

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

**IMPLEMENTACIÓN DE EMULSION VERTEX Y OTRO PARA
MEJORAR LA FRAGMENTACIÓN DE LAS VOLADURAS PRIMARIAS
EN LA UNIDAD MINERA CONSTANCIA - CUSCO - PERÚ**

PRESENTADO POR:

Br. GUIDO FLORES SAPACAYO

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO DE MINAS**

ASESOR:

Ing. MAXIMO VICTOR MAYTA LINO

CUSCO – PERU

2025



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Ingeniero Máximo Victor Mayta Lino.....
 quien aplica el software de detección de similitud al
 trabajo de investigación/tesis titulada: «IMPLEMENTACIÓN DE EMULSION
 VERTEX Y OTRO PARA MEJORAR LA FRAGMENTACIÓN
 DE LAS VOLADURAS PRIMARIAS EN LA UNIDAD MINERA
 CONSTANCIA - CUSCO - PERÚ».....

Presentado por: GUIDO FLORES SAPACAYO..... DNI N° 46928266 ;

presentado por: DNI N°:

Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO DE MINAS.....

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 10 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 17 de SEPTIEMBRE de 2025.....



 Firma

Post firma Ing. Maximo Victor Mayta Lino

Nro. de DNI 23956885.....

ORCID del Asesor 0000-0002-9935-5754.....

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:499847190.....

Guido Flores Sapacayo

IMPLEMENTACIÓN DE EMULSION VERTEX Y OTRO PARA MEJORAR LA FRAGMENTACIÓN DE LAS VOLADURAS PRIMAR...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:499847190

Fecha de entrega

17 sep 2025, 6:57 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

17 sep 2025, 7:37 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

IMPLEMENTACIÓN DE EMULSION VERTEX Y OTRO PARA MEJORAR LA FRAGMENTACIÓN DE LAS V....pdf

Tamaño del archivo

6.2 MB

170 páginas

30.595 palabras

174.346 caracteres

10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)
- ▶ Trabajos entregados

Exclusiones

- ▶ N.º de fuente excluida

Fuentes principales

- 10%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
166 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

A mis queridos padres Sabino y Plácida, mis hermanos Roger y Aldo, mis hermanas Bertha, Lidia, Marleny, Lourdes y Sayda, mis sobrinos, sobrinas y a mi novia Adelaida por ser los bases principales en todo lo que soy, mi educación, tanto académica, como de la vida, por su determinante apoyo para alcanzar todos mis objetivos.

AGRADECIMIENTO

Agradecer previamente a Dios, por estar incondicionalmente en cada paso que realizo, a mi asesor Ing. Máximo Víctor Mayta Lino por guiarme en el desarrollo del presente trabajo, empresa CHEMTRADE PERÚ S.A.C. por darme la ocasión de ser parte de su grupo humano y específicamente al área de perforación y voladura a todos los colegas y compañeros de trabajo.

PRESENTACIÓN

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería, Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, con la finalidad de optar al Título Profesional de Ingeniero de Minas, expongo ante usted la tesis titulada “IMPLEMENTACIÓN DE EMULSION VERTEX Y OTRO PARA MEJORAR LA FRAGMENTACIÓN DE LAS VOLADURAS PRIMARIAS EN LA UNIDAD MINERA CONSTANCIA - CUSCO - PERÚ”.

En el presente trabajo de investigación se documenta la implementación de una emulsión explosiva de alta energía denominada Vertex, utilizada en voladuras primarias del Tajo Constancia, Chumbivilcas - Cusco, con la finalidad de mejorar la fragmentación del macizo rocoso y elevar el porcentaje de finos. Este cambio operativo responde a la necesidad de mejorar el rendimiento en zonas con roca de alta dureza y disminuir costos asociados al chancado y carguío en el proceso operativo mina.

Guido Flores Sapacayo.

INTRODUCCION

En el Capítulo I se detalla la base del estudio, explicando el problema, su origen, y por qué es importante. También se indican los objetivos, lo que se incluye y lo que se excluye, el método o cómo se hizo la investigación. Se describe la clase y tipo de estudio, su profundidad, y a quiénes se estudió. Por último, se detallan las fuentes y técnicas de dónde se sacó la información y cómo se obtuvo, fijando los límites de la investigación.

En el Capítulo II se desarrolla las ideas claves de la voladura de rocas con explosivos, detallando los factores que optimizan la detonación y su impacto en la rentabilidad de la producción. Además, se analizan los diferentes explosivos, las características y cómo se clasifican, así como el equipo y herramientas utilizados. El objetivo es fragmentar los macizos rocosos de manera eficiente y sin riesgos hacia la humanidad.

En el Capítulo III se detalla la zona de estudio y los aspectos generales de la mina, incluida su ubicación, accesibilidad, clima, equipos y recursos disponibles. Asimismo, se detalla la geología del área, abarcando el cálculo de reservas y descripción del tipo de yacimiento, como también una descripción del proceso operativo para una voladura.

En el Capítulo IV Se detalla un análisis de los proyectos estudiados crea la sugerencia de mejora de la voladura. Se evalúa la densidad y composición de la emulsión Vertex en HA73G. También se analizan e interpretan los resultados, teniendo en cuenta una serie de factores como los niveles de vibración, el humo naranja, el factor de potencia, la granulometría, P80 y el ahorro de costos en comparación con la emulsión matriz que se utiliza actualmente. Concluye con las sugerencias y recomendaciones de la investigación.

RESUMEN

El proyecto actual se ejecutó en la unidad minera Constancia, ubicada en la provincia de Chumbivilcas, Cusco. En esta operación, el mineral fragmentado pos-voladura es transportada mediante camiones de gran capacidad hacia la chancadora. Para garantizar una operación eficaz y satisfactoria, es crítico regular la magnitud del material fragmentado, el porcentaje de finos y el P80 del material volado en los frentes de extracción.

Los resultados obtenidos indican que, tras la implementación de la emulsión Vertex en la mezcla explosiva HA73G, se alcanzaron ventajas técnicas significativas, evidenciadas en una fragmentación promedio de 2.11 pulgadas y un 50.82% de finos menores a una pulgada esto por el VOD elevado que presenta este explosivo, además de un adecuado control de vibraciones por debajo de lo estimado. Asimismo, se observaron beneficios ambientales reflejados en la ausencia de emisiones de gases naranjas. En comparación con la emulsión matriz gasificada aplicada a la misma mezcla explosiva, la emulsión Vertex se presenta como una alternativa más eficiente y adecuada para las voladuras primarias en la Unidad Minera Constancia.

Esto permitió conseguir la granulometría ideal, aumentar el porcentaje de finos, reducir la producción de gases nitrosos y controlar las vibraciones generadas durante la voladura. Además, desde una perspectiva económica, la implementación de esta nueva emulsión genera un ahorro significativo en los procesos carguío, chancado y molienda.

Palabras clave — Vertex, fragmentación, finos, vibraciones, Heavy Anfo, gases nitrosos, macizo rocoso, gasificable, VOD, densidades, emulsión, P80.

ABSTRACT

The present project was carried out at the Constancia mining unit, located in the province of Chumbivilcas, Cusco. In this operation, the fragmented ore after blasting is transported by high-capacity trucks to the crusher. To ensure an efficient and reliable operation, it is critical to regulate the size distribution of the fragmented material, the percentage of fines, and the P80 of the blasted material at the extraction fronts.

The results obtained indicate that, following the implementation of Vertex emulsion in the HA73G explosive blend, significant technical advantages were achieved. These were evidenced by an average fragmentation of 2.11 inches and 50.82% of fines smaller than one inch, a result associated with the high VOD of this explosive, in addition to proper vibration control below the estimated levels. Environmental benefits were also observed, reflected in the absence of orange gas emissions. Compared to the gasified matrix emulsion applied to the same explosive blend, Vertex emulsion proves to be a more efficient and suitable alternative for primary blasting at the Constancia mining unit.

This allowed for achieving the ideal granulometry, increasing the percentage of fines, reducing the generation of nitrous gases, and controlling the vibrations produced during blasting. Furthermore, from an economic perspective, the implementation of this new emulsion results in significant cost savings in loading, crushing, and milling processes.

Keywords — Vertex, fragmentation, fines, vibrations, Heavy ANFO, nitrous gases, rock mass, gasifiable, VOD, densities, emulsion, P80.

ÍNDICE

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
PRESENTACIÓN.....	IV
INTRODUCCION	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
ÍNDICE	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVI
GLOSARIO DE TÉRMINOS	XIX
CAPÍTULO I	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.2.1. Problema General	2
1.2.2. Problemas Específicos	2
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
1.4. IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.5.1. Técnica.....	3

1.5.2. Económica.....	4
1.5.3. Ambiental.....	4
1.6. ALCANCES	4
1.7. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.7.1. Delimitación temporal.	4
1.7.2. Delimitación espacial.....	4
1.8. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
1.8.1. Hipótesis General	5
1.8.2. Hipótesis Específicas	5
1.9. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	5
CAPITULO II.....	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN (INTERNACIONALES, NACIONALES Y LOCALES). ..	6
2.1.1. Antecedentes internacionales	6
2.1.2. Antecedentes Nacionales	8
2.1.3. Antecedentes Locales	10
2.2. MARCO CONCEPTUAL.....	11
2.2.1. Explosivos.....	11
2.2.2. Componentes de los explosivos	12
2.2.3. Propiedades de los explosivos.....	13
2.2.4. Mecánica de la rotura de rocas por explosivos	17
2.2.5. Fragmentación de rocas	21
2.2.6. Medición y análisis de la fragmentación	36

2.2.7.	Calidad de humos y balance de oxígeno.....	37
2.3.	EMULSIÓN GASIFICADA.....	40
2.3.1.	Mezcla Explosiva vertex HA73G.....	41
2.4.	DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES MINA CONSTANCIA	45
2.4.1	Método de explotación Open Pit.....	45
2.4.2	Perforación.....	45
2.4.3	Voladura.....	47
2.4.4	Carguío y Acarreo	49
2.4.5	Servicios Auxiliares.....	50
2.5.	PLAN DE PRODUCCIÓN.....	55
2.6.	PARÁMETROS DE DISEÑO DEL TAJO.....	55
2.7.	MODELOS A CONSIDERAR PARA DISEÑOS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA	56
2.7.1	Interpretación geológica	56
2.7.2	Modelo SPI	56
2.7.3	Modelo BWI.....	57
2.7.4	Modelo de polígonos de resistencia	58
2.7.5	Polígonos de minado del nivel superior.....	58
2.7.6	Leyes de mineral y pre-polígonos	59
2.7.7	Tiempos de perforación	60
2.7.8	Otras consideraciones	61
2.8.	SELECCIÓN DE EXPLOSIVOS.....	62
2.9.	DISEÑO DE SECUENCIA.....	63
2.10.	PREDICACIÓN DE VIBRACIONES	64

2.11.	RADIO DE EVACUACIÓN POR VOLADURA PARA PERSONAS Y EQUIPOS.....	65
2.12.	PROCESO OPERATIVO EN CAMPO	66
2.12.1	Medición de taladros y señalización.....	66
2.12.2	Primado de taladros.	67
2.12.3	Carguío de taladro	68
2.12.4	Testeo y tapado de taladros.....	69
2.12.5	Amarre y detonación de taladros.....	70
	CAPÍTULO III	72
	METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	72
3.1.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	72
3.1.1.	Tipo de Investigación	72
3.1.2.	Diseño de Investigación.....	72
3.1.3.	Etapas de la Investigación.....	73
3.1.4.	Unidad de Análisis	73
3.1.5.	Variables Operativas y de Diseño	73
3.1.6.	Indicadores de Voladura (KPI's).....	75
3.1.7.	Población y Muestra	75
3.2.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.....	75
3.2.1.	Técnicas de Recolección de Datos	75
3.2.2.	Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos	76
3.2.3.	Ampliación de la Metodología.....	76
3.2.4.	Fuente de Información.....	77
3.2.5.	Método de Medición.....	77

3.2.6. Densidad de la Emulsión	77
3.2.7. Análisis granulométrico de muestras.....	79
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	79
3.3.1. Wincheo	79
3.3.2. Toma y análisis de densidades	80
3.3.3. Medición de Velocidad de Detonación (VOD).....	81
3.3.4. Instalación de equipo Sismógrafo	82
3.3.5. Toma de Muestras o Fotografías con Equipo PortaMetrics.....	84
3.4. ÁMBITO DE ESTUDIO.....	85
3.4.1 Ubicación	85
3.4.2 Accesibilidad.....	87
3.4.3 Clima y Recursos.....	87
3.4.4 Flora y Fauna.....	90
3.5. ENTORNO GEOLÓGICO	91
3.5.1 Tipo de Yacimiento	91
3.5.2 Geología Regional.....	92
3.5.3 Geología Local	95
3.5.4 Geología Estructural.....	99
3.5.5 Cálculo de Reservas.....	104
CAPÍTULO IV.....	108
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	108
4.1. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	108
4.1.1. Resultados de fragmentación y % de finos para emulsion matriz.....	108

4.1.2. Procesamiento de la Información	109
4.2. PROYECTO N° 01: P3990_001F4 – (EMULSION VERTEX) TAJO CONSTANCIA.....	110
4.3. PROYECTO N° 02: P3990-002F4 – (EMULSION VERTEX) TAJO CONSTANCIA	115
4.4. PROYECTO N° 03: P3990-004F4 (EMULSIÓN MATRIZ – TAJO CONSTANCIA)	120
4.5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	125
4.5.1 Análisis técnico de resultados	125
4.6. ANÁLISIS ECONÓMICO DE RESULTADOS	130
4.6.1 Costos de explosivos	130
4.6.2 Cuadro comparativo de los 3 proyectos analizados.	130
4.6.3 Ahorro conservando el diseño de carga diferenciada (Deck).	131
4.6.4 Proyección de ahorro según el budget 2025	132
4.7. CONFRONTACIÓN DE LAS 3 HIPÓTESIS PLANTEADAS EN LA INVESTIGACIÓN.....	133
4.8. COMPARACIÓN EMULSIÓN VERTEX VS. MATRIZ PARA HA73G	135
4.8.1 Análisis de enfoques del proyecto.....	136
4.8.2 Enfoque externo	137
4.9. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	137
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	139
CONCLUSIONES	140
RECOMENDACIONES.....	141
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	142
ANEXOS	144
ANEXO A – POLÍGONOS DE RESISTENCIA	145
ANEXO B – SPI.....	146

ANEXO C – REGISTRO VOD.....	147
ANEXO D– REGISTRO DE VIBRACIONES	148
ANEXO E – MATRIZ DE CONSISTENCIA	149

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01 Variables e indicadores.....	5
Tabla 02 Resultados de rendimiento del nivel superior	59
Tabla 03 Densidad de carga lineal para distintos diámetros de perforación	62
Tabla 04 Simulación de VPP.....	65
Tabla 05 Accesibilidad a Unidad Minera Constancia.....	87
Tabla 06 Principales Conjuntos de Fallas para Cada Dominio Estructural	100
Tabla 07 Distribución del Recurso Mineral para el Tajo Constancia	105
Tabla 08 Distribución del Recurso Mineral para el Tajo Pampacancha	107
Tabla 09 Resumen de porcentaje de finos y P80.....	109
Tabla 10 Diferencia de la emulsión del vertex con emulsión matriz.....	110
Tabla 11 Velocidad de detonación del proyecto P3990_01F4 Constancia	112
Tabla 12 Control de calidad en campo proyecto P3990_01F4 Constancia.....	112
Tabla 13 Registro de fragmentación para frente de minado del proyecto P3990_01F4.....	113
Tabla 14 Monitoreo de vibraciones del proyecto P3990_01F4 Constancia.....	114
Tabla 15 Registro VOD del proyecto P3990-002F4 – Tajo Constancia.....	116
Tabla 16 Control de calidad de la mezcla HA73G proyecto P3990_02F4 Constancia	117
Tabla 17 Registro de fragmentación del frente de minado del proyecto P3990_02F4.....	118
Tabla 18 Monitoreo de vibraciones del proyecto P3990-002F4 – Tajo Constancia	119
Tabla 19 Registro VOD del proyecto P3990_004F4 – Tajo Constancia	121

Tabla 20	Control de calidad en campo proyecto P3990_04F4 Constancia.....	122
Tabla 21	Registro de fragmentación del frente de Minado del proyecto P3990_04F4	123
Tabla 22	Monitoreo de vibraciones del proyecto P3990-004F4	124
Tabla 23	Resultado del comparativo Emulsión vertex vs matriz en HA73G.....	125
Tabla 24	Cuadro comparativo fragmentación para emulsion vertex vs matriz en HA73G ...	126
Tabla 25	Cuadro comparativo registro sismográfico vertex vs matriz en HA73G	127
Tabla 26	Cuadro comparativo VOD vertex vs matriz en HA73G.....	128
Tabla 27	Cuadro comparativo gases NOx vertex vs matriz en HA73G	128
Tabla 28	Comparativa de características de los 3 proyectos ejecutados.....	129
Tabla 29	Cuadro de costos en accesorios y explosivos (2024)	130
Tabla 30	Comparación económica de los 3 proyectos.....	131
Tabla 31	Ahorro considerando el diseño de carga.....	131
Tabla 32	Proyección de ahorro según el Budget 2025.....	132
Tabla 33	Diferencia de costos por explosivo.....	133
Tabla 34	Comparación de resultados utilizando Vertex vs matriz	135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01 Banco de voladura: Nomenclatura.....	24
Figura 02 Malla de perforación cuadrada B=S.....	26
Figura 03 Partes de la columna explosiva (deck).....	30
Figura 04 Perforadora Pit Viper 271.....	46
Figura 05 Camión fabrica en sistema bombeable.....	48
Figura 06 Camión CAT 793F.....	49
Figura 07 Hidráulicas Hitachi Ex-5600	50
Figura 08 Rodillos CAT 76XT	51
Figura 09 Motoniveladoras Caterpillar 24M.....	52
Figura 10 Cisterna de Agua 777D	52
Figura 11 Tractor de ruedas CAT 824K	53
Figura 12 Tractor CAT - D10T	54
Figura 13 Excavadora CAT 336.....	54
Figura 14 Parametros de diseño del tajo	55
Figura 15 Litología, Alteración, Mineralización.....	56
Figura 16 Modelo SPI Tajo Constancia – Banco 3990.....	57
Figura 17 Modelo BWI Tajo Constancia – Banco 3990.....	58
Figura 18 Polígonos del nivel superior	59
Figura 19 Polígonos en base a leyes de mineral.....	60
Figura 20 Tiempos de perforación – Report sense plus (RS PLUS) y Data procesada.....	61
Figura 21 Equipos, estructuras cercanas y evaluación de accesos.	62
Figura 22 Secuencia de salida de disparo.	63

Figura 23 Líneas de isotiempo.	64
Figura 24 Desplazamiento de material.....	64
Figura 25 Simulación de vibraciones en Software Open-blast	65
Figura 26 Radio de influencia para personas y equipos.....	66
Figura 27 Señalización del proyecto de voladura.....	67
Figura 28 Primado y aseguramiento superficial el detonador electrónico.....	68
Figura 29 Carguío de taladros sistema vaciable.....	69
Figura 30 Testeo del detonador y tapado de taladros mecanizado.....	70
Figura 31 Iniciación remota de voladura electrónica.....	71
Figura 32 Etapas de la aplicación de la metodología.....	76
Figura 33 Wincheo de taco de los taladros	79
Figura 34 Control de calidad en laboratorio para emulsión vertex.....	80
Figura 35 Análisis de densidad de mezcla explosiva HA73G de emulsión vertex.....	81
Figura 36 Diagrama de instalación correcta de un medidor VOD.....	82
Figura 37 Instalación correcta del sismógrafo.....	84
Figura 38 Gráfico de distribución de tallas en frente de minado.....	85
Figura 39 Plano N° 01 Ubicación de la unidad minera constancia	86
Figura 40 Columna Estratigráfica Local U.M. Constancia.....	93
Figura 41 Geología de la U.M constancia.....	94
Figura 42 Plano N° 04 de Geología Local y Estructural de Constancia.....	101
Figura 43 Plano de la Litología de Mina Constancia.....	103
Figura 44 Seguimiento de Minado 2024.....	109
Figura 45 Plano de carguío y distribución de camiones del P3990_01F4 Constancia	111

Figura 46 Diseño de carga (carga Deck) para P3990_01F4 Constancia.....	111
Figura 47 Comportamiento de la curva densidad del proyecto P3990_01F4 - Constancia...	112
Figura 48 Control de gases del proyecto P3990_01F4 - Constancia.....	113
Figura 49 Seguimiento de frente de minado para el proyecto P3990_01F4 Constancia	114
Figura 50 Secuencia de la voladura del P3990_01 F4 Constancia.....	115
Figura 51 Plano de carguío del P3990_02F4 Constancia	116
Figura 52 Diseño de carga deck para P3990_02F4 Constancia	116
Figura 53 Curva de gasificación del proyecto P3990-002F4 – Tajo Constancia.....	117
Figura 54 Control de gases del proyecto P3990-002F4 – Tajo Constancia.....	118
Figura 55 P80 y % de Finos del proyecto P3990-002F4 – Tajo Constancia	119
Figura 56 Secuencia de salida del P3990-002F4 – Tajo Constancia.....	120
Figura 57 Plano de carguío del P3990_004F4 Constancia	121
Figura 58 Diseño de carguío del P3990_004F4 Constancia	121
Figura 59 Curva de densidad del proyecto P3990-004F4 – Tajo Constancia.....	122
Figura 60 Control de gases del proyecto P3990 004F4 – Tajo Constancia (1A -Puntual)....	123
Figura 61 P80 y % de Finos del proyecto P3990-004F4 Tajo Constancia	124
Figura 62 Secuencia de salida proyecto de voladura P3990_04F4 – Tajo Constancia	125
Figura 63 Comparativo de % de finos pata prueba vertex vs matriz en HA73G	126
Figura 64 Gráfica comparativa fragmentación emulsión Vertex vs Matrix en HA73G.....	127
Figura 65 Gráfica comparativo registro sismográfico vertex vs matriz en HA73G.....	127
Figura 66 Gráfica VOD comparativa de vertex vs matriz en HA73G.....	128
Figura 67 Gráfica comparativa emisión de gases NOx vertex vs matriz en HA73G	129

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Acoplamiento: Los explosivos a granel están totalmente relacionados con el grado en que llenan una perforación.

Burden: Se refiere a la distancia perpendicular del taladro hacia la cara libre.

Cara Libre: El área o estado físico expuesto al medio ambiente es necesario para permitir que la masa rocosa que es fragmentada o roto por el explosivo se desplace en el instante de la explosión.

Carga de columna: carga larga y continua de un explosivo y continua en un taladro.

Carga operante: Es la cantidad máxima de explosivo en la parte activa de un taladro que está directamente involucrada a la fragmentación de la roca.

Cebo: combinación del detonador y una carga explosiva que forma una unidad.

Conminucion: Acción de fragmentar o disminuir el tamaño de un material.

Densidad de carga (densidad lineal): Peso de un explosivo cargado por metro de taladro.

Densidad del explosivo: Peso de un explosivo en un volumen determinado.

Desviación de taladro: Una perforación ejecutada de un taladro que se desvíe del punto previsto originalmente puede alterar la carga y el espaciado del diseño original cuando se observa desde una perspectiva tridimensional.

Espaciamiento: La distancia lateral entre taladros.

Emulsión vertex: Esta emulsión es un producto mejorado utilizado para roca de mayor dureza por contener dentro de su formulación componentes energéticos lo cual asegura una buena performance en la voladura.

Explosivo: Son materiales o compuestos químicos que responden instantáneamente cuando se les aplica un fulminante u otro estímulo externo, y necesitan ser encendidos mediante detonadores para explotar.

Factor de Potencia: cantidad de explosivo utilizada para un volumen dado de material quebrado, expresada en (kg/t).

Iniciación: Efecto que inicia la detonación de la columna explosiva.

Iniciación electrónica: Consiste en utilizar detonadores electrónicos para regular el tiempo exacto en que explota cada taladro. Este método optimiza el proceso de voladura y produce resultados superiores al utilizar microprocesadores para programar y sincronizar con precisión las duraciones de retardo entre taladros.

Ley Cut off: es la ley del mineral cuyo valor equivale al coste de producción. Para el cobre, el plomo o el estaño, la ley del mineral se representa en porcentaje; para la plata y el oro, se expresa en g/t u Oz/tc; y para ambos, el valor del mineral y el coste de producción se expresan en \$/t de mineral.

Malla de perforación: Diseño inicial de la perforación para alcanzar un nivel de energía suficiente, contención y distribución coherente de la energía.

Retardos: Debe transcurrir un tiempo determinado entre las explosiones y los impulsos de detonación para permitir el inicio de cargas explosivas distintas.

Sobre excavación: Rotura excesiva fuera de los límites de la excavación.

Taco: Para preservar los gases y la energía de la explosión dentro del taladro, se inserta material inerte detrás de la carga de la columna.

Tiros congelados: Otro nombre para la muerte por presión es «prensado muerto». La tensión impuesta por gases creados debido a la explosión de un taladro cercano es lo que hace que aumente la densidad de los explosivos.

Velocidad de detonación: La rapidez con la que avanza la detonación de un explosivo.

Work Index: El índice de trabajo WI, parámetro que depende del equipo de Conminucion y del material.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del Problema

Una de las operaciones de unidad más relevantes del ciclo minero es la voladura de rocas. Por ello, cualquier mejora en su proceso se traduce en beneficios significativos para las actividades subsecuentes del ciclo minero.

Desde la creación de las mezclas de compuestos químicos para producir explosivos, su diseño ha evolucionado constantemente, mejorando la conversión de su contenido energético en fuerzas mecánicas destinadas a fragmentar el medio rocoso. Estas mejoras han incrementado la energía efectiva transmitida al macizo rocoso, lo que permite una disgregación más eficiente y una fragmentación óptima del material.

En la Unidad Minera Constancia, se utiliza Heavy Anfo 73G en función de una emulsión matriz, lo que ha generado los siguientes resultados operativos: La granulometría del mineral

(P80) promedio alcanza las 2.68 pulgadas, cumpliendo ligeramente las 3 pulgadas requeridas por el cliente. Asimismo, el porcentaje de finos promedio es del 35.16%, por debajo del valor recomendado que es 47%, lo que podría ocasionar inconvenientes en los procesos posteriores del circuito minero.

En consecuencia, deben aplicarse otras opciones que puedan satisfacer las necesidades de la planta de tratamiento con una fragmentación óptima, la maquinaria de carga y transporte debe ser lo más eficiente posible. Se propone demostrar la efectividad de implementar emulsión Vertex en las voladuras primarias, enfocándose en mejorar la fragmentación, % de finos, reducir la emisión de gases nitrosos y controlar las vibraciones generadas. Estas mejoras tendrían un efecto favorable en el desarrollo de la propia explotación minera.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿Cómo impacta la implementación de emulsión Vertex y otro en la mejora de la fragmentación, el incremento del % de finos, control de vibraciones y la disminución de humos naranjas en la Unidad Minera Constancia?

1.2.2. Problemas Específicos

- a) ¿Con la implementación de emulsión Vertex y otro se logrará mejorar la fragmentación y aumentar el % de finos en la Unidad Minera Constancia?
- b) ¿Con la implementación de emulsión vertex y otro se logrará controlar el nivel de vibraciones en la unidad minera constancia?
- c) ¿Con la implementación de emulsión vertex y otro se logrará minimizar la emisión de gases nitrosos en la unidad minera constancia?

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo General

Mejorar la fragmentación en el proceso de voladuras primarias a partir de la implementación de emulsión vertex y otro, mejorando P80, el % de finos, controlando el nivel de vibraciones y minimizando la emisión de gases nitrosos.

1.3.2. Objetivos Específicos

- a) Mejorar la fragmentación y % de finos en las voladuras primarias a partir de la implementación de emulsión vertex y otro en la unidad minera constancia.
- b) Controlar las vibraciones a partir de la implementación de emulsión vertex y otro en la unidad minera constancia.
- c) Minimizar la emisión de gases nitrosos a partir de la implementación de emulsión vertex y otro en la unidad minera constancia.

1.4. Importancia de la investigación

Garantizar una distribución uniforme de la fragmentación y % de finos para mejorar los procesos de carguío, transporte y molienda. También, mejore la eficiencia operacional optimizando los costes asociados con la voladura.

1.5. Justificación de la Investigación

1.5.1. Técnica

La investigación actual analiza las conclusiones pos-voladura obtenidos al hacer uso de emulsión Vertex con Heavy Anfo 73G, en comparación con emulsión matriz aplicada al mismo HA73G. Los resultados evidencian que la emulsión Vertex logrará la granulometría esperada y ventajas adicionales que representan un valor agregado para el proceso.

1.5.2. Económica

Los procesos aguas abajo de la mina definitivamente alcanzan una mejoría en su producción sin demoras y tiempos perdidos lo cual genera optimización del proceso que se refleja en ganancias económicas.

1.5.3. Ambiental

La emulsion vertex está diseñada con componentes que minimizan la formación de subproductos tóxicos. Incluye aditivos como urea y aceite refinado, que actúan como reductores químicos durante la detonación, evitando la oxidación del nitrógeno atmosférico que genera NOx, a diferencia de un emulsion matriz que puede contener nitratos y combustibles simples.

1.6. Alcances

Lograr y mantener la distribución uniforme de la fragmentación, de igual manera aumentar el porcentaje de finos para los procesos de carguío, transporte y molienda.

1.7. Delimitación de la investigación

1.7.1. Delimitación temporal.

El presente proyecto de investigación de implementar emulsion vertex y otro se realizó en el año 2024 en los respectivos meses de junio, julio y agosto.

1.7.2. Delimitación espacial

El proyecto de investigación se desarrolló en la provincia de Chumbivilcas, Distritos de Velille, Livitaca y Chamaca, en las comunidades de Chilloroya y Uchucarcco, tajo constancia, Nivel 3990, proyectos 001, 002 y 004, del departamento del Cusco.

1.8. Hipótesis de la Investigación.

1.8.1. Hipótesis General

La implementación de Emulsión vertex y otro impactará en la mejora de la fragmentación y % de finos permitiendo alcanzar los objetivos de voladura en la unidad minera constancia.

1.8.2. Hipótesis Específicas

- a) Con la implementación de la emulsión vertex y otro se logrará mejorar la fragmentación y % de finos, control de vibraciones y minimizar los humos naranjas en la unidad minera constancia.
- b) Con la implementación de la emulsión vertex y otro se logrará controlar los niveles de vibraciones en la unidad minera constancia.
- c) Con la implementación de la emulsión vertex y otro se logrará minimizar la emisión de humos naranjas en la unidad minera constancia.

1.9. Operacionalización de variables

En la siguiente tabla 01 se puede visualizar variables e indicadores de la investigación.

Tabla 01

Variables e indicadores

Variables		Indicadores	Unidad
Variables Independientes	Implementación de la emulsión vertex.	Granulometría (P80). Porcentaje de finos. Costo del explosivo/taladro.	Pulgadas (%) \$/m
Variables Dependientes	Monitoreo de vibraciones. Monitoreo de humos naranjas.	Nivel de vibraciones. Escala de humos naranjas.	mm/s Escala NOx (1A-5C)

Fuente. Elaboración propia

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación (internacionales, nacionales y locales).

2.1.1. Antecedentes internacionales

Quiroga, M. (2013). “*Análisis de la perforación y tronadura en El Soldado*”, haciendo un análisis de la faena minera en El Soldado de Anglo American, donde se hacen pruebas alternativas de diseño en perforación y voladura, con el objetivo de cuantificar los resultados del proceso, y de esta manera obtener variables que aporten mayor beneficio global mina-planta. Exclusivamente la variación del rendimiento efectivo de palas y toneladas por cada hora del molino SAG fueron cuantificadas. Concluyendo así que el rendimiento de las palas y toneladas por hora se obtuvieron de la base de datos y del dispatch de la mina, además principalmente se obtuvieron modelos granulométricos y de rendimiento de palas en base a las variables relevantes en torno al factor de carga. (p.23)

Music, (2007) “Diagnóstico y optimización de disparos en desarrollo horizontal, Mina El teniente (Tesis de bachiller, Universidad de Chile). El objetivo de este trabajo es realizar un diagnóstico técnico que permita evaluar la efectividad global y los estándares actuales de las tronaduras horizontales de desarrollo a nivel de producción en la Mina Reservas Norte de la División El teniente de Codelco Chile. Lograr un diseño óptimo requiere la adecuación y desarrollo de técnicas para lograr una evaluación del proceso de tronadura correcta antes, durante y después de su ocurrencia, además de una adecuada cuantificación y control de los daños que podrían producirse. Esto es debido al gran número de variables que interactúan durante el proceso de voladura. La sobre excavación observada en los métodos actuales es el principal problema en ese lugar concreto. En este sentido, es crucial destacar los éxitos obtenidos mediante el uso de una técnica de evaluación objetiva de esos aspectos técnicos cruciales de la operación, reforzada por una base de datos de campo compuesta por datos de referencia sobre la calibración y las perforaciones actuales. Para esta evaluación se utilizaron dos tipos de metodologías: la primera se ocupó del análisis del registro de vibraciones creado por la voladura, por el cual fue medido el comportamiento por medio del macizo rocoso y su impacto en el contorno; la segunda se ocupó de la ejecución real de la voladura. Como resultado final del trabajo, se desarrolló un concepto alternativo de diseño de la voladura a nivel de producción, del que pueden preverse importantes efectos operativos, entre los que se incluyen:

- Reducción del número de perforaciones por disparo, 10%.
- Reducción de la sobre excavación de un 24% a un 6%.
- Menor exposición al riesgo por desprendimientos y caídas de rocas
- Disminución de los tiempos de trabajo.
- Disminución de los costos directos de perforación y tronadura.

Se aconseja aplicar el nuevo diseño y seguir mejorando las voladuras en otras excavaciones, incluidos los desarrollos mineros como galerías, pozos, zanjas y otros, basándose en los avances logrados en este trabajo. Esto no sólo minimizará los daños y la sobre excavación, sino que también optimizará estos procesos en general (p.2).

Aguirre, (2016) “*Optimización de parámetros de tronadura en función de explosivos de alta energía en sociedad contractual minera el Alba*” (Tesis de bachiller, Universidad de Chile). Sugiere utilizar el análisis de fragmentación, el análisis de pérdidas de cargas redirigidas por fragmentación gruesa, los costes y el rendimiento de la trituradora para determinar la rentabilidad técnico-económica del uso de explosivos de alta energía en voladuras. El objetivo es optimizar la operación disminuyendo los costes y la granulometría para estandarizar las voladuras en un sector específico de una empresa minera. Basándose en los resultados, es evidente que el uso de un explosivo de alta energía da lugar a un procedimiento satisfactorio en términos de optimización, pues reduce la granulometría; a pesar de ello, los gastos asociados al proceso de perforación y voladura se incrementan. Dado que la fragmentación gruesa produce resultados más favorables en términos de pérdidas por cargas redirigidas, que disminuyeron significativamente con el uso de explosivos de alta energía, estas últimas se compensan en el flujo de caja, con el uso de esta nueva alternativa resulta un balance global positivo. (p.2)

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Zapana, (2018) “*Implementación de un agente de voladura altamente energético (vistis) en macizos rocosos competentes de mineral, aumentando la producción y disminuyendo la granulometría CIA Minera las Bambas*” (Trabajo de tesis pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa). Esta investigación se realizó con el objetivo de mostrar los resultados de la voladura con el uso de tecnología novedosa de explosivos, una mezcla explosiva

gasificable (Vistis) de Orica. Esta tecnología produce una energía y un rendimiento muy elevados, junto con gran velocidad de detonación, obteniendo resultados buenos de fragmentación. Puede utilizarse con perforadoras de agua y tiene el potencial de ahorrar costes mineros. El trabajo detalla la evolución de las pruebas realizadas desde el 1 de julio de 2017 hasta el 8 de octubre de 2017. Utilizando el explosivo Vistis 250, en zonas de Minitajo y Jahuapaylla intermedia y alta fueron realizadas quince voladuras de prueba. Para ello fue necesario modificar los sistemas técnicos y operativos, incluyendo el acondicionamiento de la logística a la tecnología de gasificación (camiones fábrica), capacitación técnica especializada y el rediseño de los parámetros de perforación y voladura. Una adecuada fragmentación del mineral volado, que redunde en ahorros en el proceso de carga, trituración y molienda, es un reflejo de los resultados alcanzados en Mina Las Bambas con la aplicación integrada de la combinación explosivo gasificado. Potenciar la fragmentación y aumentar el porcentaje de finos ($< 1''$) son los objetivos de Minera Las Bambas. Se utilizó un total de 564 Ton de Vistis 250 para aumentar la productividad de los equipos de carguío y planta de procesos, se utiliza como línea base los resultados de fragmentación obtenidos con la emulsión Fortis Extra para los análisis y comparaciones, con el uso de Vistis 250 se obtuvo valores de VOD, para Vistis 250 entre: 5774.0 – 5984.1 m/s.”(p.5).

