

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**ANÁLISIS DE VIBRACIONES CON CÁPSULAS DE PLASMA
PARA EL CONTROL DE INFRAESTRUCTURAS
EN LA U.M. QUELLAVECO, 2020**

TESIS

Presentado por:

Bach. Alex Alonso Ticona Huamán

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

TACNA – PERÚ

2023

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

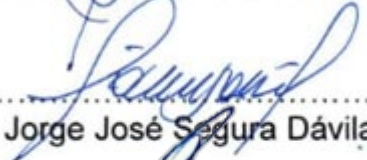
ANÁLISIS DE VIBRACIONES CON CÁPSULAS DE PLASMA PARA EL CONTROL DE INFRAESTRUCTURAS EN LA U.M. QUELLAVECO, 2020

Tesis sustentada y aprobada el 21 de setiembre del 2023, estando el Jurado Calificador integrado por:

PRESIDENTE


.....
Dr. Dante Ulises Morales Cabrera

1er. MIEMBRO
(SECRETARIO)


.....
Dr. Jorge José Segura Dávila

2do. MIEMBRO
(VOCAL)


.....
Dr. Edga Faustino Taya Osorio

ASESOR


.....
Dr. Carlos Huisa Ccori

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, CARLOS HUISA CCORI en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de FACULTAD (indicar de Facultad/Posgrado) N° 06339-2020-FAIN de la TESIS (indicar lo que corresponda: tesis/trabajo de investigación/ trabajo académico/trabajo de suficiencia profesional), titulado:

Análisis de vibraciones con cápsulas de plasma para el control de infraestructuras en la U.M. Qwallavaco, 2020

Presentado por el Bachiller (indicar estudiante/egresado/bachiller/titulando/magister)

Alex Alonso Ticona Huamán (2010-34586)

Para optar el (indicar el grado académico/título profesional/título de segunda especialidad profesional)

TÍTULO profesional

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual

TURNITIN

cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 10 % Por lo que,

CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la TESIS (indicar si es: tesis/trabajo de investigación/ trabajo académico/trabajo de suficiencia profesional) enunciado líneas arriba, la cual está expedita para continuar con los trámites para la obtención de TÍTULO profesional (indicar: grado académico/título profesional/Título de segunda especialidad profesional), según corresponda consiguientemente la publicación en el repositorio institucional.

FIRMA ASESOR

Nombres y apellidos, DNI

CARLOS HUISA CCORI
0041 7032



Huella digital

FIRMA TESISTA

Nombres y apellidos, DNI

Alex Alonso Ticona Huamán
41523450



Huella digital

DEDICATORIA

A mi madre Susana Huamán, que siempre creyó en mí, por su enseñanza de ser perseverante, tener fe, amor propio, empatía con los demás y creer en Dios. A mi padre Julián Ticona, por el apoyo a seguir adelante y buenos consejos. A mis hermanos William, Richard, Edwing, Elvert y Susan, que formaron parte de mi desarrollo y aportaron a mi formación tanto personal y como profesional, gracias.

AGRADECIMIENTO

Mi especial agradecimiento a mi querida alma mater Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas y a los docentes por el apoyo en mi formación profesional, y de forma especial a mi mentor, por haberme guiado en la elaboración del presente trabajo.

Muchas gracias a todos.

CONTENIDO

| | Pág. |
|-------------------|------|
| DEDICATORIA | iii |
| AGRADECIMIENTO | iv |
| CONTENIDO | v |
| ÍNDICE DE ANEXOS | ix |
| ÍNDICE DE FIGURAS | x |
| ÍNDICE DE TABLAS | xii |
| RESUMEN | xiv |
| ABSTRACT | xv |
| INTRODUCCIÓN | 1 |

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

| | |
|-----------------------------------------|---|
| 1.1. Descripción del problema | 3 |
| 1.1.1. Antecedentes del problema | 3 |
| 1.1.2. Problemática de la investigación | 5 |
| 1.2. Formulación del problema | 7 |
| 1.2.1. Problema general | 7 |
| 1.2.2. Problemas específicos | 7 |

| | | |
|--------|-----------------------------|----|
| 1.3. | Justificación e importancia | 7 |
| 1.4. | Alcances y limitaciones | 8 |
| 1.5. | Objetivos | 9 |
| 1.5.1. | Objetivo general | 9 |
| 1.5.2. | Objetivos específicos | 9 |
| 1.6. | Hipótesis | 10 |
| 1.6.1. | Hipótesis general | 10 |
| 1.6.2. | Hipótesis específicas | 10 |

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

| | | |
|----------|-----------------------------------------------|----|
| 2.1. | Antecedentes del estudio | 11 |
| 2.2. | Bases teóricas | 16 |
| 2.2.1. | Proyecto minero Quellaveco | 16 |
| 2.2.2. | Fragmentación con plasma | 21 |
| 2.2.3. | Cápsulas de plasma | 25 |
| 2.2.4. | Vibraciones con plasma | 30 |
| 2.2.5. | Monitoreo y control de vibraciones | 32 |
| 2.2.6. | Predicción de vibraciones | 33 |
| 2.2.6.1. | Campo lejano | 35 |
| 2.2.6.2. | Campo cercano | 35 |
| 2.2.7. | Norma nacional para el control de vibraciones | 36 |

| | |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.8. Normas internacionales para el control de vibraciones | 38 |
| 2.2.8.1. Norma alemana DIN 4150-1999 | 39 |
| 2.2.8.2. Norma suiza SN 640312-1978 | 40 |
| 2.2.8.3. Norma española UNE 22-381-93 | 40 |
| 2.2.8.4. Norma portuguesa NP2075 – 1995 | 42 |
| 2.3. Definición de términos | 43 |
| 2.3.1. Velocidad pico partícula (VPP) | 43 |
| 2.3.2. Infraestructura | 43 |
| 2.3.3. Impactos de voladura | 44 |
| 2.3.4. Macizo rocoso | 44 |
| 2.3.5. Propiedades de la onda | 45 |
| 2.3.6. Cara libre | 46 |
| 2.3.7. Factor de carga | 46 |
| 2.3.8. Desplazamiento | 47 |

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

| | |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Tipo y diseño de la investigación | 48 |
| 3.2. Población y muestra | 49 |
| 3.3. Operacionalización de variables | 51 |
| 3.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos | 53 |
| 3.5. Procesamiento y análisis de datos | 55 |

| | |
|------------------------------------------------------|----|
| 3.5.1. Recolección de datos | 55 |
| 3.5.2. Procesamiento de datos | 72 |
| 3.5.3. Análisis de datos con estadística descriptiva | 86 |

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

| | |
|----------------------------------------------------|-----|
| 4.1. Resultados de la investigación | 93 |
| 4.2. Análisis y pruebas del contraste de hipótesis | 94 |
| 4.2.1. Magnitud de vibración | 94 |
| 4.2.2. Cumplimiento de normativa en vibraciones | 95 |
| 4.2.3. Factibilidad económica en zonas críticas | 98 |
| 4.2.4. Influencia del uso de cápsulas de plasma | 99 |
| 4.3. Discusión de resultados | 101 |
| 4.3.1. Resultado de la magnitud de vibración | 101 |
| 4.3.2. Resultado del cumplimiento de normativa | 102 |
| 4.3.3. Resultado de la factibilidad económica | 104 |
| 4.3.4. Resultado del uso de cápsulas de plasma | 105 |

| | |
|---------------------|-----|
| CONCLUSIONES | 107 |
|---------------------|-----|

| | |
|------------------------|-----|
| RECOMENDACIONES | 108 |
|------------------------|-----|

| | |
|-----------------------------------|-----|
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 109 |
|-----------------------------------|-----|

| | |
|---------------|-----|
| ANEXOS | 115 |
|---------------|-----|

ÍNDICE DE ANEXOS

| | Pág. |
|-------------------------------------------------------|------|
| Anexo 1. Matriz de consistencia | 116 |
| Anexo 2. Ubicación del proyecto Quellaveco | 117 |
| Anexo 3. Mapa geológico Toquepala Cuajone Quellaveco | 118 |
| Anexo 4. Mapa geológico local del proyecto Quellaveco | 119 |
| Anexo 5. Procedimiento de fragmentación con plasma | 120 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|-------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1. Árbol de problema, causa y efectos. | 6 |
| Figura 2. Equipo de perforación Sandvik | 19 |
| Figura 3. Proceso de fragmentación con plasma | 23 |
| Figura 4. Diagrama de proceso de fragmentación con plasma | 24 |
| Figura 5. Sistema de fragmentación con plasma | 27 |
| Figura 6. Criterio de profundidad de entierro a escala (SD) | 28 |
| Figura 7. Diagrama de proceso de carguío | 29 |
| Figura 8. Propagación mecánica de ondas de cuerpo y superficiales | 31 |
| Figura 9. Efectos mecánicos de la voladura | 34 |
| Figura 10. Secuencia de disparo con cara libre | 46 |
| Figura 11. Muestra-01 de fragmentación en flotación PY-109 | 49 |
| Figura 12. Muestra-02 de fragmentación en relaves PY-055 | 50 |
| Figura 13. Diseño de malla y amarre del PY-109 | 56 |
| Figura 14. Diseño de carga del PY-109 con altura 5 y 7 m | 57 |
| Figura 15. Zonas críticas del PY-109 | 58 |
| Figura 16. Curva de fragmentación flotación PY-109 | 59 |
| Figura 17. Registro y análisis de vibraciones del PY-109 | 60 |
| Figura 18. Control de muestra-01 en flotación PY-109 | 61 |
| Figura 19. Diseño de malla y amarre del PY-055 | 62 |

| | |
|------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 20. Diseño de carga del PY-055 para precorte y producción | 63 |
| Figura 21. Factura de muestra-02 en relaves PY-055 | 64 |
| Figura 22. Registro y análisis de vibraciones del PY-055 | 65 |
| Figura 23. Curva de fragmentación relaves PY-055 | 66 |
| Figura 24. Control de muestra-02 en relavera PY-055 | 67 |
| Figura 25. Diseño de carga y registro de vibración del PY-110 | 68 |
| Figura 26. Control de vibración de la voladura PY-110 | 69 |
| Figura 27. Diseño de carga y registro de vibración del PY-019 | 70 |
| Figura 28. Control de vibración de la voladura PY-019 | 71 |
| Figura 29. Variables del cálculo de la SD | 73 |
| Figura 30. Criterio de la SD según campo cercano | 74 |
| Figura 31. Fragmentación D90 por fragmentador | 87 |
| Figura 32. Vibración por fragmentador | 88 |
| Figura 33. Vibración por fragmentador | 89 |
| Figura 34. Caja de bigotes por variable | 90 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|---------------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 1. Relación de Fc de proyectos | 20 |
| Tabla 2. Equipos de voladuras con explosivo | 20 |
| Tabla 3. Equipos de voladuras con plasma 4TH | 21 |
| Tabla 4. Comparación del uso de plasma y explosivos | 25 |
| Tabla 5. Características del plasma versus explosivos | 26 |
| Tabla 6. Factores influyentes en la generación de vibraciones | 30 |
| Tabla 7. Velocidad pico partícula máxima | 37 |
| Tabla 8. Efectos de la VPP sobre el macizo rocoso | 38 |
| Tabla 9. Parámetros de vibración por edificación DIN 4150 | 39 |
| Tabla 10. Parámetros de vibración por edificación SN 640312-1978 | 40 |
| Tabla 11. Parámetros de vibración por estructura UNE 22-381-1993 | 41 |
| Tabla 12. Parámetros de vibración en distintas edificaciones NP2074 | 42 |
| Tabla 13. Operacionalización de variables independientes | 51 |
| Tabla 14. Operacionalización de variables dependientes | 52 |
| Tabla 15. Operacionalización de variables asociadas | 52 |
| Tabla 16. Distancia de monitoreo según proyecto | 72 |
| Tabla 17. Cálculo del SD de los proyectos con plasma | 75 |
| Tabla 18. Monitoreo de esfuerzos vibratorios | 76 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 19. Criterio de daño de Oriard | 77 |
| Tabla 20. Normativa vigente en control de vibraciones | 78 |
| Tabla 21. Proyectos de fragmentación con plasma | 79 |
| Tabla 22. Proyectos de voladura con explosivos | 80 |
| Tabla 23. Costo unitario del fragmentador | 83 |
| Tabla 24. Costo beneficio del fragmentador | 85 |
| Tabla 25. Datos de proyectos por fragmentador | 86 |
| Tabla 26. Prueba de normalidad de variables | 91 |
| Tabla 27. Análisis estadístico descriptivo de variables | 92 |
| Tabla 28. Análisis de homogeneidad de varianzas | 92 |
| Tabla 29. Resumen de resultados por fragmentador | 93 |
| Tabla 30. Prueba hipótesis para el indicador vibración | 95 |
| Tabla 31. Prueba hipótesis para el cumplimiento de la normativa | 97 |
| Tabla 32. Prueba hipótesis para el indicador costo unitario | 99 |
| Tabla 33. Prueba hipótesis para el indicador fragmentación | 100 |
| Tabla 34. Cumplimiento de normativa vigente según criterios | 103 |

RESUMEN

El presente estudio tiene por objetivo analizar la efectividad del uso de plasma para controlar las vibraciones en las infraestructuras cercanas; dando solución a los daños de infraestructuras y estructuras cercanas, como plantas de beneficio, perfiles de estabilidad y accesos de la U.M. Quellaveco, ocasionadas por las altas vibraciones que se ejercen producto de los explosivos utilizados. Lo que puede generar pérdidas económicas a mediano y largo plazo, reflejadas en la productividad y seguridad de la operación. La metodología de investigación es de carácter aplicada, se centraliza en la observación y registro de resultados de los proyectos de fragmentación con el uso de plasma y explosivo, a fin de ser analizados desde un aspecto técnico, normativo y económico, enfocados a los resultados de fragmentación, vibración y costos; para evaluar las bondades de la aplicación del plasma y su impacto en el control de vibraciones de la U.M. Quellaveco. El uso estratégico del plasma permitirá cumplir con las normativas vigentes y salvaguardar la integridad de las infraestructuras cercanas, mejorando la fragmentación en 4 % y reduciendo en 67 % la vibración.

Palabras clave: plasma, vibración, control de infraestructuras.

ABSTRACT

The objective of the present study is to analyze the effectiveness of the use of plasma to control vibrations in nearby infrastructures; providing a solution to the damage to nearby infrastructures and structures, such as beneficiation plants, stability profiles and accesses of the Quellaveco project, caused by the high vibrations exerted as a result of the explosives used. What can generate economic losses in the medium and long term, reflected in the productivity and safety of the operation. The research methodology is of an applied nature, it focuses on the observation and recording of the results of the fragmentation projects with the use of plasma and explosives, in order to be analyzed from a technical, regulatory and economic aspect, focused on the results of fragmentation, vibration and costs; for evaluate the benefits of the application of plasma and its impact on the control of vibrations of the Quellaveco project. The strategic use of plasma will make it possible to comply with current regulations and safeguard the integrity of nearby infrastructures, improving fragmentation by 4% and reducing in 67 % the vibration.

Keywords: plasma, vibration, infrastructure control.

INTRODUCCIÓN

La U.M. Quellaveco, concesión de Anglo American Perú, es un yacimiento de tipo pórfido de cobre y molibdeno, donde se viene desarrollando oportunidades de mejora en el control de vibración de la fragmentación del macizo rocoso en infraestructuras cercanas. La aplicación de nuevas tecnologías, como las cápsulas de plasma, que nos permite mejorar los diseños y reducir los tiempos de reinicio de operaciones; generando una mejora en la fragmentación D90 y reducción de la vibración, ruido, polvo y proyección de rocas, en base a los resultados de los proyectos PY-109 plataforma de flotación y PY-055 plataforma de relaves, respecto al uso de explosivos en los proyectos PY-110 plataforma de molibdeno y PY-019 plataforma de espesadores. Bajo este principio se ha desarrollado el presente estudio titulado “Análisis de Vibraciones con Cápsulas de Plasma para el Control de Infraestructuras en la U.M. Quellaveco, 2020” que consta de cuatro capítulos:

En el Capítulo I, se establece el Planteamiento del Problema; haciendo referencia a la problemática de la investigación, antecedentes del problema en la U.M. Quellaveco, formulación del problema enfocado al mejoramiento del cumplimiento de la normativa vigente para el control de vibraciones en

infraestructuras cercanas, justificación e importancia del estudio, alcances y limitaciones de la investigación, objetivos e hipótesis de investigación.

En el Capítulo II, estudiaremos el Marco Teórico; para establecer los lineamientos y conceptos trascendentes del estudio, antecedentes del estudio, bases teóricas para entender y analizar los resultados de fragmentación, vibración, normativa vigente y monitoreos, y la respectiva definición de términos empleados en la presente investigación.

En el Capítulo III, desarrollaremos el Marco Metodológico; se hace referencia al tipo y diseño de investigación; población y muestras tomadas en la U.M. Quellaveco, operacionalización de variables del estudio en referencia a los objetivos planteados, técnicas e instrumentos utilizados para la recolección de datos, procesamiento y análisis de datos, para obtener los resultados del presente estudio.

En el Capítulo IV, correspondiente a los Resultados y Discusión; se mostrarán los resultados, contraste de hipótesis y discusión de resultados. Finalmente, se complementa esta investigación con sus respectivas conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

1.1.1. Antecedentes del problema

A nivel internacional, las vibraciones causadas por explosivos industriales ocasionan demandas o exigencias cerca de infraestructuras cercanas, esto origina repercusiones a nivel social, ambiental y económico. Las nuevas tecnologías de voladura, como las cápsulas de plasma, minimizan los problemas mencionados. El incremento de las exigencias para reducir los efectos generados por las voladuras con el uso de explosivos en zonas urbanas, impulsó al desarrollo e innovación de nuevas tecnologías no explosivas, que tiene como finalidad fragmentar el material de estudio, permitiendo de esa forma obtener mejores resultados en la fragmentación, minimización de la proyección de rocas, reducción de vibraciones sin la generación de gases tóxicos que impacten al medio ambiente (Núñez, 2013).

A nivel nacional, el uso de la tecnología del plasma es promovida por la empresa ENAEX, con el objetivo de brindar servicios para la reducción de la proyección de rocas, vibraciones, ruido y polvo de las voladuras cercanas a infraestructuras o zonas críticas. La implementación estratégica del Plasma 4TH en las voladuras críticas, genera alta productividad en las operaciones, respecto a los métodos mecánicos, porque minimiza la evacuación del entorno, reduciendo los riesgos de exposición en los equipos y zonas críticas. En consecuencia, se establecen radios mínimos de influencia, que varían entre 50 a 80 m para equipos, y 80 a 150 m para personas y animales, en obras mineras y civiles (ENAEX, 2019b).

Dentro de las características más resaltantes, podemos mencionar que permitir la continuidad del proceso extractivo de las operaciones mineras, sin necesidad de evacuar los equipos y al personal adyacentes a la zona de voladura, asegurando la seguridad, reduciendo los costos de operación, además, de minimizar las vibraciones, bajo influencia de ruido, desplazamiento adecuado, mitigación de proyección rocosa. En consecuencia, se impacta en menor medida a la población y medio ambiente, lo que permite cumplir la normativa más exigente (ENAEX, 2018). En el contexto local, Enaex viene usando el plasma en el desarrollo del proyecto Quellaveco, para el control de infraestructuras cercanas,

identificadas como voladuras especiales, donde el uso de explosivos no es recomendable, porque genera repercusiones en el aspecto de seguridad, social, medio ambiental y económico (ENAEX, 2019b).

1.1.2. Problemática de la investigación

Dentro de los principales problemas podemos mencionar al daño de las infraestructuras cercanas, como las plantas de beneficio y accesos principales de la U.M. Quellaveco, generadas por las altas vibraciones que se ejercen producto de los explosivos utilizados, afectando directamente a las infraestructuras adyacentes, como perfiles de estabilidad y equipos cercanos a la zona de voladura. Lo que puede generar daños o pérdidas económicas a mediano y largo plazo, reflejadas en la productividad y seguridad de la operación.

Por lo tanto, las problemáticas que se plantean en la investigación están relacionado a la reducción de la vibración con el uso del plasma, control del cumplimiento de la normativa vigente y factibilidad económica de su uso, respecto al uso de explosivos requeridos para la fragmentación del macizo rocoso.

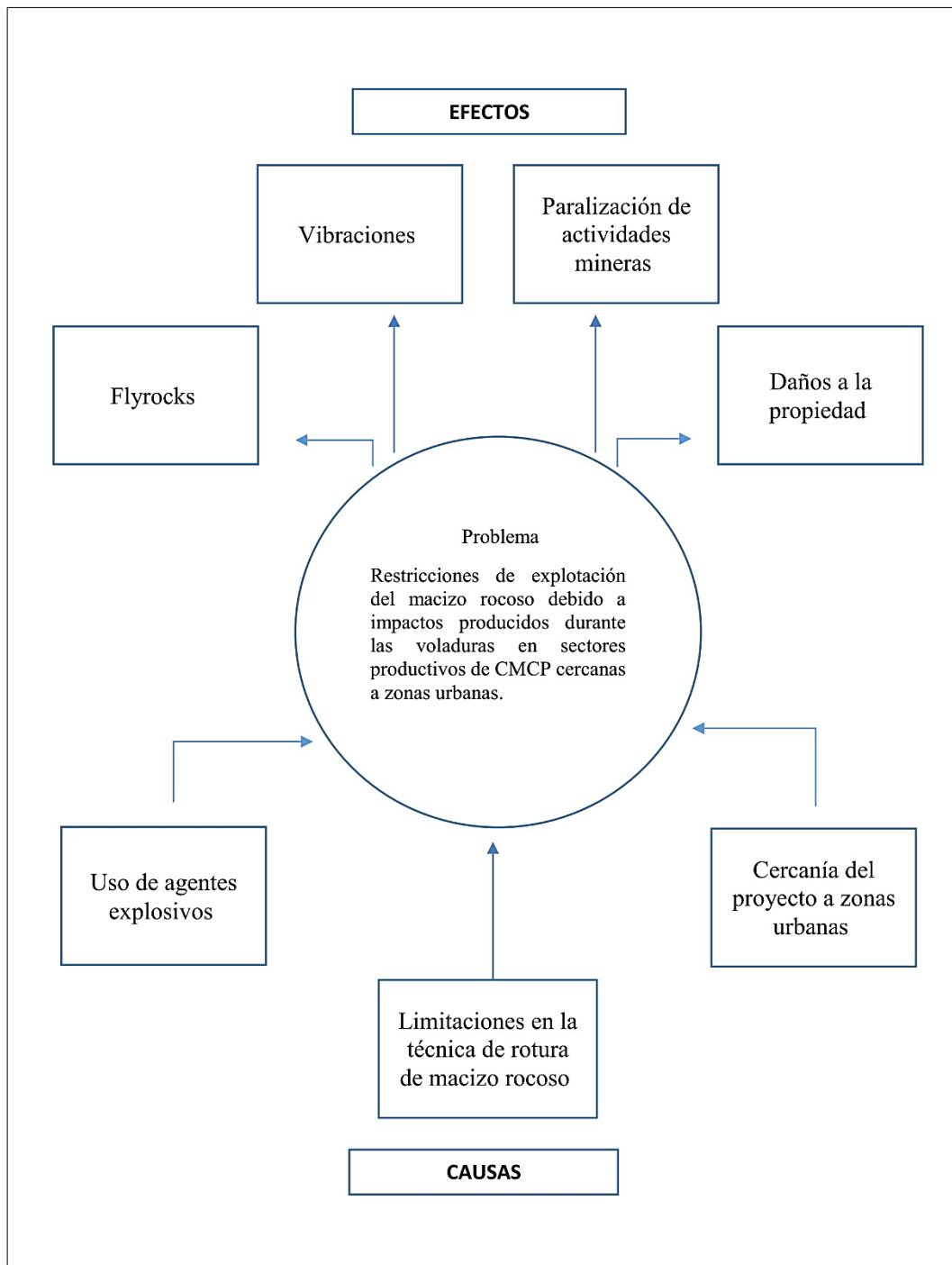


Figura 1. Árbol de problema, causa y efectos.
Fuente: Cueva y Huaynate, 2020.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿En qué medida el análisis de vibraciones con el uso de plasma es efectivo para el control de infraestructuras cercanas de la U.M. Quellaveco?

1.2.2. Problemas específicos

- a) ¿En qué medida influye el uso del plasma en el control de vibraciones de infraestructuras cercanas?
- b) ¿Qué normativas se establecen para el control de vibraciones en infraestructuras cercanas?
- c) ¿Es factible el uso de plasma para la fragmentación de zonas con presencia de infraestructuras cercanas?

1.3. Justificación e importancia

El propósito de la investigación se basa en el control de infraestructuras cercanas, con el uso de la tecnología de cápsulas de plasma que generen seguridad en el proceso de fragmentación, de

acuerdo con los requerimientos legales y técnicos nacionales e internacionales. ENAEX viene desarrollando su uso, cumpliendo con las normativas vigentes establecidas en el EIA y otras políticas de la U.M. Quellaveco, por lo tanto, es necesario el cumplimiento de sus obligaciones, para la seguridad, bienestar de la sociedad y medio ambiente.

La investigación toma importancia, ya que nos permite contribuir al desarrollo del conocimiento del control de vibraciones en infraestructuras cercanas mediante el uso de plasma para la fragmentación del material, correspondiente a operaciones mineras y civiles. Desde el aspecto económico, nos permitirá establecer bases para el análisis de costo beneficio de la voladura con plasma respecto a los explosivos utilizados en la U.M. Quellaveco, donde las pruebas piloto determinarán la toma de decisiones para futuras aplicaciones.

1.4. Alcances y limitaciones

La investigación se desarrolló en la U.M. Quellaveco, donde se dieron las facilidades para la aplicación del sistema de voladura con plasma en zonas con presencia de infraestructura cercanas, como la planta de beneficio y el acceso principal (ENAEX, 2018). La investigación se limitó a

la realización de dos proyectos de voladura controlada, denominadas pruebas piloto, donde se analizaron las vibraciones, desplazamiento del material, fragmentación y costo beneficio.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Analizar la efectividad del uso de plasma para el control de vibraciones en las infraestructuras cercanas de la U.M. Quellaveco.

1.5.2. Objetivos específicos

- a) Determinar la influencia del uso de plasma en el control de vibraciones de infraestructuras cercanas.
- b) Determinar el cumplimiento de las normativas sobre vibraciones para el control de infraestructuras cercanas.
- c) Analizar el costo beneficio del uso de plasma para la fragmentación de zonas con presencia de infraestructura cercana.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

El uso del plasma es efectivo para el control de vibraciones de infraestructuras cercanas de la U.M. Quellaveco.

1.6.2. Hipótesis específicas

- a) El uso de plasma reduce la vibración en las infraestructuras cercanas.
- b) La vibración generada por el uso de plasma mejora el cumplimiento de las normativas vigentes para el control de infraestructuras cercanas.
- c) El uso de plasma genera un mejor costo beneficio respecto al uso de explosivos para voladuras especiales.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

(Cueva y Huaynate, 2020) En la investigación titulada aplicación de fragmentador de roca, Plasma FRAG BE, en sectores productivos de la compañía minera Cerro de Pasco, cercanas a zonas urbanas para reducir impactos generados durante la fragmentación del macizo rocoso; donde la finalidad del estudio consistió en comparar los valores de velocidad pico partícula (VPP) de voladuras realizadas con plasma versus ANFO. A una distancia de 172 m, se registró un VPP de 8,802 mm/s para la voladura con ANFO, mientras que, para las voladuras con plasma, no se registró valores de VPP a 60 m. La investigación logró predecir la VPP a través de un modelo lineal en base a las variables burden, espaciamiento, longitud de taco, factor de carga, cantidad máxima de plasma Frag Be permitido por disparo y distancia del sismógrafo para el control de VPP, desarrollado a partir de 40 disparos, con una confiabilidad del 82 %.

(Cuayla, 2020) En la investigación titulada aplicación del plasma 4th para fragmentación controlada en la plataforma T7 de la U.M. Quellaveco,

donde el uso de plasma se centralizaron en mejorar la fragmentación, asegurando la seguridad de las infraestructuras aledañas al proyecto de voladura, logrando obtener un P80 de 8,3” y 6,3” para voladura con explosivos, y un P80 de 10,2” y 7,1” para voladura con plasma, si bien es cierto, no se obtuvo una mejor fragmentación, se logró reducir los resultados de vibración, proyección de rocas (fly rock) e impacto al medio ambiente, bajo el cumplimiento de la normativa DIN 4150.

(Arce y Bringas, 2020) En la investigación titulada incidencia de la tecnología plasma en la variación de los efectos de las vibraciones producidas por operaciones de voladura en minería superficial en Cajamarca, 2020; donde el principal objetivo era determinar el efecto de las vibraciones causadas por las operaciones de voladuras, con explosivo respecto a la fragmentación con plasma; se logró reducir los niveles vibratorios en 75 %, el registro con sismógrafo se realizó a una distancia de 130 m de los proyectos de voladura.

Según la evaluación de vibraciones en voladura con plasma realizados para predecir la proyección de rocas en el tajo abierto de la sociedad minera El Brocal SAA. Donde la empresa minera identifico la problemática de salvaguardar la zona urbana ubicada a 500 m, por lo tanto,

es necesario realizar voladuras especiales para el control de vibraciones, planteando de esta forma el uso estratégico del plasma para fragmentar la roca y disminuir la proyección de rocas, controlando así el ruido y vibraciones generadas por la voladura. Si bien se logra mejorar los resultados de vibración, sin embargo, no se obtuvieron buenos resultados en la fragmentación, optándose por evaluar principalmente las vibraciones en voladura con plasma, logrando reducir los costos de movilización de equipos, debido a la reducción del radio de influencia a 50 m, lo que permitió retomar más rápido las operaciones (Dávila, 2019).

(Chávez, 2019) En la investigación titulada análisis de vibraciones inducidos por el uso de plasma en la fragmentación de rocas en el proyecto óxidos in-situ compañía Minera Volcan; se logró establecer el modelo predictivo de daño por vibraciones por tipo de roca. De esa forma, se logra controlar los daños a las infraestructuras del entorno de cada proyecto de voladura, contribuyendo así al bienestar de las operaciones, y asegurando su continuidad, bajo el umbral de daño según la Norma DIN 4150.

