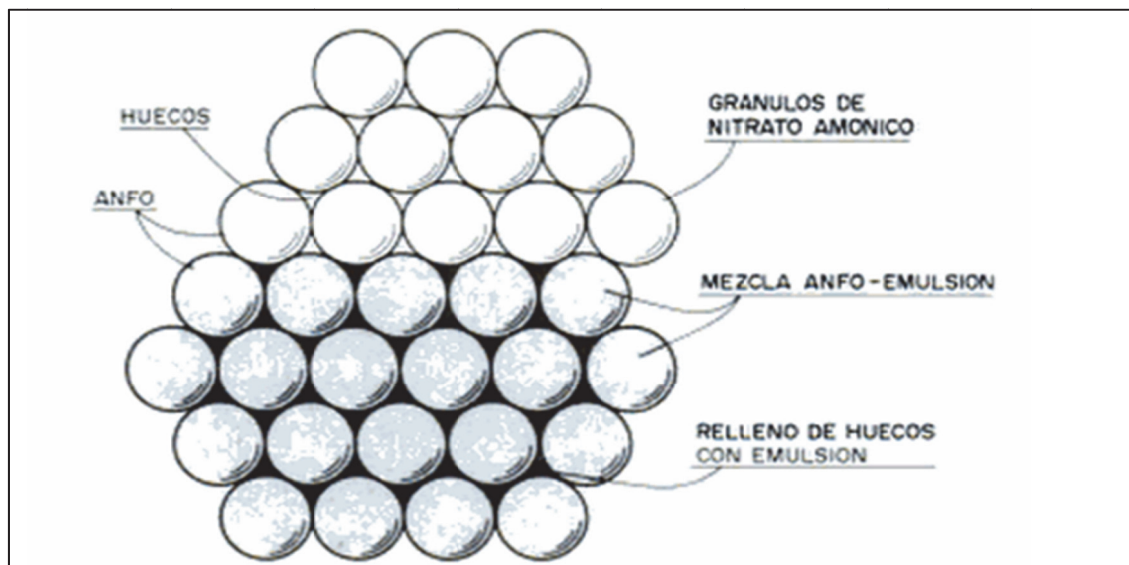


Figura 2. 1 Muestra la estructura del anfo pesado

Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas

Aunque las propiedades de este explosivo dependen de los porcentajes de mezcla, las ventajas principales que presentan son:

- Mayor energía
- Mejores características de sensibilidad
- Gran resistencia al agua
- Posibilidad de efectuar cargas con variación de energía a lo largo del barreno

La fabricación es relativamente fácil, pues la matriz emulsión puede ser preparada en una planta fija y transportada en un camión cisterna hasta un depósito de almacenamiento o ser bombeada a un camión mezclador. Con estos camiones pueden prepararse in-situ las mezclas de emulsión con nitrato amónico y gas-oil en las proporciones adecuadas a las condiciones de trabajo como muestra en la Figura 2.2. (Tecnología y seguridad minera, 1994).

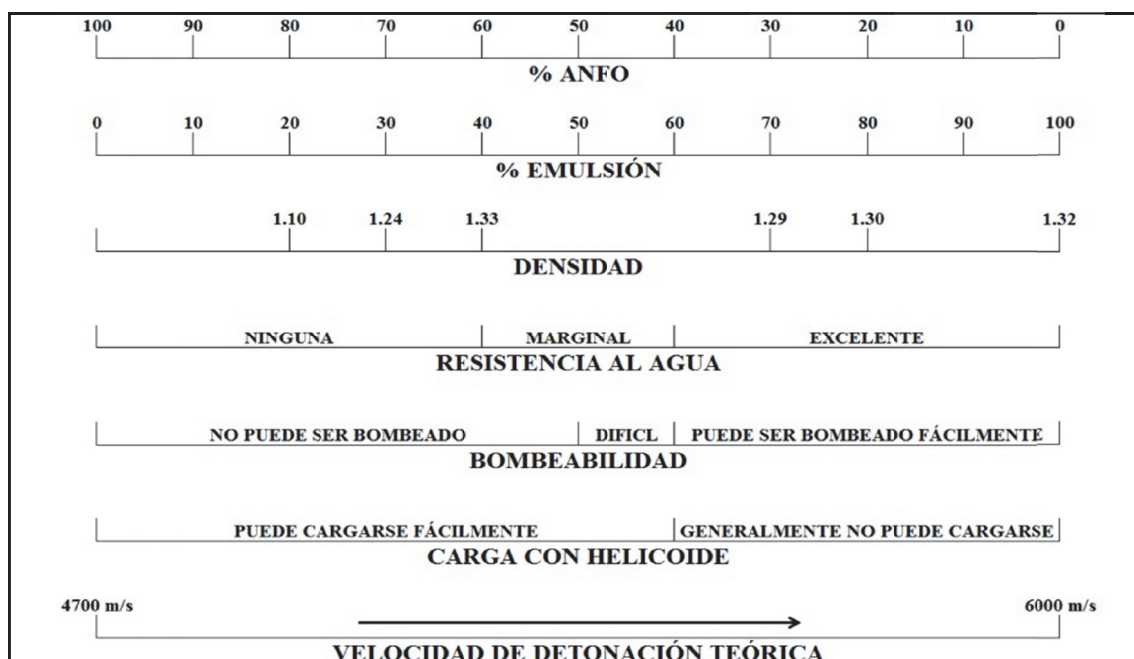


Figura 2. 2 Resistencia al agua de diferentes tipos de anfo pesado

Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas, (Du Pont, 1986)

En la Figura 2.3, se muestra la variación de la potencia relativa en volumen (anfo = 100) en un Anfo Pesado en función del porcentaje de emulsión. Puede verse como un Anfo pesado 70/30 es superior en potencia a un alanfo del 5% y una mezcla 60/40 es casi comparable a un alanfo del 10%. Curiosamente, cuando la matriz de emulsión aumenta por encima del 40% la potencia disminuye debido a que la separación de las partículas de anfo resulta elevada para que estas actúen eficientemente como puntos calientes y propagadoras de la onda de choque (Tecnología y seguridad minera, 1994).

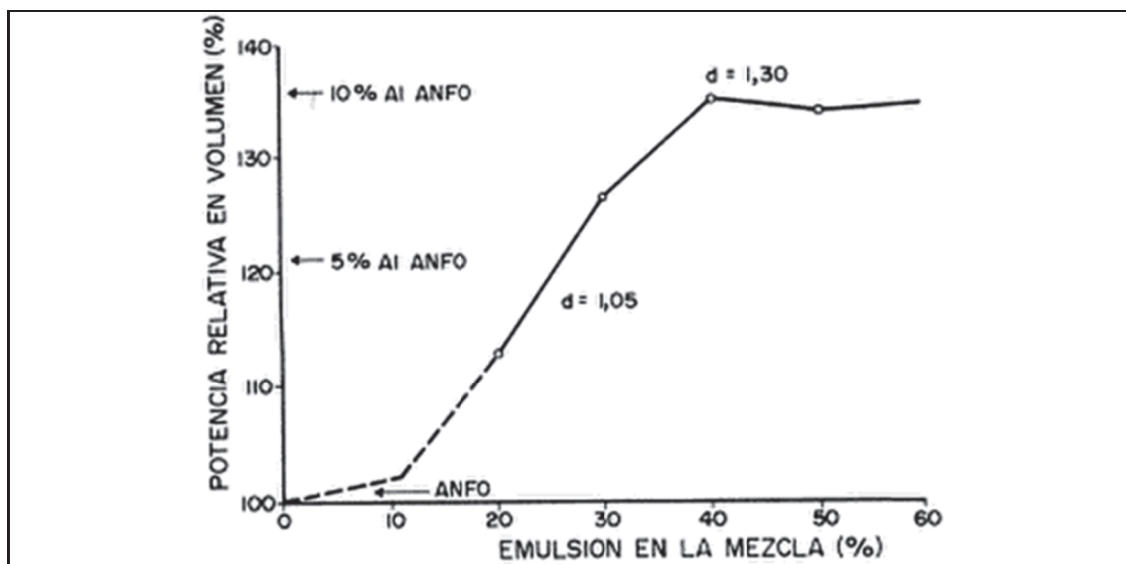


Figura 2. 3 Variación de la potencia y densidad de un anfo pesado

Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas, (Bampffield y Morrey, 1984)

La densidad de la mezcla aumenta con el porcentaje de emulsión, alcanzándose la energía máxima para un valor de ésta de 1,3 g/cc a'proximadamente.

En la Figura 2.4, indica la variación de sensibilidad del anfo pesado conforme aumenta el porcentaje de emulsión. La sensibilidad disminuye al incrementarse la densidad, siendo necesario cada vez un iniciador de mayor peso. Para una densidad de 1,33 se necesita un multiplicador de pentolita de 450 g, como mínimo (Tecnología y seguridad minera, 1994).

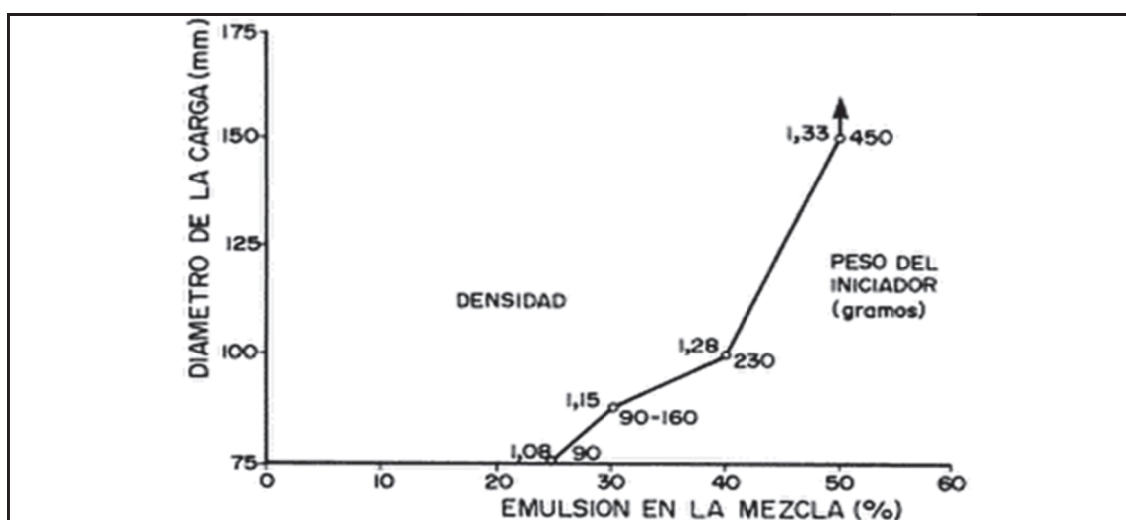


Figura 2. 4 Variación de sensibilidad de anfo pesado con el porcentaje de emulsión

Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas, (Bampffield y Morrey, 1984)

2.4.1. Descripción de Heavy Anfo

La explotación en tajos de la fase 3, 4 y 5, de la mina Toquepala, la mayoría de las operaciones mineras usan Heavy Anfo 55, porque resulta una fragmentación de roca, que llega por debajo a P80 y no cumple con los estándares de fragmentación de la roca, y también genera un costo al realizar la carga de columna y cuando se presentan taladros con agua la mezcla explosiva disminuye su velocidad de detonación, como se muestra en la Figura 2.5, la composición del porcentaje de la mezcla Heavy Anfo 55, en esta parte del estudio se enfocó en evaluar la relación entre el nuevo explosivo Quantex.

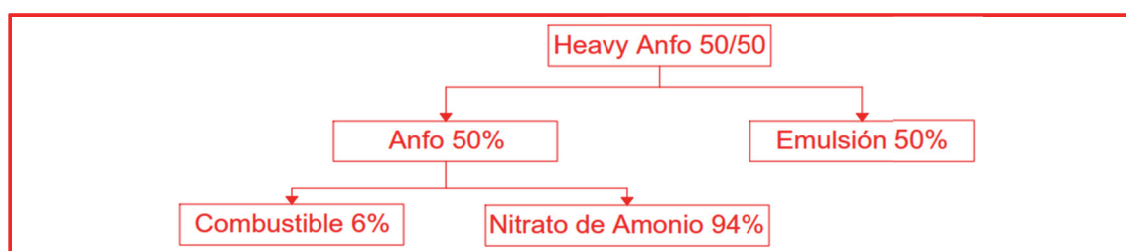


Figura 2. 5 Figura de composición del Heavy Anfo 55

Fuente: Propio de tesista

2.4.1.1. Densidad de Heavy Anfo

En el carguío de los explosivos en tajo de fase 3,4 y 5, se empleaban el Heavy Anfo 55 con una densidad que se muestra en la Tabla 2.1, y los diámetros de los taladros en donde nos permite evaluar el costo de la mezcla explosiva de los diferentes porcentajes de Heavy Anfo y ver los resultados de la fragmentación de la roca.

Tabla 2. 1 Densidad de diferentes tipos de Heavy Anfo - Toquepala

Mezcla	Densidad (g/cc)	Taladro 11” Densidad lineal (kg/ml)	Taladro 12 ^{1/4} ” Densidad lineal (kg/ml)
Anfo	0.76	46.38	57.52
HAnfo 46	1.15	70.73	87.72
HAnfo 55	1.27	78.03	96.77
HAnfo 64	1.30	79.75	98.90

Fuente: Hinostroza Sierra, Jaime Roosevelt

2.4.1.2. Velocidad de detonación de Heavy Anfo 55

Es la velocidad a la que la onda de detonación se propaga a través del explosivo y por tanto es el parámetro que define el ritmo de liberación de energía. Como se muestra en la Tabla 2.2, la velocidad con que viaja la onda a lo largo de una columna explosiva, sea al aire libre o en confinamiento dentro de un taladro de voladura.

Es el diámetro mínimo que debe tener la columna explosiva para que la reacción se propague en forma estable y completa.

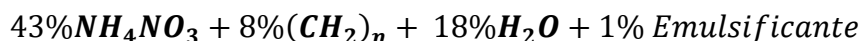
Tabla 2. 2 Velocidad de detonación de Heavy Anfo - Toquepala

Explosivo	Diámetro (pulg.)	Densidad (g/cc)	VOD (km/s)	Presión de Taladro (Mpa)
Anfo	11	0.76	4.1	1405.32
HAnfo 37	11	1.00	4.7	2429.90
HAnfo 46	11	1.15	5.1	3290.27
HAnfo 55	11	1.27	5.4	4073.65

Fuente: Hinostrroza Sierra, Jaime Roosevelt

2.4.1.3. Uso de emulsificantes

Estos explosivos fueron desarrollados para capitalizar el bajo costo del nitrato de amonio y para mejorar la energía disponible por volumen que se obtendría con el Anfo; por tal motivo, para que haya una explosión eficiente es necesario que este sea mezclado con una emulsión, la cual se agrega por dos razones: la primera es que le da propiedades de resistencia al agua, segunda es que eleva la velocidad de denotación del explosivo (VOD) en menores diámetros de carga. El nitrato la seguridad, reducir costos y mejorar la calidad de los humos. Esta es la fórmula de una emulsión promedio:



Los rangos de las cantidades de las sustancias químicas se presentan en la Tabla 2.3. La cantidad de emulsificante depende del lugar donde se use y el tiempo en que será almacenado (Mori et al. 2011).

Tabla 2. 3 Composiciones de una emulsión explosiva

Sustancia	Cantidad %	Uso
Nitrato de amonio	30 - 70	Oxidante
Nitrato de sodio	10 - 15	Oxidante
Nitrato de calcio	15 - 20	Oxidante
Nitratos de aminas alifáticas	40	Iniciador químico
Aluminio	3 - 10	Combustible
TNT u otro iniciador	5 - 25	Explosivo
Etilenglicol	3 - 15	Anticongelante
Agua	10 - 20	Medio

Fuente: Mori Flores, Jackelin Judith

En la industria se usan mezclas de anfo – emulsión, como por ejemplo:

- **Anfo Pesado 46** (40% de emulsión y 60% de anfo), esta es la mejor mezcla, tiene la más alta VOD y se usa en rocas muy duras, no es resistente al agua.
- **Anfo Pesado 55** (50% de emulsión y 50% de anfo), esta es una mezcla que tiene una pequeña resistencia al agua, una menor VOD y es más caro por tener una mayor porción de emulsión, su uso es muy restringido.
- **Anfo Pesado 64** (60% de emulsión y 40% de anfo), esta mezcla es la más cara de todas, de uso está restringido para zonas con humedad, su característica principal es su resistencia al agua hasta 72 horas, razón por la cual tiene gran utilización en minería tajo abierto (Mori et al. 2011).

2.5. Agente explosivo Quantex

Explosivo desarrollado por Exsa a partir del nitrato de amonio Quantex y una variante de la emulsión para gasificar: Slurrex Q, se trata de un anfo pesado 73 gasificado que puede llegar a tener densidad finales de carga por encima de cualquier otro producto gasificado, por tanto alcanzar mayor energía, esto también puede ayudar para roca extremadamente dura como se muestra en la Figura 2.6.

El nitrato de amonio Quantex es un nitrato de alta densidad con un tratamiento especial que le permite integrarse de una manera perfecta a la emulsión gasificada Slurrex G, antes del proceso de gasificación para entregar la mayor energía posible sin

sacrificar mayor consumo de explosivo. La densidad inicial de Quantex es mucho mayor a un nitrato estándar pero ello no quiere decir que se consumirá mayor cantidad de explosivo porque la densidad final que quiere las empresas será exactamente la misma que emplea siempre, solo bastará con incrementar o disminuir el caudal del agente reactivo (nitrito de sodio), para obtener la densidad deseada con fortaleza que inclusive tendrá mayor cantidad de puntos calientes (Rendon, 2015).

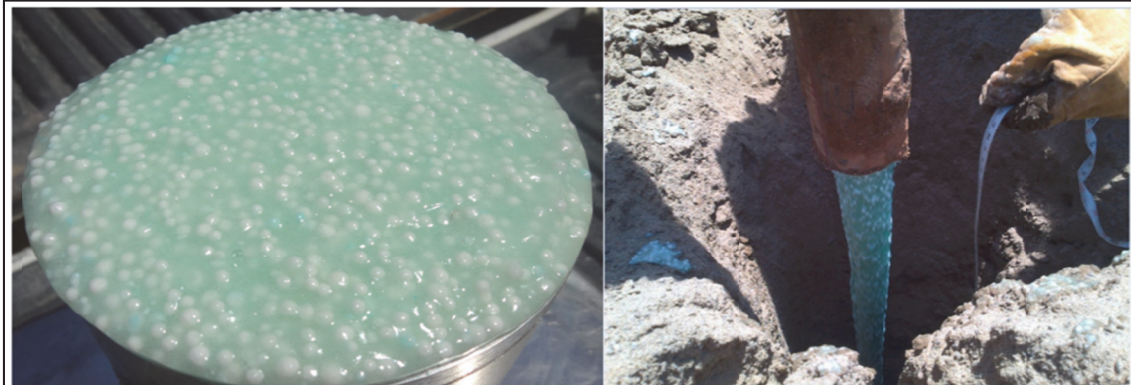


Figura 2. 6 Mezcla explosiva Quantex

Fuente: Exsa soluciones exactas

2.5.1. Componentes de la tecnología Quantex

a) Emulsión matriz gasificable

Es una emulsión oxidante inerte no detonable para efectos del transporte hasta ser sensibilizado en el lugar de la aplicación para formar un agente de voladura, es decir funciona como anfo pesado al mezclarlo con anfo en determinadas proporciones o como emulsión gasificada y anfo pesado gasificado al aplicarle la solución para gasificar.

La solución oxidante inerte para gasificar posee en su formulación un medio ácido que le permite reaccionar con la solución para gasificar, además contiene un acelerador de la reacción que permite tener un producto sensibilizado a los 25 minutos de haber vertido la emulsión al taladro (Rendon, 2015).

b) Nitrato de amonio Quantex

En la Figura 2.7, se muestra al nitrato de amonio de alta densidad que pasa por un proceso de tratamiento para optimizar su uso como explosivo. Gracias a su alta densidad, permite generar el equilibrio perfecto en la mezcla explosiva gasificada, el proceso de gasificación sensibiliza a la emulsión, bajando su densidad, el nitrato Quantex aporta mayor energía a una mezcla final altamente sensitiva, minimizando así los costos de voladura, logrando una buena fragmentación de roca. Es usado principalmente en la fabricación de anfo, para mezclas pesadas y gasificadas que contienen 70% de emulsión.

Solo añadir 3% de diesel 2; de preferencia, la mezcla entre el nitrato de amonio y el diesel 2 debe efectuarse por un módulo especial o camión mezclador que esté especialmente diseñado para este fin (Rendon, 2015).



Figura 2. 7 Nitrato de amonio de Quantex

Fuente: EXSA soluciones exactas

c) Solución para gasificar

Es una sal oxidante en solución, posee una coloración especial para su correcta visualización al integrarse a la emulsión matriz para gasificar. El porcentaje de solución para gasificar determina la densidad final del anfo pesado gasificado o emulsión gasificada, es decir existen distintos porcentajes de esta sal en solución para obtener densidades en una rango de 0.90 a 1.24 g/cc (Rendon, 2015).

2.5.2. Descripción del agente explosivo Quantex 73

El porcentaje de la mezcla explosiva Quantex 73 y el 0.14% de nitrito de sodio para roca de dureza intermedio que se muestra en la siguiente Figura 2.8.

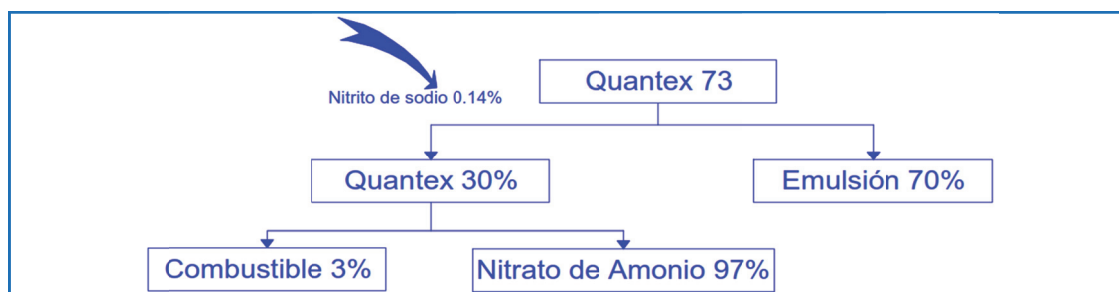


Figura 2. 8 Composición del nuevo agente explosivo Quantex 73

Fuente: Propio del tesista

2.5.2.1. Densidad de Quantex

La solución acuosa de nitrito de sodio varía de acuerdo al porcentaje de su mezcla y regula la cantidad de burbujas de N_2 , en el producto Quantex cuando pasan los minutos varían las densidades del explosivo Quantex73, como se muestra en las pruebas que se realizó y se muestra en las Figuras 2.9, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13 y 2.14. Y viendo el cambio de las densidades en un 35 minutos y se determina la velocidad de voladura y el factor de esponjamiento que produce de acuerdo al porcentaje de la mezcla del nitrito de sodio.

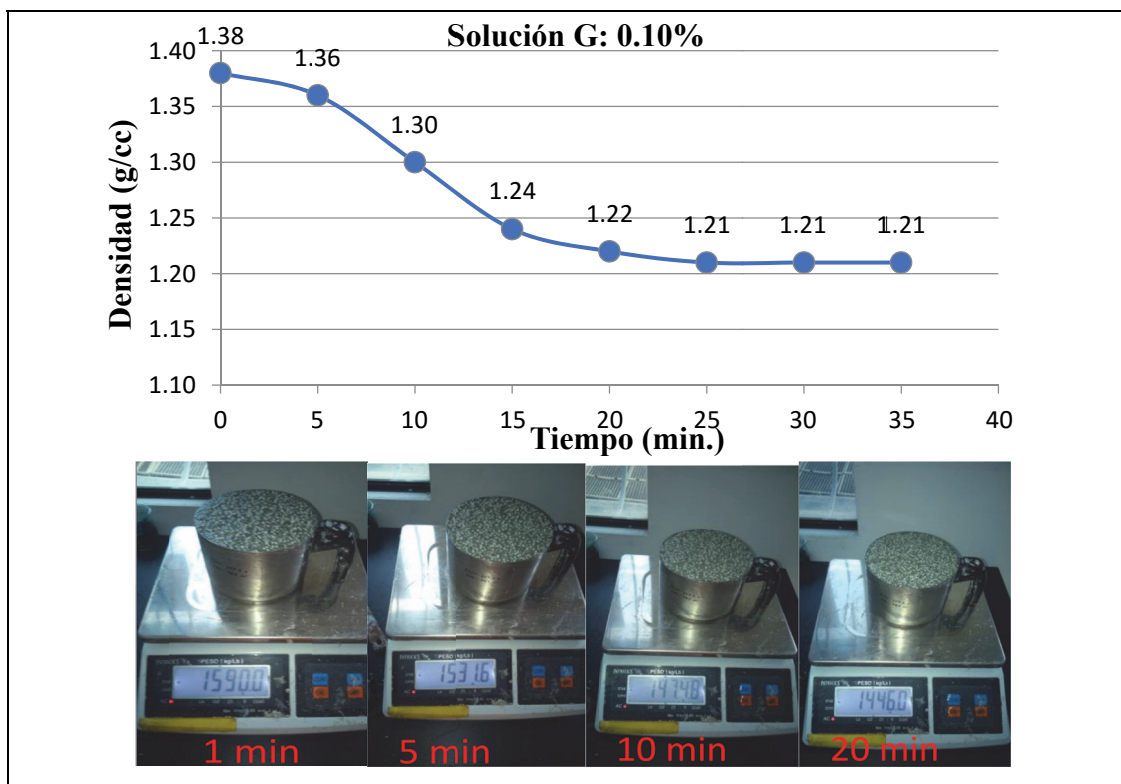


Figura 2. 9 Densidad de MEQ-73 con 0.10% de nitrito de sodio.