Gallardo, (2023) *“Implementación de la emulsión gasificable para mejorar la fragmentación en el proceso de voladura”* (Trabajo de tesis pregrado, Universidad nacional de Ingeniería). Para minimizar el porcentaje de finos producidos y regular el P80, su investigación se focaliza en la sustitución de Heavy Anfo 46 por la emulsión gasificable SANG APU 100% GAS. Esto admitiría la expansión de la estructura, la disminución de la potencia, un mayor VOD y un menor coste de la emulsión en semejanza con Heavy Anfo 46. Además, debido

a su gasificabilidad, tiene la capacidad de operar con múltiples densidades finales dependiendo del tipo de roca. Como conclusión se consigue la granulometría adecuada, se reduce la existencia de gas nitroso y se controlan las vibraciones. Consiguientemente, desde el punto de vista económico, la sustitución de la combinación explosiva supone un ahorro de \$/t.

2.1.3. Antecedentes Locales

Vargas, (2022) “*Optimización de la fragmentación de rocas mediante la aplicación de redes neuronales artificiales*” (tesis de pregrado, Universidad nacional de San Antonio Abad del Cusco). Esta investigación tuvo como objetivo comprender la conexión inherente entre la perforación, la voladura y los parámetros de datos recogidos por los sistemas FMS. Esta conexión es difícil de demostrar utilizando herramientas estándar para analizar los datos, por esto las variables relacionadas con la fragmentación de la roca en la explotación a cielo abierto de la mina Constancia de la empresa Hudbay se tratan de forma diferente para maximizar la información que ofrecen.

Las redes neuronales artificiales y sus algoritmos asociados, que son una aplicación de la inteligencia artificial, fueron la herramienta principal utilizada en la evaluación de varios modelos y métodos para comprender la información disponible y hacer predicciones basadas en ella. En este caso, se empleó el lenguaje de programación Python para crear los algoritmos que se utilizarían en la investigación de la fragmentación de las rocas, Conclusión: De este modo, se creó un modelo predictivo de cierta confianza que permite determinar los parámetros decisivos para el pronóstico de la fisuración de la roca. A continuación, esta información se refleja en la optimización que estabiliza el rendimiento y evita su fluctuación excesiva. Aumentar la producción de finos comercializables y seguir tratando el mineral.

Carpio, (2020) “*Optimización del proceso de voladura mediante el uso de emulsión gasificable*” (Tesis de pregrado, Universidad nacional de San Agustín de Arequipa). Mejorar los procesos operativos es una meta clave para mantener la competitividad en el sector. En la unidad minera Constancia, anteriormente se utilizaba Emulsión Matriz como agente de voladura para la elaboración de Heavy ANFO. A partir de esta práctica, se estableció una línea base que permitió comparar los resultados al introducir Emulsión Gasificable como una opción de mejora en el procedimiento. Las pruebas se realizaron en taladros de producción con un diámetro de 10 5/8” durante la fase dos del tajo Constancia. Para asegurar una comparación precisa, los parámetros de perforación se mantuvieron sin cambios. Como conclusión: Durante las voladuras se llevaron a cabo mediciones de la velocidad de detonación. Posteriormente, se evaluó la fragmentación del material, la presencia de gases nitrosos y se estimó el factor de potencia teórico. En los resultados obtenidos, el explosivo HA55 combinado con Emulsión Gasificable alcanzó una velocidad de detonación (VOD) promedio de 5399 m/s, lo que representa un incremento del 5.2 % en comparación con el promedio alcanzado utilizando Emulsión Matriz. Desde el punto de vista económico, el menor consumo de explosivo debido al esponjamiento producido por la gasificación generó un ahorro del 2.62 % en el costo por tonelada fragmentada. El uso de emulsión gasificable permitió mejorar el proceso de voladura, disminuyendo tanto los costos por tonelada fragmentada como la emisión de gases nitrosos. (Carpio, 2020)

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. Explosivos

Los explosivos más conocidos de la actualidad son el producto de un lento proceso que comenzó hace 600 años. La pólvora se utilizó originalmente en armas en el siglo XIV, pero fue

durante el siglo XVII cuando empezó a utilizarse sobre todo como medio para fragmentación de rocas y otros materiales. Con el tiempo, la cantidad de accidentes fue incrementando debido a la aceptación de la pólvora negra en la actividad minera y emergiendo así la necesidad de técnicas de iniciación y explosivos más seguros.

Los productos químicos con un enorme potencial energético, conocidos como explosivos, están compuestos por oxidantes, combustibles y sensibilizadores que, al ser activados por un iniciador u otro estímulo externo, reaccionan violenta e instantáneamente, produciendo una voluminosa cantidad de gases que se extienden con gran energía a altas temperaturas.

2.2.2. Componentes de los explosivos

Los explosivos sensibles a los detonadores constituyen actualmente la mayoría de los explosivos utilizados en las minas de superficie. Todos los explosivos sensibles al iniciador tienen los siguientes componentes, que son necesarios para que un cebador los encienda de forma consistente y en condiciones típicas de funcionamiento.

2.2.2.1. Oxidante

Una sustancia que proporciona oxígeno para una reacción se denomina oxidante. El oxidante más frecuente es, sin duda, el nitrato amónico.

2.2.2.2. Combustible

Los más populares son el aceite y el polvo de aluminio, que generan calor al combinarse con el oxígeno.

2.2.2.3. Sensibilizador

Durante una detonación, un sensibilizador crea vacíos que sirven de “puntos calientes” e inician la reacción. Los sensibilizadores suelen ser burbujas de gas o aire muy diminutas y ocasionalmente encerradas.

2.2.3. *Propiedades de los explosivos*

2.2.3.1. Densidad

Regula la concentración de energía en un taladro y está definido como el peso del explosivo por cada unidad de volumen (gr/cc). Dado que un explosivo con una menor densidad a 1,0 gr/cc flotaría en el agua, también es una consideración crucial para diagnosticar la cantidad de carga necesaria para un estallido.

2.2.3.2. Densidad de Carga Lineal (DCL)

Según la fórmula, la densidad de carga lineal cambia en función de la mezcla explosiva y es la cantidad de carga explosiva que aumenta en un metro para un diámetro determinado.

$$DCL = 0.507 \times D^2 \times \rho \dots \dots \dots \left(\frac{Kg}{m} \right)$$

D: Diámetro del taladro (pulg.)

P: Densidad del explosivo (gr/cc)

Cuando se carga taladro con agua en su interior, la densidad es un factor crucial a tener en cuenta. Por ejemplo, colocar explosivos con densidades inferiores a uno en barrenos llenos de agua es más difícil porque flotan, lo que no ocurre con explosivos con densidades superiores a uno, independientemente de la resistencia del explosivo al agua.

2.2.3.3. Resistencia al agua.

En este punto cabe diferenciar conceptos:

- Oposición al contacto con el agua.

- Oposición a la humedad.
- Oposición al agua bajo presión de la misma.

Gracias a este rasgo, un explosivo puede soportar una exposición, por un periodo largo al agua sin perder sus propiedades.

Los explosivos comunes sólo tienen una “calidad de resistencia al agua”, como ninguna, regular, buena o excepcional; no son impermeables.

El agua tiene el efecto de disminuir la sensibilidad del explosivo, lo que suele ir acompañado de la producción de gases nitrosos. Con el tiempo, la sensibilidad puede disminuir hasta que el producto simplemente deflagra.

Además, la composición y el embalaje del explosivo pueden influir en su durabilidad al agua.

La calidad de resistencia al agua del ANFO es nula porque el componente de nitrato de amonio es soluble en agua.

Las emulsiones son extremadamente resistentes al agua; la resistencia al agua del explosivo dependerá del porcentaje de la mezcla.

El agua estática suele recibir una clasificación de resistencia al agua. Al empaquetar el explosivo (mangas), se aumenta la resistencia cuando el agua pasa a través de las aberturas de la explosión (agua dinámica).

2.2.3.4. Sensibilidad

Es la habilidad o capacidad que posee cada explosivo para ser activado por un fulminante, un cebo o una cuerda conocido como “mínimo inicial”.

En realidad, es el peso del detonador más pequeño el que puede detonar completamente una carga explosiva rompedora, ya sea convencional, minibooster, primer, booster, cordón detonante o carga explosiva primaria.

Para que un explosivo sea detonado por un iniciador adecuado, este debe ser suficientemente sensitivo. El tipo de producto determinará esta capacidad. Los detonadores, por ejemplo, se utilizan en gran magnitud en casi todas las mezclas, por lo que es necesario un multiplicador o reforzador con más presión y velocidad.

Los números 8, 10 y 12 son los detonadores más utilizados. Se afirma que muchas dinamitas son más sensibles al N.º 8, ya que la utilización del 8 en lugar del 6 provoca un aumento de la velocidad de explosión. Un gran número de detonadores electrónicos corresponden a la sensibilidad Nº 12.

2.2.3.5. Simpatía

El impacto producido por la explosión de un disparo anterior puede empezar una carga cerca y demasiado pronto, siempre que la roca sea un eficiente transmisor de ondas de tensión, los detonadores tengan un nivel relativamente alto de perceptibilidad al comienzo (como ocurre en la mayor parte de las mezclas a base de nitroglicerina) y la proximidad entre explosivos sea pequeña. Además, la existencia de aguas subterráneas y de elementos como mantos de arcilla y estructuras abiertas puede desencadenar una detonación simpática. Cuando se utilizan pozos huecos para proteger unas perforaciones de otras, ocurre con menos frecuencia.

2.2.3.6. Presión de detonación

La tensión que experimenta la onda de detonación en el plano de Chapman-Jouguet detrás del frente de explosión. Su valor se da en megapascales (Mpa) o kbar y depende del

cuadrado de la velocidad y la densidad. Así, oscila entre 500 y 1.500 Mpa en los explosivos comerciales.

Es una medida útil de la potestad de fragmentación de un explosivo.

Aunque se encuentran varios métodos para medirla mediante cálculos e intrincadas pruebas físicas, como utilizar un acuario para medirla bajo el agua, la teoría hidrodinámica demuestra que su validez útil, expresado en kilobares, es:

$$Pd = 250px(VOD)^2 \dots \dots \dots (Mpa)$$

VOD: Velocidad de detonación (m/s)

P: Densidad de explosivo (gr/cc)

Pd. Presión de detonación (Mpa)

2.2.3.7. Estabilidad química o Tiempo de Duración

La capacidad de un detonante de mantenerse químicamente sin alteraciones durante un periodo predeterminado se conoce como estabilidad química.

Los explosivos permanecerán estables mientras se encuentran en tránsito desde la planta, lo que garantizará a los clientes un artículo totalmente seguro y confiable para las operaciones de voladura, siempre y cuando las circunstancias de almacenamiento sean adecuadas.

La pérdida de esta propiedad se puede dar por el inadecuado almacenamiento del explosivo en lugares poco ventilados, pudiendo incluso llegar a su inutilización.

2.2.3.8. Energía/Potencia

La energía de una explosión es una medida de su capacidad para romper roca. La capacidad de un explosivo para romper roca depende de su energía. La composición química, la forma física, el tipo de confinamiento, el método de iniciación y el grado de utilización de la energía dispuesta para actuar sobre la roca son algunos de las circunstancias que afectan a la

productividad de un explosivo, ya que un explosivo más energético puede actuar sobre un mayor volumen de material.

En otras palabras, si se tiene en cuenta la energía involucrada en la fragmentación y emisión, es posible predecir con mayor precisión el impacto del explosivo en la roca circundante.

2.2.4. Mecánica de la rotura de rocas por explosivos

Los componentes o combinaciones de sustancias en fases sólida, líquida o gaseosa que tienen la capacidad de cambiar rápidamente en elementos gaseosos y condensados mediante reacciones de oxidación-reducción son materiales explosivos. La transformación de su volumen original en una masa gaseosa capaz de llegar a temperaturas y presiones extremas. A alta temperatura y presión, esto provoca una alteración exotérmica que produce una serie de materiales gasificables más estables estos ocupan mucho más espacio, entre 1000 y 10 000 veces más que el lugar donde se produjo la explosión.

2.2.4.1. Proceso de reacción según su carácter fisicoquímico

2.2.4.1.1. Combustión

Se trata de cualquier proceso químico que tenga una reacción relativamente lenta, pueda liberar calor y que pueda o no ser perceptible para nuestros sentidos.

2.2.4.1.2. Deflagración

Se trata de un proceso exotérmico en el que la conductividad térmica sirve de base principal para la propagación de la reacción de descomposición. En este fenómeno de superficie, la deflagración avanza a través del explosivo en capas equivalentes a una velocidad lenta, comúnmente inferior a 1000 m/s.

La combustión rápida es lo mismo que la deflagración. La activación de explosivos resulta en una deflagración en la cual las reacciones se esparcen por radiación y conducción térmica.

2.2.4.1.3. Detonación

Se trata de un procedimiento físico-químico que produce una alta cantidad de productos gaseosos a alta temperatura y con una velocidad de reacción rápida. Estos gases ejercen presión sobre su entorno debido a su gran fuerza de expansión.

En los explosivos detonantes, las moléculas gasificadas se mueven a tal velocidad que no pueden transferir su calor por conducción a las zonas del cargador que no se ven afectadas. Más bien se propaga por impacto, que distorsiona el material y provoca un calentamiento al que sigue una explosión adiabática que libera gases frescos. Todo el explosivo se ve afectado por este proceso cíclico, que se repite y produce una onda de choque.

2.2.4.2. Etapas del proceso de fracturamiento de rocas

La mayor parte de los estudios coinciden en que el proceso de fracturación de roca con una mezcla explosiva comercial consta de tres fases principales.

2.2.4.2.1. Primera fase: Fracturas radiales (Brisance)

Se crean ondas compresivas o de choque cuando se coloca un explosivo comercial en un taladro y este detona.

La composición del detonante comercial, las cualidades de la roca, el número y la ubicación de los boosters, el diámetro del taladro, la correlación entre la velocidad de explosión y de expansión de las ondas por medio de la masa rocosa, todos estos factores afectan la forma y proporción de estas, que se propagan a velocidades comprendidas entre 3000 y 5000 m/s.

Cabe destacar que estas iniciales fisuras radiales son producidas en zonas cercanas a los taladros y el tiempo que se necesita para esta es de 1 a 2 ms.

2.2.4.2.2. Segunda fase: Empuje hacia adelante (heave).

Las ondas compresivas creadas por alta presión de gas se reflejan y refractan.

Las ondas compresivas que se reflejan cambian de signo (de negativo a positivo) y se convierten en ondas de tensión. Cuando los pulsos compresivos llegan a una superficie libre, el macizo rocoso experimenta un cambio de densidad, se contactan fallas geológicas o planos estructurales, etc., este cambio de fase se producirá.

La superficie libre o cualquier discontinuidad donde se reflejen ondas compresión es donde la roca empezará a fracturarse.

2.2.4.2.3. Tercera fase: Fragmentación.

En esta etapa se produce la fragmentación total de la roca.

JOHANSSON: Ha dicho que: Cuando se generan altas presiones debido a los gases de la detonación de una mezcla explosiva comercial, se producen fracturas radiales iniciales que se expanden, provocando la falla de la cara libre, la cual es desplazada hacia adelante.

Al igual que el empuje frontal (HEAVE), el nuevo impulso libre refleja las ondas de impacto restantes producto de las ondas compresivas después de que la primera parte del macizo rocoso haya sido desplazada.

Numerosos investigadores han señalado que la fracturación puede dividirse en cinco etapas o fases, destacando que la fragmentación es la variable más importante. Esta debe considerarse como el criterio principal para evaluar los resultados de una voladura desde una perspectiva técnico-económica y ecológica.

El factor que conecta todas las actividades del ciclo minero-metalúrgico preparación previa, minería, procesamiento de minerales y comercialización de productos minerales es la fragmentación. Por ello, su control y optimización son fundamentales para garantizar un desempeño de manera más eficiente y sostenible del proceso de extracción

2.2.4.3. Condiciones fundamentales para la rotura de rocas

a) Confinamiento del explosivo en el taladro

El objetivo es conseguir la mejor conexión con la pared interna para que la roca reciba la onda de choque. Este efecto se reduce significativamente cuando hay vacíos, desacoplamiento o explosivos sueltos.

b) Cara libre

Para que se formen y regresen las ondas de presión reflejadas que producen la fragmentación es necesario. Si hay una superficie disponible insuficiente, el resultado será una mala voladura y en su ausencia, las ondas de compresión se moverán libremente sin reflejar y solo se difundirán lejanamente como ondas sísmicas.

c) Distancia del taladro a la cara libre

Llamada línea de menor resistencia. Tiene que ser compatible para cada diámetro de taladro. Si fuera el caso en que sea excesivamente largo, la fragmentación solo se producirá en la boca o el collar del taladro y habrá muy poca reflexión de ondas.

Si se dan estas condiciones, la presión de los gases sobre el macizo rocoso en proceso de fracturación también dará lugar a la formación de planos de fracturación horizontal desde la superficie libre.

d) Fisuramiento cilíndrico radial

Mientras que un taladro convencional (con una longitud superior a 6 diámetros) se expande radialmente en forma de cilindro a lo largo de su totalidad, una carga explosiva de

punto (con un cociente longitud-diámetro máximo de 6/1), es decir, no más de 6 veces su propio diámetro, suele producir una excavación de poca profundidad en forma de cuenco o cráter.

Teóricamente, el impacto de la detonación en el entorno rocoso del martillo de perforación provocaría los siguientes niveles de devastación, según los rangos de presión de gas que van desde los 9 hasta los 275 kbar y las temperaturas que alcanzan entre los 3000 y los 7000 grados F, su impacto sobre la roca circundante a partir del eje del taladro ocasiona teóricamente los siguientes grados de destrucción:

- En una separación de dos diámetros, pulverización.
- La zona de grietas radiales se representa por grietas cada vez más débiles y abiertas a una distancia de 2 a 4 o 5 diámetros, junto con una fragmentación cada vez más gruesa.
- Para calcular la distancia entre los agujeros de perforación en una explosión se necesita conocer la distancia máxima que alcanza la detonación y la distribución de grados de destrucción. Si la interacción entre ambos es la adecuada, se producirá una buena fragmentación; si no, los explosivos simplemente crearían una explosión de gas sin producir un corte entre ellos, o incluso podrían producir craterización solo en la salida, dejando grandes fragmentos entre ellos.

2.2.5. Fragmentación de rocas

2.2.5.1. Variables en el proceso de fragmentación de rocas

Cada compañía, independientemente de su sector económico, debe contar con un planeamiento estratégico que guía sus actividades. Para el caso de las mineras, resulta imprescindible diseñar un plan estratégico adecuado para alcanzar sus objetivos al cierre del año.

Considerando que las demás operaciones unitarias dependen directamente de la voladura primaria, el departamento encargado de su diseño debe considerar tanto las variables controlables como las no controlables, las cuales se detallan a continuación:

a) Variables Controlables

- Geométricas
 - Burden
 - Espaciamiento
 - Diámetro del taladro
 - Longitud de carga
 - Sobre Perforación
 - Taco
 - Altura de Banco
 - Profundidad de taladro
- Físico - Químicas
 - Tipo de mezcla explosiva
 - Densidad de la mezcla explosiva
 - Velocidad de detonación
- De tiempo
 - Tiempos de retardo entre taladros y filas.
 - Tipos y secuencia de salida
- Operativas
 - Fragmentación requerida

b) Variables no controlables

En su mayoría poseen propiedades aleatorias y son:

- Variedad y naturaleza del macizo rocoso
- Geología regional, local y estructural
- Hidrogeología y condiciones climatológicas
- Aspectos geotécnicos
- Características geomecánicas

2.2.5.2. Parámetros de perforación***a) Diámetro de taladro***

La selección del diámetro de taladro es crítica:

- Afecta a las especificaciones de los equipos de perforación, carga y acarreo
- También afecta al burden, espaciamiento
- 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.

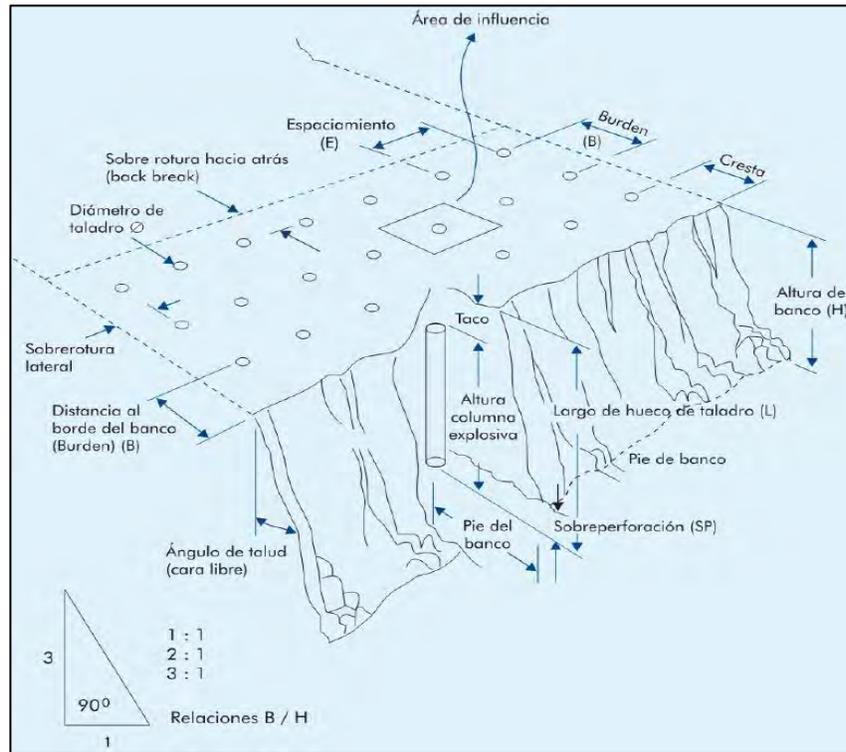
b) Cálculo de la malla de perforación (Burden, Espaciamiento)

En el caso de la voladura, se considera que la carga es el factor más importante.

El diámetro del taladro, las características del macizo rocoso, la altura del talud y las propiedades del explosivo tienen un papel fundamental, apreciamos en la figura 01.

Figura 01

Banco de voladura: Nomenclatura



Fuente: Manual práctico de voladura Exa 5ta edición

Para el diseño de mallas se ha utilizado el modelo de RAsh el cual se muestra en las siguientes líneas para este modelo que contempla que el burden, está de acuerdo con la densidad del explosivo utilizado es 1.31m/cc para HA73G y la dureza de la roca a fragmentar pertenece a la clase dura y según el cuadro de polígonos de resistencia da un valor de 220 reemplazando nos da un valor de 5m de burden (Exsa, 2019).

$$B = \frac{K_b \times \phi_{tal}}{12}$$

Donde:

$B = \text{burden (m)}$

$\phi_{tal} = \text{diámetro del taladro (pulg)}$

$K_b = \text{constante, según el cuadro}$

$$B = \frac{220 \times 10.625 \times 0.0254}{12}$$

$$B = 4.95m = 5m$$

La determinación del espaciamiento se hace teniendo en cuenta el burden y el tiempo programado para la voladura. Es importante tener en cuenta que, si los taladros se inician simultáneamente, los espaciamientos deben ser más grandes para evitar resultados negativos. Si los espaciamientos son demasiado pequeños, se generará demasiada trituración y partes inestables en el talud. Por el contrario, si el espaciamiento es grande, se generará una mala fragmentación, perfil malo en el pie de banco y una cara libre desigual, en practica normalmente es igual al burden para malla cuadrada $E = B$ y de $E = 1.3$ a $1.5B$ para malla rectangular o alterna. La medida del espaciamiento para mallas cuadradas se determina de la siguiente manera: (Zavala, 2017).

$$E = 1xB$$

$B = \textit{burden}$

$E = \textit{espaciamiento}$

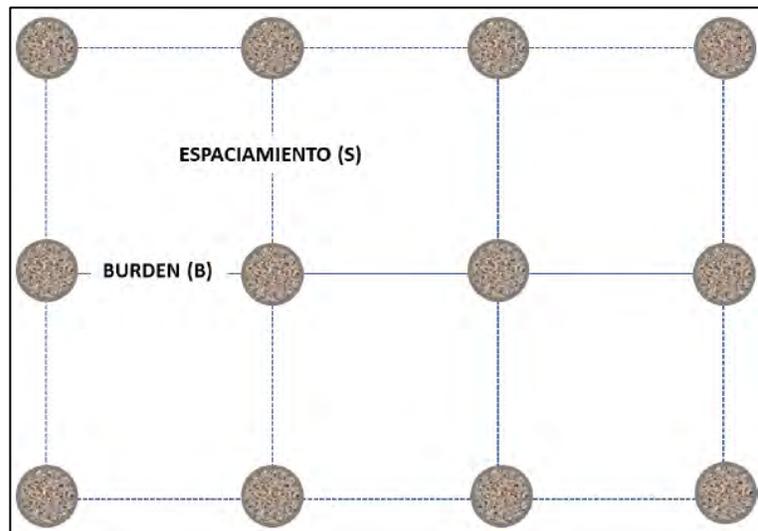
Remplazando: $E = 1xB = 1x5$, $E = 5m$

c) Diseño de malla de perforación

Se define la malla de perforación como la disposición de los taladros teniendo en cuenta la geometría para seguir y considerar la relación de burden con el espaciamiento, en este caso para mallas cuadradas y su conexión con la profundidad de los taladros directamente ver figura 02.

Figura 02

Malla de perforación cuadrada B=S



Fuente: Asistencia técnica - Enaex

d) Longitud de taladro (L)

La altura del banco más la sobre perforación por debajo del nivel de demolición o del nivel del suelo, con el objetivo de que se eviten pisos desnivel y garantice un desprendimiento adecuado a la altura del banco más sobre perforación por debajo del nivel del suelo o del nivel de derribo, para garantizar un buen desprendimiento sin presentar bultos (en pisos altos), que entorpecen la labor de la limpieza y deben ser retirados mediante una voladura secundaria, suman a la longitud del taladro (L).

$$L = H + 0.3xB = 15 + 0.3x5 = 16.5m$$

H = altura del banco

B = burden

e) Perforación inclinada

La perforación inclinada, realizada de forma paralela a la cara libre del banco, permite mantener un burden constante a lo largo del taladro, traduciéndose esto en una adecuada

fragmentación, mayor esponjamiento y desplazamiento del material volado, una menor formación de cráter en la embocadura del taladro, un consumo específico de explosivos más bajos y taludes con mayor estabilidad en la cara libre.

Aumentar la longitud de perforación genera un mayor desgaste en las brocas, barras y estabilizadores, complica el proceso de choque de explosivos y aumenta la probabilidad de desviación en los taladros, particularmente en aquellos que superan los 20 metros de profundidad.

2.2.5.3. Parámetros de la voladura

a) Características de los explosivos

Para seleccionar un explosivo adecuado para un fin determinado, es necesario reconocer particularidades de cada uno de estos, de esta manera se podrá elegir el conveniente para el tipo de aplicación que se requiera.

b) Columna explosiva

Corresponde a la zona dinámica del taladro de voladura, conocida como “longitud de carga”, en este lugar se genera la detonación del explosivo que origina el inicio de la presión con los gases sobre las partes externas del taladro.

El correcto esparcimiento del explosivo alrededor del taladro es fundamental y debe ajustarse a las condiciones geológicas del macizo rocoso. Generalmente, esta sección abarca entre la mitad y dos tercios del total del taladro, y puede configurarse de manera continua o segmentada.

En función de los requerimientos específicos de cada perforación, pueden aplicarse distintos esquemas de carga: solo dentro del taladro, hasta la mitad de la columna, a columna completa o con cargas diferenciadas (como cargas espaciadas, alternas o en decks).

En el caso de rocas poco competentes o frágiles, se suele emplear una columna de carga continúa compuesta por un solo tipo de explosivo. En contraste, para formaciones rocosas duras, resistentes o competentes, la carga está dividida en dos fragmentos, la carga de fondo (CF) y la carga de columna (CC).

c) Carga Lineal (CL) (Kg. /m)

La carga lineal o volumen del explosivo por cada metro de la columna explosiva se determina por la siguiente formula:

$$CL = 0.5067 \times D \times \rho \times \phi^2 \times 1.011$$

$$CL = 0.5067 \times 1.31 \times (10.625)^2 \times 1.011$$

$$CL = 75.75 \frac{kg}{m} = 76 kg/m$$

Donde:

De: densidad del explosivo

ϕ : diámetro de la broca

1.011 = constante de corrección ya que el diámetro del taladro es siempre un % mayor al de la broca.

d) Carga de Fondo (CF)

El término carga de fondo se refiere a la carga explosiva que presente mayor densidad y potencia, colocada abajo del taladro, cuya función es quebrar la zona más aislada y asegurar la rotura hasta el piso. Esto, junto con la sobreperforación, permite sostener la nivelación del piso de minado, evitar la creación de lomos y limitar la generación de fragmentación gruesa con presencia de bolones.

Para determinar la altura de esta carga de fondo (CF) existen dos posibilidades:

- La primera se refiere a que la CF no debe ser menor a 0.7 veces el burden $CF = 0.7B$, en este caso $CF = 0.7 \times 5m$, $CF = 3.5m$ el cual se ilustra en la figura siguiente.

- La segunda se refiere a que la CF debe tener la energía necesaria para lograr el objetivo, para ello debemos tener una longitud mínima de CF tal, en la que el explosivo logre su velocidad de detonación régimen y esta se logrará en una longitud de CF equivalente de 4 a 6 veces el diámetro de la carga explosiva.

e) Calidad del explosivo

Los productos comúnmente utilizados incluyen ANFO, emulsiones sensibilizadas y ANFOs pesados en proporciones que varían del 30/70 al 70/30, dado que la energía por unidad de longitud en lo profundo del taladro tiene que ser, como mínimo, el doble de la necesaria para fracturar la roca en la zona superior.

Para maximizar la eficiencia del disparo, el cebo iniciador o booster debe ubicarse en la sección correspondiente a la carga de fondo, preferentemente a la altura del piso del banco.

f) Carga de Columna (CC)

Esta se sitúa por encima de la carga de fondo y, debido al menor confinamiento de la roca en esta zona del taladro, puede utilizarse un explosivo de menor densidad, magnitud o concentración, siendo habitual el uso de ANFO convencional o ANFO pesado en proporciones que van del 30/70 al 70/30.

La altura de la carga de columna se determina restando, a la longitud total del taladro, la suma de la carga de fondo y el taco, en este caso según diseño se recomienda compartir la carga total del taladro en partes iguales que se puede apreciar en la figura siguiente.

g) Cálculo de Taco

Ash propuso que los parámetros de diseño de una malla de voladura (burden, spacing, stemming, subdrill, etc.) pueden expresarse mediante “K-factors” (ratios) derivados del burden (B). En su enfoque la longitud del taco T se calcula como:

$$T_{taco} = K_T \times B$$

T_{taco} : Taco del taladro (m)

$B = Burden(m)$

K_T : Factor de taco ó constante.

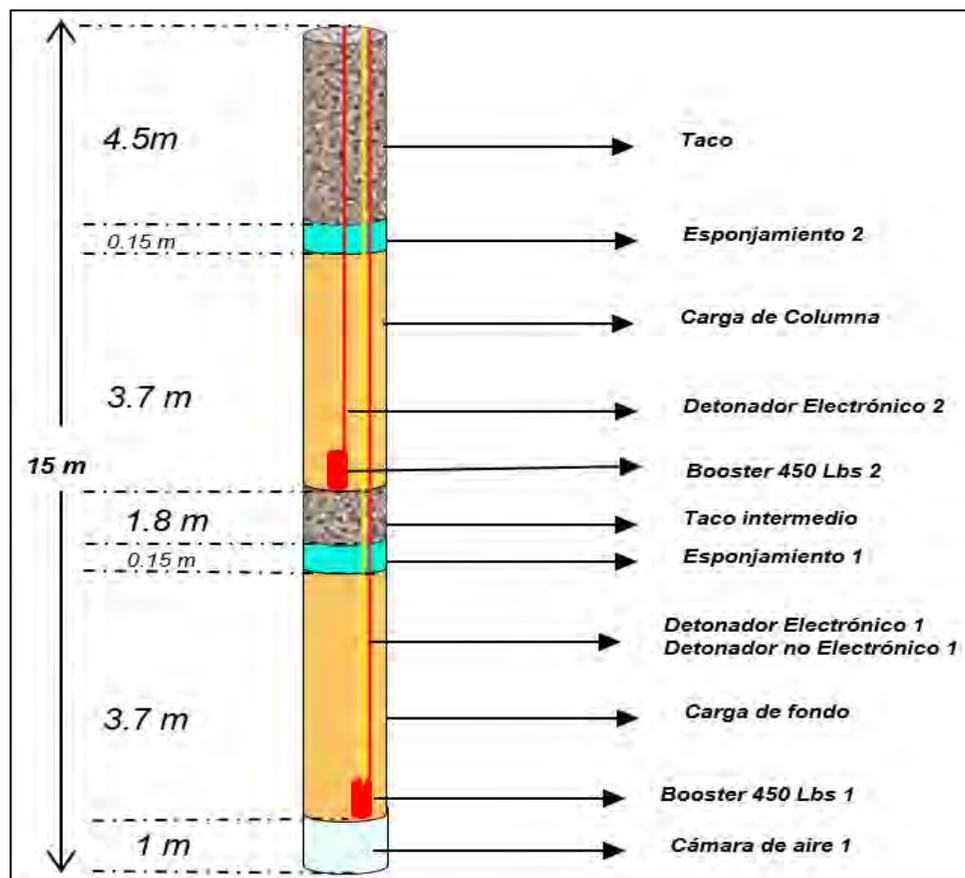
donde K_T es el factor de stemming (stemming ratio). Las recomendaciones prácticas basadas en Ash y autores que desarrollaron su método son: típicamente entre **0.7 y 1.0** veces el burden, aunque en la práctica se encuentran rangos más amplios según material y condiciones (por ejemplo $0.5-1.3 \cdot B$ o expresiones en múltiplos del diámetro del taladro) ver figura 03.

Remplazando en la fórmula para nuestro caso de estudio:

$$T_{taco} = 0.9 \times 5m = 4.5m$$

Figura 03

Partes de la columna explosiva (deck)



Fuente: Asistencia técnica - Enaex

h) Determinación del explosivo a usarse

Cada tipo de roca tiene sus características propias y para elegir el explosivo adecuado para la fragmentación requerida se debe conocer y tener en cuenta, tanto de la roca como del explosivo las siguientes características:

Los factores que presentan mayor influencia en los resultados de la voladura no sólo tienen que considerarse el explosivo, está interrelacionado a otros parámetros importantes como son:

Características del macizo rocoso

- Tipo de roca
- Características Físicas
- Características mecánicas
- Estructuras
- Hidrología

Características ambientales del explosivo

- Sensibilidad
- Resistencia al agua
- Vapores
- Condiciones climáticas.
- Resistencia a la temperatura

i) Diseño de amarre y sistema de iniciación.

Está vinculado a la disposición de los taladros en una voladura, considerando principalmente la relación entre burden y espaciamiento, así como su relación directa con la profundidad de los taladros.

En el diseño de una voladura de banco, se pueden emplear distintos patrones de perforación, conocidos como malla cuadrada, rectangular o triangular (también llamada alterna), los cuales se definen en función de la dimensión del burden.

El pre-corte debe ser iniciado por separado o en conjunto con la voladura de producción, sólo con una disimilitud mínima, previo a la tronadura de producción.

Sistema de Iniciación Pirotécnico

Trasmite energía a partir de una onda de choque, considerando la deflagración de una película explosiva que se encuentra adosada a las paredes internas de un tubo plástico.

Esta onda de choque tiene la capacidad de activar los elementos de retardo ubicados dentro del detonador.

Sistema de iniciación eléctrico.

Un sistema de detonación eléctrico es un dispositivo que transforma un impulso eléctrico en una detonación de una carga explosiva. Para que funcione, se aplica un voltaje alto en sus terminales, lo que genera una corriente eléctrica que dispara el detonador.

Sistema de iniciación Electrónico

Se trata de un método moderno y buena precisión, capaz de regular la energía liberada durante una voladura, mejorando la fragmentación, reduciendo los efectos de las vibraciones y controlando la difuminación del material.