(Fresner et al., 2019) En la investigación titulada disminución del consumo de energía en la minería por fracturación combinada de roca mecánica de plasma, expone un enfoque novedoso para aumentar la

productividad de la fractura de rocas mediante la combinación estratégica del plasma y explosivos, aumentó de esta forma la productividad de fractura en mineralización de hematita, en más del 50 %. Al aplicar una corriente de 10 A, las ratios de avance se incrementaron en 8,1 m/día, lo que permitió diseñar un modelo matemático para predecir la fractura de roca electro-térmica, integrando el efecto de inducción por arco eléctrico al modelo de perforación.

Enaex realizó una evaluación técnico económica de fragmentación de rocas con plasma en el proyecto minero Caletones. Con la finalidad de reducir el riesgo de uso de explosivos, como los accidentes directos e indirectos, impacto medioambiental y salud. El estudio se dividió en análisis del mercado, estrategias, técnicas, legal y económico; donde se logró predecir un aumento del 20 % en la cantidad de empresas productoras de plasma, por lo que recomienda financiar el proyecto con inversión privada, para incrementar el VAN en 40 %. Además, se establecen las características de mejora del uso de plasma, respecto al uso de explosivos, como la distancia de seguridad, proyección de rocas, ruido, vibración e impacto al medio ambiente (ENAEX, 2018).

En el congreso de minería Astana 2018, se presentó un estudio de evaluación del efecto sísmico de las explosiones industriales en las estructuras de ingeniería y seguridad, se identificó la problemática del impacto sísmico de las voladuras realizadas en canteras de diversas condiciones, afectando a edificios y estructuras de las zonas aledañas. Como resultado de las mediciones experimentales, se propuso controlar la cantidad máxima de carga explotada simultáneamente, con la finalidad de proporcionar mayor seguridad sísmica de los edificios ubicados a una cierta distancia del punto de operaciones (Aripov et al., 2018).

(Valenzuela, 2010) En la investigación titulada fracturamiento de rocas mediante tecnología plasma, se establece que la optimización del uso de energía producto de la reacción del plasma y el arco eléctrico, asegura una buena fragmentación relaciona con el uso adecuado del taco apropiado. El plasma se usa principalmente en labores de obras civiles, y se plantea para las voladuras en minería, porque la fragmentación lograda dista mucho de lo obtenido con explosivos, siendo esta una variable influyente en los procesos mineros post voladura, por consiguiente, el plasma no mejora la fragmentación de la roca, pero reduce en gran medida las vibraciones, por lo tanto, su uso es recomendado principalmente para el aseguramiento de la seguridad en zonas críticas.

(Pernia Llera et al., 2003) En la investigación titulada fragmentación eléctrica con voladuras plasma, establece que la tecnología de voladura con plasma permite abrir nuevos horizontes de investigación, lo que permite avanzar en las consolidaciones de nuevos modelos para la aplicación en las mejoras en la industria minera.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Unidad Minera Quellaveco

La U.M. Quellaveco, se ubica en el sur del Perú, en el distrito de Torata, provincia Mariscal Nieto, del departamento de Moquegua. Geográficamente, se encuentra asentada en el valle del río Asana, a 40 km en línea recta al NE de la ciudad de Moquegua, con una altitud promedio de 4 200 msnm. Las comunidades campesinas Tumilaca, Pocata, Coscore y Tala, son las zonas más cercanas de la operación, las cuales están vinculadas al consumo del recurso hídrico. La U.M. Quellaveco considera la explotación de una mina de cobre a tajo abierto, a un ritmo de extracción diario de 85 kt, equivalente a 31 Mt al año, con una vida útil de 32 años.

Las reservas mineras se estiman en 938 Mt de mineral de cobre y molibdeno (Knight Piésold, 2008).

En el Anexo 2, se observa la ubicación de las principales estructuras de la U.M. Quellaveco. El acceso se realiza por vía terrestre, por la carretera asfaltada Moquegua-Quellaveco, tomando la vía Moquegua-Toquepala, con una duración de 2 h, hasta llegar a la zona de construcción de la planta concentradora. Por vía aérea, se realiza desde la capital Lima a Tacna, tomando un vuelo de 1,5 h, para luego continuar por vía terrestre (Knight Piésold, 2008).

El yacimiento de Quellaveco forma parte de la faja de pórfidos cupríferos del Paleoceno del sur del Perú según INGEMMET (Tumialan, 2003), constituidas principalmente por andesitas Samanape y riolita Asana. Los volcánicos fueron instruidas por un stock de 52 a 58 millones de años, los cuales fueron responsables de la mineralización, formados por la presencia de diorita cuarcífera, granodiorita, monzonita cuarcífera, volcánicos de formación Huaylillas del Plioceno y formación Barroso del Pleistoceno. La intrusión se produjo a través de la falla regional de rumbo NO, generando diques con composición de latita cuarcífera que afloran por medio de dos brechas hidrotermales (Anexo 3).

(INGEMMET, 2017) Los rasgos estructurales más resaltante son las fallas de Incapuquio, Micalaco y Quellaveco, con presencia de cizallas transversales, donde se albergan los pórfidos cupríferos de Cuajone, Quellaveco y Toquepala. El cuerpo mineralizado de Quellaveco tiene una forma oval, donde el eje mayor presenta una orientación NO-SE, y está relacionado estructuralmente a la zona de cizallamiento Incapuquio-Atacama, la falla siniestral controla el emplazamiento de las rocas plutónicas y formación de importantes depósitos mineralizados (Anexo 4).

Las operaciones de movimiento de tierras en las zonas de estudio de la U.M. Quellaveco, inician con la perforación, voladura, fragmentación con plasma, carguío y acarreo (Cuayla, 2020).

- a) Perforación; la perforación de la malla de taladros se realiza con 2 perforadoras hidráulicas SANDVIK RANGER DX700, con brocas de 3" y 3,5" para taladros de precorte, buffer, accesos y producción, con una velocidad de 28 m/h. El proyecto presenta una malla de perforación rectangular con burden entre 1,8 y 2,78 m, y espaciamiento entre 1,8 y 3,2 m (Cuayla, 2020).



Figura 2. Equipo de perforación Sandvik
Fuente: Cuayla, 2020.

- b) Voladura; en la U.M. Quellaveco se utilizan diferentes explosivos, dependiendo de las condiciones del terreno y objetivos a cumplir (Tabla 1). Los principales insumos que se utilizan para las voladuras de la U.M. Quellaveco son el ANFO, Emultex, accesorios, iniciadores y fracturador plasma 4TH. ENAEX, define los tiempos para cada disparo según protocolo aprobado; 17 ms entre taladros; 25, 35, 42, 65 y 100 ms para filas con explosivo; y 0,10 y 25 ms para filas con plasma. Para los accesorios de voladura con explosivo se utilizan detonadores electrónicos Davey Tronic, Dual 17/800 y conector unidireccional; y

para voladuras con plasma, se usa cable de conexión H07V-U 1,5 mm 2/NYA.

Tabla 1
Relación de Fc de proyectos

| Proyectos | Fc con explosivo ANFO (kg/m³) | Fc con fracturador Plasma (kg/m³) |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| GyM STRACON, COSAPI EPSA, JJC BESALCO, ECOP SAC, SACYR AJANY y OHL | 0,18 - 0,66 | 0,20 - 0,45 |

Fuente: Cuayla, 2020.

En la tabla 2 y 3, se observa los equipos utilizados para proyectos de voladura con explosivo y plasma respectivamente.

Tabla 2
Equipos de voladuras con explosivo

| Equipo principal | Capacidad (t) | Capacidad de carga con explosivo (t) |
|---------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|
| Camión furgón - marca Mitsubishi | 5 | 4,5 |
| | 4,5 | 4 |
| Equipo auxiliar | Cantidad (Und) | |
| Camioneta furgón, accesorios - marca Toyota | 2 | |

Fuente: Cuayla, 2020.

Tabla 3
Equipos de voladuras con plasma 4TH

| Equipo principal | Capacidad (t) | Capacidad de carga con plasma 4TH (t) | |
|-----------------------------------------|----------------|---------------------------------------|--------------------|
| Camión furgón - marca Mitsubishi | 5 | 4,5 | |
| | 4,5 | 4 | |
| Equipo auxiliar | Cantidad (Und) | Voltaje (V) | Salida voltaje (V) |
| Acumulador eléctrico - modelo YL 1602LD | 1 | 120 | 4 000 |
| Generador diésel - modelo PD 11000E | 1 | 120 | 220 |

Fuente: Cuayla, 2020.

- c) Carguío y acarreo; el carguío consiste en cargar el material volado mediante los equipos de acarreo, se realiza con 3 excavadoras sobre orugas, 2 John Deere 350GLC y 1 Hyundai R300LC-9S, de una capacidad de carga de 2,3 m³, y un cargador frontal John Deere 644K, con capacidad de 3,2 m³. Mientras que el acarreo, se realiza con camión VOLVO modelo FMX6X4R con una capacidad de 17 m³.

2.2.2. Fragmentación con plasma

El plasma fragmentador de rocas es una mezcla compuesta principalmente por sales metálicas que funcionan como electrolito al interior de la cápsula (Olivero y Larson, 2013), estas se activan por medio de un arco eléctrico, generando una reacción exotérmica, se libera energía

en forma de calor, por medio del gas ionizado, se expande y propaga por las grietas de la roca provocándola el fracturamiento; las reacciones del plasma, son de baja vibración, por lo tanto, no produce proyección de rocas (ENAEX, 2018). La aplicación de la tecnología no explosiva o plasma, es altamente recomendada en situaciones donde el uso de explosivos no cumple con la normativa, exigencias técnicas y ambientales para la protección de las zonas de operación (ENAEX, 2019b).

El plasma como agente de fracturamiento en proyectos de tajo abierto, además de bajar los niveles de vibración en condiciones de no explosivo, también permite reducir tiempos de tramites documentarios, regulados por parte de SUCAMEC correspondiente a explosivos. En la figura 3, se observa el proceso de fragmentación con plasma, siendo necesarios para el cálculo de tiempos de operación, donde se identifica los encargados para cada control. Mientras que en la figura 4, se establece el diagrama de proceso operativo de iniciación de la fragmentación con plasma 4TH, que parte de la propuesta de diseño de fragmentación, aceptación de diseño, coordinación, control operativo de la zona de trabajo, validación y confirmación para la iniciación.

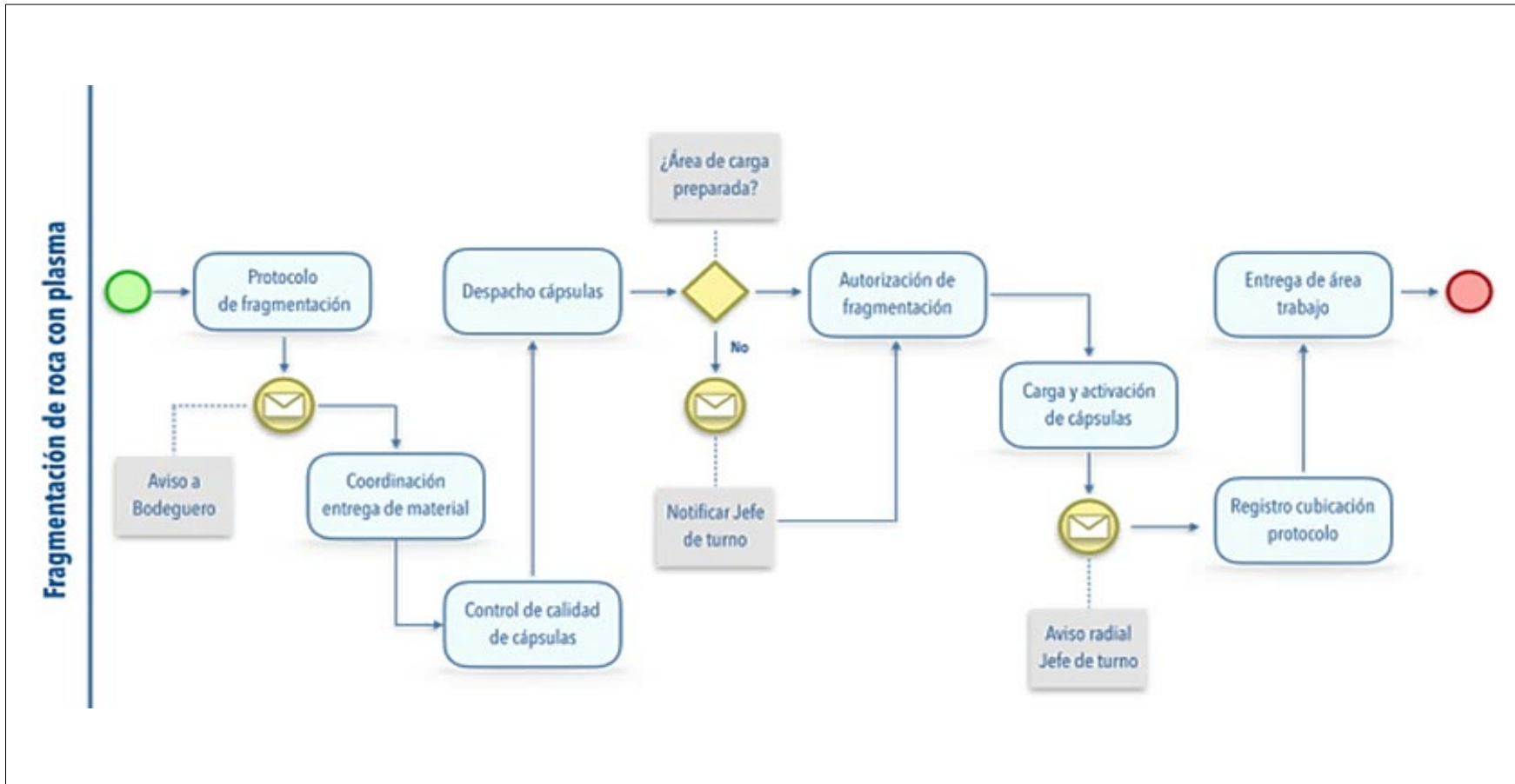


Figura 3. Proceso de fragmentación con plasma
Fuente: ENAEX, 2018.

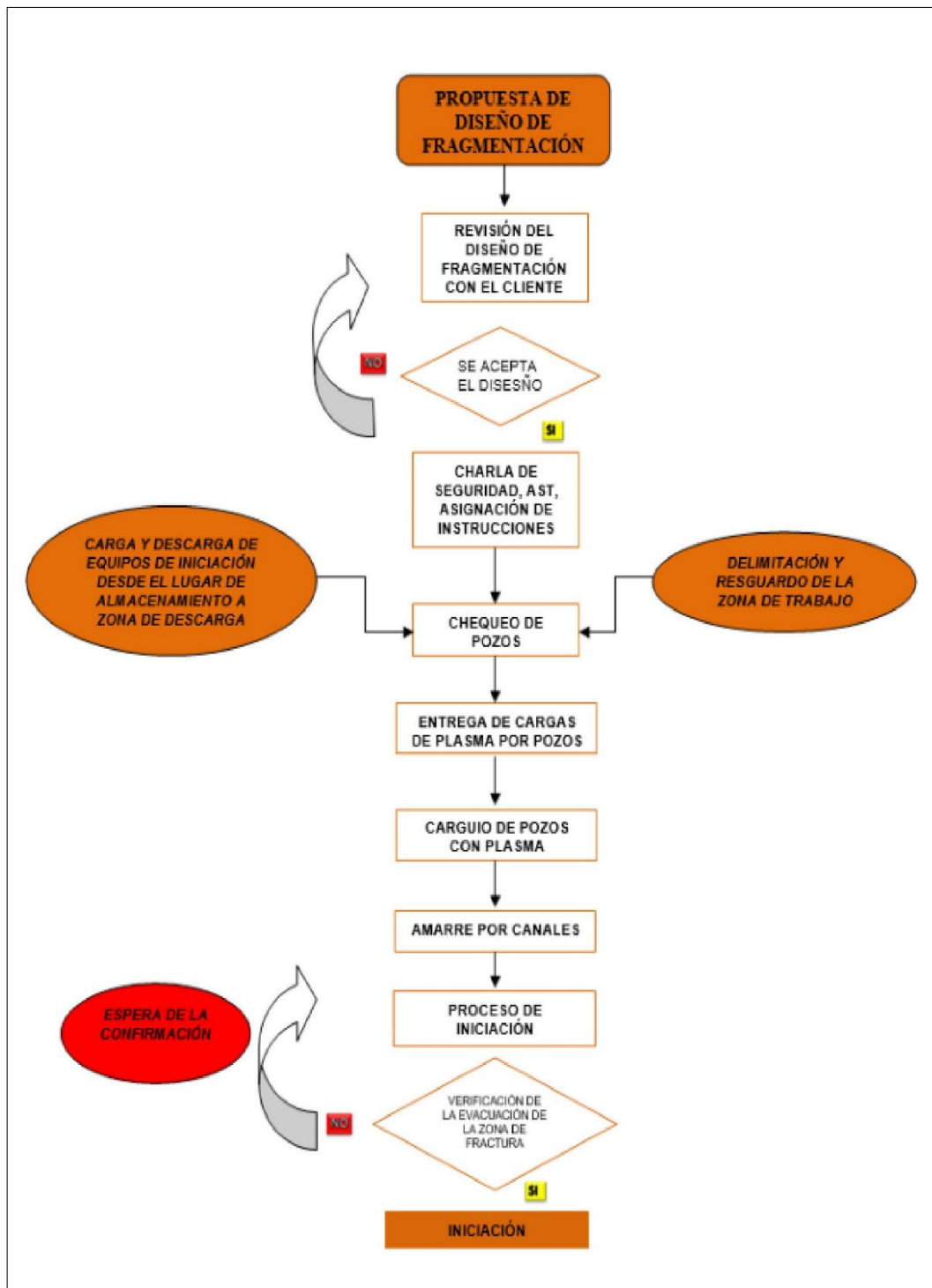


Figura 4. Diagrama de proceso de fragmentación con plasma
Fuente: ENAEX, 2018.

2.2.3. Cápsulas de plasma

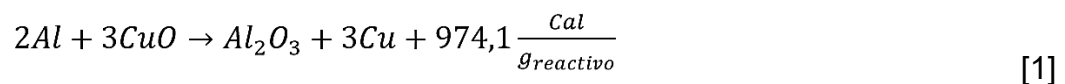
El plasma es considerado el cuarto estado de la materia, y esta se obtiene al someter un gas a elevadas temperaturas, provocando la separación de los átomos, con la finalidad de formar iones positivos y electrones libres, denominado gas ionizado, con un alto nivel de conductividad eléctrica (Gibbon, 2014). La utilización del plasma en voladura es necesaria frente a requerimientos de seguridad e interacción con el entorno, porque es un producto que reduce la proyección de material particulado, vibración, niveles de ruido y posee un excelente manejo de los aspectos de seguridad (Tabla 4).

Tabla 4
Comparación del uso de plasma y explosivos

| Ítem | Unidad | Explosivos | Plasma |
|-------------------------|--------|-------------|------------|
| Distancia de seguridad | m | 500 | 30 |
| Velocidad de detonación | m/s | 5000 | 350 |
| Proyección de rocas | | sin control | controlada |
| Ruido | dB | < 150 | > 85 |
| Vibraciones | | máxima | mínima |
| Biodegradable | | no | si |

Fuente: ENAEX, 2018.

El plasma esta principalmente formado por sales metálicas y funcionan como electrolito en el interior de la cápsula. En la Ecuación [1], se observa el producto de la reacción entre el aluminio y el óxido de cobre.



En la tabla 5 se observa las principales diferencias entre las propiedades del plasma versus los explosivos usados en las voladuras especiales, donde la finalidad es asegurar la seguridad de las infraestructuras aledañas a la zona de voladura (ENAEX, 2018).

Tabla 5
Características del plasma versus explosivos

| Características | Explosivos | Plasma |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Componentes | Nitratos $M(NO_3)_n$ + Agente | Mezcla metal y óxido metálico |
| Método de activación | Detonador (polvo de alta densidad) y Booster (detonador débil). | Descarga o arco eléctrico. |
| Energía de voladura | Mayor 800 Kcal/Kg. | Entre 409 y 980 Kcal/Kg. |
| Permisos | Requiere control de dirección general de movilización nacional (DGMN). | Exento de control DGMN. |

Fuente: ENAEX, 2018.

El fracturador de plasma se presenta en cápsulas con una resistencia de iniciación incorporada en su interior, permitiendo un manejo e instalación fácil de efectuar. En la figura 5, se observa el sistema de fragmentación con plasma, donde la reacción exotérmica se genera a partir de una pequeña cantidad de gas, con la mezcla confinada en su interior, aumentando la temperatura, y expandiendo el gas resultante, logrando fracturar el macizo rocoso. La fractura de roca se logra con el empuje de energía total entregada, superando la propiedad intrínseca de la roca. Una vez que se produce la fractura, la temperatura disminuye y la energía expansiva se reduce abruptamente (ENAEX, 2018).

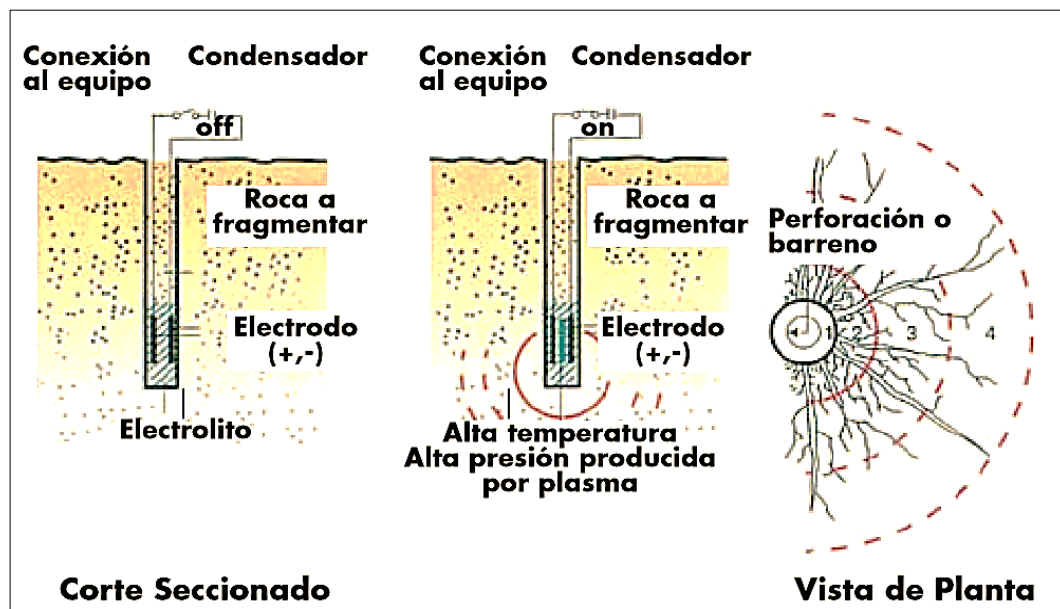


Figura 5. Sistema de fragmentación con plasma
Fuente: Huayhua, 2019.

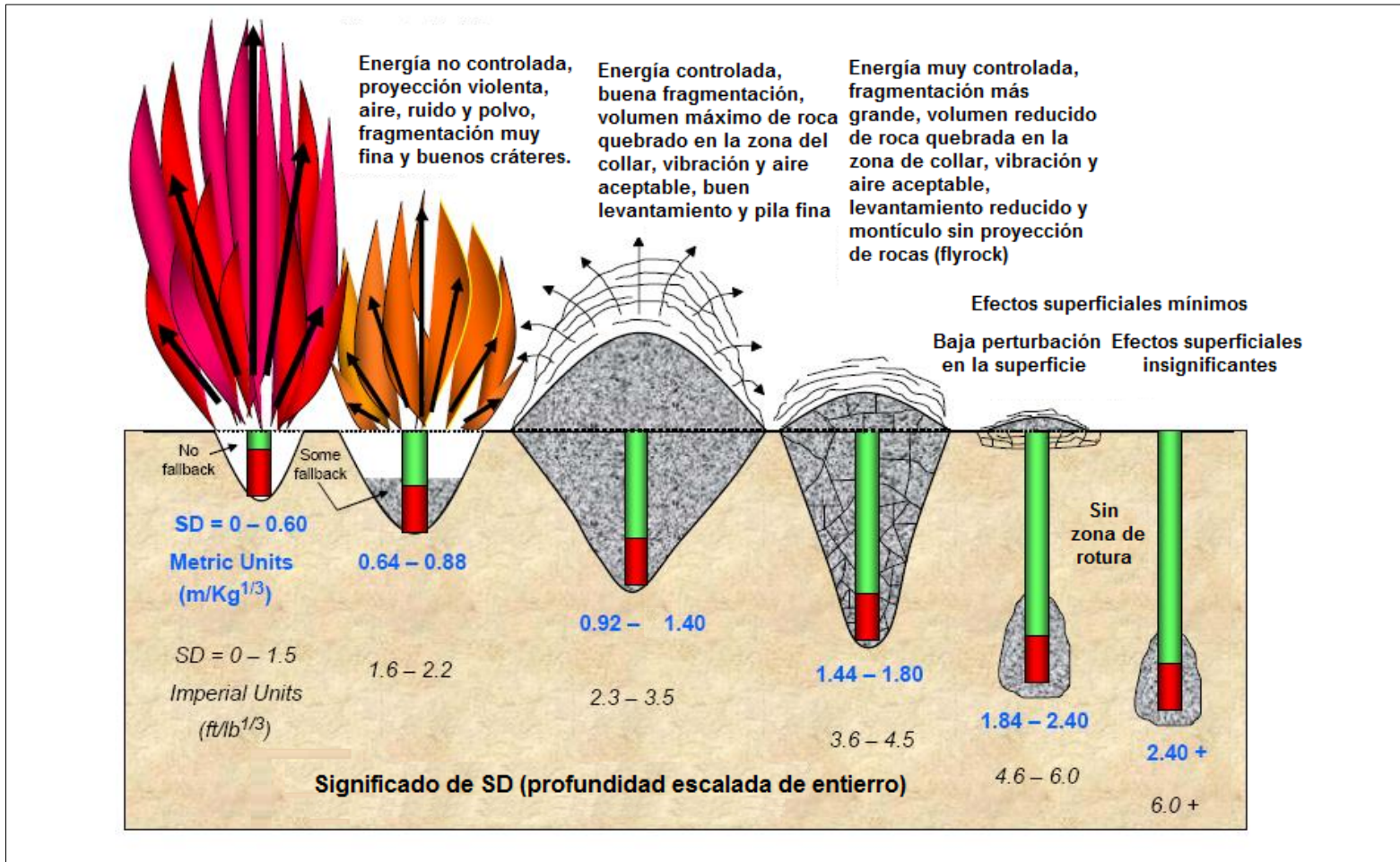


Figura 6. Criterio de profundidad de entierro a escala (SD)
 Fuente: Chiappetta y Treleaven, 1997.

El plasma al ser una tecnología no explosiva compuesta de metal y sales metálicas, donde la carga en cartuchos está relacionado a la altura de diseño, y a partir de su iniciación termoquímica por una chispa eléctrica de alto voltaje, genera ventajas en su operación; al ser un elemento no explosivo, no requiere permiso ante la SUCAMEC para su transporte, almacenamiento y manipulación; la mezcla metálica es estable contra golpes de fricción y altas temperaturas; presenta alta productividad; reduce el radio de evacuación; minimiza la proyección de rocas; no genera contaminación por residuos o gases tóxicos; reduce el nivel de ruido y vibraciones; y baja la generación de polvo (Cuayla, 2020).

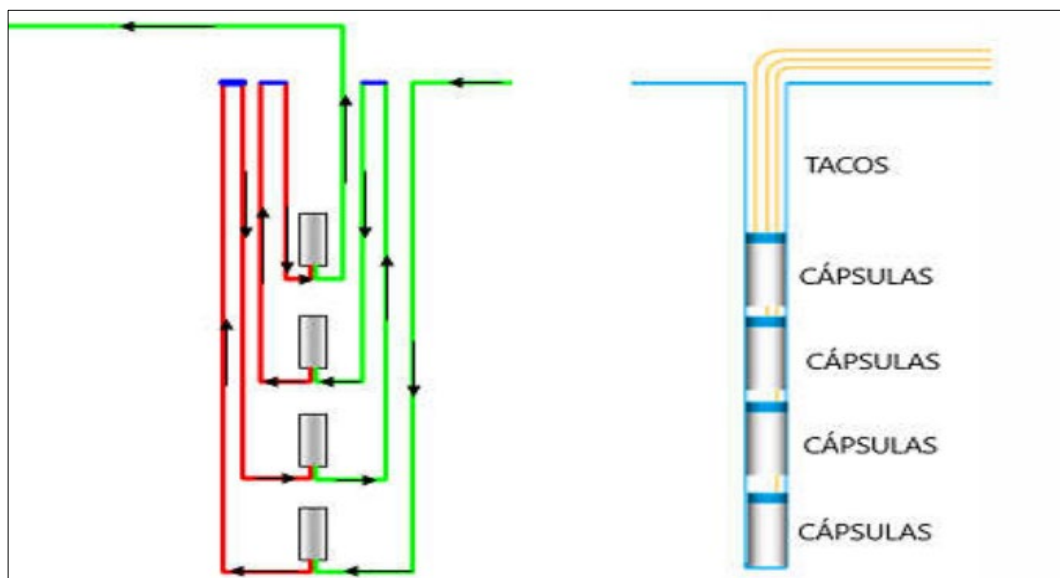


Figura 7. Diagrama de proceso de carguío
Fuente: ENAEX, 2019b.

2.2.4. Vibraciones con plasma

La vibración es un fenómeno que transmite energía por medio de la propagación del movimiento ondulatorio, y en las voladuras son ondas que se generan en el interior de la corteza terrestre, causadas por la detonación de explosivos que se propagan por todo el macizo rocoso. Las vibraciones están representadas por desplazamientos, velocidad y aceleración de las partículas proyectadas producto de la voladura, lo que constituye gran relación con los daños generados a las estructuras e infraestructuras cercanas (Cuayla, 2020). La generación de ondas está influenciada por los factores geotécnicos y operacionales presentadas en la tabla 6.