Fuente: Iglesias S., Luis – Exsa soluciones

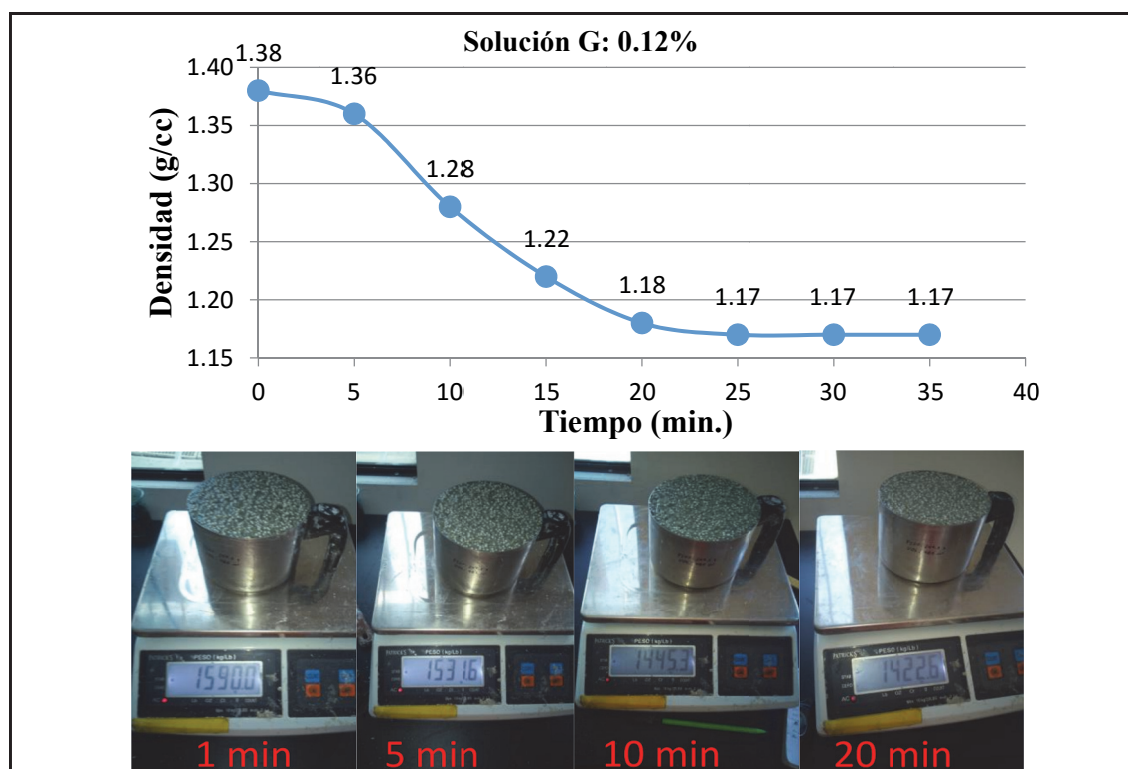


Figura 2. 10 Densidad de MEQ-73 con 0.12% de nitrito de sodio

Fuente: Iglesias S., Luis – Exsa soluciones

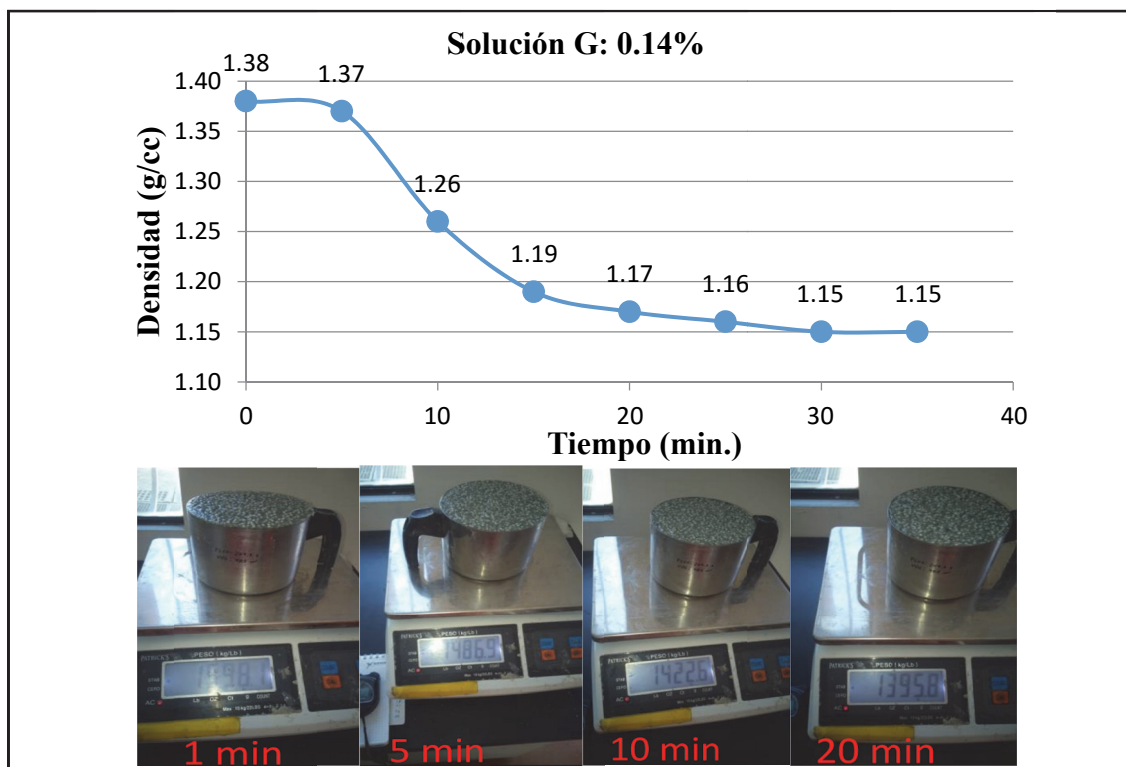


Figura 2. 11 Densidad de MEQ-73 con 0.14% de nitrito de sodio

Fuente: Iglesias S., Luis – Exsa soluciones

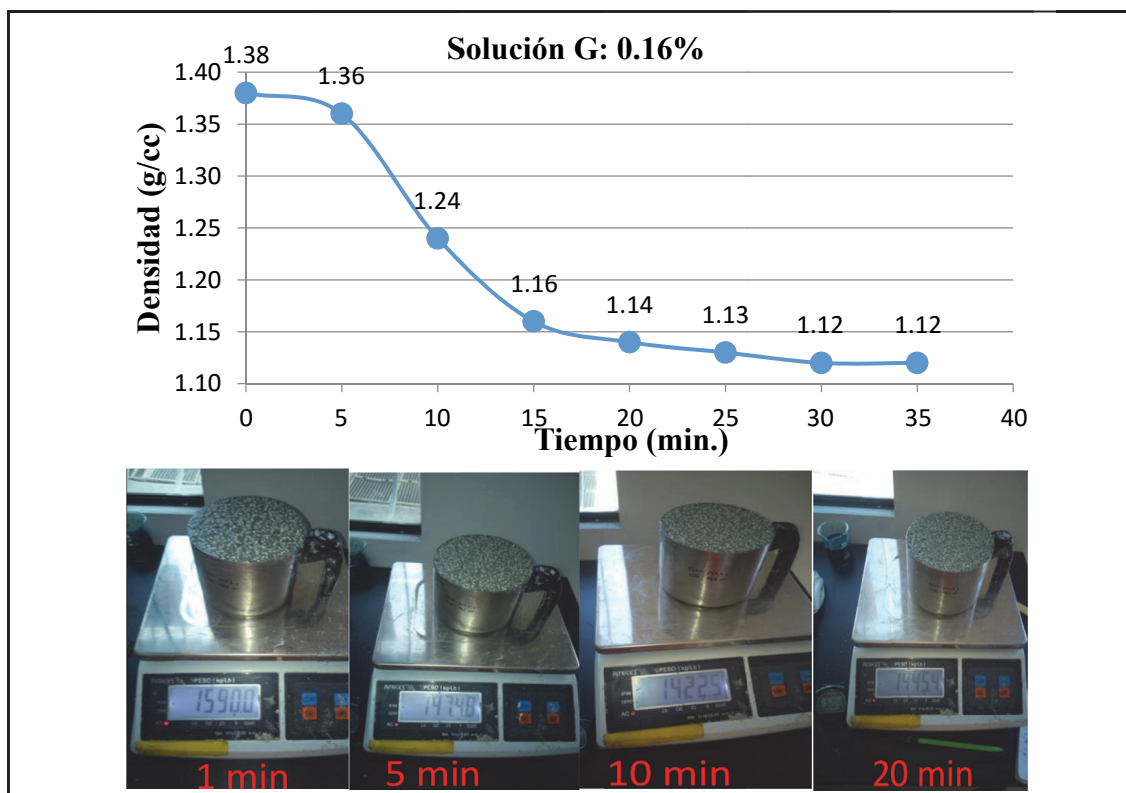


Figura 2. 12 Densidad de MEQ-73 con 0.16% de nitrito de sodio

Fuente: Iglesias S., Luis – Exsa soluciones

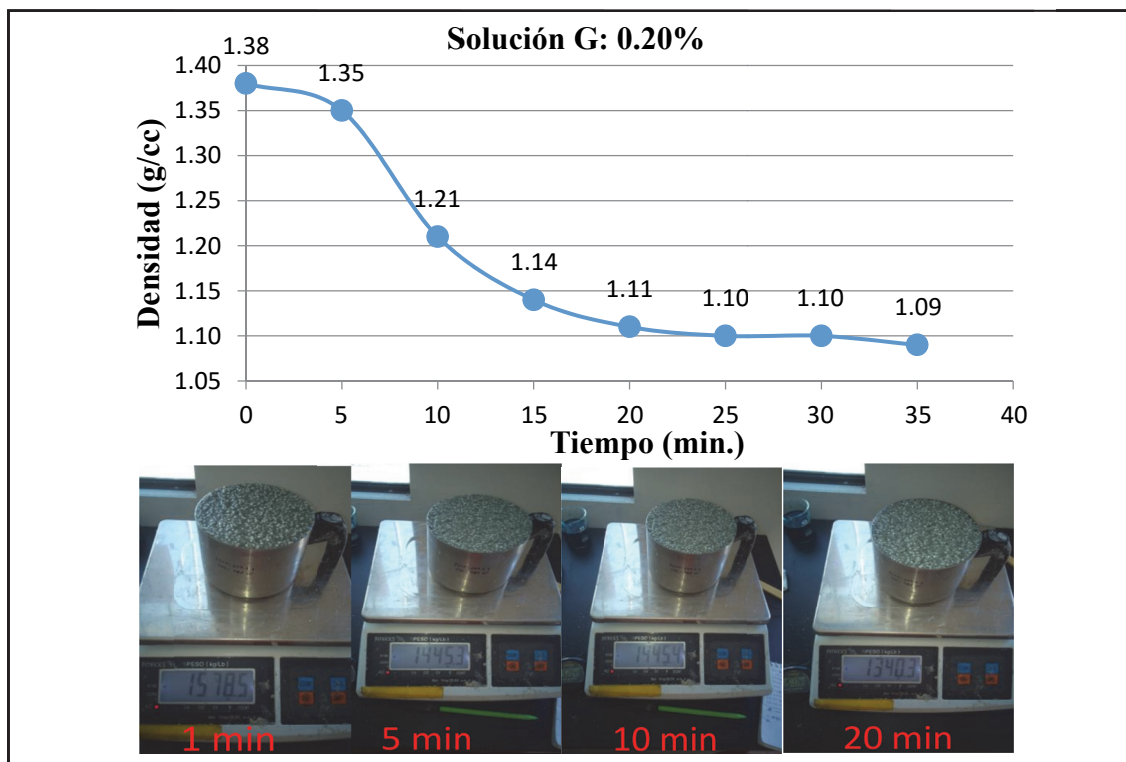


Figura 2. 13 Densidad de MEQ-73 con 0.20% de nitrito de sodio

Fuente: Iglesias S., Luis – Exsa soluciones

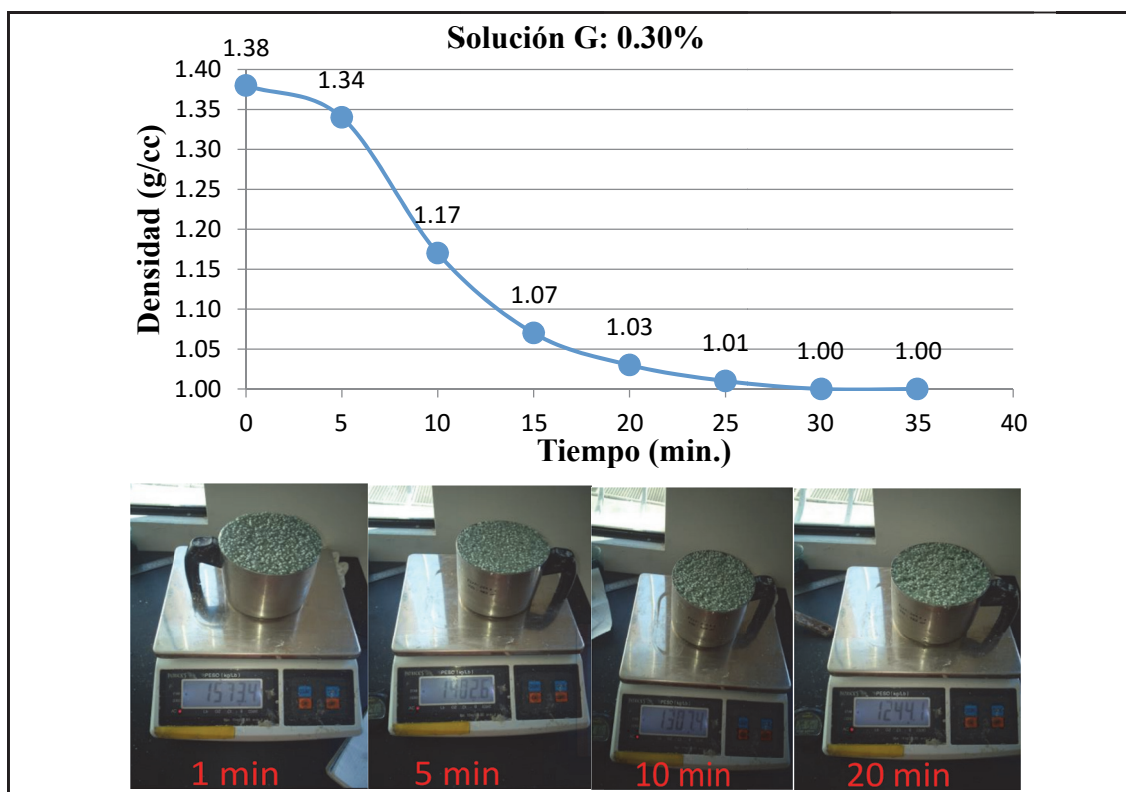


Figura 2. 14 Densidad de MEQ-73 con 0.30% de nitrito de sodio

Fuente: Iglesias S., Luis – Exsa soluciones

2.5.2.2. Velocidad de detonación Quantex

En la Tabla 2.4, se muestra el factor de esponjamiento de acuerdo al porcentaje de la mezcla del nitrito de sodio, donde se esponjara en la columna de carga de los taladros que serán cargados y la velocidad de detonación del agente explosivo Quantex es determinante; la densidad final de la mezcla explosiva y la dureza de la roca, para poder cargar a los taladros de producción y amortización en el tajo de fase 3,4 y 5.

Tabla 2. 4 Densidades finales del Quantex - Toquepala

Densidad Mezcla (g/cc)	Densidad Final (g/cc)	Nitrito de Sodio %	Esponj. (m)	VOD (m/s)
1.38	1.21	0.10	0.40	5793
	1.17	0.12	0.55	5600
	1.15	0.14	0.70	5453
	1.12	0.16	0.80	5350
	1.09	0.20	0.90	5172
	1.00	0.30	1.20	4954

Fuente: Análisis de laboratorio MEQ 73-Exsa soluciones

2.5.2.3. Presión de detonación

Como las emulsiones tienen una gran velocidad de detonación y una razonable densidad, también como consecuencia de eso disponen de una relativamente alta presión de detonación. Las mediciones realizadas a diferentes tipos de emulsión, indican que la presión de detonación está entre 1000 y 1200 Mpa (100 y 120 Kbar), lo cual es particularmente apropiado para mejorar la fragmentación en rocas duras y para ser usadas como iniciador para anfo (Salcedo, 2015).

$$P_{Det}(Pa) = 0.25 * VOD^2 * \rho \tag{Ecuación 2. 4}$$

Dónde:

P_{Det} : Presión de detonación (Pa)

VOD : Velocidad de detonación (m/seg)

ρ : Densidad final del explosivo (kg/m^3)

2.5.2.4. Densidad de copa

Esta densidad solo se encuentra invariable en la parte superior de la columna explosiva. Durante el tapado la parte superior de la columna experimenta compresión por peso del taco.

Sin embargo esta densidad puede medirse con mucha precisión en campo, aunque no permanecerá mucho tiempo con ese valor cuando la mezcla experimente compresión dentro del taladro como se muestra en la Figura 2.15 (Iglesias, 2015).

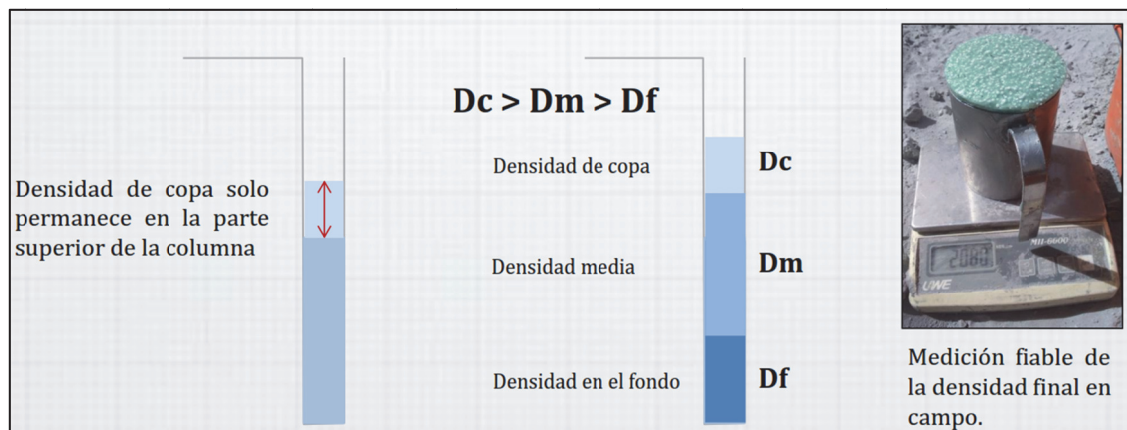


Figura 2. 15 Densidad del Quantex - Toquepala

Fuente: Exsa soluciones

2.5.2.5. Presión hidrostática en la columna explosiva

La presión generada en cada punto dentro de la columna explosiva es igual al resultado de la suma de la presión atmosférica, la presión generada por el taco y la columna explosiva superior al punto en mención como se muestra en la Figura 2.16. (Salcedo, 2015).

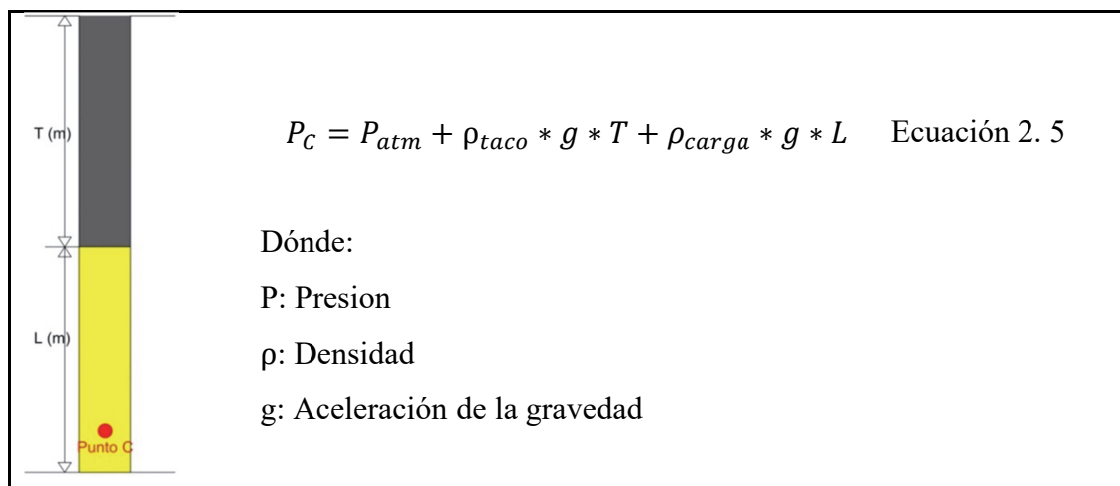


Figura 2. 16 Calculo de la presión en un punto dentro de la columna explosiva
 Fuente: Exsa soluciones

La emulsión, al ser una mezcla de líquidos inmiscibles, es propensa a ser comprimido (por consiguiente a tener una mayor densidad que la registrada en una balanza por medio de una taza) dependiendo de la presión que ejerza el peso sobre la carga explosiva. Se han realizado pruebas en donde se compara la densidad de taza con la densidad promedio de la columna de explosivo calculada a partir del esponjamiento final luego de 20min promedio para taladros de 12 ¼ y 11 pulgadas de diámetro. Con una profundidad del taladro de 16.5 m. el método de cálculo se grafica en al siguiente Figura 2.17 (Salcedo, 2015).

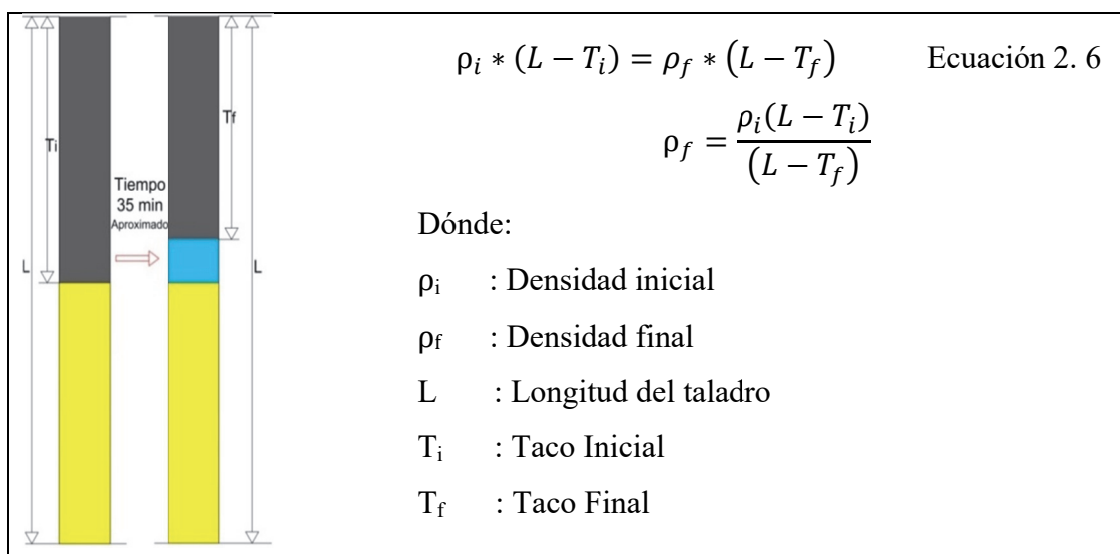


Figura 2. 17 Cálculo de la densidad promedio real de la columna explosiva luego del esponjamiento
 Fuente: Exsa soluciones

2.5.2.6. Factor de esponjamiento de mezcla explosiva Quantex en taladros

La ventaja del nuevo agente explosivo Quantex, tiene la capacidad de esponjarse de acuerdo al contenido del porcentaje del nitrito de sodio en el interior del taladro. El nitrato de amonio de Quantex mantiene su densidad para que genere una mayor fuerza y la emulsión que tiene una resistencia al agua.

El diseño de los taladros en la mina Toquepala se utiliza tres tipos de taladro como:

a) Esponjamiento en taladros de producción

Los taladros de producción se realizan en la parte de minerales de alta ley de cobre y molibdeno en donde, son marcados antes de realizar la voladura por el área de geología. Y se realiza con un mayor factor de carga de columna de Quantex, en los taladros de producción. En donde el material volado debe ir a la planta de molino de la mina Toquepala. Como se muestra en la siguiente Figura 2.18.

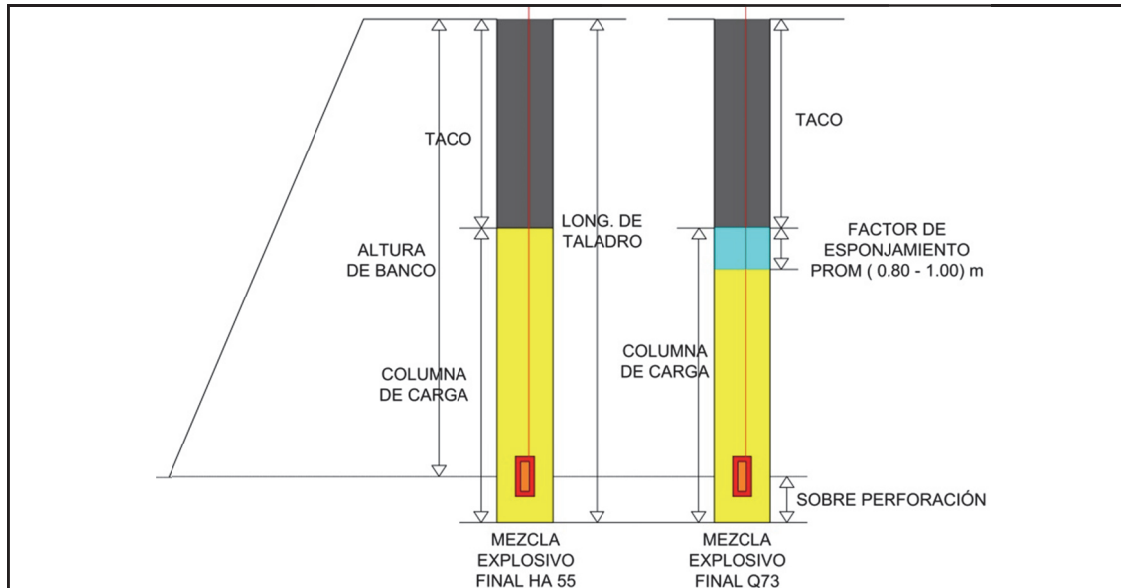


Figura 2. 18 Diseño para taladros de producción

Fuente: Propio del tesista

b) Esponjamiento en taladros de amortiguación

Los taladros de amortiguación o también llamados taladros de contorno se han modificado el diseño, tanto en su longitud de carga que es más reducida en las cargas de mezcla explosivo Quantex, los cuales son menores como se muestra en la Figura 2.19. La finalidad de estos taladros es reducir el daño hacia el talud o plataforma de una malla adyacente, es decir, minimizar el over break y el back break. La voladura diseñada el material se tiene que transportar a la planta de lixiviación o la planta de molino. Para su posterior recuperación de cobre y molibdeno.

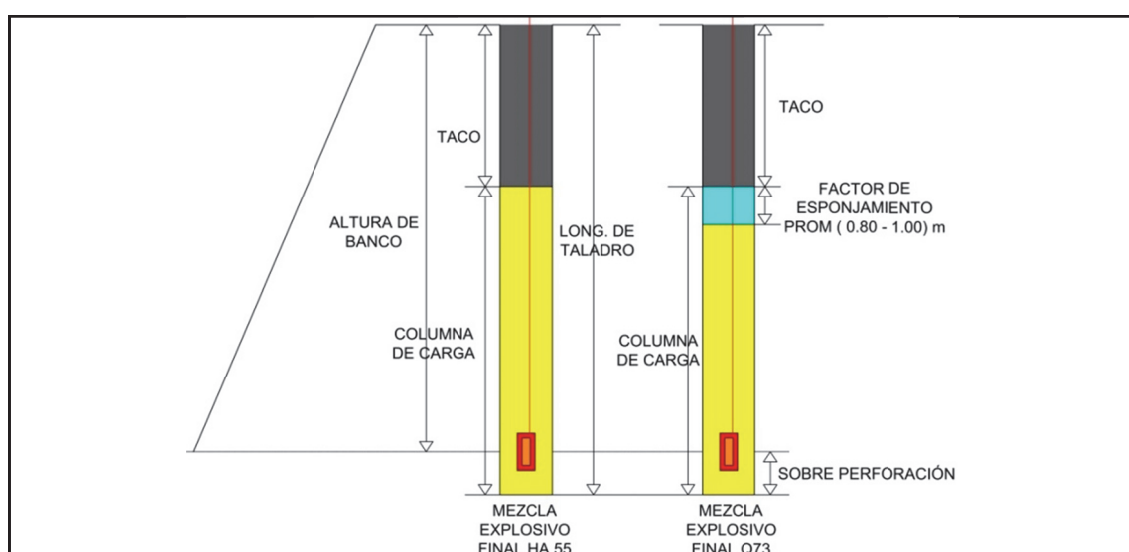


Figura 2. 19 Diseño para taladros de amortiguación

Fuente: Propio del tesista

c) Esponjamiento en taladros de Trim

En este tipo de taladros Trim, se muestra en la Figura 2.20. Se realiza la voladura con una menor carga de mezcla explosivo Quantex, debido a que se debe cuidar la cara del tajo, en este taladro ya no se realiza la sobre perforación para poder controlar la deformación la cara del tajo.

Los taladros Trim, son diseñados para cuidar la cara de los taludes, para que no se presente un deslizamiento de taludes en la zona de los trabajos de carguío de los materiales y también para no producir un deslizamiento de rocas.

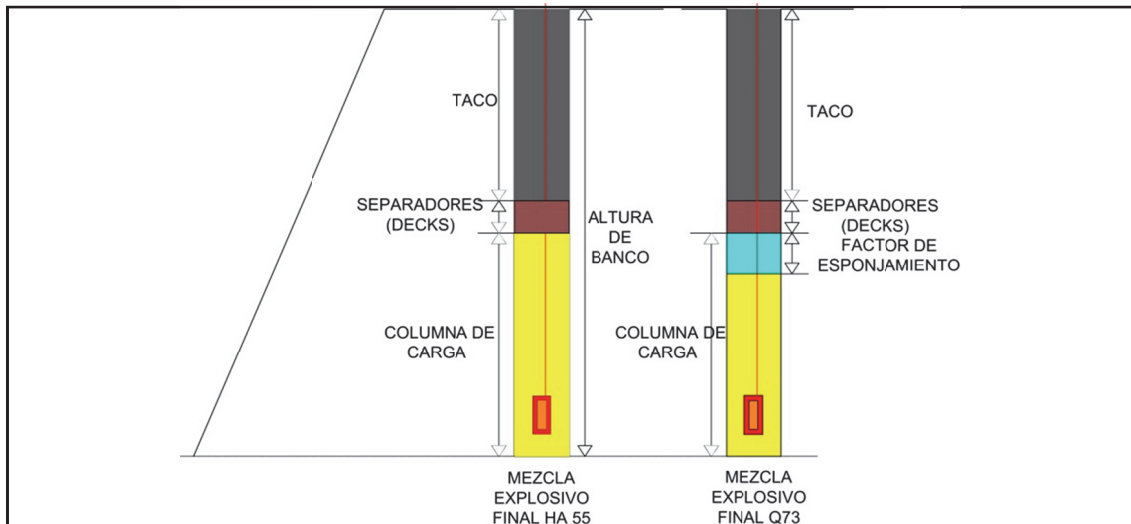


Figura 2. 20 Diseño de taladros Trim

Fuente: Propio del tesista

2.5.2.7. Estándar de partida en la mina Toquepala

Se establece el rango de densidades óptimo para cargar en las distintas partes de una longitud de carga en taladros de la mina Toquepala, que muestra la Figura 2.21. (Iglesias, 2015).

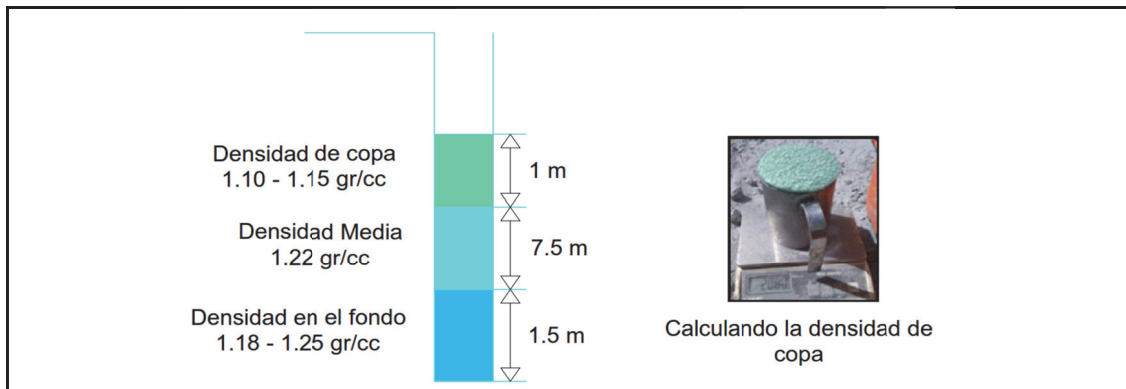


Figura 2. 21 Densidad de Quantex en diferentes partes del taladro – Toquepala

Fuente: Exsa soluciones

2.5.2.8. Control de la mezcla de explosivo Quantex

Los personales que están involucrados en realizar el carguío del agente explosivo Quantex, se observa en la Figura 2.22, que el cambio es constantemente la calidad de la

mezcla, su textura y su coloración. Y medir la densidad de acuerdo al procedimiento de carguío y de la medición de esponjamiento (Iglesias, 2015).



Figura 2. 22 Control de la mezcla Quantex - Toquepala

Fuente: Exsa soluciones

2.5.2.9. Sistemas de carguío de Quantex

a) Sistema vaciable

Se muestra en la Figura 2.23. En los taladros secos se deja caer el agente explosivo Quantex, desde la boca del taladro. El flujo de la mezcla explosiva Quantex cae relativamente hasta el fondo del taladro, de tal forma que no se descostren las paredes del taladro y provoque la contaminación del explosivo.



Figura 2. 23 Sistema vaciable

Fuente: Exsa soluciones

b) Sistema bombeable

Este sistema se utiliza cuando tenemos presencia de agua en el fondo del taladro. En la Figura 2.24, se muestra como introduce la manguera hasta el fondo del taladro que se encuentra en el posterior del camión mezclador una vez teniendo instalado se procede a cargar la mezcla explosiva y así subiendo el nivel de agua, para que no quede acumulado el agua en el fondo del taladro.

Teniendo en cuenta que la densidad de la mezcla explosiva es mayor que el agua. Por lo tanto que la mezcla explosiva tiene mayor peso que el agua.



Figura 2. 24 Sistema bombeable

Fuente: Exsa soluciones

c) Parámetros en sistema de carguío de mezcla Quantex

Los parámetros en estos dos sistemas de carguío de la mezcla explosiva Quantex a los taladros de producción y amortiguación, se encuentra una diferencia de la velocidad de descarga de la mezcla explosiva. Como se muestra en la Tabla 2.5 (Tecnología Quantex, 2015).

Tabla 2. 5 Parámetros de sistema de carguío del Quantex - Toquepala

Parámetros	Sistema de Carguío	
	Vaciable	Bombeable
Presencia de agua	NO	SI
Velocidad de descarga (kg/min)	560	280
Flujo de nitrato (LPM)	0.8 a 1.0	0.4 a 0.6
Tiempo de carga por taladro (min)	1.6	3.1
Densidad de ME inicial (g/cc)	1.40	1.36
Densidad de ME final (g/cc)	1.15	1.12
Presión de bombeo (psi)	50-60	

Fuente: Exsa soluciones

2.6. Parámetros dimensionales de perforación

2.6.1. Diámetro de taladro

La selección del diámetro de taladro es crítica considerando que afecta a las especificaciones de los equipos de perforación, carga y acarreo, también al burden, espaciado distribución de la carga explosiva, granulometría de la fragmentación, tiempo a emplear en la perforación y en general a la eficiencia y economía de toda la operación (Exsa, 2013).

2.6.2. Burden

También denominado piedra, bordo o línea de menor resistencia a la cara libre. Es la distancia desde el pie o eje del taladro a la cara libre perpendicular más cercana, también la distancia entre filas de taladros en una voladura. Se considera el parámetro más determinante de la voladura, depende básicamente del diámetro de perforación, de las propiedades de la roca, altura de banco y las especificaciones del explosivo a emplear. Se determina en razón del grado de fragmentación y al desplazamiento del material volado que se quiere conseguir (Exsa, 2013).

2.6.3. Espaciamiento

La distancia entre taladros de una misma fila que se disparan con un mismo retardo o con retardos diferentes y mayores en la misma fila. Se muestra en la Figura 2.25, se calcula en relación con la longitud del burden, a la secuencia de encendido y el tiempo de retardo entre taladros (Exsa, 2013).

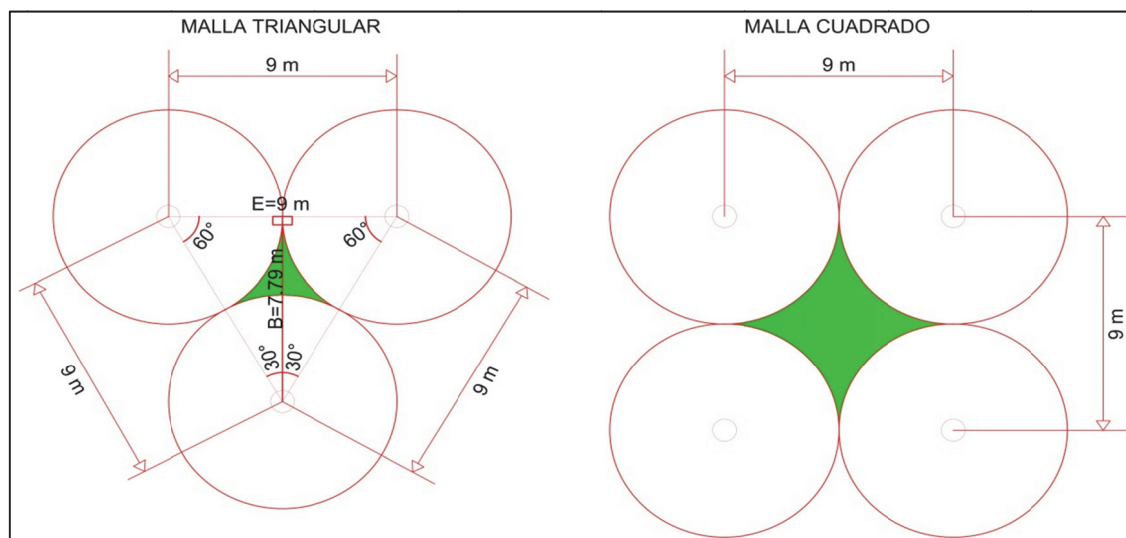


Figura 2. 25 Dimensiones del burden y espaciamento - Toquepala

Fuente: Diseño de mina Toquepala

2.6.4. Altura de banco

La altura es función del equipo de excavación y carga, del diámetro de perforación, de la resistencia de la roca de la estructura geológica y estabilidad del talud, de la mineralización y de aspecto de seguridad. En un equipo de carga y acarreo son determinantes la capacidad volumétrica (m^3) y la altura máxima de elevación del cucharón, además de su forma de trabajo (por levante en cargadores frontales y palas rotatorias o por desgarrar hacia abajo en retroexcavadoras). Mientras que las excavadoras y grandes palas a oruga, en bancos de 10 a 15 m y más, con taladros de 100 mm (4 a 12 pulgadas) o de diámetro, pudiéndose estimar la altura de banco con la siguiente formula: (Exsa, 2013)

$$H = 10 + 0.57(C - 6)$$

Ecuación 2. 7

Dónde:

C : capacidad del lampón de la excavadora

2.6.5. Malla de perforación

Muchas son las formulas propuestas por distintos autores para el cálculo del esquema o malla de perforación en las voladuras en banco. Todas ellas manejan uno o varios de los factores vistos anteriormente, denominados factores geométricos, inherentes al explosivo. El problema que surge en el cálculo de voladura es que no todos estos parámetros pueden determinarse con igual facilidad y grado de precisión. Además, algunos de ellos, como potencia del explosivo y la dureza de la roca, son conceptos genéricos que admiten interpretaciones diversas se muestra en Figura 2.26. (Bernaola et al. 2013).

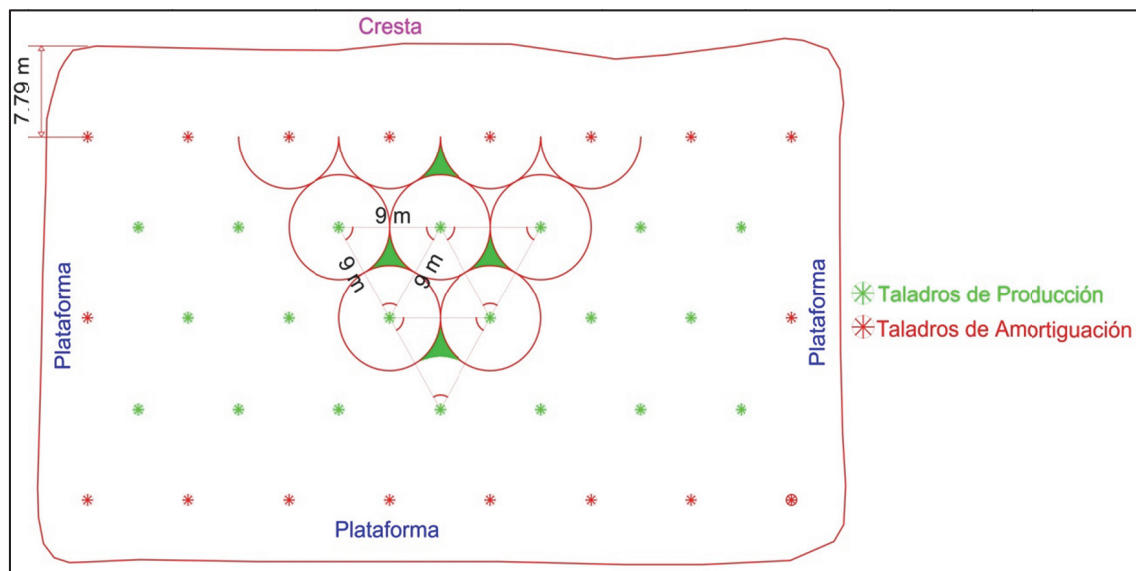


Figura 2. 26 Diseño de malla de perforación

Fuente: Propio del tesista

2.7. Sistema de iniciación electrónico (I-Kon)

Se muestra los componentes del I-Kon, en el **Anexo 01**, un moderno y preciso sistema de iniciación electrónico, que pueda controlar la energía desprendida por una

tronadura optimizando la fragmentación, disminuyendo daño por vibración además de controlar la dilución.

Este sistema redefine los conceptos de precisión, exactitud, flexibilidad y seguridad (Álvarez, 2015).

a) Detonador electrónico

Este detonador puede ser programable entre 0 a 15,000 milisegundos, con un incremento de 1 milisegundos, dando oportunidad a un amplio manejo de tiempos de amarre; contando de +/- 0.1% ms. Esto garantiza no tener overlap, que tiene la directa relación con la probabilidad de acoplamiento de las ondas de choque producidas por cargas detonadas simultáneamente.