Este método redefine los conceptos de precisión, exactitud, flexibilidad y seguridad ya que la dispersión de retardos es menor por tratarse de unos detonadores programados y activados electrónicamente.

j) Resultados de la voladura

Estos deben ser cuidadosamente evaluados y deben considerarse lo siguiente:

k) Grado de fragmentación

El nivel de fragmentación representa un indicativo clave de la calidad de la voladura y se evalúa de forma indirecta a través de la cualidad de rendimiento de las máquinas de carga y transporte.

l) Volumen Roto (m³) o Toneladas métricas rotas (TMR)

Corresponde al volumen calculado del área de voladura, expresado en metros cúbicos (m³), el cual se convierte en toneladas considerando la densidad del macizo rocoso que se está volando.

m) Factor de Potencia:

Es un indicador que establece la relación entre la cantidad de explosivo empleada en la voladura, expresada en kilogramos de explosivo a utilizarse para romper una tonelada de toca, (kg/tn).

$$F.P = \frac{M}{ExBxHx\rho}$$

F.P: Factor de Potencia (kg/Tn)

M: Masa del Explosivo (kg)

E: Espaciamiento (m)

B: Burden (m)

ρ : Densidad de Roca (gr/cc) = 2.5 gr/cc

$$F.P = \frac{640}{5x5x15x2.5} = 0.68kg/Tn$$

2.2.5.4. Voladura de producción

En esta etapa se fragmenta el macizo rocoso y se extrae el mineral. Después de fragmentar el macizo rocoso, se procede con los procesos metalúrgicos con el fin de obtener el

metal o concentrado. El macizo rocoso fragmentado pasa mediante procesos metalúrgicos para transformarse en concentrado o metal.

La voladura de producción exige el diseño de una malla de perforación y voladura (B x S), basada en modelos matemáticos.

En este proceso, los taladros de voladura fragmentan la roca mediante su interacción mutua, predominando el fraccionamiento radial. Para asegurar este resultado, es fundamental cumplir con determinadas condiciones, tales como:

1. Relación de separación en relación a la carga: $E = (1,3 \text{ a } 1,5) \times B$.
2. Relación de acoplamiento (diámetro del taladro): un máximo de 1,2 a 1, buscando una zona y un ataque adecuado para el explosivo.
3. Partición de la carga explosiva, que ocupa alrededor de $2/3$ de la longitud del taladro (66%), con la máxima aglomeración de esta carga en la parte inferior del taladro.
4. Para aumentar el grado de confinamiento y mantener la explosión en el pozo el mayor tiempo posible, se utilizan bloques inertes de taco.
5. Todos los talaros se disparan de forma secuencial, con intervalos de tiempo determinados por un esquema de secuenciación (precorte, buffer, producción, etc.).

2.2.5.5. Voladura controlada

El objetivo primordial de esta es limitar el fraccionamiento de la roca dentro de límites predefinidos, evitando así la sobreexplotación. Este método especializado crea superficies de corte lisas y bien delimitadas, a la vez que reduce el agrietamiento de la roca sobrante. Esto mejora la estabilidad de la roca, lo cual es particularmente importante en la minería subterránea y a cielo abierto, donde la estabilidad de los taludes en los frentes de corte es esencial.

Este método consiste en el uso de cargas explosivas lineales de baja energía, ubicadas en taladros muy próximos entre sí, las cuales se detonan simultáneamente para generar y controlar la formación de una grieta o plano de ruptura continuo que defina el límite de la superficie final de un corte o excavación.

a) Precorte, recorte

Definición del término “precorte” se refiere cuando la detonación para este corte es precedente a la voladura primordial. Por otro lado, se dice que es “Precorte” cuando la detonación para este corte es posterior a la voladura de contorno o voladura suave (Smooth blasting).

b) Control de taludes

Los taladros de voladura controlada, en comparación con los taladros de voladura normales, deben espaciarse para dirigir las grietas hacia los puntos de menor resistencia. Para crear un plano de corte y disminuir o evitar por completo el desarrollo de fracturas radiales, deben alinearse de un taladro a otro.

Entre sus requisitos previos esenciales se encuentran:

1. Lo contrario de la típica relación espacio-carga, que es menor que la carga (a menudo $E = 0,5$ a $0,8 B$).
2. Carga explosiva lineal dispersada a lo largo de la perforación, idealmente utilizando cartuchos desmontables como son los de o, en algunas situaciones, carga amortiguada con espaciadores.
3. El bloque inerte no contiene la explosión, simplemente la mantiene dentro del taladro.
4. El uso de explosivos de gran potencia y velocidad limitadas.

5. Todos los taladros de la línea de corte deben dispararse simultáneamente, sin interrupción, y antes de la voladura principal.
6. Observe la alineación y el paralelismo de las brocas de acuerdo con el diseño del corte; si no, no saldrá nada útil.

2.2.6. Medición y análisis de la fragmentación

El factor único y más crucial que hay que considerar al momento de evaluar el rendimiento de una voladura desde una perspectiva técnica y financiera es la fragmentación.

Esto se debe al hecho de que la fragmentación es la única variable que conecta cada una de las operaciones mineras individuales que comprenden todo el ciclo minero, actividades que comprenden todo el ciclo minero.

Llevar un monitoreo de la fragmentación que se va obteniendo en cada voladura con el objeto de hacer mejora continua para tener la fragmentación óptima que permita reducir los costos globales del negocio minero.

Se necesitan dos personas para esta operación, que se llevará a cabo con el equipo de carga parado. Una persona servirá de vigía, mientras que la otra tomará fotografías utilizando la herramienta necesaria (PortaMetrics).

Comuníquese y retírese si la situación no es segura. También se debe contactar por radio con el supervisor de la mina (O1) a cargo de la zona para solicitar permiso para entrar si el trabajo se va a realizar en un lugar que esté al menos a 50 metros de la zona de trabajo del equipo de carga.

Coloque el PortaMetrics en la ubicación adecuada para la imagen y llene el campo de visión con roca rota representativa del frente de minado.

Añada todos los tamaños. Ningún bloque debe ocupar más del 20% de la anchura de la imagen. El examinador tiene la última palabra sobre cuántas imágenes se toman, pero debe tenerse en cuenta la uniformidad de la fragmentación. Deberían añadirse más imágenes si la fragmentación de la pila es desigual.

Para conocer mejor el aspecto del frente de minado que se está extrayendo, tome fotografías panorámicas.

2.2.6.1. PortaMetrics

Es una herramienta esencial para optimizar el trabajo de la evaluación de los frentes posvoladura de las operaciones mineras. Este dispositivo compacto y fácil de transportar permite realizar análisis en tiempo real gracias a su tecnología avanzada, que incluye cámaras de alta resolución y una interfaz con pantalla táctil. Proporciona información detallada sobre la fragmentación de las partículas, como la proporción en porcentaje de finos y el P80, ofreciendo análisis preciso y rápido que mejora significativamente la toma de decisiones operativas.

2.2.6.2. Modelo de fragmentación

P80: Tamaño correspondiente al 80% pasante. Indica grado de fragmentación como en la curva de distribución gravimétrica tamizada.

2.2.7. Calidad de humos y balance de oxígeno

2.2.7.1. Calidad de humos

Los vapores nitrosos (NO_x), el vapor de agua, el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO₂) son algunos de los productos gaseosos que quedan tras la detonación del explosivo.

Los explosivos industriales se fabrican de forma que, cuando se producen reacciones químicas, se producen humos de voladura con una baja concentración de gases nocivos (CO y NOx). Esto demuestra que se está produciendo una reacción química completa.

Sin embargo, la cantidad de gases nocivos (CO, NOx, etc.) producidos durante la voladura es importante y puede causar molestias o incluso intoxicaciones graves a las personas porque, en general, los parámetros reales difieren de los teóricos. Por ello, nunca hay que acercarse a un frente de voladura después de una voladura hasta tener la certeza de que se han evacuado los gases creados durante la voladura, ya sea mediante cálculos o mediciones reales.

2.2.7.2. Balance de oxígeno

Teóricamente, el nitrógeno (gas), el dióxido de carbono y el vapor de agua deberían ser los componentes de detonación de los ingredientes que suelen componer la formación química de un explosivo: hidrógeno, carbono y nitrógeno.

El nitrato de amonio y el fuel-oil se combinan para generar el explosivo conocido como ANFO, y la reacción adecuada sería:



Calculamos los pesos moleculares:

Los pesos atómicos son: N=14.008, O=16, C=12.01, H= 1.008, Al=26.97, S=32.06, K=39.096, Na = 22.997.

3NH₄NO₃

$$3 \cdot 16.00 = 48.00$$

$$2 \cdot 14.008 = 28.016$$

$$4 \cdot 1.008 = 4.032$$

$$3 \Sigma(048.80) = 240.144 \text{ gr/mol}$$

CH2

$$2 * 1.008 = 2.016$$

$$1 * 12.010 = 12.010$$

$$\Sigma = 14.026 \text{gr/mol}$$

CO2

$$2 * 16.00 = 32.00$$

$$1 * 12.010 = 12.010$$

$$\Sigma = 44.01 \text{gr/mol}$$

7H2O

$$2 * 1.008 = 2.016$$

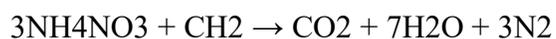
$$1 * 16.00 = 16.00$$

$$7 \Sigma (18.016) = 126.112 \text{gr/mol}$$

3N2

$$2 * 14.008 = 28.016$$

$$3 \Sigma (28.016) = 84.048 \text{gr/mol}$$



$$240.144 + 14.026 \rightarrow 44.01 + 126.112 + 84.048$$

$$254.17 \rightarrow 254.17$$

Calculando los porcentajes en peso de cada ingrediente del ANFO, se tiene:

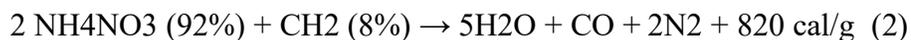
Para el ANFO: $254.17 \text{gr/mol} \underline{\hspace{2cm}}$ 100%

Para el AN $240.144 \text{gr/mol} \underline{\hspace{2cm}}$ X

$$X = 94.48\%$$

El FO será $100\% - 94.48\% = 5.52\%$

Esta suposición es coherente con la situación en la que el ANFO que reacciona está compuesto por un 5,5% de fuel-oil y un 94,5% de NO_3NH_4 . Si estas proporciones fueran diferentes, el resultado sería el siguiente:



Cuando la cantidad de oxígeno que reacciona es la cantidad exacta necesaria para la oxidación completa del carbono y el hidrógeno, dejando nitrógeno libre, se habla de reacción completa.

El “balance de oxígeno” (B.O.) en déficit o exceso de oxígeno en la formulación química de un explosivo, representado en porcentaje sobre la cantidad teóricamente necesaria. Así, con la formulación (1), el B.O. sería cero; con la formulación (2), sería negativo; y con la formulación (3), sería positivo.

Como hemos visto, el B.O. influye en la intensidad del detonante (calor de explosión) y en la generación de gases nocivos.

2.3. Emulsión Gasificada

Una emulsión que ha sido sensibilizada a través la creación de diminutas burbujas en el interior de su arquetipo se conoce como emulsión gasificada, creación de diminutas burbujas en el interior de su matriz.

Una emulsión puede hacerse gasificable químicamente añadiendo un aditivo que, al primer contacto con la emulsión, provoque burbujas. Esto hace que la emulsión sea sensible a un iniciador fuerte, como la dinamita, el reforzador o la emulsión sensible a los detonadores. En el campo es donde se realiza esta sensibilización.

La emulsión no es más que una solución oxidante no explosiva que se produce en la planta, se conduce a la mina, se guarda en silos, se traslada a los camiones de la fábrica y luego se bombea a los taladros. Todas estas operaciones son, por tanto, totalmente seguras. Sólo cuando se ha producido la gasificación en el interior del barreno se convierte en un agente explosivo.

Las mezclas conocidas como «ANFO pesado» o «Heavy ANFO», compuestas de ANFO en diferentes proporciones, pueden sustituirse eficazmente por la emulsión gaseosa.

2.3.1. Mezcla Explosiva vertex HA73G

Este ANFO pesado gasificado, creado a partir de nitrato de amonio y una variación de la emulsión vertex para gasificar, puede alcanzar densidades de carga finales superiores a las de cualquier otro producto gasificado, con lo que se consigue una mayor energía. También puede ser útil para rocas excepcionalmente duras.

Antes del proceso de gasificación, el nitrato de amonio, un nitrato de alta densidad con un tratamiento único, puede integrarse fácilmente en la emulsión gasificada vertex para ofrecer la máxima energía sin comprometer el aumento del consumo de explosivos. La densidad inicial de la emulsión vertex es significativamente máxima que la de una emulsión matriz típica, pero esto no implica que se vaya a utilizar más explosivo porque la densidad final será exactamente la misma de siempre; sólo será necesario alterar el flujo del agente reactivo (nitrito sódico, o L-4) como se indica en la figura para conseguir la densidad requerida con la resistencia que incluso tendrá más puntos calientes.

Balance de oxígeno de emulsion vertex

Cooper, Paul W. balance de oxígeno (OB%) indica si una mezcla explosiva vertex, tiene oxígeno suficiente para oxidar completamente el carbono e hidrógeno presentes.

- $OB\% = 0 \rightarrow$ oxígeno justo (oxidación completa).
- $OB\% < 0 \rightarrow$ déficit de oxígeno \rightarrow productos parcialmente oxidados (CO, humos, carbono).
- $OB\% > 0 \rightarrow$ exceso de oxígeno.

Para el compuesto $C_x H_y O_z N_w$:

$$OB\% = \frac{-1600}{M} * (2X + \frac{y}{2} - Z)$$

Donde M es la masa molecular ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$) del compuesto.

El OB% de la mezcla es el promedio ponderado por fracción en masa:

$$OB\%_{mezcla} = \sum_i f_i * OB\%_i$$

(f_i =fracción en masa del componente i)

Valores atómicos utilizados:

- C = 12.011,
- H = 1.008,
- O = 15.999,
- N = 14.007 ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)

Cálculos intermedios (muestras utilizadas):

- NH_4NO_3 : fórmula efectiva $N_2H_4O_4 \rightarrow$ masa molar $M_{AN} = 80.043 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

$$2X + \frac{y}{2} - Z = 0 + \frac{4}{2} - 3 = -1$$

$$OB\%_{AN} = \frac{-1600}{80.043} * (-1) \approx +19.99\%$$

- H_2O : $OB\%_{H_2O} = 0\%$ (por definición).
- *Fuel* (modelo $C_{12}H_{26}$) : $M_{fuel} = 170.34 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

$$2X + \frac{y}{2} - Z = 24 + 13 = 37.$$

$$OB\%_{fuel} = \frac{-1600}{170.34} * (37) \approx -347.54\%$$

- Urea (modelo CH_4N_2O) : $M_{urea} = 60.056 \text{ g.mol}^{-1}$

$$2X + \frac{y}{2} - Z = 2 + 2 - 1 = 3.$$

$$OB\%_{urea} = \frac{-1600}{60.056} * (3) \approx -79.92\%$$

(estos son los OB% de cada componente puro; ahora los mezclamos según fracciones en masa).

Ejemplo para emulsion Vertex. Composición: 82.5% AN, 11% H₂O, 5.0% fuel, 1.5% urea

Cálculo:

$$0.825 * 19.99 = 18.492$$

$$0.11 * 0 = 0$$

$$0.050 * (-347.54) = -17.377$$

$$0.0150 * (-79.92) = -1.198$$

$$OB_{E.vertex} = 18.492 - 17.377 - 1.198 = -0.083\%$$

Resultado para el ejemplo OB= -0.083% = 0% (balance perfecto)

Interpretación practica:

- Valores entre -5% y -20% son comunes en emulsiones/ANFO “pesadas”. No implican necesariamente mal funcionamiento, pero sí mayor generación de humos y productos parcialmente oxidados.
- OB muy negativo (p. ej. < -25%) suele indicar mucho fuel respecto a oxidante: mayor humo, riesgo de CO, posible pérdida de eficiencia.

- OB cercano a 0 es ideal si se busca oxidación completa (menos humo), pero lograr $OB \approx 0$ puede requerir disminuir fuel o aumentar AN (o usar fuel con diferente composición).

2.3.1.1. Emulsión Matriz (Emulgex G1) o denominado otro en esta investigación

Emulgex G1, una emulsión gasificable de tipo agua en aceite, se utiliza para fabricar ANFO pesado vaciable y bombeable. Se mezcla con ANFO en diversas cantidades in situ y se sensibiliza mediante una solución gasificante antes de cargarlo en los taladros. Esto garantiza que el explosivo funcione con la mayor eficacia posible en minas a cielo abierto, canteras y/o proyectos de construcción.

2.3.1.2. Emulsión Vertex

Esta emulsión es un producto mejorado utilizado para roca de mayor dureza por contener dentro de su formulación productos energéticos como la urea, emulsificante, Diésel, agua y aceite mineral refinado lo cual asegura una buena performance en la voladura.

Cuando se mezcla con ANFO en cantidades específicas, actúa como ANFO Pesado; cuando se le aplica la solución gasificante, actúa como emulsión gasificada y ANFO Pesado gasificado. Esta emulsión oxidante inerte no puede detonarse a efectos de transporte hasta que se sensibiliza en el lugar de aplicación para formar un agente de voladura.

Además de un medio ácido que le permite reaccionar con la solución de gasificación, la solución oxidante inerte para gasificación también incluye un acelerador de reacción que permite obtener un producto sensibilizado después de verter la emulsión en el taladro.

2.3.1.3. Nitrato de Amonio Prillex

Es un componente de alta densidad que maximiza el potencial explosivo conocido como Nitrato de amonio. Su alta densidad hace posible crear el balance perfecto en la mezcla gaseosa explosiva. La emulsión se sensibiliza durante el proceso de gasificación, lo que disminuye su

densidad. El nitrato de Prillex confiere a la mezcla final altamente sensible más energía, lo que reduce los costes de voladura y produce una buena fragmentación de la roca. Su principal aplicación es la producción de ANFO para mezclas gasificadas y pesadas. Añada sólo un 5.5% a 6% de diésel; lo ideal es utilizar un módulo especial o un camión mezclador o fabrica específicamente para este fin para combinar el diésel con el nitrato de amonio.

2.3.1.4. Nitrito de Sodio L-4

Cuando se añade a la emulsión vertex para su gasificación, esta sal oxidante en solución tiene una tonalidad única que ayuda a su correcta visión. La densidad final del ANFO pesado gasificado o de consiguiente emulsión gasificada viene determinada por la cantidad de solución a gasificar; es decir, diferentes porcentajes de esta sal en solución arrojan densidades que oscilan entre 0,3 y 0,6 gr/cc.

2.4. Descripción de las Operaciones Mina Constancia

2.4.1 Método de explotación Open Pit

La operación de minado del tajo Constancia, se realizan mediante métodos convencionales de explotación a cielo abierto (Open Pit); empleando perforación & voladura mecanizada, carguío mediante palas hidráulicas - cargadores frontales y acarreo con camiones mineros de gran tonelaje. Las operaciones unitarias del método señalado se describen a continuación:

2.4.2 Perforación

2.4.2.1. Descripción

Esta tarea tiene como principal fin abrir en la roca o mineral huecos cilíndricos nombrados de forma técnica como “taladros”.

2.4.2.2. Diseño y Parámetros

Se perforan taladros de 15.5 m de profundidad (15m altura de banco y 0.5m sobre perforación), los mismos se realizan con un diámetro de perforación de 10 5/8” y 9 7/8” (producción y precorte respectivamente). Pulldown aplicado en un rango de 2 200 y 2 800 psi, RPM entre 80 y 110. Los factores de burden y espaciamiento cambian respecto al tipo de componente que se perfora como puede ser estéril o mineral.

2.4.2.3. Equipos empleados

Las actividades de perforado se realizan con hasta tres perforadoras PIT VIPER 271. (ver figura 04)

Figura 04

Perforadora Pit Viper 271



Fuente: Elaboración propia

2.4.3 Voladura

2.4.3.1. Descripción

El diseño y el trabajo de campo son las dos subcategorías del trabajo de voladura. El diseño de las cargas de acuerdo con las especificaciones de la roca es responsabilidad del primer grupo, así como la secuencia de amarre y salida respectiva, al mismo tiempo el segundo grupo se encarga de llevar a cabo la carga de los explosivos en el taladro y los equipos de voladura correspondientes, finalmente el amarre y detonación respectivos.

2.4.3.2. Diseño y Parámetros

Para las voladuras primarias, secundarias y de precorte se emplean de acuerdo al diseño respectivo mezclas explosivas a basadas en emulsiones y ANFO.

El ANFO se elabora utilizando una combinación de petróleo y residuos de aceite. (40 y 60 % respectivamente).

Los accesorios usados son el booster de 1 Lb y detonadores electrónicos (según sea el material a volar mineral o desmonte) empleando técnicas de voladura controlada; como medida de seguridad.

2.4.3.3. Equipos empleados

La carga de los taladros de perforación se realiza mediante 3 camiones de producción más un retén, que poseen las siguientes características:

- 9 toneladas de nitrato de amonio.
- 11 toneladas de emulsión.
- 300 galones de petróleo o petróleo + aceite residual.
- 300 litros de solución gasificante
- 300 litros de agua.

Los camiones de producción están concebidos para llevar a cabo dos formas de carga dependiendo lo necesitado en el terreno, los cuales son:

- Sistema vaciable: se hace uso de la gravedad para cargar los taladros desde el orificio del taladro, a través del brazo del transporte y un mango acoplado al final del mismo y que llega a la boca de taladro. Este procedimiento es utilizado en taladros secos.
- Sistema bombeable: La carga de los taladros se lleva a cabo desde el fondo hasta la altura de carga requerida. Este sistema se utiliza en taladros donde hay agua presente.

En ambos sistemas, los camiones fábrica están en capacidad de inyectar solución gasificante a la mezcla explosiva ver figura 05.

Figura 05

Camión fabrica en sistema bombeable



Fuente: Elaboración propia.

2.4.4 Carguío y Acarreo

2.4.4.1. Descripción

La carga de distribuido por los distintos lugares de minado es monitoreada en forma remota con Mine Sense (software que brinda información a los operadores como destino, densidad de tráfico, mapas en tiempo real).

Las zonas de carga se encuentran determinados de conformidad a la variedad de materiales a través de polígonos de min. Estos polígonos también forman parte del sistema de liberación de la mina.

El acarreo se da mediante camiones de gran tonelaje CAT 793F de 250tn de capacidad de carga como se visualiza en imagen figura 06.

Figura 06

Camión CAT 793F



Fuente: Elaboración propia.

2.4.4.2. Equipos empleados:

El carguío se realiza empleando 3 palas hidráulicas Hitachi Ex-5600 de 50 tn de capacidad de cucharón; así mismo como apoyo se usa un cargador frontal Caterpillar 994H de 19 m³ de suficiencia, que es común en el empleo de los stocks de mineral.

El acarreo se da mediante el uso de camiones Caterpillar 793F de 230 TN de capacidad (30 unidades) y de su equivalente el Hitachi – EH4000 de 220 TN (3 unidades). muestran ejemplos de distintas configuraciones de carguío, figura 07.

Figura 07

Hidráulicas Hitachi Ex-5600



Fuente: Elaboración propia

2.4.5 Servicios Auxiliares

2.4.5.1. Descripción

Los equipos de auxilio empleados en la Unidad Minera Constancia son para el desarrollo de la labor diaria en el área operativa de suma importancia, teniendo en cuenta que debido a condiciones climáticas adversas muchas veces se generan complicaciones que deben ser solucionadas con rapidez.

2.4.5.2. Equipos empleados

a) Rodillo

Son 2 rodillos CAT 76XT, cuya función principal es compactar las vías de acarreo u otras zonas, una vez estas estén debidamente lastradas, este trabajo ayuda para el cuidado de las llantas de los equipos de gran envergadura. (figura 08)

Figura 08

Rodillos CAT 76XT



Fuente. Elaboración propia.

b) Motoniveladora

Las motoniveladoras son imprescindibles para mantener las carreteras o vías en buen estado. Se cuenta con dos motoniveladoras Caterpillar 24M y una 16M (ver figura 09)

La cuchara rectangular que poseen permite remover el lodo o piedras que se encuentran en el camino; solucionan irregularidades del terreno en los frentes de minado y adicional a ello las uñas posteriores permiten en condiciones de clima adverso la escarificación de las vías para mejorar la tracción de los equipos que transiten por ellas.

Figura 09

Motoniveladoras Caterpillar 24M



Fuente: Elaboración propia

c) Cisterna para Agua

El tanque se encuentra montado sobre un camión Caterpillar 777D (ver figura 10). El uso de los mismos es básicamente en regado de vías para disminuir la polución o en casos de emergencia como por ejemplo algún incendio en las áreas a las que posee acceso.

Figura 10

Cisterna de Agua 777D



Fuente. Elaboración propia

d) Tractor de Ruedas

Es utilizado prácticamente para desempeñarse en el suelo haciendo función de sus lampas para juntar el material repartido para cargarlo; adicionalmente se usa en la preservación de las carreteras en circunstancias operativas, por facilitar el transporte de material a comparación de otros equipos como orugas. Teniendo disponibles de dos equipos CAT 824K - 854K (ver figura 11).

Figura 11

Tractor de ruedas CAT 824K



Fuente: Elaboración propia

e) Tractor de Orugas

Cumple similares funciones que los tractores de rueda; su mayor fuerza de trabajo permite emplearlo en zonas por ejemplo de alta pendiente, relieve accidentado o que presenten difícil acceso. Se cuenta con unidades CAT D10T- D8T - D6T (ver figura 12).

Figura 12

Tractor CAT - D10T



Fuente. Elaboración propia

f) Excavadoras

Empleadas en conformación de cunetas, pozos, perfilados de talud (ver figura 13), fracturación de bolonería mediante el uso de martillo hidráulico.

Figura 13

Excavadora CAT 336



Fuente. Elaboración propia

2.5. Plan de Producción

El estado actual de la planta concentradora es de 81,900 TPD (29.9 Mt anuales) y se requiere mantener el ritmo constante los próximos años. El centro minero tendrá una vida útil aproximadamente de 17 años, considerando el comienzo de la operación el año 2014.

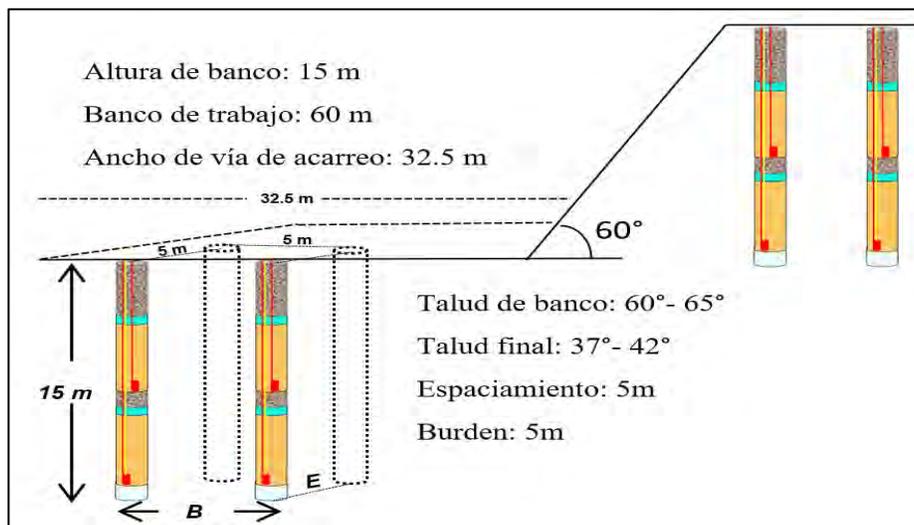
2.6. Parámetros de Diseño del tajo

S. M. Johnson, El diseño de mallas es un proceso fundamental en la minería de superficie, especialmente en operaciones de tajo abierto, el diseño de mallas de perforación para minas superficiales incluye a los que han desarrollado técnicas y software para optimizar la fragmentación de roca, la seguridad y la eficiencia del proceso, en el caso de mina constancia se puede ilustrar en la siguiente figura 14.

- Altura de banco: 15 m
- Banco de trabajo: 60 m
- Ancho de vía de acarreo: 32.5 m
- Talud de banco: 60°- 65°
- Talud final: 37°- 42°

Figura 14

Parámetros de diseño del tajo



Fuente: Propia - Enaex

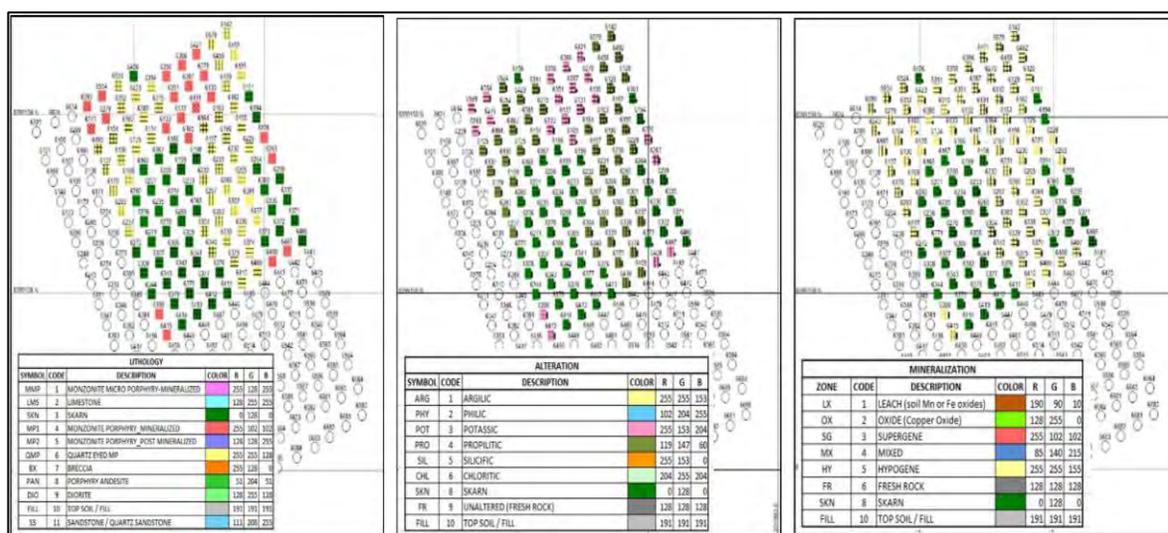
2.7. Modelos a considerar para diseños de perforación y voladura

2.7.1 Interpretación geológica

En la interpretación geológica identificamos el material que aflora en el proyecto de voladura. Esta información se consigue en las zonas liberadas que comparte el área de geología mina, es importante mencionar que no se deben cargar taladros que no hayan sido liberados. Actualmente la alteración propilítica es la alteración de mayor dureza, como se puede apreciar en la siguiente figura 15.

Figura 15

Litología, Alteración, Mineralización



Litología

Alteración

Mineralización

Fuente: Geología Mina - Hudbay

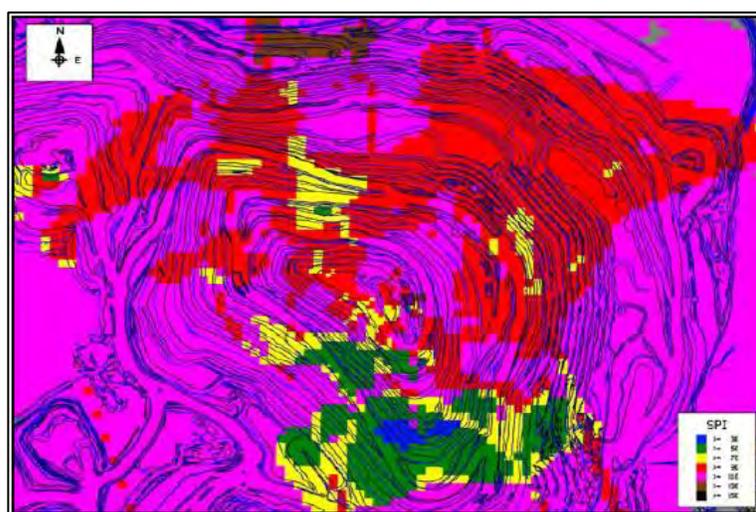
2.7.2 Modelo SPI

SAG Power Index, es el tiempo que necesita un material para ser de un tamaño estándar, se mide en una unidad de tiempo, en mina constancia se tiene un SPI de 140 minutos en el material más duro. Según el modelo de bloques se tiene indicadores desde 30 min. hasta 110 min. Aquí se tiene las tablas de diseño en mineral para el tajo Constanca y Pampacancha.

En estas tablas se consideran dos densidades de diseño, 2.5 gr/cc y 2.8 gr/cc para Constancia y Pampacancha respectivamente. Para el plano de diseño de contornea los bloques de influencia según los colores establecidos en la leyenda por tiempo SPI. Esta información es compartida por el área de perforación del modelo de corto plazo con se puede ver en la figura 16.

Figura 16

Modelo SPI Tajo Constancia – Banco 3990



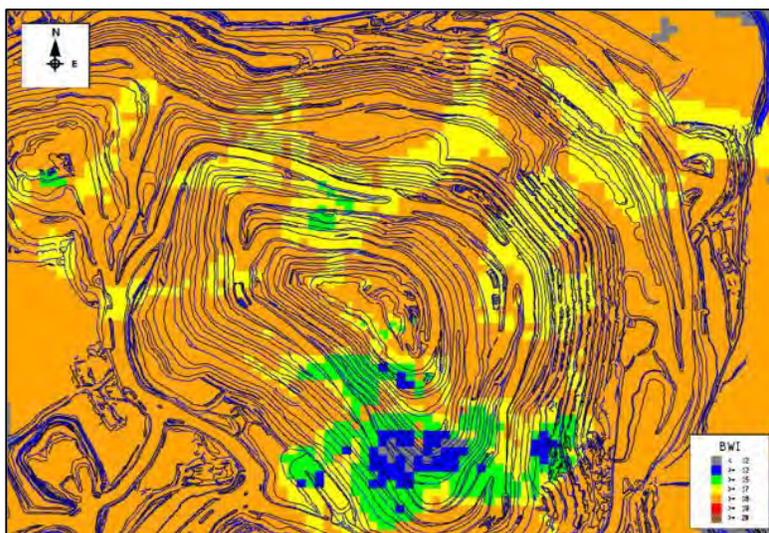
Fuente: Geología Mina - Hudbay

2.7.3 Modelo BWI

BWI (Bond Work index test), es la cantidad energía que necesita un material en el molino para llegar a pasar por la malla 100, se mide en Kilowatt hora por tonelada, en mina Constancia - Pampacancha tenemos un BWI de 20 Kilowatt hora como material más duro. Según el modelo de bloques se tiene indicadores desde 12 Kw-hr/tn hasta 20 Kw-hr/tn. Esta información es compartida por el área de perforación del modelo de corto plazo ver figura 17.

Figura 17

Modelo BWI Tajo Constancia – Banco 3990



Fuente: Geología Mina - Hudbay

2.7.4 Modelo de polígonos de resistencia

Los polígonos de resistencia indican la dureza de la roca expresada en mega Pascales (MPa), se tiene seis valores establecidos con una leyenda de colores, para el plano de carguío realizar la zonificación por color. Se utiliza la tabla de carga mostrada cuando el material a volar es desmonte según color. Esta información es compartida por el área de geotecnia mina.

2.7.5 Polígonos de minado del nivel superior

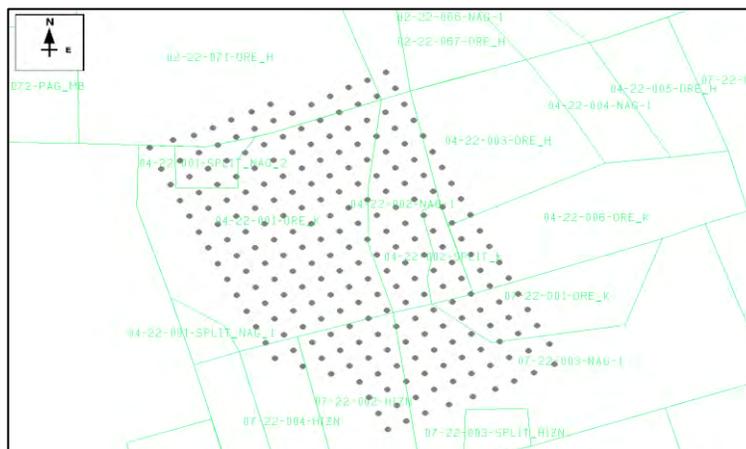
THROUGHPUT: Rendimiento de las líneas de los molinos SAG, se mide en toneladas por hora, el rendimiento promedio que se tiene en planta es de 2000 toneladas por hora por línea. Los polígonos de minado del banco superior muestran la información del rendimiento de las líneas que alimentan los molinos en planta. El throughput que se considera como valor y es el promedio de ambas líneas como muestra la figura 18 y tabla 02.

Existen otros valores que también se consideran, como es el BWI, SPI, % de finos, F80, FP, y número de muestras que se obtiene en el visualizador de datos PI VISION. Toda esta

información es obtenida del visualizador de datos de planta PI VISION en el computador asignado.