Tabla 6
Factores influyentes en la generación de vibraciones

| Geotécnicos | Operación | |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| | Perforación | Voladura |
| Tipo de roca | Ángulo de taladro | Burden |
| Presencia de discontinuidades | Altura de columna | Espaciamiento |
| Presencia de fallas | Diámetro de taladro | Confinamiento del explosivo |
| Resistencia de la roca | Tipo de malla | Densidad del explosivo |
| Porosidad del macizo rocoso | Tipo de taladros | Retardos y secuencia |
| Densidad del macizo rocoso | Cantidad de taladros | Tipo de iniciación |
| Ángulo de la cara libre | | Energía real aportada |

Fuente: Konya y Albarrán, 1998.

Las vibraciones son ondas con movimiento armónico que tienen un determinado desplazamiento, velocidad y aceleración. Y al ser propagadas a través del macizo rocoso, se atenúan inversamente proporcional a la distancia recorrida por disipación en forma esférica. Los tipos de onda se componen en vibraciones internas y superficiales; las ondas principales son las internas, porque disturbán en mayor medida al macizo rocoso, a partir de las ondas P, que son propagadas longitudinalmente y causa mayor movimiento, provocando oscilación de las partículas en la misma dirección de la onda, con característica compresional al poseer mayor amplitud y velocidad, estas son registradas en los monitoreos con geófonos (Cornejo y Huamán, 2020).

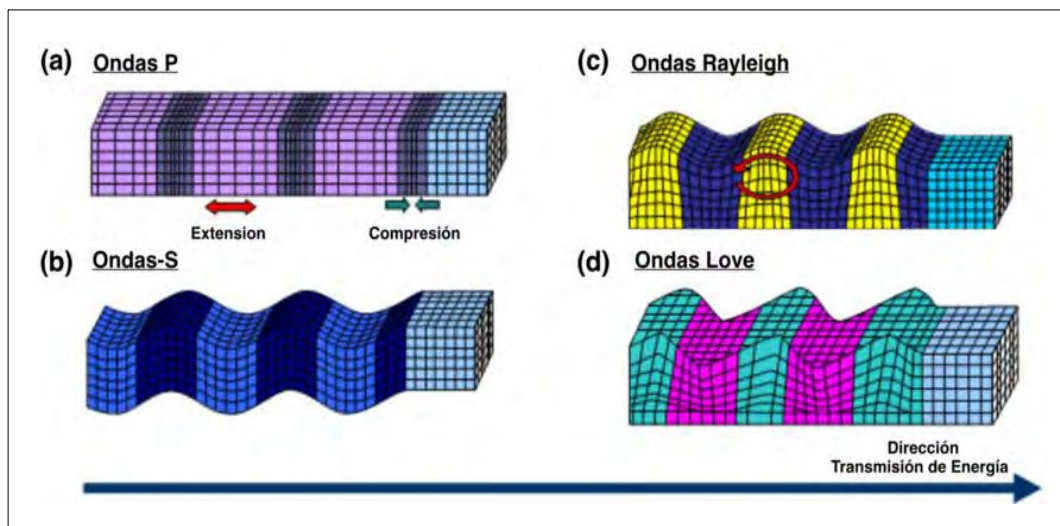


Figura 8. Propagación mecánica de ondas de cuerpo y superficiales
Fuente: Sáez, 2016.

A diferencia, las ondas S, se propagan transversalmente al movimiento de las partículas, conocida como ondas de cizalladuras o corte, debido a la potencialidad de alterar la forma y estructura del macizo rocoso, a partir de menor amplitud y velocidad que las ondas principales. Mientras que las ondas superficiales, al presentar menor velocidad y potencial de daño, se establecen como complementarias a las ondas internas, mediante las ondas Rayleigh R y ondas Love L; generando un movimiento elíptico sobre las partículas en la misma dirección de propagación, tanto en el plano vertical como horizontal, atenuándose rápidamente en la superficie de acuerdo a las formaciones y resistencia del macizo rocoso (Cornejo y Huamán, 2020).

2.2.5. Monitoreo y control de vibraciones

El monitoreo y control de vibraciones se basa en los métodos mediante la medición de la velocidad de propagación de ondas para las de tipo compresional, y la medición de velocidad de partículas en un punto deseado. Para realizar un correcto monitoreo se deben establecer adecuadamente los puntos de control donde se colocarán los sismógrafos y geófonos. Si el monitoreo se realiza en superficie, es necesario colocarlo sobre una superficie nivelada para evitar errores por inclinación. De la

misma forma, de acuerdo al tipo de compactación del suelo, los geófonos deben de ser confinados por una bolsa de arena para evitar movimientos por efecto de la vibración con la finalidad de realizar la medición de las bovinas internas. La calibración se debe realizar considerando el registro previo de monitoreo, definiéndose a partir de los límites de iniciación, registro de frecuencia y velocidad de partícula en las tres direcciones. Los puntos de control deben ser seleccionados de acuerdo al nivel de riesgo y sensibilidad de las estructuras a proteger, para posteriormente comparar los valores obtenidos con los límites de la norma. A partir de los datos históricos se puede llegar a desarrollar un modelo predictivo confiable que permita reducir los factores de carga y optimizar la voladura (Cornejo y Huamán, 2020).

2.2.6. Predicción de vibraciones

La variedad de los modelos predictivos correspondiente a las vibraciones, parte de la ley de transmisividad, basada en que la vibración ocurre en un punto determinado por la carga explosiva (Q) y distancia entre la detonación y el punto de control donde se realiza la medición (D), expresa en la ecuación [2].

$$V = K \times Q^a \times D^b$$

[2]

Donde las constantes “K”, “a” y “b” son modificadores que dependen principalmente de las características del entorno medido, delimitándose 3 controles correspondientes al estudio de vibración inducida. En la figura 9, se observa la representación gráfica de los diferentes efectos mecánicos de un disparo, se desarrollan en 3 zonas del campo vibratorio inducidas por la voladura, se identifican como campo cercano, transitorio y lejano (Cornejo y Huamán, 2020).

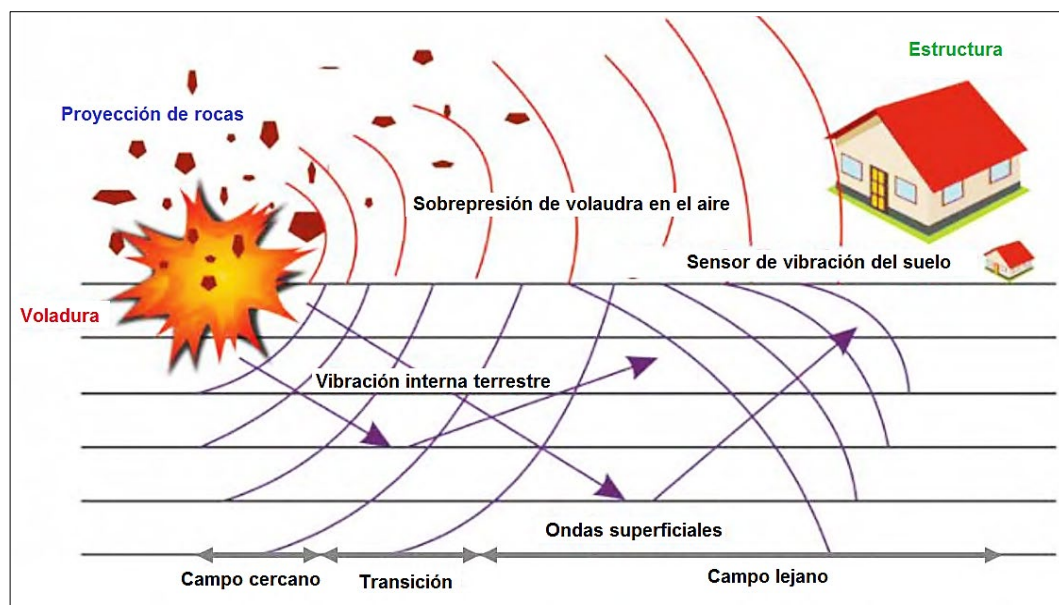


Figura 9. Efectos mecánicos de la voladura
Fuente: Hopler, 1998.

2.2.6.1. Campo lejano

El modelo predictivo de Devine es el más utilizado para la predicción de la vibración en campo lejano. Donde se asume una distancia (d) mayor de 3 a 5 veces la longitud de carga. Para la presente investigación para el modelamiento del campo lejano, se considera una distancia de 350 m para voladuras con explosivo, y 50 m para fragmentaciones especiales con plasma. La ley de transmisividad en campo lejano se expresa en la ecuación [3], donde la velocidad pico partícula (V) está expresado en función de la carga operante (W), distancia de monitoreo (d) y los parámetros “K” y “a”, que están relacionados con las características del terreno y explosivo (Cornejo y Huamán, 2020).

$$V = K x \left[\frac{d}{w^{1/2}} \right]^{-a} \quad [3]$$

2.2.6.2. Campo cercano

El modelo predictivo de Holmberg y Pearson es el más aceptado y utilizado para la predicción de la vibración en campo cercano. Donde “ θ ” es el ángulo que se forma entre la recta que pasa por un punto de la carga explosiva del taladro y el punto de medición, “R” es la distancia de la recta,

y “H” es la altura del taladro cargado. La ecuación [4] hace que la carga lineal “y” sea el factor con más impacto en la vibración y daño del macizo rocoso (Cornejo y Huamán, 2020).

$$PPV = Ky^a \left[\int_0^H \frac{dh}{[R_0^2 + (R_i \tan \phi - h)^2]^{\beta/2a}} \right]^a \quad [4]$$

2.2.7. Norma nacional para el control de vibraciones

Normalmente las operaciones mineras buscan tener frecuencias altas para evitar la resonancia con la frecuencia límite del macizo rocoso, obtenidas de los estudios sísmicos. Esto se controla en los diseños de voladura, y, en consecuencia, producto de la detonación, con la finalidad de fragmentar el macizo rocoso, se genera vibraciones, donde su control está basado en la normativa nacional e internacional, y debiendo incluirse el contexto geográfico y demográfico del foco de emisión. Al determinar la frecuencia predominante, se continua con el control del límite de velocidad de partícula que pueda resistir la estructura (Cornejo y Huamán, 2020).

La norma nacional tiene la guía ambiental para la perforación y voladura de operaciones mineras publicada por el MINEM en 1995, donde

se especifica los límites de vibraciones de acuerdo al tipo de suelo, características de la estructura y edad de la misma. En concordancia con la ley de transmisividad, se propuso la tabla 7, para limitar la carga máxima operante sin monitoreo sísmico a una distancia escalada D_s (Dirección General de Asuntos Ambientales, 1995).

Tabla 7
Velocidad pico partícula máxima

| Distancia de referencia - D (m) | Velocidad partícula pico máxima permitida - V_{max} (mm/s) | Factor de distancia a escala sin monitoreo sísmico - D_s (m) |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 0 - 91,44 | 31,75 | 1,27 |
| 91,75 - 1 524 | 25,40 | 1,40 |
| 1 524,31 a más | 19,05 | 1,65 |

Fuente: Dirección General de Asuntos Ambientales, 1995.

La norma nacional menciona los ajustes que se dan a la determinada distancia escalada para monitoreos de vibraciones realizados con geófonos triaxiales, para evitar daños a las estructuras cercanas o lejanas al superar los límites de acuerdo a la VPP y velocidad de propagación de onda P en el macizo rocoso. La norma asume que el daño sobre el macizo rocoso es igual para todos los tipos de roca, sin considerar la velocidad de propagación, límites de elasticidad del macizo rocoso y

material que compone la estructura. Debido a estos factores, se considera que la guía está desfasada y requiere ajustes más conservadores a la realidad actual de la minería en el Perú (Cornejo y Huamán, 2020).

Tabla 8
Efectos de la VPP sobre el macizo rocoso

| Velocidad partícula pico (mm/s) | Efectos en el macizo rocoso |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Menos de 254 | No hay fracturas de rocas intactas |
| 254 - 381 | Ocurre menor fractura tensional y caídas de roca |
| 635 - 2 540 | 100 fracturas tensionales fuertes y radial |
| Más de 2 540 | Rotura completa de macizo rocoso |

Fuente: Dirección General de Asuntos Ambientales, 1995.

2.2.8. Normas internacionales para el control de vibraciones

Con el aumento en los niveles de vibraciones, la cantidad de edificaciones y de fuentes generadoras de vibración, es necesario establecer cotas máximas a los niveles de vibraciones, con la finalidad de evitar daños en las estructuras cercanas. Las vibraciones producidas por la voladura de rocas se han realizado con ciertos niveles de vibraciones máximos, los cuales se han determinado por medio de mediciones, llegando a determinar así el límite máximo permisible de daño.

2.2.8.1. Norma alemana DIN 4150-1999

En la tabla 9 se muestra norma DIN 4150 y los datos paramétricos sobre vibraciones.

Tabla 9
Parámetros de vibración por edificación DIN 4150

| Tipo de estructura | Nivel de Fundación | | | Piso más alto Cualquier Frecuencia |
|-------------------------------|--------------------|---------|----------|------------------------------------------|
| | Frecuencia (Hz) | | | |
| | < 10 | 10 – 50 | 50 – 100 | > 100 |
| Velocidad de vibración (mm/s) | | | | |
| Industrial (I) | 20 | 20 - 40 | 40 - 50 | 40 |
| Habitaciones (II) | 5 | 5 - 15 | 15 - 20 | 15 |
| Edificios Delicados (III) | 3 | 3 - 8 | 8 - 10 | 8 |

Fuente: Norma Alemana DIN 4150, 1999.

Establece los valores límites de velocidad de vibración de la partícula en mm/s, considerando el tipo de estructura civil y el intervalo de frecuencia en Hz, en los cuales demuestran estar fuera de riesgo de daños a los edificios. Las tres clases de edificios definidas por la norma son estructurales, residenciales y construcciones sensibles.

2.2.8.2. Norma suiza SN 640312-1978

Norma introducida en abril de 1992, incluye los efectos en los edificios, acrecentando los criterios de evaluación de los daños materiales manteniendo los valores de Vp máxima según se observa en la tabla 10.

Tabla 10
Parámetros de vibración por edificación SN 640312-1978

| Tipo de Estructura | Frecuencia (Hz) | Vp máxima (mm/s) |
|-------------------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Edificios de concreto armado (I) | 10 - 60 | 30 |
| | 60 - 90 | 40 |
| Construcciones normales de edificios (II) | 10 - 60 | 18 |
| | 60 - 90 | 18 - 25 |
| Habitaciones (III) | 10 - 60 | 12 - 18 |
| Edificios delicados (IV) | 10 - 60 | 8 |
| | 60 - 90 | 8 - 12 |

Fuente: Norma Suiza SN 640312-1978, 1992.

2.2.8.3. Norma española UNE 22-381-93

Dicha norma es aplicable a diferentes tipos de trabajos que impliquen la utilización de voladuras para realizar sus actividades, dentro de estos tipos de trabajos tenemos a los trabajos de explotación en minas y canteras, tanto para las labores de extracción como para labores

complementarias; trabajos de construcción en obras públicas y para trabajos de demolición. En la tabla 11 se observa los datos paramétricos correspondientes a las clasificaciones de esta normativa.

Tabla 11
Parámetros de vibración por estructura UNE 22-381-1993

| Tipo de Estructura | Frecuencia principal (Hz) | | |
|--------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|
| | 2 a 15 | 15 a 75 | Mayor a 75 |
| | Velocidad PPV (mm/s) | Desplazamiento (mm) | Velocidad PPV (mm/s) |
| I | 20 | 0,212 | 100 |
| II | 9 | 0,095 | 45 |
| III | 4 | 0,042 | 20 |

Nota. Para frecuencias entre 15 y 75 Hz, los niveles están dados en desplazamiento, la velocidad se calcula en base a la ecuación [5]. Según el tipo de estructuras tipo I, corresponde a edificios y naves industriales; tipo II, corresponde a edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreación; y tipo III, corresponde a estructuras de valor arqueológico o histórico.

Fuente: Norma española UNE 22-381-93, 1993.

$$V = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot d \quad [5]$$

Donde:

V = Velocidad equivalente en mm/s.

f = Frecuencia en Hz.

d = Desplazamiento admisible en mm.

2.2.8.4. Norma portuguesa NP2075 – 1995

En la tabla 12 se muestra norma NP2075 y los datos paramétricos sobre vibraciones.

Tabla 12
Parámetros de vibración en distintas edificaciones NP2074

| Tipo de construcción | Tipo de Suelo | | |
|---------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|
| | Suelos no consolidados | Suelos compactos de consistencia mediana a dura | Suelos de alta coherencia y rocas |
| | Velocidad de la onda (m/s) | | |
| | < 1 000 | 1 000 - 2 000 | > 2 000 |
| | Frecuencia (Hz) | | |
| | < 10 | 10 - 40 | > 40 |
| Construcciones especiales | 3 | 5 | 10 |
| Construcciones normales | 5 | 10 | 20 |
| Construcciones reforzadas | 15 | 30 | 60 |

Fuente: Norma Portuguesa NP2074, 1995.

En la normativa portuguesa los valores límites son establecidos de acuerdo con las características de las condiciones de fundación, del tipo de construcción y de las fuerzas dinámicas. Esta norma propone, además de consideraciones de las características anteriormente mencionadas, una consideración de frecuencia (Norma Portuguesa NP2074, 1995).

El parámetro usado para evaluar el nivel de vibración es la suma vectorial de las tres componentes ortogonales de velocidad de la partícula, o simplemente se toma el valor máximo de cada eje, el resultado de este estudio es mostrado en la tabla 12.

2.3. Definición de términos

2.3.1. Velocidad pico partícula (VPP)

Es el movimiento de las partículas a través del macizo rocoso y se propaga en 3 dimensiones, vertical, radial y transversal. Las vibraciones generadas alcanzan velocidades máximas, conocidas como velocidad pico partícula; su monitoreo se realiza por medio de sismógrafos, donde se registra las velocidades alcanzadas (Cueva y Huaynate, 2020).

2.3.2. Infraestructura

Se hace referencia a todo bien muebles o inmueble que se encuentran en determinadas zonas como construcciones, maquinarias y bienes de gran valor. Las infraestructuras más cercanas a una unidad

minera generalmente son la planta de chancado y molienda, planta de concentración y beneficio, relaveras, represas, botaderos, lagunas, centros poblados entre otros (Cueva y Huaynate, 2020).

2.3.3. Impactos de voladura

Las voladuras impactan directamente a las estructuras e infraestructuras más cercanas a la voladura, produciendo daños al entorno dentro del área de influencia, producto del uso de agentes explosivos o fracturadores, generación vibraciones y proyección de partículas proyectadas; afectando de esta forma a la estructura interna del macizo rocoso, lo que incrementa las fallas y diaclasas, que en un futuro pueden originar desplazamientos en las zonas operativas, dependiendo de las condiciones de desarrollo (Cueva y Huaynate, 2020).

2.3.4. Macizo rocoso

El macizo rocoso es un medio discontinuo, anisótropo y heterogéneo conformado en conjunto, por bloques de matriz rocosa y distintos tipos de discontinuidades que lo afectan, ocurren en los medios ambientes geológicos y naturaleza, afectados principalmente por los

planos de debilidad o discontinuidad, que distan a los bloques de la matriz rocosa; ambos conjuntos, la matriz rocosa y discontinuidades, forman parte del macizo rocoso (Iglesias, 2016).

2.3.5. Propiedades de la onda

Las propiedades básicas de propagación de ondas de vibración son la frecuencia, amplitud, duración, longitud y velocidad (Chávez, 2019).

- a) Frecuencia; son los ciclos de compresión y tensión que la onda de propagación transmite por segundo.
- b) Amplitud; es la medida de la variación máxima de desplazamiento, relacionado a partículas individuales sujetas a esfuerzos.
- c) Duración; es el tiempo total que el medio está expuesto a la vibración.
- d) Longitud de onda; es la distancia que viaja la onda durante un ciclo completo de compresión y tensión.
- e) Velocidad de propagación; es la velocidad de onda de desplazamiento, diferenciada de la velocidad de movimiento de partícula.

2.3.6. Cara libre

La cara libre es la superficie que está en contacto con el entorno, y es indispensable para la formación de fracturas y retorno de las ondas de tensión reflejadas que generan la fragmentación (Exsa SA, 2009).

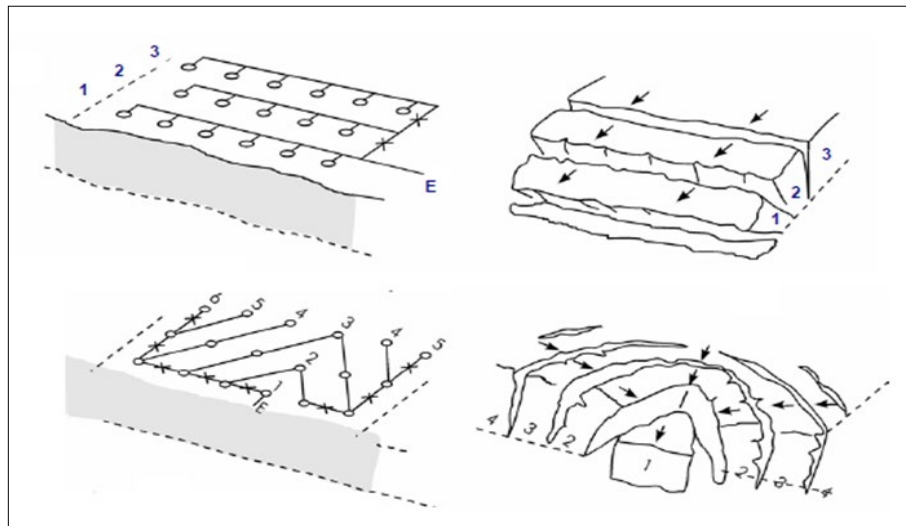


Figura 10. Secuencia de disparo con cara libre
Fuente: Exsa SA, 2009.

2.3.7. Factor de carga

Para voladuras convencionales, corresponde a la cantidad de explosivo en peso que se emplea para fragmentar un metro cúbico del macizo rocoso, aplicando técnicas de voladura, al combinar la diversidad de etapas de rotura a fin de extraer el material. Y para la fragmentación

con plasma, corresponde a la cantidad de sales, aplicando técnicas especiales de fragmentación. Este indicador sirve para controlar los costos y rendimientos del tipo de explosivo o fragmentador (Ortiz, 2009).

2.3.8. Desplazamiento

Es el movimiento del macizo rocoso triturado como consecuencia de la acción ejercida por los explosivos para voladuras convencionales, y sales para la fragmentación con plasma, en una dirección establecida según los diseños esperados (Ortiz, 2009).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación

Por el tipo de investigación, el presente estudio reúne las condiciones metodológicas de una investigación de carácter aplicada, porque establece los beneficios de la implementación y uso de plasma en las voladuras controladas, realizadas cerca de las estructuras e infraestructuras de la U.M. Quellaveco. Mientras que el diseño de investigación, es de enfoque cuantitativo, y corresponde a un diseño de tipo no experimental, pues no se ha manipulado las variables de estudio para obtener los resultados esperados. Sin embargo, se observan fenómenos de campo a fin de ser analizados desde un aspecto técnico, normativo y económico, enfocados en los resultados de fragmentación, vibración y costos; desde los puntos de vista mencionados, se pretende evaluar las bondades de la aplicación del plasma, a fin de determinar principalmente su impacto en el control de vibraciones de la U.M. Quellaveco.

3.2. Población y muestra

La población corresponde a las voladuras especiales realizadas por en la U.M. Quellaveco, cabe mencionar que las infraestructuras están relacionadas a elementos o servicios que son considerados como necesarios para que la organización pueda desarrollarse efectivamente. La muestra-01, flotación PY-109; corresponde al desarrollo de la nueva plataforma de flotación PY-109, cercana a la infraestructura de flotación.



Figura 11. Muestra-01 de fragmentación en flotación PY-109
Fuente: ENAEX, 2019a.

La muestra-01, se cargó 121 taladros con 767 cápsulas con un factor de carga de $0,38 \text{ kg/m}^3$. Se instaló un equipo sismógrafo con geófono triaxial de superficie para monitorear la estructura a 50 m.



Figura 12. Muestra-02 de fragmentación en relaves PY-055
Fuente: ENAEX, 2019a.

Mientras que la muestra-02, relaves P-55; corresponde al desarrollo de la nueva plataforma de relaves P-55, cercana a la infraestructura de camino o acceso por carretera; se cargó 67 taladros con 251 cápsulas con un factor de carga de $0,34 \text{ kg/m}^3$.

Se instaló un equipo sismógrafo con geófono triaxial de superficie para monitorear la estructura a 50 m, ubicada al suroeste de la fractura.

3.3. Operacionalización de variables

En la presente investigación, se han definido las variables independientes, dependientes y asociadas; su definición operacional, indicadores y dimensiones, se detallan en las siguientes tablas. El estudio de las variables nos permitirá evaluar y realizar el contraste de hipótesis de investigación; las variables independientes, representan el cambio del comportamiento matriz de la investigación (Tabla 13), mientras que las variables dependientes, representan los resultados obtenidos al analizar los cambios observables y medibles (Tabla 14).

Tabla 13
Operacionalización de variables independientes

| Operacionalización de variables independientes | | |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variable | Operacional | Indicadores |
| Producto | Corresponde al uso de producto para evaluar los resultados de los proyectos de voladuras. | <u>Tipo de producto</u> Plasma 4 th Explosivos |
| Normativas | Corresponde a las normativas del control de vibraciones en los proyectos de voladura. | <u>Normativas internacionales</u> Norma Nacional Norma Alemana DIN 4150-1999 Norma suiza SN 640312-1978 Norma española Une 22-381-93 Norma portuguesa NP2075-1995 |

Fuente: propia.

Tabla 14
Operacionalización de variables dependientes

| Operacionalización de variables dependientes | | |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variable | Operacional | Indicadores |
| Vibración | Corresponde a los resultados de vibración obtenidos en los proyectos de voladura respecto al uso del producto. | <u>Registros cuantificables</u> VPP (mm/s) Frecuencia (Hz) Presión de onda (dB) Área de influencia (m) |
| Fragmentación | Corresponde a la fragmentación obtenida en los proyectos de voladura respecto al uso del producto. | <u>Registros cuantificables</u> Fragmentación D90 (cm) <u>Registros observables</u> Fly-rock |
| Costo unitario | Corresponde a los costos del uso del producto en los proyectos de voladura. | <u>Registros cuantificables</u> Costo unitario plasma 4th (USD/t) Costo unitario ANFO (USD/t) |

Fuente: propia.

Tabla 15
Operacionalización de variables asociadas

| Operacionalización de variables asociadas | | |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variable | Operacional | Indicadores |
| Zona crítica | Corresponde a las infraestructuras y estructuras cercanas a los proyectos de voladuras. | <u>Registros observables</u> Identificación de infraestructura y estructuras críticas |
| Caracterización macizo rocoso | Corresponde a las propiedades físicas y mecánicas del macizo rocoso de los proyectos de voladura evaluados. | <u>Registros cuantificables</u> Densidad (t/m ³) Resistencia a la compresión (Mpa) Resistencia a la tracción (Mpa) RQD (%) RMR |
| Diseño Pervol | Corresponde al diseño de perforación y voladura de los proyectos evaluados. | <u>Registros observables</u> Diseños de malla de perforación Diseño de carga de voladura |

Fuente: propia.

Las variables asociadas, como zona crítica, caracterización del macizo rocoso y diseño Pervol; son variables que interfieren directamente en los resultados, para la presente investigación no se consideran como materia de estudio, por lo tanto, es tratada como información (Tabla 15).

3.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

El presente estudio se investigó mediante las técnicas de análisis descriptivo de las variables principales a través de experimentación y observación. La actividad del procedimiento de trabajo seguro en la fragmentación de roca con plasma y el monitoreo de vibraciones con el uso del sismógrafo con geófono en los proyectos PY-109 plataforma de flotación para GYM STRACON y proyecto PY-055 plataforma de relaves para JJC BESALCO, a continuación, se detallan estas actividades.

- a) Técnicas en campo; corresponde a las actividades realizadas en campo para la recolección de datos; como la identificación y reconocimiento de los proyectos en campo; control y llenado de procedimientos de seguridad; delimitación de la zona; control de descarga del plasma; capacitación continua en su uso; control y verificación de parámetros de diseño del proyecto; control y testeado de

cápsula de plasma con el uso de multitester para probar continuidad; verificación con el multitester de las conexiones de cargas introducidas; control de unión del circuito de amarre de cargas de acuerdo a la resistencia óhmica (máximo 45 Ohm por canal); control de adecuada instalación de iniciador y generador eléctrico; inspección de extensión del cable troncal de iniciación y conexión del circuito con cable troncal; verificar conexión del cable troncal al iniciador; conexión de red 220 V al iniciador (7 o 9 KVA); e inspección del sismógrafo instalado a 50 m del proyecto de fragmentación.

- b) Técnica en gabinete; corresponde a las actividades que se realizan desde la revisión de fuentes de información de guías para la realización de los proyectos; como la recopilación de información referente a cápsulas de plasma; revisión de metodologías y marco normativo de vibraciones; reporte del monitoreo de vibraciones con sismógrafos; y procesamiento de la información con programa BlasWare.

Los instrumentos de la presente investigación para las técnicas en campo, corresponden al uso de camioneta para el transporte; camión furgón de capacidad 5 t para el traslado de las cápsulas de plasma; equipo generador 7 KVA, máquina iniciadora eléctrica de 4 claves, extensiones eléctricas, para cables 6", multitester, cinta aisladora, alambre 1,5

mm²/NYA, atacador y sismógrafo con geófono MP14120 V10-75 Minimate Pro 6; formatos de trabajo IPERC y equipos de señalización. Con respecto a las técnicas en gabinete se consultaron informes de consultorías, investigaciones en campo y estudios especializados en la materia de investigación, correspondientes a fragmentación con cápsulas de plasma en la U.M. Quellaveco.