El detonador electrónico cuenta con un número de identificación único de fábrica el cual permite tener registrado a cada detonador como muestra en la Figura 2.27. Se realiza la comunicación Bi-dirección entre el control del equipo y el detonador (Orica mining service, 2014).

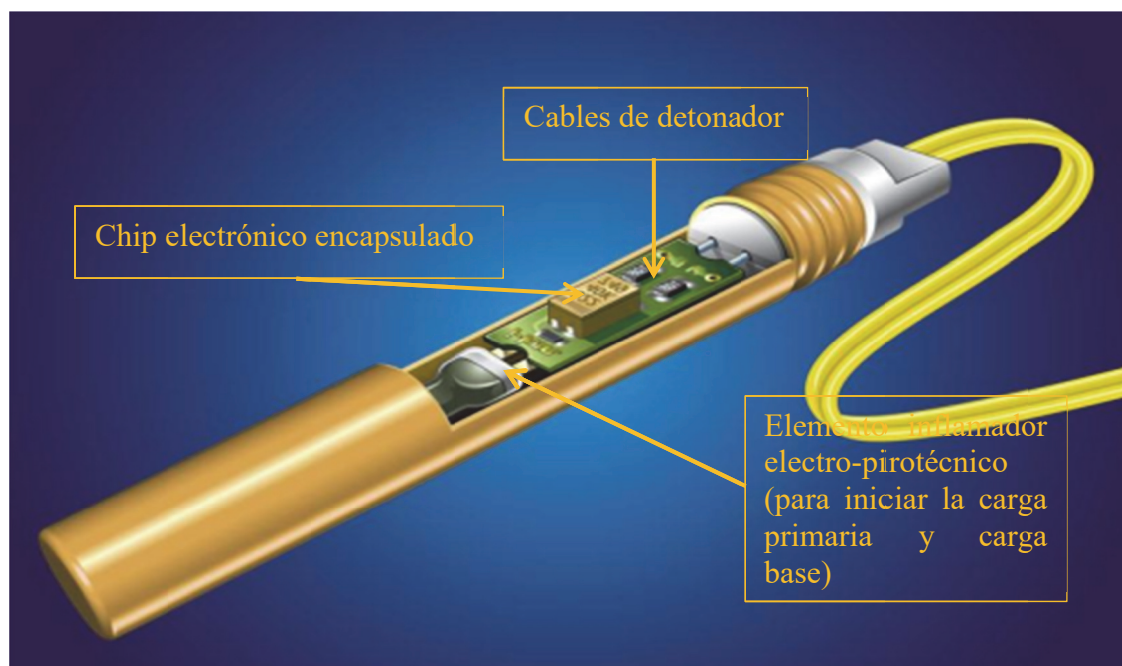


Figura 2. 27 Detonador electrónico

Fuente: Jose Alvarez R. consultor técnico OMS

b) Logger (Programador de retardos)

- Este dispositivo verifica el estado del detonador que se muestra en **Anexo 02**
- Lee y describe el ID del detonador en la memoria.
- Asigna tiempos de detonación.
- Chequea automáticamente el detonador y el cable, mediante un tes de continuidad de línea.
- Cada logger tiene una capacidad de registrar 200 detonadores.
- Es inherentemente seguro, tiene 5 voltios de salida (Orica mining service, 2014).

c) Blaster (sistema de iniciación de alta seguridad)

- Como se muestra en **Anexo 03**; Este equipo realiza un Auto chequeo completo y automático de la funcionalidad del detonador.
- Cuenta con una capacidad de 1600 detonadores (control de 8 logger con 200 detonadores por logger).
- Único con una llave de activación digital.
- Único con códigos de armado y fuego.
- Trabaja con un voltaje de salida de 24 voltios (Orica mining service, 2014).

2.8. Secuencia de encendido

Con la secuencia de encendido se puede variar no solo los desfases de tiempo entre la detonación de los distintos barrenos, sino también la dirección de salida de la voladura y de movimiento de la pila de material volado.

La iniciación secuenciada de los barrenos de una voladura en banco constituye una herramienta que permite variar de forma controlada los tiempos de salida de la carga o cargas contenidas en los barrenos, modificando de forma sustancial los esquemas nominales de perforación (piedra, espaciamiento), pasando a otros valores más adecuados a los objetivos fijados.

Los objetivos que se pretenden con la secuencia de encendido son los siguientes:

- Conseguir mayor fragmentación, esponjamiento y el desplazamiento de la roca volada de acuerdo con las operaciones siguientes.
- Reducir las proyecciones y sobre excavaciones.
- Minimizar la intensidad de las vibraciones transmitidas al macizo rocoso y la onda aérea producida (Bernaola et al, 2013).

2.8.1. Tiempo de retardo entre barrenos de la misma fila

Existen numerosos criterios recomendando el tiempo de retardo entre barrenos (TRB). Entre ellos cabe citar uno que relaciona el tiempo de retardo con la densidad de la roca y el consumo específico de explosivo necesario:

$$TRB = 2 * \sqrt{\frac{Dr}{CE}} \quad \text{Ecuación 2. 8}$$

Dónde:

TRB : tiempo de retardo entre barrenos. Expresado en milisegundos por metro de piedra.

Dr : densidad de la roca en TM/m^3 .

CE : consumo específico de explosivo en kg/cc (Bernaola et al. 2013).

2.8.2. Tiempo de retardo entre filas

En cuanto al tiempo de retardo entre filas (TRF), cabe utilizar la siguiente expresión:

$$TRF = K * TRB \quad \text{Ecuación 2. 9}$$

Oscilando K entre 2y3 dependiendo del destino posterior de la roca volada, así pues tiempos de retardo pequeños dan lugar a pilas más recogidas adecuadas para palas excavadoras y tiempos de retardo mayores pilas adecuadas para palas cargadoras (Bernaola et al. 2013).

2.9. Evaluación de voladura

2.9.1. Vibraciones en voladuras

a) Parámetros de las ondas

El paso de una onda sísmica por un medio rocoso produce en cada punto de este un movimiento que se conoce por vibración, las vibraciones generadas por las voladuras se consideran entonces como ondas de tipo sinusoidal, donde los parámetros básicos de análisis son:

- Amplitud: es el desplazamiento máximo de un punto del terreno desde su posición de reposo, en pulgadas o milímetros.
- Velocidad de partícula es la velocidad a la que se desplaza el punto, en pulg/s ó mm/s.
- Aceleración: es el ritmo de cambio de la velocidad, en pies/s² o m/s².
- Frecuencia: es el número completo de oscilaciones en ciclos por segundo.

En voladura, la amplitud es definida usualmente en términos de velocidad (pulg/s) y la frecuencia en Hertz, o ciclos por segundo (Pernia et al. 1987).

b) Origen de las vibraciones

Generalmente entre las vibraciones excesivas del terreno son causadas ya sea por colocar demasiada carga explosiva dentro del taladro o por el inapropiado diseño de la voladura, especialmente en lo referente a la energía que no es utilizada en fragmentar y desplazar la roca producirá vibraciones (por término medio un 40% de la energía del explosivo se gasta en generar ondas sísmicas en el entorno).

Por tanto los primeros factores a considerar son los parámetros geométricos del disparo, entre ellos:

- Diámetro del taladro: el aumento de diámetro es negativo para el efecto de vibración, pues la cantidad de explosivo por taladro es proporcional al cuadrado del diámetro resultando en cargas en ocasiones muy elevadas.
- Altura de banco: debe mantener una relación óptima a $H/B > 2$ para mejorar fragmentación y reducir las vibraciones al estar la carga menos confinada.
- Burden y espaciamiento: si el burden es excesivo, los gases de explosión encuentran resistencia para fragmentar y desplazar la roca, por lo que parte de la energía se transforma en sísmicas, incrementando las vibraciones.

Este fenómeno es más notorio en las voladuras de precorte, donde pueden registrarse vibraciones cinco veces superior a las voladuras convencionales si no se mantiene un adecuado control como se muestra en la Tabla 2.6.

La intensidad de la vibración en una localidad específica se determina mediante la siguiente relación empírica, usualmente denominada “ley de propagación”, que relaciona la velocidad de vibración máxima con la carga de explosivo y la distancia:

$$PPV = K \left(\frac{DH}{W^{1/2}} \right)^{-1.5} \quad \text{Ecuación 2. 10}$$

Dónde:

- PPV : Velocidad pico de partícula, en pulgadas por segundo (ó en mm/s)
- K : Constante empírica de transmisión de la roca (factor local)
- K : 500 en roca suave.
- K : 2500 en roca media.
- K : 5000 en roca dura.
- DH : Distancia horizontal entre la voladura y el punto de medición o registro, en pies o metros.
- W : Máximo peso de carga explosiva permisible por retardo (mínimo de 8 milisegundos) o carga de explosivo detonado instantáneamente, en libras o kilos (W también se indica con la letra Q en diversa literatura).

n : Constante empírica determinada por las condiciones geológicas existentes en el lugar, usualmente 1,5 (Hinostroza, 2014).

Tabla 2. 6 Daños por vibración en las voladuras

PPV		Daños potenciales
mm/s	pulg/s	
13	0.51	Daños superficiales (3-15 Hz)
19	0.75	Daños menores a estructuras compuestas (3-15 Hz)
70	2.75	Daños medios estructurales
140	5.50	Hasta 50% de daños estructurales
190	7.50	Más de 50% de daños estructurales

Fuente: Jaime Roosevelt, Hinostroza Sierra

2.9.2. Fragmentación de la roca

a) Factor de carga

$$FC = \frac{Q_e}{V_o * \rho_r} \tag{Ecuación 2. 11}$$

Dónde:

V_o : Roca tronada por tiro (Burden*Espaciamiento*Altura Banco) (m³)

Q_e : Masa de explosivo cargada en el tiro (kg)

ρ_r : Densidad roca (TM/m³)

$$Q_e = \frac{\pi \phi^2 L \rho_e}{4} \tag{Ecuación 2. 12}$$

Dónde:

L : Altura cargada con explosivos (m)

ϕ : Diámetro de perforación (m)

ρ_e : Densidad de carga de explosivos (TM/m³) (Orellana, 2011).

b) Modelo de Kuznetsov Rambler

Modelo Kuz – RAM para obtener un valor promedio de fragmentación.

$$X_{50} = A \left(\frac{V_0}{Q_e} \right)^{0.8} * Q_e^{\frac{1}{6}} * \left(\frac{115}{S_{anfo}} \right)^{0.633} \quad \text{Ecuación 2. 13}$$

Dónde:

X_{50} : Tamaño medio de los fragmentos o d50 (cm)

V_0 : Roca tronada por tiro (Burden*Espaciamiento*Altura Banco) (m³)

Q_e : Masa de explosivo cargada en el tiro (kg)

S_{ANFO} : Potencia relativa en peso al Anfo. (Anfo = 100, TNT = 115)

A : Índice de tronabilidad y/o factor que depende del tipo de roca (Orellana, 2011).

c) Índice de Tronabilidad o factor de roca

El factor de roca es la variable que cuantifica al macizo rocoso para efectos de una voladura se obtiene mediante la interpretación de propiedades: geológicas, físicas y estructurales del macizo. En muchos casos interpretar correctamente al macizo rocoso resulta complicado, dada la poca información disponible y su limitada representatividad en comparación la extensión de un proyecto, para lo cual es necesario considerar la zona más extensa o si existe la posibilidad de analizar más de un factor de roca.

El factor de roca estimado debe ajustarse a las ecuaciones de tamaños de fragmentos como se muestra en la Tabla 2.7, es necesario que las tendencias del factor de roca y los tamaños de los fragmentos sean las correctas, esto debe ser corroborado antes de incluirla como variable del modelo matemático (Orellana, 2011).

$$A = 0,06 * (RMD + JF + RDI + HF) \quad \text{Ecuación 2. 14}$$

Dónde:

RMD : describe la masa rocosa

- RDI : describe el efecto de la densidad de la roca
- HF : la influencia de la dureza de la roca

Tabla 2. 7 Factor “A” de Cunningham

Símbolo	Descripción	Valores
A	Factor de roca	8 a 12
RMD	Descripción de la masa rocosa - Desmenuzable/Friable - Verticalmente Fracturado - Masivo	10 JF 50
JF	JPS+JPA	
JPS	Espaciamiento de la fractura vertical - < 0.1 m - 0.1 a MS - MS a DP	10 20 50
MS	Muy grande (m)	
DP	Tamaño (m) del diseño de perforación asumido DP > MS	
JPA	Angulo del plano de las fracturas - Buzamiento hacia fuera de la cara - Perpendicular a la cara - Buzamiento hacia dentro de la cara	20 30 40
RDI	Índice de densidad de la roca	25xRD-50
RD	Densidad (TM/m ³)	
HF	Factor de dureza - Si y < 50 Gpa - Si y > 50 Gpa	HF=y/3 HF=UCS/5
Y	Módulo de Young (Gpa)	
UCS	Fuerza compresiva no confinada (MPa)	

Fuente: Cunningham, 1987

d) Ecuación de Rossini-Rammler

$$F_U(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_c}\right)^n}$$

Ecuación 2. 15

Dónde:

Xc : Tamaño característico (cm) igual a d_{63,2}

$F_U(x)$: Función acumulado bajo tamaño
 n : Índice de uniformidad (adimensional)

Considerando que kuznetsov entrega X_{50} se resuelve de R-R y se llega a: (Orellana, 2011).

$$X_c = \frac{X_{50}}{0.693^{\frac{1}{n}}} \quad \text{Ecuación 2. 16}$$

e) Índice de uniformidad de Rosin-Rambler

La expresión para “n” desarrollada por cunningham (1987) a partir de pruebas de campo es: (Orellana, 2011).

$$n = \left(2.2 - \frac{14B}{D}\right) * \left(\frac{1 + \frac{S}{B}}{2}\right)^{0.5} * \left(1 - \frac{W}{B}\right) * \left(\frac{L}{H}\right) * PS \quad \text{Ecuación 2. 17}$$

Los valores del burden (B): conjuntamente con el espaciamiento utilizado en la (Ecuación 2.17) pertenecen al modelo de perforación y no al modelo de sincronización. Cuando hay dos diferentes explosivos en el taladro (carga de fondo y carga de columna la (Ecuación 2.18) se modifican a: (Orellana, 2011).

$$n = \left(2.2 - 14\frac{B}{D}\right) \left(1 - \frac{W}{B}\right) \left(\frac{1 + \frac{S}{B}}{2}\right)^{0.5} \left(\left(\text{abs}\left(\frac{BCL - CCL}{L}\right)\right) + 0.1\right)^{0.1} \frac{L}{H} * PS \quad \text{Ecuación 2. 18}$$

Dónde:

B : Burden (m)
 S : Espaciamiento (m)
 W : Desviación pozos (m)
 L : Largo tiro (m)

H	: Altura del banco (m)
D	: Diámetro tiro (mm)
BCL	: Carga fondo (m)
CCL	: Carga columna (m)
abs	: Valor absoluto
PS	: 1,1 para malla escalonada (Orellana, 2011).

2.9.3. Control de la generación de fly rocks

Las formas para intentar controlar la generación de “flyrocks” se presentaran a continuación, sin embargo es preciso adelantar que la necesidad de bajar la generación de “flyrocks” como asimismo, la de minimizar la longitud de proyección para los mismos, puede implicar forzosamente aceptar en casos más críticos, realizar tronaduras menores, usar explosivos desacoplados (encartuchados), usar material de taqueo especialmente seleccionado en la fracción de tamaño adecuado (roca canchada) o bien, dispositivos de retención colocados dentro del taco. Esto último puede significar que las tronaduras en zonas críticas pueden complicarse y además tener que sacrificar (¡ojala lo menos posible!), la granulometría generada por el disparo, rendimientos de equipos y costos asociados. ¡¡A no dudar, esto podría llegar a constituirse en un problema de interés contrapuesto de riesgos y beneficios!! (Enaex, 2014).

a) Largo de taco para los tiros

Esta variable, junto a la anterior es, para la mayoría de los autores, la más importante de todas, la primera forma para fijar el largo de taco adecuado (T), para minimizar tanto la generación como alcance de los “flyrocks”, es utilizar el procedimiento establecido conjuntamente por Alan Bauer y Frank Chiapetta, basado en resultados obtenidos de pruebas de cráter y/o filmaciones con cámara de alta velocidad. En síntesis, el procedimiento consiste en establecer el largo de taco adecuado en función de la distancia (D) medida desde el collar del pozo en superficie hasta el centro de una carga de largo igual a diez veces el diámetro de pozo que parte del extremo superior de la columna de explosiva, (L_w) y, cuyo valor en definitiva se establece multiplicando la denominada “Scaled Depth of Burial, SD”, por la raíz cubica de la carga explosiva

$(W)^{1/3}$ contenida en el largo igual a 10 veces el diámetro del pozo. En concreto, el largo de taco (T) será igual a $D-L_w/2$. De la Figura 2.28, que vienen a continuación.

Muestran claramente esta modalidad de cálculo indicando en particular, que valores de la “Scaled Depth of Burial, SD” deben ser considerados cuando se desea mantener los “flyrocks” bajo control en tanto que la segunda Figura 2.29, señala a su vez cual es la consecuencia de llevar a cero la probabilidad de generar “flyrocks”. (Enaex, 2014).

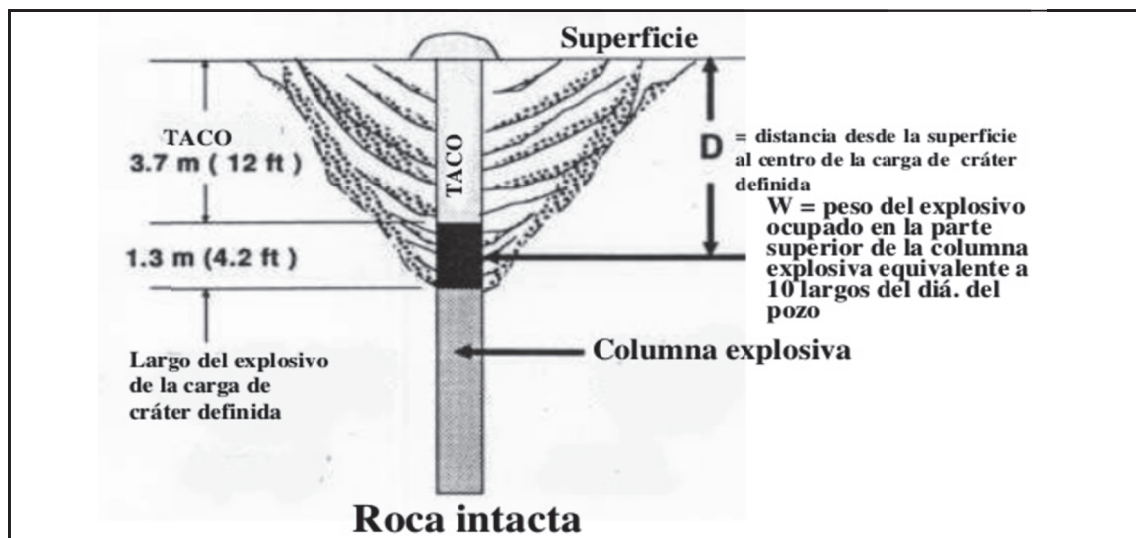


Figura 2. 28 Taco de taladro (Scaled Depth of Burial-SD)

Fuente: Enaex

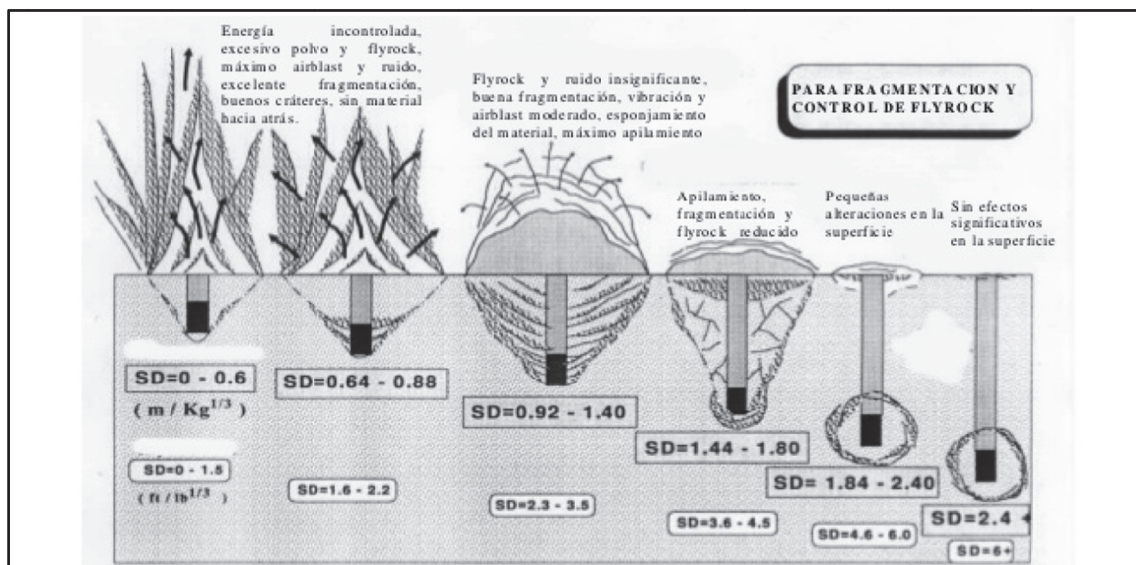


Figura 2. 29 Profundidad escalada de enterramiento SD

Fuente: Enaex

2.10. Teoría de costos

Un concepto central económico es el que trata de que conseguir algo requiere abandonar otra cosa. Por ejemplo, para ganar más dinero se debe trabajar más horas, lo cual cuesta más tiempo libre. Los economistas utilizan esta teoría para ofrecer una estructura para comprender como los individuos y las empresas distribuyen los recursos de tal forma que mantienen los costos bajos y los beneficios altos (Teoría de costos, 2001).

2.10.1. Función de costos

Es aquella que relaciona el mínimo costo de producción requerido para obtener determinado nivel de producto.

$$C = f(Q) \qquad \text{Ecuación 2. 19}$$

Dónde:

C : Costo de producción

Q : Nivel de producción (Teoría de costos, 2001).

2.10.2. Matriz de costos

La elaboración de la matriz de costos consiste en estimar los costos totales de perforación y voladura asociado a los posibles diseños a realizar. La matriz de costos debe incluir las siguientes estimaciones: (Anchorena, 2015).

2.10.3. Costo de perforación (CP)

Es el costo relacionado a la perforación de un proyecto, depende principalmente de las siguientes variables: costo de la broca, los costos de los aceros (estimando sus respectivos rendimientos), el costo del diesel que consume el equipo y el ratio de penetración, además se deben incluir aquellos costos que se consideren relevantes en la perforación. Los costos mencionados anteriormente se relacionan con los parámetros

geométricos del proyecto: malla de perforación (burden, espaciamiento), altura de banco, sobre perforación y diámetro del taladro, con estas variables se obtiene un costo de perforación (CP) en US\$/TM, esto se realiza para cada diseño.

La precisión en la estimación del costo de perforación (CP) dependerá de los datos. Si la estimación de costos se realiza para una mina con un tiempo considerable de operación, esta contará con mayor cantidad de datos históricos, lo cual es favorable para los cálculos, mientras que una mina que recién inicia su operación tendrá pocos o ningún dato, en ambos casos es importante pronosticar el costo futuro, si no se cuenta datos históricos es posible recopilar información que nos pueda ser un punto de partida.

En la Tabla 2.8, se muestran los precios de los detonadores electrónicos y convencional, así como el precio del iniciador. El costo del primado en la mina Toquepala es de 32.31 US\$ (Anchorena, 2015).

$$CPr = \text{Booster 2Lb } (\$) + \text{Det. Elect. } (\$) + \text{Nonel 5000 ms} (\$)$$

Tabla 2. 8 Costo de primado - Toquepala

Accesorios	Unidad	Costo (US\$)
Booster 2Lb	1	6.02
Det. Electronico (I-Kon)	1	24.00
Nonel 5000 ms	1	2.29
Costo del primado		32.31

Fuente: propio del tesista

2.10.4. Costo de la mezcla explosiva (CM)

Se determina en base a los precios de los insumos necesarios para elaborar las diferentes mezclas explosivas que utilizan en la voladura.

Dadas las siguientes variables:

CN : Costo de nitrato (\$/kg)

CE : Costo emulsión matriz (\$/kg)

CD : Costo del Diésel (\$/kg)

Si “n” es el porcentaje de emulsión matriz de una mezcla, el costo estaría dado por:

$$\begin{aligned}
 CM &= n\% * C. E. \left(\frac{\$}{\text{kg}} \right) \\
 &+ 94\% * (100 - n)\% * C. N. \left(\frac{\$}{\text{kg}} \right) \\
 &+ 6\% * (100 - n)\% * C. D. \left(\frac{\$}{\text{kg}} \right)
 \end{aligned}
 \tag{Ecuación 2. 20}$$

De las densidades de las diferentes mezclas explosivas y conociendo el diámetro del taladro, se estiman los Kilos de mezcla explosiva por metro lineal (DCL)

$$DCL \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}} \right) = 0.507 * Dm \left(\frac{\text{g}}{\text{cc}} \right) * (D(\text{Pulg.}))^2
 \tag{Ecuación 2. 21}$$

Dónde:

- Dm : Densidad del explosivo
D : diámetro del taladro en pulgadas.

El costo de la (CV) incluye el costo de cargar y primar un taladro considerando su aporte un taladro considerando su aporte en tonelaje. La fórmula está representada mediante la siguiente expresión:

$$CV = \frac{C(m) * DCL \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}} \right) * CM \left(\frac{\$}{\text{kg}} \right) + CPr(\$)}{B(m) * Es(m) * H(m) * De \left(\frac{\text{TM}}{\text{m}^3} \right)}
 \tag{Ecuación 2. 22}$$

Dónde:

- C : altura de carga
DCL : Kilos de explosivos por metro lineal
CM : Costo de la mezcla explosiva
CPr : Costo del primado

- B : Burden
Es : Espaciamiento
H : Altura de banco
De : Densidad de la roca (Anchorena, 2015).

2.10.5. Costo total de perforación y voladura (CP&V)

Es la sumatoria de los costos de perforación (CP) y de voladura (CV), los cuales son estimados para un proyecto en particular (Anchorena, 2015).

$$CP\&V = CP + CV \qquad \text{Ecuación 2. 23}$$

2.10.6. Matriz de decisión de costo

La matriz de decisión, se elabora de las estimaciones que resultan al utilizar el modelo predictivo de fragmentación para la mina Toquepala y su relación con la matriz de costos (CP&V). La matriz de decisión muestra las diferentes alternativas que existen en el diseño de una voladura donde se incorpora la variable costo. Esta matriz nos permite tomar la decisión del mejor diseño de voladura que se puede realizar en la mina, teniendo en cuenta las restricciones de la operación, como son: diámetros de taladros, tipos de explosivos, pozos con agua, disparos cerca de estructuras, cuidados de taludes, etc. El objetivo de utilizar esta matriz, consiste en seleccionar el diseño que más se adecua a nuestra necesidad, tomando como criterio inicial el costo en US\$/TM de obtener un X_{80} (Anchorena, 2015).

2.11. Planteamiento de hipótesis

2.11.1. Hipótesis general

Con la aplicación del agente explosivo Quantex en los resultados de fragmentación se reducirá los costos de voladura en el tajo de la mina Toquepala.

2.11.2. Hipótesis específicos

- Con la determinación de costos comparativos de los dos explosivos se resolverá el porcentaje de la reducción de voladura en las fases de la mina Toquepala.
- Se mejorará la fragmentación de la roca con la aplicación del agente explosivo Quantex en el tajo de la mina Toquepala

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Tipo de investigación

a) Tipo

Esta investigación es de tipo descriptivo y explicativo y se describirán los factores que influyen el uso de los agentes explosivos, para la mejora de la fragmentación de la roca.

b) Descriptivo

Describe las eficiencias de explosivos Heavy Anfo55, utilizados en la mina Toquepala, para poder mejorar la fragmentación en las fases de la mina con el Quantex73.

c) Explicativo

Porque se muestra a través de la hipótesis, con el explosivo Quantex se mejoraría la fragmentación de roca a menor costo de voladura, por el esponjamiento que genera al añadir el 0.14% de nitrito de sodio en donde también se reduce la emisión de gas y la vibración

d) Nivel

El nivel de la investigación es aplicativo.

La investigación tiene carácter aplicativo, haciendo una evaluación de los agentes explosivos en la mina Toquepala, por lo cual proponemos aplicar el uso del explosivo Quantex73 en tajo de la mina.

3.2. Diseño metodológico

En este trabajo de investigación, se presenta una metodología para evaluar los resultados de los explosivos, para determinar el uso del explosivo Quantex, para así reducir los costos de voladura en la mina Toquepala.

La evaluación de los explosivos consistirá en determinar las densidades de cada explosivo en diferentes partes de la columna de carga de un taladro y la velocidad de detonación de acuerdo, en que tipos de rocas se va a realizar la voladura viendo el plano geológico, para poder mejorar la fragmentación, que este por debajo del rango P80, que requiere la empresa Toquepala. Y así determinar el tamaño de roca cerca al talud, centro del corte y en la cresta del talud después de la voladura. En la Figura 3.1, muestra La estructura del diseño metodológica, sobre la evaluación de los explosivos.

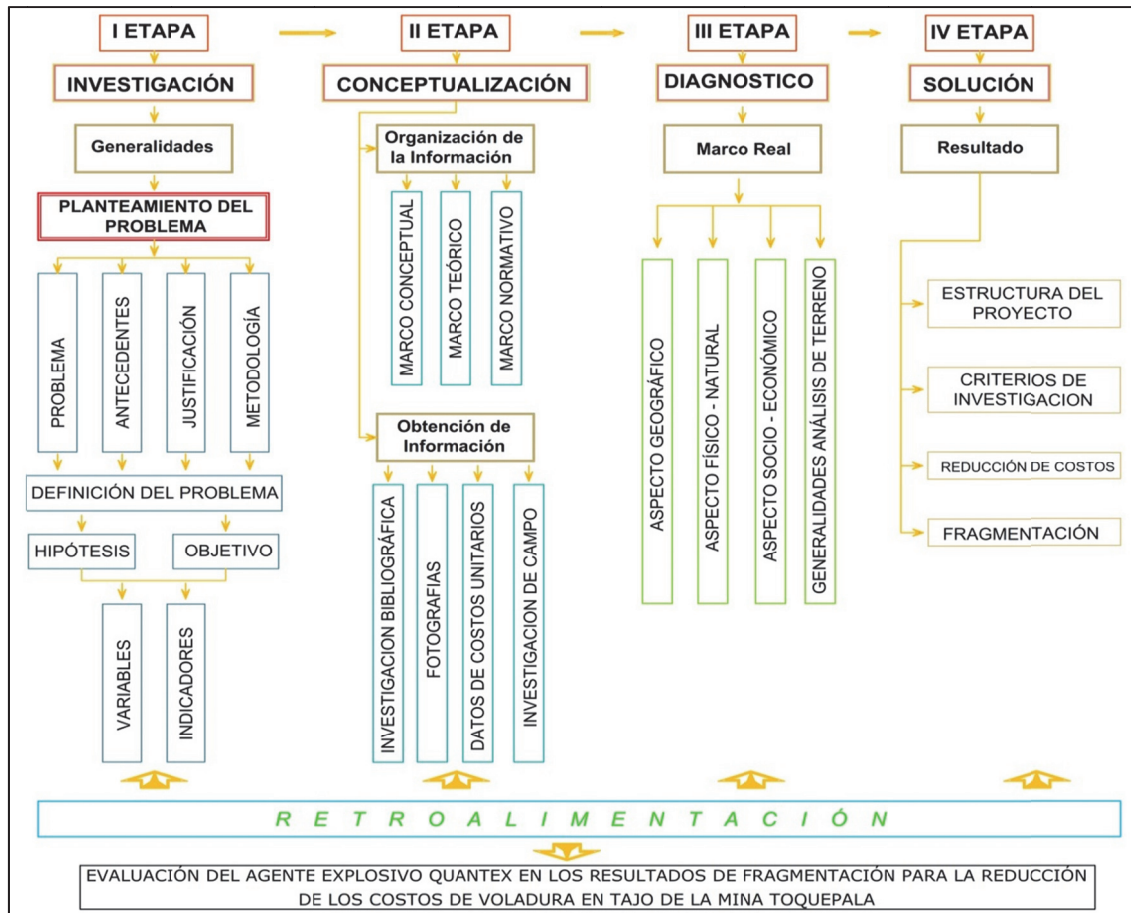


Figura 3. 1 Estructura del diseño metodológico

Fuente: Propio del tesista

3.3. Población y muestra

a) Población

La población es la totalidad del fenómeno a estudiar, donde las unidades de la población poseen una característica común, la que se estudia y da origen a los datos de esta investigación. Entonces, una población es el conjunto de todas las cosas que concuerdan con una serie determinada de especificaciones técnicas.

La población de muestra es: La empresa minera Toquepala

b) Muestra

La muestra, es un subgrupo de la población, donde reúne todas las características y propiedades de una población y que es representativa; de la cual se obtienen conclusiones semejantes y de relevancia en relación al problema inicial planteado. Los procedimientos adecuados del muestreo permitirán la correlación de los respectivos datos con propiedades de la muestra como indican la mejor fragmentación a un menor costo la voladura en tajo de la mina.

Como muestra será: Fases 3,4 y 5 de la mina Toquepala

3.4. Unidad de muestreo

En las unidades de las medidas de los explosivos de Heavy Anfo55 y Quantex73 se encuentran en la siguiente Tabla 3.1.

Tabla 3. 1 Unidades de medida

Descripción	Unidad de medida
Densidad de los explosivos	g/cc
Densidad lineal	kg/ml
Longitud de carga	kg
Toneladas roto por taladro	TM
Volumen por taladro	m ³
Factor de carga	kg/TM
Costo por metro lineal	US\$/ml
Costo total	US\$
Reducción	%
Costo total de voladura	US\$/TM

Fuente: Propio del tesista

3.5. Operacionalización de variables

3.5.1. Variable independiente

Evaluación del agente explosivo Quantex

3.5.2. Variable dependiente

Reducción de los costos de voladura

3.6. Técnicas de recolección de datos

a) Observación

Utilizaremos técnicas mediante el cual percibimos a través de la vista toda las actividades a su alrededor, donde la observación realizada de forma sistemática en el tajo de la mina Toquepala, donde se desarrolla los trabajos de voladura y la muestra de medición de la fragmentación después de la voladura en los tajo. Para mejor recopilación de datos se utilizara a otro instrumento auxiliar que es la libreta de campo con la guía planteada, fotografías, videos de alta definición para poder determinar el color de los humos que genera en la voladura y después se calcula el tamaño de la fragmentación.

b) Reportes diarios de trabajo

Nos permitirá una información cuantificable, donde se reportara a diario, semanal y mensualmente, los datos nos indicaran los resultados de voladura en el tajo. En donde nos permitirá analizar la evaluación de costos y obtención de los mejores resultados de la fragmentación de las diferentes zonas del tajo.