Figura 18

Polígonos del nivel superior



Fuente: Geología Mina - Hudbay

Tabla 02

Resultados de rendimiento del nivel superior

Polígono	Throughput tn/h	BWI kwh/tn	SPI t/tn	Finos %	F80 Pulg	FP kg/tn	Numero de muestras
07-22-001-ORE_K	1989.8	16.5	60.4	66.0	1.7	0.41	20

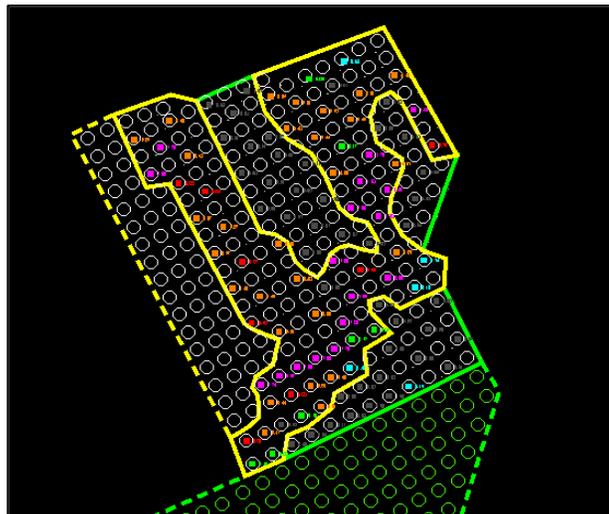
Fuente: Elaboración propia - Hudbay

2.7.6 Leyes de mineral y pre-polígonos

La delimitación de zonas de mineral y desmonte se rige por los polígonos de minado que son entregados por el área de geología mina. En casos especiales, se considera los Pre-polígonos que muestra la figura 19, que son una proyección del banco superior como límites de mineral y desmonte, cuando no se cuenta con la información de las leyes.

Figura 19

Polígonos en base a leyes de mineral



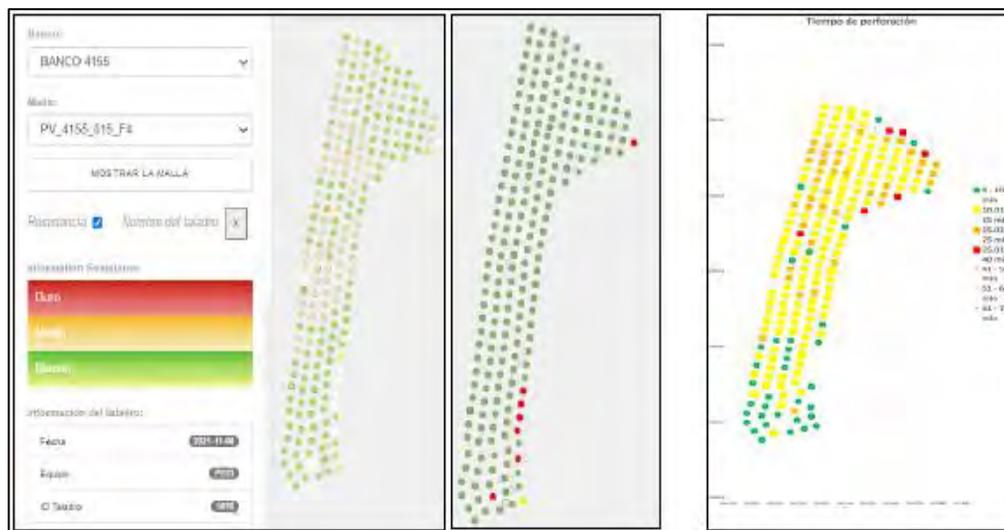
Fuente: Geología Mina - Hudbay

2.7.7 Tiempos de perforación

Los tiempos de perforación hacen referencia a las zonas donde la perforadora tuvo un mayor tiempo al momento de realizar el taladro hasta su altura de diseño. Esta información es obtenida del área de control mina a través del visualizador de información Report Sense Plus. Para tener mayor gama de tiempos, los datos se tratan en archivo Excel para disgregar en tiempos más cortos y ayude al análisis ver figura 20 y figura 21 de una foto panorámica del proyecto.

Figura 20

Tiempos de perforación – Report sense plus (RS PLUS) y Data procesada



Fuente: Perforación y voladura – Hudbay.

2.7.8 Otras consideraciones

- Fotografía panorámica con dron
- Considerar equipos cercanos como: Excavadoras, container, camiones, palas, etc
- Tener en cuenta zonas de contornos y levantamiento en campo
- Taladros con presencia de agua
- Zona de labores subterráneas o vacíos
- Evaluación de taladros de inicio de detonación

Figura 21

Equipos, estructuras cercanas y evaluación de accesos.



Fuente: Asistencia técnica - Enaex

2.8. Selección de explosivos

Dentro de la unidad minera Constancia se emplea distintas mezclas explosivas que van de una densidad menor a mayor de acuerdo a la composición química de cada producto.

Tabla 03

Densidad de carga lineal para distintos diámetros de perforación

Producto	Densidad (g/cc)	Densidad de carga lineal (kg/m)					
		7 7/8"	9"	9 7/8"	10 5/8"	11"	12 1/4"
ANFO	0.80	25.2	32.9	39.6	45.8	49.1	60.9
HA-28	0.97	30.5	39.8	48.0	55.5	59.5	73.8
HA37	1.07	33.6	43.9	52.9	61.2	65.6	81.4
HA-46	1.19	37.4	48.9	58.8	68.1	73.0	90.5
HA-55	1.28	40.2	52.6	63.3	73.3	78.5	97.4
HA-64	1.31	41.2	53.8	64.8	75.0	80.4	99.7
HA-73	1.32	41.5	54.2	65.3	75.6	81.0	100.4
Emulsión	1.34	42.1	55.0	66.3	76.7	82.2	101.9

Fuente. Elaboración propia - Enaex

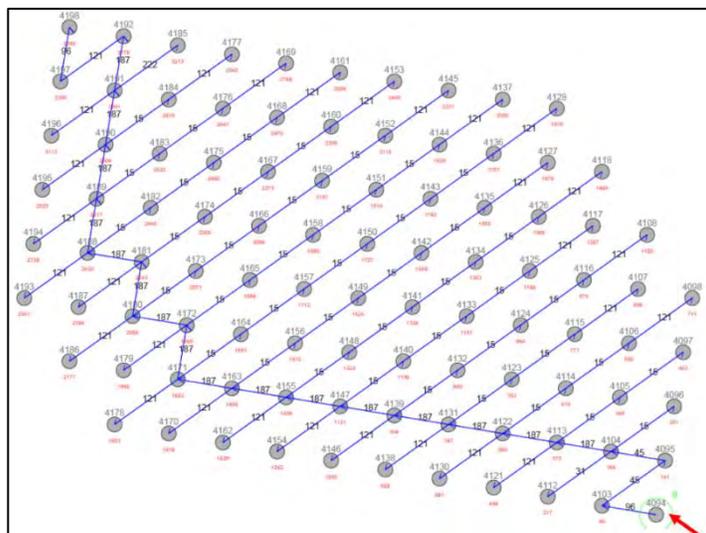
2.9. Diseño de secuencia

La iniciación de los proyectos de voladura se realiza con detonadores electrónicos en mineral y desmante ver figuras 22, 23 y 24.

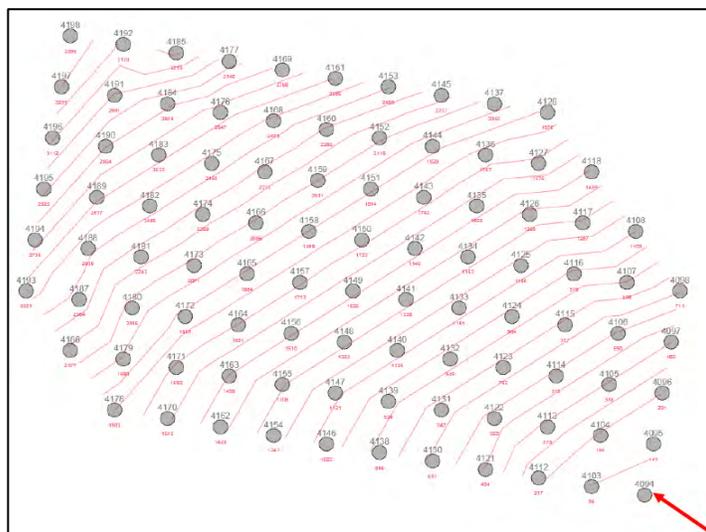
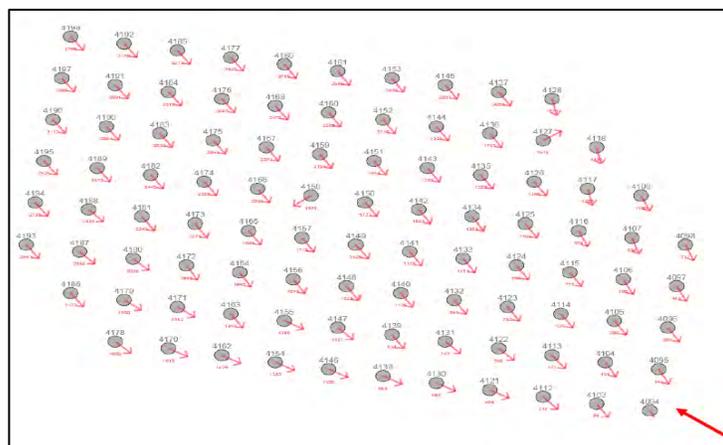
- La secuencia está en función a las condiciones aledañas al proyecto.
- Los tiempos de iniciación para Constancia son: entre filas y taladros.
- Las líneas de isotiempos muestran la interacción de tiempos por zonas y el direccionamiento del tren de ondas generado.
- El desplazamiento es mostrado por las líneas de desplazamiento.
- Todas estas simulaciones han sido realizadas en el software O-pitblast.
- El diseño completo es realizado por asistencia técnica Enaex.

Figura 22

Secuencia de salida de disparo.



Fuente: Asistencia técnica – Enaex

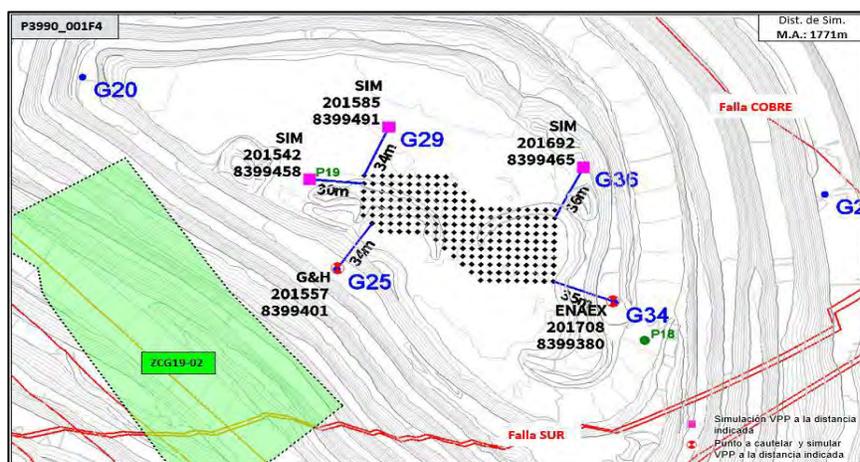
Figura 23*Líneas de isotiempo.**Fuente: Asistencia técnica – Enaex***Figura 24***Desplazamiento de material.**Fuente: Asistencia técnica – Enaex***2.10. Predicción de vibraciones**

En voladuras de tajo Constancia es esencial para minimizar el impacto en infraestructuras cercanas, evitar daños a equipos, garantizar la seguridad del personal y cumplir con normativas ambientales. Se basa en modelos empíricos y uso de software especializado que

relacionan la energía de la explosión, la distancia al punto de medición y las características geológicas del terreno ver figura 25 y tabla 04.

Figura 25

Simulación de vibraciones en Software Open-blast



Fuente: Geotecnia – Hudbay

Tabla 04

Simulación de VPP

Simulación de vibraciones					
Punto de Monitoreo	Distancia (m)	Carga (kg)	VPP Teórico (mm/s)	VPP Real (mm/s)	Coordenadas
Punto 1	35	640	81.9		E: 201708 N: 8399380 –ENAEX
Punto 2	34	640	82.12		E: 201557 N: 8399401 HBP
Punto 3	30	640	84.12		E: 201542 N: 8399458 SIM
Punto 4	34	640	82.12		E: 201585 N: 8399491 SIM
Punto 5	36	640	81.3		E: 201692 N: 8399465 SIM

Fuente: Elaboración propia

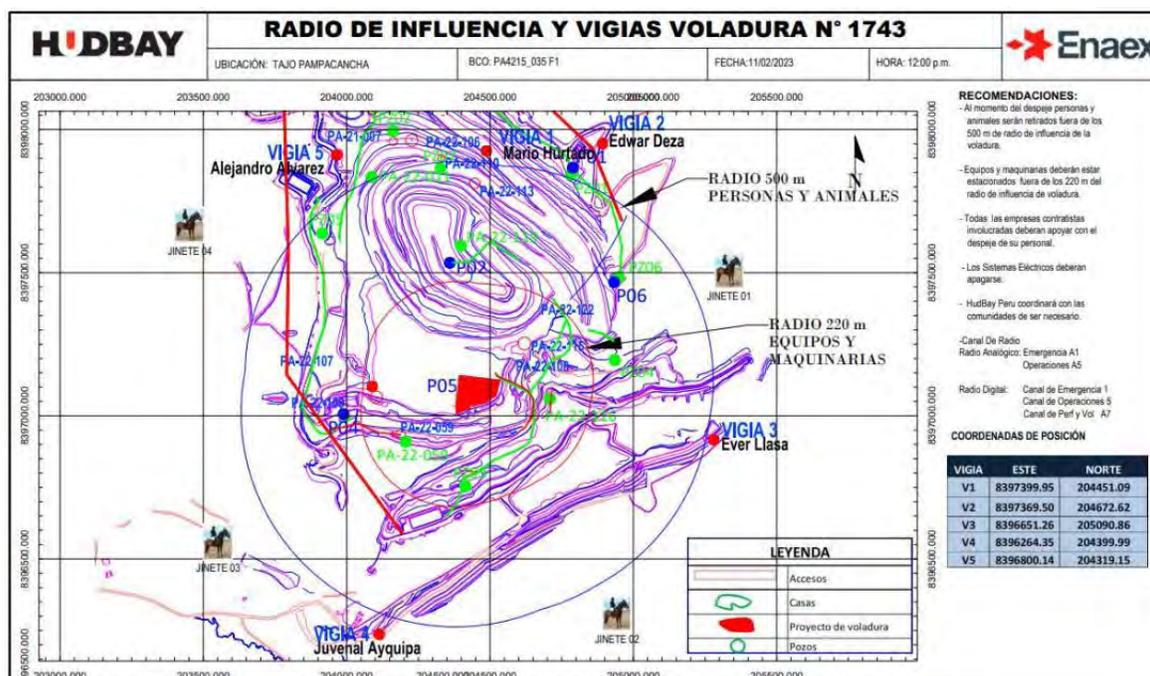
2.11. Radio de evacuación por voladura para personas y equipos

Durante este proceso minero de tajo abierto para realizar las perforaciones y voladuras, se debe tener en cuenta lo siguiente, según DS-024-2017-EM y su respectivo cambio al DS-023-2017-EM sub capítulo II, artículo 267: los trabajadores deben ser sacados lejos del campo detonado en un área segura de quinientos (500) metros. En cuanto al radio de evacuación para

equipos queda a responsabilidad de cada operación minera. Por ello se ha realizado estudios y análisis que puedan sustentas el radio de evacuación para equipos ver figura 26.

Figura 26

Radio de influencia para personas y equipos.



Fuente: Asistencia técnica - Enaex

2.12. Proceso operativo en campo

2.12.1 Medición de taladros y señalización

El Operario de piso verifica la condición del collar del taladro, despejar cualquier material (rocas u otro) que se encuentre obstaculizando o sea un peligro y daño a la línea descendente, se verifica la cantidad de los taladros y los parámetros de estos. Para la medición, descender la wincha junto a la pesa al fondo del taladro y proceder a medir la profundidad del taladro hasta el mismo collar (nivel del piso). Registrar en la estaca altura medida con sus respectivas observaciones (corto, tapado, con agua, húmedo, etc), otro operario de piso señaliza

la cresta y el contorno del proyecto a disparar con conos y cintas si es necesario, como también coloca los letreros obligatorios como se ve en la figura 27.

Figura 27

Señalización del proyecto de voladura.



Fuente: Elaboración propia

2.12.2 Primado de taladros.

Durante este proceso, el operario de piso introduce la cápsula de detonador electrónico a través del agujero central del booster, mientras que este último se inserta por uno de los orificios del cartucho. En condiciones críticas del taladro, si es necesario se añade una línea pirotécnica de respaldo. Posteriormente, el carrete del detonador se asegura al primador, dejando caer libremente el cable junto con el booster hasta alcanzar el fondo del taladro, asegurándose de que el booster quede a 0.50 m por encima del fondo. Para evitar que el detonador caiga completamente al fondo, el cable sobrante se sujeta a la estaca de identificación o se fija con una roca que asegure el carrete ver figura 28.

Figura 28

Primado y aseguramiento superficial el detonador electrónico.



Fuente: Elaboración propia

2.12.3 Carguío de taladro

En este proceso, el operario de piso o winchero espera la llegada del camión fábrica y da la señal para iniciar la preparación de la mezcla explosiva como se ve en la figura 29, según el diseño establecido por el asistente técnico. Durante la carga de los taladros, se debe respetar la altura del taco establecido tomando en consideración el tipo de mezcla a utilizar. Una vez finalizado el carguío, los taladros deben ser señalizados con espray de color verde aplicado sobre la estaca de identificación, indicando que se encuentran correctamente cargados.

Figura 29

Carguío de taladros sistema vaciable.



Fuente: Elaboración propia

2.12.4 Testeo y tapado de taladros

Durante este proceso el Supervisor de Voladura (Enaex 01) gestiona el material para el tapado de taladros con la supervisión de P&V Hudbay. Para taladros con agua se debe proporcionar material tipo gravilla de $\frac{1}{2}$ " a $\frac{3}{4}$ " de diámetro aproximadamente. Si el material no es el adecuado se comunica inmediatamente, debido que este influye directamente a los resultados de la voladura. Un Operario de piso se ubica al frente del equipo (minicargador o cargador de volteo) de acuerdo a la figura 30, desenrolla de la estaca, tensa la línea descendente, luego (de acuerdo a evaluación) lo cubre con el tubo de PVC y lo baja lo más posible sin exponerse a la maniobra del equipo, luego coloca la rejilla en la boca del taladro, mientras que el segundo operario de piso va realizando el mismo procedimiento en el siguiente taladro. Los operarios de piso deben mantener contacto visual con el Operador de Minicargador/Cargador de volteo, quien maniobra el equipo para el tapado del taladro (colocación de taco).

Figura 30

Testeo del detonador y tapado de taladros mecanizado.



Fuente: Elaboración propia

2.12.5 Amarre y detonación de taladros.

La programación de los detonadores electrónicos se realiza una vez completado el tapado de taladros. Es importante destacar que se realiza un testeo de los detonadores después del carguío de la mezcla explosiva y antes del tapado, con el fin de asegurar su correcto funcionamiento. Existen dos modos de programación disponibles: Modo Manual y Modo Automático Por cada proyecto de voladura se permite el uso de hasta ocho unidades de programación (PU) y se utiliza un solo DBD (Blast Driver) para ejecutar la detonación. El sistema permite disparar hasta 1500 detonadores por proyecto, en un tiempo máximo total de 20 segundos. Previamente, el diseño de voladura debe ser desarrollado en gabinete, donde se definen tanto la secuencia de programación como los tiempos de iniciación. Estos datos se plasman en los planos impresos del proyecto, los cuales se utilizan como guía para la programación en campo.

Una vez finalizada la programación, y tras verificar la conectividad y funcionamiento del sistema, el supervisor de voladura (V1) inicia la cuenta regresiva: “Se inicia el proceso de detonación en cuenta regresiva: 5, 4, 3, 2, 1... ¡DETONACIÓN!” Acto seguido, el programador de disparos procede con la ejecución del disparo, conforme a los parámetros previamente establecidos, ver figura 31.

Figura 31

Iniciación remota de voladura electrónica



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Metodología de la Investigación

3.1.1. Tipo de Investigación

La actual investigación es tipo descriptivo y del mismo modo aplicativo ya que se realiza la implementación de emulsión vertex en el carguío de los diferentes proyectos de prueba en tajo constancia y el uso de equipos de tecnología necesarios como PortaMetres y otros para determinar una fragmentación (P80) y % de finos adecuadas de las voladuras primarias planificadas. Hernández, S. (2014)

3.1.2. Diseño de Investigación

La existente investigación se basa en un enfoque cuantitativo-experimental. Es cuantitativo pues se sustenta de la recolección de datos directos del terreno, como la altura del

taco, las características de los taladros, y las densidades medidas tanto en campo como en laboratorio, las cuales se procesaron posteriormente en gabinete para su análisis. Es experimental porque tiene como objetivo establecer una relación de causa-efecto, evaluando el impacto del cambio a emulsión vertex en la mezcla explosiva según los indicadores obtenidos después de la voladura. **Hernández, S. (2014)**

3.1.3. Etapas de la Investigación

La investigación inicia con la recolección de datos directamente en lugar de los hechos. Entre los datos recopilados se incluyen: la longitud de taladro, la longitud del taco, densidad de los detonantes, tamaño de fragmentación (P80), porcentaje de finos, altura de esponjamiento del material volado, velocidad de detonación (VOD) y registros de vibraciones, entre demás datos. Las muestras consisten en los diferentes proyectos de voladura estudiados, permitiendo cotejar los resultados conseguidos con los indicadores establecidos por el cliente (parámetros de fragmentación y porcentaje de finos).

3.1.4. Unidad de Análisis

Proyectos de voladura en los cuales se implementó emulsión vertex. (Tajo Constancia – Fase IV)

- P3390-001F4
- P3390-002F4
- P3390-004F4

3.1.5. Variables Operativas y de Diseño

Variables Controlables de una voladura de rocas

- Diámetro de taladro
- Sobre perforación
- Ensanchamiento del taladro
- Ángulo de perforación

- Tipo de explosivo
- Taco
- Cámaras de aire
- Longitud de carga
- Esponjamiento de explosivo
- Inicio y secuencia de detonación

Variables no Controlables de una Voladura de Rocas

- Características del macizo rocoso
- Mecánica de rocas (Presencia de cráteres)
- Rumbo y buzamiento
- Presencia de agua
- Temperatura del taladro y del ambiente

Explosivos, accesorios y equipos de iniciación electrónica.

- Nitrato de amonio
- ANFO
- Diesel D2
- Emulsión gasificable (Vertex)
- Solución sensibilizante (L4)
- Booster (1 lb)
- Detonador electrónico.
- Detonador no electrónico.
- Cable M35.
- PU, DBD y DRB.

3.1.6. Indicadores de Voladura (KPI's)

- Factor de potencia
- Velocidad de detonación (VOD)
- Fragmentación – P80
- Porcentaje de finos.
- Presencia de humos
- Control de vibraciones

3.1.7. Población y Muestra

- a) Población: Tajo Constancia.
- b) Muestra: Los 3 proyectos del Tajo Constancia, en (Fase IV – 3990).

3.2. Técnicas e Instrumentos de Investigación

3.2.1. Técnicas de Recolección de Datos

Las principales técnicas que utilizaremos en la investigación son:

Trabajos de Campo y Gabinete:

- Uso de cámara PortaMetrics.
- Uso de Software Opit-Blast y otros.
- Equipos para medir nivel de vibración (sismógrafo).
- Equipo para medir % de humos naranja (escala de gases/medidor de gases).
- Equipo para medir V.O.D (Microtrap)
- Kit de densidades y otros.
- Bibliografía. (antecedentes)
- Observación simple y recojo de imágenes

3.2.2. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos

Se llevarán a cabo diversos procedimientos en campo para evaluar y garantizar la calidad de la emulsión Vertex y el desempeño general del proceso de voladura en el Tajo Constancia. Además, se compararán los siguientes parámetros clave con los datos recopilados en los equipos.

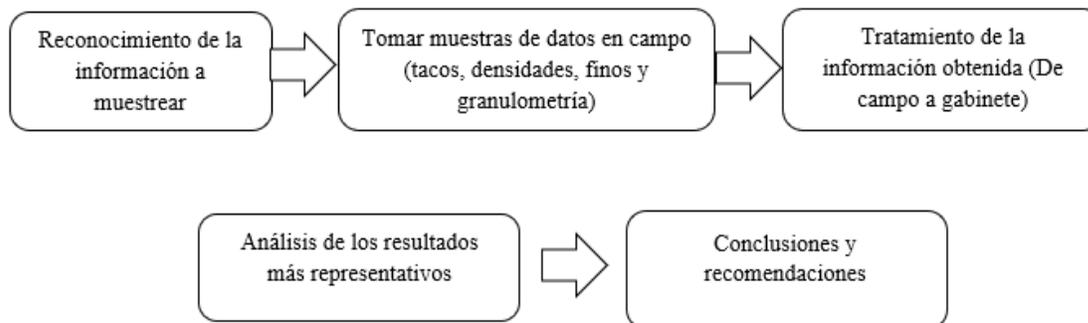
- Vibraciones.
- Humos naranjas.
- Velocidad de detonación (V.O.D.).
- Fragmentación (P80)
- Porcentaje de finos.
- Densidad del explosivo.

3.2.3. Ampliación de la Metodología

Se pudo realizar el estudio en tres proyectos poniendo en marcha la emulsión vertex en una mezcla explosiva HA73G, donde se hizo la aplicación de la emulsion energética, con el objetivo de hacer comparación y seleccionar el proyecto con su modelo de malla único el cual genera óptimos resultados para lograr los indicadores establecidos por el cliente. En la figura 32 se hace referencia a los métodos de implementación de la metodología utilizada.

Figura 32

Etapas de la aplicación de la metodología



Fuente: Elaboración propia.

3.2.4. Fuente de Información

Para esta investigación se utilizaron diversas fuentes de información que incluyen los reportes e informes generados y entregados al área de operaciones de la Mina Constancia antes, durante y después del proceso de voladura. Estos documentos son elaborados por el equipo responsable de garantizar el cumplimiento de los estándares operativos y de seguridad establecidos durante el proceso de voladura. Asimismo, se considera la información proporcionada por el contratista Chemtrade S.A.C, recopilada por mi persona en todo el proceso de pruebas.

3.2.5. Método de Medición

Para la obtención de datos recurrimos a la medición de nuestras variables independientes estableciendo parámetros de medición que, a través de una comparación con los recopilados en laboratorio y campo, con estos datos se logró determinar la excelencia de la voladura.

- Velocidad de detonación (VOD) m/s.
- Densidad del explosivo(g/cm³).
- Viscosidad (CP)
- Cálculo de temperatura (C°).

Cada uno de estos parámetros se desarrollaron a través de procedimientos específicos de medición que permitan lograr ensayos fiables y representativos. Luego se describe el procedimiento en el que se basó cada prueba, el equipo utilizado y otros recursos necesarios.

3.2.6. Densidad de la Emulsión

El proceso inicia con el seguimiento de la trazabilidad de la emulsión desde la planta hasta la mina. Posteriormente, se separan muestras para laboratorio, donde se evalúan

parámetros clave como viscosidad, utilizando un viscosímetro; temperatura, y densidad, garantizando así la calidad de la emulsión al llegar a la mina.

En campo, se toma una muestra directamente desde la manga de descarga en un vaso volumétrico. De manera instantánea, se limpia cualquier material residual fuera del depósito y se procede a pesar la muestra. En un periodo de 30 minutos, se controla el proceso descartando todo aquel material que rebase del vaso volumétrico debido a la gasificación y se realiza un nuevo pesaje. Además, la densidad debe medirse cada cinco minutos para calcular el proceso de esponjamiento.

Los siguientes, son materiales indispensables para llevar a cabo la medida y que son parte de un paquete necesario, que debe contener cada camión fábrica:

- Balanza.
- Vaso volumétrico de 1 litro.
- Espátula, termómetro, cronómetro y trapos para limpieza.

a) Cálculo de densidad para HA73G

La densidad de un explosivo es crucial, pues a mayor densidad, mayor energía concentrada en un espacio. Los valores de densidad varían según el tipo de explosivo; La densidad influye directamente en la capacidad de fragmentación del explosivo, siendo importante considerar también la humedad del terreno, ya que explosivos de baja densidad tienden a flotar en aguas con taladros.

$$D = \frac{M}{V} (g/cc)$$

D: Densidad

M: Masa (gr)

V: Volumen (cm²)

Remplazando en la formula:

$$D = \frac{M}{V} \left(\frac{g}{cc} \right) = \frac{1313gr}{1000cm^3} = 1.31gr/cm^3$$

3.2.7. Análisis granulométrico de muestras

Se ejecutó el estudio granulométrico de múltiples muestras post voladura durante el año 2024 haciendo uso del Heavy Anfo 73 gasificable para emulsion matriz.

3.3. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.3.1. Wincheo

Este procedimiento se realiza para determinar la altura real y taco del taladro, utiliza una cuerda o cabrestante que está conectado a una plomada en un extremado. Esto debe acercarse al nivel del collar del taladro en la superficie. Estas mediciones se registran a continuación para determinar la carga del explosivo. El proceso de wincheo del taladro se ve en la figura 33.

Figura 33

Wincheo de taco de los taladros



Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Toma y análisis de densidades

Se obtiene una muestra del explosivo en una taza metálica, se determina la masa utilizando una balanza digital y se tiene en cuenta la densidad correspondiente utilizando una tabla de equivalencias mientras se cargan los demás taladros con el camión fábrica. A continuación, se elimina el exceso del vaso metálico calibrado con una espátula mientras se esponja el explosivo y se calcula la nueva densidad (cada 5 minutos durante 30 minutos) para determinar las densidades inicial y final. La figura 34 y 35 muestra el método para evaluar la densidad de la mezcla explosiva en gabinete y en campo para emulsión vertex.

Figura 34

Control de calidad en laboratorio para emulsión vertex.



Fuente: Elaboración propia

Figura 35

Análisis de densidad de mezcla explosiva HA73G de emulsión vertex.



Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Medición de Velocidad de Detonación (VOD)

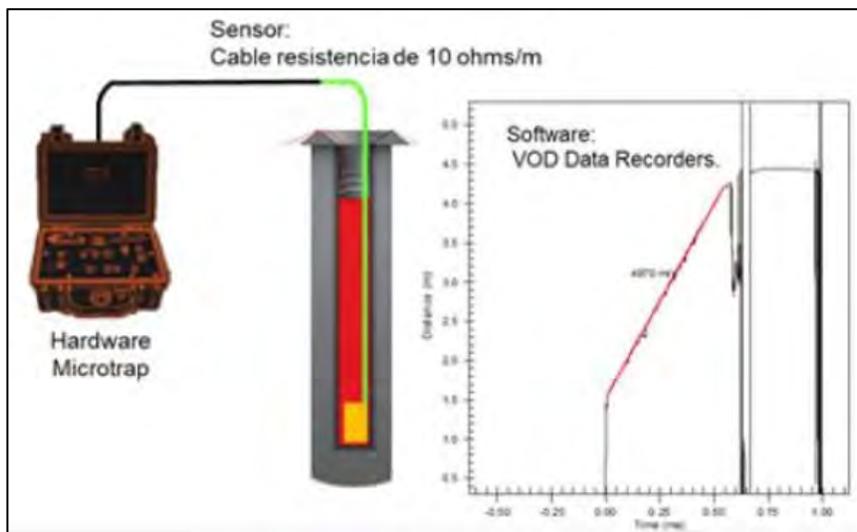
La velocidad de detonación (VOD) de la mezcla explosiva en los pozos de producción se midió utilizando un equipo MicroTrap. El fundamento de esta técnica es el registro de la solidez eléctrica de un circuito cuando la detonación emplea un hilo resistente.

Para ello, se instala un cable de resistencia continua, cuya resistencia continua conocida es de 10,8 ohm/m, desde el booster o iniciador hasta el límite máximo de la columna de carga explosiva. El frente de detonación, al propagarse a lo largo del explosivo, va consumiendo el cable y modificando su resistencia, lo cual permite al equipo MicroTrap calcular la velocidad de detonación con alta precisión como se muestra en la figura 36.

La rapidez de detonación de un explosivo se cuantifica en metros por segundo.

Figura 36

Diagrama de instalación correcta de un medidor VOD.



Fuente: Revista científica ciencia y desarrollo UAP.

3.3.4. Instalación de equipo Sismógrafo

La correcta instalación de un sismógrafo es fundamental para registrar con precisión las vibraciones generadas por una voladura. Este procedimiento se realiza conforme a los protocolos de control ambiental y seguridad operativa. A continuación, se describen los pasos esenciales como se muestra en la figura 37:

a) Selección del punto de monitoreo

- Elegir una ubicación representativa y segura, preferentemente en la dirección de las estructuras sensibles (taludes, zonas críticas, campamentos, chancadoras, zonas pobladas).
- La distancia desde el punto de voladura debe registrarse con precisión (usualmente con GPS).

b) Preparación del terreno

- Nivelar el terreno donde se colocará el sensor (geófono), asegurando que esté firmemente asentado sobre una superficie dura o ligeramente excavada.
- De ser necesario, se puede enterrar parcialmente el geófono o fijarlo con estacas para evitar movimientos.

c) Orientación y configuración del sismógrafo

- El sensor debe alinearse según las instrucciones del fabricante (ejes X, Y, Z correctamente orientados).
- Configurar el equipo con los parámetros adecuados: sensibilidad, frecuencia de muestreo, umbral de activación, duración del registro.
- Verificar la calibración del equipo.

d) Prueba previa y sincronización

- Realizar una verificación previa (pre-blast check) para asegurar que el equipo está correctamente instalado, sincronizado y listo para registrar.
- Algunos sismógrafos modernos incluyen sincronización GPS para precisión temporal y comparación con otros equipos.

e) Registro y recolección de datos

- Durante la voladura, el sismógrafo capturará las componentes vertical, longitudinal y transversal de la onda sísmica.
- Finalizada la voladura, se descargan los datos y se genera un reporte que incluye:
 - Velocidad pico partícula (PPV)
 - Frecuencia dominante
 - Tiempo de ocurrencia
 - Forma de onda

Figura 37

Instalación correcta del sismógrafo



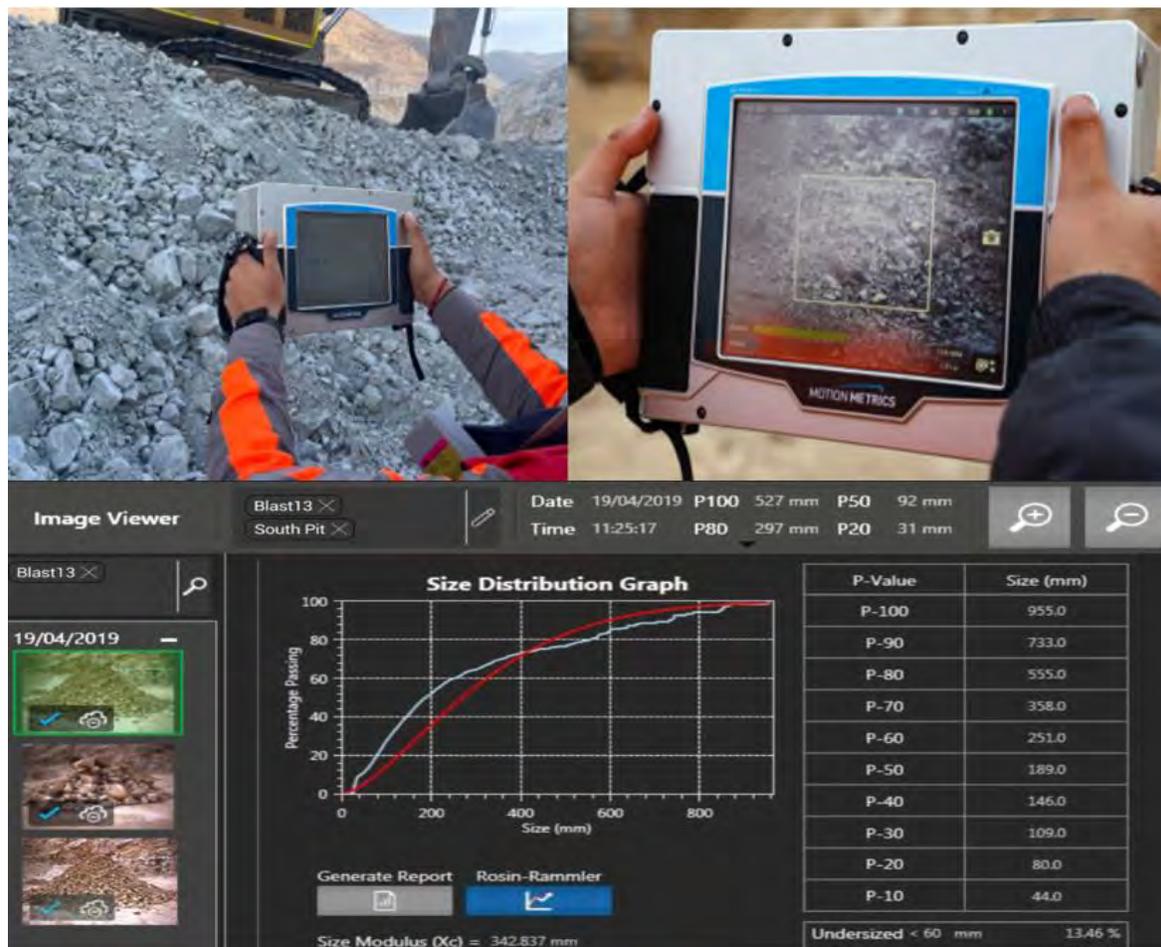
Fuente: Elaboración propia

3.3.5. Toma de Muestras o Fotografías con Equipo PortaMetrics

Una alternativa para analizar los resultados de la fragmentación por voladura consiste en una herramienta práctica y segura que permite medir el tamaño de las partículas en el frente de minado. Basta con tomar fotografías desde una distancia segura, y el dispositivo se encargará automáticamente de procesarlas. Una vez ubicada en un frente de minado de una de las Palas se recoge muestras fotografías aprovechando el cambio de turno o guardia en donde se procede a realizar las fotos necesarias para tener un promedio más certero del tamaño de la fragmentación como se puede ver en la figura 38, culminada de realizar fotos el equipo PortaMetrics procesa las fotos para posterior realizar la descarga o subida de las fotos procesadas en la nube (OneDrive) para su posterior análisis de los resultados en gabinete.