3.5. Procesamiento y análisis de datos

De acuerdo a los datos registrados en el estudio, se procederá a realizar el procesamiento y análisis de datos correspondientes a los proyectos de prueba en la U.M. Quellaveco del año 2019.

3.5.1. Recolección de datos

Para la presente investigación, la recolección de datos se basa en la obtención del registro de los proyectos PY-109 plataforma de flotación para GYM STRACON, y proyecto PY-055 plataforma de relaves para JJC BESALCO, la fragmentación se realiza con cápsulas de plasma.

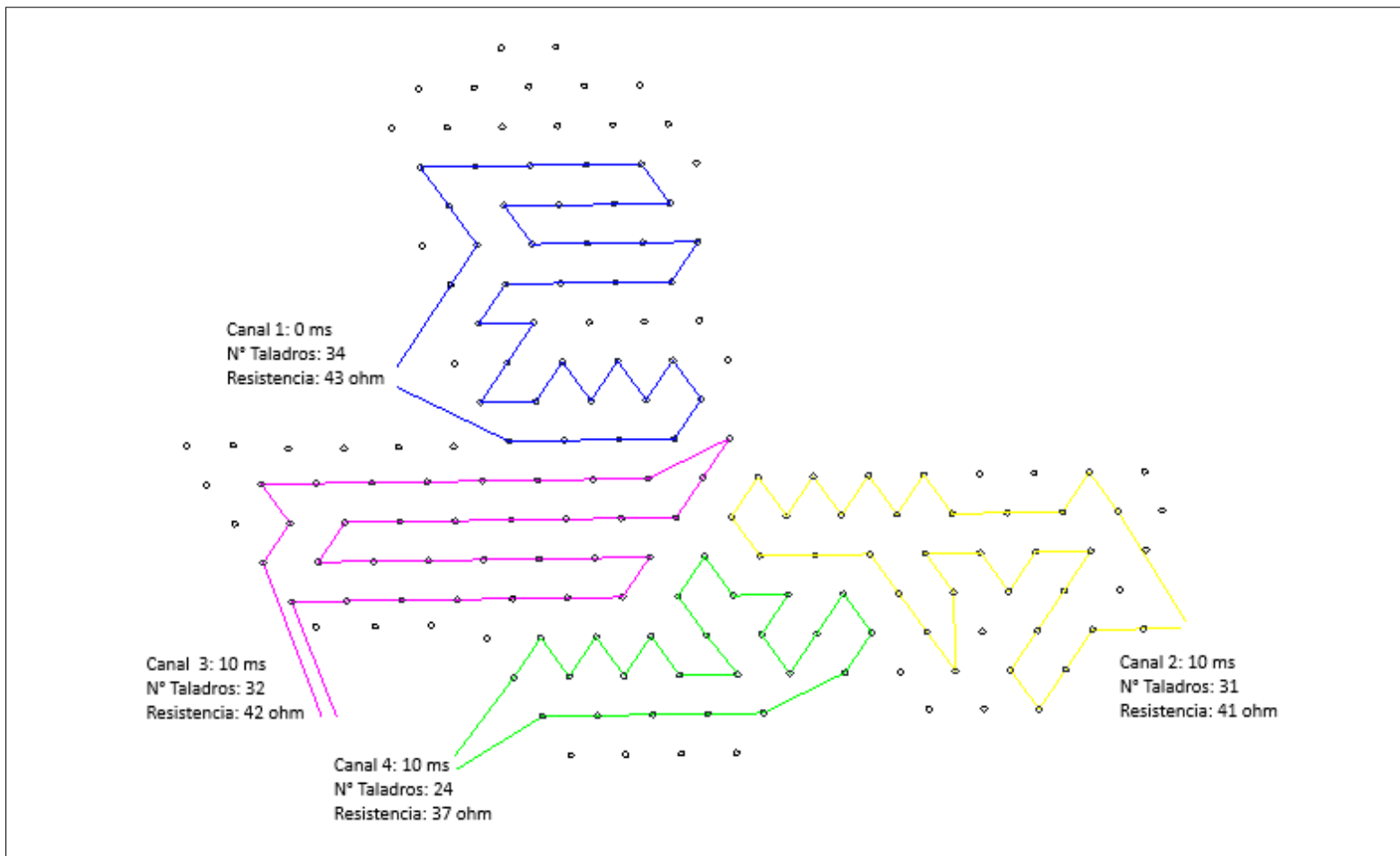


Figura 13. Diseño de malla y amarre del PY-109
 Fuente: ENAEX, 2019c.

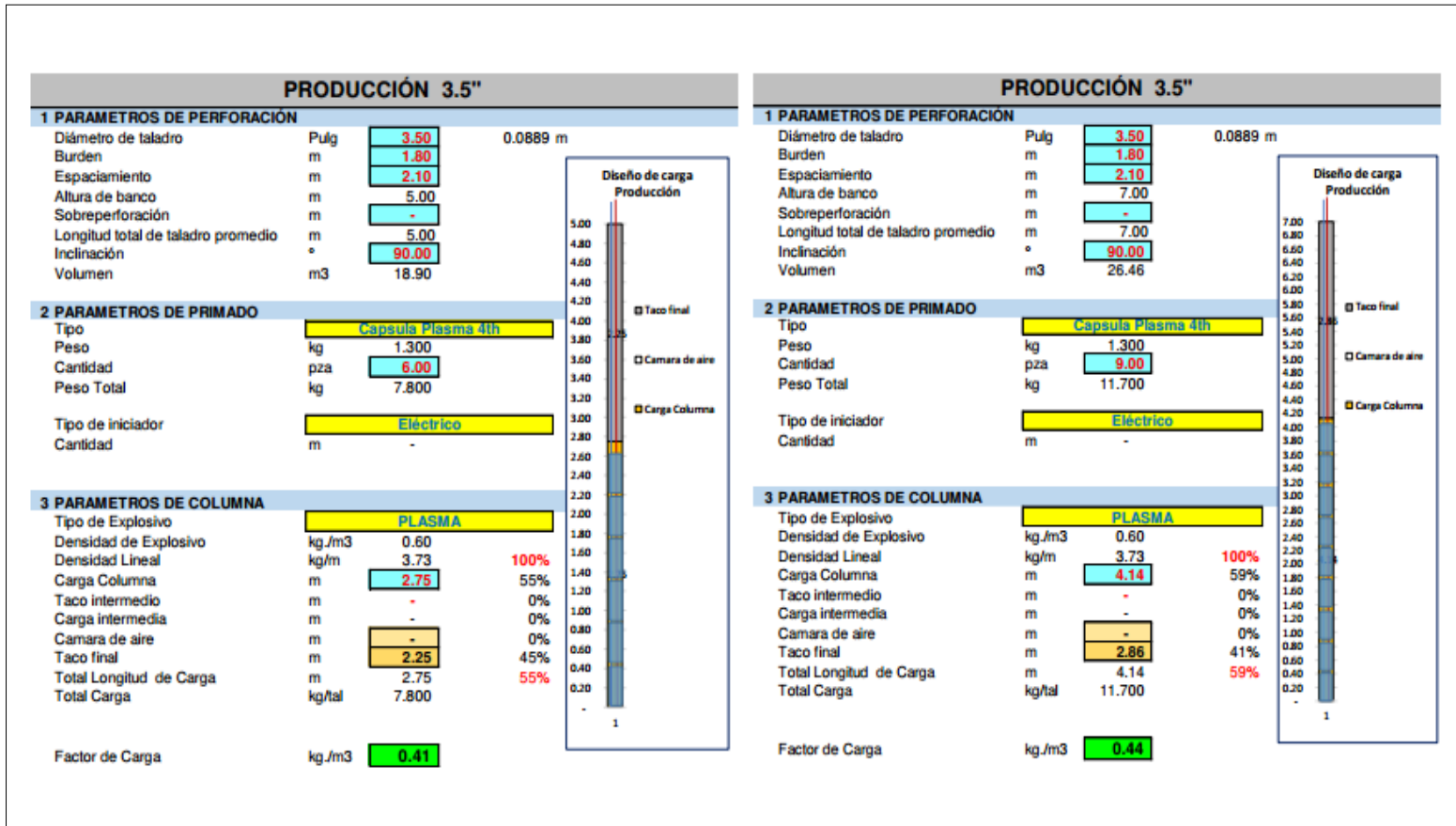


Figura 14. Diseño de carga del PY-109 con altura 5 y 7 m
Fuente: Cuayla, 2020.

a) Proyecto PY-109 plataforma de flotación GYM STRACON

Se realizó el carguío de 121 taladros con 767 cápsulas, con un factor de carga de diseño de $0,38 \text{ kg/m}^3$. El área donde se desarrolló la fractura, estuvo con muchas estructuras metálicas y elementos a menos de 15 m. Estos fueron retirados o en algunos casos protegidos. Se tomaron medidas para controlar el exceso de polución y las proyecciones en la fractura, tales como no cargar los taladros cercanos a la cresta por tener material muy suelto y también se colocó taco superior a 1,8 m.

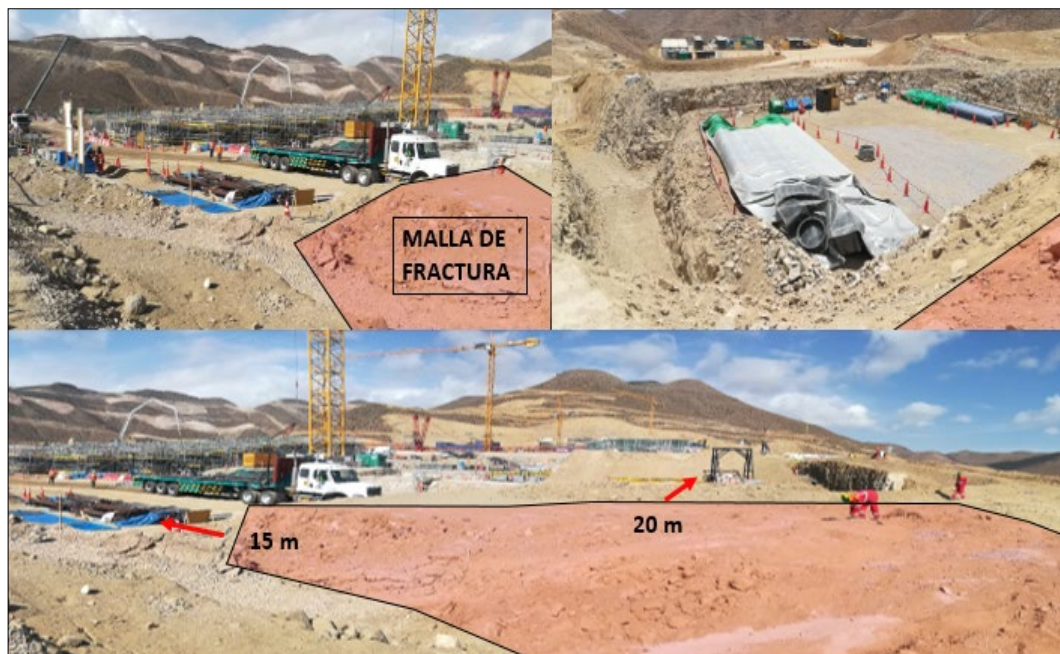


Figura 15. Zonas críticas del PY-109
Fuente: ENAEX, 2019c.

Los resultados obtenidos referentes al cuidado del área colindante fueron positivos, porque no se encontraron fragmentos de rocas de importancia a más de 5 m de la distancia de fractura, esto refleja el cuidado que se tuvo en el carguío de los taladros.

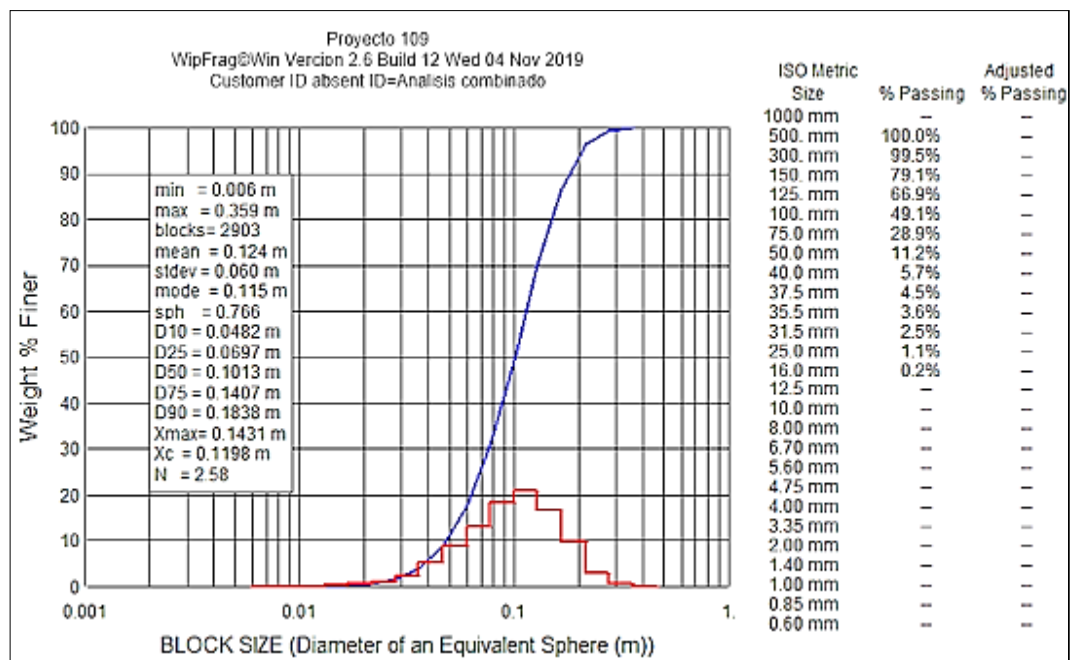


Figura 16. Curva de fragmentación flotación PY-109
Fuente: ENAEX, 2019c.

Se realizó monitoreo de vibraciones a 50 m al Noreste del PY-109; obteniéndose una PPV suma de 3,88 mm/s en 0,146 segundos y AirBlast de 120,9 dB con una frecuencia de 3,2 Hz, dichos valores se encuentran por debajo del umbral de daño “tipo III” según la norma DIN4150.

Instantel RO VIBRACIONES PY 109 - GYM STRACON - 2019-11-04

Date/Time Vert at 13:01:22 November 4, 2019
 Trigger Source Geo: 0.127 mm/s, Mic: 131 dB(L)
 Range Geo: 254 mm/s
 Record Time 3.0 sec at 1024 sps
 Job Number: 1
 Operator/Setup: Operator 1/list-01.nsb
 Notes
 Location: QUELLAVrehouse
 Client:
 User Name:
 General:

Serial Number MP14120 V 10-75 Minimate Pro 8
 Battery Level 4.1 Volts
 Unit Calibration May 1, 2019 by Instantel
 Geo1 Calibration SE13818, May 1, 2019 by Instantel
 Mic Calibration SL12822, August 23, 2018 by Geoinstruments
 File Name MP14120_20191104130122.IDFW
 Post Event Notes
 Proyecto 109 - Plataforma de Flotacion - GYM STRACON
 El Geofono se instalo a 50 metros al noreste del proyecto de fractura.

Microphone Linear Weightling
 PSPL 120.9 dB(L) at 0.276 sec
 ZC Freq 3.2 Hz
 Channel Test Passed (Freq = 19.6 Hz Amp = 1485 mv)

| | Tran | Vert | Long | |
|---------------------|--------|--------|--------|------|
| PPV | 2.21 | 3.07 | 2.98 | mm/s |
| PPV | 57.9 | 60.7 | 60.5 | dB |
| ZC Freq | 24 | 17 | 28 | Hz |
| Time (Rel. to Trig) | 0.102 | 0.124 | 0.093 | sec |
| Peak Acceleration | 0.0395 | 0.0576 | 0.0558 | g |
| Peak Displacement | 0.0141 | 0.0248 | 0.0190 | mm |
| Sensor Check | Passed | Passed | Passed | |
| Frequency | 7.5 | 7.1 | 7.4 | Hz |
| Overswing Ratio | 4.3 | 4.4 | 4.4 | |

Peak Vector Sum 3.88 mm/s at 0.146 sec

PPV Sumatoria Registrado : 3.88 mm/s
 Airblast : 120.9 dB
 Distancia : 50 metros aprox.

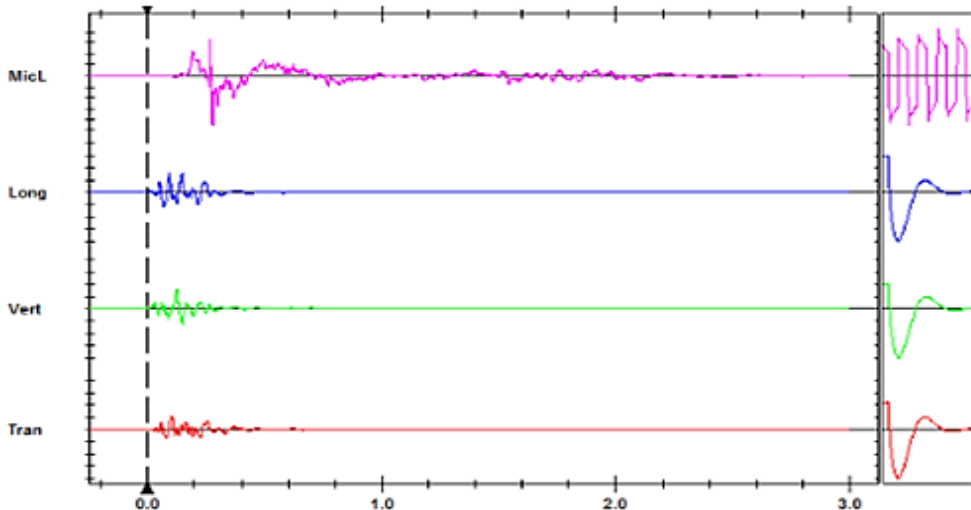
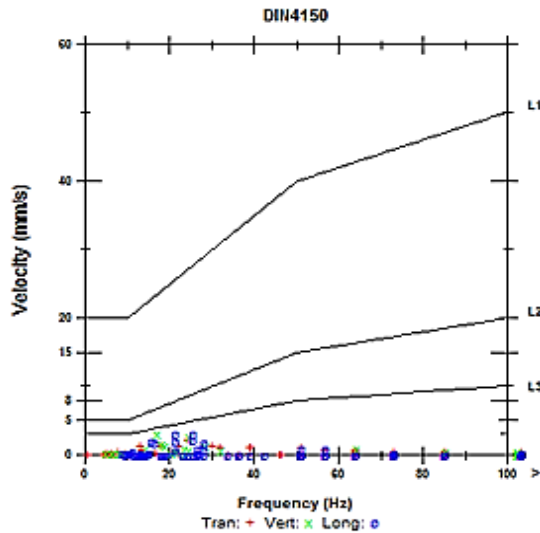


Figura 17. Registro y análisis de vibraciones del PY-109
 Fuente: ENAEX, 2019a.

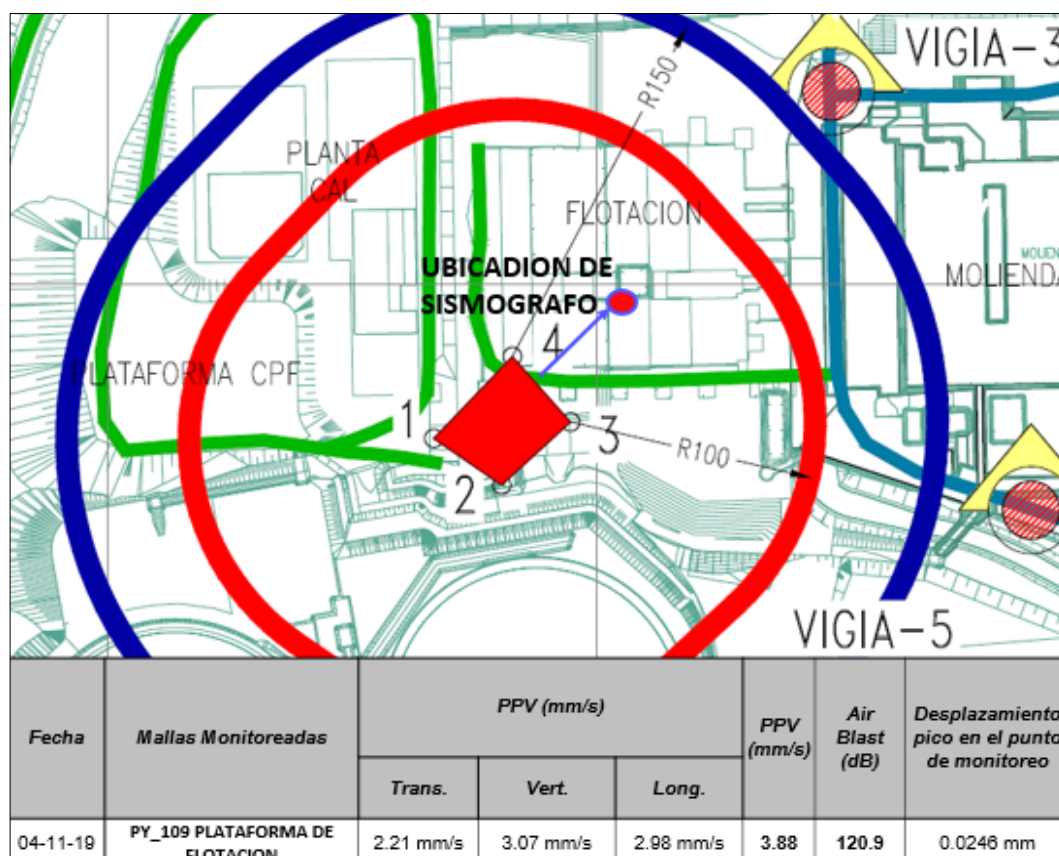


Figura 18. Control de muestra-01 en flotación PY-109
Fuente: ENAEX, 2019c.

Se ingresó al frente a solo 15 min después que se generó el disparo sin ningún contratiempo, se verificó la fragmentación comprobando la iniciación completa de la malla. Comprobando que cantidad de ruido generado por la fragmentación del proyecto PY-109 plataforma flotación para GYM-STRACON, estuvo en niveles muy bajos y admisibles a una distancia de 150 m desde donde se dio inicio la fragmentación. La relación a los gases y polución se disipo rápidamente y no superó los 6 m de altura.

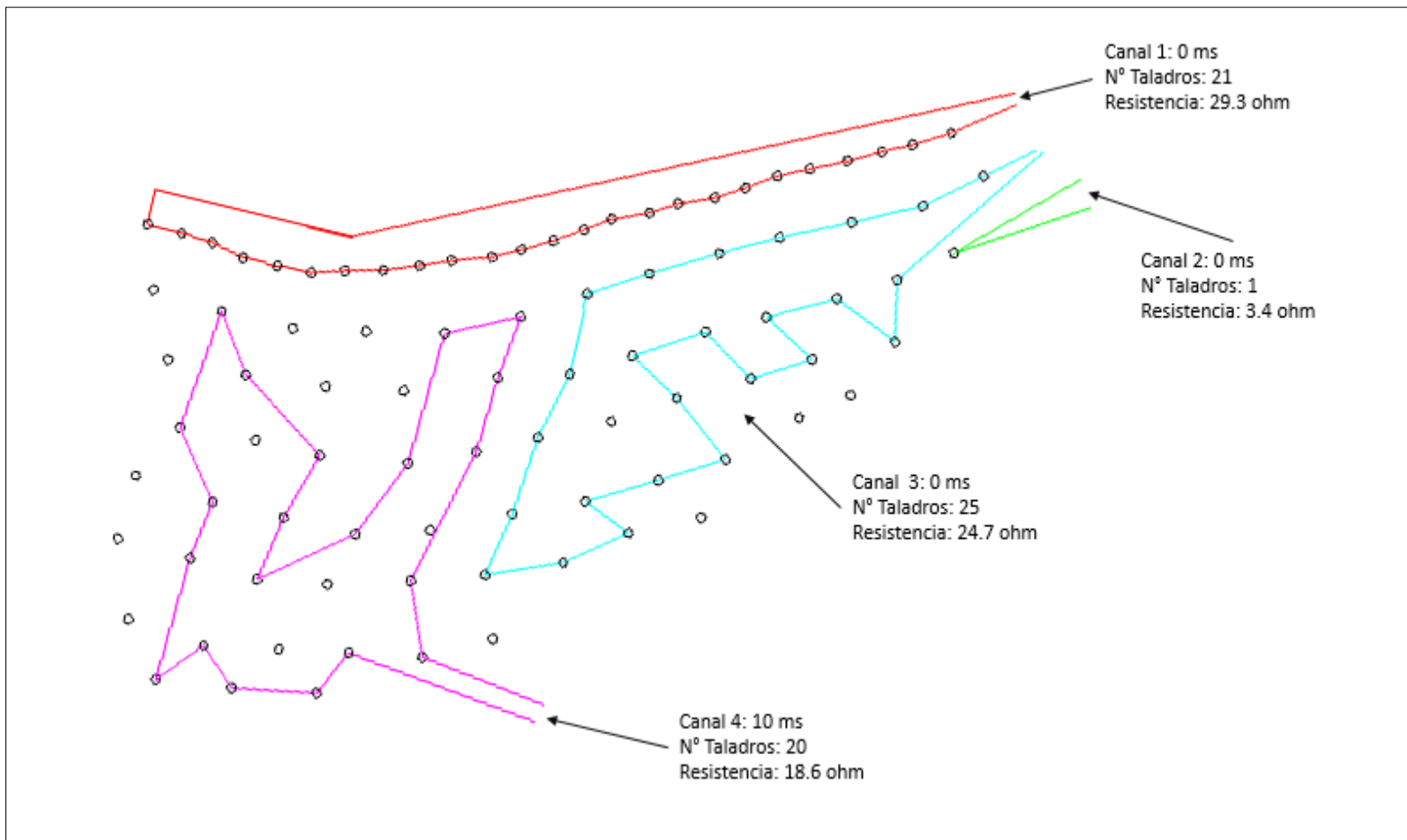


Figura 19. Diseño de malla y amarre del PY-055
Fuente: ENAEX, 2019d.

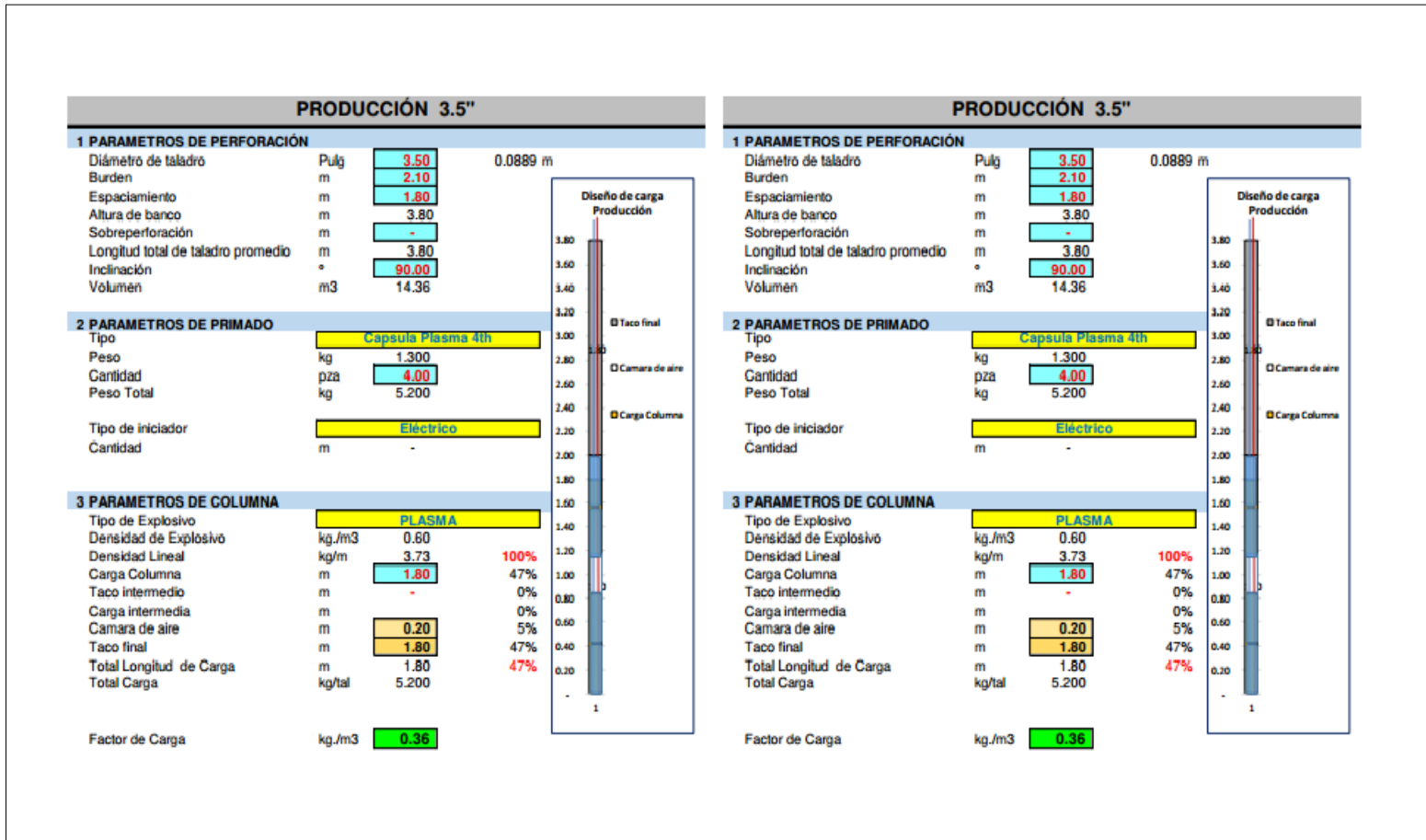


Figura 20. Diseño de carga del PY-055 para pre corte y producción
Fuente: Cuayla, 2020.

b) Proyecto PY-055 plataforma de relaves JJC BESALCO

Se realizó el carguío de 67 taladros con 251 cápsulas, con un factor de carga de diseño de $0,34 \text{ kg/m}^3$. El área donde se desarrolló la fractura, se desarrolló en el acceso a la plataforma de relaves. Además, la operación no dificultó el tránsito antes y después de la fractura. Se puede identificar como zona crítica a construcciones, campamentos y equipos que se encuentran ubicado a 60 m del proyecto.