3.7. Procesamiento de las técnicas de datos

El procesamiento de los datos, en la presente investigación se realizó con los reportes mensuales que se tenía, importante los reportes anteriores para poder evaluar y así obtener los resultados nuevos con el nuevo agente explosivo Quantex73.

Los reportes de los datos fueron ordenados y procesados de acuerdo a las preguntas y luego llegar a los objetivos e hipótesis de la investigación según el libro de metodología de Carlos Eduardo Méndez Álvarez.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización del área de estudio

4.1.1. Ubicación y acceso

La mina Toquepala, se ubica en el sur del Perú, geográficamente el departamento de Tacna en la parte Nor-Oeste de la Provincia de Jorge Basadre en el distrito de Ilabaya, se asienta a una altitud de 1,425 m.s.n.m. a 17°36' de latitud sur y a 70°45' de longitud Oeste, se muestra en el **Anexo 04** (Aduvire, 2011).

4.1.2. Límites

Políticamente, el distrito de Ilabaya se encuentra en la Provincia de Jorge Basadre Grohmann de la región Tacna, siendo sus límites:

- **Por el Norte:** Región Moquegua y los distritos de Camilaca, Cairani y Huanuara de la Provincia de Candarave.
- **Por el Sur:** Distritos de Locumba y Sama de la Provincia de Tacna.
- **Por el Este:** Distrito de Curibaya de la Provincia de Candarave
- **Por el Oeste:** Departamento de Moquegua (Aduvire, 2011).

4.1.3. División política

El distrito de Ilabaya, está dividido en cuatro zonas:

- **Pueblo de Ilabaya.** Capital de distrito, con sus caseríos; Pachana, El Cocal, Chapicunca y Solabaya e integrado por los anexos de Chejaya y Toquepala, así como las comunidades campesinas de Carumbraya-Higuerani, Chululuni y Toco.
- **Centro poblado de Mirave con sus caseríos.** El Cayro, La Haciendita y Cacapunco, e integrado por los anexos de Oconchay, con su caserío Marga rala; Ticapampa, Chulibaya y Paquera, con su caserío Chintari, además del sector de Caoña.
- **Centro poblado de Cambaya.**
- **Centro poblado de Borogueña.** está compuesto por las Comunidades de Coraguaya, Vilalaca y Santa Cruz (Aduvire, 2011).

4.1.4. Altitud

El distrito de Ilabaya se extiende de los 900 m.s.n.m., hasta una altitud de 4 200 m.s.n.m., abarcando 2 regiones naturales las que se pueden mencionar costa y sierra. El distrito presenta un relieve muy accidentado en donde se pueden encontrar angostos valles, pendientes pronunciadas, depresiones y pampas muy áridas (Aduvire, 2011).

4.1.5. Clima

El clima en el territorio de Ilabaya es árido, con escasas lluvias y temperaturas medias anuales entre 12 y 17 grados centígrados. En invierno hay presencia de neblinas densas en las partes medias y altas del Distrito.

Cabe indicar que los cambios climáticos cada vez se hacen más evidentes en el distrito a consecuencia del calentamiento inusual, durante los meses de enero a marzo, constituyéndose en un factor de riesgo por la exposición de la población a la radiación UV, debido al deterioro de la capa de ozono en esta parte de la región (Aduvire, 2011).

4.1.6. Topografía

Ilabaya es uno de los tres (03) distritos de la provincia de Jorge Basadre que conforman la cuenca del río Locumba; ubicado en la parte media y alta de ésta, por lo que accede a pisos ecológicos localizados en la parte baja, media y alta de la cuenca.

Los otros dos distritos se ubican en la parte inferior de la cuenca. Locumba (capital de provincia) ocupa la parte media de la cuenca, y el distrito de Ite. Se ubica en la parte baja e inferior de ésta y llega hasta la bahía de Ite (Aduvire, 2011).

4.1.7. Actividad minera

La actividad minera en el distrito de Ilabaya, está presente a través del yacimiento minero de Toquepala. En donde se extrae cobre y molibdeno principalmente y oro en pequeñas cantidades, de gran pureza para exportación y su administración está a cargo de la empresa Southern Perú, como se muestra en la Tabla 4.1.

A pesar de ser una gran actividad generadora de divisas, no representa mayores oportunidades de trabajo para la población local.

La empresa minera cada vez que registra utilidades debe de pagar impuesto a la renta a la SUNAT. Sobre la base de lo recaudado por SUNAT, el Ministerio de Economía y Finanzas calcula los montos de canon minero (50% del impuesto a la renta de pagado por las empresas mineras) Y los transfiere a los gobiernos regionales y locales para el desarrollo de proyectos de inversión en la zona.

El canon minero es un derecho constitucional que les permite participar a los gobiernos, locales y regionales de la zona de explotación de un % de los ingresos y rentas captadas por el Estado por la explotación de sus recursos naturales (Aduvire, 2011).

Tabla 4. 1 Yacimiento minero de Toquepala-producción de cobre

Yacimiento	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Unidad de medida	(TMF)						
Toquepala	161,110	158,452	182,344	164,219	148,991	161,960	166,394

Fuente: Banco Central de Reserva-Informe de Conyuntura y Estadísticas

La regalía minera es la contraprestación económica que los titulares de las concesiones mineras pagan al estado por la explotación de los recursos naturales, lo pagan sobre el valor del concentrado, La empresa Southern Perú paga regalía minera según las tasas dadas ver Tabla 4.2, en el caso de Southern está en el tercer rango (valor del concentrado es mayor a los \$.120 millones de dólares) lo que le corresponde pagar el 3% del total del valor del concentrado a distribuirse en la región donde se explota (Aduvire, 2011).

Tabla 4. 2 Distrito de Ilabaya transferencias de regalías mineras

Yacimiento	2006	2007	2008	2009	2010
Unidad de medida	(millones de soles)				
Toquepala	28'127,288	29'617,557	23'375,990	12'189,802	20'681,668

Fuente: Transferencia económica

También es importante conocer las utilidades obtenidas por la empresa Southern Perú por la explotación de nuestros recursos naturales ver Tabla 4.3; durante los años 2009 y 2010, la empresa minera ha obtenido grandes utilidades especialmente el 2010 en comparación del 2009 en donde logró superar en 83% las utilidades del año 2009 (Aduvire, 2011).

Tabla 4. 3 Minero de Toquepala utilidades al III Trimestre

Yacimiento	2009	2010	Dif.	Incre %
Unidad de medida	(millones de dólares)		378 714	82,82%
Toquepala	457 260	835 974		

Fuente: CONASEV

4.1.8. Desarrollo económico-productivo

El distrito de Ilabaya al 2021, presenta una economía articulada él los mercados, competitiva y sostenible en base a las actividades económicas productivas y comerciales, vinculadas a la cultura local: y con articulación inter institucional (alianzas estratégicas) de todos sus actores, desarrolladas en su territorio: la actividad minera, la agricultura, la actividad pecuaria, el turismo, artesanía y servicios conexos, el comercio; haciéndolo atractivo para la inversión, en especial de sus productos bandera para la exportación y en el caso del turismo, a desarrollar, tendrá como escenario un entorno natural, eco-turismo dado que la actividad económica que tradicionalmente caracteriza a los territorios rurales cuya dinámica social y económica del cual dependen predominantemente, es la agricultura (Aduvire, 2011).

4.2. Aspecto geológico

4.2.1. Geología regional

El yacimiento está situado en un área que fue sometida a intensa actividad ígneo-eruptiva, de magmas riolíticos y andesíticos que se registró hace 70 M.A. (Cretáceo - Terciario); esta actividad produjo enormes cantidades de material volcánico, el cual se acumuló en una serie de mantos de lava, hasta completar un espesor de 1,500 m constituyendo el basamento regional, el mismo que está compuesto por derrames alternados de riolitas, andesitas y aglomerados, inclinados ligeramente hacia el oeste y que constituyen el llamado “Grupo Toquepala” que se muestra en **Anexo 05**.

Posteriormente la actividad ígnea fue principalmente epitermal y produjo grandes masas de roca en fusión que instruyeron, rompiendo y fundiendo las lavas enfriadas del “Grupo Toquepala”. Estas rocas intrusivas constituyen apófisis del batolito andino y

fueron emplazadas en diferentes etapas. Debido a que provinieron de un magma calcoalcalino de concentración química variable, resultaron diferentes tipos de rocas: diorita, granodiorita, dacita porfírica, etc.

La actividad tectónica regional, que está relacionada con la formación de la Cordillera de los Andes, está representada estructuralmente en el área por las fallas Incapuquio, Micalaco de orientación NW-SE y el alineamiento Toquepala. El basamento de Toquepala fue afectado por los movimientos de la segunda fase de la orogenia andina (fase Inca) durante el Eoceno tardío o comienzos del Oligoceno (E. Bellido).

La formación de la falla Micalaco puede haber sido favorecida por el contacto volcánico intrusivo, mientras que el alineamiento Toquepala N-S se habría desarrollado como subsidiaria del fallamiento principal NW-SE y por el levantamiento del bloque situado al norte de la falla Micalaco; ambas fallas se interceptan en el área de la mina y determinaron una zona extensa de debilitamiento.

Posteriormente, soluciones a elevada temperatura, resultantes de una etapa de diferenciación magmática, atravesaron todas las rocas existentes destruyéndolas y alterando su composición química, haciéndolas más permeables. Estas soluciones, favorecidas por el debilitamiento preexistente, produjeron la alteración y mineralización primaria, definiéndose un estadio estable y maduro del sistema.

En las diferentes etapas de intrusión y de la secuencia de brechamiento (Chimenea de brecha), durante las últimas manifestaciones de actividad hidrotermal, se formó una ventana explosiva, confinada al norte del yacimiento, ventana que fue rellenada posteriormente por un magma de composición porfírica con una débil mineralización que englobó fragmentos de diferentes tipos de roca de varias formas y tamaños (aglomerado de dacita).

Intrusiones de diques de latita porfírica, emplazados a lo largo del alineamiento Toquepala, representan la última fase de vulcanismo en el sistema.

A esa actividad volcánica le siguieron etapas sucesivas de intensa erosión, asociadas a variaciones del nivel freático que ocasionaron el lavado (lixiviación) de la parte superior de la zona mineralizada y una concentración de minerales de cobre en profundidad (zona de enriquecimiento secundario).

Erosiones subsiguientes aplanaron la topografía regional expuesta hasta formar la superficie Puna durante el Mioceno superior. Actividad volcánica posterior depositó en extensas áreas los volcánicos Huayllillas. En Toquepala no se tiene cubierta de volcánico joven (Vera, 1995).

4.2.2. La falla micalaco y el depósito de Toquepala

La falla Micalaco se extiende desde las inmediaciones del pueblo del mismo nombre hacia el NO, cruzando la quebrada Toquepala, en el lugar que es ahora conocido como la boca de la mina, y continúa hasta atravesar las quebradas cimarrona, y Cortadera. Desde Micalaco hasta cerca de la mina, la falla se presenta como una estructura esencialmente vertical y de alineamiento rectilíneo y angosto. Pero en un recorrido de cerca de 4 kilómetros desde la quebrada Toquepala hacia el NO la falla se abre, convirtiéndose en una faja de cizallamiento “shear zone” con 200 a 500 metros de ancho que tiene el mismo rumbo que la falla y un buzamiento que varía desde la vertical hasta 70 grados hacia el norte. Parte de la zona mineralizada de Toquepala se encuentra dentro de la faja de cizallamiento, siendo la falla Micalaco el límite sur de la mineralización. Las rocas afectadas por la falla en la zona mineralizada son granodiorita y bloques incorporados de pórfido cuarífero Quellaveco. En las cercanías del depósito de Toquepala, cuarzo y turmalina rellenan las fracturas de la zona de cizallamiento. Dentro de la zona mineralizada ha habido rellenos de sulfuros de cobre y fierro, así como también diques de latita y “pebblebreccia” que se alinean a lo largo del fracturamiento. Más hacia el NO, el cizallamiento decrece gradualmente y da lugar a una falla vertical muy compleja con numerosos ramales entrelazados y constituidos por roca intensamente triturada y con ligera alteración hidrotermal, contiene pequeñas zonas de piritización y turmalinización. Es evidente que la falla Micalaco es una estructura principal en el desarrollo y formación del depósito de Toquepala. (B. Stevenson, 1968).

4.2.3. Geología local

Relacionada con una intensa actividad ígnea del cretáceo superior al terciario inferior. El basamento consiste de derrames alternados de riolitas y andesitas de posición casi horizontal, con un espesor acumulado superior a los 1,500 m y que constituyen el Grupo Toquepala. El intrusivo consiste en apófisis y cuerpos mayores de granodiorita y diorita pertenecientes al batolito andino y su diferenciación a dacita porfirítica. Como indica los tipos de roca de la mina en la Tabla 4.4.

Posee estructuras enmarcadas regionalmente dentro del alineamiento tectónico NO-SE formado durante el cretácico superior - terciario inferior y que tiene orientación paralela a la Cordillera Andina (Falla Micalaco y alineamiento Toquepala.). Relacionadas con la formación de brechas y fracturamiento tipo stock work en áreas amplias de debilitamiento constituyendo en conjunto chimenea de brecha. Las principales fallas mapeadas en el tajo coinciden con las quebradas de la topografía original, siendo las más representativas: Sargento, Yarito y Toquepala que en general son fallas de alto ángulo (Vera, 1995).

Tabla 4. 4 Litología de la mina Toquepala

Tipo de roca	Símbolo	Código
Alta andesita	Aa	1
Riolita Toquepala	Tr	2
Andesita Toquepala	Ta	3
Pórfido cuarcífero Toquepala	Tq	4
Dolerita Toquepala	Td	5
Pórfido cuarcífero Quellaveco	Qq	6
Latita porfirítica	Lp	7
Dacita aglomerada	Da	8
Dacita porfirítica	Dp	9
Diorita	Di	10
Brecha slump	Sbx	11
Brecha diorita	DiBx	12
Brecha angular	Bx	13
Brecha turmalina	Bxt	14
Pebble brecha	Px	15
Relleno	F1	16

Fuente: Aspecto geológico de la mina Toquepala, Alejo Vera Gonzalo

Tabla 4. 5 Fases de la mina Toquepala, tipo y densidad de roca

Fases	Tipo de roca	Nombres de la roca	Densidad de roca (TN/m ³)
3	Di-ga	Diorita	2,76
	Bx-ga	Brecha angular	2,72
	Dp-ga	Dacita Porfíritica	2,72
4	Di-Prop	Diorita- Propilitización	2,68
	Da	Dacita aglomerada	2,62
	Bx-Px	Brecha Angular – pebble brecha	2,64
	Dp-qtz	Dacita Porfíritica	2,66
5	Ta	Andesita Toquepala	2,6
	Tr	Riolita Toquepala	2,59
	Tq	Pórfido cuarcífero Toquepala	2,63
	Di-Prop	Diorita- Propilitización	2,68

Fuente: pruebas realizados de la empresa EXSA soluciones

a) Mineralogía

- Posee una mineralización simple siendo la distribución de leyes de cobre uniforme, tanto lateralmente como en profundidad.
- Los minerales económicos se encuentran en estado de sulfuros diseminados a través de toda la roca, en pequeñas venillas relleno vacíos o en pequeños agregados.
- Presenta una mineralogía compuesta por calcopirita (CuFeS₂) y calcosita (Cu₂S) como minerales de mena; molibdenita (MoS₂) como mineral de molibdeno y pirita (FeS₂) mineral de hierro no económico.
- La zona de enriquecimiento secundario se encuentra en posición casi horizontal con espesores que varían de 0 a 150 m.
- En el nivel intermedio 3100 se ha localizado un tope de mineralización de yeso-anhidrita.
- La mineralización es del tipo meso termal (entre 225°C – 475°C).

b) La mineralogía de Toquepala está representado por:

- **Zona lavada:** Están presentes, limonita, jarosita, goethita en fracturas.
- **Zona de óxidos:** Están presentes, Prácticamente no existe.

- **Zona de enriquecimiento secundario:** Están presentes, calcosina, digenita, covelina, bornita, pirita, calcopirita, molibdenita, relleno del stock work y en forma diseminada.
- **Zona primaria:** Están presentes, calcopirita, pirita, bornita, molibdenita tetraedrita, enargita, galena; relleno del stock work y en forma diseminada (Vera, 1995).

Tabla 4. 6 Mineralogía de Toquepala

Zona De Mineral	Minerales Predominantes	Código
Leached Capping	Limonitas, Jarosita 30%, Hematita 60%, Goethita 10%	Diseminado mayormente y en fracturas
Oxidos	Prácticamente no existe	
Enriquecido	Calcosita 90% y otros 10% Digenita, Pirita, Covelita, Bomita. Cu nativo	Rellenando espacios en las brechas, diseminado y como vetas
Transicional	Calcopirita 60%, Calcosita 25%, otros 15% Molibdenita, Pirita, Bomita	Rellenando espacios en las brechas, diseminado y en venas, asociado al Cuarzo
Primario	Calcopirita 90% y otros 10%, Pirita, Bomita, Molibdenita, Tetrahedrita, Enargita, Gina	Rellenando espacios vacíos de las brechas, diseminado y en vetas.

Fuente: Aspecto geológico de la mina Toquepala, Alejo Vera Gonzalo

c) Alteración

Presenta los cuatro tipos de alteración más comunes:

- **Alteración propilítica:** Epidota – clorita – calcita – pirita. Presente en diorita mayormente.
- **Alteración argílica supérgena:** Caolín y arcillas en general. Presente en diorita y rocas volcánicas.
- **Alteración filica:** Cuarzo-sericita-pirita. Presente en el intrusivo de dacita y brechas en general.
- **Alteración filico-potásica:** Biotita-clorita-sericita. Presente en el intrusivo de dacita y brecha.

Todas las rocas del basamento, rocas intrusivas han sido alteradas, a excepción de la dacita aglomerádica y diques de latita porfirítica.

Tabla 4. 7 Principales alteraciones

Tipos De Alteración-Asociación Mineralógica		
Alteración	Asociación	Relación Py:Cp
Prolítica	Epidota-clorita calsita	20:1
Filica	Cuarzo sericita	10-8:1
Argilica supergena	Kaolin y arcillas en general	
Potasica-filica	Biotita-clorita, Ortosa-biotita (anhidrita-magnetita)	1:2

Fuente: Alejo Vera, Gonzalo

En la siguiente Figura 4.1, se observa el plano de alteración del yacimiento y muestra tres aspectos importantes:

- Borde expuesto de mineralización 0.4 y 0.1 % Cu.
- La comparación de áreas entre el tajío actual y el área de interés.
- El área de interés con potencial para explorar en la zona de alteración propilica (Vera, 1995).

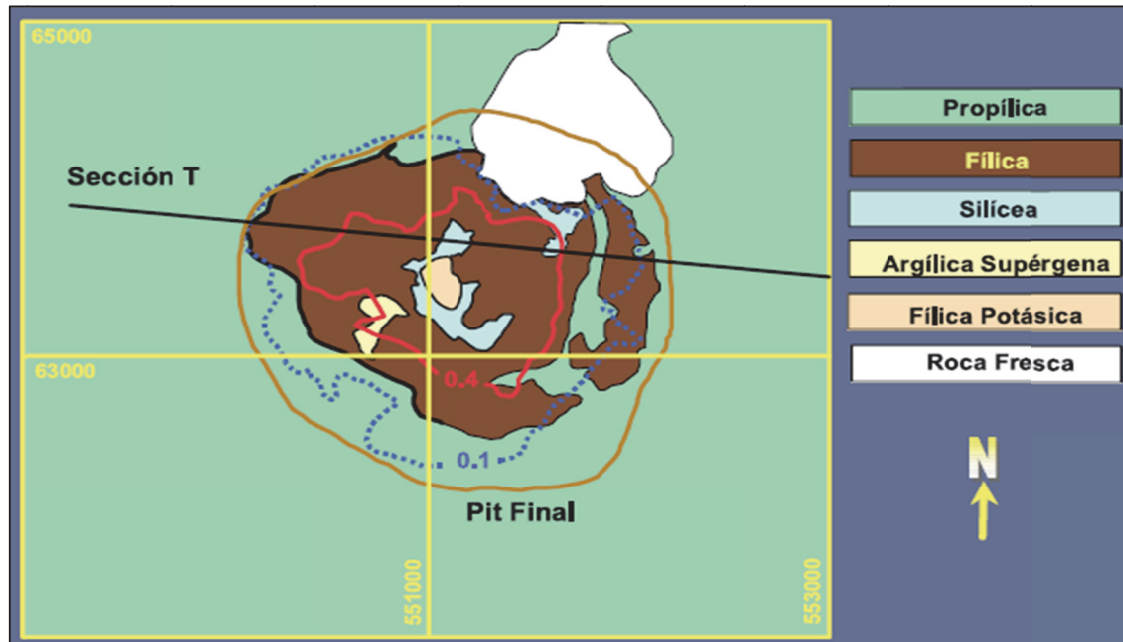


Figura 4. 1 Alteración de Toquepala

Fuente: Alejo Vera, Gonzalo

d) Paragénesis y zoneamiento

La evolución del yacimiento de Toquepala está genéticamente relacionada a dos tipos de eventos magmáticos como se muestra en la Figura 4.2.:

- El primero de naturaleza volcánica con la deposición de derrames intercalados de andesitas y riolitas que pertenecen al grupo Toquepala.
- El segundo de tipo intrusivo con emplazamientos sucesivos de cuerpos mayores de diorita-granodiorita, seguida de pequeños stocks de dacitas, monzonitas cuarcíferas y latitas, ocurridos en el Terciario inferior y ubicados a pocos kilómetros de la superficie, responsables de la alteración hidrotermal y la mineralización hipógena del yacimiento. (Vera, 1995).

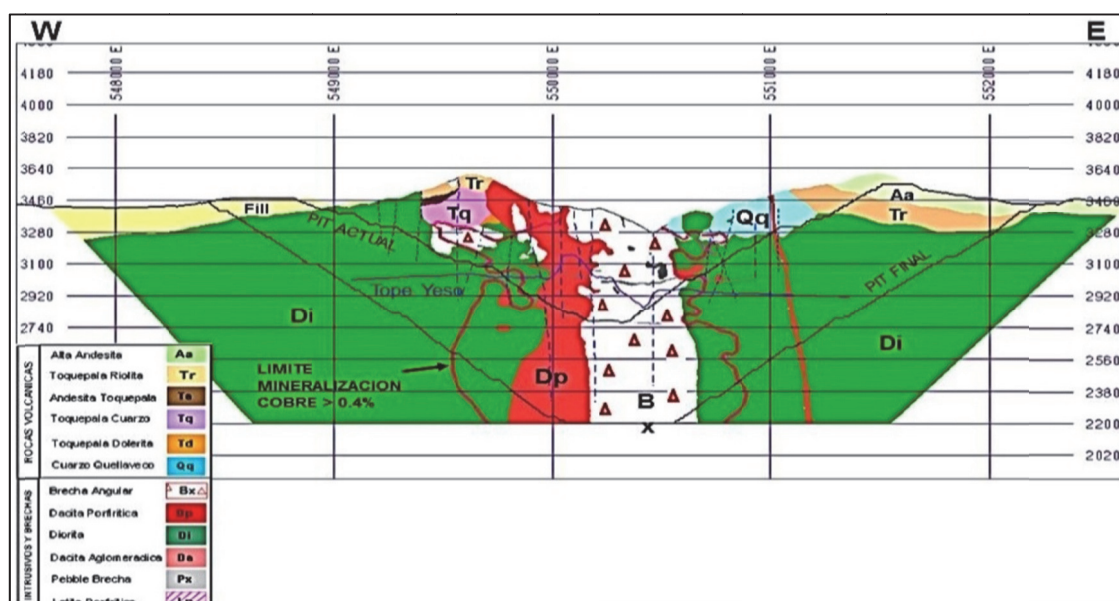


Figura 4. 2 Sección geológica vertical central depósito de Toquepala

Fuente: Hinostroza Sierra, Jaime Roosevelt

Algunas de las características de estos yacimientos son el desarrollo de chimeneas de brecha angulares y redondeadas y presencia de diques tabulares de pórfido de latita y brecha de guijarros.

Los movimientos de la segunda fase de la orogenia andina ocurridos desde el Eoceno tardío hasta comienzos del Oligoceno constituyen el marco tectónico regional

que afectó y modeló el yacimiento Toquepala. Richard y Courtright (1955) establecieron la secuencia de la formación del yacimiento Toquepala (Vera, 1995).

Tabla 4. 8 Mineralogía del zoneamiento

Zona del deposito	Mineralogía
Zona de lixiviación	Los minerales solubles han sido separados
Zona enriquecida por oxidación	Malaquita, azurita cuprita, cobre nativo y crisocola
Nivel del Agua Subterránea	
Zona de enriquecimiento en sulfuros secundarios	Calcosina, covelina, bornita, calcopirita y pirita
Zona de sulfuros primarios	Calcopirita y pirita

Fuente: Alejo Vera, Gonzalo

e) Génesis

El depósito está situado en un terreno que fue sometido a intensa actividad ígnea, incluyendo una gran variedad de fenómenos eruptivos, los que se registraron hace 70 millones de años (cretáceo-terciario); esta actividad produjo enormes cantidades de material volcánico, el cual se acumuló en una serie de mantos de lava volcánica, hasta completar un espesor de 1,500 m constituyendo el basamento regional, el mismo que está compuesto por derrames alternados de riolitas, andesitas y aglomerados, inclinados ligeramente hacia el Oeste y que constituyen el llamado “Grupo Toquepala”.

Posteriormente, la actividad ígnea fue principalmente subterránea y produjo grandes masas de roca en fusión que intrusionaron, rompiendo y fundiendo las lavas enfriadas del “Grupo Toquepala”.

Estas rocas intrusivas constituyen apófisis del batolito andino y fueron emplazadas en diferentes etapas. Debido a que provinieron de un magma de composición química variable, resultaron diferentes tipos de rocas (Vera, 1995).

4.3. Operaciones mina

Actualmente la Mina Toquepala produce 600 000 TM de material por día, con ley aproximada de 0,40 % de Cu y 0,035 % de Mo, lo que hace aproximadamente 25 millones de TM/año. La mina está dividida en 6 push backs o fases de minado hasta alcanzar el límite final del pit. Actualmente se encuentra en explotación las fases 3,4 y 5. Toquepala es una mina que diariamente extrae más de 600,000 TM/día de las cuales 60 000 son mineral. En la operación de equipos eléctricos como Palas y Perforadoras que son alimentados con cables de alto voltaje (4100V y 7200V), En la mina operan 28 camiones Komatsu 930E de 310 TM, 18 camiones de 218 TM Komatsu 830E, 5 camiones CAT 793C de 231TM, 13 camiones CAT 793D de 231 TM, 9 camiones 797F de 364 TM. En total son 73 volquetes la flota que cuenta la compañía. En Toquepala emplean; 3 Palas de 56 yd³ (P&H 4100) y 5 Palas 73 yd³ (Bucyrus 430). Asimismo cuenta con 11 perforadoras para taladros de producción y 2 perforadoras para pre-corte (Olazabal, 2014).

4.3.1. Perforación

La perforación es la primera operación minera que se efectúa en la preparación de una voladura, es importante efectuar esta operación con la mayor exactitud del caso, de profundidad, exactitud en las coordenadas, paralelismos y perpendicularidad.

- Tres perforadoras eléctricas P&H 100XP
 - Una perforadora eléctrica P&H 120
 - Tres perforadoras eléctricas Bucyrus 49R-III
 - Tres perforadoras eléctricas Bucyrus 49HR
 - Una perforadora Down the Hole (DTH) Titon 600 para precorte
 - Una perforadora Cubex 1120 (Olazabal, 2014).
- a) **Perforadoras para producción y amortiguación.-** los parámetros de perforación están diseñados en función a las características geomecánicas y estructurales del maciso rocoso.

- Diámetro de perforación: 11 y 12 ¼ de pulgadas
- Malla de perforación: patrón triangular equilátero de 6.5 m a 12 m
- Longitud de perforación: 15 m
- Sobre perforación: 1.5. a 2.0 m (Hinostroza, 2014).

b) Perforación para Pre corte

- Diámetro de perforación: 11 y 12 ¼ de pulgadas
- Malla de perforación: patrón triangular equilátero de 6.5 m a 12 m
- Longitud de perforación: 15 m
- Sobre perforación: 1.5. a 2.0 m (Hinostroza, 2014).

4.3.2. Voladura

Operación que se encarga del proceso de la fragmentación del macizo rocoso y obtención de taludes estables para un minado productivo. Consiste en el carguío mecanizado (camión fábrica) de los taladros con los explosivos (Heavy Anfo y Agente Explosivo Quantex) según sea el caso.

Entre los principales factores que influyen en los resultados de una voladura se encuentran: las propiedades de los explosivos a usar (densidad, velocidad de detonación, etc.), la distribución y secuencia de iniciación, geometría del disparo y desde luego las propiedades del macizo rocoso.

4.3.3. Carguío

El carguío consiste en el recojo del material ya fragmentado para depositarlo seguidamente en los volquetes quienes lo conducen a distintos destinos si se trata de mineral para planta de chancado mineral para lixiviación o desmonte.

La mina cuenta con los siguientes equipos de carguío:

- Una pala P&H 4100 de 60 yd³

- Dos palas P&H 4100 de 56 yd³
- Una pala Bucyrus 495B1 de 56 yd³
- Tres palas Bucyrus 495HR de 73 yd³
- Un cargador frontal CAT 994F de 23 yd³
- Un cargador Le Tourneau L1850
- Un cargador Le Tourneau L2350 (Olazabal, 2014).

4.3.4. Acarreo

Operación destinada al transporte de material (mineral y desmonte) a los diferentes destinos de la mina como tolvas de mineral, botaderos de material lixiviable y botaderos de desmonte.

- 28 Volquetes Komatsu 930E1, E3 y E4 de 290 TM
- Volquetes Caterpillar 793C de 218 TM
- 13 Volquetes Caterpillar 793D de 218 TM
- 8 Volquetes Caterpillar 797F de 363 TM
- 18 Volquetes Komatsu 830 de 218 TM (Olazabal, 2014).

4.3.5. Equipos auxiliares

Está conformado por diferentes equipos, los cuales sirven para efectuar los trabajos de desarrollo y construcción, está conformado de la siguiente manera:

- Un tractor de oruga CAT D11R
- Un tractor de oruga CAT D10 N
- Dos tractores de oruga CAT D10R
- Cuatro tractores de oruga CAT D10 T
- Un tractor de oruga Komatsu D375A
- Dos Motoniveladoras CAT 24H
- Una motoniveladora CAT 24M
- Dos tractores de llanta CAT 844C
- Seis tractores de llantas 834H

- Un rompedor de roca PC300
- Cuatro tanques de regadío de 20000 galones
- Un tanque de regadío de 30000 galones (Olazabal, 2014).

4.3.6. Chancado

Planta de beneficio “concentradora Toquepala”, con capacidad de molienda de 60,000 Toneladas Métricas por día, la misma que en su circuito (Hinostroza, 2014).

4.3.7. Depósitos lixiviables

La planta de depósitos lixiviables, ha sido diseñado para apilamiento de mineral de baja ley, este mineral es previamente chancado y depositado a través de fajas transportadoras de acuerdo a un perfil topográfico una vez almacenado este mineral, se procede a su lixiviación, esta planta, tiene una capacidad de chancado y transporte de 140000 TMD. Como se muestra en la Figura 4.3 (Hinostroza, 2014).

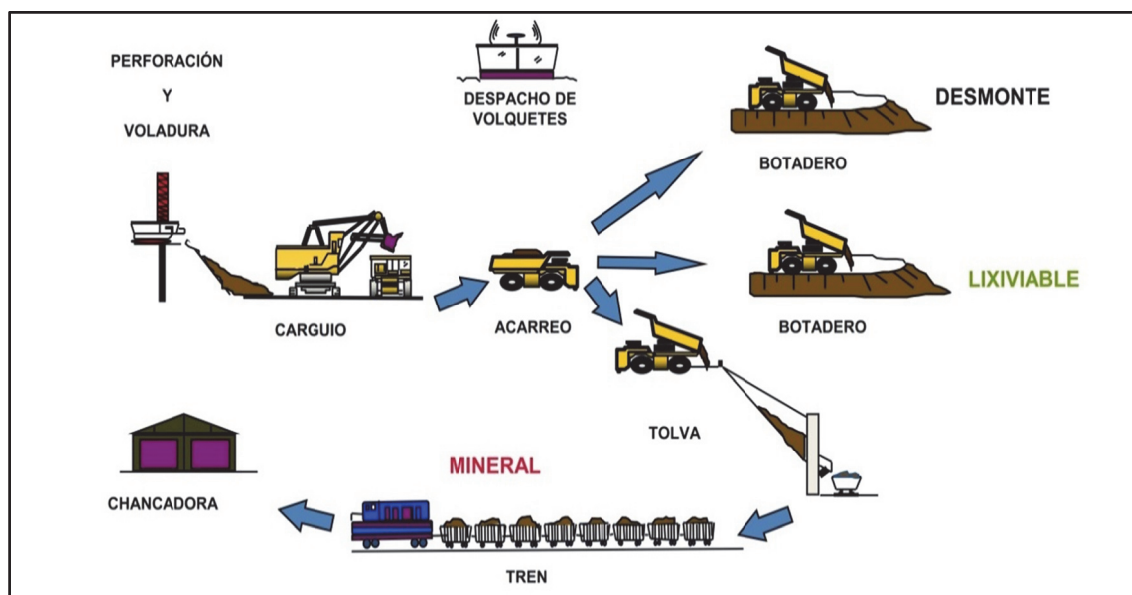


Figura 4. 3 Material de la mina de acuerdo a su destino

Fuente: Diseño de mina y alternativas de planeamiento a largo plazo en la mina Toquepala

4.4. Programa de producción

El programa de producción viene ser el plan de producción a corto, mediano y largo plazo, los parámetros básicos para este programa son: capacidad de la mina, leyes de corte, relación de desbroce y otros. A partir de estos datos, se elaboran el siguiente programa de producción.