Figura 38

Gráfico de distribución de tallas en frente de minado



Fuente: Elaboración propia – Enaex

3.4. Ámbito de estudio

3.4.1 Ubicación

La base minera de Constanca se encuentra en los distritos de Chamaca, Velille y Livitaca, ubicados en la provincia de Chumbivilcas del departamento de Cusco, en la región meridional de los Andes peruanos. Está situado entre 3.400 y 4.800 metros por encima del nivel del mar, cerca de 643 kilómetros al sureste de Lima y a 110 kilómetros al sur de Cusco (medidas en línea recta).

Geográficamente, la UM Constanca se ubica en las coordenadas del punto céntrico de referencia (Coordenadas UTM 200 634 E - 8 400 308 N (Datum WGS 84, Zona 19 S).

Figura 39

Plano N° 01 Ubicación de la unidad minera constancia



Fuente. Superintendencia de Geología U.M. Constanza

3.4.2 Accesibilidad

Se puede llegar de dos formas al Centro Minero Constancia. La primera es por carretera, que recorre 362 kilómetros desde la ciudad de Arequipa hasta Imata, Yauri y la Unidad Minera Constancia, con una ruta de 308 kilómetros. La segunda, pasa por las carreteras de Cusco, Sicuani y Yauri para continuar por Velille y Santo Tomás antes de desviarse a Livitaca y, por último, a la Unidad Minera Constancia, ver tabla 05.

La viabilidad por carretera hacia la U.M. empieza desde Arequipa con un aproximado de (7,5 horas) o Cusco (6,5 horas).

Tabla 05

Accesibilidad a Unidad Minera Constancia

TRAMO	DISTANCIA (KM)	CLASIFICACIÓN DE LA VÍA	TIEMPO APROX. (H)
Arequipa – Imata – Yauri – UM Constancia	362	Carretera afirmada / Carretera sin asfalto	7,5
Cusco – Sicuani – Yauri – UM Constancia	308	Carretera afirmada / Carretera sin asfalto	6,5

Fuente. Elaboración propia

3.4.3 Clima y Recursos

Clima

Para presentar las características climáticas del área del proyecto se tomó en cuenta todos aquellos datos registrados de la estación meteorológica Norsemont Constancia, situada al norte del proyecto a una elevación de 4 274 m.s.n.m. y cuyas coordenadas son 200 634 E - 8 400 308 N, así como de las estaciones SENAMHI cercanas. Las siguientes conclusiones se basan en los registros de los parámetros climatológicos:

Temperatura del Aire

Con una temperatura media anual de 6,2°C y sin variación anual perceptible, la temperatura media mensual oscila entre 4,9°C y 7,4°C. La estación meteorológica de Yauri registra una temperatura máxima de 18,9°C de media diaria, 20,9°C en Acomayo y 12,3°C en Imata. En cuanto a la temperatura mínima, la temperatura media diaria en Imata es de -6,8°C, Yauri es de -3,5°C y en Acomayo es de 5,3°C.

Los meses con más presencia de frío son en invierno, los que van de mayo hasta setiembre, por otro lado, los más cálidos son los meses de noviembre a enero, en temporada de verano.

Humedad relativa

Durante la estación húmeda (de octubre a abril), los valores medios oscilan entre el 53,3% y el 74,7%, mientras que durante la estación seca (de mayo a septiembre), los valores medios oscilan entre el 38,3% y el 51,7%.

El valor de humedad promedio a lo largo del periodo de registro es de 57,3%.

Evaporación

Los meses con los menores niveles de evaporación son junio y julio con valores menores a 110mm.

Precipitación

Las precipitaciones mínimas y máximas anuales se calcularon en 485 y 1 887 mm, respectivamente, mientras que la precipitación media anual se previó en unos 1.172mm. Se predijo que la precipitación media sería de 1.078 mm durante la estación húmeda (de octubre a abril) y de 94 mm durante la estación seca (de mayo a septiembre). La precipitación mensual

más alta en un siglo fue de 772 mm (enero), y la precipitación anual más alta en un siglo se calculó en 2.270mm.

Velocidad y dirección del Viento

De acuerdo con la información proporcionada por la estación de Constancia, la media anual de velocidad del viento es de 3,1 m/s, con los niveles de velocidad más altos en julio a diciembre y los más bajos en enero a mayo.

Radiación Solar

Los datos de la estación de Constancia indican que la elevación de radiación oscila entre 2 317,8 Wh/m² y 3 616,0 Wh/m², que es producido por la latitud, la nubosidad y la altitud de la estación.

Hidrografía y Drenaje

La subcuenca del río Chilloroya, afluente del río Velille, afluente del río Apurímac y que forma la vertiente atlántica, es donde se ubica la zona de Modificación del Proyecto de Exploración Constancia.

A 4,925 msnm, el río Chilloroya nace en el límite de la quebrada Casanuma y la quebrada Huayllachane entre sus microcuencas. La subcuenca tiene una pendiente promedio de 21,17%, un área de drenaje de 317,84 km² y una orientación noroeste. Numerosos afluentes alimentan su cauce principal, el cual tiene una longitud de 47,69 km y una inclinación promedio de 3,3%. Las más importantes quebradas son Casanuma, Huayllachane, marcapata y Sacrane.

Las microcuencas que están dentro de la zona de impacto directo e indirecto del proyecto de exploración son las microcuencas de las quebradas: Huayllachane, Pincullune-Conormarca, Sacrane y la Casanuma.

3.4.4 *Flora y Fauna*

Se identificaron 34 familias botánicas con 121 especies de plantas en los dos periodos de evaluación (seco y húmedo).

Los registros muestran que existen 1 especie suculenta, 6 especies arbustivas, 9 especies su arbustivas y 105 especies herbáceas, según el patrón de crecimiento de cada especie. Se comprobó que la extensión de la zona de exploración efectiva estaba cubierta por tres formaciones vegetales. Las formaciones conocidas como «pajonal» y «pasto puna» exhibieron la mayor proporción en la distribución de especies del área de investigación.

La siguiente lista incluye estas formaciones vegetales:

- La pradera/humedal es extremadamente húmeda.
- Pastizal de puna.
- Pedregal + Matorral/Pajonal = roquedal.
- Matorral / pajonal + césped de puna.
- Pajonal.
- Pajonal, Pedregal y Roquedal.
- Pedregal Roquedal.
- Pasto de puna o pajonal.

En cuanto a la fauna, se identificaron diferentes especies como: 22 mamíferos de 4 y 11 grupos taxonómicos.

Con 14 especies (63%), el orden con mayor riqueza de especies fue Rodentia. Con once especies, la familia Cricetidae fue la más representativa de este orden. Mediante observaciones directas se documentaron tanto individuos solitarios como grupos de algunas especies medianas

y grandes, entre ellas la vizcacha (*Lagidium peruanum*), la taruca (*Hippocamelus antisensis*) y el zorro andino (*Lycalopex culpaeus*).

Con hasta 39 especies registradas en el área de hábitat del río Chilloroya afecta significativamente a la abundancia percibida y sirve de gran atractivo para la avifauna local. Entre estas especies se encuentran el “águila cuello blanco”, *Buteo albigula*, el “playero pectoral” *Calidris melanotos*, la “golondrina andina” *Orochelidon andecola*, y el “gavilán cenizo” *Circus cinereus*. Cabe mencionar que, debido al hábitat proporcionado por el río, estas especies sólo se observaron en este lado del área de investigación.

3.5. Entorno geológico

3.5.1 Tipo de Yacimiento

Antes de enero de 2009, se utilizaron 317 sondeos de perforación diamantina para examinar el pórfido de cobre de Constancia, algunos de los cuales alcanzaron profundidades de más de 600 metros y un máximo de 675,80 metros (CO-08-133). La mayor parte de la mineralización, que en su mayor parte está conectada al «Micro Pórfido Monzonítico 1 (MP1)», adopta la forma de rellenos de diaclasas de sulfuros, depósitos grietales de vetas de cuarzo y diseminaciones. MP1 presenta una importante alteración potásica o cuarzo-sericita.

Dentro del pórfido de monzonita, la mineralización de cobre está más desarrollada en la porción del centro de este yacimiento y está abierta por debajo de los 3800 msnm (por ejemplo, CO-06-083, CO-07-105, CO-08-233, CO-08-278 y CO-08-288).

Prácticamente no se forman nuevos sulfatos en la superficie debido a la extrema oxidación y lixiviación. Se puede encontrar una capa lixiviada en rocas con un fuerte crecimiento fisural del yacimiento o a profundidades inestables, de hasta un máximo de 100 m cuando la diaclasación está más severa.

En el skarn de magnetita y alrededor de los bordes de la prospección, la oxidación disminuye hasta alcanzar una profundidad de algunas decenas de metros. Después de la calcosina supergénica, los fundamentales minerales de óxido de hierro son la jarosita y, con trazas de hematites. Desde el punto de vista geoquímico, las leyes normales de cobre en la capa lixiviada se sitúan entre 100 y 200 ppm, valores bastante inusuales. En general, los datos de molibdeno y oro de la capa lixiviada se asemejan a los de los grados hipogénicos.

La zona de la falla de Barita divide la zona de San José del yacimiento de Constancia, situado a 350 metros al oeste-noroeste de su límite occidental. En la región se terminaron 60 perforaciones, muchas de ellas para determinar la profundidad y amplitud de la mineralización. Se conectan 2 fallas por la región por del este (la falla de San José) y del oeste parecen ser los principales reguladores. Aunque estas dos fallas tienden a ir de norte a sur, podrían combinarse en la región de Yanaccaca.

La mayor parte de la mineralización de esta región está asociada a ensamblajes de modelo hipógeno, con mineralización de skarn posterior.

Geología Regional

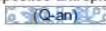
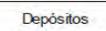
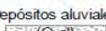
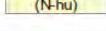
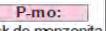
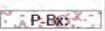
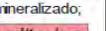
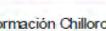
3.5.2 Geología Regional

El cuadrángulo de Livitaca (Hoja 29-s del Mapa Geológico Nacional) contiene el área del Proyecto. Está constituido por varias unidades litológicas estructurales cuya edad oscila entre el Cuaternario Reciente y el Cretácico. Las rocas más antiguas son del Cretácico Inferior del Grupo Murco, compuesta por una serie de areniscas de tamaño medio con intercalaciones de lutitas rojizas de tonalidades gris, blanco, violeta y rojo. Encima de la Formación Chilloroya, se encuentra de manera discordante la Formación Arcurquina. Los minerales principales del

batolito de Andahuaylas-Yauri son la plagioclasa, ortoclasa, feldespato, cuarzo, hornblenda, biotita, apatita, circón y esfena. Esta composición varía de diorítica a granodiorítica. Es muy probable que el batolito esté conectado a las vetas y lentes del enorme skarn de magnetita. Hay diques, laccolitos e intrusiones de roca ígnea monzonítica que atraviesan las formaciones geológicas. Algunas intrusiones de roca ígnea presentan rasgos comunes a los yacimientos de cobre porfídico, que se muestra en la siguiente figura 40:

Figura 40

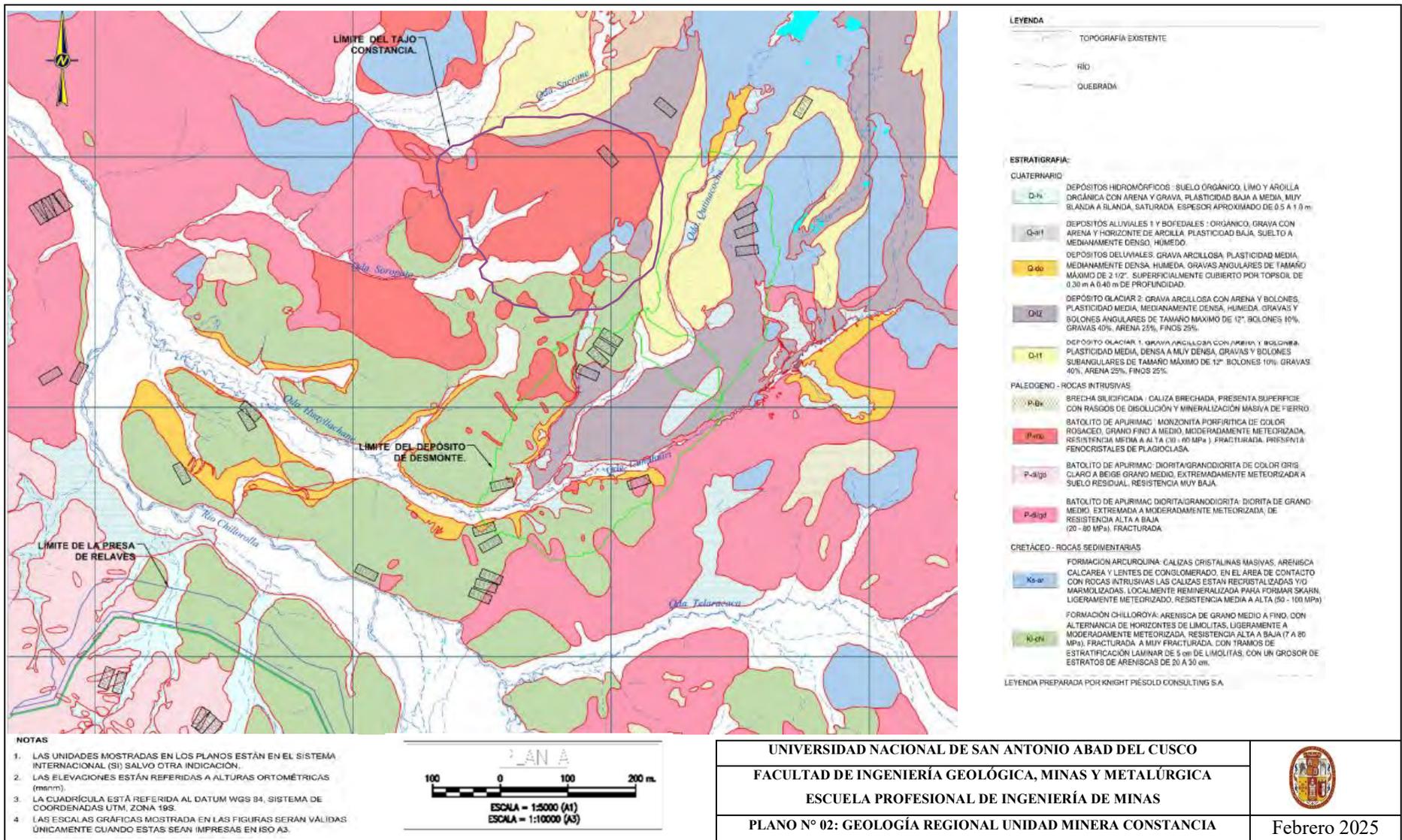
Columna Estratigráfica Local U.M. Constancia

Era	Sistema	Serie	Unidad Litoestratigráfica	Descripción	Rocas intrusivas	Alteración
Cenozoico	Cuaternario	Pleistoceno/ Holoceno	Depósitos antrópicos  (Q-an)	Depósitos generados por antiguas actividades mineras sin control ambiental.		
			Depósitos hidromórficos  (Q-hi)	Limos y arcillas orgánicos altamente compresibles, saturados, con traza de grava, ubicados en planicies de baja pendiente.		
			Depósitos aluviales  (Q-al)	Grava arenosa con bloques y cantos esporádicos, subredondeados, al Sur del río Chilroya.		
			Depósitos fluvio-glaciares  (Q-fg)	Grava arenosa con poco limo, cantos y bloques esporádicos, subredondeados, compactos a densos, forman terrazas en algunas quebradas.		
			Depósitos morrénicos  (Q-mo)	Grava arcillosa con arena, firme a dura, forma lomas alargadas y onduladas.		
	Neógeno	Plioceno	Formación Huaycha  (N-hu)	Intercalación de tobas dacíticas a riodalíticas con derrames lávicos de composición andesítica, poco fracturados..		
			Formación Alpabamba  (N-al)	Tobas andesíticas a dacíticas, gris claro a blanco amarillento, frescas y poco fracturadas.		
		Mioceno	Formación Orcopampa  (N-or)	Aglomerados y tobas de composición dacítica, blanquecinos, fuertemente fracturados y con alteración hidrotermal.	Batolito Andahuaylas – Yauri  P.mo: stock de monzonita mineralizado;	 P-Bx: Brecha silicificada compuesta por caliza brechada, presenta superficie con rasgos de disolución y mineralización masiva de hierro.
	Paleógeno	Eoceno/ Oligoceno	Discordancia angular		 P-gd/ton/mz: granodiorita, tonalita, monzonita y diorita	
			Mesozoico	Cretáceo	Superior	
Inferior	Formación Chilroya  (Ks-ch)	Secuencia de areniscas, areniscas cuarzosas y limolitas en estratos delgados a medios, forman pliegues amplios.				

Fuente. Superintendencia de Geología U.M. Constancia

Figura 41

Geología de la U.M constancia



Fuente. Superintendencia de Geología U.M. Constanza

3.5.3 Geología Local

La extensión del proyecto sobre los cuerpos intrusivos paleógenos que comprende monzonita, diorita y monzodiorita, pertenecientes al batolito de Apurímac, la cual se emplazó en las secuencias sedimentarias de la Formación Chilloroya perteneciente al Grupo Murco y la Formación Arcurquina. A continuación, se describen estas formaciones:

Areniscas, limolitas y calizas de las formaciones Chilloroya y Arcurquina componen el paquete sedimentario.

Formación Chilloroya (Ki-chi)

Al suroeste y sur de la región de estudio se encuentra la Formación Chilloroya. Está formada por estratos de fangolitas, limolitas y areniscas y muestra las rocas de mayor antigüedad de la región. Gris claro y marrón, grano fino a medio, bastante meteorizadas, resistencia media a baja y rotas con rellenos de óxidos duros (hematites) son las características de las areniscas. Las lodolitas y limolitas se encuentran en un porcentaje reducido, están moderadamente meteorizadas y presentan resistencia baja a muy baja.

Formación Arcurquina (Ks-ar)

La porción sureste de la región de estudio también alberga la Formación Arcurquina, que se compone de estratos calizos cristalinos de color gris claro, muy resistentes, que están localmente marmolizados y/o recristalizados en capas de 0,20 metros cuando entran en contacto con la roca intrusiva. Estas formaciones dieron pie a las unidades geológicas descritas a continuación.

a) Material de Cobertura

Los depósitos superficiales recientes, consistentes en depósitos morrénicos, aluviales y coluviales, se encuentran dispersos por toda la vasta llanura de terrazas cuaternarias y varían en pendiente desde suavemente inclinadas a escarpadas. Entre ellos, destacamos:

Alteración Depósitos Glaciares / Till glaciario (Q-t)

Estos depósitos se crearon como morrenas laterales y están situados al este y al norte de la región de investigación. En zonas fuertemente compactadas de hasta 40 metros de espesor, estos depósitos están formados por gravas arenosas con guijarros y cantos rodados en una matriz arcillosa limosa fina que tiene una flexibilidad de media a alta.

Mineralización Depósitos Coluviales (Q-co)

Estos depósitos se caracterizan por presentar fragmentos angulares a subangulares, de diversos tamaños, que provienen de intrusivos, sedimentos sueltos y permeables. Los materiales coluviales son de hasta 3 m de espesor según se observa en cortes de caminos y trincheras.

Depósitos Coluviales (Q-co)

El depósito mencionado se caracteriza por presentar fragmentos angulares a subangulares, de diversos tamaños, que provienen de intrusivos, sedimentos sueltos y permeables. Los materiales coluviales son de hasta 3 m de espesor según se observa en cortes de caminos y trincheras.

Depósitos Aluviales y/o Material Saturado (Q-bo)

El depósito mencionado se encuentra en los fondos de las quebradas y a lo largo de la parte inferior de las laderas, está compuesta de fragmentos subredondeados a subangulares, de compactación media y generalmente es de color gris.

Diorita (Dio)

Esta roca intrusiva se encuentra en el Oeste y Suroeste del área de estudio. Se observa meteorización ligera en la superficie, está fracturada a altamente fracturada, con tamaños de granos que varían de microcristalino a medio, color gris a gris claro y presenta una resistencia alta a muy alta.

Monzonita Porfirítica (MP1)

Esta roca representa la mayoría de la mineralización de importancia económica de la región analizada. La monzonita porfídica presenta un tono de blanco a gris claro, con un grano de medio a fino y una textura similar a la de una pera. En ciertas zonas, se observan cristales de hornablenda de hasta 5 mm de tamaño, con modificación hidrotermal a cuarzo-alunita, sílice y modificación argílica, con meteorización de ligera a moderada, fracturación de moderada a severa y de resistencia media.

Fallas Micromonzonita Porfirítica (MMP)

Esta roca se encuentra en las áreas suroeste y noroeste del área de estudio. Además, se halla en el yacimiento Constancia, dentro de las monzonitas porfiríticas, en forma de diques y estructuras orientadas en el noreste-suroeste. La micromonzonita porfirítica se compone principalmente de microcristales de plagioclasa de forma porfirítica; presenta meteorización superficial de ligera a moderada, se encuentra cloritizada a argilizada, fracturada y presenta un color blanco.

Monzonita Cuarcifera Porfirítica (QMP)

Estos brotes, individuales y dispersos, se manifiestan en forma de diques y cuerpos en el área de estudio. Se compone de plagioclasa de grano medio y cuarzo con una textura de tipo porfirítico. La superficie muestra meteorización de moderada a ligera, presenta fracturas y en

algunos puntos muy fracturadas, y suele ser de un tono beige a gris claro blanquecino, con señales de oxidación y cambios hidrotermales.

Monzonita Porfirítica 2 (MP2)

Esta roca se expone en forma de diques y cuerpos alargados, con un alineamiento de norte a noreste que cruza los afloramientos de monzonita porfirítica 1 y micromonzonita porfirítica. Está compuesta por minerales de feldespato de grano medio a fino con textura porfirítica.

Skarn (Sk)

Se encuentra en los terrenos de sur y sureste del área de estudio, donde afloran calizas y areniscas, existe una franja un tanto continua de skarn como resultado del metamorfismo de contacto entre la roca intrusiva con las calizas y las areniscas. Se caracteriza por una coloración marrón anaranjada y rojiza debido a la oxidación y alteración sílica.

a) Skarn de Calizas

presenta pequeños diques con fragmentos de sílice angular emplazados en una matriz fina.

b) Skarn de Areniscas

se caracteriza por presentar textura de grano gruesa, además de presentar minerales entre los cuales destacan; el granate, epidota calcopirita, magnetita, galena y esfalerita.

Brecha Silicificada (Bx-sil)

La Bx-sil se presenta en el área de estudio como franjas o lentes alargados, formando afloramientos en forma de acantilados. El mismo consta de fragmentos de sílice angular encerrados en una matriz fina, ligeramente meteorizada.

3.5.4 *Geología Estructural*

Se definieron dos dominios estructurales (I y II), principalmente en base a las fallas identificadas en el mapeo de la superficie y los programas de perforación del subsuelo.

- **Dominio I – Zona ligeramente fallada:** Este dominio está identificado en las áreas norte y sureste del yacimiento Constancia y en sectores al sur del yacimiento. El basamento rocoso en este dominio muestra sólo deformación estructural moderada, con presencia de algunas fallas. Los afloramientos en este dominio son ininterrumpidos por zonas de fractura y aparecen masivos; sin embargo, se observaron abundantes vetas delgadas con alteración hidrotermal de cuarzo-alunita.
- **Dominio II – Zona fuertemente fallada:** Este dominio se ubica principalmente en los sectores sur y oeste del yacimiento Constancia. Las estructuras dentro de este dominio están frecuentemente alineadas con pequeñas quebradas, donde se han desarrollado turbas y humedales. El basamento rocoso en este dominio es muy fragmentado y estructuralmente deformado, con fallas dominantes y zonas de corte con brecha común y panizo de falla. Las zonas de falla están rellenas principalmente con brecha, mientras que algunas zonas de falla contienen panizo. En general, las zonas intensamente fracturadas están asociadas con las direcciones de las fallas y las intersecciones de las mismas.

Las orientaciones de los sistemas de fallas en cada dominio estructural. La tabla 06 presenta un resumen de los conjuntos de fallas primarias para cada dominio estructural.

Tabla 06*Principales Conjuntos de Fallas para Cada Dominio Estructural*

Dominio Estructural	Buzamiento/Dirección de Buzamiento	Orientada, Buzamiento / Dirección de Buzamiento
I	F1: 60° / 270°	F1: 85° / 276°
	F2: 66° / 162°	F2: 54° / 196°
	F3: 75° / 313°	F3: 89° / 164°
	F4: 60° / 59°	F4: 40° / 22°
II	F1: 53° / 270°	F1: 42° / 252°
	F2: 81° / 142°	F2: 58° / 134°
	F3: 70° / 18°	F3: 56° / 320°
	F4: 71° / 62°	F4: 79° / 69°

Fuente. Superintendencia Geotecnia & Hidrogeología U.M. Constanca

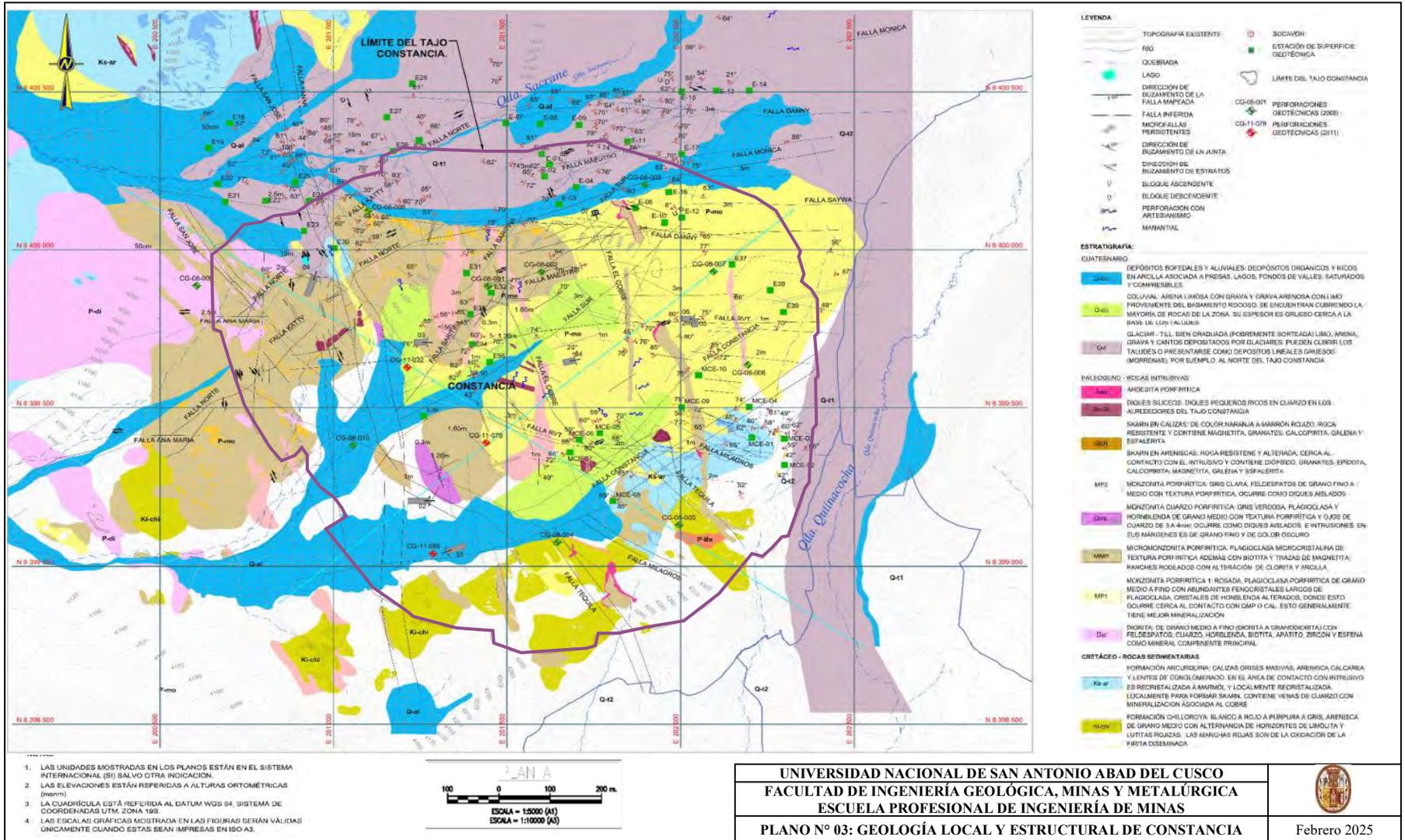
Los análisis estereográficos demuestran que las fallas presentan buzamiento empinado y generalmente, concuerdan con los cuatro sistemas de fallas identificados. También se observaron sets de fallas dispersas en los diagramas estereográficos, lo cual confirma que el área del yacimiento ha sido fuertemente fallada por múltiples actividades tectónicas, especialmente dentro del Dominio Estructural.

Resistencia de los Materiales de Falla

Se ejecutaron ensayos de corte directo y ensayos triaxiales, consolidados no drenados, en muestras de materiales de falla y panizo, colectadas en perforaciones y calicatas. Tres ensayos de corte directo indican que los ángulos máximos de fricción varían entre 20° y 24°, junto con valores de cohesión que fluctúan entre 35 y 100 kPa. Los ángulos de fricción residual varían entre 19° y 23°, con valores de cohesión residuales que fluctúan entre 28 y 68 kPa, que se visualiza en la figura 40.

Figura 42

Plano N° 04 de Geología Local y Estructural de Constanacia



Fuente. Superintendencia de Geología U.M. Constanacia

Geología Económica del Yacimiento

a) Mineralización

El tajo Constancia corresponde a un yacimiento tipo pórfido de Cu - Mo - Au, con mineralización tipo skarn de cobre, en el cual se han presenciado cinco modelos o tipos de mineral:

- Hipógeno (Tipo 1), de estilo porfídico, con presencia fisural de vetas de cuarzo diseminadas y mineralización de calcopirita molibdenita de diaclasamiento controlado en el intrusivo. Comprende el mayor volumen del centro minero, prolongándose debajo de la altura de 3 900 m.
- Skarn (Tipo 2), es de menor volumen en comparación al Tipo 1; sin embargo, las leyes son superiores y la mineralización ocurre en la superficie o cerca de esta.
- Supergeno (Tipo 3), ocurre debajo del Tipo 2, y ocasionalmente como remanentes dentro de la capa lixiviada. La zona de skarn suele estar vinculada a las mayores leyes de cobre del pórfido.
- Mixto (Tipo 4), es la zona transicional; corresponde a la zona donde se mezcla la mineralización supergena e hipogena; como, por ejemplo, donde coexisten los sulfuros supergenos o hipógenos. Están incluidos el sulfuro de cobre suplementario/calcopirita, en la monzonita, en el traslape del (Tipo 1 y Tipo 3).
- Óxidos de cobre (Tipo 5), ocurre localmente, en superficie volumétricamente pequeño.

Alteraciones

En el tajo Constancia se tienen tres tipos de alteraciones, potásica, propilítica y filica. La alteración potásica tiene una intensidad alterable, en un escalafón de débil a fuerte; con existencia de mineralización de calcopirita, molibdenita, bornita, pirita en vetas pequeñas y así mismo en la sustitución de minerales ferromagnesianos como también relleno de diaclasamiento. La alteración

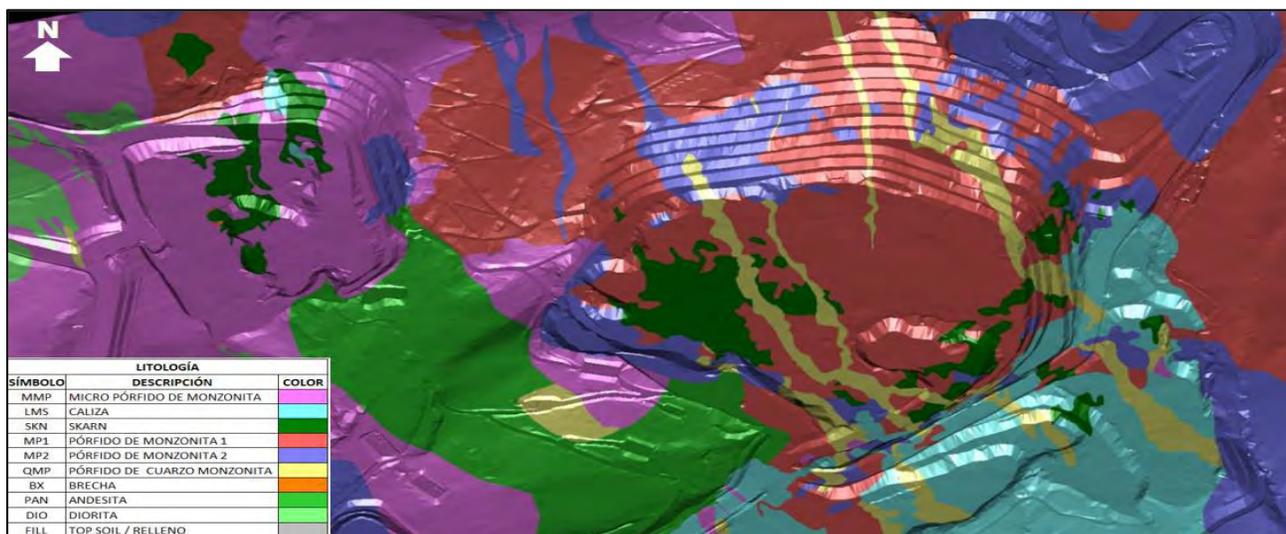
propilítica se da transitoriamente hacia la reacción potásica esta se propaga más de 1 km desde la intrusión de los contactos de pórfido. Este cambio comprende pirita, calcita, rodocrosita, epidota y clorita. También hay calcopirita subordinada, que puede utilizarse para sustituir minerales máficos o para rellenar disyunciones. Pequeñas vetas y venas de esfalerita-galena pueden encontrarse hasta a 3 km de distancia del sistema de cobre porfídico y dentro del halo de alteración propilítica, se distribuyen como un halo hacia la mineralización de cobre-molibdeno. En ocasiones, la alteración potásica está cubierta por alteración fílica, que crea un caparazón ubicuo a su alrededor. Sericita-cuarzo-pirita, trazas de calcopirita y esporádicas vetas y vetillas diminutas también forman parte de esta alteración.

Litología.

Presenta varias fases de monzonita y pórfido monzonítico, que son frecuentes en la región. El evento de mineralización importante más antiguo a más reciente está vinculado a la segunda más antigua de las al menos cuatro fases intrusivas principales que se han identificado. Las litologías predominantes son: pórfido de monzonita, Diorita y Andesita como se muestra en la figura 43.