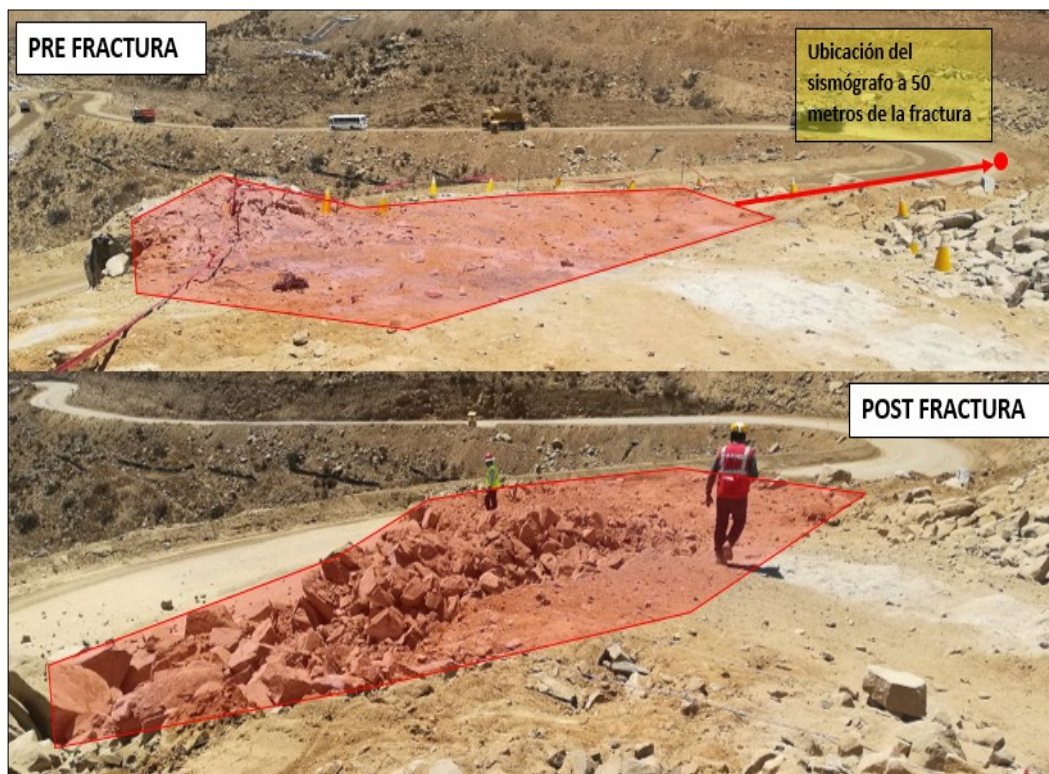


Figura 21. Fractura de muestra-02 en relaves PY-055
Fuente: ENAEX, 2019d.

Instantel VIBRACIONES PY 055 TALLER DE CAMIONES COSAPI EPSA 09/11/19

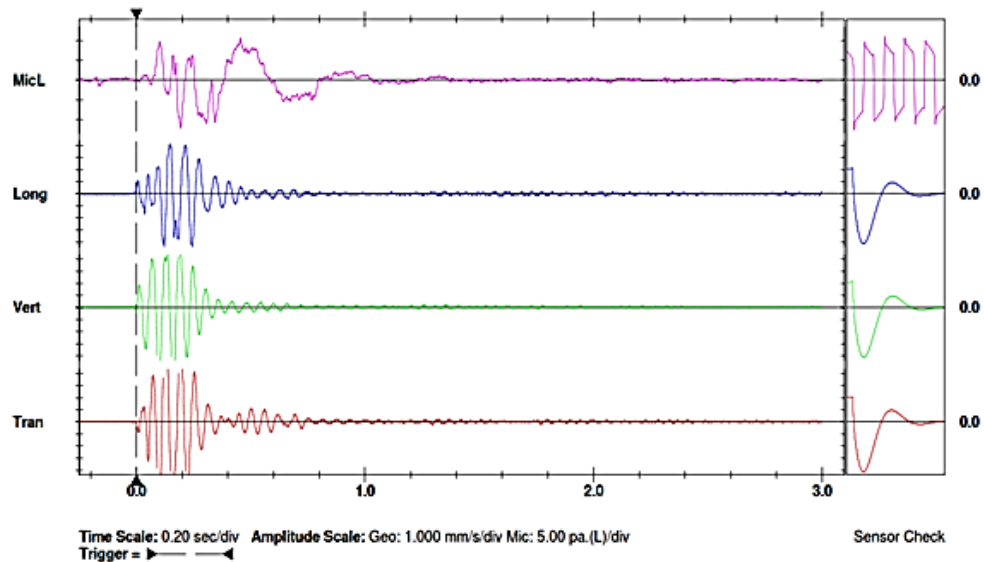
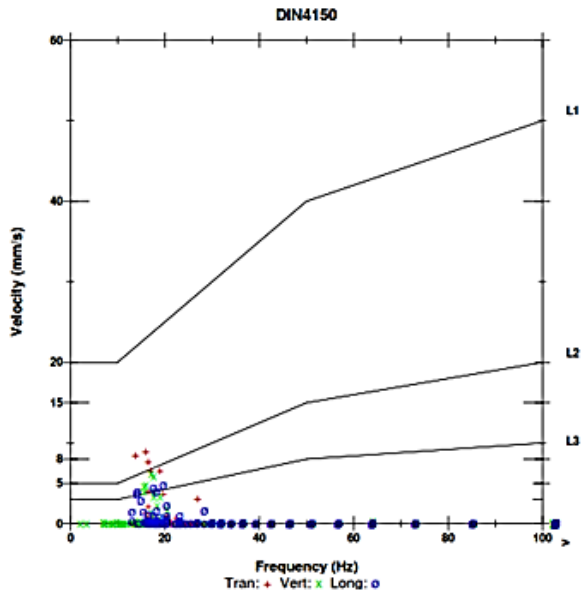
Date/Time Long at 12:59:06 November 8, 2019
 Trigger Source Geo: 0.500 mm/s, Mic: 131 dB(L)
 Range Geo: 254 mm/s
 Record Time 3.0 sec at 1024 sps
 Job Number: 1
 Operator/Setup: Operator 1/list-01.nsb
 Notes
 Location: QUELLAVrehouse
 Client:
 User Name:
 General:

Serial Number MP14120 V 10-75 Minimate Pro 6
 Battery Level 3.9 Volts
 Unit Calibration May 1, 2019 by Instantel
 Geo1 Calibration SE13818, May 1, 2019 by Instantel
 Mic Calibration SL12822, August 23, 2018 by Geoinstruments
 File Name __TEMP.EVT

Microphone Linear Weighting
 PSPL 115.7 dB(L) at 0.193 sec
 ZC Freq 14 Hz
 Channel Test Passed (Freq = 19.6 Hz Amp = 1633 mv)

| | Tran | Vert | Long | |
|---------------------|--------|--------|--------|------|
| PPV | 9.07 | 6.21 | 4.75 | mm/s |
| PPV (Ponderated) | 9.24 | 6.14 | 4.66 | mm/s |
| ZC Freq | 16 | 17 | 20 | Hz |
| Time (Rel. to Trig) | 0.128 | 0.162 | 0.119 | sec |
| Peak Acceleration | 0.0979 | 0.0749 | 0.0732 | g |
| Peak Displacement | 0.0900 | 0.0546 | 0.0474 | mm |
| Sensor Check | Passed | Passed | Passed | |
| Frequency | 7.4 | 7.2 | 7.3 | Hz |
| Overswing Ratio | 4.3 | 4.3 | 4.4 | |

Peak Vector Sum 10.3 mm/s at 0.126 sec



Printed: November 10, 2019 (V 10.60 - 10.60)

Format © 1995-2013 Xmark Corporation

Figura 22. Registro y análisis de vibraciones del PY-055
 Fuente: ENAEX, 2019a.

Los resultados obtenidos referentes a la fragmentación y el cuidado de la zona colindante fueron positivos, porque no se encontraron rocas proyectadas de gran importancia a más de 5 m de la fractura.

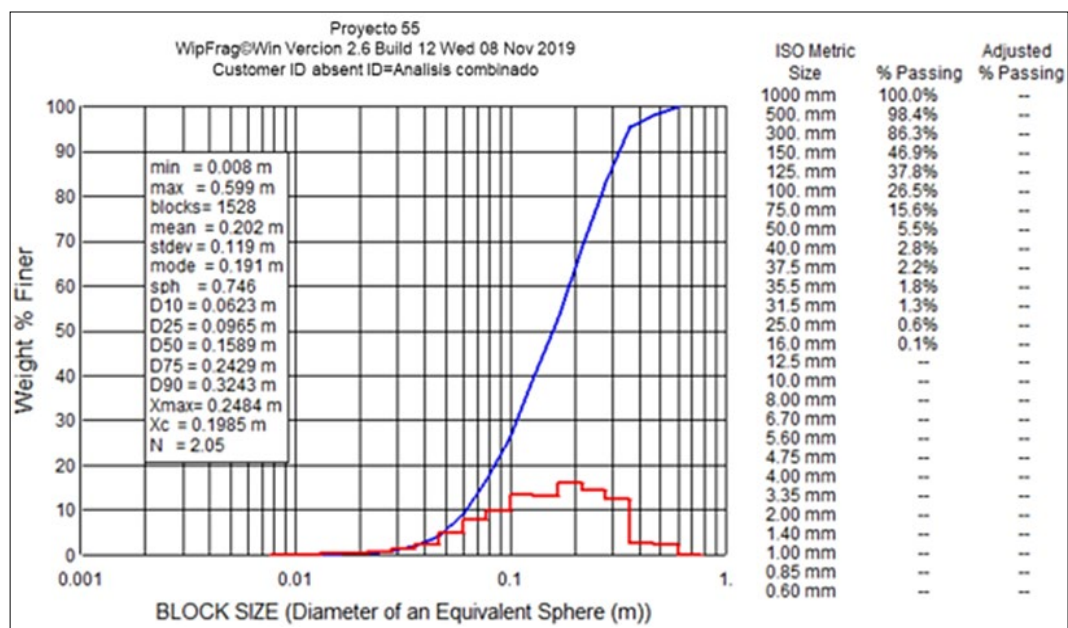


Figura 23. Curva de fragmentación relaves PY-055
Fuente: ENAEX, 2019d.

El despeje del área se dio sin problemas y respetando el radio de influencia de 150 m para personas y equipos. Se realizó monitoreo de vibraciones a 50 m al sureste del PY-055; obteniéndose una PPV suma de 10,03 mm/s en 0,126 segundos y AirBlast de 120,9 dB con una frecuencia de 3,2 Hz, dichos valores se encuentran por debajo del umbral de daño “tipo III” según la norma DIN4150. Se ingresó al frente en 15 min después

que se generó el disparo este se dio con normalidad, se comprobó la salida de todos los canales; donde se generó bajo polvo y ruido.

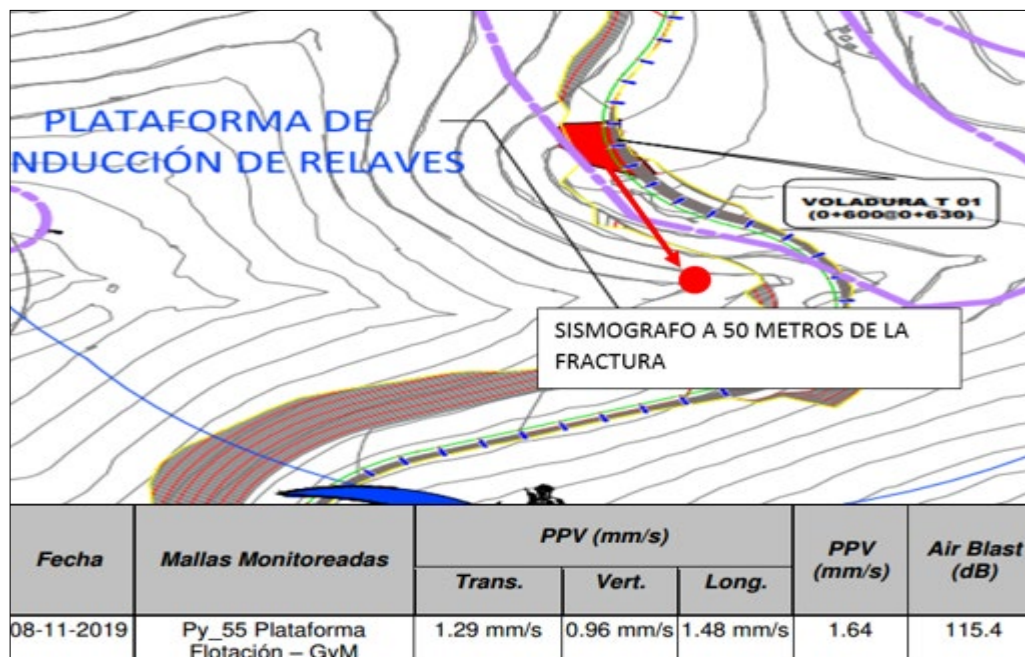


Figura 24. Control de muestra-02 en relavera PY-055
Fuente: ENAEX, 2019d.

Para la medición de factibilidad técnica y económica al usar las cápsulas de plasma en voladuras especiales, es necesario recolectar los registros voladuras con explosivos (ANFO) en la U.M. Quellaveco; como el PY-110 plataforma de molibdeno T-19 para GYM STRACON, y PY-019 plataforma de espesadores para GYM STRACON.

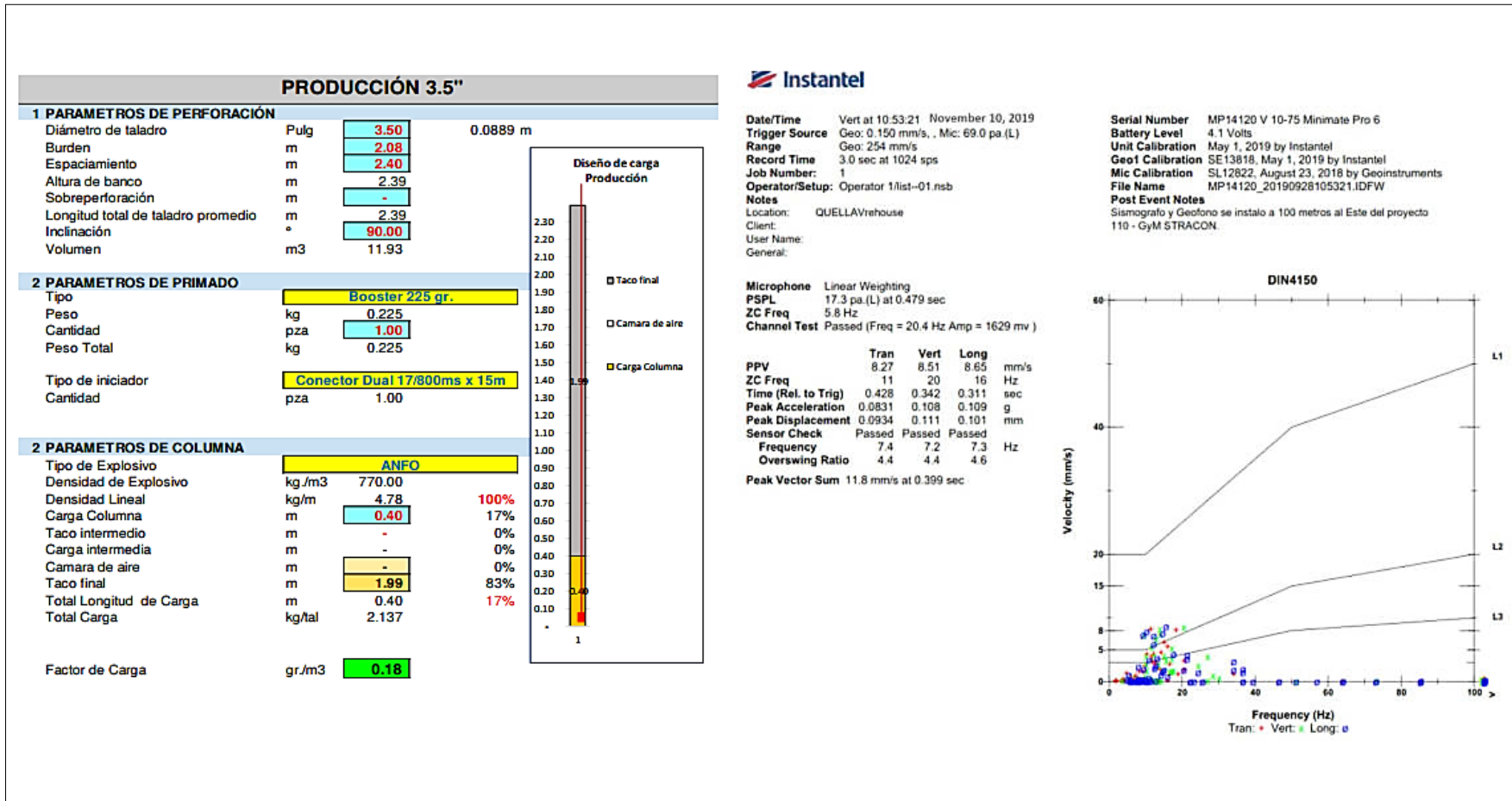


Figura 25. Diseño de carga y registro de vibración del PY-110
 Fuente: Cuayla, 2020.

a) Proyecto PY-110 plataforma de molibdeno GYM STRACON

Se realizó monitoreo de vibraciones a 100 m, al Este del PY-110; obteniéndose una PPV suma de 11,8 mm/s en 0,399 s, donde la voladura supero el tipo L2 y L3, considerado para construcciones de concreto no mayor a 116 m, dichos valores se encuentran por debajo del umbral de daño “tipo I” según la Norma DIN4150. Con respecto a la fragmentación mediante el programa Wipfrag, se obtuvo 0,2753 m en D90.

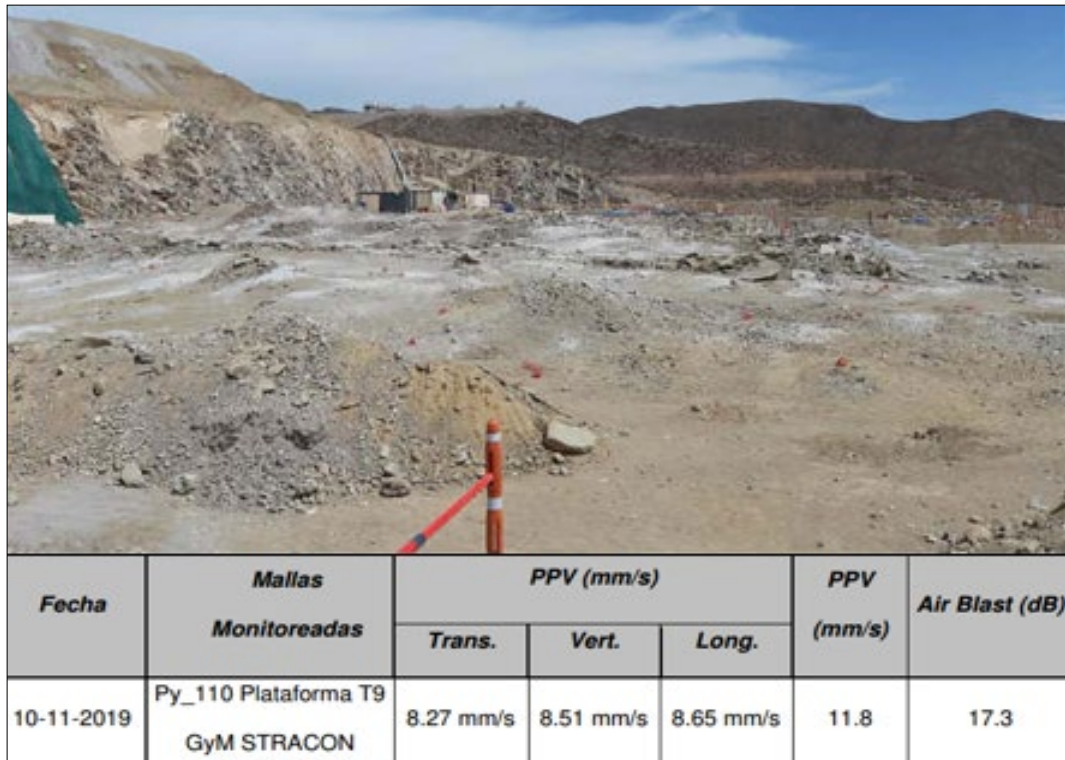


Figura 26. Control de vibración de la voladura PY-110
Fuente: Cuayla, 2020.

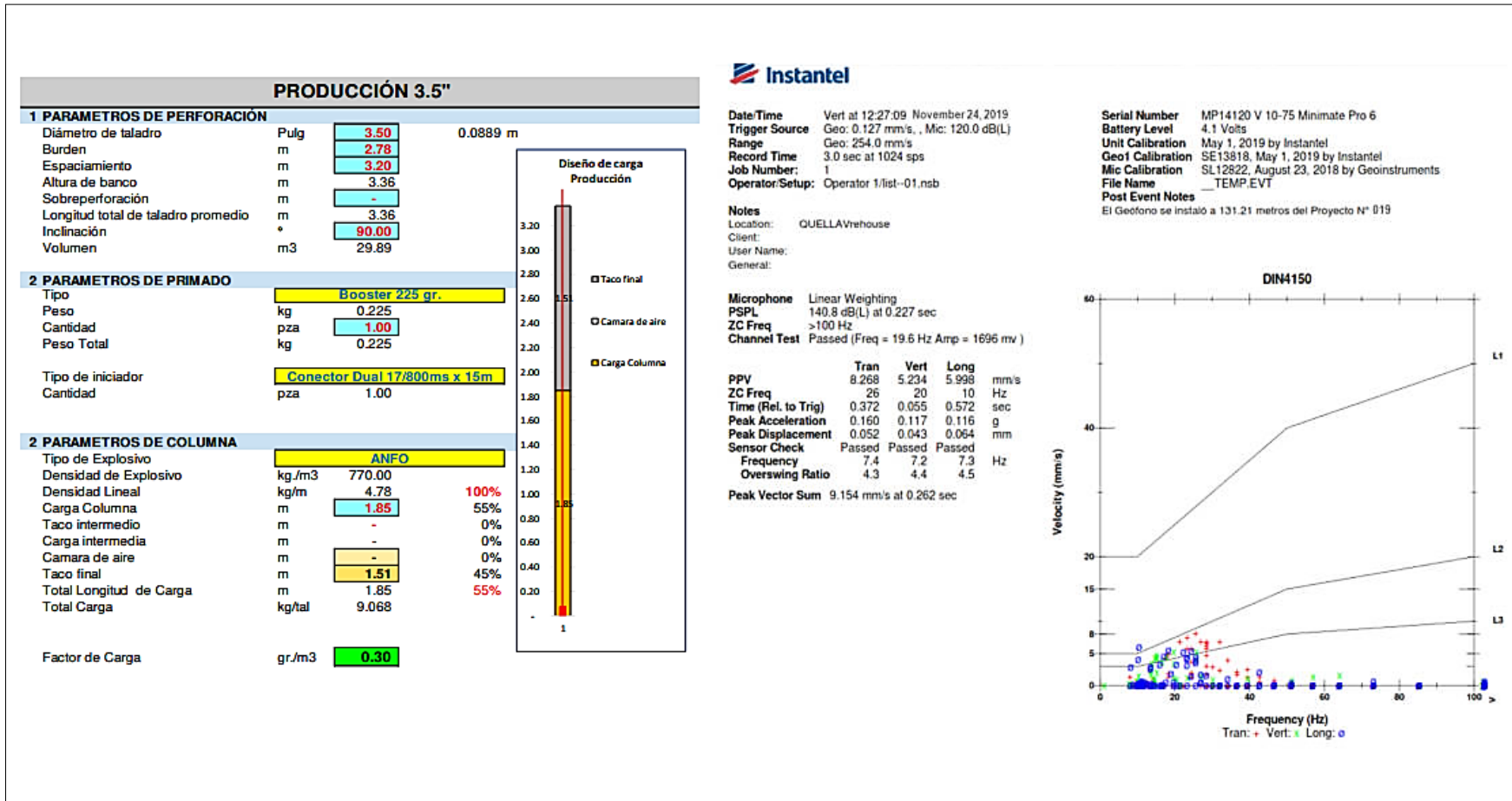


Figura 27. Diseño de carga y registro de vibración del PY-019
 Fuente: Cuayla, 2020.

b) Proyecto PY-019 plataforma de espesadores GYM STRACON

Se realizó monitoreo de vibraciones a 131,21 m, al sur del PY-019; obteniéndose una PPV suma de 9,154 mm/s en 0,262 s, de tal forma que la voladura supero el tipo de edificación L2 y L3, considerando construcciones de concreto no mayor a 125 m, presentando indicio de daños menores; de la misma forma la voladura presento proyección de rocas, dichos valores se encuentran por debajo del umbral de daño “tipo I” según la Norma DIN4150. Con respecto a la fragmentación mediante el programa Wipfrag, se obtuvo 0,2044 m en D90.

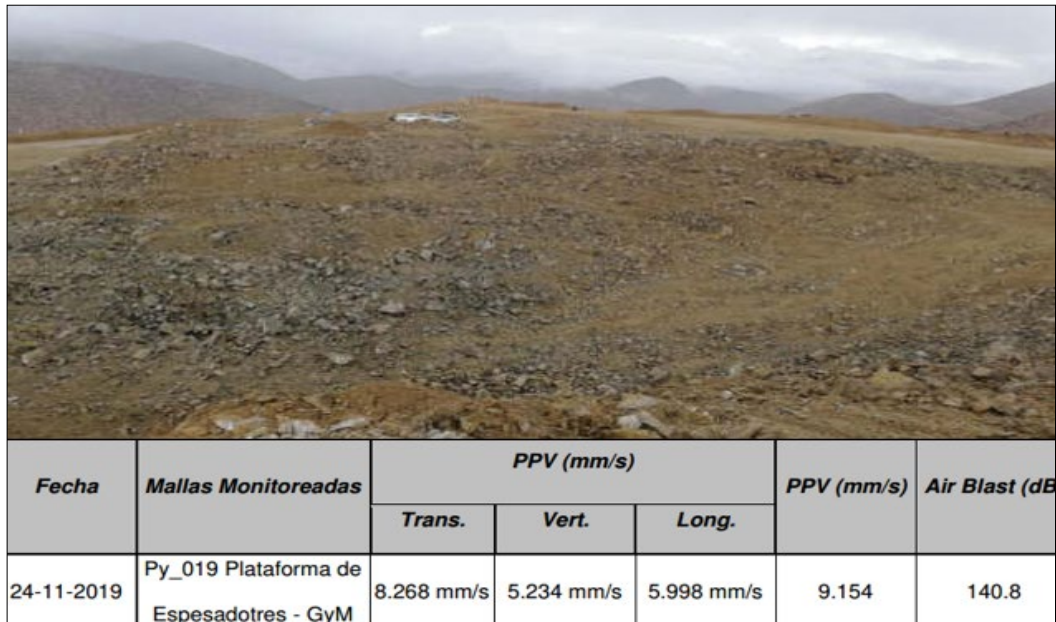


Figura 28. Control de vibración de la voladura PY-019
Fuente: Cuayla, 2020.

3.5.2. Procesamiento de datos

De acuerdo a las variables de estudio y decisión, se procede a realizar los cálculos correspondientes.

a) Distancia de monitoreo

En la tabla 16, se establecen las distancias de monitoreo para el control de vibraciones producidas por los proyectos de voladura; la distancia mínima según carga corresponde a la mínima distancia donde se debe de ubicar el geófono para el control de vibraciones según Devine, y la distancia de seguridad corresponde a la distancia mínima de preservación de equipos y seres vivos ubicados alrededor del proyecto.

Tabla 16
Distancia de monitoreo según proyecto

| Proyecto | Producto | Longitud de carga (m) | Distancia de mínima según carga (m) | Distancia de seguridad (m) | Distancia de infraestructura (m) | Distancia de monitoreo (m) |
|----------|-----------|-----------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| PY-109 | Plasma | 4,14 | 20,70 | 30 | 31,00 | 35,00 |
| PY-055 | | 1,80 | 9,00 | | 47,00 | 60,00 |
| PY-110 | Explosivo | 0,40 | 2,00 | 500 | 116,00 | 100,00 |
| PY-019 | | 1,85 | 9,25 | | 125,00 | 131,21 |

Fuente: propia.

b) Determinación de la carga

Para la determinación de la carga se aplica la teoría anunciada por Frank Chiappetta, que en base al criterio de profundidad de entierro a escala (SD) busca determinar la longitud óptima del taco efectivo en un taladro (figura 29), se calcula mediante la expresión [6].

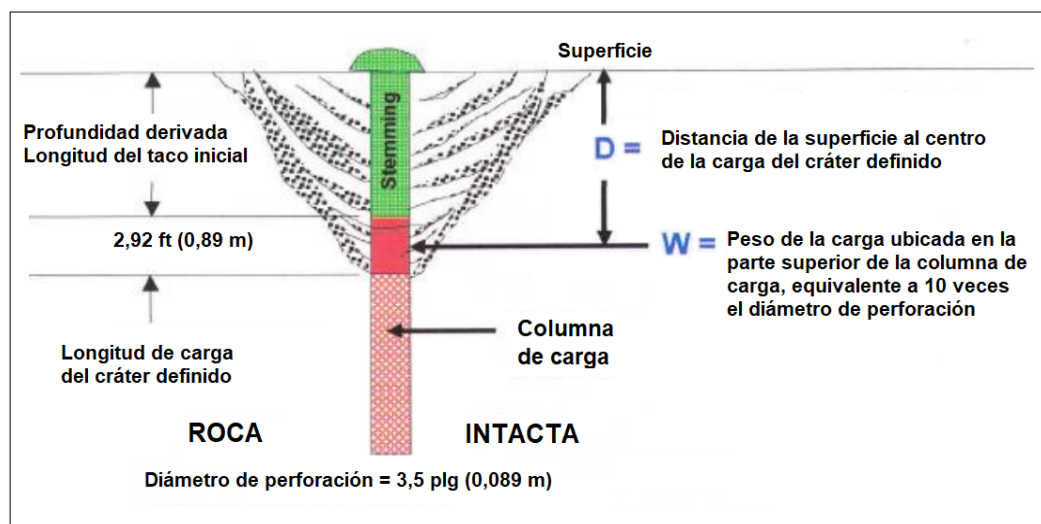


Figura 29. Variables del cálculo de la SD
Fuente: Basilio, 2014.