- Producción por día : 600,000 TM
- Horas trabajadas por día : 22
- Días trabajados por mes : 30
- Meses trabajados por año : 12 (Hinostroza, 2014).

4.5. Característica geomecánica de la mina

Los diferentes estudios en la mina, como la toma de muestras de la roca para análisis, innumerables para constatar la información que se tenía y sus resultados, llegando a la conclusión que la mina debe tener las muestras de las rocas que fueron agrupados en 15 tipos de roca como se muestran en la Figura 4.4.

- Diorita argilizada
- Brecha angular argilizada
- Pebble brecha argilizada
- Latita porfírica
- Dacita porfírica silicificada
- Dacita aglomerada
- Toquepala andesita
- Dacita porfírica argilizada
- Cuarzo quellaveco silicificada
- Brecha angular silicificada
- Toquepala riolita
- Pebble brecha silicificada
- Dacita porfírica con yeso anhidrita
- Brecha angular silicificada con turmalina y yeso anhidrita

- Brecha angular silicificada con turmalina (Bellido, 1995).

Se efectuaron 4 modelos de ensayo de resistencia de la roca, en el laboratorio de mecánica de rocas y estos ensayos fueron:

- Ensayo de compresión uniaxial
- Ensayo de tensión uniaxial (ensayo brasileño)
- Ensayos de corte directo (Benito, 1998).

Los dos primeros fueron ejecutados para evaluar un estimado de las resistencias tanto compresivas como tensivas de la roca. Los ensayos de corte directo a gran escala, hechos sobre muestras de bloques superficiales y en núcleos de perforación se realizaron para dar un estimado de la resistencia al corte tanto en muestras sin fracturamiento como en muestras fracturadas y diaclasadas. En conjunción con estos ensayos, se hicieron medidas del peso específico de los diferentes tipos de roca. Tabla N° 20, se muestran los resultados de estos ensayos.

Los resultados de los ensayos indican que las rocas volcánicas fueron generalmente los más fuertes y las rocas intrusivas más débiles a los ensayos de resistencia de la roca (Benito, 1998).

a) Presencia de agua

La presencia del agua en los alrededores del tajo puede afectar adversamente las operaciones de minado y el carguío del agente explosivo. Grandes flujos de agua pueden causar serios problemas operacionales pero pueden ser controlados eficazmente con el bombeo. Sin embargo, altas presiones de poros, las cuales usualmente están asociadas con volúmenes de flujos de agua, pueden disminuir la estabilidad de las paredes. Existen indicios de que el desarrollo de estas presiones ha contribuido al fallamiento de las paredes actuales del tajo. Estas presiones de poros son originados por la presencia de agua en las discontinuidades geológicas (fallas, fracturas). Para reducir estas presiones de poros se debe de realizar métodos de drenaje inducidos como por

ejemplo realizar taladros para drenaje horizontal en zonas menos estables (Benito, 1998).

Tipo de roca	Densidad TM/m ³	Peso especifico TM/m ³	Porosidad (%)	Resistencia a la compresión (MPA)	Resistencia a la Tracción (MPA)	Angulo de fricción interna	Cohesión (MPA)
Diorita argilizada	2.27	25.21	6.40	77.69	10.50	49.63	145.61
Brecha angular argilizada	2.73	26.18	2.22	125.16	11.89	55.74	128.83
Pebble brecha argilizada	2.56	25.11	6.51	44.79	4.93	53.50	75.75
Latita porfírica	2.60	25.51	1.60	107.48	17.20	46.40	219.19
Dacita porfírica silicificada	2.57	25.21	2.18	129.91	16.91	50.32	238.98
Dacita aglomerada	2.51	24.62	6.45	103.80	14.32	49.25	196.55
Toquepala andesita	2.55	25.02	-	179.92	22.49	51.06	324.31
Dacita porfírica argilizada	2.31	22.66	3.15	30.42	4.03	49.98	56.84
Cuarzo quellaveco silicificada	2.64	25.90	2.55	118.17	15.97	49.63	221.40
Brecha angular silicificada	2.68	26.29	1.85	94.52	13.13	49.12	179.61
Toquepala riolita	2.41	23.69	-	136.06	18.14	49.88	253.32
Pebble brecha silicificada	2.62	25.70	5.79	95.30	13.18	49.20	180.70
Dacita porfírica con yeso anhidrita	2.50	26.88	-	152.97	18.43	51.72	270.69
Brecha angular silicificada con turmalina y yeso anhidrita	2.67	26.19	-	74.18	8.61	52.38	253.16
Brecha angular silicificada con turmalina	2.68	26.29	2.14	138.76	17.78	50.60	252.19

Figura 4. 4 Resultado de los ensayos de mina Toquepala

Fuente: Mina Toquepala

4.6. Evaluación de proyectos de voladura con uso de la mezcla explosiva Q73.

Las evaluaciones de voladuras y el uso del agente explosivo Quantex 73, se realiza en las fases 3, 4 y 5 de la mina Toquepala. Ver las fases de la mina en **Anexo 06**.

4.6.1. Evaluación de los agentes explosivos en tajo de fase 5

La evaluación de los agentes explosivos como: Heavy Anfo 55 y explosivo Quantex73, en el tajo de fase 5 del proyecto 174, se mencionara a continuación:

4.6.1.1. Ubicación del proyecto 174

El proyecto 174 de la fase 5 se ubica al Nor-Oeste de la mina, en donde se realizan trabajos de perforación y voladura, en el tajo no se presencia filtraciones de agua, se

evaluara el costo de los agentes explosivos de Heavy Anfo 55 y el agente explosivo Quantex73.

Tabla 4. 9 Ubicación del proyecto 174

Banco	3445
Proyecto	174
Tipo de roca	Toquepala Andesita (Ta)
Horario de disparo	1:10 pm
Pala	8
Cantidad de taladros con presencia de agua	00 %

Fuente: Mina Toquepala

Teniendo los datos geomecánicos del proyecto 174, se encuentra un roca Toquepala Andesita (Ta), que tiene una dureza intermedio, que se muestra en la Figura 4.4, por lo tanto el técnico que realizara el carguío del explosivo Quantex73, tendrá que prevenirse al cargar los taladros de producción y amortiguación, las características del proyecto de 174, nos ayudara a cuidar las plataformas, que se encuentran a su alrededor y cuidar la cresta del tajo donde se realizara la voladura.

4.6.1.2. Parámetros dimensionales del proyecto 174

Para determinar el diseño del tajo del proyecto 174, se calcula con la teoría de Richard Ash, que se muestra en el **Anexo 07**.

En la Tabla 4.10, se tiene las medidas y las cantidades para evaluar el Heavy Anfo 55 y el explosivo Quantex73, de un solo tipo de roca (Toquepala Andesita), se muestran las diferencias: la densidad del explosivo, la densidad carga lineal y la cantidad del explosivo. La densidad lineal y/o carga lineal del Heavy Anfo 55 y de la mezcla explosiva Quantex 73, se calcula con la siguiente formula:

$$\text{Carga Lineal} = \text{Densidad mezcla} * (\phi)^2 * 0.507 \quad \text{Ecuación 4. 1}$$

Dónde:

Carga Lineal : kg/m

ρ_{Mezcla} : Densidad de la mezcla (g/cc)

Φ : Diámetro del taladro (pulg)

Tabla 4. 10 Datos del diseño del tajo del proyecto 174 de la fase 5

		unidad de medida	Heavy Anfo 55	Quantex 73	
Diámetro del taladro		Pulg.	12 1/4	12 1/4	
Malla Triangular		m	9	9	
Espaciamiento		m	9	9	
Burden		m	7.79	7.79	
Altura de banco		m	15	15	
Sobre perforación		m	1.5	1.5	
Taco	Taco de producción	m	8	8	
	Taco de amortiguación	m	9	9	
Longitud de Carga	Lc de producción	m	8.5	8.5	Lc Real Quantex 7.5
	Lc de amortiguación	m	7.5	7.5	Lc Real Quantex 6.5
Factor de Esponjamiento Quantex73	Lc Producción	m	-	1	
	Lc Amortiguación	m	-	1	
Profundidad del taladro		m	16.5	16.5	
Tipo de roca		-	Ta	Ta	
Densidad de roca		g/cc	2.6	2.6	
Densidad del HA 55		g/cc	1.27	-	
Densidad Quantex 73	Densidad Inicial	g/cc		1.38	
	Densidad Final	g/cc		1.14	
Densidad Lineal		kg/ml	96.62	104.99	

Fuente: Mina Toquepala

4.6.1.3. Costo por metro lineal en taladro de 12 ¼ de pulgada de diámetro

El costo por metro lineal se calcula con las composiciones de ambas mezclas explosivas de Heavy Anfo 55 y Quantex 73, teniendo en cuenta los porcentajes que se muestran en las Figuras 2.5 y 2.8, aplicando las ecuaciones 2.20 y 2.21, y la ecuación de 4.1 para determinar la densidad lineal. Como se muestra en la Tabla 4.11.

Tabla 4. 11 Costos unitarios de los componentes de los explosivos HA55 y Q73

Heavy Anfo 55			Quantex 73		
Densidad lineal	kg/ml	96.62	Densidad lineal	kg/ml	104.99
Nitrato de amonio	US\$/kg	0.60	Nitrato de amonio	US\$/kg	0.57
Emulsión matriz	US\$/kg	0.51	Emulsión matriz	US\$/kg	0.51
Diesel	US\$/gl	3.80	Diesel	US\$/gl	3.80
Costo por metro lineal	US\$/ml	55.07	Nitrito de sodio	US\$/gl	0.025
			Costo por metro lineal	US\$/ml	55.65

Fuente: Mina Toquepala

a) Costo de los accesorios

El detonador electrónico se utiliza para HA55 y el Q73 y se muestra en:

Tabla 4. 12 Costo de los accesorios

	Cantidad	P.U.(US\$)	Total (US\$)
Booster 2 Lb	Unidad	6.02	6.02
Nonel 5000 ms	Unidad	2.29	2.29
detonador Electrónico	Unidad	24.00	24.00
	Costo por accesorios		32.31

Fuente: Mina Toquepala

b) Cantidad de explosivos por longitud de carga

Tabla 4. 13 Cantidad de los explosivos para cada taladro

		Unidad medida	Heavy Anfo55	Quantex73
Cantidad de explosivo	Lc Producción	kg	821.30	787.45
	Lc Amortiguación	kg	724.68	682.45
Volumen por taladro		m ³	1052.22	1052.22
Peso Especifico		g/cc	2.60	2.60
Toneladas Roto por Taladro		TM	2735.77	2735.77
Factor de Carga	En Tal Producción	kg/TM	0.30	0.29
	En Tal Amortiguación	kg/TM	0.26	0.25

Fuente: Propio del tesista

c) Costo por cada taladro de producción y amortiguación

El costo se calcula por costo de metro lineal por altura de longitud de carga más el detonador electrónico, para cada Taladros de producción y amortiguación a ambos que se muestra en la siguiente Tabla 4.14.

Tabla 4. 14 Costo por cada taladro

		Unidad de medida	Heavy Anfo55	Quantex73
Costo por Taladro	Producción	US\$	500.40	449.71
	Amortiguación	US\$	445.33	394.06
Toneladas Roto por Taladro		TM	2735.77	2735.77
% Costo Total	Tal Producción	US\$/TM	0.18	0.16
	Tal Amortiguación	US\$/TM	0.16	0.14

Fuente: Propio del tesista

En la siguiente Figura 4.5 nos muestra la cantidad y las medidas de los taladros de amortiguación y producción, que tienen una variación de los explosivos en la longitud de carga. De acuerdo a los parámetros que se muestra en la Tabla 4.10.

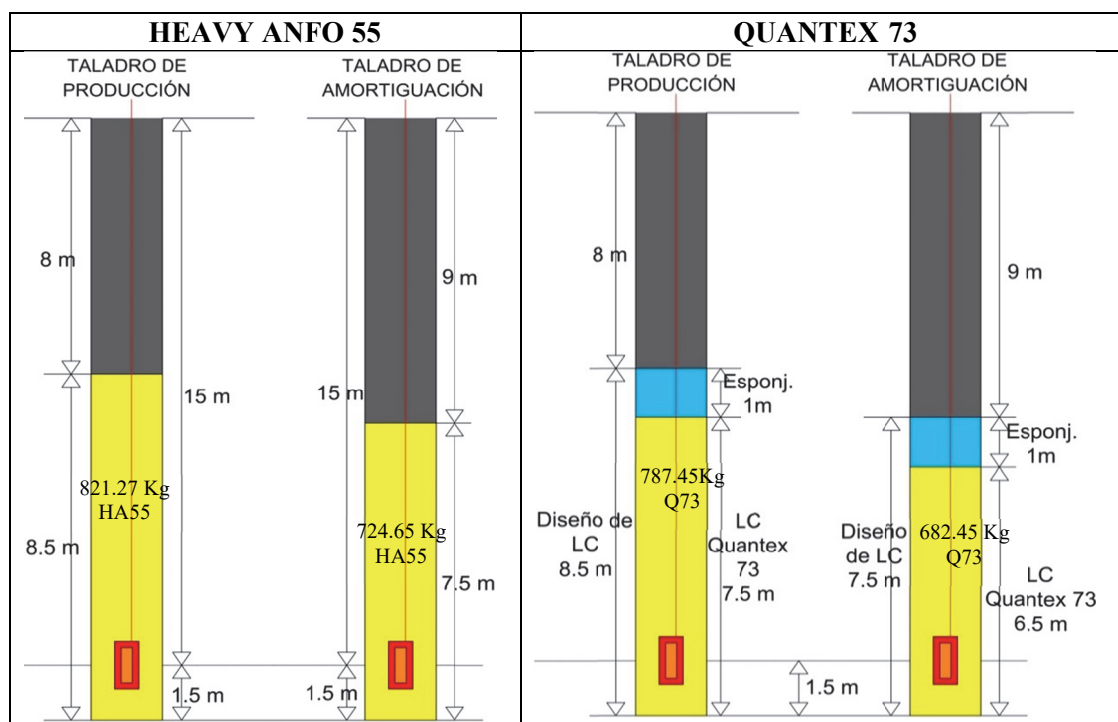


Figura 4. 5 Diseño de taladros con mezclas explosivos

Fuente: Propio del tesista

4.6.1.4. Costo de taladros del proyecto 174

El costo de cada taladro para el proyecto, se calcula de acuerdo a los porcentajes que se muestran en la Figura 2.5 y 2.8, y con la ecuación 2.20 y 2.21. También los costos del detonador electrónico. El costo de explosivos se calcula de acuerdo a los parámetros que se muestra en la Tabla 4.10.

Tabla 4. 15 Costo de HA 55 para cada taladro del proyecto 174

Costo del Explosivo Heavy Anfo55				
Taladros Producción	Unidad	P.U.	Cantidad	Costo (US\$)
Nitrato de amonio	TM	600.00	0.39	231.61
Emulsión matriz	TM	505.06	0.41	207.40
Diesel	gl	3.80	3.82	14.52
Fanel primadet	EA	2.29	1	2.29
Detonador electrónico	EA	24.00	1	24.00
Cable conexión	m	0.22	8	1.76
Booster 2Lb	EA	6.02	1	6.02
Costo Total (\$)				487.60
Taladros Amortiguación	Unidad	P.U.	Cantidad	Costo (US\$)
Nitrato de amonio	TM	600.00	0.34	204.36
Emulsión matriz	TM	505.06	0.36	183.00
Diesel	gl	3.80	3.37	12.81
Fanel primadet	EA	2.29	1	2.29
Detonador electrónico	EA	24.00	1	24
Cable conexión	m	0.22	8	1.76
Booster 2Lb	EA	6.02	1	6.02
Costo Total (\$)				434.24

Fuente: Propio del tesista

Tabla 4. 16 Costo de Q73 para cada taladro del proyecto 174

Costo del Explosivo Quantex73				
Taladros producción	Unidad	P.U.	Cantidad	Costo (US\$)
Nitrato de amonio	TM	570.00	0.23	130.61
Emulsión	TM	505.06	0.55	278.40
Diesel	gl	3.80	1.10	4.18
Nitrito de sodio	gl	0.025	0.25	0.01
Fanel primadet	EA	2.29	1	2.29
Detonador electrónico	EA	24.00	1	24.00
Cable conexión	m	0.22	8	1.76
Booster 2Lb	EA	6.02	1	6.02
			Costo Total (\$)	447.26
Taladros Amortiguación	Unidad	P.U.	Cantidad	Costo (US\$)
Nitrato de amonio	TM	570.00	0.20	113.20
Emulsión	TM	505.06	0.48	241.28
Diesel	gl	3.80	0.95	3.62
Nitrito de sodio	gl	0.025	0.22	0.005
Fanel primadet	EA	2.29	1	2.29
Detonador electrónico	EA	24.00	1	24.00
Cable conexión	m	0.22	8	1.76
Booster 2Lb	EA	6.02	1	6.02
			Costo Total (\$)	392.17

Fuente: Propio del tesista

a) Porcentaje de reducción de cada taladro de (HA55 y Q73)

Teniendo los precios de cada taladro de producción y amortiguación del proyecto 174, se muestra la reducción del porcentaje en la siguiente Tabla 4.17:

Tabla 4. 17 Porcentaje de reducción de los taladros (HA55 y Q73)

	Heavy Anfo55 (US\$/tal)	Quantex73 (US\$/tal)	% reducción
Taladros de producción	487.60	447.26	8.27%
Taladros de amortiguación	434.24	392.17	9.69%

Fuente: Propio del tesista

4.6.1.5. Comparación de costo de voladura del proyecto 174

Calculando el costo total de los 93 taladros del proyecto 174, de ambos mezclas explosivos de HA55 y Q73, en el tajo de fase 5, se muestra en las Tablas 4.18 y 4.19.

Tabla 4. 18 Costo total del proyecto 174 con HA55

Voladura con Heavy Anfo55	Taladros de Producción	Taladros de Amortiguación	Costo por explosivo
Taladros cargados	66	27	
\$/Malla	\$32,181.31	\$11,724.47	\$43,905.79
Altura (m)	15	15	
Espac (m)	9	9	
Burden (m)	7.79	7.79	
Volumen (m ³)	69,446.58	28,409.96	97,856.54
Tonelaje (TM)	180,561.10	73,865.90	254,427.01

Fuente: Propio del tesista

Tabla 4. 19 Costo total del proyecto 174 con Q73

Voladura con Quantex73	Taladros de Producción	Taladros de Amortiguación	Costo por explosivo
Taladros cargados	66	27	
\$/Malla	\$29,519.28	\$10,588.54	\$40,107.81
Altura (m)	15	15	
Espac (m)	9	9	
Burden (m)	7.79	7.79	
Volumen (m ³)	69,446.58	28,409.96	97,856.54
Tonelaje (TM)	180,561.10	73,865.90	254,427.01

Fuente: Propio del tesista

El costo de toda la malla, de los 93 taladros de producción y amortiguación, con el empleo del Quantex 73, se ahorra \$3,797.98, esto debido al esponjamiento de 1m que se obtuvo en cada uno de los taladros.

Tabla 4. 20 Costo total por taladro (US\$/TM)

	Heavy Anfo55	Quantex73	% Reducción
	(US\$/TM)	(US\$/TM)	(%)
Costo Total de voladura	0.173	0.158	8.65%

Fuente: Propio del tesista

4.6.1.6. Diseño de voladura

Para iniciar la voladura es importante, se muestra en la Figura 4.6, la secuencia de tiempos de salidas de filas y taladros, en menor tiempo tienen que salir los tiempos en la parte (ala corta), para que pueda romper y sin perjudicar las taludes de plataforma y en segundo (ala larga), tienen que salir después para poder cuidar las crestas, para que el material no sea desplazado hacia abajo del tajo de la mina.

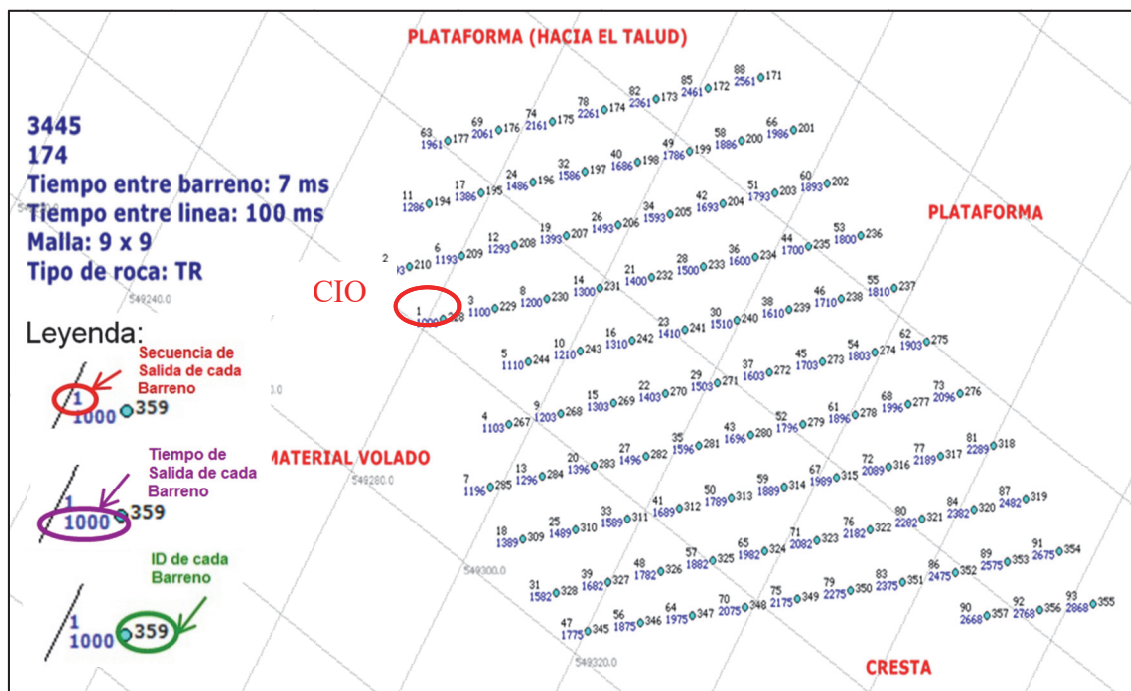


Figura 4. 6 Secuencia de salida de tiempo para realizar la voladura

Fuente: Mina Toquepala

En este grafico se muestra el apilamiento del material roto después de la voladura, no queremos que el material quede en un área muy grande, sino que deberá quedar dispuesto espacialmente de modo, que el equipo se encargue de su manejo posterior en condiciones acorde a su diseño de operación.

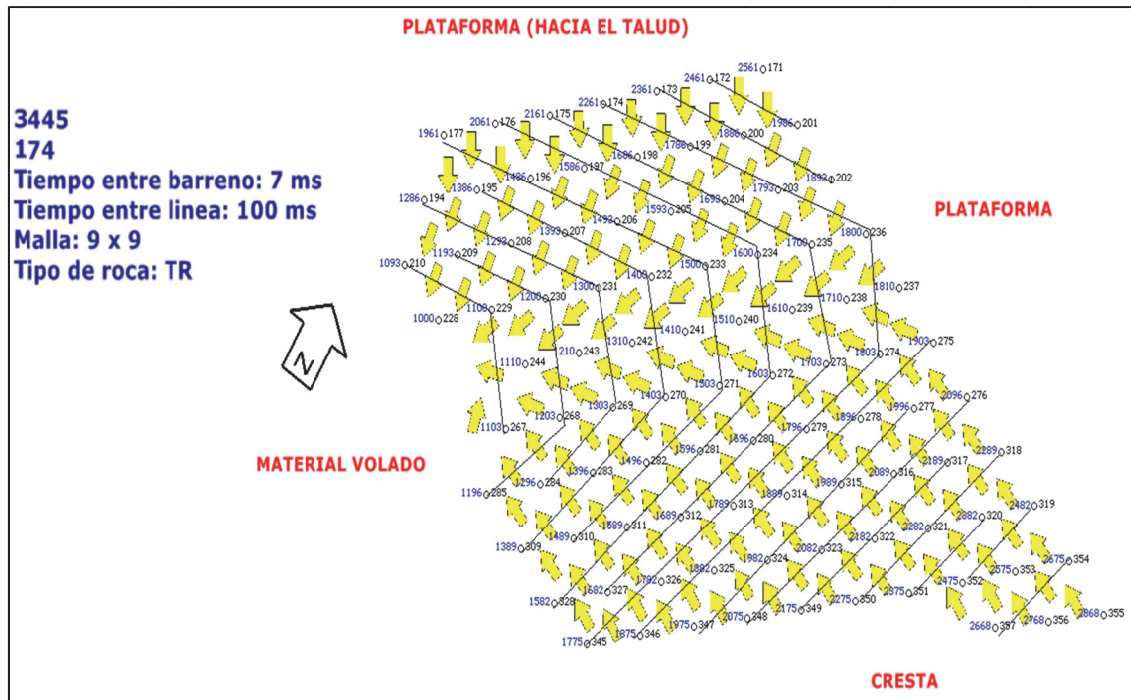


Figura 4. 7 Dirección de apilamiento del material

Fuente: Mina Toquepala

4.6.1.7. Análisis de voladura

a) Fragmentación

Después de realizar la voladura, se procede a verificar el material fragmentado en tres partes del tajo como: cresta, centro del corte y cerca al talud. En donde se aprecia en la Figura 4.8, se toma las fotografías con un balón donde tiene un diámetro de 25 cm. empleándose el explosivo Heavy Anfo 55 teniendo reportes anteriores de la fragmentación y también reportes de fragmentación del agente explosivo Quantex 73, en el tajo de la fase 5.

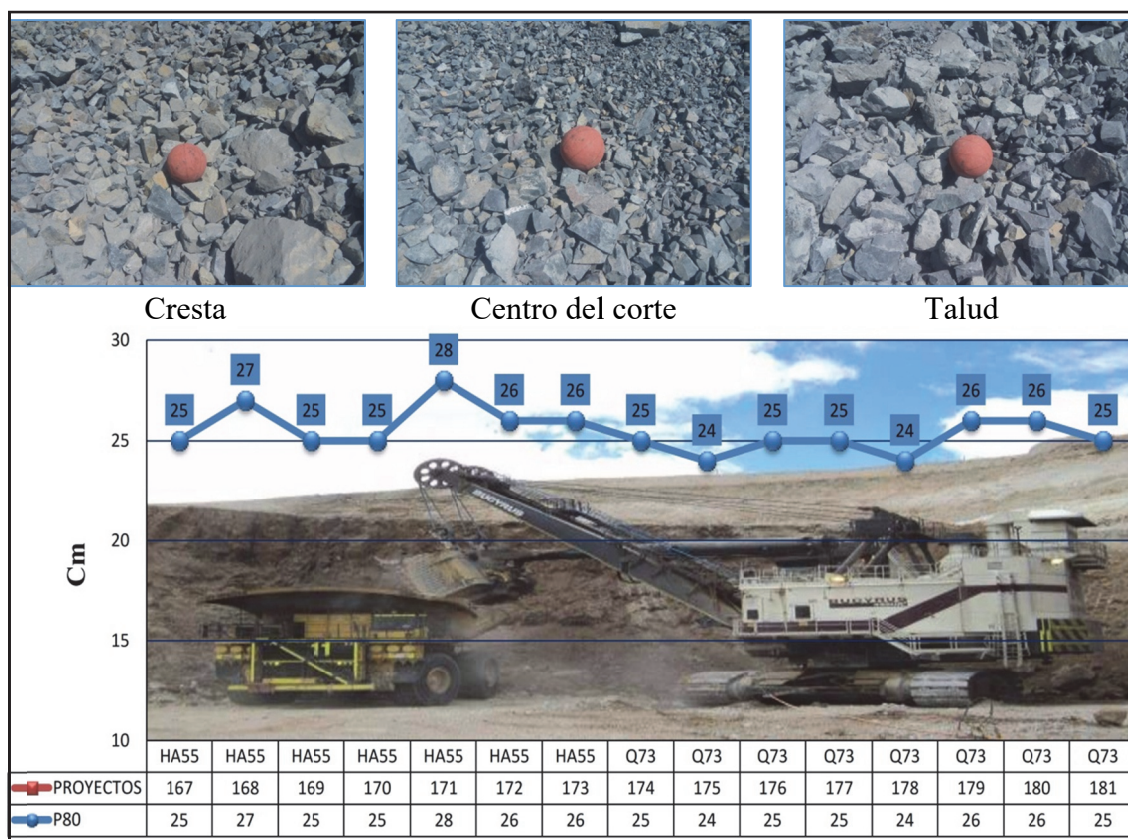


Figura 4. 8 Reportes de la fragmentación de pala n° 8 del proyecto 174

Fuente: Mina Toquepala

Tabla 4. 21 Resultados de la fragmentación de pala n° 8

Fragmentación con Heavy Anfo 55 (cm)							Fragmentación con Quantex 73 (cm)							
25	27	25	25	28	26	26	25	24	25	25	24	26	26	25
Promedio de fragmentación: 26.00 cm							Promedio de fragmentación: 25.00 cm							

Fuente: Mina Toquepala

Se muestra en la Tabla 4.21, el porcentaje de la mejora de fragmentación de la roca es: 3.85% al utilizar el explosivo Quantex 73

b) Minado de Pala 08 (Desmonte)

Para calcular el número de pases, para cargar a un volquete de gran tonelaje es con la siguiente ecuación:

$$Tonelaje\ x\ pase = \frac{vol.cuchara * densidad\ de\ material * factor\ de\ llenado}{factor\ de\ esponamiento}$$

Ecuación 4. 2

- Tiempo de carguío HA55 : 2 min
- Tiempo de carguío Q73 : 1 min 50 seg (2 min 00 seg)
- Volumen de cuchara de la pala n° 8 : 42.82 m³
- Densidad del material : 2.6 TM/m³
- Factor de llenado de cuchara (pala) HA55 : 82.50%
- Factor de llenado de cuchara (pala) Q73 : 84.00%
- Factor de esponjamiento del material HA55 : 17.00%
- Factor de esponjamiento del material Q73 : 16.00%
- Tonelaje por pase HA55 : 80.6 TM/pase
- Tonelaje por pase Q73 : 78.50 TM/pase
- Numero de pases : 04 pases
- Capacidad del volquete KOM930E4 : 320 TM

c) Programa de producción

- Horas trabajadas por día : 22
- Días trabajados por mes : 30
- Meses trabajados por año : 12

Tabla 4. 22 Proyección de movimiento de material pala eléctrica n° 8

22 horas efectivas proyectada	Unidad	Cantidad
TM/hora	TM	4,500.00
TM/día	TM	99,000.00
TM/mes	TM	2'970,000.00
TM/año	TM	35'640,000.00

Fuente: Propio del tesista

Tabla 4. 23 Diferencia de movimiento de material pala n° 8

Carguío del material con la Pala N° 8	Unidad	Movimiento después de la voladura Heavy Anfo 55	Movimiento después de la voladura Quantex 73
Horas efectivas trabajadas		21	21
Tiempo de carguío (promedio máximo)	Tiempo	2 min	1min 50 seg
TM/hora	TM	4,241.10	4,250.16
TM/día	TM	89,063.10	89,253.36
TM/mes	TM	2'671,893.00	2'677,600.80
TM/año	TM	32'062,716.00	32'131,209.60

Fuente: Propio del tesista

En la Figura 4.9 se muestra los reportes de la pala número 8, el total de toneladas movidos en una hora y el total del material movido durante un día, en diferentes en diferentes horas.

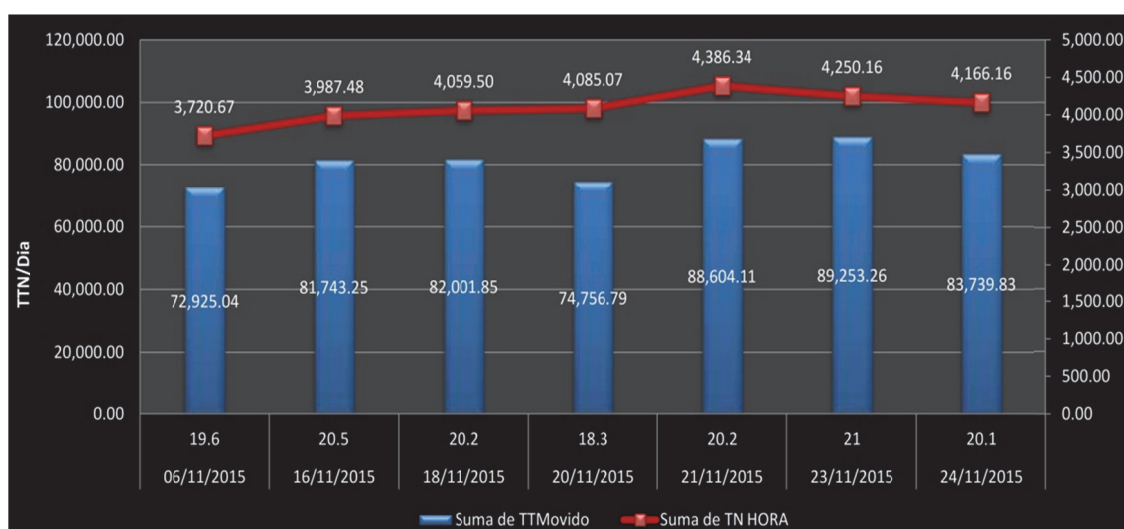


Figura 4. 9 Reporte de la pala n° 8 del material movido

Fuente: Mina Toquepala

d) Vibración

- vibración de taladros de Heavy Anfo55, en el tajo 174 : 180.29 mm/s
- la velocidad pico partícula de Quantex 73, en el tajo 174 : 140.5 mm/s
- la velocidad pico partícula crítico : 206.75 mm/s

e) Fly rock

En la figura 4.10, se muestra el diámetro del taladro del proyecto 174, la longitud del taco, la columna de carga y la densidad del explosivo que es determinante para controlar el fly rock. Según el “SD” tiene que estar dentro de un rango de 0.92-1.40 $m/kg^{1/3}$, para tener buena fragmentación de roca. Se calcula y ve en los resultados con los explosivos heavy anfo55 y Quantex 73.