Figura 43

Plano de la Litología de Mina Constanacia



Fuente. Superintendencia de Geología U.M. Constanacia

3.5.5 *Cálculo de Reservas*

Modelo Geológico Tajo Constancia

La litología del yacimiento de Constancia y los registros de testigos de perforación de la fase de exploración del proyecto Constancia sirvieron de base para el modelado geológico. Pórfido de monzonita mineralizado, pórfido de micromonzonita, pórfido de cuarzo-monzonita, pórfido de monzonita postmineralizado, skarn y sedimentos, y zonas mineralizadas fueron las seis clases litológicas en las que se dividieron estos datos. Además de la cartografía de superficie, esta modelización se basó en interpretaciones geológicas de secciones horizontales cada 15 m y secciones verticales cada 50 m (38 longitudinales y 33 transversales). Se identificaron zonas de lixiviación, óxido de cobre, supergénicas, mixtas, hipogénicas y skarn mediante modelización de la mineralización basada en factores de recuperación metalúrgica y tipo de mineralización.

Modelo de Bloques

La modelización por bloques, que representaba los dominios litológicos mineralizados (zonas de ley), se realizó utilizando dimensiones de 10 m x 10 m x 15 m.

La densidad se calculó utilizando 145 sondeos y 1.247 muestras. El pórfido de monzonita mineralizado (2,51 t/m³), el pórfido de micromonzonita (2,55 t/m³), el pórfido de cuarzo-monzonita (2,46 t/m³), el pórfido de monzonita postmineralizado (2,61 t/m³), el skarn (3,04 t/m³) y los sedimentos (2,66 t/m³) fueron los grupos litológicos a los que se asignó la densidad.

Estimación de Recursos

Para estimar los recursos minerales se utilizaron los registros de 384 sondeos, teniendo en cuenta el collar, la topografía, las leyes y la información litológica. El oro (Au), el molibdeno (Mo), la plata (Ag) y el cobre (Cu) fueron los elementos químicos que se calcularon. También se realizaron estudios exploratorios para los siguientes elementos: zinc (Zn), hierro (Fe), plomo (Pb), azufre (S), arsénico (As), cobre cianurado (CuCN), cobre soluble (CuS) y cadmio (Cd).

Se tomaron análisis de muestras originales y muestras compuestas (a intervalos de 7,5 m) para cada uno de los elementos químicos dentro de cada dominio geológico como parte del proceso utilizado para estimar los recursos en el pozo Constancia. Se estableció un límite de dos muestras compuestas por sondeo y un mínimo de cuatro a doce muestras compuestas por bloque. El correlograma se utilizó para realizar el análisis variográfico de cada dominio geológico. Para cada dominio geológico, se utilizaron gráficos de curvas probabilísticas para calcular las altas erráticas aplicadas al cobre, que oscilaban entre el 0,1% Cu y el 1,7% Cu. Las tres técnicas empleadas para estimar la ley fueron kriging ordinario, kriging simple y kriging de distancia inversa. El rango determinado por el estudio variográfico sirvió de base para el radio de impacto para la interpolación de la ley. Por último, se utilizaron validaciones globales, locales y visuales para validar el modelo de bloques.

Para clasificar los recursos minerales del yacimiento de Constancia se determinó aplicando técnicas matemáticas para calcular la continuidad geológica y la fiabilidad. Los bloques fueron clasificados como recursos indicados, medidos e inferidos en orden decreciente de fiabilidad. La distribución de los recursos minerales en el yacimiento de Constancia en la tabla 07.

Tabla 07

Distribución del Recurso Mineral para el Tajo Constancia

Categoría	Tonelaje (Mt)	Cu (%)	Ag (g/t)	Mo (%)	Au (g/t)
Medido	609	0.27	2.74	0.009	0.04
Indicado	399	0.19	2.09	0.005	0.03
Medido + Indicado	1008	0.24	2.48	0.007	0.03
Inferido	138	0.17	1.71	0.004	0.02

Fuente. Superintendencia de Geología U.M. Constancia

Modelo Geológico Tajo Pampacancha

a) Modelo Geológico

El modelamiento geológico se realizó a partir de los registros de perforación. La litología se dividió en cinco grupos: calizas, diorita, diorita porfídica, skarn y monzonita porfídica, con el fin de analizar mejor la continuidad de la geología y las leyes en el tajo de Pampacancha.

b) Modelo de Bloques

La modelización por bloques, que representaba los dominios litológicos mineralizados (zonas de ley), se realizó utilizando dimensiones de 10 m x 10 m x 15 m.

A cada grupo litológico -diorita (2,78 t/m³), pórfido diorítico (2,75 t/m³), skarn (3,50 t/m³) y endoskarn (2,94 t/m³)- se le asignó una densidad basada en 56 muestras.

c) Estimación de Recursos

Para la evaluación de los recursos minerales se tomaron en consideración los registros de 110 sondeos, teniendo en cuenta la litología, los resultados de las prospecciones, la topografía y los datos de los collares. Se estimaron los siguientes elementos químicos: oro (Au), plata (Ag), molibdeno (Mo) y cobre (Cu). Además, se hizo una investigación exploratoria de la presencia de zinc (Zn). Las muestras originales y las muestras compuestas (a intervalos de 2 metros) fueron analizadas exploratoriamente para cada componente químico dentro de cada dominio geológico como parte del proceso para evaluar los recursos en el tajo Pampacancha. Tomando en cuenta un máximo de tres compuestos por cada perforación, se utilizó un mínimo de cuatro compuestos y doce compuestos por bloque. Utilizando el correlograma, se realizó el análisis de variograma para cada dominio geológico. Utilizando el valor de 4,22% Cu, los erráticos elevados utilizados para el cobre se calcularon en su mayoría mediante trazados de curvas probabilísticas. Para estimar las leyes se emplearon tres técnicas: kriging ordinario, distancia inversa al cuadrado (ID²) y distancia inversa al

cubo (ID3). El intervalo determinado por el variograma sirvió de base a la región de efecto para la interpolación de los grados. Por último, el modelo de bloques se validó mediante validaciones visuales, locales y globales.

La continuidad geológica y los cálculos de fiabilidad utilizando métodos matemáticos sirvieron de base para la diversificación de los recursos minerales en el tajo de Pampacancha. Los bloques se clasificaron en recursos inferidos, sugeridos y medidos en orden decreciente de fiabilidad. En la tabla número 08 se visualiza la repartición del recurso mineral dentro del tajo Pampacancha. Como también mencionar los proyectos maría reina, kusiorcco, caballito I y II que se encuentran en etapa de exploración.

Tabla 08

Distribución del Recurso Mineral para el Tajo Pampacancha

Categoría	Tonelaje (Mt)	Cu (%)	Ag (%)	Mo (%)	Au (g/t)
Medido	30	0.48	4.37	0.013	0.28
Indicado	35	0.33	3.42	0.013	0.22
Medido + Indicado	66	0.4	3.86	0.013	0.25
Inferido	0	0.14	3.23	0.009	0.19

Fuente. Superintendencia de Geología U.M. Constancia

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

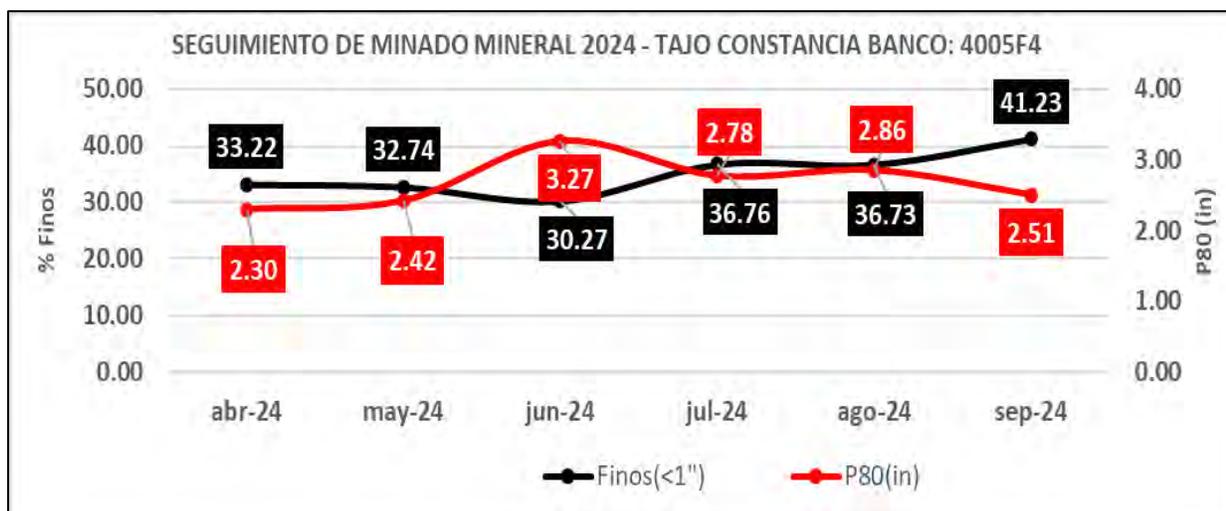
4.1. Resultados de la Investigación

4.1.1. Resultados de fragmentación y % de finos para emulsion matriz

En el mismo año se realizaron investigaciones con la mezcla HA73G combinada con emulsión matriz, durante el periodo de abril a septiembre de 2024. Los resultados obtenidos fueron los siguientes: para la fragmentación, el P80 promedio alcanzó las 2.68 pulgadas, valor que se encuentra ligeramente dentro del KPI establecido por el cliente, que exige un P80 menor a 3 pulgadas. En cuanto al porcentaje de finos menores a una pulgada, se obtuvo un promedio de 35.16%, valor aún distante del KPI solicitado por planta, que requiere superar el 47% de finos. Los resultados se presentan en la siguiente imagen 44 y tabla 09.

Figura 44

Seguimiento de Minado 2024



Fuente: Elaboración propia – Enaex

Tabla 09

Resumen de porcentaje de finos y P80

Finos y P80 Banco: 4005F4 - Tajo Constancia		
Año 2024	Fino (<1")	P80(pulg)
Abril	33.22	2.30
Mayo	32.74	2.42
Junio	30.27	3.27
Julio	36.76	2.78
Agosto	36.73	2.86
Septiembre	41.23	2.51
Resultado	35.16%	2.68 Pulg

Fuente: Elaboración propia - Enaex

4.1.2. Procesamiento de la Información

En la consecuente tabla 10 se visualiza los atributos de la emulsión vertex y emulsion matriz para una mezcla explosiva HA73G.

Tabla 10*Diferencia de la emulsión del vertex con emulsión matriz*

Característica	Emulsión Vertex en HA73G	Emulsión Matriz en HA73G
Descripción	Emulsión energética, presenta un conjunto de propiedades: alta energía, buen volumen de gases, densidad variable, resistencia al agua alta. (70% emulsión vertex gasificada + 30%ANFO) bombeable y vaciable.	Emulsión gasificable tipo agua en aceite; para la fabricación de ANFO Pesados Vaciables y Bombeables, mediante su mezcla in situ en diferentes proporciones. (70% emulsión matriz gasificada + 30%ANFO)
Usos	Son productos adecuados para voladuras de superficie para roca dura, principalmente si es factible el uso de sistemas mecanizados de carga, en perforaciones secas o con agua.	Usado para fabricar mezclas de ANFO pesado vaciables y bombeables; es utilizado como agente de voladura para uso en minería de superficie, canteras y/o trabajos de construcción.
VOD (m/s)	5,000-5,800	5,000-5,500
Resistencia al agua	Si	Si

Fuente: elaboración propia

4.2. Proyecto N° 01: P3990_001F4 – (Emulsion vertex) Tajo Constancia

El 25 de julio de 2024, a las 12:27 horas, se ejecutó la voladura del proyecto P3990_001F4, correspondiente a una malla de producción conformada por 69 taladros. Todo el proyecto fue cargado con emulsión Vertex, mezcla HA73G.

La detonación se realizó siguiendo una secuencia en “Echelón”, con un retardo de 15 milisegundos entre taladros y 220 milisegundos entre filas, utilizando el sistema de iniciación electrónica Daveytronic.

En el taladro ID 4104 se instrumentó la prueba de VOD, cuyos resultados se muestran en las figuras 45, 46, 47, 48, 49 y 50, así como en las tablas 11, 12, 13 y 14, que corresponden al diseño de carga deck, la medición de la densidad de la mezcla explosiva y el control de vibraciones.

Asimismo, se efectuó la evaluación de gases nitrosos y, en la etapa pos-voladura, se realizaron los controles de fragmentación, porcentaje de finos y esponjamiento del proyecto.

Figura 45

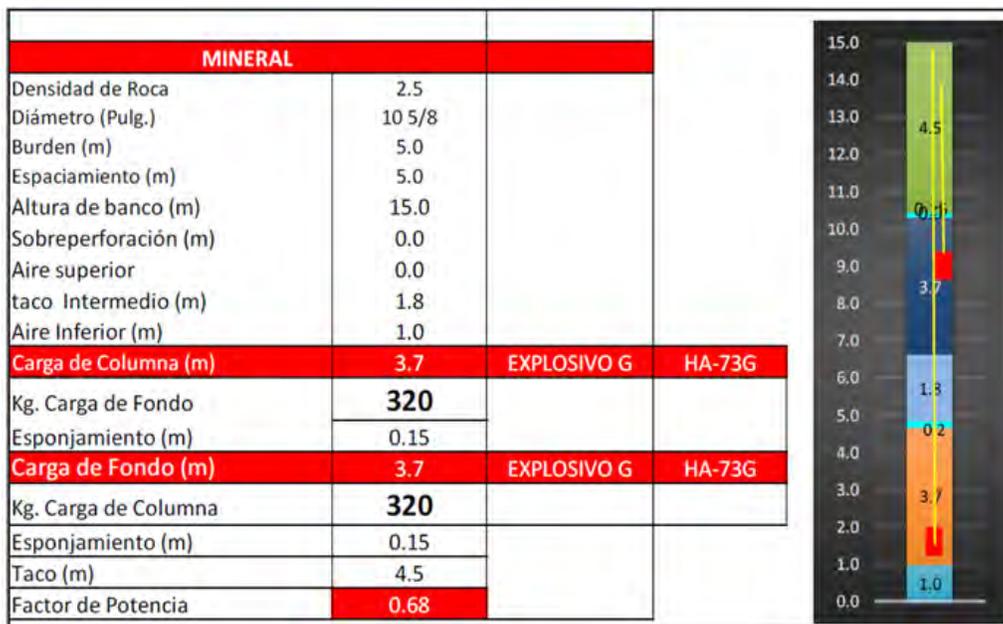
Plano de carguío y distribución de camiones del P3990_01F4 Constanica



Fuente. Elaboración propia - Enaex

Figura 46

Diseño de carga (carga Deck) para P3990_01F4 Constanica



Fuente. Elaboración propia – Enaex

Tabla 11

Velocidad de detonación del proyecto P3990_01F4 Constanica

ID Taladro	Diámetro (pulg)	B (m)	S (m)	H. Carga (m)	Carga (Kg)	D. Inicial (g/cc)	D. Final (g/cc)	VOD (m/s)
4104	10 5/8	5	5	8	640	1.31	1.14	5,639

Fuente: elaboración propia

Tabla 12

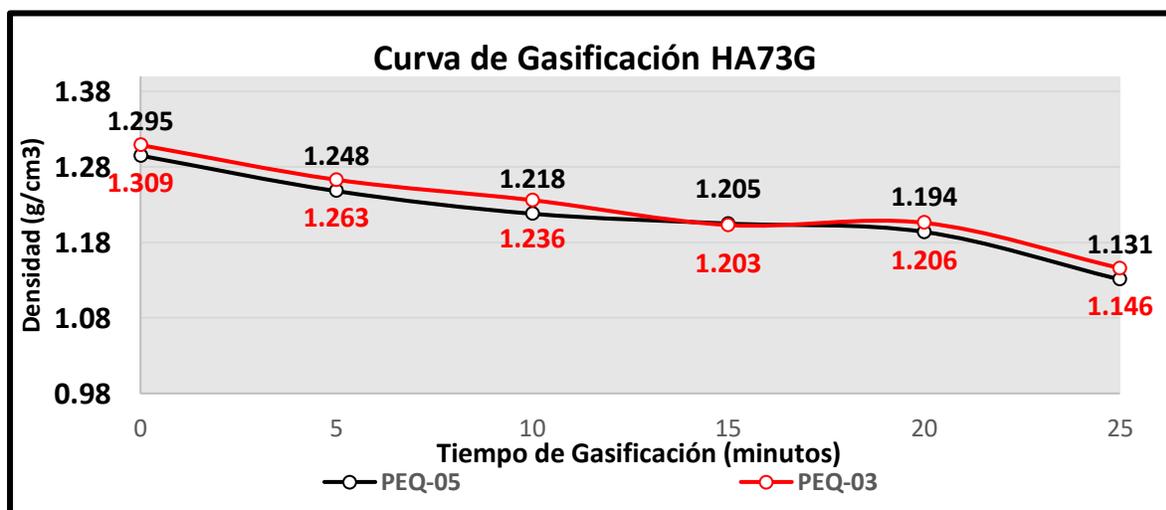
Control de calidad en campo proyecto P3990_01F4 Constanica

Camión Fabrica		PEQ-05	PEQ-03
Mezcla Explosiva Vertex		HA73G	HA73G
Temperatura (°C)		7	7
Caudal (kg/min)		500	500
% de L-4		0.3	0.3
ID Taladro		4104	4092
Tiempo de gasificación (minutos)	0	1.295	1.309
	5	1.248	1.263
	10	1.218	1.236
	15	1.205	1.203
	20	1.194	1.206
	25	1.131	1.146

Fuente. Elaboración propia - Enaex

Figura 47

Comportamiento de la curva densidad del proyecto P3990_01F4 - Constanica



Fuente. Elaboración propia – Enaex

Figura 48

Control de gases del proyecto P3990_01F4 - Constanica



Fuente- Adaptado de AEISG, 2011, 2nd Edición

El P80 deseado para el mineral es inferior a 3 pulgadas, como muestra en la figura 47, para cada muestra examinada, el porcentaje de finos menores a una pulgada obtenida es superior al 47%.

Tabla 13

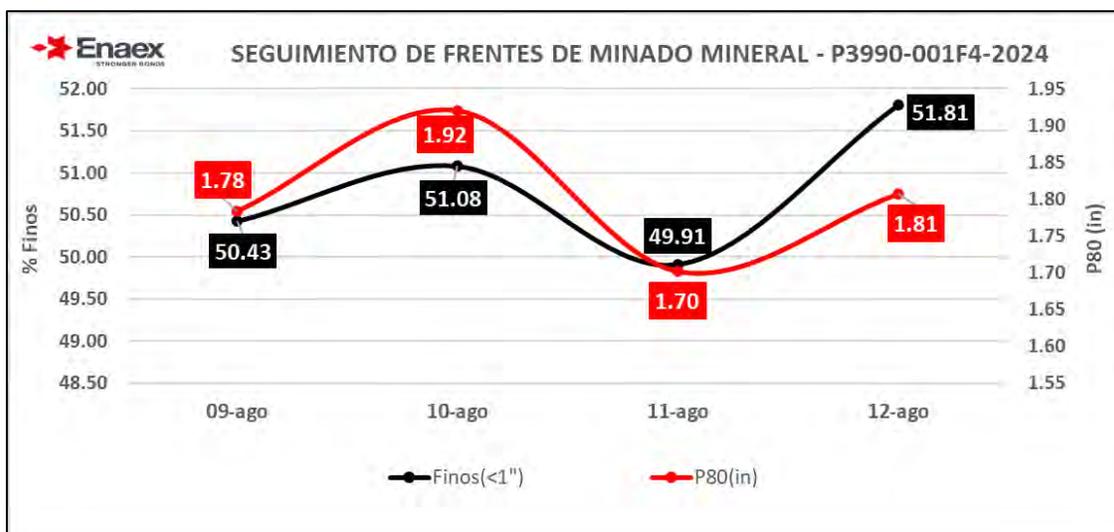
Registro de fragmentación para frente de minado del proyecto P3990_01F4

Fecha	P80(pulg)	Finos (<1")	Finos (<1.5")
09-ago	1.78	50.43	61.46
10-ago	1.92	51.08	62.71
11-ago	1.70	49.91	68.49
12-ago	1.81	51.81	63.07
Total, general	1.81	50.68	63.74

Fuente. Elaboración propia – Enes

Figura 49

Seguimiento de frente de minado para el proyecto P3990_01F4 Constanacia



Fuente. Elaboración propia – Enaex

Utilizando un sismógrafo, se registran las vibraciones generadas por la voladura. Los datos se guardan en documentos electrónicos para después ser revisadas y estudiadas, las frecuencias predominantes, la velocidad máxima de pico partículas (VPP), la frecuencia y amplitud de las vibraciones como los tiempos de llegada. De conformidad con el reglamento nacional vigente, «Guía Ambiental para Perforaciones y Voladuras en Operaciones Mineras del Ministerio de Energía y Minas».

Tabla 14

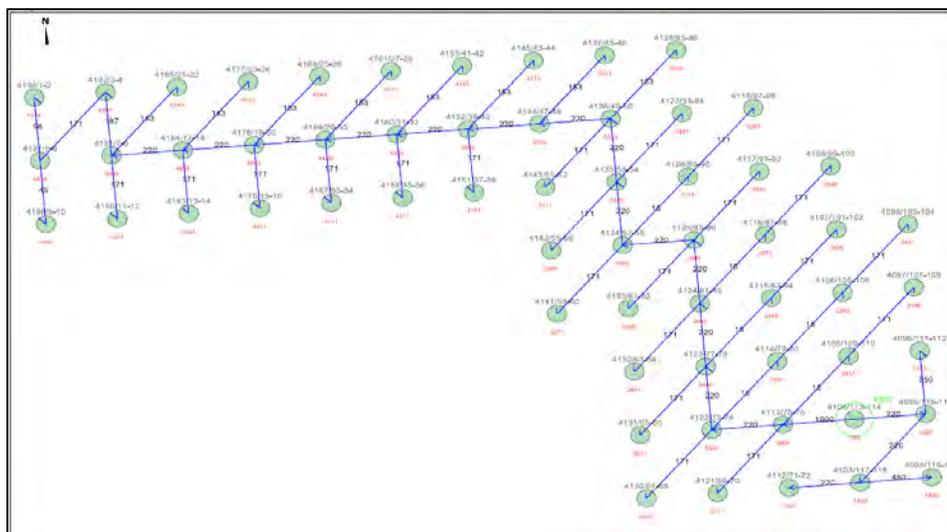
Monitoreo de vibraciones del proyecto P3990_01F4 Constanacia

Voladura	PPV (mm/s)				Ubicación	Distancia (m)	Carga Operante (Kg)
	TRANS.	VERT.	LOG.	V. SUM.			
P3990_01 F4	52.88	102.0	60.60	117.8	Mismo nivel	34	620

Fuente. Elaboración propia - Enaex

Figura 50

Secuencia de la voladura del P3990_01 F4 Constancia



Fuente: Elaboración propia - Enaex

4.3. Proyecto N° 02: P3990-002F4 – (Emulsion vertex) Tajo Constancia

El 28 de julio de 2024, a las 14:55 horas, se ejecutó la voladura de producción del proyecto P3990-002F4, conformada por 62 taladros. La prueba VOD se instrumentó en el taladro ID 4252.

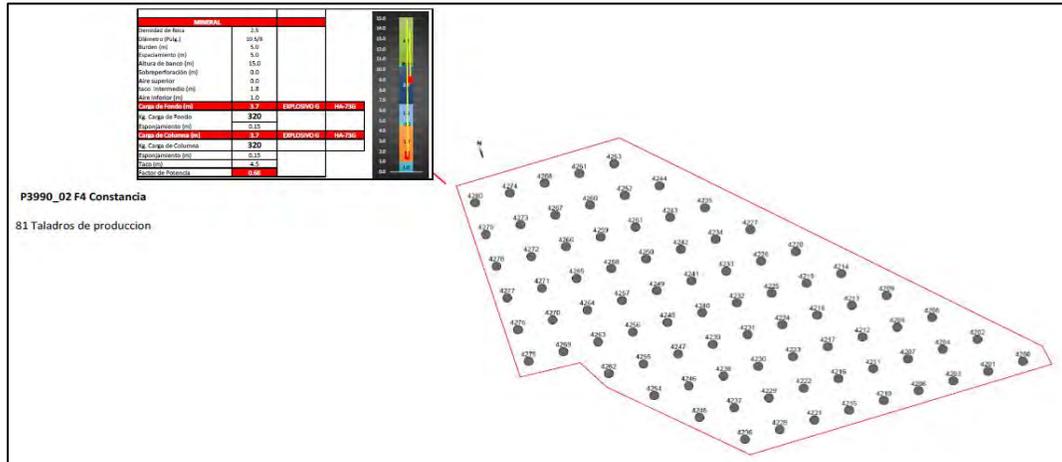
Todo el proyecto fue cargado con emulsión Vertex, mezcla HA73G, y se utilizó el sistema de iniciación electrónica Daveytronic. La secuencia de salida se programó en diamante, con un retardo de 14 milisegundos entre taladros y 153 milisegundos entre filas.

La prueba realizada con la emulsión Vertex evidenció una buena fragmentación de la superficie, sin detectarse emisiones visibles durante la voladura.

En las figuras 51, 52, 53, 54, 55 y 56, así como en las tablas 15, 16, 17 y 18, se presentan los resultados obtenidos en el proyecto P3990-002F4: la secuencia de malla, el diseño de carga, el control de vibraciones, el análisis de P80, la evaluación de gases, el registro de VOD, el control de densidad de la mezcla explosiva en campo, así como los valores de porcentaje de finos y fragmentación.

Figura 51

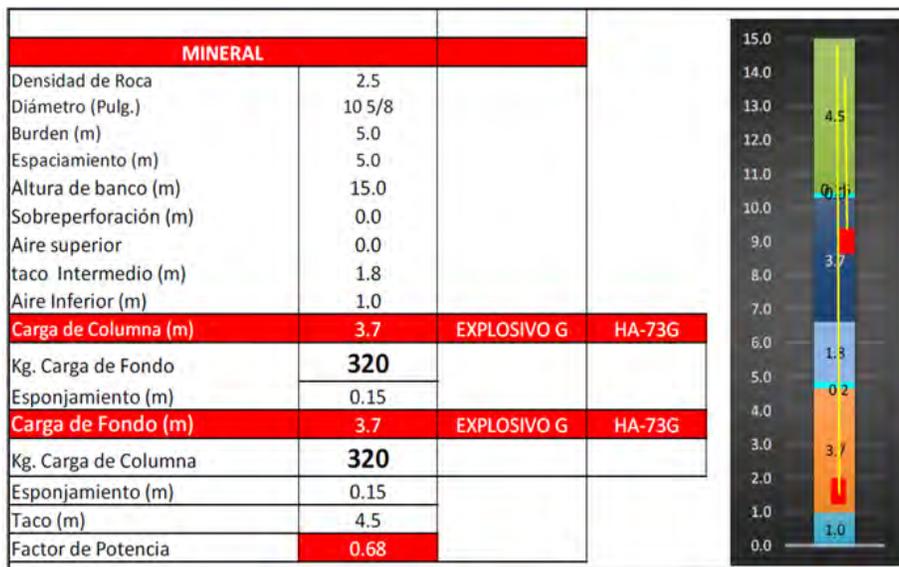
Plano de carguío del P3990_02F4 Constanacia



Fuente: Elaboracion propia – Enaex

Figura 52

Diseño de carga deck para P3990_02F4 Constanacia



Fuente: Elaboracion propia – Enaex

Tabla 15

Registro VOD del proyecto P3990-002F4 – Tajo Constanacia

ID Taladro	Diámetro (pulg)	B (m)	S (m)	H. Carga (m)	Carga (Kg)	D. Inicial (g/cc)	D. Final (g/cc)	VOD (m/s)
4262	10 5/8	5	5	8	640	1.30	1.13	5,707

Fuente: elaboración propia – Enes

Tabla 16

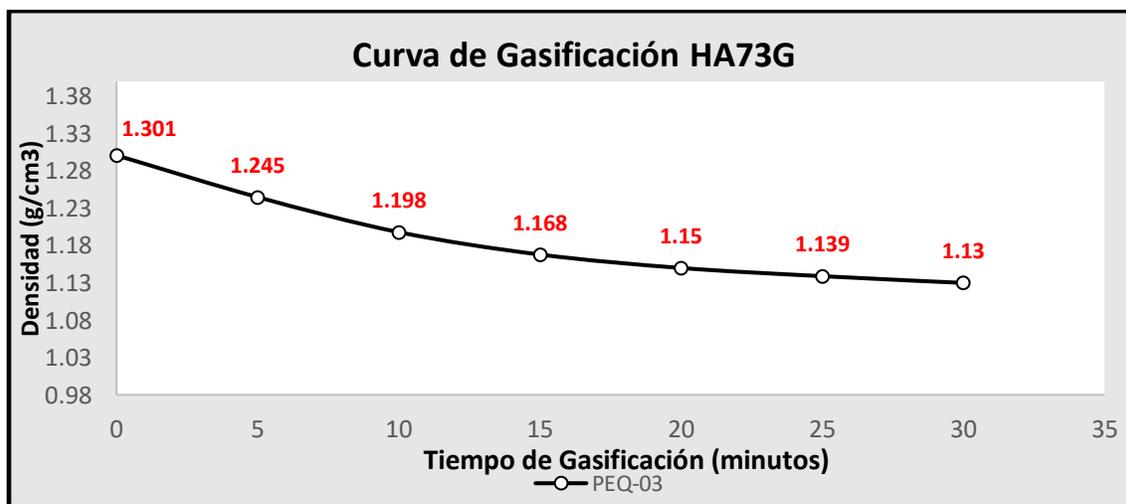
Control de calidad de la mezcla HA73G proyecto P3990_02F4 Constancia

Camión Fabrica		PEQ-03
Mezcla Explosiva Vertex		HA73G
Temperatura (°C)		15
Caudal (kg/min)		500
% de L-4		0.3
ID Taladro		4262
Tiempo de gasificación (minutos)	0	1.301
	5	1.245
	10	1.198
	15	1.168
	20	1.150
	25	1.139
	30	1.13

Fuente. Elaboración propia - Enaex

Figura 53

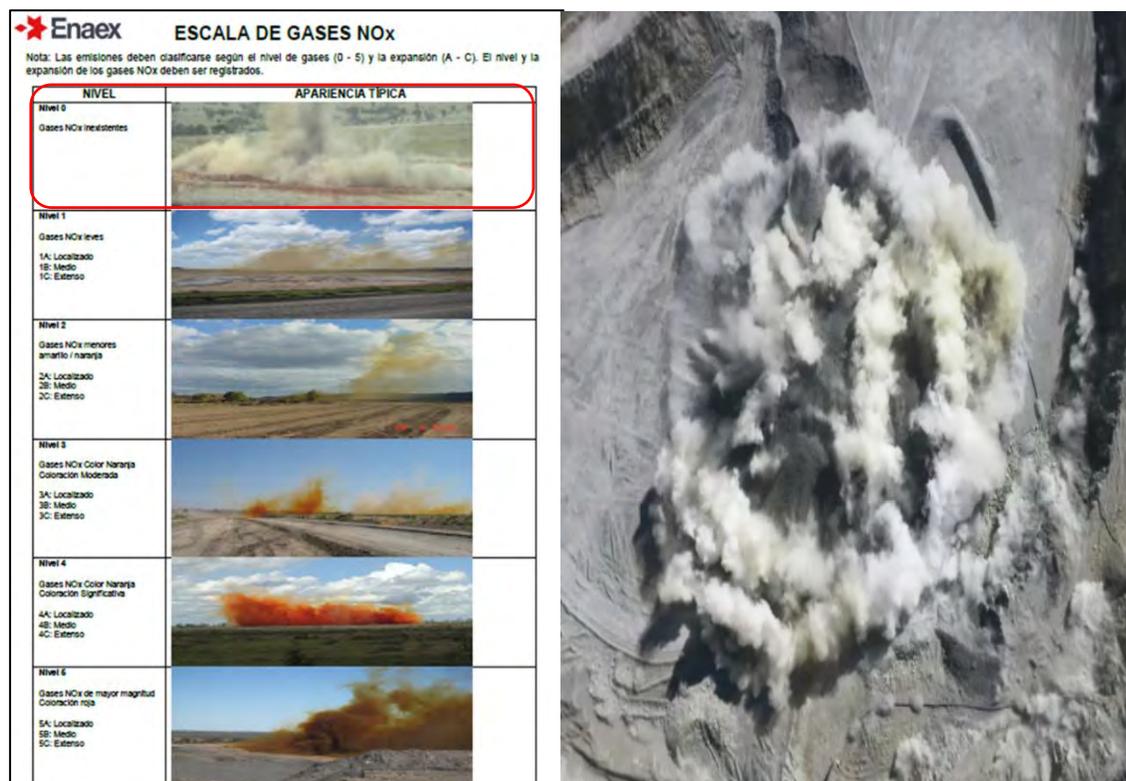
Curva de gasificación del proyecto P3990-002F4 – Tajo Constancia



Fuente: Elaboración propia - Enaex

Figura 54

Control de gases del proyecto P3990-002F4 – Tajo Constancia



Fuente:

Adaptado de AEISG, 2011, 2nd Edición

Tabla 17

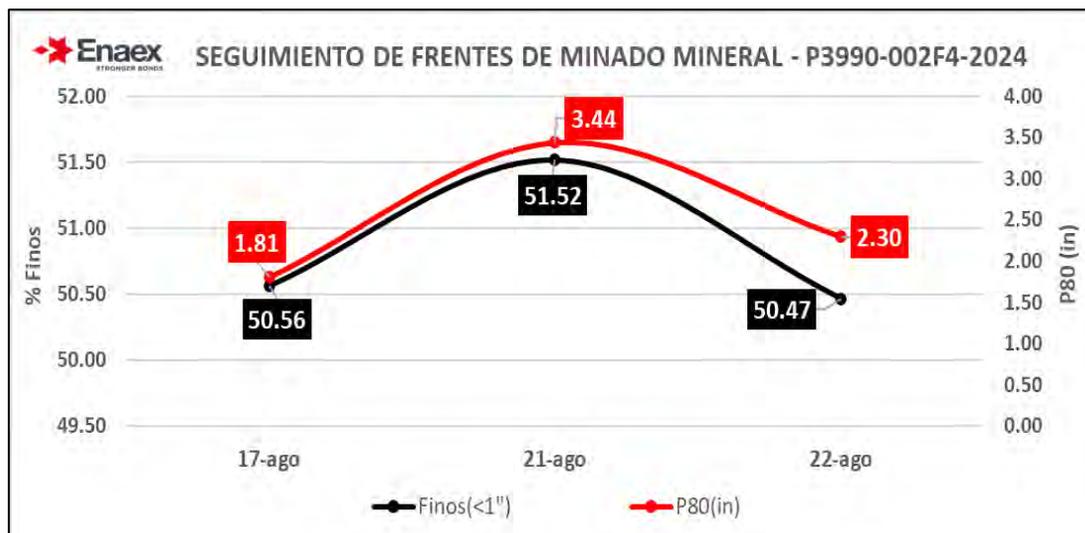
Registro de fragmentación del frente de minado del proyecto P3990_02F4

Fecha	P80 (pulg)	Finos (<1")	Finos (<1.5")
17-ago	1.81	50.56	65.14
21-ago	3.44	51.52	55.26
22-ago	2.30	50.47	64.15
Total, general	2.48	50.86	61.58

Fuente: Elaboración propia – Enes

Figura 55

P80 y % de Finos del proyecto P3990-002F4 – Tajo Constancia



Fuente: Elaboración propia - Enaex

Utilizando un sismógrafo, se controlan y registran las vibraciones registradas por la voladura. Los datos registran y se guardan en archivos electrónicos para después ser analizadas, que reconoce las frecuencias predominantes, la velocidad más alta pico partícula (VPP), la amplitud y frecuencia de las vibraciones y los tiempos de llegada.