En la expresión [6] se establecen los parámetros para determinar la profundidad de entierro a escala (SD).

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

[6]

Donde:

SD = Profundidad de entierro a escala.

D = Distancia de la superficie al centro de la carga del cráter en m.

W = Peso de la carga en la parte superior de la columna.

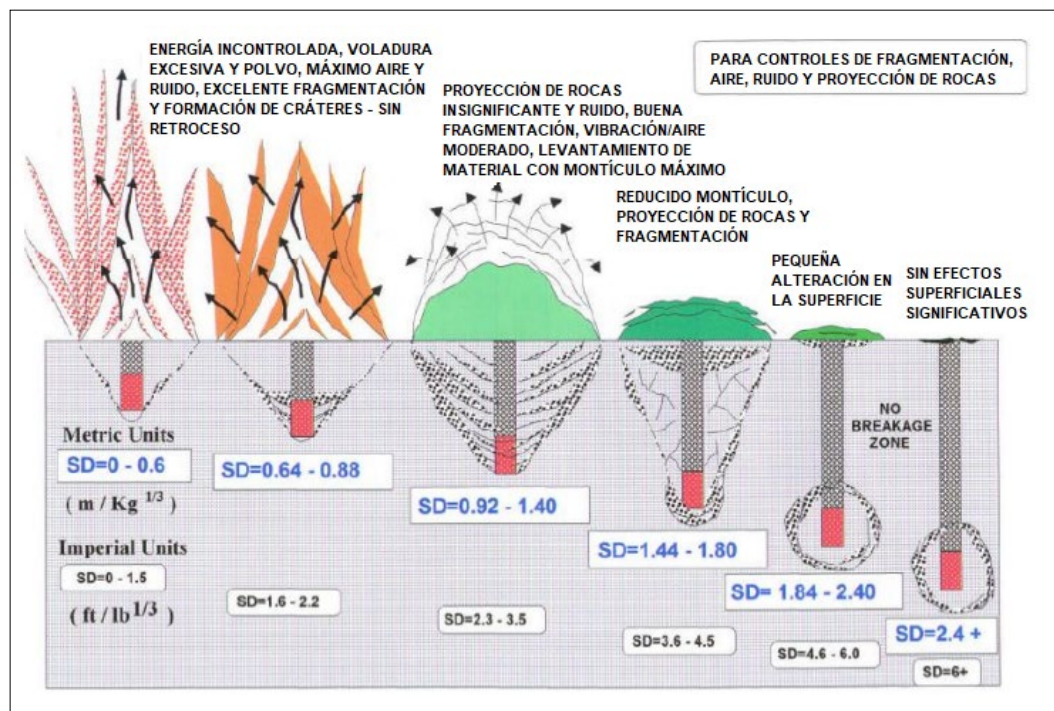


Figura 30. Criterio de la SD según campo cercano
Fuente: Basilio, 2014.

Como se observa en la figura 30; los valores de SD menores a 0,88 generan una adecuada fragmentación, sin embargo presenta un excesivo desgaste de energía que produce proyecciones de rocas pronunciadas, polvo y ruido; los valores mayores a 1,84 no generan una buena

fragmentación producto de la falta de perturbación con el exterior; los valores entre 1,44 y 1,8 generan una fragmentación controlada con mínima proyección de rocas, pero el cráter no es el óptimo; finalmente para valores de SD entre 0,92 y 1,40 logran una buena fragmentación sin ruido y poca proyección de rocas debido a la generación de un cráter óptimo.

Tabla 17
Cálculo del SD de los proyectos con plasma

| Proyecto | Producto | Longitud carga (m) | Longitud del taco (m) | D | W | SD |
|----------|----------|--------------------|-----------------------|------|-------|------|
| PY-109 | Plasma | 4,14 | 2,86 | 3,30 | 11,70 | 1,46 |
| PY-055 | | 1,80 | 1,80 | 2,24 | 5,20 | 1,30 |

Fuente: propia.

Al aplicar la expresión [6] de acuerdo a los parámetros de cada proyecto, como se observa en la tabla 17, se logra calcular la variable SD, esto nos permite evaluar el criterio de aceptabilidad del resultado previsto y clasificarla como fragmentación buena con formación de cráter óptimo. El indicador de carga se calcula mediante la expresión [7]; donde la densidad se mide Kg/m³ y el diámetro en plg.

$$\frac{Kg}{m} = Densidad \times Diámetro^2 \times 0,507 \quad [7]$$

c) Determinación de esfuerzos según monitoreo de vibraciones

En la tabla 18, se observa el registro de los esfuerzos vibratorios transversal, vertical, longitudinal y resultante por uso de fragmentador. Donde se visualiza que el uso estratégico del plasma reduce notablemente la vibración en los proyectos PY-055 y PY-109.

Tabla 18
Monitoreo de esfuerzos vibratorios

| Proyecto | Producto | VPP Trans. (mm/s) | VPP Vert. (mm/s) | VPP Long. (mm/s) | VPP (mm/s) |
|----------|-----------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------|
| PY_055 | Plasma | 1,29 | 0,96 | 1,48 | 1,64 |
| PY_109 | | 2,21 | 3,07 | 2,98 | 3,88 |
| PY_110 | Explosivo | 8,27 | 8,51 | 8,65 | 11,8 |
| PY_019 | | 8,268 | 5,234 | 5,998 | 9,154 |

Fuente: propia.

d) Criterio de daño y riesgo

El conocimiento de los límites de daño nos permite evaluar la realidad de la influencia de la voladura al entorno de trabajo. De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 19, se procede a realizar la evaluación de daños según criterios. Desde el punto de vista del criterio de daño en

taludes en referencia al criterio de daño de Oriard (1989) correspondientes al proyecto en acceso PY-055, se puede observar que el esfuerzo resultante de 1,64 mm/s no genera daño al talud cercano del acceso.

Tabla 19
Criterio de daño de Oriard

| Forma de daño | VPP (mm/s) |
|------------------------------------------------|---------------|
| Caída ocasional de roca suelta | 5 - 100 |
| Caída de secciones de roca parcialmente suelta | 130 - 380 |
| Daño a rocas poco competentes | > 600 |
| Daño significativo a rocas competentes | > 2 500 |

Fuente: Oriard, 1989.

Para controles de daños a infraestructuras, se aplican los criterios de acuerdo a la normativa vigente observadas en la Tabla 20, correspondiente al control en la plataforma de flotación de PY-109. Donde se puede observar que el esfuerzo resultante de 3,88 mm/s no genera daño. De acuerdo a ambos criterios de evaluación de daños, se determina que el uso del plasma no genera riesgos a los taludes colindantes e infraestructuras cercanas.

Tabla 20
Normativa vigente en control de vibraciones

| Normas | Criterio de evaluación | VPP (mm/s) |
|--------------------------------|----------------------------------------|-----------------------|
| Norma nacional | Distancia de sismógrafo 0 - 91,44 | 31,75 |
| Norma alemana DIN 4150-1999 | Edificios Delicados (III) Hz < 10 | 3 |
| Norma suiza SN 640312-1978 | Edificios delicados (IV) Hz 10 - 80 | 8 |
| Norma española UNE 22-381-93 | Tipo de estructura (III) Hz 2 - 15 | 4 |
| Norma portuguesa NP2075 – 1995 | Construcciones especiales Hz < 10 | 3 |

Fuente: propia.

e) Cálculo del costo unitario por proyecto

Para calcular el costo unitario de fragmentación para cada proyecto debemos de aplicar la expresión [8].

$$CU_{FRAG} = \frac{PU_{FRAG} \cdot Q}{T_{DISP}} \quad [8]$$

Donde:

CU_{FRAG} = Costo unitario de fragmentación en USD/t.

PU_{FRAG} = Precio unitario del fragmentador en USD/Kg.

Q = Cantidad de producto fragmentador por proyecto en Kg.

T_{DISP} = Tonelaje disparado en t.

En la Tabla 21, se observa los datos por variable para determinar el costo unitario de fragmentación de los proyectos con uso de plasma.

Tabla 21
Proyectos de fragmentación con plasma

| Variable | Características | Unidad | PY-055 JJC BESALCO | PY-109 GYM STRACON |
|---------------|-------------------|--------|-----------------------|-----------------------|
| Zona crítica | Control | # | Flotación | Flotación |
| | Proyecto | # | PY-055 | PY-109 |
| | Monitoreo | m | 47 | 35 |
| | Infraestructura | m | 60 | 31 |
| Diseño P&V | Malla | m | 2,10 x 1,80 | 1,80 x 3,50 |
| | Cantidad taladros | Und | 73 | 121 |
| | Volumen | m3 | 964 | 2516 |
| | Tonelaje | t | 1 301,40 | 3 396,60 |
| | Plasma 4TH | Kg | 340 | 997,1 |
| | Fc | kg/m3 | 0,36 | 0,41 |
| Fragmentación | D90 | cm | 32,43 | 18,38 |
| | Proyección roca | # | No | No |
| Vibración | VPP Trans. | mm/s | 1,29 | 2,21 |
| | VPP Vert. | mm/s | 0,96 | 3,07 |
| | VPP Long. | mm/s | 1,48 | 2,98 |
| | VPP | mm/s | 1,64 | 3,88 |
| | Tiempo | s | 0,177 | 0,146 |
| | Golpe aire | dB | 115,4 | 120,9 |
| Costo | Pu | USD/kg | 7,74 | 7,74 |
| | Costo total | USD | 2 631,60 | 7 717,55 |
| | Costo unitario | USD/t | 2,02 | 2,27 |

Fuente: ENAEX, 2019a.

En la Tabla 22, se observa los datos por variable para determinar el costo unitario de fragmentación de los proyectos con uso de explosivo.

Tabla 22
Proyectos de fragmentación con explosivos

| Variable | Características | Unidad | PY_110 GYM STRACON | PY_019 GYM STRACON |
|---------------|-------------------|--------|-----------------------|-----------------------|
| Zona crítica | Control | # | Molibdeno | Espesadores |
| | Proyecto | # | PY-110 | PY-019 |
| | Monitoreo | m | 100 | 131,21 |
| | Infraestructura | m | 116 | 125 |
| Diseño P&V | Malla | m | 2,08 x 2,4 | 2,78 x 3,20 |
| | Cantidad taladros | Und | 420 | 240 |
| | Volumen | m3 | 4817,65 | 7231,32 |
| | Tonelaje | t | 6 503,83 | 9 762,28 |
| | Explosivo - ANFO | Kg | 850 | 2175 |
| | Fc | kg/m3 | 0,18 | 0,3 |
| Fragmentación | D90 | cm | 27,53 | 20,44 |
| | Proyección roca | # | Si | Si |
| Vibración | VPP Trans. | mm/s | 8,27 | 8,268 |
| | VPP Vert. | mm/s | 8,51 | 5,234 |
| | VPP Long. | mm/s | 8,65 | 5,998 |
| | VPP | mm/s | 11,8 | 9,154 |
| | Tiempo | s | 0,399 | 0,262 |
| | Golpe aire | dB | 17,3 | 140,8 |
| Costo | Pu | USD/kg | 0,83 | 0,83 |
| | Costo total | USD | 704,85 | 1 803,58 |
| | Costo unitario | USD/t | 0,11 | 0,18 |

Fuente: Cuayla, 2020.

Para calcular el costo unitario de fragmentación con plasma por proyecto, se aplica la expresión [8] a los datos obtenidos de la tabla 21.

$$CU_{PY-055} = \frac{7,74 \frac{USD}{Kg} \cdot 340,00 Kg}{1\ 301,40 t}$$

$$CU_{PY-055} = 2,02 \frac{USD}{t} \quad [9]$$

$$CU_{PY-109} = \frac{7,74 \frac{USD}{Kg} \cdot 997,10 Kg}{3\ 396,60 t}$$

$$CU_{PY-109} = 2,27 \frac{USD}{t} \quad [10]$$

Para calcular el costo unitario de fragmentación con explosivo por proyecto, se aplica la expresión [8] a los datos obtenidos de la tabla 22.

$$CU_{PY-110} = \frac{0,83 \frac{USD}{Kg} \cdot 850,00 Kg}{6\ 503,83 t}$$

$$CU_{PY-110} = 0,11 \frac{USD}{t} \quad [11]$$

$$CU_{PY-019} = \frac{0,83 \frac{USD}{Kg} \cdot 2\,175,00\ Kg}{9\,762,28\ t}$$

$$CU_{PY-019} = 0,18 \frac{USD}{t} \quad [12]$$

Al aplicar la expresión [8] en los datos totales de la tabla 23, se logra obtener los costos unitarios ponderados de cada fragmentador, los datos obtenidos nos permitirán realizar una evaluación de costo beneficio al implementar el plasma como fragmentador en voladuras especiales.

$$CU_{PLASMA} = \frac{7,74 \frac{USD}{Kg} \cdot 1\,337,10\ Kg}{4\,698,00\ t}$$

$$CU_{PLASMA} = 2,20 \frac{USD}{t} \quad [13]$$

$$CU_{EXPLOSIVO} = \frac{0,83 \frac{USD}{Kg} \cdot 3\,025,00\ Kg}{16\,266,11\ t}$$

$$CU_{EXPLOSIVO} = 0,15 \frac{USD}{t} \quad [14]$$

Tabla 23
Costo unitario del fragmentador

| Ítems | Unidad | Explosivo | Plasma |
|------------------------|--------------|-------------|-------------|
| Cantidad de taladros | # | 660,00 | 194,00 |
| Volumen | m3 | 12 048,97 | 3 480,00 |
| Tonelaje | t | 16 266,11 | 4 698,00 |
| Cantidad de producto | Kg | 3 025,00 | 1 337,10 |
| Precio unitario | USD/Kg | 0,83 | 7,74 |
| Costo de fragmentación | USD | 2 508,43 | 10 349,15 |
| Costo unitario | USD/t | 0,15 | 2,20 |

Fuente: propia.

f) Evaluación del benéfico respecto al costo

Para calcular la reducción de vibración se aplica la expresión [15] a los datos recopilados de la tabla 24, correspondientes al VPP máximo.

$$\% VPP_{PLASMA/EXPLOSIVO} = \left(1 - \frac{VPP_{PLASMA}}{VPP_{EXPLOSIVO}}\right) \cdot 100 \%$$

$$\% VPP_{PLASMA/EXPLOSIVO} = \left(1 - \frac{3,88 \frac{mm}{s}}{11,80 \frac{mm}{s}}\right) \cdot 100 \%$$

$$\% VPP_{PLASMA/EXPLOSIVO} = 67,12 \%$$

[15]

Para calcular la reducción de la fragmentación obtenida se aplica la expresión [16] a los datos recopilados de la tabla 24, correspondientes al D90 promedio.

$$\% D90_{PLASMA/EXPLOSIVO} = \left(1 - \frac{D90_{PLASMA}}{D90_{EXPLOSIVO}}\right) \cdot 100 \%$$

$$\% D90_{PLASMA/EXPLOSIVO} = \left(1 - \frac{22,27 \text{ cm}}{23,27 \text{ cm}}\right) \cdot 100 \%$$

$$\% D90_{PLASMA/EXPLOSIVO} = 4,30 \%$$

[16]

En la tabla 24, se determina el costo beneficio de aplicar la fragmentación con el uso plasma respecto al explosivo, donde se establece el valor económico de la infraestructura expuesta con una valorización estimada de 5 300 MUSD, y por un costo adicional de 9 624,67 USD al usar el plasma como fragmentador en los procesos de voladura especializada, se logra reducir la vibración máxima en un 67 %, mitigar la proyección de rocas, mantener la fragmentación promedio con una variación hacia la reducción del 4 % y reducir la distancia mínima de seguridad para los equipos en un 94 %, lo que implica una reducción adicional de los costos en el desplazamiento de la flota equipos hacia la zona segura, y un menor riesgo de afectación de la planta de beneficio.

Como se observa en la tabla 24, en los resultados del beneficio costo, se logra asegurar 26,50 MUSD correspondientes al valor de riesgo de la zona expuesta de la planta de beneficio, lo que hace factible su aplicación para proyectos de voladura especializado en el control de daños a infraestructuras de precisión, donde el valor de riesgo sea mayor al costo adicional de la aplicación del plasma como fragmentador.

Tabla 24
Costo beneficio del fragmentador

| Ítems | Unidad | Explosivo | Plasma |
|----------------------------------------|--------|-----------|-----------|
| Valor de infraestructura | | | |
| Planta de flotación | MUSD | 5 300,00 | 5 300,00 |
| Zona expuesta | % | 0,50 | 0,50 |
| Costo del proyecto fragmentador | | | |
| Tonelaje | t | 4 698,00 | 4 698,00 |
| Costo unitario | USD/t | 0,15 | 2,20 |
| Costo por fragmentación | USD | 724,49 | 10 349,15 |
| Resultados esperados | | | |
| VPP máx. | mm/s | 11,80 | 3,88 |
| Proyección de rocas | # | Si | No |
| D90 prom. | cm | 23,27 | 22,27 |
| Distancia de seguridad | m | 500 | 30 |
| Beneficio Costo | | | |
| Valor de riesgo | MUSD | 26,50 | 0,00 |
| Costo de beneficio | USD | 0,00 | 9 624,67 |

Fuente: propia.

3.5.3. Análisis de datos con estadística descriptiva

En la tabla 25, se observan los datos obtenidos en los ítems de recolección y procesamiento de datos, donde las principales variables de análisis son la fragmentación, vibración y costos.

Tabla 25
Datos de proyectos por fragmentador

| Fragmentador | Proyecto | Fragmentación D90 (cm) | Vibración VPP (mm/s) | Costo unitario (USD/t) |
|--------------|----------|------------------------|----------------------|------------------------|
| Plasma | PY-055 | 32,43 | 1,64 | 2,02 |
| | PY-109 | 18,38 | 3,88 | 2,27 |
| | PROMp | 22,27 | 3,26 | 2,20 |
| Explosivo | PY-110 | 27,53 | 11,8 | 0,11 |
| | PY-019 | 20,44 | 9,154 | 0,18 |
| | PROMe | 23,27 | 10,21 | 0,15 |

Fuente: ENAEX, 2019a.

Como se observa en la tabla 25, al usar el plasma como fragmentador del macizo rocoso, se obtiene una variabilidad del 4 % en la fragmentación D90 y 67 % en la vibración respecto al uso de explosivo; sin embargo, los costos unitarios se incrementan considerablemente.

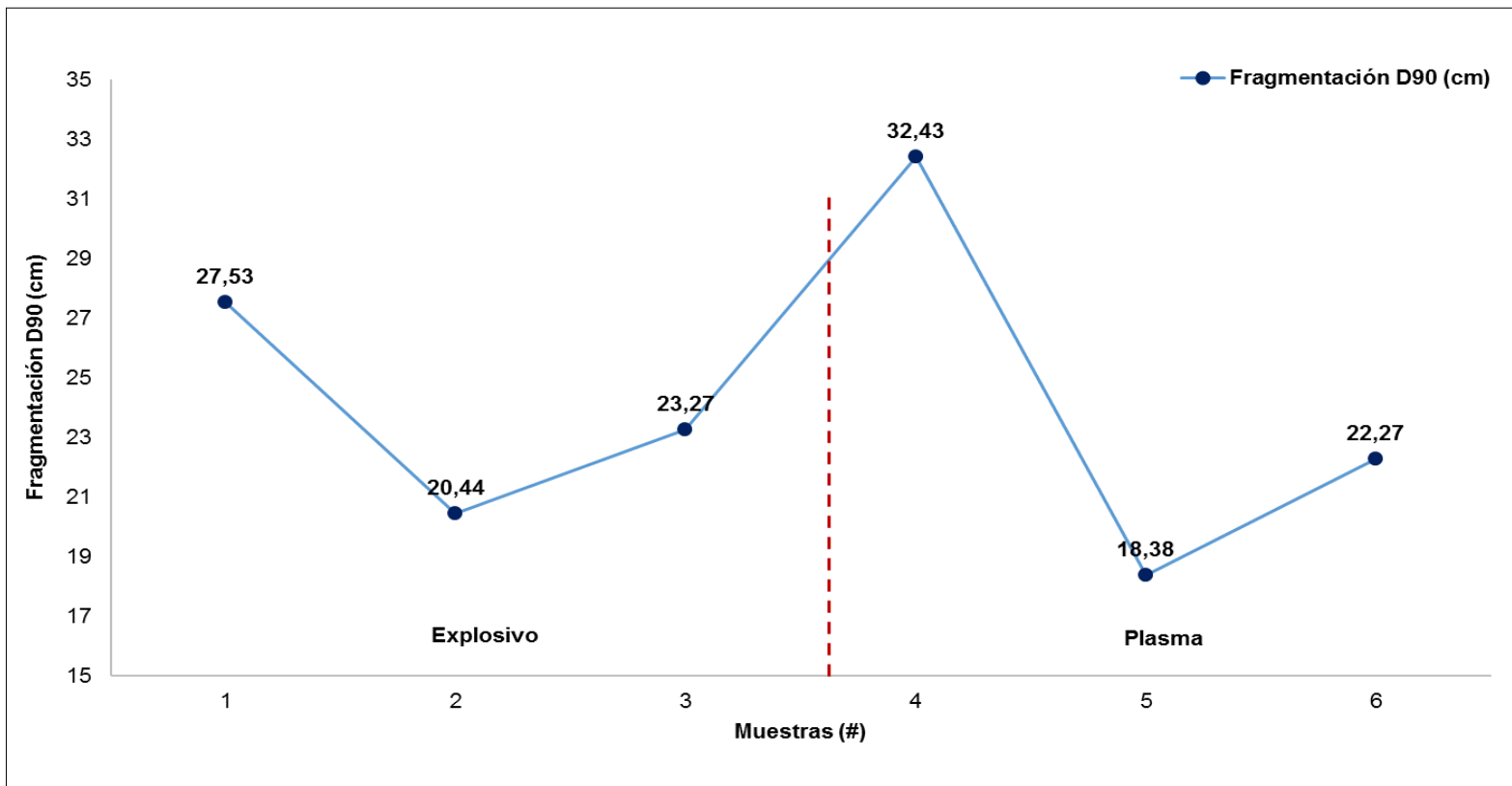


Figura 31. Fragmentación D90 por fragmentador
 Fuente: ENAEX, 2019a.

Nota. La diferencia de 1 cm en la fragmentación del plasma representa una variabilidad del 4 % respecto al explosivo

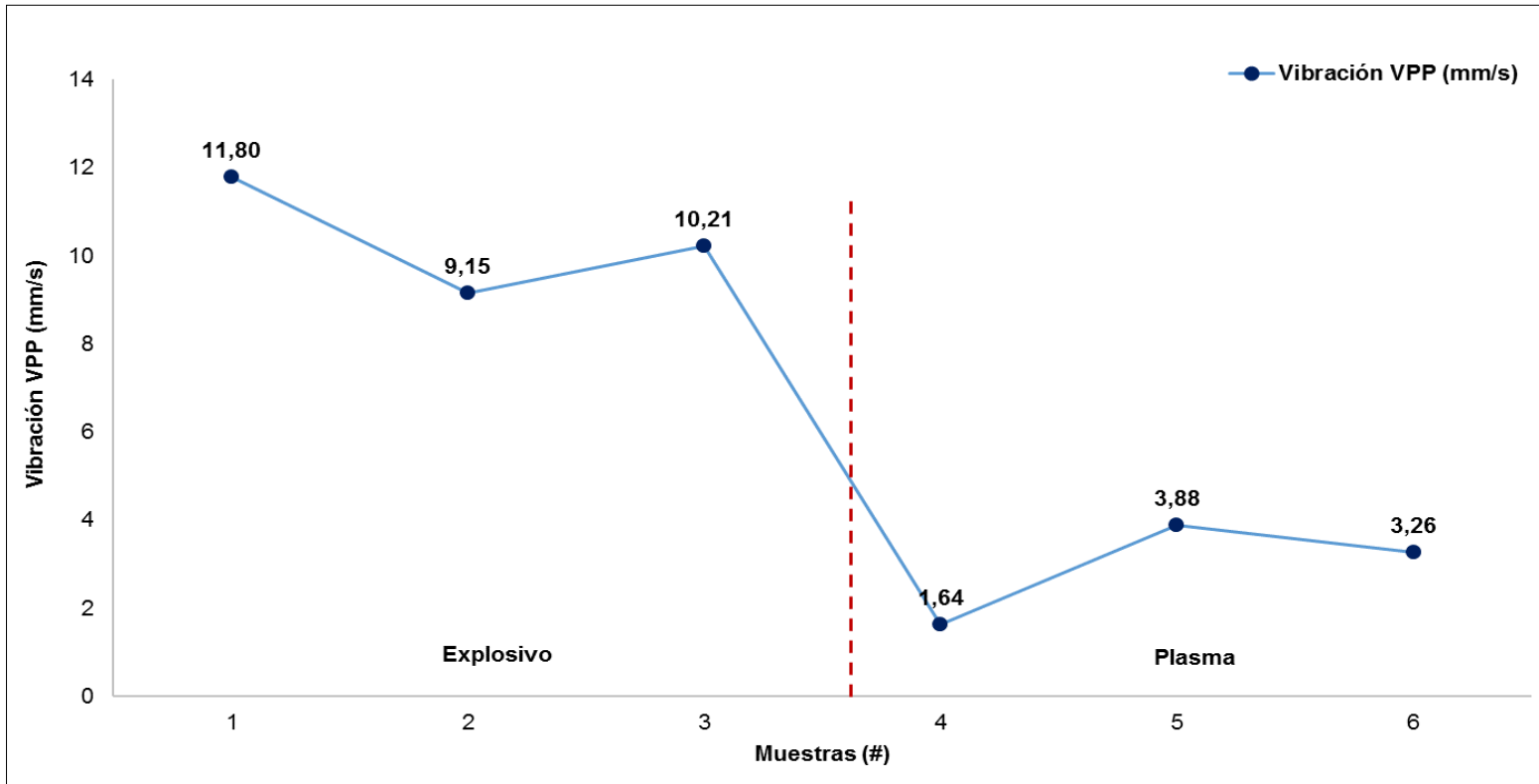


Figura 32. Vibración por fragmentador
 Fuente: ENAEX, 2019a.

Nota. La diferencia de 7,92 mm/s en la vibración del plasma representa una variabilidad del 67 % respecto al explosivo

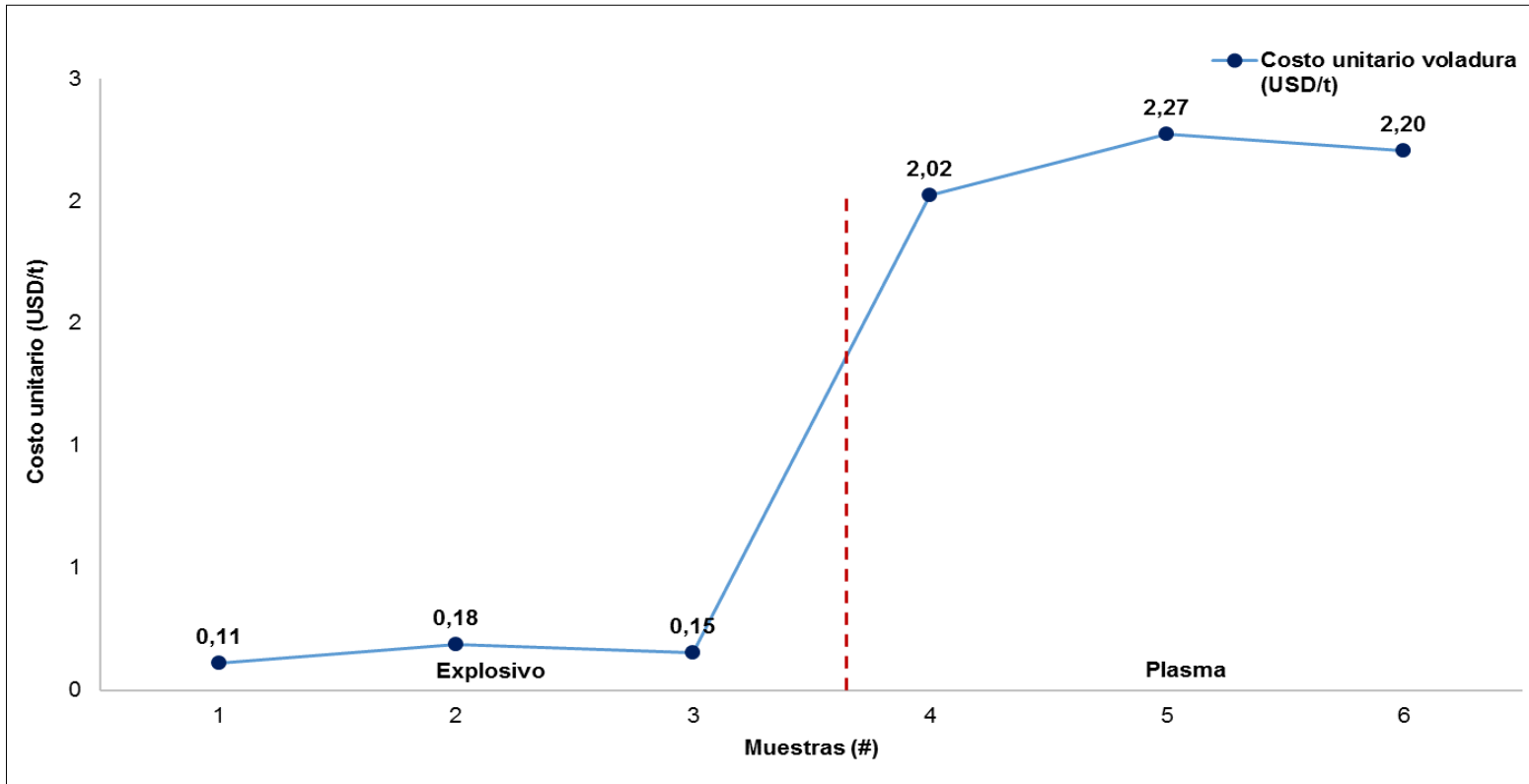


Figura 33. Vibración por fragmentador
 Fuente: ENAEX, 2019a.