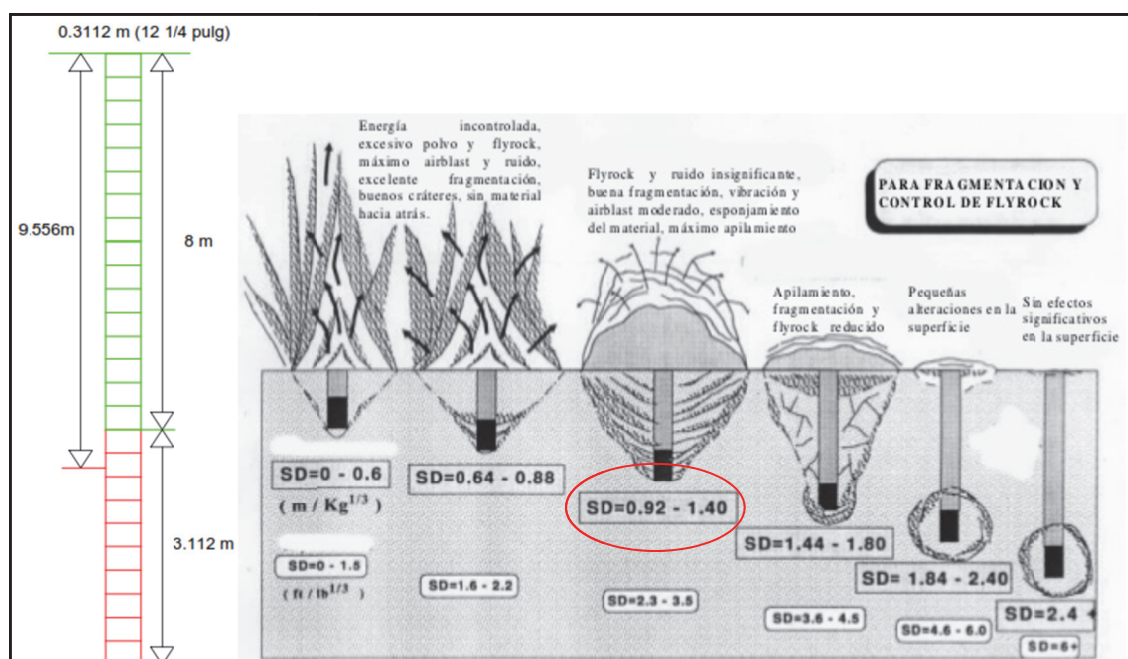


Figura 4. 10 Control de fly rock del proyecto 174

Fuente: Enaex

Cálculo del índice SD, para Heavy Anfo 55:

$$D = 8m + \left(\frac{3.112m}{2}\right) = 9.556 m$$

$$W = 0.507 * \rho_{\text{explosivo}} * \phi^2 \text{pulg} * 3.112m$$

$$W = 0.507 * 1.27 * (12.25)^2 * 3.112m$$

$$W = 300.69 \text{ kg}$$

$$SD = \frac{D}{w^{1/3}} = \frac{9.556m}{(300.69 \text{ kg})^{1/3}} = \frac{9.556}{6.67}$$

$$SD = 1.43 \text{ m/kg}^{1/3}$$

Cálculo del índice SD para Quantex 73

$$D = 8m + \left(\frac{3.112m}{2}\right) = 9.556m$$

$$W = 0.507 * \rho_{\text{explosivo}} * \phi^2 \text{pulg} * 3.112m$$

$$W = 0.507 * 1.38 * (12.25)^2 * 3.112m$$

$$W = 326.74 \text{ kg}$$

$$SD = \frac{D}{w^{1/3}} = \frac{9.556m}{(326.74 \text{ kg})^{1/3}} = \frac{9.556}{6.89}$$

$$SD = 1.39 \text{ m/kg}^{1/3}$$

f) Humos

- **Voladura con el Heavy Anfo 55**

En los videos anteriores de los proyectos grabados se presentaban humos anaranjados, cuando se realizaba la voladura con la mezcla explosiva Heavy Anfo 55, ocasionando una desventaja para realizar un trabajo en operación mina.



Figura 4. 11 Humos anaranjados producidos por la mezcla explosiva HA 55

Fuente: Mina Toquepala

- **Voladura con la mezcla explosiva Quantex 73**

Cuando se realiza la voladura es grabado en video de alta resolución, de toda la malla del proyecto 174 de la fase 5, se nota que no se producen humos anaranjados, debido al porcentaje de la mezcla de Quantex 73, que contiene el 70% de emulsión y 30% de nitrato de Quantex y que llega su densidad final 1.15 g/cc, el explosivo Q73.



Figura 4. 12 Humos producidos por la mezcla explosiva Quantex 73

Fuente: Mina Toquepala

4.6.2. Evaluación de los agentes explosivos en tajo de fase 4

4.6.2.1. Ubicación del proyecto 146

En el proyecto 146, de la fase 4, está ubicado al lado Este de la mina, donde se presenta un 20% de agua.

Tabla 4. 24 Ubicación del proyecto 146

Banco	3115
Proyecto	146
Tipo de roca	Dp qtz (dacita porfirítica Argilizada)
Pala N°	07

Fuente: Mina Toquepala

4.6.2.2. Parámetros dimensionales del proyecto 146

El parámetro dimensional, se calcula con la teoría de Richard Ash, **ver Anexo 07**.

Tabla 4. 25 Datos del diseño del tajo del proyecto 146

		Unidad medida	Heavy Anfo 55	Quantex 73	
Diámetro del taladro		Pulg.	12 1/4	12 1/4	
Malla Triangular		m	7x7	7x7	
Espaciamiento		m	7	7	
Burden		m	6.06	6.06	
Altura de banco		m	15	15	
Sobre perforación		m	1.5	1.5	
Taco	Taco de producción	m	7	7	
	Taco de amortiguación	m	8	8	
Longitud de Carga	Lc de producción	m	9.5	9.5	Lc Real Quantex 8.5
	Lc de amortiguación	m	8.5	8.5	Lc Real Quantex 7.5
Factor de Esponjamiento Quantex73	Lc Producción	m	-	1	
	Lc Amortiguación	m	-	1	
Profundidad del taladro		m	16.5	16.5	
Tipo de roca		-	Dp-qtz	Dp-qtz	
Densidad de roca		g/cc	2.6	2.6	
Densidad del HA 55		g/cc	1.27	-	
Densidad de Quantex 73	Densidad Inicial	g/cc		1.38	
	Densidad Final	g/cc		1.14	
Densidad Lineal		kg/ml	96.62	104.99	

Fuente: Mina Toquepala

4.6.2.3. Costo por metro lineal en taladro de 12 ¼ de pulgada de diámetro

Calculando costo de metro lineal solo para taladros de 12 ¼ de pulg de diámetro. Se calcula con el porcentaje de las composiciones de los explosivos de Heavy Anfo 55 y Quantex 73, que se muestran en la Figuras 2.5 y 2.8 y se calcula con las ecuaciones 2.20 y 2.21. La densidad lineal y/o carga lineal de calcula con la ecuación 4.1

Tabla 4. 26 Costos unitarios de los componentes de HA55 y Quantex73

Heavy Anfo 55			Quantex 73		
Densidad lineal	kg/ml	96.62	Densidad lineal	kg/ml	104.99
Nitrato de amonio	US\$/kg	0.600	Nitrato de amonio	US\$/kg	0.570
Emulsión matriz	US\$/kg	0.505	Emulsión matriz	US\$/kg	0.505
Diesel	US\$/gl	3.80	Diesel	US\$/gl	3.80
Costo por metro lineal	US\$/ml	55.07	Nitrito de sodio	US\$/gl	0.025
			Costo por metro lineal	US\$/ml	55.65

Fuente: Mina Toquepala

a) Costo de los accesorios

El detonador electrónico se utiliza para Heavy Anfo 55 y el explosivo Quantex 73 y se muestra los precios unitarios en la siguiente Tabla 4.27.

Tabla 4. 27 Costo de los accesorios de voladura

	Cantidad	P.U.(US\$)	Total (US\$)
Booster 2 Lb	Unidad	6.02	6.02
Nonel 5000 ms	Unidad	2.29	2.29
detonador Electrónico	Unidad	24.00	24.00
	Costo por accesorios		32.31

Fuente: Mina Toquepala

b) Cantidad de explosivos por longitud de carga

Evaluando la cantidad de los explosivos que se carga en el taladro de producción y amortiguación, la cantidad del explosivo que se carga es menor el explosivo Quantex 73, debido al esponjamiento que tiene en el fondo de la columna de carga.

Tabla 4. 28 Cantidad de explosivo para cada taladro

		Unidad de medida	Heavy Anfo55	Quantex73
Cantidad de explosivo	Lc Producción	kg	917.93	892.44
	Lc Amortiguación	kg	821.30	787.45
Volumen por taladro		m ³	636.53	636.53
Peso Especifico		g/cc	2.60	2.60
Toneladas Roto por Taladro		TM	1654.97	1654.97
Factor de Carga	En Tal Producción	kg/TM	0.55	0.54
	En Tal Amortiguación	kg/TM	0.50	0.48

Fuente: Propio de tesista

c) Costo por cada taladro de producción y amortiguación

El costo por taladro se calcula: costo por metro lineal por la altura de longitud de carga del explosivo más el precio total del detonador electrónico, para cada taladro de producción y amortiguación

Tabla 4. 29 Costo por cada taladro

		Unidad de medida	Heavy Anfo55	Quantex73
Costo por Taladro	Producción	US\$	555.47	505.36
	Amortiguación	US\$	500.40	449.71
Toneladas Roto por Taladro		TM	1654.97	1654.97
Costo Total	Tal Producción	US\$/TM	0.34	0.31
	Tal Amortiguación	US\$/TM	0.30	0.27

Fuente: Propio de tesista

En la siguiente Figura 4.13 que se muestra, el diseño de los taladros, son especificados en la Tabla 4.25.

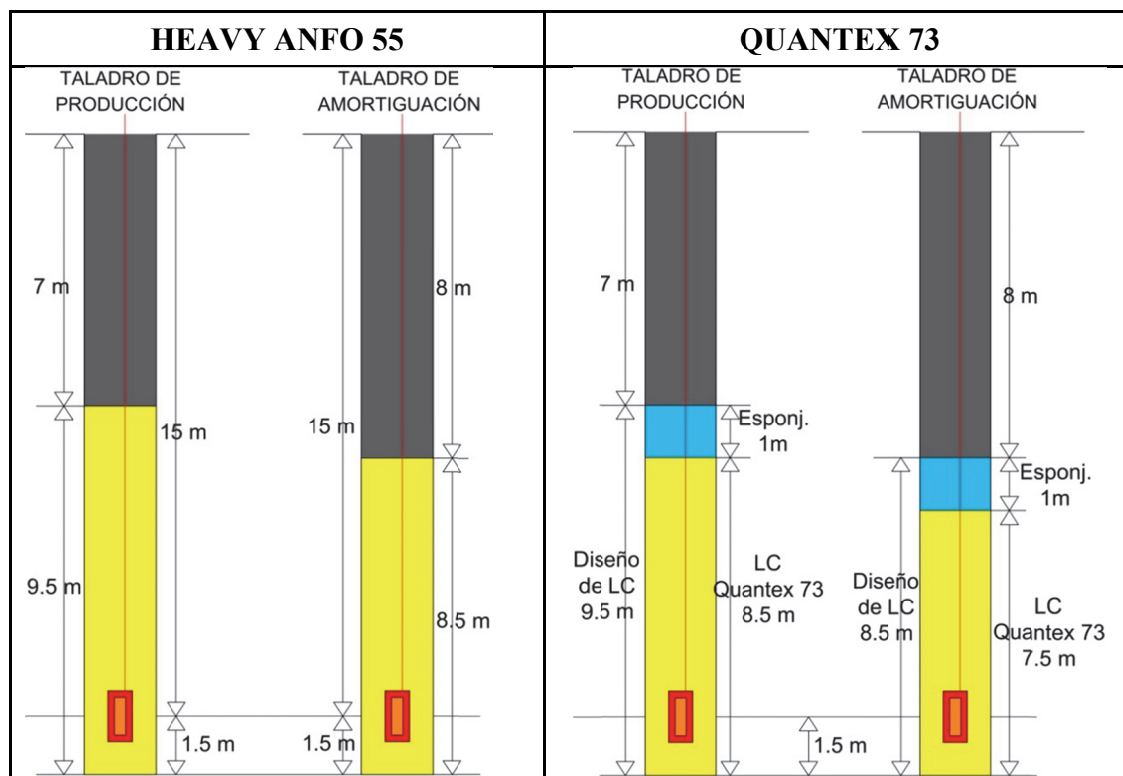


Figura 4. 13 Diseño de los taladros de HA55 y Q73

Fuente: Propio de tesista

4.6.2.4. Costo de taladros del proyecto 146

El costo total de los taladros, se calcula de acuerdo a los costos unitarios de los componentes de los explosivos según la Tabla 4.26, se calcula de acuerdo a los porcentajes que se muestran en las Figuras 2.6 y 2.9.

Tabla 4. 30 Costo de HA 55 para cada taladro del proyecto 146

Costo del Explosivo Heavy Anfo55				
Taladros Producción	Unidad	P.U.	Cantidad	Costo (US\$)
Nitrato de amonio	TM	600.00	0.43	258.86
Emulsión matriz	TM	505.06	0.46	231.80
Diesel	gl	3.80	4.27	16.22
Fanel primadet	EA	2.29	1	2.29
Detonador electrónico	EA	24.00	1	24.00
Cable conexión	m	0.22	8	1.76
Booster 2Lb	EA	6.02	1	6.02
Costo Total (\$)				540.95

Taladros Amortiguación	Unidad	P.U.	Cantidad	Costo (US\$)
Nitrato de amonio	TM	600.00	0.39	231
Emulsión matriz	TM	505.06	0.41	207.40
Diesel	gl	3.80	3.82	14.52
Fanel primadet	EA	2.29	1	2.29
Detonador electrónico	EA	24.00	1	24
Cable conexión	m	0.22	8	1.76
Booster 2Lb	EA	6.02	1	6.02
Costo Total (\$)				487.60

Fuente: Propio de tesista

Tabla 4. 31 Costo de HA 55 para cada taladro del proyecto 146

Costo del Explosivo Quantex73				
Taladros producción	Unidad	P.U.	Cantidad	Costo (US\$)
Nitrato de amonio	TM	570.00	0.26	148.03
Emulsión	TM	505.06	0.62	315.51
Diesel	gl	3.80	1.10	4.18
Nitrito de sodio	gl	0.025	0.29	0.01
Fanel primadet	EA	2.29	1	2.29
Detonador electrónico	EA	24.00	1	24.00
Cable conexión	m	0.22	8	1.76
Booster 2Lb	EA	6.02	1	6.02
Costo Total (\$)				501.80
Taladros Amortiguación	Unidad	P.U.	Cantidad	Costo (US\$)
Nitrato de amonio	TM	570.00	0.23	130.61
Emulsión	TM	505.06	0.55	278.40
Diesel	gl	3.80	1.10	4.18
Nitrito de sodio	gl	0.025	0.25	0.006
Fanel primadet	EA	2.29	1	2.29
Detonador electrónico	EA	24.00	1	24.00
Cable conexión	m	0.22	8	1.76
Booster 2Lb	EA	6.02	1	6.02
Costo Total (\$)				447.26

Fuente: Propio de tesista

a) Porcentaje de reducción de costos de voladura

La reducción se muestra de las Tablas 4.30 y 4.31

Tabla 4. 32 Porcentaje de la reducción de los taladros del proyecto 146

	Heavy Anfo55 (US\$/tal)	Quantex73 (US\$/tal)	% reducción
Taladros de producción	540.95	501.80	7.24%
Taladros de amortiguación	487.60	447.26	8.27%

Fuente: Propio de tesista

4.6.2.5. Comparación de costo de voladura de Heavy Anfo 55 y Quantex73

Tabla 4. 33 Costo total del proyecto 146 con HA55

Voladura con Heavy Anfo55	Taladros de Producción	Taladros de Amortiguación	Costo por explosivo
Taladros cargados	280	54	
\$/Malla	\$151,466.46	\$26,330.17	\$177,796.62
Altura (m)	15	15	
Espac (m)	7	7	
Burden (m)	6.06	6.06	
Volumen (m ³)	178,228.03	34,372.55	212,600.58
Tonelaje (TM)	463,392.87	89,368.63	552,761.50

Fuente: Propio de tesista

Tabla 4. 34 Costo total del proyecto 146 con Q73

Voladura con Quantex73	Taladros de Producción	Taladros de Amortiguación	Costo por explosivo
Taladros cargados	280	54	
\$/Malla	\$140,503.19	\$24,152.04	\$164,655.23
Altura (m)	15	15	
Espac (m)	7	7	
Burden (m)	6.06	6.06	
Volumen (m ³)	178,228.03	34,372.55	212,600.58
Tonelaje (TM)	463,392.87	89,368.63	552,761.50

Fuente: Propio de tesista

El costo es menor a comparación del explosivo Heavy Anfo 55, el Quantex 73, reduce 334 metros, debido al esponjamiento en la longitud de carga del taladro, que causa el nitrito de sodio al 0.14%. De cada taladro de producción y amortiguación.

Tabla 4. 35 Costo total del proyecto 146 (US\$/TM)

	Heavy Anfo55	Quantex73	Reducción
	(US\$/TM)	(US\$/TM)	(%)
Costo Total de voladura	0.322	0.298	7.39%

Fuente: Propio de tesista

4.6.2.6. Diseño de voladura

Para el diseño de voladura, se toma las consideraciones de las características de terreno, en esta figura se muestra la secuencia de salida de filas y de taladros. Y también se toma como prevención el apilamiento del material, para su posterior secuencia de carguío del material.

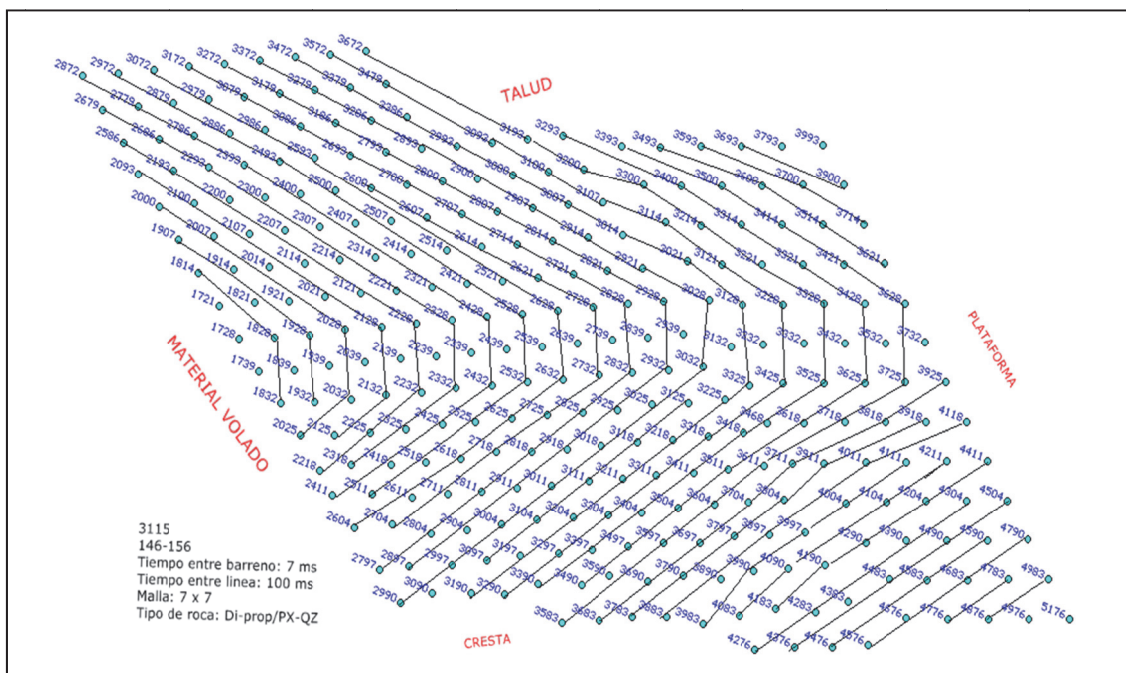


Figura 4. 14 Iniciación de voladura de filas y barrenos del proyecto 146

Fuente: Mina Toquepala

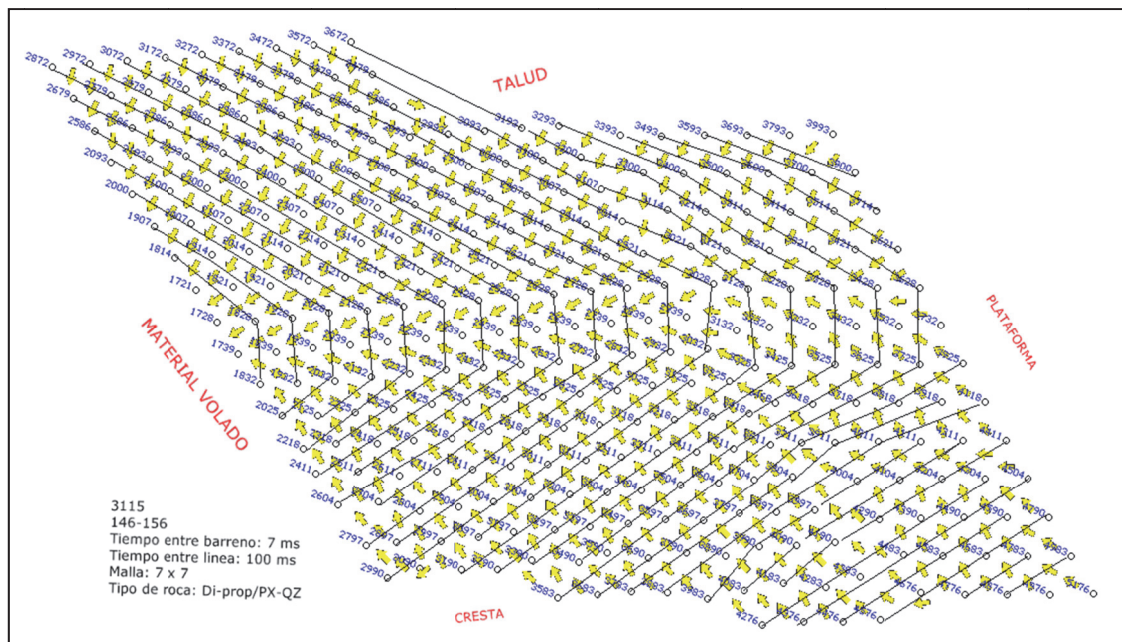


Figura 4. 15 Dirección del apilamiento del material del proyecto 146

Fuente: Mina Toquepala

4.6.2.7. Análisis de voladura

a) Fragmentación

Según los reportes de la fragmentación, son evaluados las voladuras con los explosivos Heavy Anfo 55 y Quantex 73 en el proyecto 146. En la anterior evaluación de la fragmentación se determina con las imágenes la granulometría de la voladura en: cresta, centro del corte y talud.

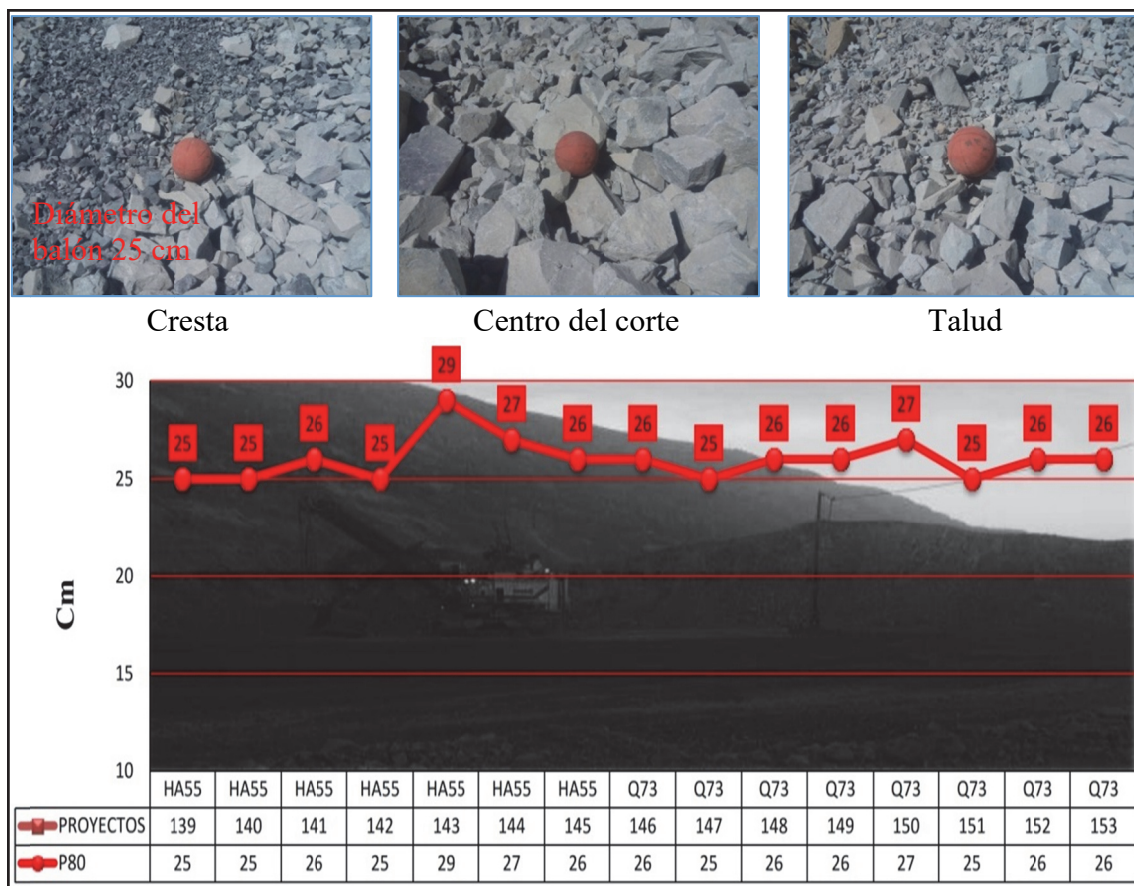


Figura 4. 16 Reporte de fragmentación de la pala n° 7 del proyecto de 146 de fase 4

Fuente: Mina Toquepala

Tabla 4. 36 Resultados de la fragmentación de la pala n° 7

Fragmentación con Hevy Anfo 55 (cm)							Fragmentación con Quantex 73 (cm)							
25	25	26	25	29	27	26	26	25	26	26	27	25	26	26
Promedio de la fragmentación: 26.14 cm							Promedio de la fragmentación: 25.88 cm							

Fuente: Mina Toquepala

Se muestra en la Tabla 4.36 el porcentaje de la fragmentación se mejora al usar el explosivo Q73. Con una reducción del tamaño de roca: 1.02 %.

b) Minado de Pala 07 (Leach)

Para calcular, el número de pases que realizara la pala 07, se calcula con la ecuación 4.2.

- Tiempo de carguío HA55 : 2 min seg
- Tiempo de carguío Q73 : 1 min 40 seg (2 min 00 seg)
- Volumen de cuchara de la Pala n° 7 : 42.82 m³ (56 yd³)
- Densidad del material : 2.6 TM/m³
- Factor de llenado de cuchara (pala) HA55 : 84.00%
- Factor de llenado de cuchara (pala) Q73 : 84.00%
- Factor de esponjamiento del material HA55 : 15.50%
- Factor de esponjamiento del material Q73 : 15.00%
- Tonelaje por pase HA55 : 80.07 TM/pase
- Tonelaje por pase Q73 : 81.32 TM/pase
- Numero de pases : 03 pases
- Capacidad del volquete KOM930E4 : 240 TM

c) Programa de producción

- Horas trabajadas por día : 22
- Días trabajados por mes : 30
- Meses trabajados por año : 12

Tabla 4. 37 Proyección de movimiento de material pala n° 7

22 horas efectivas proyectadas	Unidad de medida	Cantidad del material
TM/hora	TM	4,500.00
TM/día	TM	99,000.00
TM/mes	TM	2'297,000.00
TM/año	TM	35'640,000.00

Fuente: Mina Toquepala

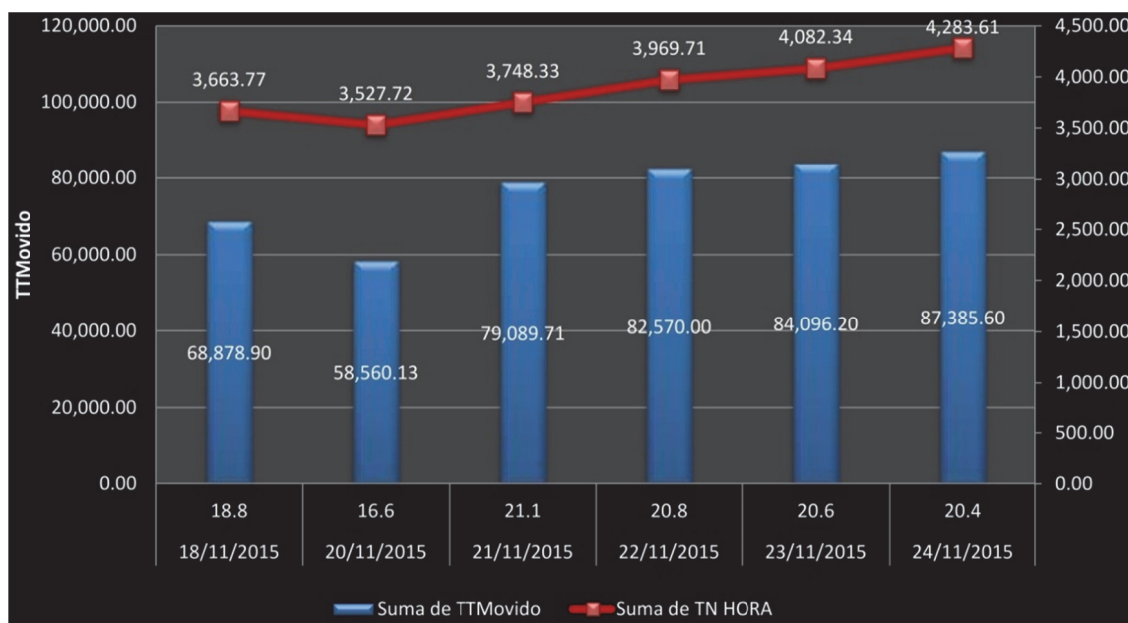
Tabla 4. 38 Diferencia de movimiento de material pala n° 7

Carguío del material con la Pala n° 7	Unidad medida	Movimiento después de la voladura Heavy Anfo 55	Movimiento después de la voladura Quantex 73
Horas efectivas trabajadas		20	20.4
Tiempo promedio máximo	Tiempo	2 min	1min 40 seg
TM/hora	TM	4,278.00	4,283.61
TM/día	TM	85,560.10	87,385.64
TM/mes	TM	2'566,800.00	2'621,569.32
TM/año	TM	30'801,600.00	31'458,831.84

Fuente: Mina Toquepala

En la Figura 4.17 se muestra el reporte de total de toneladas movido de pala n° 7:

Figura 4. 17 Reporte de la pala n° 7 de material total removido



Fuente: Mina Toquepala

d) Vibración

- vibración de taladros de Heavy Anfo55, en el tajo 146 : 234 mm/s
- vibración de taladros de Quantex 73, en el tajo 146 : 226 mm/s
- velocidad pico partícula crítico : 240.33 mm/s

e) Fly rock

El HA55 con mayor columna de carga está dentro del rango de generar una fragmentación que se requiere y los resultados con Q73, se muestra en la Figura 4.18.

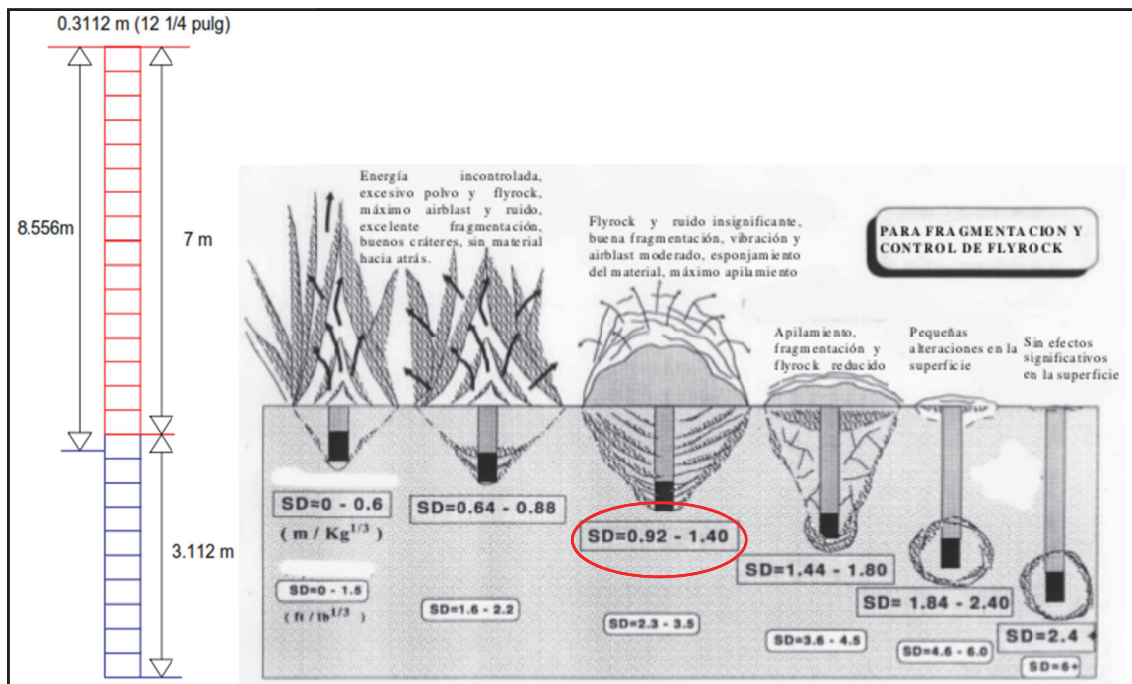


Figura 4. 18 Control de fly rock del proyecto 146

Fuente: Enaex.

Cálculo del índice SD, para Heavy Anfo 55

$$D = 7m + \left(\frac{3.112m}{2}\right) = 8.556 m$$

$$W = 0.507 * \rho_{\text{explosivo}} * \phi^2 \text{pulg} * 3.112m$$

$$W = 0.507 * 1.27 * (12.25)^2 * 3.112m$$

$$W = 300.69 \text{ kg}$$

$$SD = \frac{D}{W^{1/3}}$$

$$SD = \frac{D}{w^{1/3}} = \frac{8.556m}{(300.69 \text{ kg})^{1/3}} = \frac{8.556}{6.67}$$

$$SD = 1.28 \frac{m}{\text{kg}^{1/3}}$$

Cálculo del índice SD para Quantex 73

$$D = 7m + \left(\frac{3.112m}{2}\right) = 8.556m$$

$$W = 0.507 * \rho_{\text{explosivo}} * \phi^2 \text{pulg} * 3.112m$$

$$W = 0.507 * 1.38 * (12.25)^2 * 3.112m$$

$$W = 326.74 \text{ kg}$$

$$SD = \frac{D}{w^{1/3}}$$

$$SD = \frac{D}{w^{1/3}} = \frac{8.556m}{(326.74 \text{ kg})^{1/3}} = \frac{8.556}{6.89}$$

$$SD = 1.24 \frac{m}{\text{kg}^{1/3}}$$

f) Humos

- Voladura empleando la mezcla explosiva Heavy Anfo 55



Figura 4. 19 Humos anaranjados producidos con Heavy Anfo 55

Fuente: Mina Toquepala

- Voladura empleando la mezcla explosiva Quantex 73



Figura 4. 20 Humos producidos con el explosivo Quantex 73

Fuente: Mina Toquepala

4.6.3. Evaluación de los agentes explosivos en tajo de fase 3

4.6.3.1. Ubicación del proyecto

La fase 3 está ubicada en nivel inferior del tajo, ver la Tabla 4.39, en este nivel del tajo cambia el diámetro de la broca (11 pulgadas), porque se presentan brechas volcánicas debido que la roca es competente y se presenta 60% de agua en el proyecto.