Tabla 18

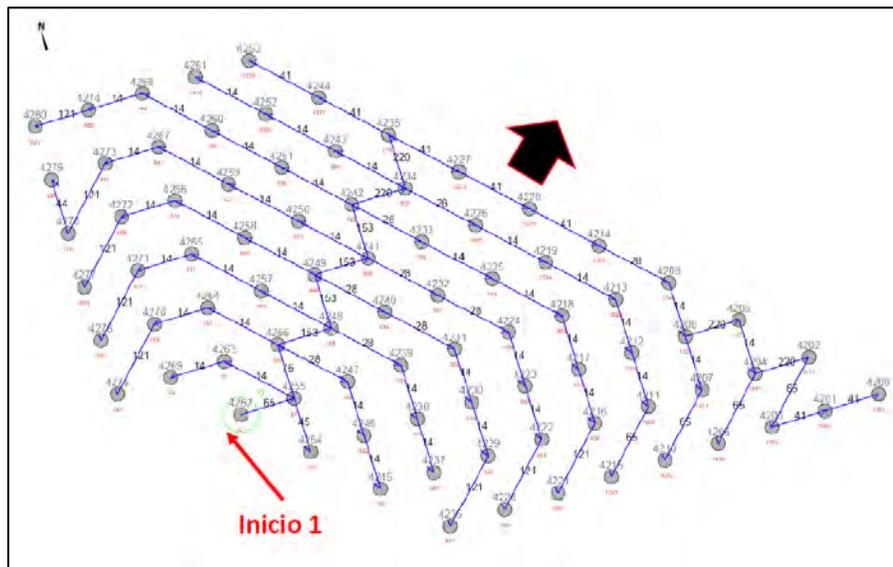
Monitoreo de vibraciones del proyecto P3990-002F4 – Tajo Constancia

Voladura	PPV (mm/s)				Ubicación	Distancia (m)	Carga Operante (Kg)
	TRA NS.	VER T.	LOG.	V. SUM			
P3990_02F4	44.90	62.57	40.66	68.60	Mismo Nivel	81	620

Fuente: Elaboración propia – Enaex

Figura 56

Secuencia de salida del P3990-002F4 – Tajo Constancia



Fuente: Elaboración propia – Enaex

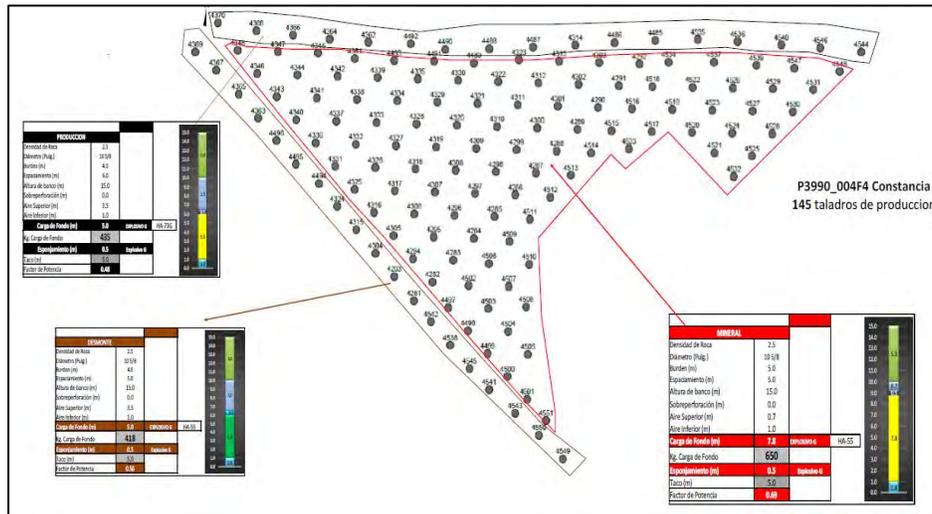
4.4. Proyecto N° 03: P3990-004F4 (Emulsión Matriz – Tajo Constancia)

El 22 de julio de 2024, a las 12:29 horas, se ejecutó la voladura del proyecto P3990-004F4, correspondiente a una malla de producción conformada por 125 taladros. Todos los taladros fueron cargados con emulsión matriz HA73 gasificada y se utilizó el sistema de iniciación electrónica Daveytronic. La detonación se realizó en secuencia “Echelón”, con retardos de 15 milisegundos entre taladros y 120 milisegundos entre filas. Durante la voladura se observó emisión puntual de humos naranjas de nivel 1A.

En las figuras 57, 58, 59, 60, 61 y 62, así como en las tablas 19, 20, 21 y 22, se presentan los registros correspondientes al proyecto P3990-004F4: secuencia de salida, modelo de carga, control de densidad de la mezcla explosiva en el área de estudio, monitoreo de gases, análisis de P80, porcentaje de finos y seguimiento de vibraciones.

Figura 57

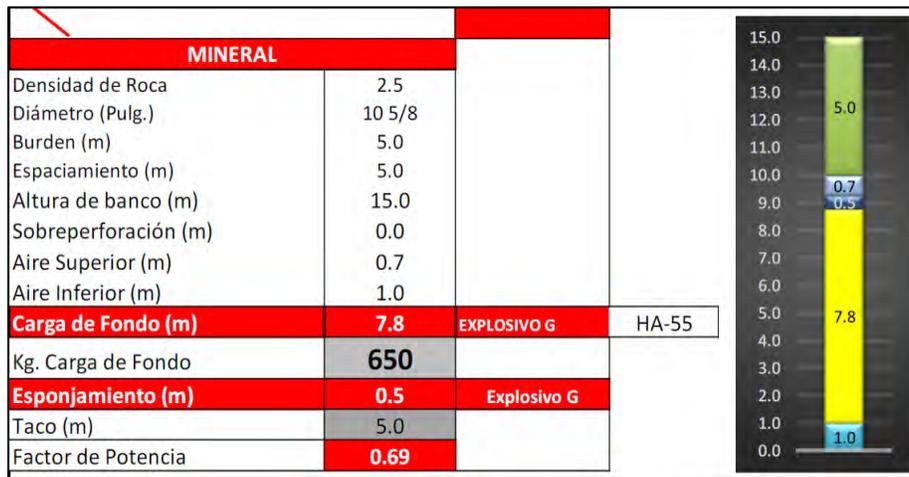
Plano de carguío del P3990_004F4 Constanica



Fuente: Elaboración propia – Enaex

Figura 58

Diseño de carguío del P3990_004F4 Constanica



Fuente: Elaboración propia – Enaex

Tabla 19

Registro VOD del proyecto P3990_004F4 – Tajo Constanica

ID Taladro	Diámetro (pulg)	B (m)	S (m)	H. Carga (m)	Carga (Kg)	D. Inicial (g/cc)	D. Final (g/cc)	VOD (m/s)
4262	10 5/8	5	5	8	650	1.3	1.13	5,377

Fuente: elaboración propia- Enes

Tabla 20

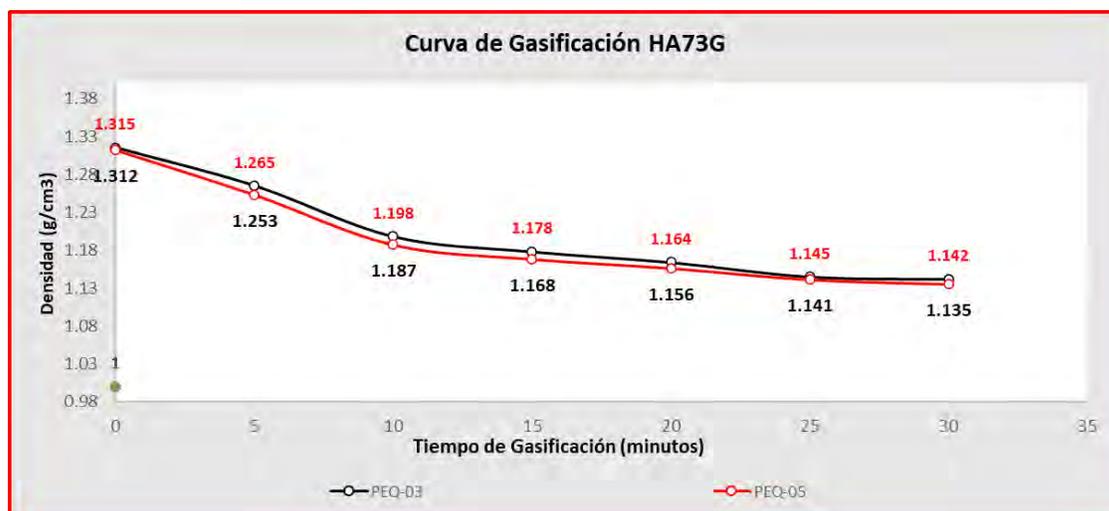
Control de calidad en campo proyecto P3990_04F4 Constanca

Camión Fabrica		PEQ-03	PEQ-05
Mezcla Explosiva (emulsión matriz)		HA73G	HA73G
Temperatura (°C)		15	14.5
Caudal (kg/min)		500	500
% de L-4		0.3	0.3
ID Taladro		4542	4281
Tiempo de gasificación (minutos)	0	1.315	1.312
	5	1.265	1.253
	10	1.2198	1.187
	15	1.178	1.168
	20	1.164	1.156
	25	1.145	1.141

Fuente. Elaboración propia - Enaex

Figura 59

Curva de densidad del proyecto P3990-004F4 – Tajo Constanca



Fuente: Elaboración propia - Enaex

Figura 60

Control de gases del proyecto P3990 004F4 – Tajo Constancia (1A -Puntual)



Fuente: Adaptado de AEISG, 2011, 2nd Edición

Tabla 21

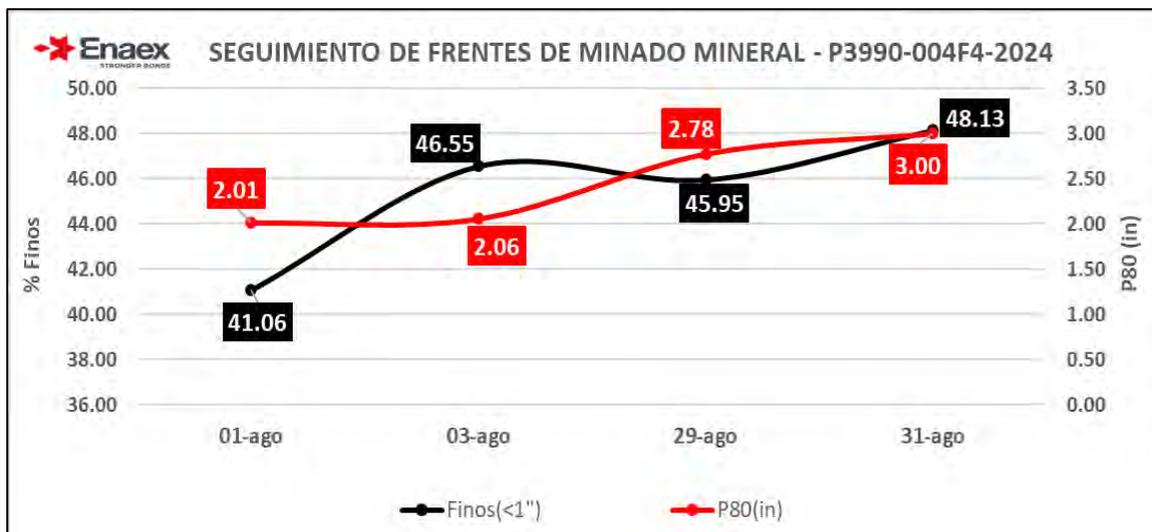
Registro de fragmentación del frente de Minado del proyecto P3990_04F4

Fecha	P80(in)	Finos (<1")	Finos (<1.5")
01-ago	2.01	41.06	62.60
03-ago	2.06	46.55	61.66
29-ago	2.78	45.95	54.78
31-ago	3.00	48.13	54.81
Total, general	2.46	45.42	58.46

Fuente: Elaboración propia – Enaex

Figura 61

P80 y % de Finos del proyecto P3990-004F4 Tajo Constancia



Fuente: Elaboración propia - Enaex

Utilizando un sismógrafo, se registran las vibraciones captadas por la voladura, posteriormente se almacenan en documentos digitales para realizar un estudio, que determine las frecuencias prevalecientes, la velocidad pico partículas (VPP), frecuencia de las vibraciones, la amplitud y los tiempos de llegada.

Tabla 22

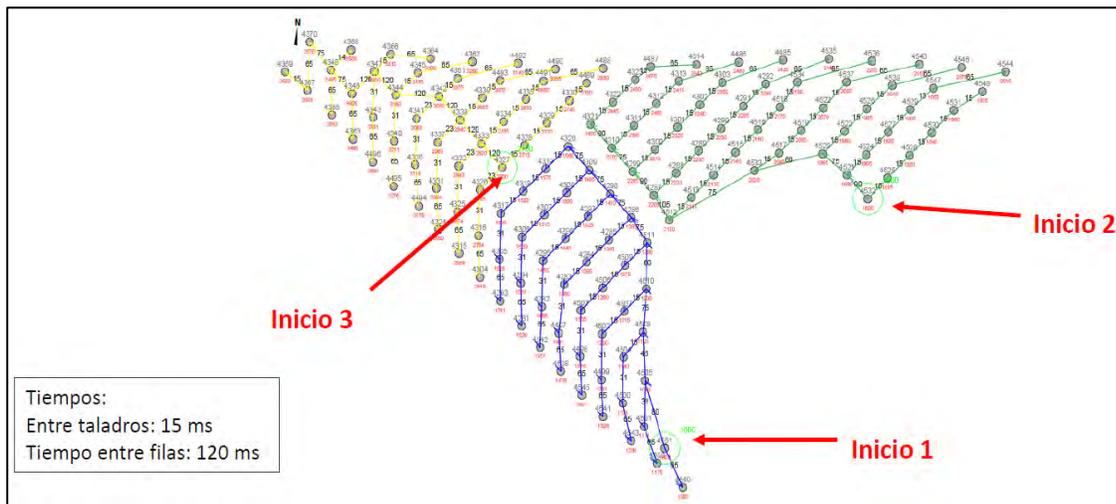
Monitoreo de vibraciones del proyecto P3990-004F4

Voladura	PPV (mm/s)				Ubicación	Distancia (m)	Carga Operante (Kg)
	TRANS	VERT	LOG	V. SUM			
P3990_04 F4	19.18	20.07	21.40	26.93	Nivel Superior	105	650

Fuente: Elaboración propia – Enaex

Figura 62

Secuencia de salida proyecto de voladura P3990_04F4 – Tajo Constancia



Fuente: Elaboración propia - Enaex

4.5. Análisis y discusión de resultados

4.5.1 Análisis técnico de resultados

Comparativa de los 2 proyectos utilizando Emulsión vertex y Matriz se visualizan en tabla 23.

Tabla 23

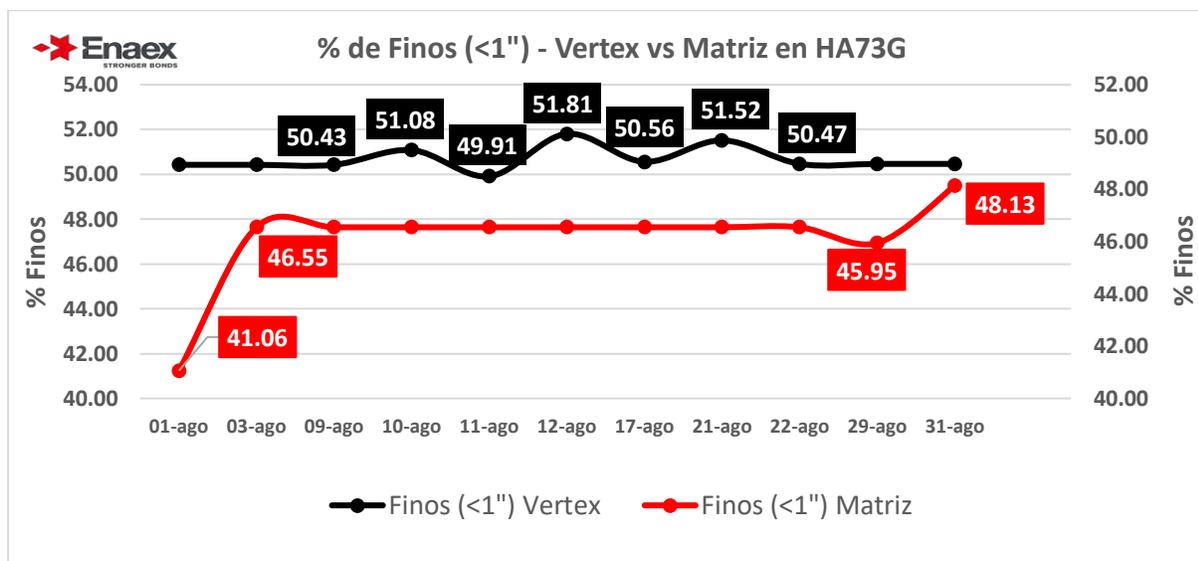
Resultado del comparativo Emulsión vertex vs matriz en HA73G

% de Finos (<1") - Vertex vs Matriz en HA73G		
Fecha de Registro	Finos (<1") Vertex	Finos (<1") Matriz
01-ago	Sin Registro	41.06
03-ago	Sin Registro	46.55
09-ago	50.43	Sin Registro
10-ago	51.08	Sin Registro
11-ago	49.91	Sin Registro
12-ago	51.81	Sin Registro
17-ago	50.56	Sin Registro
21-ago	51.52	Sin Registro
22-ago	50.47	Sin Registro
29-ago	Sin Registro	45.95
31-ago	Sin Registro	48.13
Resultado	50.82%	45.42%

Fuente: Elaboración propia - Enaex

Figura 63

Comparativo de % de finos para prueba vertex vs matriz en HA73G



Fuente: Elaboración propia - Enaex

Tabla 24

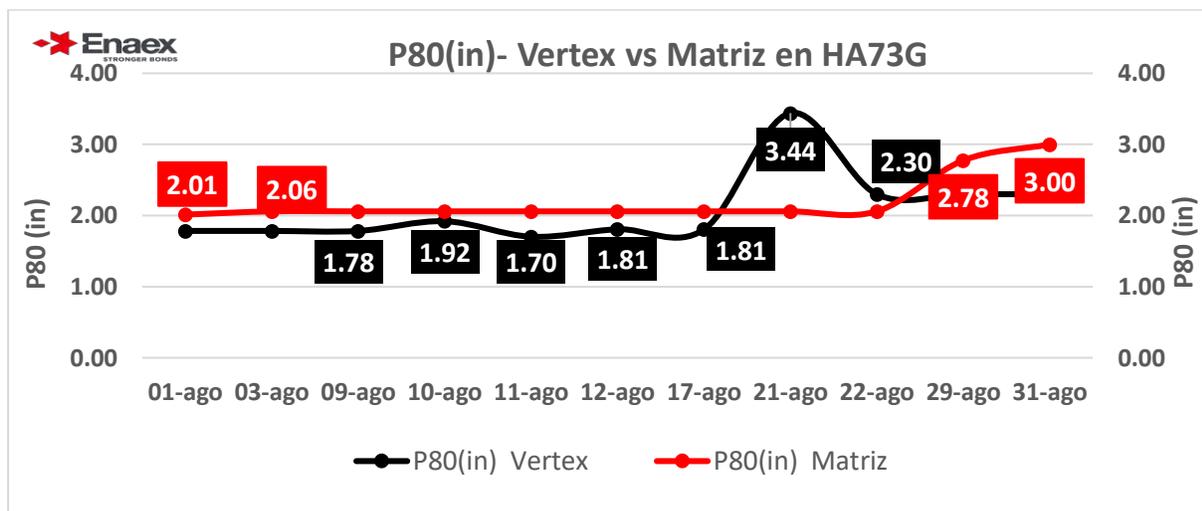
Cuadro comparativo fragmentación para emulsion vertex vs matriz en HA73G

P80(in) - Vertex vs Matriz en HA73G		
Fecha de Registro	Finos (<1") Vertex	Finos (<1") Matriz
01-ago	Sin Registro	2.01
03-ago	Sin Registro	2.06
09-ago	1.78	Sin Registro
10-ago	1.92	Sin Registro
11-ago	1.70	Sin Registro
12-ago	1.81	Sin Registro
17-ago	1.81	Sin Registro
21-ago	3.44	Sin Registro
22-ago	2.30	Sin Registro
29-ago	Sin Registro	2.78
31-ago	Sin Registro	3.00
Resultado (in)	2.11	2.46

Fuente: Elaboración propia - Enaex

Figura 64

Gráfica comparativa fragmentación emulsión Vertex vs Matriz en HA73G



Fuente: Elaboración propia - Enaex

Tabla 25

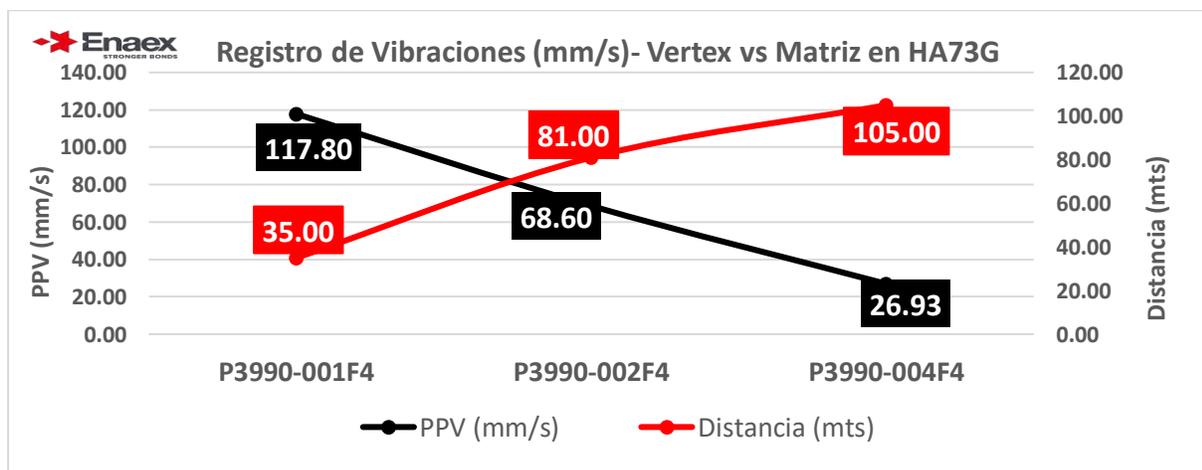
Cuadro comparativo registro sismográfico vertex vs matriz en HA73G

Registro de Vibraciones (mm/s)- Vertex vs Matriz en HA73G		
Proyectos	PPV (mm/s)	Distancia (mts)
P3990-001F4	117.80	35.00
P3990-002F4	68.60	81.00
P3990-004F4	26.93	105.00

Fuente. Elaboración propia - Enaex

Figura 65

Gráfica comparativo registro sismográfico vertex vs matriz en HA73G



Fuente: Elaboración propia - Enaex

Tabla 26

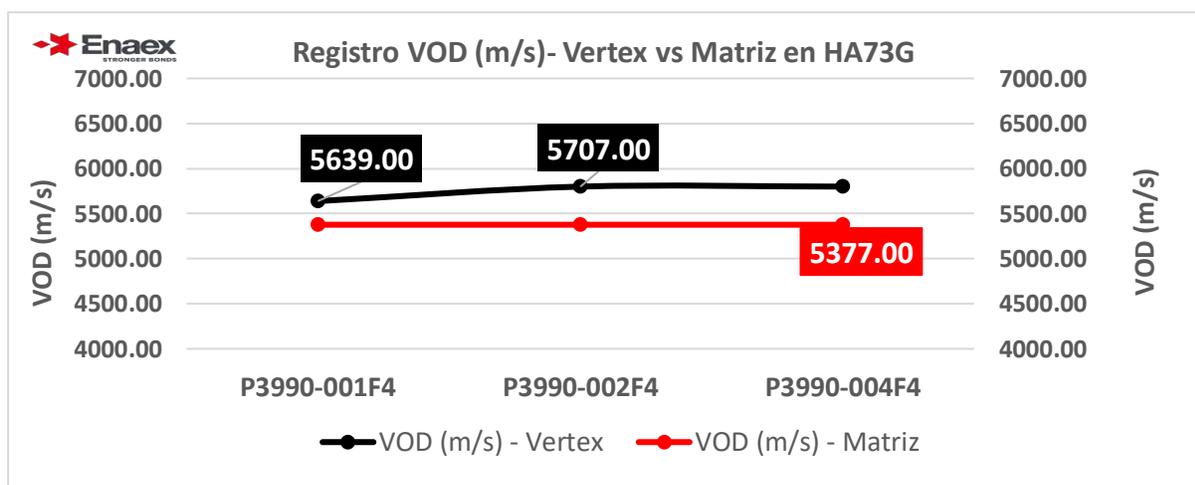
Cuadro comparativo VOD vertex vs matriz en HA73G

VOD - Vertex vs Matriz en HA73G		
Fecha de Registro	VOD (m/s) - Vertex	VOD (m/s) - Matriz
P3990-001F4	5639.00	Sin Registro
P3990-002F4	5707.00	Sin Registro
P3990-004F4	Sin Registro	5377.00
Resultado (m/s)	5,673.00	5,377.00

Fuente: Elaboración propia - Enaex

Figura 66

Gráfica VOD comparativa de vertex vs matriz en HA73G



Fuente: Elaboración propia - Enaex

Tabla 27

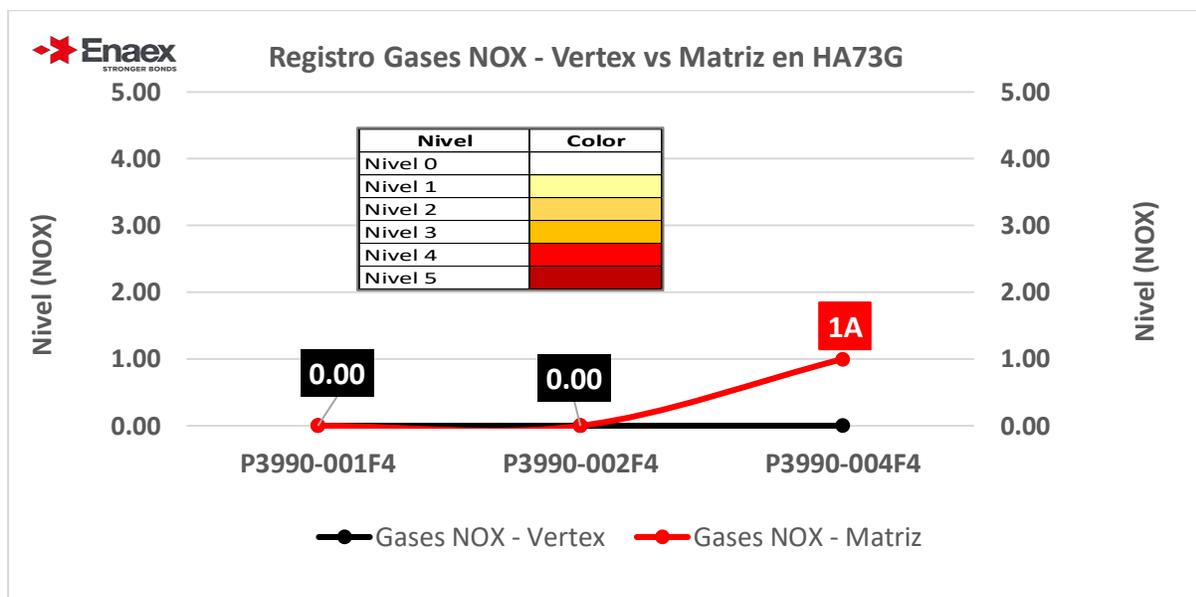
Cuadro comparativo gases NOx vertex vs matriz en HA73G

Gases NOx - Vertex vs Matriz en HA73G		
Proyecto	Gases NOx - Vertex	Gases NOx - Matriz
P3990-001F4	0	Sin Registro
P3990-002F4	0	Sin Registro
P3990-004F4	Sin Registro	1A
Resultado (valor)	NO	SI

Fuente: Elaboración propia - Enaex

Figura 67

Gráfica comparativa emisión de gases NOx vertex vs matriz en HA73G



Fuente: Elaboración propia - Enaex

Tabla 28

Comparativa de características de los 3 proyectos ejecutados

DATOS	PROYECTO 1	PROYECTO 2	PROYECTO 3
Proyecto	P3990-001F4	P3990-002F4	P3990-004F4
#taladros	69	62	125
Diseño de secuencia	Echelón	Diamante	Echelón
Diámetro de taladro (pulg)	10 5/8	10 5/8	10 5/8
Burden B (m)	5	5	5
Espaciamiento - E (m)	5	5	5
Subdrilling+ SD (m)	1	1	1
Altura de banco (m)	15	15	15
Densidad de roca(gr/cc)	2.78	2.81	2.7

Fuente: Elaboración propia

4.6. Análisis económico de resultados

4.6.1 Costos de explosivos

Los costos estimados para la presente investigación están dados por las combinaciones explosivas, materiales de voladura, coste de voladura, se visualizan en la respectiva tabla 29.

Tabla 29

Cuadro de costos en accesorios y explosivos (2024)

Descripción	US \$/uni	USD S
Nitrato de Amonio (Prillex)	US\$/Kg	0.542
Emulsión Matriz	US\$/Kg	0.600
Petróleo D2	US\$/gl	2.700
Emulsión Vertex	US\$/Kg	0.602
L-4	US\$/Kg	1.053
Booster ½ Lb	\$/Pza	2.13
Detonador no electrónico 18m	\$/Pza	1.804
Detonador electrónico Davey Tronic 20m	S/Pza	19.55
Cable M35 (m)	\$/m	0.0442

Fuente: elaboración propia

4.6.2 Cuadro comparativo de los 3 proyectos analizados.

La evaluación de los resultados de los proyectos con emulsion vertex (01 y 02, para ambos proyectos se presentó agua en la mayoría de los taladros.

Se realizó una malla cuadra y corta en los dos proyectos, se aprovechó en ganar 1m de taco intermedio(deck) según diseño para de esta forma hacer una distribución más adecuada de la energía explosiva para poder ganar un porcentaje de finos mayor y la fragmentación necesaria para la cual se implementó, también la distribución del explosivo en las cargas (deck), utilizando el alto VOD de la emulsión de vertex, la carga explosiva debe distribuirse adecuadamente por todo el taladro para detonar y liberar la energía de manera uniforme.

En la tabla 30 para los proyectos 01 y 02 se muestra resultados apropiados para mantener el nivel de finos y P80 que el cliente necesita, cumpliendo con los indicadores evaluados y requeridos para mejorar la fragmentación.

Tabla 30*Comparación económica de los 3 proyectos*

Parámetro	Unidad	F3990-001F4	F3990-002F4	F3990-004F4
Burden-B	M	5	5	5
Espaciamiento - E	M	5	5	5
Subdrilling-SD	M	1	1	1
Altura de banco	M	15	15	15
Altura total	M	16	16	16
#taladros	#	69	62	125
Toneladas rotas reales	T	71,932.5	65,332.5	126,562.5
Densidad de roca	g/cc	2.78	2.81	270
Carga explosiva	Kg/tal	640	640	650
Consumo de emulsión	Kg	27,352	27,352	51,392
Consumo de L-4	Kg	82	77	155
Consumo de Nitrato de Amonio	Kg	11,052	10,355	20,766
Consumo de Diesel	Kg	706	661	1325
Factor de potencia	Kg/t	0.68	0.68	0.69
Explosivos	\$	23,045.11	21,590.98	43,196.99
Costo del Booster	\$	2.13	2.13	2.13
Costo Det. Electrónico	\$	19.55	19.55	19.55
Costo cable M35	\$	22.1	22.1	44.2
Costo de S.I.E.	\$/vold	1,750	1,750	1,750
Costo Total/Proyecto	\$	27,809.05	26,051.4	50,411.19

Fuente: elaboración propia

4.6.3 Ahorro conservando el diseño de carga diferenciada (Deck).

La siguiente tabla 31 muestra el ahorro por tipo de precio unitario del costo por taladro, manteniendo el modelado de la malla de perforadora.

Tabla 31*Ahorro considerando el diseño de carga.*

Explosivo	Proyectos	Malla (BxE)	N° de Taladros	Costo (\$/Tal)	Costo Total (\$)	Ahorrar (\$)
VERTEX HA73G	P3990-001F4	5x5	150	403.03	60,454.45	
MATRIZ HA73G	P3990-004F4	5x5	150	403.29	60,493.42	+ 38.98
*Se está considerando en ambos casos el mismo número de taladros						

Fuente: elaboración propia

Por tales motivos, la Implementación de la mezcla explosiva emulsión vertex en HA73G manteniendo la misma malla 5 x 5, con el objetivo de mejorar la fragmentación, permitiendo los KPIs de voladura comprometidos con el cliente genera resultados esperados con mejoras significativas en los siguientes procesos operativos de la mina.

4.6.4 Proyección de ahorro según el budget 2025

Considerando la cantidad de taladros perforados mensualmente según al presupuesto 2024 y teniendo en cuenta el costo de 403.03 \$/tal para la emulsión vertex y 403.29 \$/tal para emulsión matriz en ambos casos mezcla explosiva HA73G ver siguiente tabla 32 y 33.

Tabla 32

Proyección de ahorro según el Budget 2025

Mes	# taladros (unidad)	Costo total	
		Vertex HA73G (\$)	Matriz HA73G (\$)
Enero	3691	1,487,582.45	1,488,541.53
Febrero	3615	1,456,952.19	1,457,891.53
Marzo	4078	1,643,554.92	1,644,614.56
Abril	4435	1,787,436.51	1,788,588.91
Mayo	6072	2,447,196.05	2,448,773.82
Junio	5870	2,365,784.06	2,367,309.34
Julio	4345	1,751,163.84	1,752,292.86
Agosto	4755	1,916,406.00	1,917,641.55
Septiembre	4429	1,785,018.33	1,786,169.18
Octubre	4958	1,998,221.02	1,999,509.32
Noviembre	6770	2,728,510.75	2,730,269.89
Diciembre	4956	1,997,414.96	1,998,702.74
Total (Millones de dólares)		23,365,241.06	23,380,305.24

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33*Diferencia de costos por explosivo*

COSTO POR EXPLOSIVO	Costo (\$/tal)	Total 2025 (\$)
Vertex HA73G	403.03	23,365,241.06
Matriz HA73G	403.29	23,380,305.24
Ahorro Anual		15,064.19

fuentes: elaboracion propia

Realizando un pronóstico de costos teniendo en cuenta la cantidad de taladros según el Budget 2025, se logró obtener una disminución de costo anual de \$ 15,064.19, utilizando Emulsión Vertex en comparación a la Emulsión Matriz, ambos para una mezcla explosiva HA73G.

4.7. Confrontación de las 3 hipótesis planteadas en la investigación

Con el HA73G emulsión matriz se produce un P80 de 2.41 pulgadas y 45.24 % de finos promedio, en contraposición a los esperado por el área de planta y lo establecido en la hipótesis de estudio era de alcanzar < 3 pulgadas y > a 47% de finos correspondientes. Después de implementar la emulsión vertex para HA73G y analizar los logros operativos obtenidos en término de fragmentación 2,15 pulgadas de P80 y 50.77 % de finos; en la que se compara la hipótesis general y la hipótesis específica 01: mejorar la fragmentación y % de finos, permitiendo alcanzar los objetivos de voladura sin inconvenientes.

Para la hipótesis específica 02: Utilizando emulsión vertex para una mezcla HA73G al respecto de PPV podemos indicar lo siguiente: en el proyecto P3990-001F4 estaba simulado tener una PPV de 122.12mm/s pos-voladura se tiene un registro real de 117.8mm/s para una distancia 35m en el mismo nivel, el proyecto P3990-002F4 el PPV simulado es 73.11 mm/s a una distancia de 81m, registro del sismógrafo nos indica 68.60 mm/s y para el proyecto F3990-004F4 se tiene un PPV simulada de 31.12mm/s para una distancia de 105m, registro del sismógrafo nos indica 26.93 mm/s de los tres proyectos analizados podemos concluir que no se está superando los PPVs

simulados por lo cual estamos dentro de los objetivos requeridos de la voladura para la hipótesis específica 02.

En cuanto para la hipótesis específica 03 con el objetivo de reducir la emisión de humos naranjas se ha tenido resultados satisfactorios en los tres proyectos en análisis para emulsion vertex, teniendo un resultado de “0” nivel cero según a la escala de gases NO_x, para los proyectos con implementación de emulsion vertex, excepcionalmente en el proyecto con emulsion matriz se visualizó puntualmente un nivel de NO_x 1A, de los cuales podemos concluir que se ha tenido resultados satisfactorios en la línea del objetivo del proyecto.

Por otra parte, en ahorro de costos, después de un análisis de precios unitarios y costos considerando los explosivos, accesorios y voladura se obtuvo que con la emulsión matriz (HA73G) se obtiene 403.03 \$/tal y \$ 23,380,305.24 de costo anual con el Budget 2024. Mientras que con la emulsión vertex (HA73G) se obtuvo 403.29 \$/t y \$23,365,24.06 respectivamente. Por lo tanto, con la diferencia anual del Budget 2025 se obtiene un ahorro anual de \$15,064.19 usando la emulsión vertex en comparación a la emulsión matriz. Por lo cual se tiene un ahorro no tan significativo de costos en voladura, pero comparativamente aguas abajo del proceso minero traen ahorros y ventajas considerables.

Sumando a esto, se utilizó la VOD para la emulsión matriz HA73G obteniendo 5,377 m/s y lo registrado con la emulsión vertex para HA73G fue en promedio 5,673 m/s. Así mismo, utilizar la emulsión vertex (HA73G) posibilitara lograr buenos resultados operativos gracias al incremento de la velocidad de detonación”

La VOD de emulsión matriz (HA73G) es menor en comparación con la VOD de la emulsión vertex (HA73G).