Nota. La diferencia de 2,05 USD/t en el costo unitario del plasma supera en gran medida al explosivo

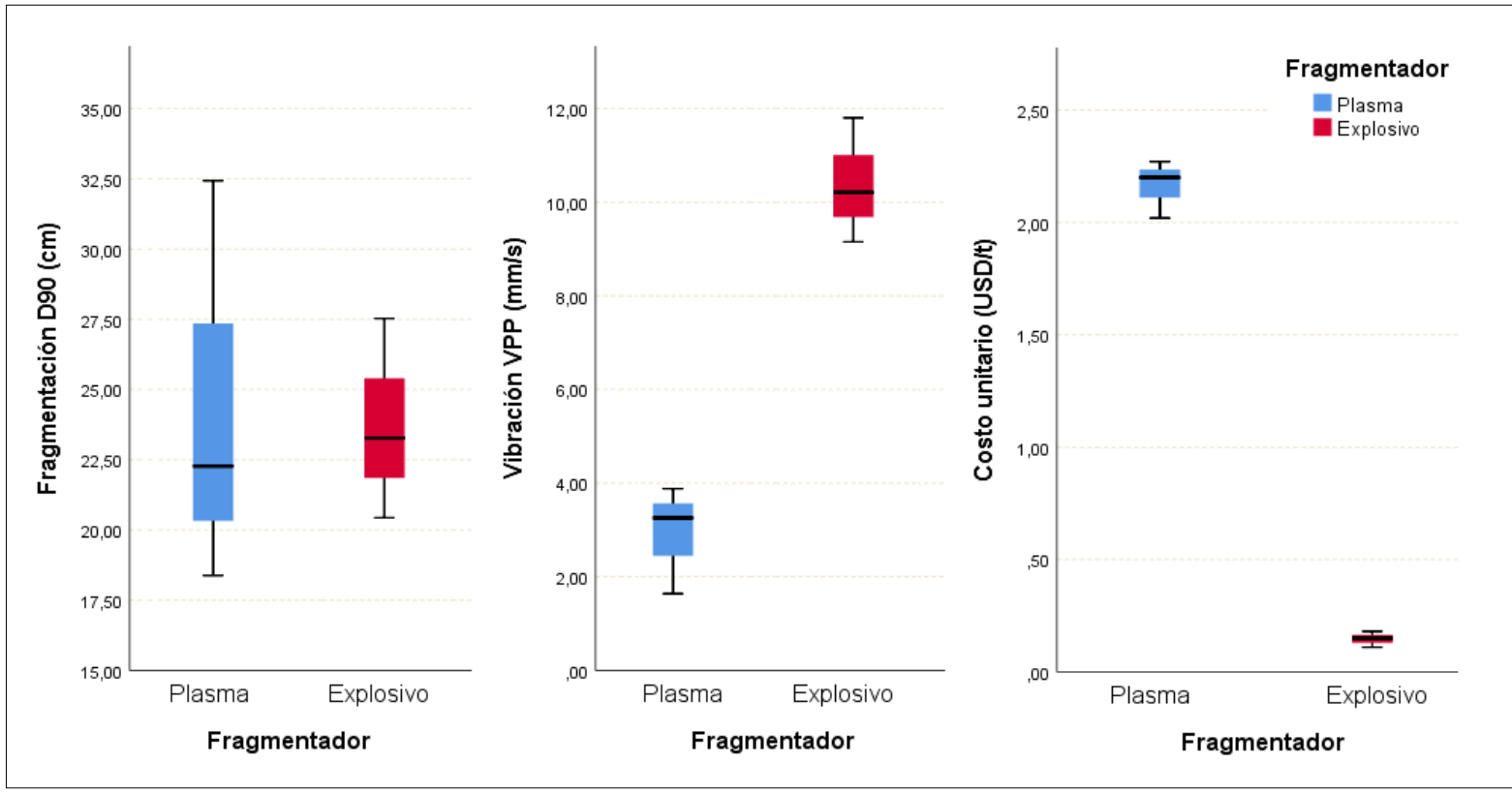


Figura 34. Caja de bigotes por variable
Fuente: ENAEX, 2019a.

Nota. Se observa menor asimetría en los datos de fragmentación, vibración y costo unitario del plasma

a) Prueba de normalidad de datos; en la tabla 26, se observa los resultados del análisis de normalidad de las variables; de acuerdo a la evaluación del P-valor ($\alpha > 0,05$), se acepta H_0 para distribución normal; se considera la prueba de Shapiro-Wilk, por tener muestras menores a 50, y se determina que las variables D90, VPP y Cunit, presentan una distribución normalizada, por lo tanto, no muestra la presencia de valores erráticos.

Tabla 26
Prueba de normalidad de variables

| Prueba de normalidad | Shapiro-Wilk | | | | | |
|------------------------|--------------|----|-------|-------------|----|-------|
| | Plasma | | | Explosivo | | |
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Fragmentación D90 (cm) | 0,938 | 3 | 0,518 | 0,987 | 3 | 0,779 |
| Vibración VPP (mm/s) | 0,938 | 3 | 0,518 | 0,987 | 3 | 0,778 |
| Costo unitario (USD/t) | 0,939 | 3 | 0,525 | 0,993 | 3 | 0,843 |

Fuente: propia.

b) Análisis descriptivos de datos; luego de comprobar la normalización de las variables e identificar los valores erráticos, por medio del gráfico de bigotes (figura 34), se procede a realizar el análisis estadístico descriptivo de cada variable según el tipo de fragmentador.

Tabla 27
Análisis estadístico descriptivo de variables

| Estadístico | Plasma | | | Explosivo | | |
|-------------|----------|------------|---------------|-----------|------------|---------------|
| | D90 (cm) | VPP (mm/s) | Cunit (USD/t) | D90 (cm) | VPP (mm/s) | Cunit (USD/t) |
| Media | 24,360 | 2,927 | 2,163 | 23,747 | 10,388 | 0,147 |
| Mediana | 22,270 | 3,260 | 2,200 | 23,270 | 10,210 | 0,150 |
| Desviación | 7,254 | 1,157 | 0,129 | 3,569 | 1,332 | 0,035 |
| Desv. Error | 4,188 | 0,668 | 0,074 | 2,061 | 0,769 | 0,020 |
| Mínimo | 18,380 | 1,640 | 2,020 | 20,440 | 9,154 | 0,110 |
| Máximo | 32,430 | 3,880 | 2,270 | 27,530 | 11,800 | 0,180 |
| Rango | 14,050 | 2,240 | 0,250 | 7,090 | 2,646 | 0,070 |

Fuente: propia.

- c) Análisis homogeneidad de varianzas; se realiza la prueba de Levene, de acuerdo al P-valor ($\alpha > 0,05$), se acepta H_0 para homogeneidad de varianzas; se observa que las variables D90, VPP y Cunit, presentan homogeneidad en las varianzas (Tabla 28).

Tabla 28
Análisis de homogeneidad de varianzas

| Variables | Prueba de homogeneidad de varianzas | | | |
|------------------------|-------------------------------------|-----|-----|-------|
| | Levene | gl1 | gl2 | Sig. |
| Fragmentación D90 (cm) | 1,975 | 1 | 4 | 0,233 |
| Vibración VPP (mm/s) | 0,031 | 1 | 4 | 0,869 |
| Costo unitario (USD/t) | 4,633 | 1 | 4 | 0,098 |

Fuente: propia.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados de la investigación

En la tabla 29, se observa el resumen de los resultados de la investigación obtenida en los capítulos anteriores.

Tabla 29
Resumen de resultados por fragmentador

| Fragmentador | Estadístico | Fragmentación D90 (cm) | Vibración VPP (mm/s) | Costo Unitario (USD/t) |
|-----------------------|-------------|------------------------|----------------------|------------------------|
| Plasma ($\mu 1$) | Media | 24,360 | 2,927 | 2,163 |
| | Desv. | 7,254 | 1,157 | 0,129 |
| | Desv. Error | 4,188 | 0,668 | 0,074 |
| Explosivo ($\mu 2$) | Media | 23,747 | 10,388 | 0,147 |
| | Desv. | 3,569 | 1,332 | 0,035 |
| | Desv. Error | 2,061 | 0,769 | 0,020 |

Fuente: propia.

4.2. Análisis y pruebas del contraste de hipótesis

4.2.1. Magnitud de vibración

Para contrastar la hipótesis alternativa, el uso plasma reduce la vibración en las infraestructuras cercanas; es necesario proponer la hipótesis alternativa (H1) e hipótesis nula (Ho) en base a los indicadores de evaluación. Respecto al indicador vibración VPP; para contrastar resultados de mejora en reducción con una significancia (α): $\alpha = 0,05$, se define las hipótesis de evaluación.

- Hipótesis alternativa (H1): $\mu_1 < \mu_2$; el uso plasma reduce la vibración en las infraestructuras cercanas.
- Hipótesis nula (Ho): $\mu_1 = \mu_2$; la vibración se mantiene al usar plasma en los proyectos con infraestructuras cercanas.

De acuerdo a la tabla 30, el P-valor (Sig = 0,002) es menor a la significancia ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, la decisión que se toma es rechazar Ho, porque existe diferencia entre las medias; y al observar los valores negativos del intervalo de confianza ($\mu_1 - \mu_2 < 0$), se acepta H1; entonces

se puede afirmar que el uso de plasma reduce la vibración en las infraestructuras cercanas, con una significancia del 5 %.

Tabla 30
Prueba hipótesis para el indicador vibración

| Prueba de muestras independientes H1: $\mu_1 < \mu_2$ Ho: $\mu_1 = \mu_2$ | | Prueba t para la igualdad de medias | | | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-------|------------------|-------------|----------------|-----------------------------|----------|
| | | t | gl | Sig. (bilateral) | Diferencias | | Intervalo confianza al 95 % | |
| | | | | | Medias | Error estándar | Inferior | Superior |
| Vibración VPP (mm/s) | Varianzas iguales | -7,326 | 4 | 0,002 | -7,461 | 1,018 | -10,289 | -4,634 |
| | Varianzas diferentes | -7,326 | 3,923 | 0,002 | -7,461 | 1,018 | -10,311 | -4,612 |

Fuente: propia.

4.2.2. Cumplimiento de normativa en vibraciones

Para contrastar la hipótesis alternativa, la vibración generada por el uso de plasma cumple con las normativas vigentes para el control de infraestructuras cercanas; es necesario proponer la hipótesis alternativa (H1) e hipótesis nula (Ho) en base a los indicadores de evaluación. Respecto al indicador vibración VPP y VPPc; para contrastar resultados de cumplimiento de la normativa con una significancia (α): $\alpha = 0,05$, se define las hipótesis de evaluación.

- Hipótesis alternativa (H1): $\mu_1 < \mu_2$; la vibración generada por el uso de plasma mejora el cumplimiento de las normativas vigentes para el control de infraestructuras cercanas.
- Hipótesis nula (Ho): $\mu_1 = \mu_2$; la vibración generada por el uso de plasma cumple con las normativas vigentes para el control de infraestructuras cercanas respecto al uso de explosivos.

De acuerdo a la tabla 31, si el P-valor (Sig. bilateral) es mayor a la significancia ($\alpha = 0,05$), se acepta el Ho, por lo tanto, se cumple con la normativa vigente; de lo contrario se rechaza Ho, y al observar los valores negativos del intervalo de confianza con plasma ($\mu_1 - VPPc < 0$), se acepta H1; entonces se puede afirmar que el uso de plasma mejora el cumplimiento de las normativas vigentes para el control de infraestructuras cercanas, con una significancia del 5 %.

Respecto a los valores positivos del intervalo de confianza para la fragmentación con explosivo ($\mu_2 - VPPc > 0$), se comprende que la vibración generada por el uso de explosivo en proyectos especiales, supera la normativa vigente de referencia para el control de infraestructuras cercanas, con una significancia del 5 %.

Tabla 31
Prueba hipótesis para el cumplimiento de la normativa

| Normas | Criterio de evaluación | VPPc (mm/s) | Plasma | | | | Explosivo | | |
|--------------------------------|----------------------------------------|-------------|-------------------------------------------|-----------------------------|----------|-------------------------------------------|-----------------------------|----------|--|
| | | | $\mu_1 = \text{VPPc}$ (Sig. bilateral) | Intervalo confianza al 95 % | | $\mu_2 = \text{VPPc}$ (Sig. bilateral) | Intervalo confianza al 95 % | | |
| | | | | Inferior | Superior | | Inferior | Superior | |
| Norma nacional | Distancia de sismógrafo 0 - 91,44 | 31,75 | 0,001 | -31,696 | -25,950 | 0,001 | -24,671 | -18,053 | |
| Norma alemana DIN 4150-1999 | Edificios Delicados (III) Hz < 10 | 3 | 0,923 | -2,946 | 2,800 | 0,011 | 4,079 | 10,697 | |
| Norma suiza SN 640312-1978 | Edificios delicados (IV) Hz 10 - 80 | 8 | 0,017 | -7,946 | -2,200 | 0,090 | -0,921 | 5,697 | |
| Norma española UNE 22-381-93 | Tipo de estructura (III) Hz 2 - 15 | 4 | 0,249 | -3,946 | 1,800 | 0,014 | 3,079 | 9,697 | |
| Norma portuguesa NP2075 – 1995 | Construcciones especiales Hz < 10 | 3 | 0,923 | -2,946 | 2,800 | 0,011 | 4,079 | 10,697 | |

Fuente: propia.

4.2.3. Factibilidad económica en zonas críticas

Para contrastar la hipótesis alternativa, el uso de plasma genera un mejor costo beneficio respecto al uso de explosivos para voladuras especiales; es necesario proponer la hipótesis alternativa (H1) e hipótesis nula (Ho) en base a los indicadores de evaluación. Respecto al indicador costo unitario (Cunit); para contrastar resultados de mejora en adición con una significancia (α): $\alpha = 0,05$, se define las hipótesis de evaluación.

- Hipótesis alternativa (H1): $\mu_1 > \mu_2$; el uso de plasma genera un mejor costo beneficio respecto al uso de explosivos para voladuras especiales.
- Hipótesis nula (Ho): $\mu_1 = \mu_2$; el uso de plasma genera el mismo costo beneficio respecto al uso de explosivos para voladuras especiales.

De acuerdo a la tabla 32, el P-valor (Sig = 0,000) es menor a la significancia ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, la decisión que se toma es rechazar Ho, porque existe diferencia entre las medias; y al observar los valores positivos del intervalo de confianza ($\mu_1 - \mu_2 > 0$), se acepta H1; entonces se puede afirmar que el uso de plasma incrementa el costo respecto al uso de

explosivos para voladuras especiales en zonas críticas ($\mu_1 > \mu_2$), con una significancia del 5 %.

Tabla 32
Prueba hipótesis para el indicador costo unitario

| Prueba de muestras independientes H1: $\mu_1 > \mu_2$ Ho: $\mu_1 = \mu_2$ | | Prueba t para la igualdad de medias | | | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-------|------------------|-------------|----------------|-----------------------------|----------|
| | | t | gl | Sig. (bilateral) | Diferencias | | Intervalo confianza al 95 % | |
| | | | | | Medias | Error estándar | Inferior | Superior |
| Costo unitario (USD/t) | Varianzas iguales | 26,132 | 4 | 0,000 | 2,017 | 0,077 | 1,802 | 2,231 |
| | Varianzas diferentes | 26,132 | 2,295 | 0,001 | 2,017 | 0,077 | 1,722 | 2,311 |

Fuente: propia.

4.2.4. Influencia del uso de cápsulas de plasma

Para contrastar la hipótesis alternativa, el uso del plasma es efectivo para el control de vibraciones de infraestructuras cercanas de la U.M. Quellaveco; es necesario proponer la hipótesis alternativa (H1) e hipótesis nula (Ho) en base a los indicadores de evaluación. Respecto al indicador fragmentación D90; para contrastar resultados de mejora o reducción en la fragmentación, y analizar junto a los indicadores ya evaluados, con una significancia (α): $\alpha = 0,05$, se define las hipótesis de evaluación.

- Hipótesis alternativa (H1): $\mu_1 < \mu_2$; el uso del plasma es efectivo para el control de vibraciones de infraestructuras cercanas de la U.M. Quellaveco.
- Hipótesis nula (Ho): $\mu_1 = \mu_2$; el uso del plasma mantiene la fragmentación respecto al uso de explosivos en la U.M. Quellaveco.

De acuerdo a la tabla 33, el P-valor (Sig = 0,902) es mayor a la significancia ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, la decisión que se toma es aceptar Ho; entonces se puede afirmar que el uso de plasma mantiene la fragmentación respecto al uso de explosivos en zonas críticas de la U.M. Quellaveco, con una significancia del 5 %.

Tabla 33
Prueba hipótesis para el indicador fragmentación

| Prueba de muestras independientes H1: $\mu_1 < \mu_2$ Ho: $\mu_1 = \mu_2$ | | Prueba t para la igualdad de medias | | | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-------|---------------------|-------------|----------------|-----------------------------|----------|
| | | t | gl | Sig. (bilateral) | Diferencias | | Intervalo confianza al 95 % | |
| | | | | | Medias | Error estándar | Inferior | Superior |
| Fragmentación D90 (cm) | Varianzas iguales | 0,131 | 4 | 0,902 | 0,613 | 4,668 | -12,346 | 13,573 |
| | Varianzas diferentes | 0,131 | 2,915 | 0,904 | 0,613 | 4,668 | -14,491 | 15,718 |

Fuente: propia.

4.3. Discusión de resultados

4.3.1. Resultado de la magnitud de vibración

Cueva y Huaynate (2020) en la minera Cerro de Pasco determino la diferencia significativa de la velocidad pico partícula (VPP) de la fragmentación con plasma versus ANFO; donde el plasma no presento registro de valores a 60 m de monitoreo; con respecto al ANFO, registró un VPP de 8,802 mm/s a 172 m de monitoreo.

Arce y Bringas (2020) determinaron el efecto de las vibraciones causadas en las voladuras con explosivo respecto a la fragmentación con plasma; logrando reducir los niveles de vibración en 75 %, monitoreado con sismógrafo a una distancia de 130 m.

De acuerdo al resultado obtenido en la presente investigación, donde se afirma que el uso del plasma reduce en 67 % la vibración a 50 m de monitoreo, respecto al uso de explosivos, en las infraestructuras cercanas de la U.M. Quellaveco. Por lo tanto, se logró una congruencia con la afirmación del estudio de Arce y Bringas (2020), al obtener una reducción promedio en VPP de 6 mm/s; y una semejanza con la afirmación del

estudio de Cueva y Huaynate (2020), al reducir significativamente la vibración en el monitoreo de infraestructuras cercanas.

4.3.2. Resultado del cumplimiento de normativa

Chávez (2019) en compañía Minera Volcan, logró controlar los daños a las estructuras críticas aledañas al proyecto de fragmentación, usando el plasma como fragmentador, generando bienestar en las operaciones, asegurando el umbral de daño según la Norma DIN 4150.

Aripov et al. (2018) presentó un estudio de evaluación del efecto sísmico en las estructuras, logró identificar el impacto sísmico de las voladuras realizadas en canteras, afectando a edificios y estructuras de las zonas aledañas. Propuso controlar la carga explosiva simultáneamente, con la finalidad de generar mayor seguridad a los edificios aledaños.

De acuerdo al resultado obtenido en la presente investigación, respecto al cumplimiento de las normativas vigentes, se logró afirmar que el uso de plasma mejora el cumplimiento de las normativas vigentes para el control de infraestructuras cercanas de la U.M. Quellaveco, en base a

los proyectos PY-055 y PY109, con una frecuencia promedio de 6,47 Hz, observadas en la tabla 34.

De la misma forma, se logró identificar que el uso de explosivo en la fragmentación del macizo rocoso, supera la normativa alemana, española y portuguesa, en base a los registros del proyecto PY-110 y PY-019, con una frecuencia promedio de 3,16 Hz. Por lo tanto, se logró una congruencia con la afirmación del estudio de Chávez (2019) y Aripov et al. (2018).

Tabla 34
Cumplimiento de normativa vigente según criterios

| Normas | Normativa vigente | | Cumplimiento | |
|-----------------------------------|----------------------------------------|-------------|--------------|------------|
| | Criterio de evaluación | VPPc (mm/s) | Plasma | Explosivo |
| Norma nacional | Distancia de sismógrafo 0 - 91,44 | 31,75 | Por debajo | Por debajo |
| Norma alemana DIN 4150-1999 | Edificios Delicados (III) Hz < 10 | 3 | Cumple | Por encima |
| Norma suiza SN 640312-1978 | Edificios delicados (IV) Hz 10 - 80 | 8 | Por debajo | Cumple |
| Norma española UNE 22-381-93 | Tipo de estructura (III) Hz 2 - 15 | 4 | Cumple | Por encima |
| Norma portuguesa NP2075 – 1995 | Construcciones especiales Hz < 10 | 3 | Cumple | Por encima |

Fuente: propia.

4.3.3. Resultado de la factibilidad económica

Dávila (2019) con la finalidad de salvaguardar la zona urbana ubicada a 500 m en la sociedad minera El Brocal SAA, planteó el uso estratégico del plasma para fragmentar y reducir la proyección de rocas, donde obtuvo un mejoramiento significativo en los resultados de vibración, sin embargo, no se obtuvo mejoras en la fragmentación, de esta forma se optó usar el plasma para proyectos especiales, con la finalidad de reducir los costos de movilización de equipos, debido a la reducción del radio de influencia a 50 m, permitiendo reiniciar las operaciones en menor tiempo.

De acuerdo al resultado obtenido en la presente investigación, donde se afirma que el uso de plasma incrementa abismalmente el costo respecto al uso de explosivos para voladuras especiales en zonas críticas de la U.M. Quellaveco, sin embargo, esto permite salvaguardar las estructuras críticas para la operación minera, que presentan gran inversión, y de la misma forma permite acelerar el proceso de reiniciación de las operaciones. Por lo tanto, se logró una congruencia con la afirmación del estudio de Dávila (2019), donde se asegura que el uso del plasma presenta un mayor beneficio respecto al costo, para proyectos especiales con presencia de estructuras críticas o zonas urbanas.

4.3.4. Resultado del uso de cápsulas de plasma

Valenzuela (2010) establece que la optimización del uso de energía del plasma, asegura la fragmentación; sin embargo, recomienda su uso principalmente para el aseguramiento de la seguridad en zonas críticas, porque la fragmentación es diferenciada respecto al uso de explosivos, y esto impacta a los procesos mineros post voladura, por consiguiente, afirma que el plasma no mejora la fragmentación, pero logra reducir en gran medida las vibraciones.

ENAEX (2018) en el proyecto minero Caletones, logró reducir el riesgo de uso de explosivos mediante el uso de plasma, relacionados a accidentes directos e indirectos, impacto medioambiental y salud; estableciendo características de mejora como la distancia de seguridad, proyección de rocas, ruido, vibración e impacto al medio ambiente.

Cuayla (2020) en la U.M. Quellaveco, estudio principalmente la optimización de la fragmentación con plasma, sin embargo, obtuvo un incremento del 18 % en la fragmentación D90; pero logró mejorar la seguridad de las estructuras aledañas al reducir los resultados de vibración, proyección de rocas (fly rock) e impacto al medio ambiente.

Fresner et al. (2019) aumentó la productividad de la fractura de rocas en más del 50 %, variando la corriente iniciación y combinar estratégicamente el uso de plasma con explosivos, generando un incremento de 8,1 m/día de avance. Permitiendo de esta forma diseñar un modelo matemático para predecir la fractura electro-térmica, integrando el efecto de inducción por arco eléctrico al modelo de perforación.

De acuerdo al resultado obtenido en la presente investigación, donde se afirma que el uso de plasma mantiene la fragmentación respecto al uso de explosivos en zonas críticas de la U.M. Quellaveco, sin embargo, presenta una variabilidad de 4 % en la fragmentación D90, obteniendo una reducción no significativa para el estudio, pero genera un mayor beneficio al salvaguardar las estructuras críticas cercanas, reduciendo principalmente la vibración, proyección de rocas e impacto al medio ambiente, lo que hace factible su aplicación para proyectos especiales. Por lo tanto, se logró una congruencia con la afirmación de los estudios de Valenzuela (2010), ENAEX (2018), Cuayla (2020) y Fresner et al. (2019).

CONCLUSIONES

El uso estratégico del plasma nos permite cumplir las normativas vigentes y salvaguardar la integridad de las infraestructuras cercanas a la fractura, lo que hace efectivo su implementación para proyectos especiales, donde se logra reducir en un 67 % la vibración respecto al uso de explosivos.

El uso de plasma mejora el cumplimiento de las normativas vigentes para el control de vibración en infraestructuras cercanas, con un monitoreo a 50 m; a diferencia del uso de explosivo que supera la normativa alemana, española y portuguesa, con un monitoreo a 150 m.

El uso de plasma incrementa en 2,05 USD/t el costo unitario de fragmentación, sin embargo, se logra reducir la vibración, mitigar la proyección de rocas y mantener la fragmentación propuesta a una menor distancia de seguridad, lo que permite acelerar el proceso de reiniciación de las operaciones y salvaguardar en el menor tiempo los equipos y las zonas críticas de gran inversión como la planta de beneficio.

RECOMENDACIONES

En virtud de los resultados obtenidos se recomienda continuar con los estudios en infraestructuras cercanas, para generar más registros y obtener un modelo predictivo del daño respecto al estudio de Fresner et al. (2019).

Se recomienda seguir controlando los puntos de monitoreo a 50 m de los proyectos especiales para registrar valores que afecten al proyecto, con la finalidad de salvaguardar la integridad de las estructuras críticas o zonas urbanas colindantes.

Se recomienda aplicar el plasma estratégicamente en proyecto especiales donde se pretenda proteger infraestructuras o zonas urbanas cercanas, debido al alto costo que estas presentan; y establecer indicadores de categorización para alertas y control de vibraciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arce Gutiérrez, V. J., y Bringas Salazar, C. A. (2020). *Incidencia de la tecnología plasma en la variación de los efectos de las vibraciones producidas por operaciones de voladura en minería superficial, Cajamarca, 2020*. Universidad Privada del Norte.

Aripov, A., Melikulov, A., Sagdiyev, K., y Teshaboyev, Z. (2018). Evaluación del efecto sísmico de las explosiones industriales en las estructuras de ingeniería y su seguridad. *25 ° Congreso Mundial de Minería - Astana 2018 - Kazajstán*, 862-869.

Basilio, E. (2014). Reducción de la dilución de carbón aplicando voladura bajo manto. *Pontificia Universidad Católica del Perú*.

Chávez Navarro, I. (2019). *Análisis de vibraciones inducidos por el uso de plasma en la fragmentación de rocas en el proyecto óxidos insitu compañía minera Volcan - E.A. óxidos de Pasco S.A.C.* Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

Chiappetta, F., y Treleaven, T. (1997). *El futuro de la seguridad en voladuras* (pp. 1–45). AUSTIN POWDER 2018.

Cornejo Chacón, P. A., y Huamán Rivas, P. A. (2020). *Estimación de un*

modelo predictivo de vibraciones inducidas por voladura en campo medio y lejano para el cuidado de estructuras en una mina superficial en proceso de cierre. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Cuayla Medina, M. Y. (2020). *Aplicación del plasma 4TH para fragmentación controlada en la Plataforma T7 - proyecto Quellaveco.* Universidad Nacional de Moquegua.

Cueva Rojas, A., y Huaynate Ríos, A. (2020). *Aplicación de fragmentador de roca , Plasma FRAG BE , en sectores productivos de la compañía minera Cerro de Pasco cercanas a zonas urbanas para reducir impactos generados durante la fragmentación del macizo rocoso.* Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Dávila Santos, J. Á. (2019). *Evaluación de vibraciones en voladura con plasma para reducir la proyección de rocas (fly rock) en el tajo abierto de sociedad minera el Brocal S.A.A.* Universidad Nacional Danie Alcides Carrión.

Dirección General de Asuntos Ambientales (1995). *Guía ambiental para la perforación y voladuras en operaciones mineras* (pp. 1–82). Ministerio de Energía y Minas, República del Perú.

ENAEX (2018). *Evaluación técnico económica de fragmentación de rocas*

con plasma en proyecto minero Caletones. *16th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 19–21.

ENAEX (2019a). *Informe de registro de vibraciones de fracturas realizadas con plasma* (pp. 1–7). GYM STRACON - JJC BESALCO, Proyecto Quellaveco, ENAEX.

ENAEX (2019b). *Producto para fractura con tecnología no explosiva PLASMA 4TH*. PERUMIN, Camará de Comercio Canadá - Perú.

ENAEX (2019c). *Reporte post-fractura proyecto 109 plataforma flotación* (pp. 1–14). GYM STRACON, Proyecto Quellaveco, ENAEX.

ENAEX (2019d). *Reporte post-fractura proyecto 55 plataforma de relaves* (pp. 1–10). JJC BESALCO, Proyecto Quellaveco, ENAEX.

Exsa SA (2009). *Manual práctico de voladura 3ra edición*. EXSA SA.

Fresner, J., Terentiev, O., y Kleshchov, A. (2019). *Disminución del consumo de energía en la minería por fracturación combinada de roca mecánica de plasma*. *Revista Internacional de las Últimas Investigaciones en Ingeniería y Tecnología (IJLRET)*.