Tabla 4. 39 Datos del proyecto 067

Banco	2830
Proyecto	067
Tipo de roca	Bx-ga
Numero de pala	02

Fuente: Mina Toquepala

4.6.3.2. Parámetros dimensionales del proyecto 067

Para determinar el diseño del tajo del proyecto 067, se calcula con la teoría de Richard Ash, que se muestra en el **Anexo 07**.

Tabla 4. 40 Datos del diseño del tajo del proyecto 067

		Unidad de Medida	Heavy Anfo 55	Quantex 73	
Diámetro del taladro		Pulg.	11	11	
Malla Triangular		m	6.5x6.5	6.5x6.5	
Espaciamiento		m	6.5	6.5	
Buden		m	5.63	5.63	
Altura de banco		m	15	15	
Sobre perforación		m	1.5	1.5	
Taco	Taco de producción	m	6	6	
	Taco de amortiguación	m	7	7	
Longitud de Carga	Lc de producción	m	10.5	10.5	Lc Real Quantex 9.5
	Lc de amortiguación	m	9.5	9.5	Lc Real Quantex 8.5
Factor de Esponjamiento Quantex73	Lc Producción	m	-	1	
	Lc Amortiguación	m	-	1	
Profundidad del taladro		m	16.5	16.5	
Tipo de roca		-	Bx-ga	Bx-ga	
Densidad de roca		g/cc	2.6	2.6	
Densidad del HA 55		g/cc	1.27	-	
Densidad de Quantex 73	Densidad Inicial	g/cc		1.38	
	Densidad Final	g/cc		1.14	
Densidad Lineal		kg/ml	77.91	84.66	

Fuente: Mina Toquepala

4.6.3.3. Costo por metro lineal en taladro de 11 pulgadas de diámetro

El costo por metro lineal, se calcula viendo el porcentaje de las figuras 2.5 y 2.8, y calcular el costo con las ecuaciones 2.20 y 2.21, como se muestra en la Tabla 4.41, es solo para taladros de 11 pulgadas de diámetro.

Tabla 4. 41 Costos unitarios de los componentes de HA55 y Quantex73 (11 pulg. φ)

Heavy Anfo55			Quantex 73		
Densidad lineal	kg/ml	77.91	Densidad lineal	kg/ml	84.66
Nitrato de amonio	US\$/kg	0.600	Nitrato de amonio	US\$/kg	0.570
Emulsión matriz	US\$/kg	0.505	Emulsión matriz	US\$/kg	0.505
Diesel	US\$/gl	3.80	Diesel	US\$/gl	3.80
Costo por metro lineal	US\$/ml	44.40	Nitrito de sodio	US\$/gl	0.025
			Costo por metro lineal	US\$/ml	44.87

Fuente: Mina Toquepala

a) Costo de los accesorios de voladura

Los accesorios de voladura son iguales para HA55 y Q73.

Tabla 4. 42 Costo de los accesorios de la voladura

	Cantidad	P.U.(US\$)	Total (US\$)
Booster 2 Lb	Unidad	6.02	6.02
Nonel 5000 ms	Unidad	2.29	2.29
detonador Electrónico	Unidad	24.00	24.00
	Costo por accesorios		32.31

Fuente: Mina Toquepala

b) Cantidad de explosivos por longitud de carga (11 pulg. de diámetro)

Tabla 4. 43 Cantidad de explosivos por taladros del proyecto 067

		Unidad medida	Heavy Anfo55	Quantex73
Cantidad de explosivo	Lc Producción	kg	818.06	804.26
	Lc Amortiguación	kg	740.15	719.60
Volumen por taladro		m ³	548.84	548.84
Peso Especifico		g/cc	2.60	2.60
Toneladas Roto por Taladro		TM	1426.99	1426.99
Factor de Carga	En Tal Producción	kg/TM	0.57	0.56
	En Tal Amortiguación	kg/TM	0.52	0.50

Fuente: Propio del tesista

c) Costo por cada taladro de producción y amortiguación

Tabla 4. 44 Costo por cada taladro

		Unidad de medida	Heavy Anfo55	Quantex73
Costo por Taladro	Producción	US\$	498.55	458.62
	Amortiguación	US\$	454.15	413.75
Toneladas Roto por Taladro		TM	1426.99	1426.99
Costo Total	Tal Producción	US\$/TM	0.35	0.32
	Tal Amortiguación	US\$/TM	0.32	0.29

Fuente: Propio del tesista

Las dimensiones de los taladros de producción y amortiguación de 11 pulgadas de diámetro, diseñados en la fase 3. En esta parte inferior de la mina se encuentran taladros con presencia de agua y también la dureza de la roca como: brechas volcánicas, se necesita diseñar un burden y espaciamiento menor que las fases 4 y 5.

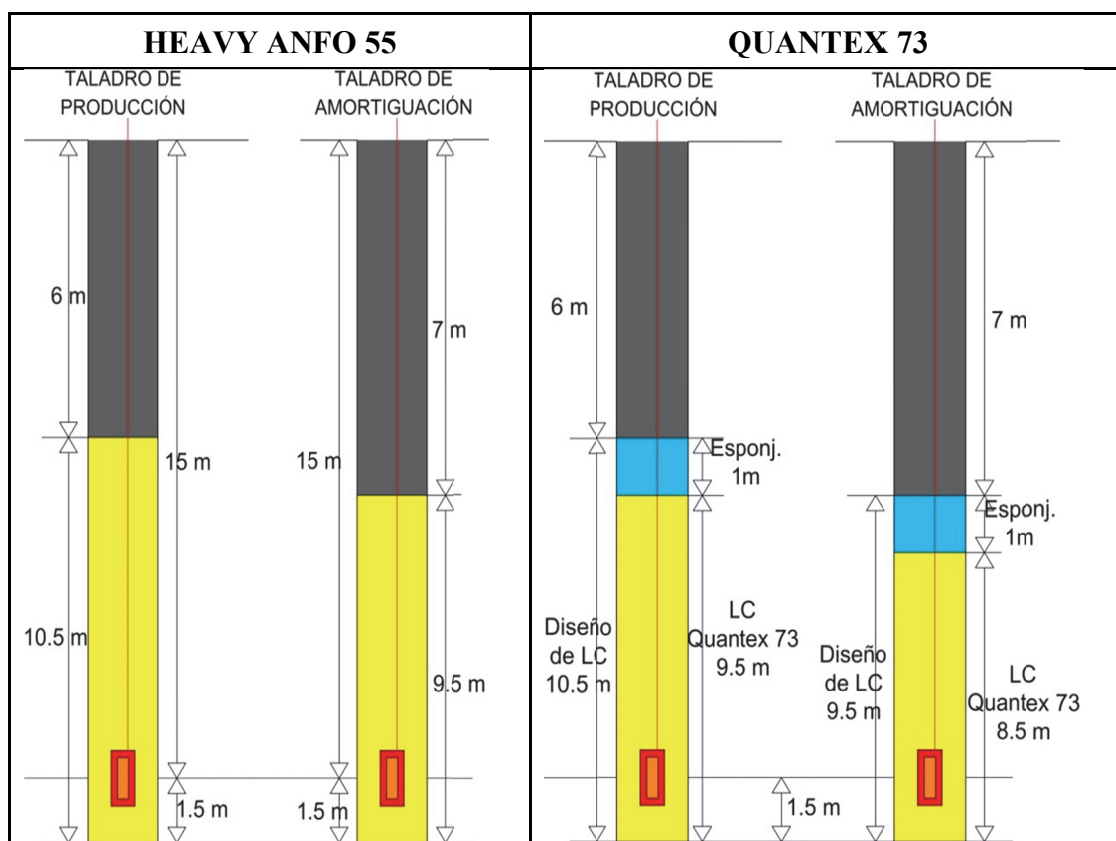


Figura 4. 21 Diseño de los taladros de 11 pulg de diámetro del proyecto 067

Fuente: Mina Toquepala

4.6.3.4. Costos de los explosivos HA55 y Quantex73 del proyecto 067

El costo de cada taladro para el proyecto 067, se calcula de acuerdo a los porcentajes que se muestran en las Figuras 2.6 y 2.9 y utilizando la ecuación 2.20 y 2.21.

Tabla 4. 45 Costo de HA 55 para cada taladro del proyecto 067

Costo del Explosivo Heavy Anfo55				
Taladros Producción	Unidad	P.U.	Cantidad	Costo (US\$)
Nitrato de amonio	TM	600.00	0.38	230.69
Emulsión matriz	TM	505.06	0.41	206.59
Diesel	gl	3.80	3.80	14.46
Fanel primadet	EA	2.29	1	2.29
Detonador electrónico	EA	24	1	24.00
Cable conexión	m	0.22	8	1.76
Booster 2Lb	EA	6.02	1	6.02
Costo Total (\$)				485.81
Taladros Amortiguación	Unidad	P.U.	Cantidad	Costo (US\$)
Nitrato de amonio	TM	600.00	0.35	208.72
Emulsión matriz	TM	505.06	0.37	186.91
Diesel	gl	3.80	3.44	13.08
Fanel primadet	EA	2.29	1	2.29
Detonador electrónico	EA	24	1	24
Cable conexión	m	0.22	8	1.76
Booster 2Lb	EA	6.02	1	6.02
Costo Total (\$)				442.78

Fuente: Propio del tesista

Tabla 4. 46 Costo de Q73 para cada taladro del proyecto 067

Costo del Explosivo Quantex73				
Taladros producción	Unidad	P.U.	Cantidad	Costo (US\$)
Nitrato de amonio	TM	570.00	0.23	133.40
Emulsión	TM	505.06	0.56	284.34
Diesel	gl	3.80	1.10	4.18
Nitrito de sodio	gl	0.025	0.26	0.01
Fanel primadet	EA	2.29	1	2.29
Detonador electrónico	EA	24.00	1	24.00
Cable conexión	m	0.22	8	1.76
Booster 2Lb	EA	6.02	1	6.02
			Costo Total (\$)	456.00
Taladros Amortiguación	Unidad	P.U.	Cantidad	Costo (US\$)
Nitrato de amonio	TM	570	0.21	119.36
Emulsion	TM	505.06	0.50	254.41
Diesel	gl	3.8	1.00	3.82
Nitrito de sodio	gl	0.025	0.23	0.006
Fanel primadet	EA	2.29	1	2.29
Detonador electrónico	EA	24	1	24.00
Cable conexión	m	0.22	8	1.76
Booster 2Lb	EA	6.02	1	6.02
			Costo Total (\$)	411.66

Fuente: Propio del tesista

a) Porcentaje de reducción de costos de voladura

Obteniendo el costo de los taladros de producción y amortiguación, incluyendo el costo de los accesorios en la Tabla 4.47 se muestra el % de la reducción del costo.

Tabla 4. 47 Porcentaje de la reducción de los taladros del proyecto 067

	Heavy Anfo55 (US\$/tal)	Quantex73 (US\$/tal)	% reducción
Taladros de producción	485.81	456.00	6.14%
Taladros de amortiguación	442.78	411.66	7.03%

Fuente: Propio del tesista

4.6.3.5. Comparación de costo de voladura de Heavy Anfo 55 y Quantex73

Teniendo el costo de los taladros de producción y amortiguación y los 158 taladros de la malla del proyecto de calcula el costo total de cada explosivo (HA55 y Q73).

Tabla 4. 48 Costo total del proyecto 067 con HA55

Voladura con Heavy Anfo55	Taladros de Producción	Taladros de Amortiguación	Costo por explosivo
Taladros cargados	115	43	
\$/Malla	\$55,867.78	\$19,039.72	\$74,907.50
Altura (m)	15	15	
Espac (m)	6.5	6.5	
Burden (m)	5.63	5.63	
Volumen (m ³)	63,117.01	23,600.27	86,717.29
Tonelaje (TM)	164,104.24	61,360.71	225,464.95

Fuente: Propio del tesista

Tabla 4. 49 Costo total del proyecto 067 con Q73

Voladura con Quantex73	Taladros de Producción	Taladros de Amortiguación	Costo por explosivo
Taladros cargados	115	43	
\$/Malla	\$52,439.44	\$17,701.39	\$70,140.83
Altura (m)	15	15	
Burden (m)	6.5	6.5	
Espac (m)	5.63	5.63	
Volumen (m ³)	63,117.01	23,600.27	86,717.29
Tonelaje (TM)	164,104.24	61,360.71	225,464.95

Fuente: Propio del tesista

El costo total de 158 taladros de producción y amortiguación del proyecto 067, se ahorra \$4,766.67, por lo tanto se obtiene un costo menor al de HA55. Y en la siguiente Tabla 4.50, se muestra el costo por (US\$/TM).

Tabla 4. 50 Costo total del proyecto 067 (US\$/TM)

	Heavy Anfo55	Quantex73	Reducción
	(US\$/TM)	(US\$/TM)	(%)
Costo Total de voladura	0.332	0.311	6.36%

Fuente: Propio del tesista

4.6.3.6. Diseño de voladura

El diseño, se realiza de acuerdo a las características del terreno como se muestra:

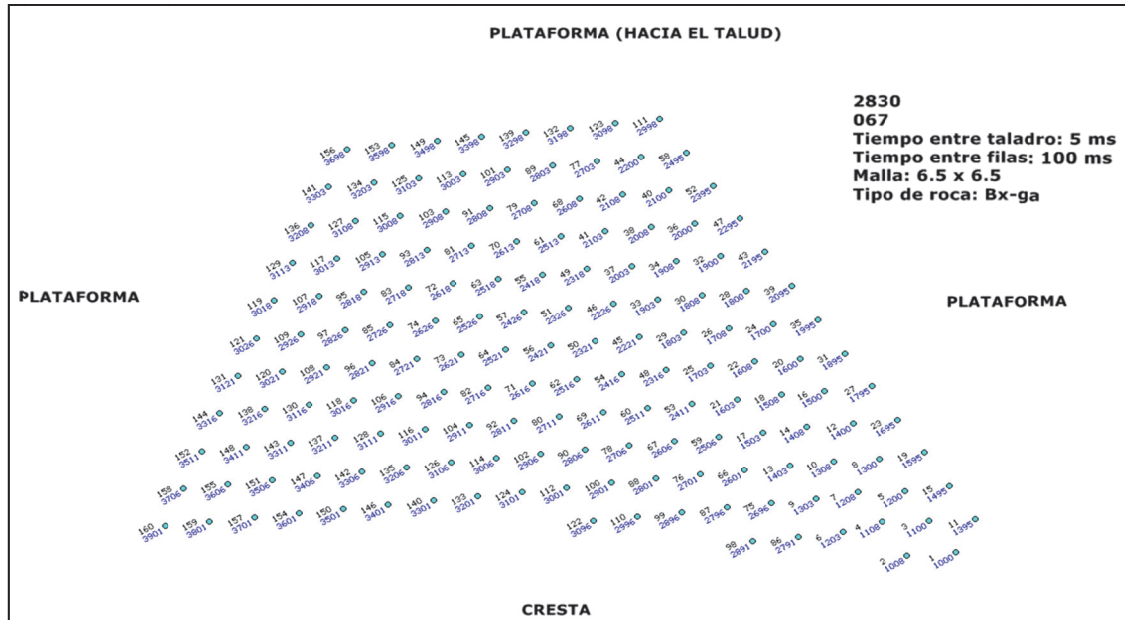


Figura 4. 22 Secuencia de iniciación de filas de taladros y barrenos del proyecto 067

Fuente: Mina Toquepala

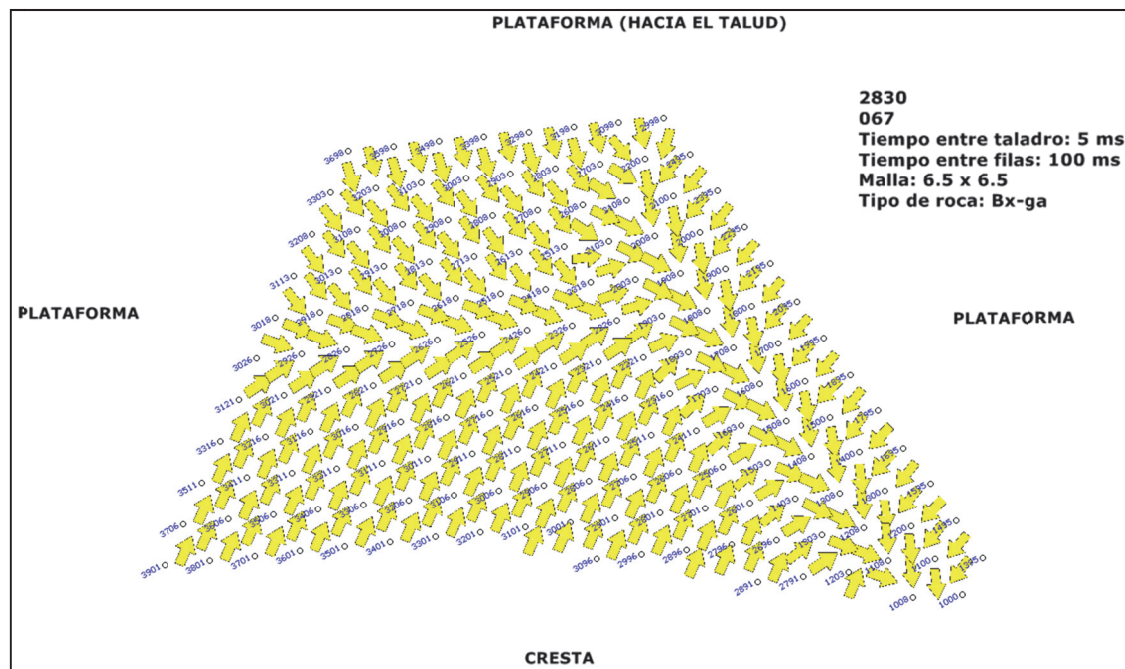


Figura 4. 23 Diseño de apilamiento del material del proyecto 067

Fuente: Mina Toquepala

4.6.3.7. Análisis de voladura

a) Fragmentación

Se muestra en la siguiente figura 4.24, se evalúa la fragmentación de los proyectos anteriores que se realizó con el explosivo Heavy Anfo 55 y los resultados con el explosivo Quantex 73, se mejoró en un porcentaje mínimo con se muestra en los reportes de fragmentación de la pala n° 2 y también se muestran las partes de muestreo de la fragmentación en; cresta, centro del corte y talud.

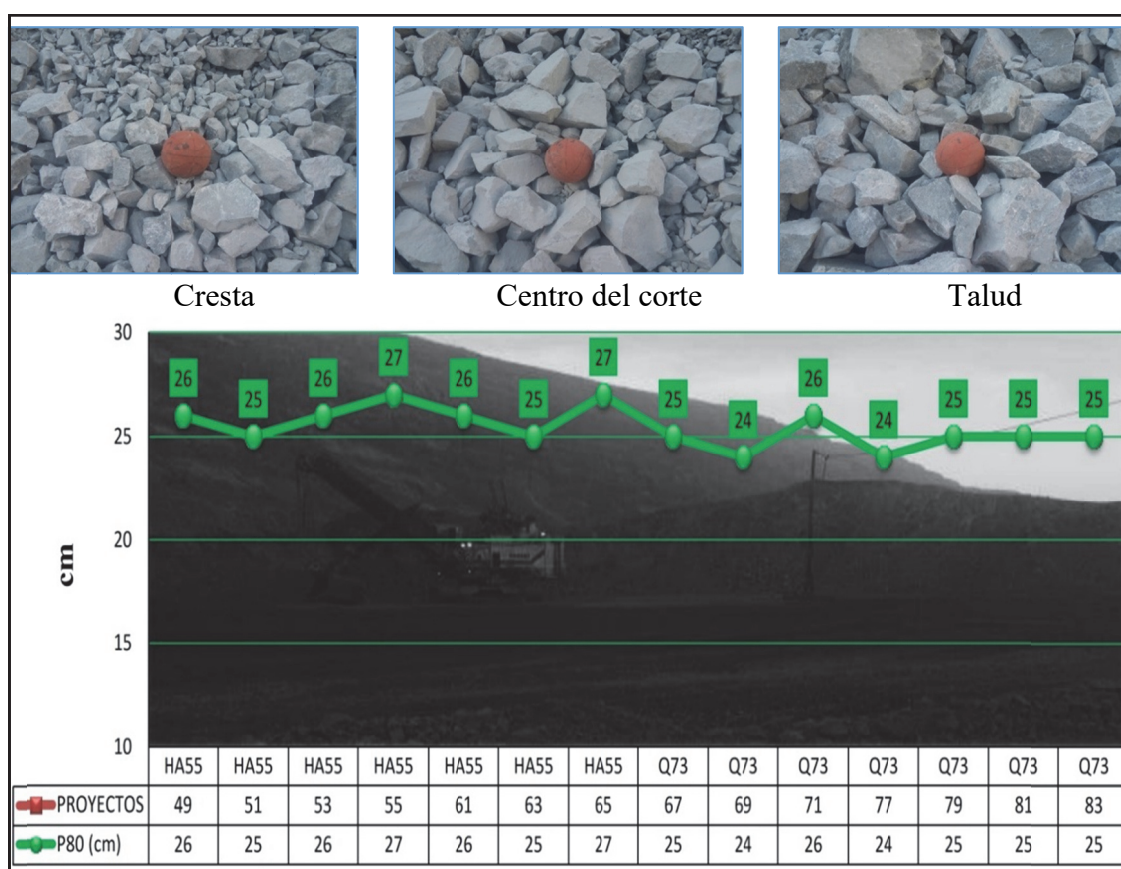


Figura 4. 24 Reporte de pala n°2, la fragmentación de la roca en el proyecto 067

Fuente: Mina Toquepala

Tabla 4. 51 Resultados del promedio de la fragmentación de la fase 3

Fragmentación con Heavy Anfo 55 (cm)							Fragmentación con Quantex 73 (cm)						
25	25	26	27	26	25	27	25	24	26	24	25	25	25
Promedio de fragmentación: 26 cm							Promedio de fragmentación: 24.86 cm						

Fuente: Mina Toquepala

La fragmentación de roca con el explosivo Quantes 73 se reduce un promedio de 4.40%.

b) Minado de Pala 02 (Mineral)

- Tiempo de carguío HA55 : 1 min 50seg
- Tiempo de carguío Q73 : 1 min 35 seg (2 min 00 seg)
- Volumen de cuchara de la Pala n° 2 : 42.82 m³ (56 yd³)
- Densidad del material : 2.6 TM/m³
- Factor de llenado de cuchara (pala) HA55 : 84.00%
- Factor de llenado de cuchara (pala) Q73 : 84.00%
- Factor de esponjamiento del material HA55 : 15.50%
- Factor de esponjamiento del material Q73 : 15.00%
- Tonelaje por pase HA55 : 80.07 TM/pase
- Tonelaje por pase Q73 : 81.32 TM/pase
- Numero de pases : 03 pases
- Capacidad del volquete KOM930E4 : 240 TM

c) Programa de producción

- Horas trabajadas por día : 22
- Días trabajados por mes : 30
- Meses trabajados por año : 12

Tabla 4. 52 Proyección de movimiento de material pala eléctrica n° 2

22 horas efectivas proyectadas	Unidad de medida	Cantidad del material
TM/hora	TM	3,000.00
TM/día	TM	66,000.00
TM/mes	TM	1'980,000.00
TM/año	TM	23'760,000.00

Fuente: Mina Toquepala

Tabla 4. 53 Diferencia de movimiento de material pala eléctrica n° 2

Carguío del material con la Pala n° 2	Unidad medida	Movimiento después de la voladura Heavy Anfo 55	Movimiento después de la voladura Quantex 73
Horas efectivas trabajadas		20.1	20.8
Tiempo promedio máximo	Tiempo	1min 50seg	1min 35 seg
TM/hora	TM	2,936.00	2,949.68
TM/día	TM	59,013.60	61,353.34
TM/mes	TM	1'770,408.00	1'840,600.32
TM/año	TM	21'244,896.00	22'087,203.84

Fuente: Mina Toquepala

En la figura 4.25, se muestra el total de toneladas movidos por hora y las horas efectivas después de haber realizado la voladura con el explosivo Quantex 73 del proyecto 067, el movimiento del material es menor, porque se encuentra en el nivel inferior del tajo, en donde el recorrido de los volquetes KOM es mantener su capacidad de rendimiento de trabajo de la pala n 2.

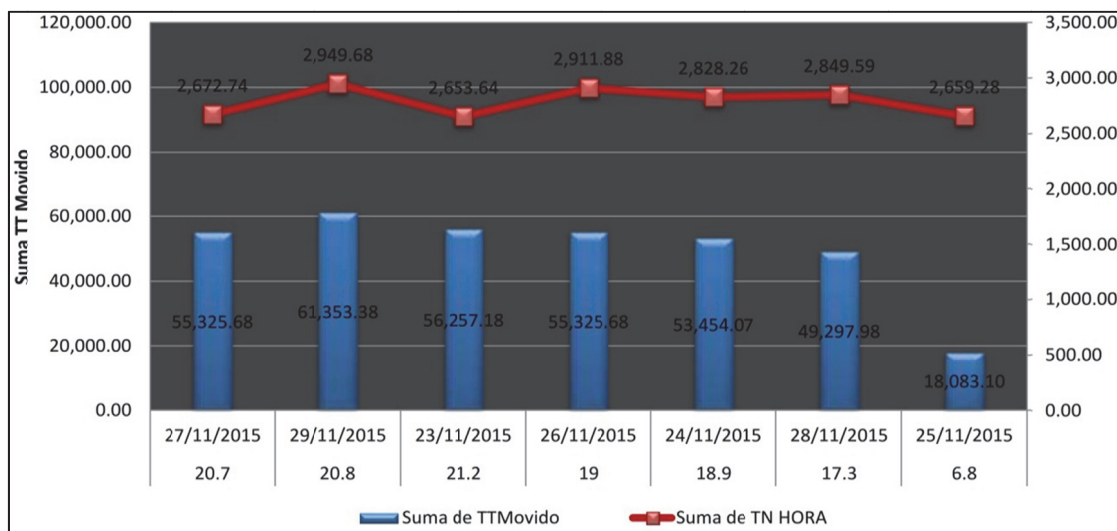


Figura 4. 25 Material movido por la pala n° 2

Fuente: Mina Toquepala

d) Vibración

- vibración de taladros de Heavy Anfo55, en el tajo 067 : 213 mm/s
- vibración de taladros de Quantex 73, en el tajo 067 : 142mm/s
- velocidad pico partícula crítico :261.87 mm/s(Bx-ga)

e) Análisis de fly Rock

En el proyecto 067, se evalúa el fly rock en taladro (11 pulg de diámetro). Donde es determinante; el diámetro del taladro, la longitud de taco, longitud de carga y las densidades de los explosivos para poder controlar la voladura, se ve en la figura 4.26.

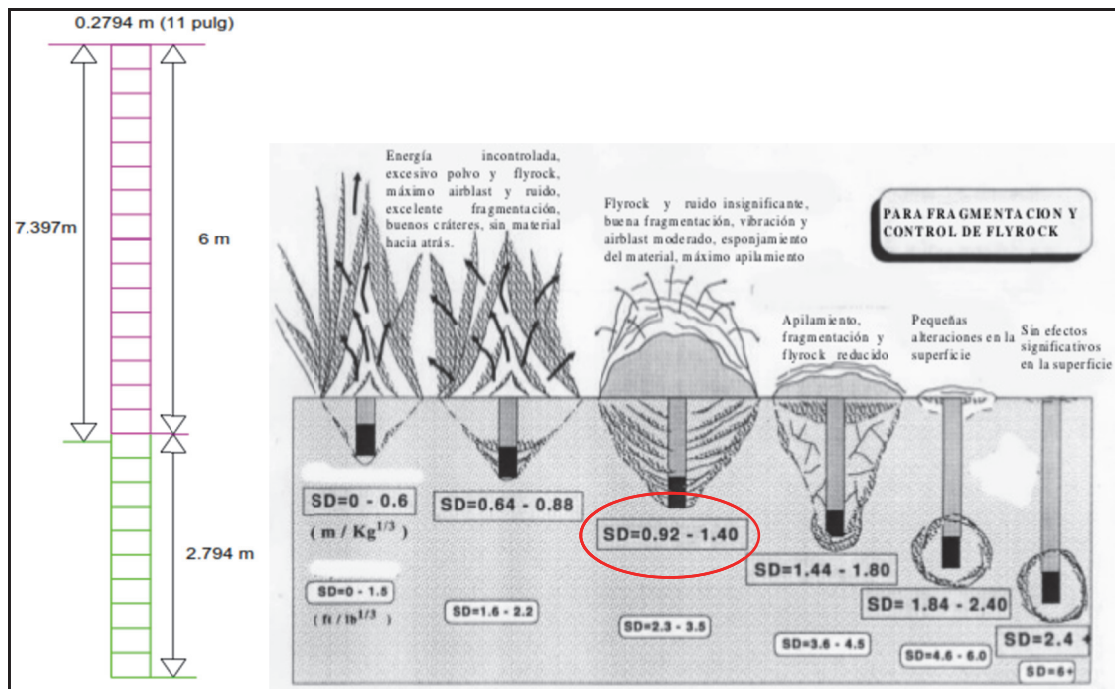


Figura 4. 26 Control de Fly rock en el proyecto 067

Fuente: Enaex

Cálculo del índice SD, para Heavy Anfo 55

$$D = 6m + \left(\frac{2.794m}{2}\right) = 7.397m$$

$$W = 0.507 * \rho_{\text{explosivo}} * \phi^2 \text{pulg} * 2.794m$$

$$W = 0.507 * 1.27 * (11)^2 * 2.794m$$

$$W = 217.68 \text{ kg}$$

$$SD = \frac{D}{w^{1/3}} = \frac{7.397m}{(217.68 \text{ kg})^{1/3}} = \frac{7.397}{6.02}$$

$$SD = 1.23 \text{ m/kg}^{1/3}$$

Cálculo del índice SD para Quantex 73

$$D = 6\text{m} + \left(\frac{2.794\text{m}}{2}\right) = 7.397\text{m}$$

$$W = 0.507 * \rho_{\text{explosivo}} * \phi^2 \text{pulg} * 2.794\text{m}$$

$$W = 0.507 * 1.38 * (11)^2 * 2.794\text{m}$$

$$W = 236.54 \text{ kg}$$

$$SD = \frac{D}{w^{1/3}} = \frac{7.397\text{m}}{(236.54 \text{ kg})^{1/3}} = \frac{7.397}{6.18}$$

$$SD = 1.19 \text{ m/kg}^{1/3}$$

f) Humos

En la siguiente figura 4.27, se observa cómo se produce los humos anaranjados, cuando se realiza la voladura con el explosivo heavy anfo 55. En esta fase 3, de la mina hay presencia de agua y el HA55 no es resistente al agua por el porcentaje de emulsión.

En la figura 4.28, con el empleo de Quantex73, por el contenido de 70% emulsión, resiste más en taladros con presencia de agua y no genera humos anaranjados.



Figura 4. 27 Humos anaranjados producidos por la voladura con HA55

Fuente: Mina Toquepala



Figura 4. 28 Humos producidos por la voladura con MEQ 73

Fuente: Mina Toquepala

4.6.4. Resultados de costos de voladura de los proyectos de las fases 3,4 y 5

a) Resultados de la Evaluación de costos de voladura

En las siguientes figuras, se muestra el resultado de las diferencias de los costos de explosivos por metro lineal (US\$/ml), de Heavy Anfo 55 y Quantex 73. Se calcula solo para los taladros de diámetros de 12 ¼ y 11 pulgadas. Y la cantidad de los explosivos

que se cargara en su longitud de carga de los taladros de producción y amortiguación. Y el costo total de las mallas de los tres proyectos que se evaluaron.