4.8. Comparación Emulsión Vertex vs. Matriz para HA73G

Una vez obtenidos los resultados de los tres proyectos evaluados, se procede a compararlos con el fin de contrastar la hipótesis planteada, tomando como referencia la tabla número 34.

Tabla 34

Comparación de resultados utilizando Vertex vs matriz

Parámetro	Unidad	E. Vertex	E. Matriz
		HA73G	HA73G
		F3990-001F4	F3990-004F4
Burden-B	m	5	5
Espaciamento - E	m	5	5
Subdrilling-SD	m	1	1
Altura de banco	m	15	15
Altura total	m	16	16
#taladros	#	69	125
Toneladas rotas reales	T	71932.5	126562.5
Densidad de roca	g/cc	2.78	2.7
Carga explosiva	Kg/tal	640	650
Consumo de emulsión	Kg	27352	51392
Consumo de L-4	Kg	82	155
Consumo de Nitrato de Amonio	Kg	11052	20766
Consumo de Diesel	Kg	706	1325
Factor de potencia	Kg/t	0.68	0.69
Velocidad de detonación- VOD	m/s	5739	5373
Fragmentación-P80	Pulgadas	1.81	2.41
Porcentaje de finos	%	50.68	45.24
Presencia de humos	*	NO	SI
Costo Explosivos	\$	23045.11	43196.99
Accesorios (Booster + NO Electrónicos + Electrónico + M35)	\$	3013.94	5464.2
Costo S.L. E	\$	1750	1750
Costo Total (Voladora)	\$	27809.05	50411.19
Costo (PU)	\$/tal	403.03	403.29
Diferencia costo	\$/tal	0.26	

Fuente: elaboración propia

En tabla 34 se realiza un contraste del proyecto F3990-001F4 emulsión vertex y el proyecto F3990-004F4 para un tipo de emulsión matriz, con los recientes criterios de diseño presentados, notando como existe una variación económica mínima en el costo unitario por taladro en el proyecto F3990-001F4 con 403.03 \$/tal donde en comparación el costo unitario del proyecto F3990-004F4 con 403.29 \$/tal, también se puede observar en el análisis post voladura viendo una mejoría notable con el P80 y el porcentaje de finos que tiene efecto positivo en el proceso aguas abajo del ciclo de minado, igualmente en el impacto ambiental produciendo 0 humos naranjas (gases nitrosos).

4.8.1 Análisis de enfoques del proyecto

Enfoque interno

Las siguientes líneas muestran la visión interna considerado para el estudio de la investigación:

Seguridad

- Durante el desarrollo de la investigación, no se presentaron accidentes.
- Todos los trabajadores de personal cuentan con vigencia de SUCAMEC.
- Ausencia de Tiros cortados durante la investigación.

Operativos

- Conservación de Malla: 5 x 5m
- F.P: 0.68 - 0.69 Kg/t
- P80: 1.81 – 2.48 < 3”
- % de Finos mayor al 50%
- VOD: 5,673 m/s.

Económicos

La implementación de la mezcla explosiva de emulsión vertex para la mezcla HA73G y la conservación del diseño de malla a 5mx5m representa un ahorro anual de \$15,064.19 según Budget 2025.

4.8.2 Enfoque externo

La metodología externa que se ha tenido en cuenta para el análisis de la investigación se muestra en las líneas que siguen:

Legal:

- Se siguen todas las reglas de seguridad y operación durante el desarrollo de las pruebas, incluyendo el control estricto de vibraciones sismográficas, los grados y emisiones de gases aceptables.
- Respetar la Guía Ambiental para Perforaciones y Voladuras en Operativos Mineros y al Lineamiento de Seguridad y Salud Laboral D.S 023 2017 EM.

Ambiental:

- No se detectó gases nitrosos durante la implementación de la emulsión vertex para HA73G.
- El rango de humos NOx es de nivel “0” para los dos proyectos en prueba.

Social:

- Para precaver molestias a la ciudadanía cercana, se vigilan y controlan las oscilaciones:

4.9. Interpretación y discusión de resultados

La investigación se ha centrado en mejorar la fragmentación y porcentaje de finos para las voladuras primarias de mineral en la Unidad Minera Constancia, cuyos resultados pos-voladura para los proyectos analizados superaron la expectativa con un margen ampliamente visible de 2.11 pulgadas de fragmentación y 50.86% de finos menores a una pulgada, cuando el KPI para los

mismos nos indica menores de 3 pulgadas para fragmentación y mayores a 47% de finos menores a una pulgada, como también indicar con respecto al control de vibraciones ningún registro a superado el simulado en gabinete, en cuanto a la comparación de velocidad de onda de detonación el de emulsión vertex es superior que la de una emulsión matriz.

Nuestros resultados son consistentes con los antecedentes revisados, en los cuales se demuestra la mejoría de las voladuras primarias implementando emulsión vertex en mezcla explosiva HA37G, permitiendo garantizar una fragmentación adecuada, porcentaje de finos mayores a lo requerido por planta, buen control de vibraciones y disminución considerable de emisión de gases NOx de esta forma podemos afirmar que los procesos como carguío, chancado y molienda van a ser beneficiados con ahorros considerables en sus procesos.

La investigación realizada por Carpio (2020), demostró que la incorporación de emulsión gasificable en la mezcla explosiva HA55 permitió incrementar en un 5.2 % la velocidad de detonación (VOD) respecto a la emulsión matriz. Asimismo, el efecto de esponjamiento generado por la gasificación redujo el consumo de explosivo, obteniéndose un ahorro económico del 2.62 % por tonelada fragmentada. De manera adicional, se reportó una disminución de la emisión de gases nitrosos, lo que supuso una mejora técnica y ambiental respecto al uso de emulsión matriz.

Por su parte, los resultados de la presente investigación, al implementar la emulsión Vertex HA73G en las voladuras primarias de la Unidad Minera Constancia, muestran un impacto más amplio. Se alcanzó una fragmentación promedio de 2.11 pulgadas (dentro del KPI establecido de < 3 pulgadas) y un 50.86 % de finos menores a una pulgada (superior al KPI requerido de > 47 %). Además, se registró un óptimo control de vibraciones, donde ningún registro superó lo simulado en gabinete, y se evidenció la ausencia total de emisiones de gases naranjas.

Al comparar ambos estudios, se observa que mientras Carpio (2020) centró su análisis en la eficiencia económica inmediata —derivada del ahorro en consumo de explosivo y del incremento en la VOD, la investigación actual aporta un enfoque integral, al mejorar simultáneamente la fragmentación, el porcentaje de finos, el control de vibraciones y la sostenibilidad ambiental. De este modo, la emulsión Vertex no solo garantiza un mejor desempeño técnico, sino que también contribuye a la optimización de los procesos posteriores de carguío, chancado y molienda, generando beneficios económicos indirectos de mayor alcance.

En consecuencia, se puede afirmar que la emulsión Vertex HA73G representa una alternativa más adecuada y sostenible para las voladuras primarias en la Unidad Minera Constancia, al superar los resultados obtenidos con la emulsión matriz gasificable y consolidarse como una opción de mayor valor técnico, económico y ambiental para la operación.

Conclusiones y recomendaciones

CONCLUSIONES

1. Los resultados sugieren que, tras la implementación de la emulsión Vertex en la mezcla explosiva HA73G, se obtuvieron ventajas técnicas, fragmentación promedio de 2.11 pulgadas y un 50.82% de finos, así como ventajas ambientales, evidenciadas en la ausencia de emisiones de gases naranjas. En comparación con la emulsión matriz gasificada aplicada a la misma mezcla explosiva, la emulsión Vertex representa una opción más eficiente y adecuada para las voladuras primarias en la Unidad Minera Constanca.
2. La implementación de la emulsión Vertex en el diseño HA73G generó, en promedio, un P80 de entre 1.81 y 2.68 pulgadas, así como más del 50.70% de finos. En ambos proyectos ejecutados con esta emulsión se cumplieron los objetivos establecidos, evidenciando una mejora en los resultados operativos. En particular, el porcentaje de finos aumentó de manera significativa en comparación con los obtenidos con la emulsión matriz aplicada en el mismo diseño HA73G.
3. Con la implementación de emulsion vertex para HA73G se ha logrado controlar las PPV según los resultados simulados para el proyecto 001 un PPV de 117.8mm/s, simulada 122.12mm/s a 35m de distancia en el mismo nivel, para el proyecto 002 un PPV 68.60mm/s, simulado 73.11mm/s a una distancia de 81m en el mismo nivel los cuales se ubican por debajo del límite implantado según el reglamento español UNE 22.381. (Guía ambiental para la Perforación y Voladuras en Operaciones Mineras), en cuanto a la Emulsión matriz para HA73G en el proyecto 004, el registro de vibraciones fue de PPV 26.93mm/s, simulada 31.12mm/s para una distancia de 105 metros.
4. En cuanto al control de emisión de humos naranjas según la implementación de la emulsion vertex para los proyectos 001 y 002 cargados con la mezcla HA73G fue de 0% de gaseosos NOx (ausencia de humos naranjas), en cuanto al proyecto 004 para la Emulsión matriz se evidenció un nivel localizado de nivel 1A.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda la implementación progresiva y estandarizada de la emulsión Vertex HA73G en las voladuras primarias de la Unidad Minera Constancia, debido a los beneficios comprobados en fragmentación, generación de finos y reducción de emisiones gaseosas. Asimismo, se sugiere realizar un monitoreo continuo de parámetros técnicos y ambientales (P80, porcentaje de finos, VOD, vibraciones y presencia de gases), con el fin de garantizar la sostenibilidad y optimización del proceso de voladura.
2. Se debe realizar un seguimiento continuo de la densidad de la mezcla, la cual debe mantenerse en torno a 1.30 ± 0.02 g/cc. La densidad de copa o densidad final, a los 30 minutos de seguimiento, debe situarse entre 1.14 y 1.15 g/cc, utilizando un 0.3 % de solución sensibilizante (L-4), con el objetivo de lograr el máximo esponjamiento de copa en ese intervalo de tiempo con la finalidad de conseguir el máximo esponjamiento de copa a los 30 minutos.
3. Se sugiere, a partir de la implementación de la emulsión Vertex, evaluar la posibilidad de ampliar la malla de perforación de 5x5 m a 5.5x5.5 m, dado que la mezcla HA73G con emulsión Vertex presenta un buen VOD, lo que indica una alta carga energética capaz de transferirse eficazmente entre taladros durante la detonación, sin descuidar el control preciso de las vibraciones en cada voladura.
4. Se recomienda el uso de cargas compartidas (*deck*) para optimizar la carga lineal del explosivo, manteniendo el diseño de malla de 5x5 m y distribuyendo de manera homogénea la carga explosiva. Asimismo, se sugiere continuar con las buenas prácticas aplicadas en cada proceso de voladura, sobre todo buen control de calidad a la mezcla explosiva las cuales han permitido alcanzar los objetivos trazados, especialmente en la reducción de emisiones de gases nitrosos con la implementación de la emulsión Vertex.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, A. (2016). Optimización de parámetros de tronadura en función de explosivos de alta energía en sociedad contractual minera El Alba. Universidad de Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/139156>
- Ames, V., & León, G. (2007). Tecnología de Explosivos. Fondo Editorial PUCP.
- Arrocha, Y. (2021). Normas APA Séptima Edición, 2020. Universidad Especializada de las Américas. Obtenido de <http://repositorio2.udelas.ac.pa/handle/123456789/333>
- Bampfield, H., Breakwell, J., & Villamagna, F. (1984). Emulsion explosive composition. Fernie, British Columbia. Obtenido de <https://patents.google.com/patent/EP0107407A2/en>
- Carpio, E. (2020). Optimización del proceso de voladura mediante el uso de emulsión gasificable en unidad minera constancia. Universidad Nacional de San Agustín. Obtenido de <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/646bc186-1e1f-4ae2-8996-6f8a17535896>
- Chávez, L. (2014). Optimización de la fragmentación en los proyectos de voladura primaria en la zona norte del tajo San Pedro Sur, Minera La Zanja. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Obtenido de <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/item/184d86b4-74c5-4841-ab06-f78c1e1ee1c1>
- Enaex S.A. (2008). Manual de tronadura. Enaex S.A. Obtenido de <https://www.chichofaim.com/biblioteca-digital/librosmanuales/manual-tronadura-enaex>
- Exsa. (2012). Manual práctico de Voladura. Exsa. Obtenido de <https://minedeskcorp.com/libro-manual-practico-de-voladura-exsa/>
- Famesa Explosivos S.A.C. (2018). Compromiso Eco-amigable para la gran minería, respuesta para los humos naranja. Famesa Explosivos S.A.C.
- Gallardo, E. (2023). Implementación de la emulsión gasificable para mejorar la fragmentación en el proceso de voladura. Universidad Nacional de Ingeniería. Obtenido de <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/26890>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación. McGraw Hill Education. Obtenido de <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- Konya, C., & Albarrán, E. (1998). Diseño de voladuras. Cuicatl. Obtenido de <https://biblioteca.unasam.edu.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=19198>
- López, C., López, E., & Garcia, P. (2003). Manual de perforación y voladura de rocas. Instituto Geológico y Minero de España. Obtenido de <https://www.geologiaviva.info/wp-content/uploads/2021/07/Manual-de-Perforacion-y-Voladura-de-Rocas.pdf>

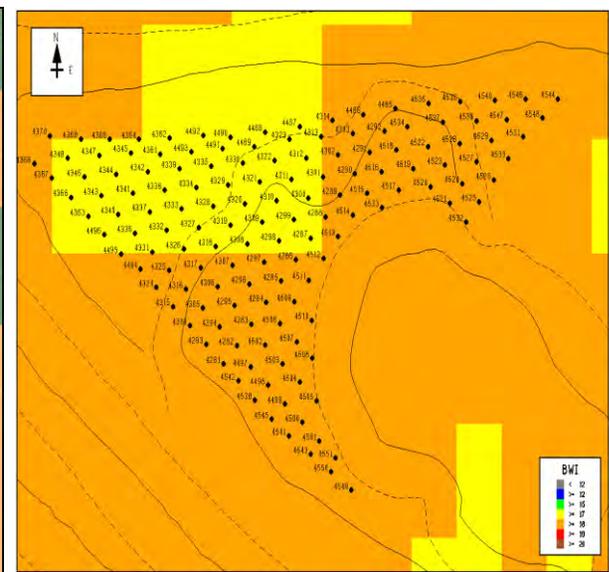
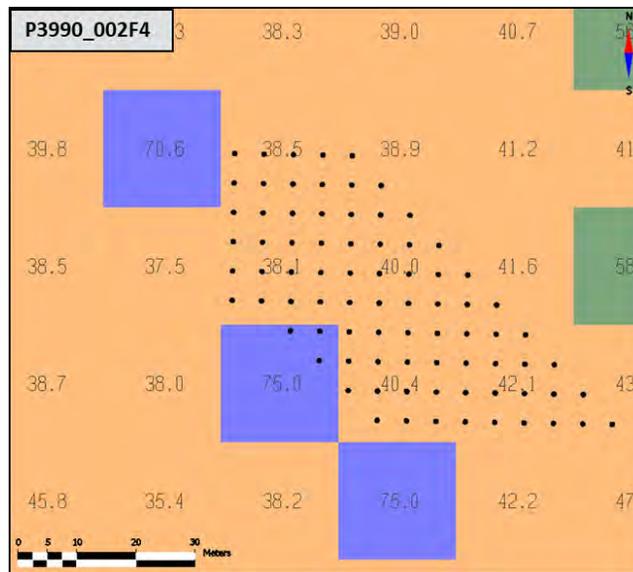
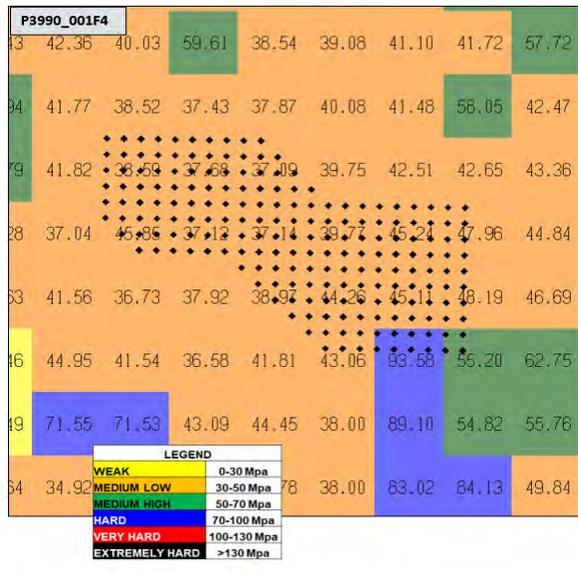
- Medina, R. (2014). Evaluación técnico-económica ecológica de los resultados de las pruebas realizadas usando emulsiones gasificadas en Cuajone – Southern Perú. Universidad Nacional de Ingeniería. Obtenido de <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/1273>
- Morhard, R. (1987). Explosives and rock blasting. Atlas Powder Co. Obtenido de <https://www.abebooks.com/9780961628406/Explosives-Rock-Blasting-Morhard-Robert-0961628405/plp>
- Mujica, R. (2017). Mejoramiento de la voladura utilizando emulsion gasificada (MEQ73) en el tajo Ferrobamba – M.M.G. las Bambas -Apurimac. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Obtenido de <http://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/3467>
- Music, A. (2007). Diagnóstico y optimización de disparos en desarrollo horizontal, Mina El Teniente. Universidad de Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104674>
- Quiroga, M. (2013). Análisis de la perforación y tronadura en El Soldado. Universidad de Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114484>
- Vargas, J. (2022). Optimización de la fragmentación de rocas mediante la aplicación de redes neuronales artificiales. Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12918/7152>
- Vilela, W. (2015). Análisis de factibilidad para el uso de anfo pesado a base de emulsión gasificable en minera Yanacocha. Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/5950>
- Zapana, E. (2018). Implementacion de un agente de voladura altamente energetico (vistis) en macisos rocosos competentes de mineral, aumentando la produccion y disminuyendo la granulometria CIA Minera las Bambas. Universidad Nacional de San Agustín. Obtenido de <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/30de2bfa-8f12-47c1-b2fd-e44de76f6d05>

ANEXOS

1. Anexo A – Polígonos de resistencia
2. Anexo B – SPI
3. Anexo C – Registro de vibraciones
4. Anexo D – Matriz de Consistencia
5. Anexo E – Registro VOD

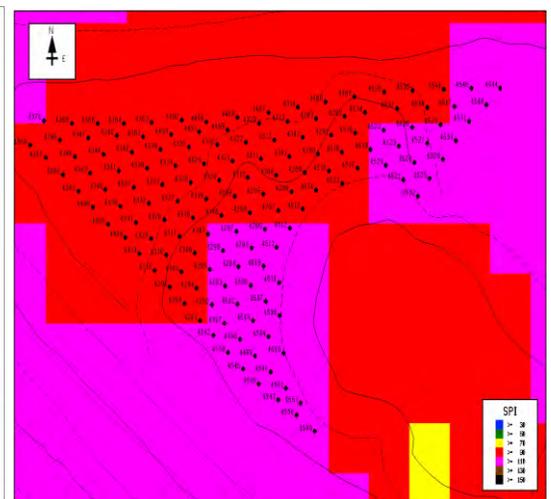
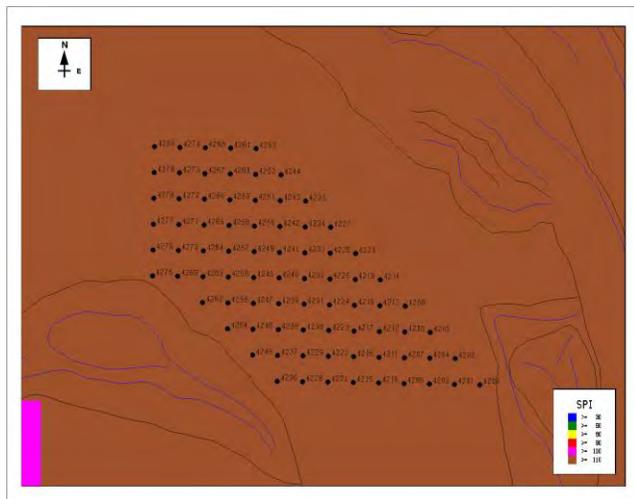
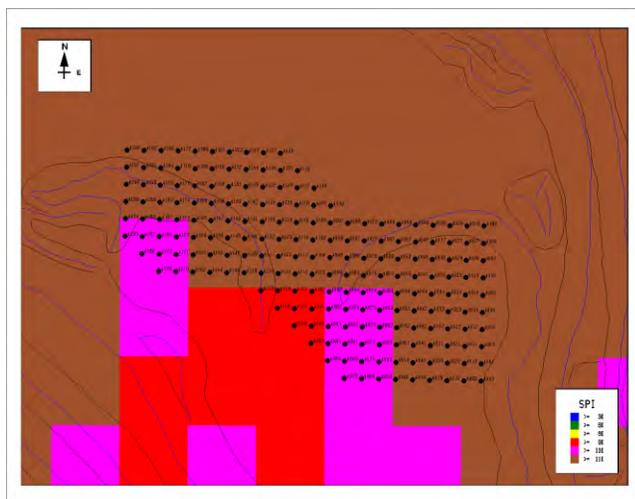
Anexo A – Polígonos de resistencia

CONSTANCIA/PAMPACANCHA														
Ensanchamiento 10% (TALADRO) gropa = 2.5					Desmonte (version 09FEB2024)									
Resistencia Mpa	e	b	h	ton x taladro	Tipo de Explosivo	φ"	S.P	F.P	Kg/tal	h carga	Aire			Taco
	(m)	(m)	(m)			(pulg)	(m)	Kg/tal	Explosivo	(m)	(m) Inf	(m) Med	(m) Sup	(m)
0 - 30	9	9	15	3037.5	HA55G(seco)	9 7/8"	0	0.2	608	9.1	1	0	0.9	4
					HA73G(agua)									
30 - 50	9	9	15	3037.5	HA55G(seco)	10 5/8"	0	0.22	668	8.7	1	0	1.3	4
					HA73G(agua)									
50 - 70	9	9	15	3037.5	HA55G(seco)	10 5/8"	0	0.24	729	9.5	1	0	0	4.5
					HA73G(agua)									
70 - 100	7.5	7.5	15	2109.375	HA55G(seco)	10 5/8"	0.5	0.35	738	9.6	1	0	0.9	4
					HA73G(agua)									
100 - 130	7	7	15	1837.5	HA55G(seco)	9 5/8"	0.5	0.37	680	10.2	1	0	0	4.3
					HA73G(agua)									
>130	5	5	15	937.5	HA55G(seco)	10 5/8"	0.5	0.68	640	10	1	0	0	4.3
					HA73G(agua)									

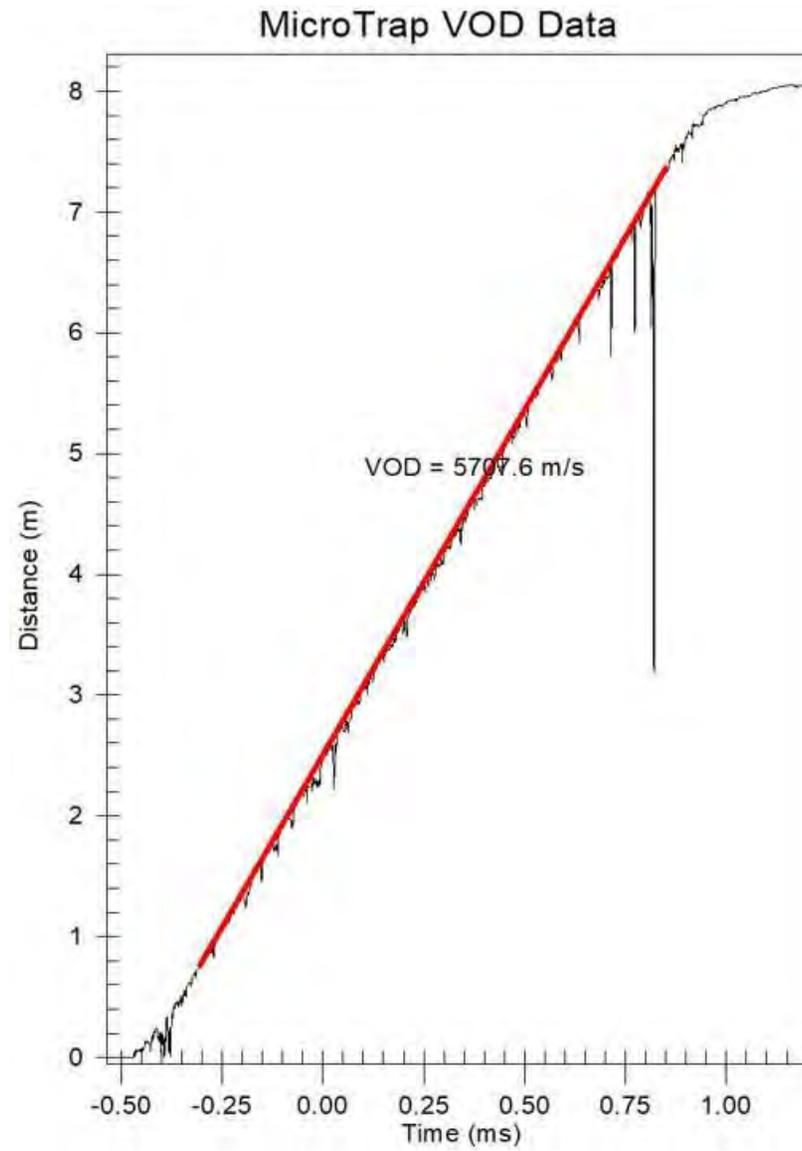


Anexo B – SPI

CONSTANCIA (Potasico / Skarn)														
Ensanchamiento 10% (TALADRO) g-roca = 2.5					Mineral (version 09FEB2024)									
SPI	e	b	h	ton x taladro	Tipo de Explosivo	φ"	S.P	F.P	Kg/tal	h carga	Aire			Taco
	(m)	(m)	(m)			(pulg)	(m)	Kg/tal	Explosivo	(m)	(m) Inf	(m) Med	(m) Sup	(m)
< 20	8	8	15	2400	HA55G(seco)	10 5/8"	0	0.32	768	10.0	1.0	0.0	0.0	4.0
					HA73G(agua)									
30	7.5	7.5	15	2109	HA55G(seco)	10 5/8"	0	0.34	717	9.3	1.0	0.0	0.7	4.0
					HA73G(agua)									
60	7.5	7.5	15	2109	HA55G(seco)	10 5/8"	0	0.36	759	9.9	1.0	0.0	0.0	4.1
					HA73G(agua)									
80	6.5	6.5	15	1584	HA55G(seco)	10 5/8"	0	0.47	745	9.7	1.0	0.0	0.0	4.3
					HA73G(agua)									
90	6	6	15	1350	HA55G(seco)	9 5/8"	0	0.5	675	10.2	0.8	0.0	0.0	4.0
					HA73G(agua)									
100	6	6	15	1350	HA55G(seco)	10 5/8"	0	0.55	743	9.6	1.0	0.0	0.5	3.9
					HA73G(agua)									
>110	6	6	15	1350	HA55G(seco)	11"	0	0.6	810	9.8	1.0	0.0	0.4	4.2
					HA73G(agua)									



Anexo C – Registro VOD



Anexo D- Registro de vibraciones



PV 01_Bco. 3990_Fase V Constancia.



Data/Time Vert at 12:25:50 July 25, 2023
 Trigger Source Geo: 2.540 mm/s, Mic: 68.95 pa.(L)
 Range Geo: 254.0 mm/s
 Record Time 3.0 sec at 1024 sps
 Job Number: 1
 Operator/Setup: Operator1/constancia.nsb

Serial Number MP14388 V 10-75 Minimate Pro 4
 Battery Level 3.7 Volts
 Unit Calibration November 4, 2022 by Istantel
 Geo1 Calibration SE14093, November 4, 2022 by Istantel
 Mic Calibration SL12619, September 16, 2022 by Istantel
 File Name _TEMP.EVT

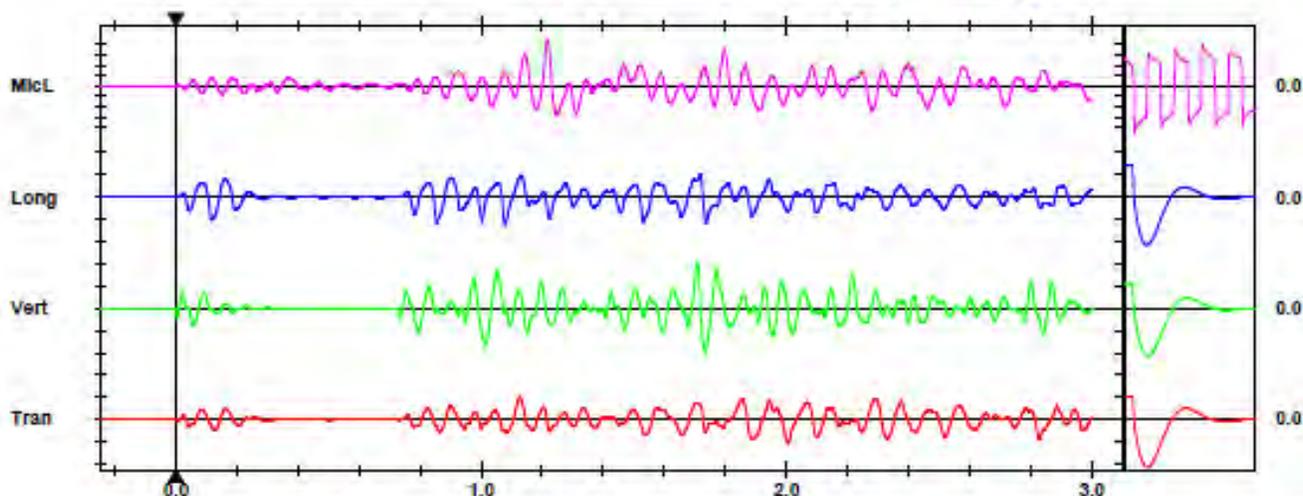
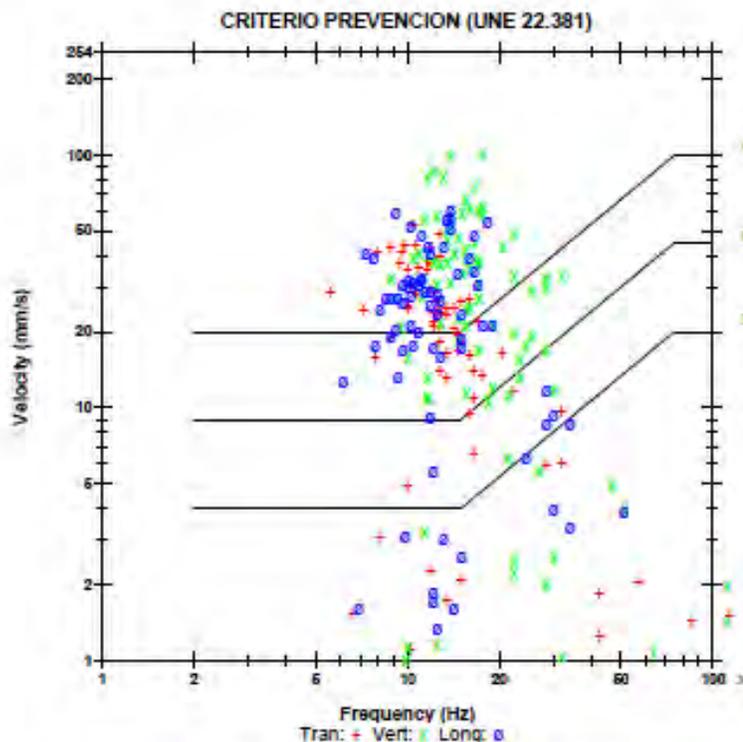
Notes
 Location CONSTANCIA
 Client HUBBAY PERU SA
 Company
 General note

Post Event Notes
 Coordenadas punto de Monitoreo: E: 201557, N: 8399401,
 Distancia: 34, VPP Teórico: 82.12, VPP Max. Registrado 102.00
 mm/s, Carga Operante: 620 Kg.

Microphone Linear Weighting
 PSPL 221.3 pa.(L) at 1.216 sec
 ZC Freq 16 Hz
 Channel Test Passed (Freq = 20.4 Hz Amp = 1790 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	52.68	102.0	60.60	mm/s
ZC Freq	10	18	14	Hz
Time (Rel. to Trig)	2.005	1.709	1.078	sec
Peak Acceleration	0.658	1.599	0.941	g
Peak Displacement	0.734	1.129	0.803	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.2	6.9	7.4	Hz
Overwriting Ratio	4.5	4.7	4.8	

Peak Vector Sum 117.8 mm/s at 1.735 sec



Time Scale: 0.20 sec/div Amplitude Scale: Geo: 50.00 mm/s/div Mic: 50.00 pa.(L)/div
 Trigger =

Sensor Check

Anexo E – Matriz de Consistencia

“IMPLEMENTACIÓN DE EMULSION VERTEX Y OTRO PARA MEJORAR LA FRAGMENTACIÓN DE LAS VOLADURAS PRIMARIAS EN LA UNIDAD MINERA CONSTANCIA - CUSCO - PERÚ”				
PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA
<p>Problema Principal:</p> <p>¿Cómo impacta la implementación de emulsión Vertex y otro en la mejora de la fragmentación, el incremento del % de finos, control de vibraciones y la disminución de humos naranjas en la Unidad Minera Constancia?</p>	<p>Objetivo General:</p> <p>Mejorar la fragmentación en el proceso de voladuras primarias a partir de la implementación de emulsión Vertex y otro, mejorando la P80, el % de finos, controlando el nivel de vibraciones y minimizando la emisión de gases nitrosos.</p>	<p>Hipótesis General:</p> <p>La implementación de Emulsión vertex y otro impactará en la mejora de la fragmentación y % de finos permitiendo alcanzar los objetivos de voladura en la unidad minera constancia.</p>	<p>Variables Dependientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Monitoreo de vibraciones. • Monitoreo de humos naranjas. 	<p>Tipo de Investigación:</p> <p>La actual investigación es tipo descriptivo y del mismo modo aplicativo ya que se realiza la implementación de emulsión vertex en el carguío de los diferentes proyectos de prueba en tajo constancia y el uso de equipos de tecnología necesarios como PortaMetrcs y otros para determinar una fragmentación (P80) y % de finos adecuadas de las voladuras primarias planificadas</p>
<p>Problemas Específicos:</p> <p>a) ¿Con la implementación de emulsión Vertex y otro se logrará mejorar la fragmentación y aumentar el % de finos en la Unidad Minera Constancia?</p> <p>b) ¿Con la implementación de emulsión vertex y otro se logrará controlar el nivel de vibraciones en la unidad minera constancia?</p> <p>c) ¿Con la implementación de emulsión vertex y otro se logrará minimizar la emisión de gases nitrosos en la unidad minera constancia?</p>	<p>Objetivo Especifico:</p> <p>a) Mejorar la fragmentación y % de finos en las voladuras primarias a partir de la implementación de emulsión vertex y otro en la unidad minera constancia.</p> <p>b) Controlar las vibraciones a partir de la implementación de emulsión vertex y otro en la unidad minera constancia.</p> <p>c) Minimizar la emisión de gases nitrosos a partir de la implementación de emulsión vertex y otro en la unidad minera constancia.</p>	<p>Hipótesis Especifica:</p> <p>a) Con la implementación de la emulsión vertex y otro se logrará mejorar la fragmentación y % de finos, control de vibraciones y minimizar los humos naranjas en la unidad minera constancia.</p> <p>b) Con la implementación de la emulsión vertex y otro se logrará controlar los niveles de vibraciones en la unidad minera constancia.</p> <p>c) Con la implementación de la emulsión vertex y otro se logrará minimizar la emisión de humos naranjas en la unidad minera constancia.</p>	<p>Variables Independientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Implementación de la emulsion vertex. <p>Indicadores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Granulometría (P80) pulgadas • Porcentaje de finos (%) • Costo explosivo por taladro (\$/tal) • Nivel de vibraciones mm/s • Escala de NOx (1A-5C) 	<p>Diseño de la Investigación:</p> <p>La actual investigación es tipo experimental, pues abarca diferentes procedimientos de trabajo en campo para determinar la fragmentación y % de finos adecuados en los diferentes proyectos de voladura.</p> <p>Técnicas:</p> <p>Trabajos de Campo y Gabinete:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Uso de Software como PortaMetrcs y otros. • Equipos para medir nivel de vibración (sismógrafo). • Escala para medir % de humos naranja. • Equipo para medir VOD (Microtrap) • Kit de densidades y otros. • Bibliografía. (antecedentes) • Observación simple y recojo de imágenes.