Gibbon, P. (2014). *Introducción a la física del plasma*. Publicación de la Escuela Aceleradora CAS-CERN.

Hopler, R. (1998). *Manual de Voladura ISEE*.

Huayhua, R. (2019). *Implementacion del plan de respuesta a emergencias en la construccion de presa de relaves - consorcio JJC - Besalco S.A.C. - CIA. minera Quellaveco*. Universidad Nacional San Agustín.

Iglesias Salas, L. (2016). *Estudio técnico económico del uso de la mezcla explosivo Quantex 73 en la Unidad Minera Toquepala SPCC*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

INGEMMET (2017). *Mapa geológico y ubicación de muestras Cuajone Toquepala y Quellaveco, GE33A-4 Estudios Metalogenéticos de la Franja Magmática Jurásico Cretáceo asociado a los depósitos tipo IOCG y Pórfidos entre Ica, Arequipa y Tacna*. INGEMMET.

Knight Piésold (2008). *Proyecto Quellaveco modificación del estudio de impacto ambiental, informe final Anglo American Quellaveco S . A.*

Konya, C., y Albarrán, E. (1998). *Diseño de voladuras* (pp. 231–274). Edificaciones Cuicatl.

Norma Alemana DIN 4150 (1999). *Vibraciones estructurales*.

Norma española UNE 22-381-93 (1993). *Control vibración por voladura*.

Norma Portuguesa NP2074 (1995). *Evaluación de la influencia de las vibraciones en los edificios por explosiones o solicitudes similares.*

Norma Suiza SN 640312-1978 (1992). *Vibraciones estructurales.*

Núñez, C. (2013). *Plasma, nueva tecnología de fractura de roca - minería Chilena. Minera Chilena, Grupo Editorial Editec.*

Olivero, P., y Larson, C. (2013). *Tecnología de plasma para la fragmentación de roca en zonas sensibles.*

Oriard, L. (1989). *La escala de efectos en la evaluación del potencial de daño por vibración.* 15th conferencia anual de investigación de explosivos y voladura (pp. 161-176), ISEE.

Ortiz Sosa, S. (2009). *Optimización de voladura con el uso de detonadores electrónicos en la mina Cerro de Pasco, Compañía Minera Volcán.* Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

Pernia Llera, J. M., López Jimeno, C., Pla Ortiz de Urbina, F., y López Jimeno, E. (2003). *Manual de perforación y voladura de rocas.* En *Ingeopress.* Instituto Geológico y Minero de España.

Sáez Árias, M. (2016). *Correlación cruzada de ruido sísmico para la obtención de perfiles profundos de velocidad de onda de corte en la*

cuena de Santiago. Universidad de Chile.

Tumialan, P. (2003). *Boletín N°10, Compendio de yacimientos minerales del Perú.*

Valenzuela, D. (2010). *Fracturamiento de rocas mediante tecnología plasma. Universidad de La Serena, Chile, 9(1), 1–16.*

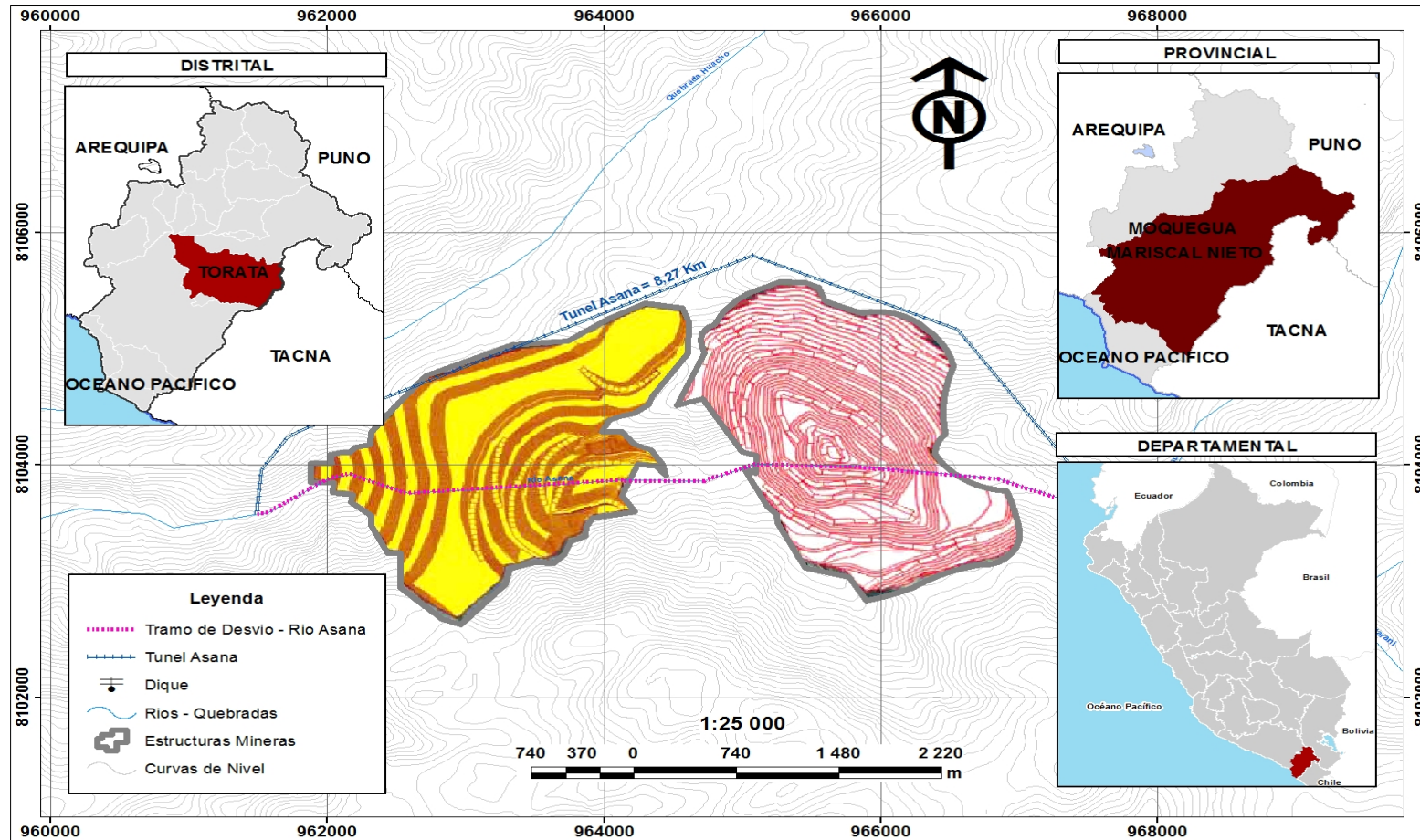
ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

| Título | Problema | Objetivo | Hipótesis | Variable | Indicadores | Metodología |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Análisis de Vibraciones con Cápsulas de Plasma para el Control de Infraestructuras en la U.M. Quellaveco, 2020 | Problema General | Objetivo General | Hipótesis General | Variable Independiente | Variable Independiente | Tipo de Investigación |
| | ¿En qué medida el análisis de vibraciones con el uso de plasma es efectivo para el control de infraestructuras cercanas del proyecto Quellaveco? | Analizar la efectividad del uso de plasma para el control de vibraciones en las infraestructuras cercanas del proyecto Quellaveco. | El uso del plasma es efectivo para el control de vibraciones de infraestructuras cercanas del proyecto Quellaveco. | VI1: Producto VI2: Normativas | Plasma 4th Explosivos Norma Nacional Norma Alemana DIN 4150 Norma suiza SN 640312 Norma española Uhe 22-381 Norma portuguesa NP 2075 | Investigación aplicada de enfoque cuantitativo. Nivel de Investigación Investigación de diseño no experimental. Método de Investigación La investigación enfoque cuantitativa de diseño no experimental. |
| | Problema Específico | Objetivo Específico | Hipótesis Específico | Variable Dependiente | Variable Dependiente | Población y Muestra |
| | ¿En qué medida influye el uso del plasma en el control de vibraciones de infraestructuras cercanas? | Determinar la influencia del uso de plasma en el control de vibraciones de infraestructuras cercanas. | El uso plasma reduce la vibración en las infraestructuras cercanas. | VD1: Vibración VD2: Fragmentación VD3: Costo unitario | VFP (mm/s) Frecuencia (Hz) Presión de onda (dB) Área de influencia (m) D90 (cm) Fly-rock VFP (mm/s) Cunit plasma (USD/t) Cunit explosivo (USD/t) | La población corresponde a las voladuras realizadas en el proyecto Quellaveco. Mientras que la muestra corresponde al proyecto PY-109 y PY-055 con plasma, y proyecto PY-110 y PY-019 con explosivo ANFO. |
| | | | | Variables Asociadas | Variables Asociadas | Técnicas e Instrumentos |
| | ¿Qué normativas se establecen para el control de vibraciones en infraestructuras cercanas? | Determinar el cumplimiento de las normativas sobre vibraciones para el control de infraestructuras cercanas. | La vibración generada por el uso de plasma mejora el cumplimiento de las normativas vigentes para el control de infraestructuras cercanas. | Zona crítica Caracterización macizo rocoso | Infraestructuras Estructuras críticas Densidad (t/m ³) Compresión (Mpa) Tracción (Mpa) RQD (%) RVR | Técnicas de campo, como la observación y registro de los proyectos; y técnicas en gabinete, como el procesamiento y recolección de información, revisión de metodologías y estudio de marco normativo. Los instrumentos son los equipos correspondientes a la fractura con plasma 4th y formatos de gabinete. Técnicas de Procesamiento de Datos |
| | ¿Es factible el uso de plasma para la fragmentación de zonas de infraestructuras cercanas? | Analizar el costo beneficio del uso de plasma para la fragmentación de zonas de infraestructura cercana. | El uso de plasma genera un mejor costo beneficio respecto al uso de explosivos para voladuras especiales. | Diseño Pervol | Diseño de malla Diseño de carga | El tratamiento de datos corresponde al análisis descriptivo de 2 muestras por producto; análisis estadístico y normalidad con la prueba de Shapiro Wilk, análisis de homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene, contraste de hipótesis del investigador con la prueba t Student del programa SPSS. |

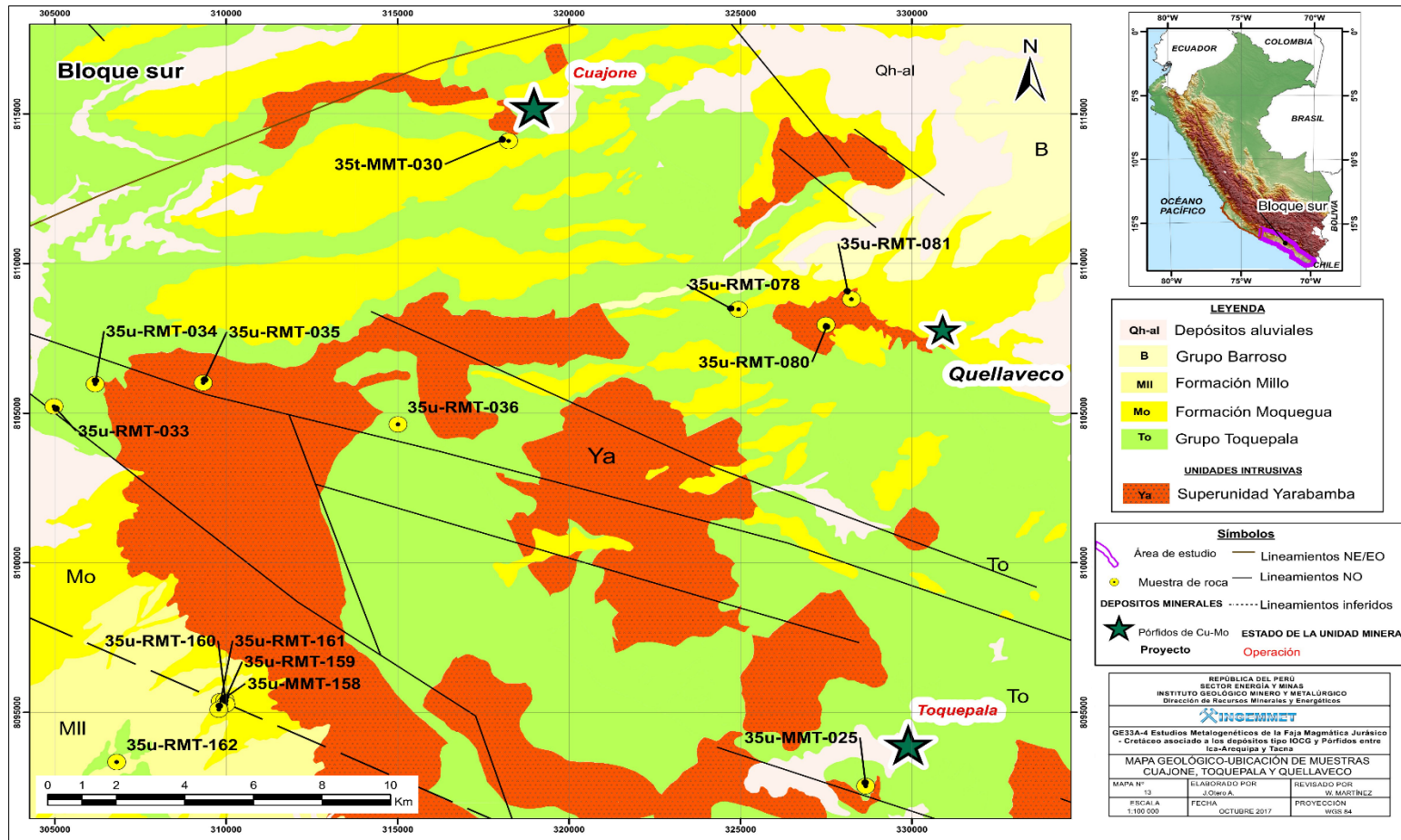
Fuente: propia.

Anexo 2. Ubicación del proyecto Quellaveco



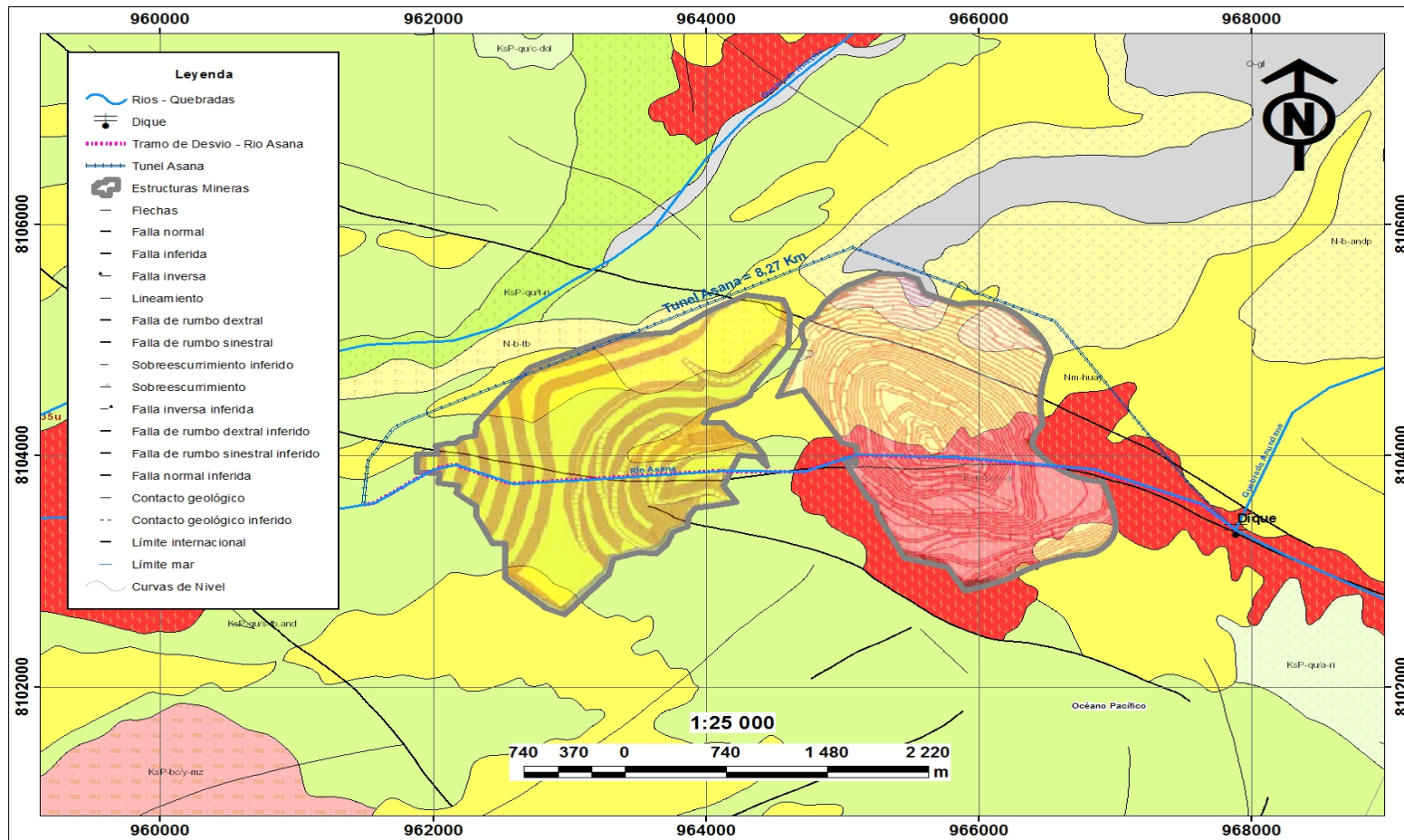
Fuente: INGEMMET, 2017.

Anexo 3. Mapa geológico Toquepala Cuajone Quellaveco



Fuente: INGEMMET, 2017.

Anexo 4. Mapa geológico local del proyecto Quellaveco



Fuente: INGEMMET, 2017.

Anexo 5. Procedimiento de fragmentación con plasma

1. Especificaciones del producto y accesorios

Es un producto no explosivo, catalogado como producto químico controlado, clase 4.1, que trabaja confinado dentro de una perforación, con cápsula de diámetro de 1,57 pulgadas (serie 600 D), cargas en diámetros de 2.5, a 6 pulgadas (serie PMD) y profundidad de perforaciones de 1,5 m a 12 m, con burden y espaciamiento de diferentes medidas. El fracturador se presenta en cápsulas con resistencia de iniciación incorporada en su interior, permitiendo un manejo e instalación fácil de efectuar por las personas.



Ilustración 1. Cápsulas de plasma de cargas de 1,3 kg con resistencia incorporada
Fuente: ENAEX, 2019b.

Los elementos del plasma fracturador son los cables de conexión para circuito NYA H07V-U DE 1,5 mm (rollos de 100 m), pelacables de conexión, y una cinta aisladora eléctrica de 19 x 0,177 mm, respectivamente.

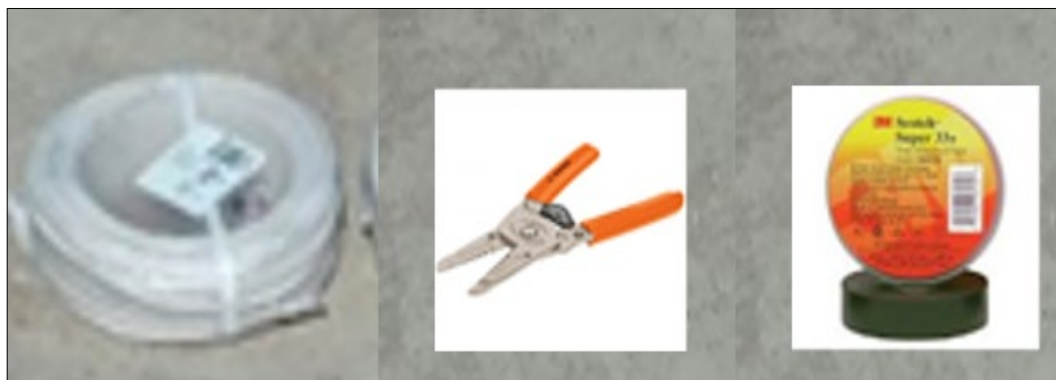


Ilustración 2. Accesorios para la preparación de cápsulas de plasma
Fuente: ENAEX, 2019b.

Otro accesorio para su iniciación son los rollos de cable troncal de iniciación (150 a 250 m), y equipo generador de energía de 7 KVA con corriente 220 V-CA.

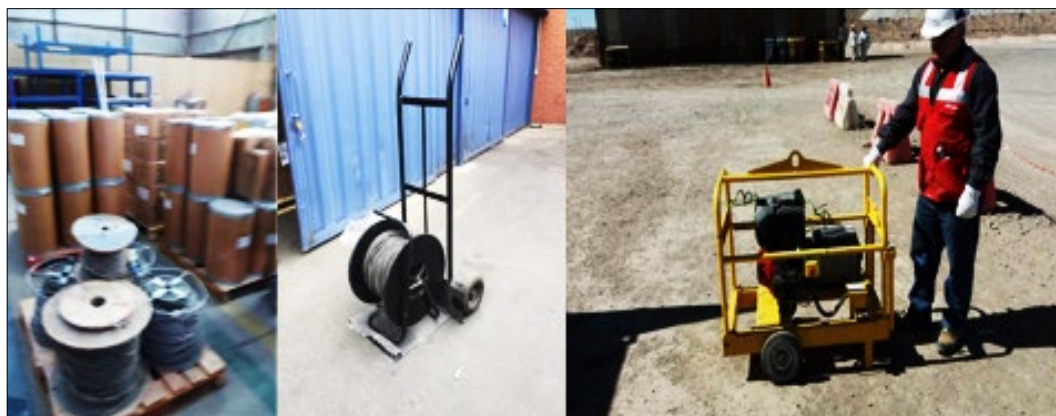


Ilustración 3. Rollo de cable y generador de energía para la iniciación
Fuente: ENAEX, 2019b.

Y finalmente, la máquina acumulador o iniciador eléctrico y el multitester. El primero, con 4 canales para iniciar (capacidad por canal de 50 Ohm) conectado al equipo generador eléctrico. Y el segundo, para medir las resistencias en Ohm. En la Ilustración 4, se observan los componentes, paralelamente.



Ilustración 4. Inicializador eléctrico y multímetro para la iniciación
Fuente: ENAEX, 2019b.

2. Procedimiento de carguío con cápsulas de plasma

Antes de realizar el proceso de carguío a los taladros del proyecto, la empresa PEVOEX es la encargada de realizar las perforaciones de taladros de la malla de voladura, también es responsable de la entrega del proyecto ya perforada a la empresa ENAEX, encargada principalmente del carguío de los taladros y realización de la voladura programada. Según ENAEX para el desarrollo de la actividad de fracturamiento del macizo rocoso con plasma, se consideran esencialmente tres actividades.

- El carguío de plasma en las perforaciones.
- Amarre de pozos, líneas y conexión de canales de iniciación.
- Iniciación de la fractura de roca con plasma.

a) Procedimiento de carguío con plasma en perforaciones

En la primera actividad, se deberá tomar en cuenta las medidas restrictivas con respecto a la seguridad, transporte y manejo adecuado de los productos y equipos para el carguío de plasma en las perforaciones, de acuerdo a lo siguiente.

- No se podrá realizar ninguna tarea de carguío de Plasma en los pozos, mientras exista en las cercanías una tormenta eléctrica.
- La secuencia considera como primera etapa chequear el espaciamiento burden (Ilustración 5), presencia de agua, rocas sueltas en la boca o collar y profundidad de los pozos conforme al diseño entregado.



Ilustración 5. Chequeo de los taladros de perforación
Fuente: ENAEX, 2019b.

- Si un pozo estuviera tapado, se hará lo posible por destapar siempre teniendo presente el control de los riesgos, si las medidas de profundidad, espaciamiento y burden no corresponde al calculado, se deberá rediseñar la carga.
- Se deberá verificar la distribución y cantidad de gravilla requerida para el taco de los pozos, siempre teniendo presente que no exista material de taco con sobre tamaño, ya que esto puede cortar las líneas u obstruir el pozo.
- El traslado de los equipos de iniciación y las cargas de plasma, se deberán trasladar en vehículos rehabilitados y estandarizados para el transporte de materiales.



Ilustración 6. Iniciador eléctrico y multítester para la iniciación
Fuente: ENAEX, 2019b.

- Testeo de todas las cargas de plasma antes de introducirlas en los pozos, con la finalidad de probar continuidad, respetando las indicaciones del fabricante. Esta acción se realizará por medio del multítester.



Ilustración 7. Verificación de calidad de las cargas con multítester
Fuente: ENAEX, 2019b.

- Distribución de las cargas de plasma en los pozos, conforme a las cantidades calculadas, durante su distribución el personal no podrá levantar y cargar manualmente cargas o equipos que sobrepasen los 25 kg por persona.
- Introducción de las cargas de plasma en los pozos (Ilustración 8); las cargas se colocarán respetando los tacos de gravilla previamente establecidos, siendo de responsabilidad del supervisor de terreno a cargo, el verificar su correcta instalación.



Ilustración 8. Distribución de cargas en los pozos de perforación
Fuente: ENAEX, 2019b.

b) Amarre de pozos, líneas y conexión de canales de iniciación

- Se testeará con un multímetro las conexiones de las cargas introducidas en el pozo constatando su continuidad. Este trabajo deberá realizarse en cada uno de los pozos. Todas las conexiones serán aisladas con cinta aislante de PVC/conectores.
- La conformación y unión del circuito de amarre de las cargas, se realizará de acuerdo a la resistencia óhmica, manteniendo el cuidado de no sobrepasar en total 45 Ohm por canal señaladas por el fabricante, incluido el cable doble conductor que el equipo acumulador es capaz de iniciar por canal.



Ilustración 9. Amarre de cargas en los pozos de perforación
Fuente: ENAEX, 2019b.

c) Iniciación de la fractura de roca con plasma

Una vez realizado el amarre de circuito de los pozos y despejada el área conforme al programa de fractura del macizo rocoso, se procede lo siguiente.

- Instalar el acumulador o iniciador y generador eléctrico, debe ser ubicada en un lugar seguro, esto dependerá de la malla a fracturar, cantidad de plasma, tipo y superficie del terreno entre otros factores (Ilustración 10).



Ilustración 10. Instalación del iniciador con el generador eléctrico
Fuente: ENAEX, 2019b.

- Se debe extender de forma manual un cable troncal de iniciación por cada canal de acumulador o iniciador eléctrico y evitar que haga contacto con zona de agua y estructuras metálicas.
- Extendido del cable de iniciación, se procede a conectar el circuito eléctrico de los pozos con el cable troncal de iniciación. Lo anterior se repite para cada uno de los canales del equipo iniciador (Ilustración 11).



Ilustración 11. Equipo de circuito eléctrico de iniciación
Fuente: ENAEX, 2019b.

- Conectar cable troncal a máquina iniciadora: Antes de conectar, verificar continuidad del circuito eléctrico. Conectar los extremos del cable troncal a la salida positivo-negativo del canal, en el equipo iniciador.
- Conectar a red 220 V o equipo generador (7 o 9 KVA), al equipo iniciador: Esto se realiza con el cable de conexión del equipo iniciador.
- Iniciar fracturamiento con plasma; autorizada la fractura, se procede a cargar el equipo iniciador (entre 60 a 80 segundos aproximadamente).
- Se realizará de forma manual y evitar que haga contacto con zona de agua y estructuras metálicas.

d) Procedimiento del circuito eléctrico

Para el procedimiento de iniciación de cápsulas de plasma se debe tomar en cuenta que el único circuito para iniciar las cápsulas es en serie (Ilustración 12). Queda estrictamente prohibido, amarrar un circuito en paralelo o mixto. El circuito de amarre se da mediante circuito para las cápsulas y entre pozos; ambos se amarran en serie.

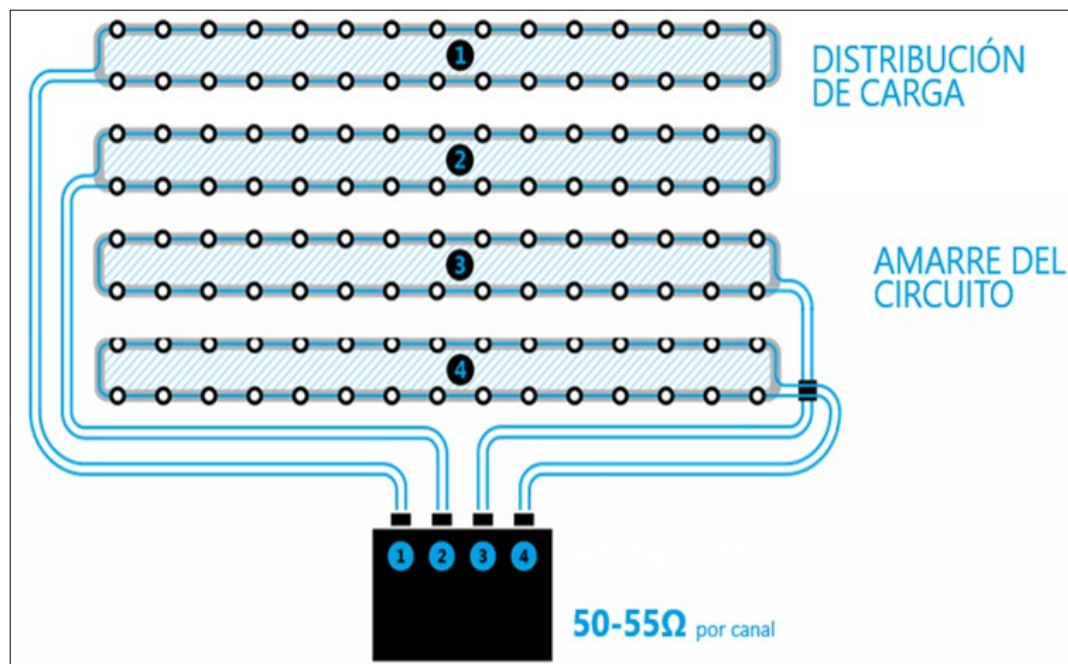


Ilustración 12. Circuito eléctrico con plasma fracturador
Fuente: ENAEX, 2019b.