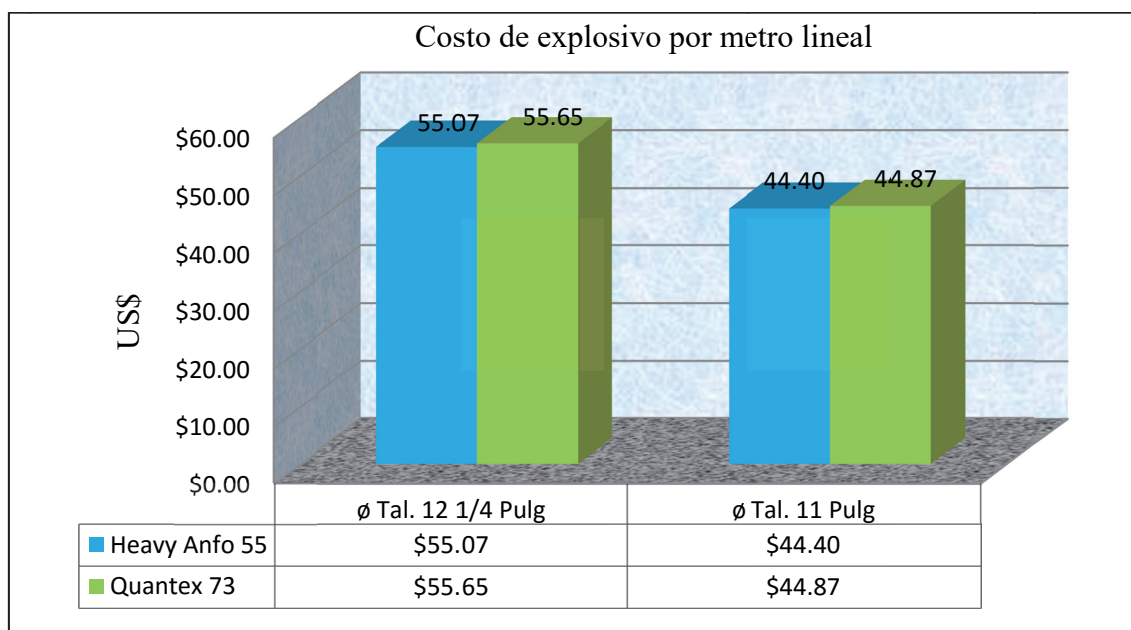


Figura 4. 29 Diferencia de costos por metro lineal de HA55 y Q73

Fuente: Propio de tesista

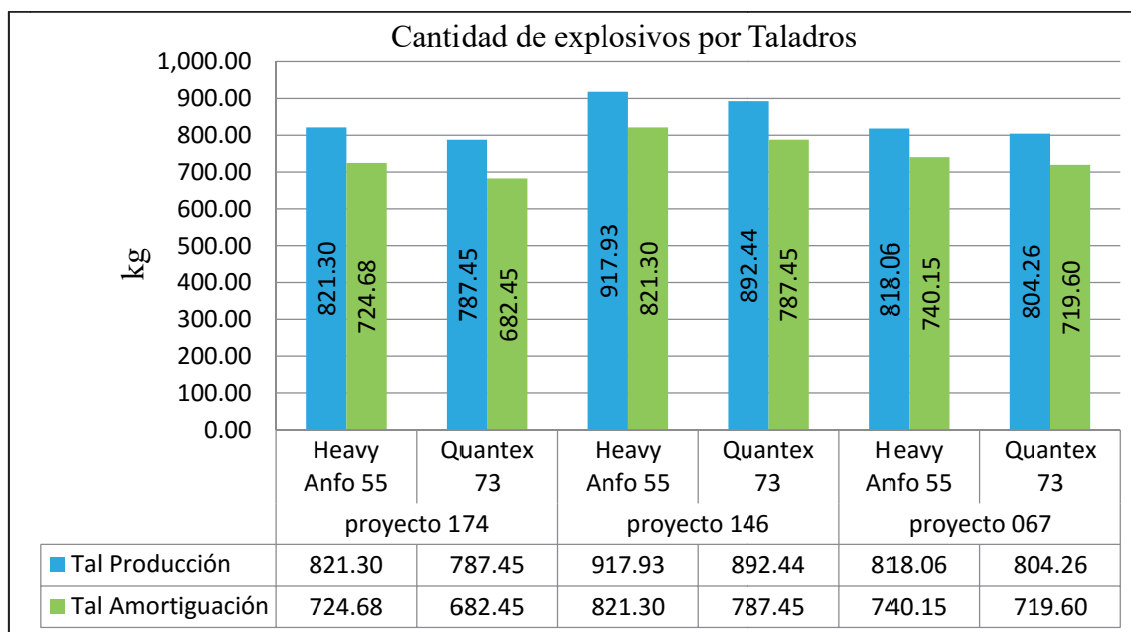


Figura 4. 30 Cantidad de explosivos por taladros según su longitud de carga

Fuente: Propio de tesista

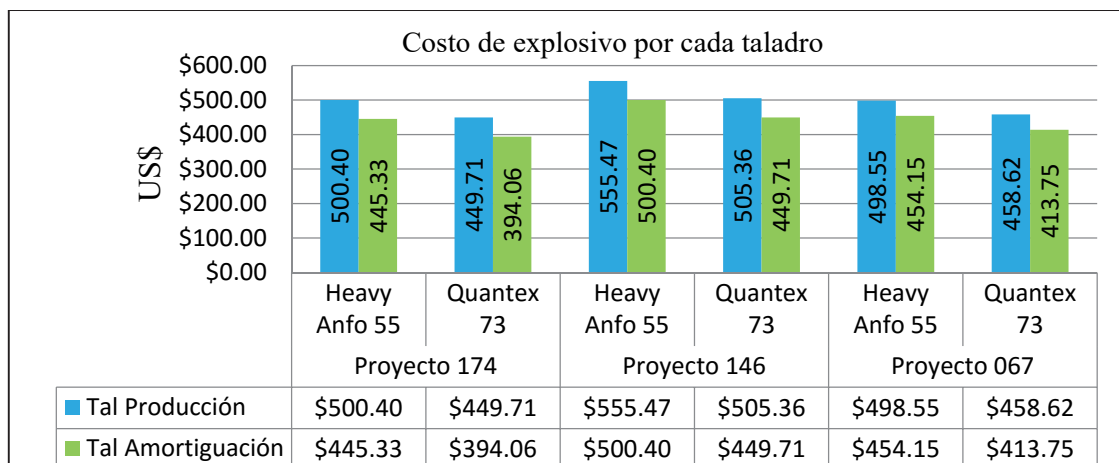


Figura 4. 31 Resultado de costo de explosivos por cada taladro de los proyectos

Fuente: Propio de tesista

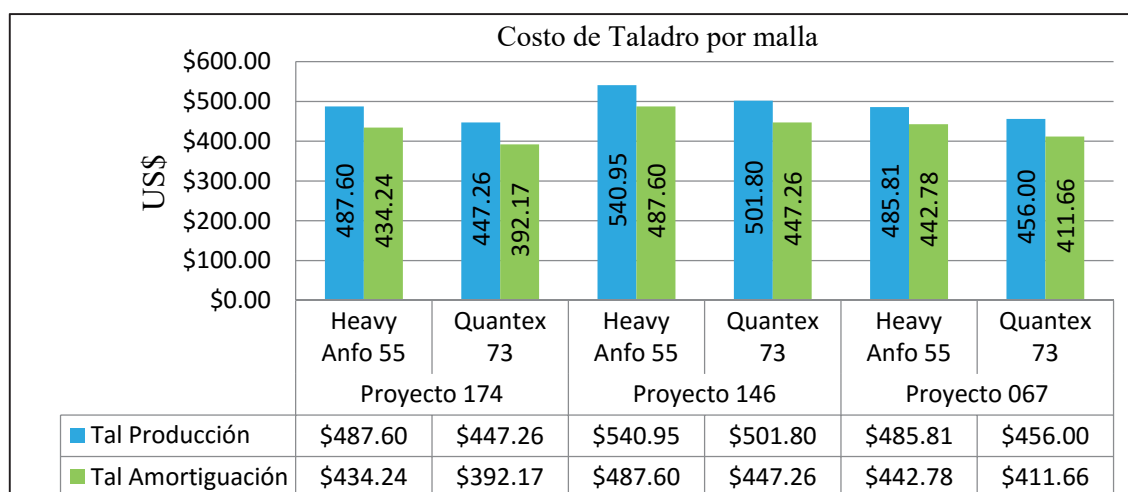


Figura 4. 32 Resultado de costo de taladro por malla

Fuente: Propio de tesista

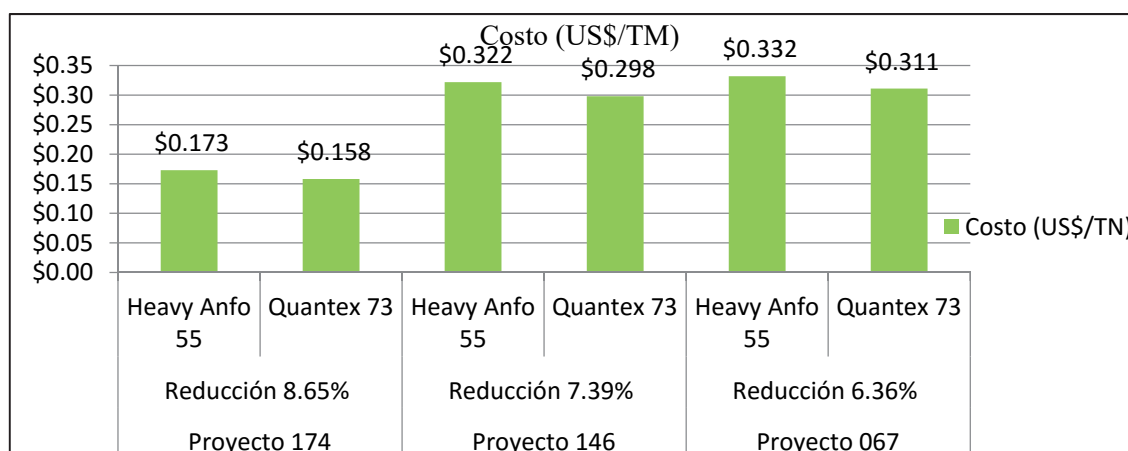


Figura 4. 33 Porcentaje de la reducción de los costos de los proyectos 174,146 y 067

Fuente: Propio de tesista

b) Evaluación de la voladura

- **Fragmentación**

Los resultados de la fragmentación en los proyectos 174, 146 y 067. Se muestra el porcentaje de la reducción de la roca con el explosivo Quantex 73:

- En el reporte de la pala n 8 se obtiene un porcentaje de reducción de: 3.85%
- En el reporte de la pala n 7 se obtiene un porcentaje de reducción de: 1.02 %
- En el reporte de la pala n 2 se obtiene un porcentaje de reducción de: 4.40%

Se evaluaron en el presente trabajo muestra en las figuras de la evaluación de los proyectos de cada fase.

- **Vibración**

En la siguiente Figura 4.34, se muestran los resultados de las vibraciones de los tres proyectos que se ha evaluado.

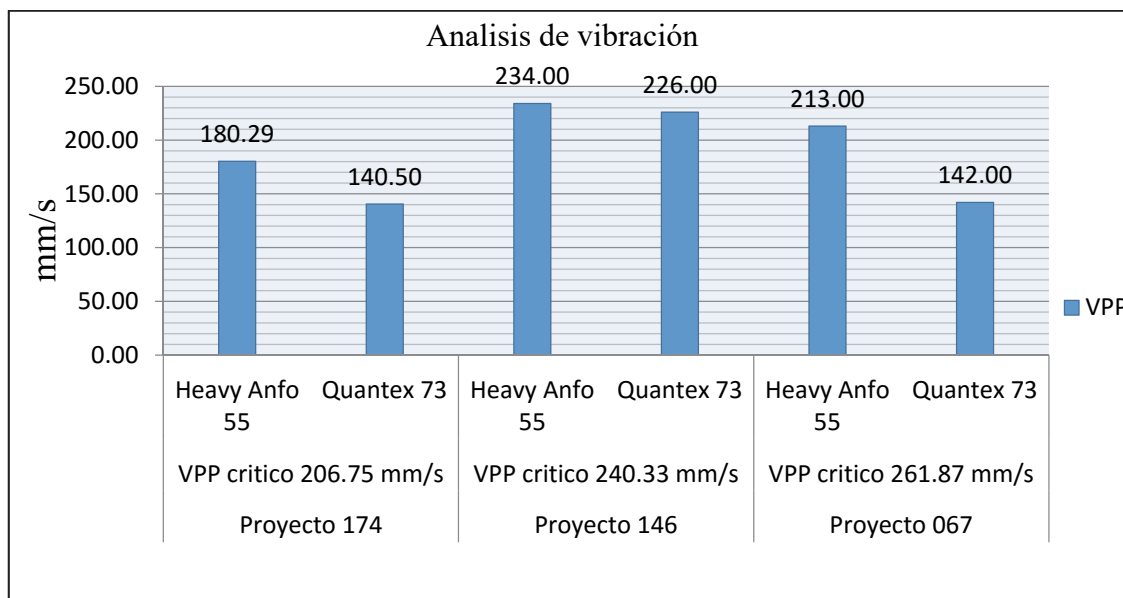


Figura 4. 34 Resultados de la velocidad pico partícula

Fuente: Mina Toquepala

- **Resultados de fly rock**

Según por Alan Bauer y Frank chiapetta, basado en resultados obtenidos de pruebas de cráter y/o filmaciones con cámara de alta velocidad. Se establece multiplicando la denominada “Scaled Depth of Burial, SD”, que se muestra en la Figura 4.35, los resultados de fly rock, de los tres proyectos 174,146 y 067.

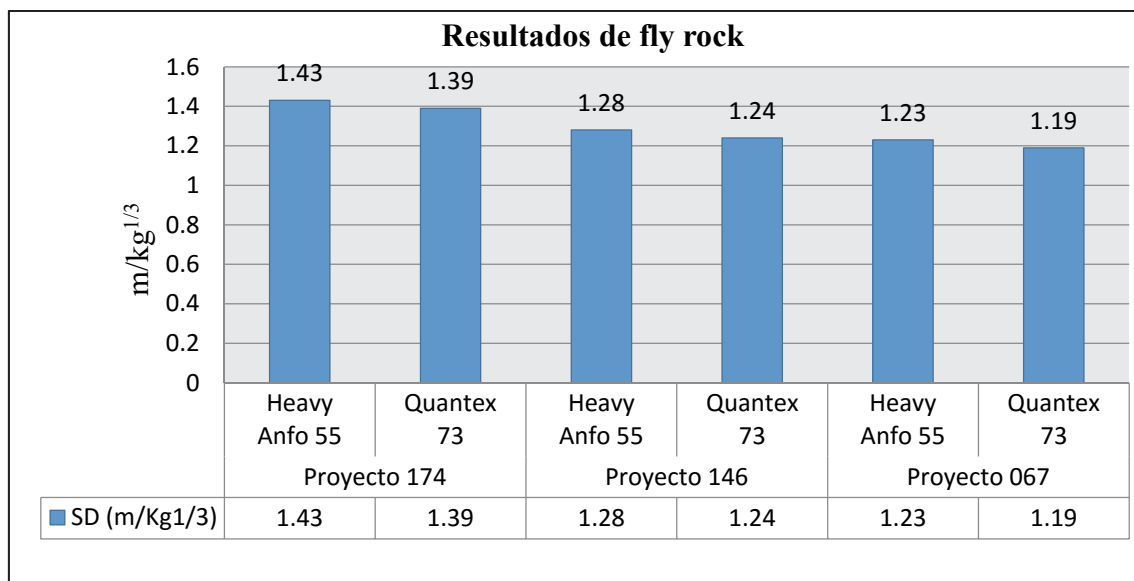


Figura 4. 35 Resultados de fly rock

Fuente: Propio de tesista

- **Humos**

Con el explosivo Quantex 73, no se genera humos anaranjados porque tiene 70% de emulsión, tiene una velocidad de detonación 5453 m/s y es muy sensible a la iniciación de la detonación debido al contenido de nitrito de sodio.

4.6.5. Discusión de resultados

- En la Tesis Titulado “Diseño de las Mallas de Perforación y Voladura Utilizando la Energía Producida por las Mezclas Explosivas”.

Respecto a los resultados económicos la diferencia de US\$/TM es 0.014 a favor del anfo pesado

En nuestra investigación, en el proyecto 174 la diferencia de los costos con el explosivo Heavy Anfo 55 y Quantex 73 se obtiene: 0.015 (US\$/TM) a favor del Quantex 73.

- En la Tesis Titulado “Evaluación Técnica Económica del Uso del Sang en Mina – La Arena”.

En el registro se puede observar que existe un ahorro de 0.02 US\$/TM en el tajo calaorco y 0.01 US\$/TM, en el tajo Ethel respectivamente al usar SAN-G y Heavy anfo.

Se ha obtenido en los registros que se puede ahorrar un 7.41% en el consumo de explosivos usando SAN-G.

En nuestra investigación, en el proyecto 146 el ahorro con el explosivo Quantex 73 es: 0.024 US\$/TM, frente al Heavy Anfo 55.

En nuestra investigación, en el proyecto 174, empleando el explosivo Quantex 73 el porcentaje de la reducción de los explosivos en los taladros de producción es: 8.27 % y en taladros de amortiguación es: 9.69%. a favor de Quantex 73.

CONCLUSIONES

Luego de haber realizado la evaluación de los explosivos Heavy Anfo55 y Quantex 73, los resultados de fragmentación y la reducción de los costos de explosivos hemos conseguido una mejora general en la voladura con beneficios como: cuidado del medio ambiente, menor vibración y menor fly rock.

- La evaluación de los costos comparativos de los explosivos en taladros de 12 ¼ pulg. Diámetro, se obtiene el costo por metro lineal de Heavy Anfo 55 (US\$/ml 55.07) y el costo de Quantex (US\$/ml 55.65). La diferencia de los costos de Quantex 73 se nota en la columna de carga, por el esponjamiento que genera el 0.14 % de nitrito de sodio. En donde se reduce 1 m de columna de carga de los taladros de producción y amortiguación y la fragmentación aumenta porque tiene una velocidad de detonación mayor que el de Heavy Anfo.
- Se ha determinado la evaluación del costo total de voladura del proyecto 174 de la fase 5; al realizar la voladura en roca andesita Toquepala, en dimensiones de la malla 9m x 9m, en total de 93 taladros, para explotar 254,427.01 TM de material, el costo con el explosivo Heavy Anfo 55 es 0.173 US\$/TM y con el explosivo Quantex 73 es 0.158 US\$/TM. Con un porcentaje de reducción de 8.65% a favor de Quantex 73.
- Los resultados de la fragmentación que se muestra en cada proyecto de fase 3, se procede a determinar con un rango de medida que debe estar por debajo de P80. La proyección del movimiento de la pala n° 2 (volumen cuchara 42.82 m³), es de 3,000.00 TM/h. Donde solo llega a cargar empleando la voladura con Heavy Anfo es 2,936.00 TM/h y el carguío con Quantex 2,949.68 TM/h. La diferencia del carguío se debe al promedio de la fragmentación del explosivo Heavy Anfo 55 es de 26 cm. Y los resultados de Quantex 73 es de 24.86 cm, con una reducción de fragmentación de 4.40%

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar las voladuras con diferentes densidades finales del agente explosivo Quantex en el tajo de la mina. antes de cargar a los taladros de producción y amortiguación, para tener una velocidad de detonación que nos brinde una mejor fragmentación de roca.
- Se recomienda aplicar los datos de geomecánica para realizar la voladura en los tajos donde podríamos calcular una nueva medida del burden y espaciamiento y así determinar según los datos geomecánicos la secuencia salida de los taladros.
- Se recomienda controlar las densidades finales del explosivo Quantex, y controlar la mezcla explosiva antes de 12 horas, en zonas donde se presenta taladros con agua, para que su densidad final de 1.27 g/cc se mantenga y también que las burbujas de nitrito de sodio no se desaparezcan en el fondo del taladro y así evitar la variación de longitud de carga proyectada.

BIBLIOGRAFÍA

- Aduvire Soto, L.A. (2011). *Plan de desarrollo local concertado del distrito de Ilabaya "2011-2021"*. Ilabaya, Perú. Recuperado de https://www.munilabaya-gob.pe/web/archivos/transparencia/PDLC-2011-2021-189_1314823264.pdf
- Álvarez R., J. (2015). *Detonador electrónico I-Kon*. Lima, Perú. Orica mining services. Recuperado de <http://www.scribd.com/presentation/94856893/Ikon>
- Ames Lara, V. A. (2008). *Diseño de las mallas de perforación y voladura utilizando la energía producida por las mezclas explosivas* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Anchorena López, A. E. (Setiembre de 2015). *Modelo predictivo de fragmentación y su aplicación en una matriz de decisión*. En 32 convención minera (Perumin), Instituto de Ingenieros de Minas del Perú, Arequipa, Perú.
- Benito Lopez, R. O. (1998). *Diseño de planeamiento de minado a cielo abierto mina Toquepala* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del altiplano, Puno, Perú.
- Bellido Diaz, E. (1995). *Evaluación de costos de perforación y análisis de reemplazo de equipos de perforación mina Toquepala* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del altiplano, Puno, Perú.
- Bernaola Alonso, J., Castilla Gómez, J. y Herrera Herbert, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. E.T.S. de Ingenieros de Minas de Madrid, Madrid, España.
- B. Stevenson, F. (Abril de 1968). *Interpretación estructural del depósito de Toquepala primera parte*. Toquepala, Perú. Southern Perú Copper Corporation.

Chura Torres, H., Mamanchura Sosa, H., y Danex Callomamani, V. (Febrero de 2015). *Control de densidades con mezcla explosiva Quantex 73*. (Informe de guardia “A”). Toquepla, Perú. Exsa soluciones exactas.

Concepto de costo (2015). Recuperado de <http://concepto.de/costo/>

Codelco educa (2016). *Control y evaluación de la tronadura*. Chile. Recuperado de https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_extraccion_tronaduras_control.asp

Cueva Arauzo, O. (Setiembre de 2015). *Técnicas modernas en voladuras controladas en minería a cielo abierto*. En 32 convención minera (Perumin), Instituto de Ingenieros de Minas del Perú, Arequipa, Perú.

Definición de evaluación (2007). Recuperado de <https://www.definicionabc.com/general/evaluacion.php>

Duno, E., Guanipa, A., y Medina, O. (Octubre de 2009). *Macizo rocoso y roca intacta* (Informe técnico). Santa Ana de Coro, Venezuela. Instituto Universitario de Tecnología Alonso Gamero. Recuperado de <https://www.scribd.com/doc/52506430/MACIZO-ROCOSO> p.1

Enaex (2014). *Manual de tronadura Enaex s.a.* Chile, Recuperado de <https://es.slideshare.net/AlfredoPangue/manual-de-tronadura-enaex>

Exsa (2014). *Tecnología Quantex*. Lima, Perú. Exsa soluciones exactas. Recuperado de <http://www.academia.edu/10274188/QUANTEX>

Exsa (2013). *Manual práctico de voladura* (4a ed.). Lima, Perú. Recuperado de <https://exsa.net/wp-content/publicacion/manual-de-voladura.pdf>

Guillen Núñez, L. (Octubre de 2014). *Perforación y voladura aplicada a la minería a cielo abierto* (Exposición). Toquepala, Perú. Southern Perú. Recuperado de

http://www.diremmoq.gob.pe/web13/files/capacitacion/curso_capacitacion_07_11_2014/11_Perforacion_Voladura_Aplicada_Mineria.pdf

- Hinostroza Sierra, J. R. (2014). *Optimización de la fragmentación en las rocas con la aplicación de la doble iniciación electrónica en la explotación de cobre porfirítico a cielo abierto* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Huangal Cruzado, C. A. (2014). *Evaluación técnica económica del uso del sang en mina "La Arena"* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Iglesias S., L. (Setiembre de 2015). *Análisis de laboratorio de MEQ 73* (Informe asistencia técnica - exsa). Toquepala, Perú. Exsa soluciones exacta.
- Iglesias S., L. (Setiembre de 2015). *Aplicación de la tecnología Quantex en mina Toquepala* (Informe asistencia técnica - exsa). Toquepala, Perú. Exsa soluciones exacta.
- Medina Cortes, R. O. (2014). *Evaluación técnico-económica-ecológica de los resultados de las pruebas realizadas usando emulsiones gasificadas en Cuajone-Southern Perú* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Mori Flores, J. J. y Canchucaja Cruz, R. F. (2011). *Estudio técnico-económico de la producción de nitrato de amonio para la industria minera a partir de la petroquímica del metano* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Olazabal Mora, J. O. (2014). *Factibilidad del cambio de sistema de control de mina en la unidad minera Toquepala* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Orica mining service (2014). *Detonador electrónico*. Lima, Perú. Unidad minera Cuajone. Recuperado de <https://www.scribd.com/doc/94147217/ORICA>

- Orellana E., L.F. y Paredes M., P. (2011). *Ejercicio fragmentación*. Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile.
- Palomino Vilca, J. (2013). *Diseño de mallas de perforación y voladura para optimizar la fragmentación en el tajo Jessica-CIA Minera Arasi SAC* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Pernia Llera, J. M., Lopez Jimeno, C., Pla Ortiz de Urbina, F., y Lopez Jimeno, E. (1987). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid, España.
- Real academia española (Octubre de 2014). *Diccionario de la lengua española*. Recuperado de <http://dle.rae.es/?id=YxyAqjV>
- Rendon, G. G. (Marzo de 2015). *Propuesta de valor agregado para disminuir los costos en fragmentación de roca* (Informe de jefe de cuentas). Lima, Perú. Exsa soluciones exacta.
- Salcedo Orihuela, E. E. (2015). *Evaluación técnica y económica de la emulsion gasificada en minera Yanacocha SRL* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Tecnología Quantex (Abril de 2015). *Reduciendo los costos de voladura*. (Informe de asistencia técnica – exsa). Toquepala, Perú. Exsa soluciones exacta.
- Tecnología y seguridad minera (1994). *Manual de perforación y voladura de rocas* (2a ed.). Madrid, España. Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Teoría de costos (2001). Recuperado de <https://www.scribd.com/document/311932176/Teoria-de-Costos>
- Vera Gonzalo, A. (1995). *Aspecto geológico de la mina Toquepala* (Informe técnico). Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Recuperado de <https://www.scribd.com/document/190083036/Mina-Toquepala>

ANEXOS:

Anexo 01 Componentes del sistema electrónico I-Kon



Fuente: Orica mining services

Anexo 02 Logger



Fuente: Orica mining services

Anexo 03 Blaster

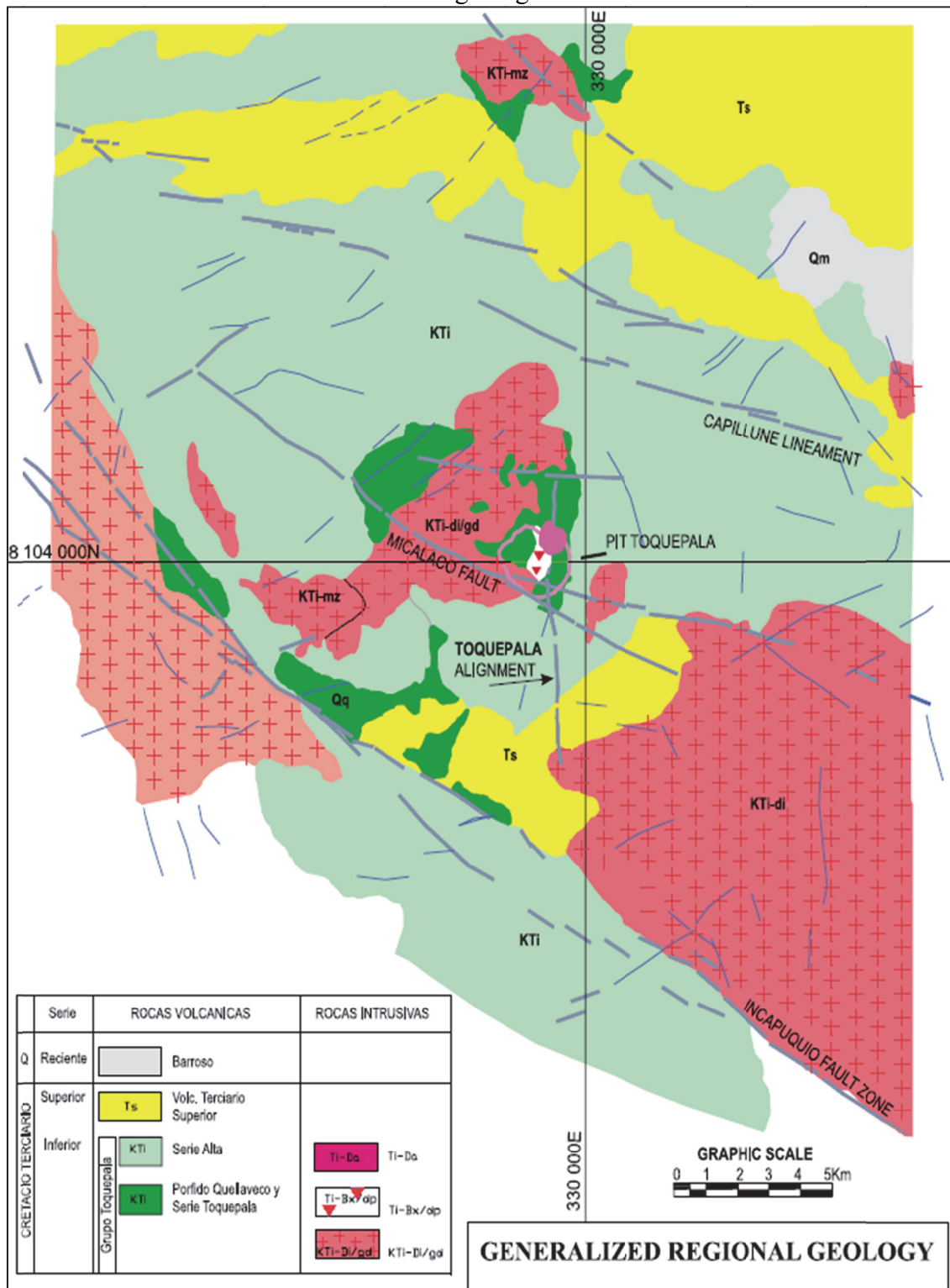


Fuente: Orica mining services

ANEXO 04

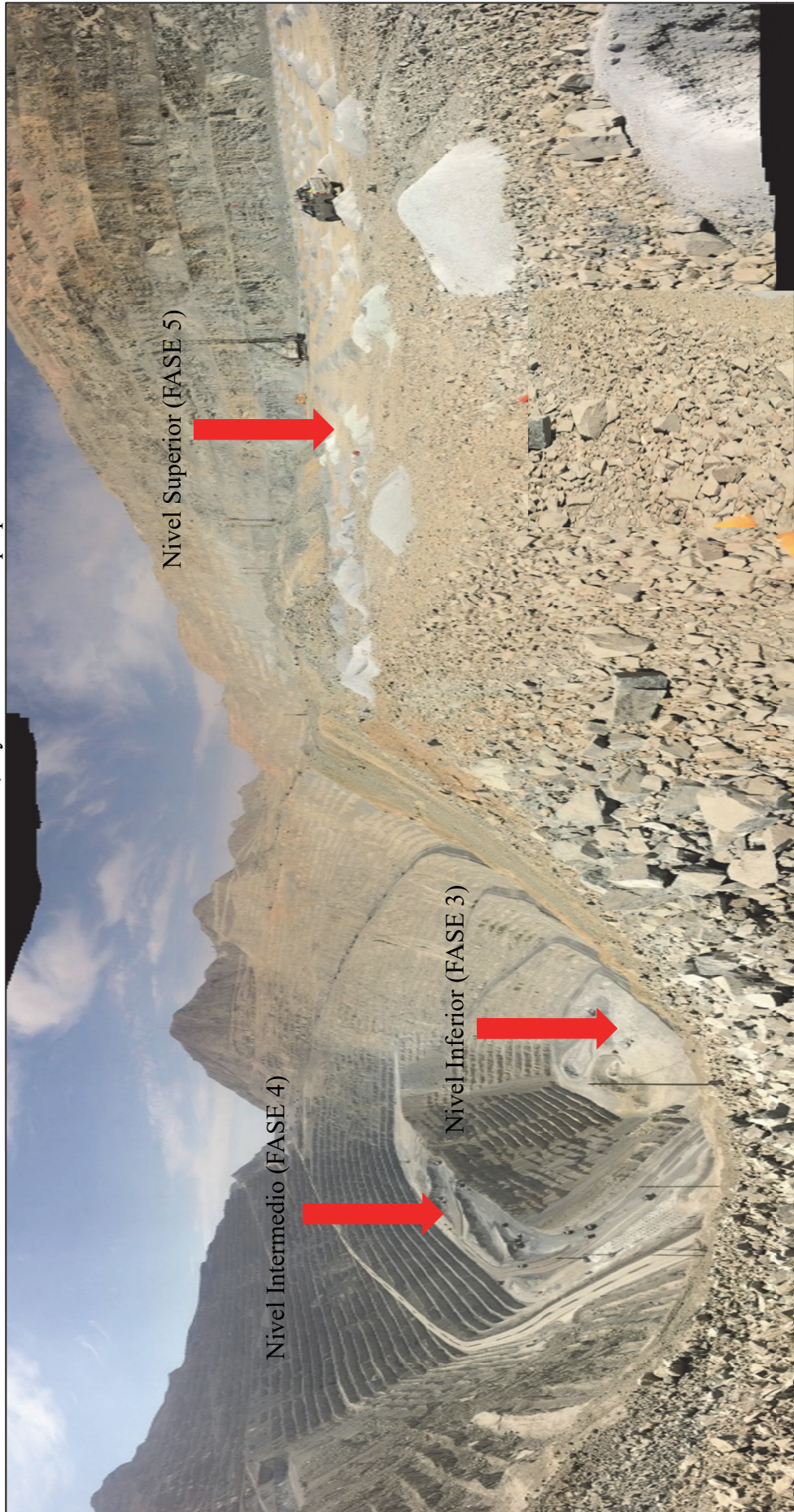
-Plano de Ubicacion

Anexo 05 Geología regional de Tacna



Fuente: Aspecto geológico de la mina Toquepala, Alejo Vera Gonzalo

Anexo 06 Ubicación de las fases 3, 4 y 5 de la mina Toquepala - SPCC



Fuente: Mina Toquepala

Anexo 07 Modelo matemático de Richard Ash para determinar el burden

El modelo de Ash

a) Burden

$$B = \frac{K_B * D}{12}$$

Dónde:

B : Burden

D : Diámetro (pulg)

K_B : Depende de la clase de roca y tipo de explosivo

Cuadro para el cálculo de K_B en base al tipo de explosivo y clase de roca

Tipo de explosivo	Clase de roca		
	Blanda	Media	Dura
Baja densidad (0.8-0.9 g/cc) y baja potencia	30	25	20
Densidad media (1.0 - 1.2 g/cc) y potencia media.	35	30	25
Alta densidad (1.3-1.6 g/cc) y potencia alta	40	35	30

Fuente: manual de perforación y voladura de rocas

b) Espaciamiento

$$S = K_S * B$$

K_S : 2.0 para iniciación simultánea.

K_S : 1.0 para taladros secuenciados con mucho retardo.

K_S : entre 1.2 y 1.8 para taladros secuenciados con pequeños retardo.

c) Sobre perforación de taladro

$$J = K_J * B$$

(K_J Entre 0.2 y 0.4)

d) Retacado o taco

$$T = K_T * B$$

(K_T entre 0.7 y 1.0)

e) Profundidad de taladro

$$L = K_L * B$$

(K_L Entre 1.5 y 4.0)

El modelo de Ash (modificado)

López Jimeno modifico la fórmula de Ash, incorporando la velocidad sísmica del macizo rocoso:

a) Burden

$$B = 0.76 * D * F$$

Dónde:

B : Burden (m)

D : Diámetro de barreno (pulg)

F : Factor de corrección en función de la clase de roca y tipo de explosivo.

$$F = f_r * f_e$$

Dónde:

$$f_r = \left(\frac{2.7 * 3500}{\rho_r * VC} \right)^{0.33}$$

$$f_e = \left(\frac{\rho_e * VD^2}{1.3 * 3660^2} \right)^{0.33}$$

ρ_r : densidad de la roca (g/cc)

VC : velocidad sísmica de propagación del macizo rocoso (m/s)

ρ_e : densidad de la carga del explosivo (g/cc)

VD : velocidad de detonación del explosivo (m/s)

La ecuación es válida para diámetros superiores a 165 mm. Para diámetros mayores el valor del Burden se verá afectado de un coeficiente reductor de 0.9