

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

**DISEÑO DE VOLADURA Y SIMULACIÓN PARA EL CONTROL DE VIBRACIONES
DE LAS ESTRUCTURAS GEOTÉCNICAS EN LA MINA GALINHEIRO - MINAS
GERAIS - BRASIL**

PRESENTADO POR:

Br. ASTRID KEYLHA, PORTILLO GUIZADO

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

ASESOR:

Dr. MIGUEL VERA MIRANDA

CUSCO - PERÚ

2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada: " DISEÑO DE VOLADURA Y SIMULACIÓN PARA EL CONTROL DE VIBRACIONES DE LAS ESTRUCTURAS GEOTÉCNICAS EN LA HMA GALINHEIRO - MINAS GERAIS - BRASIL

presentado por: ASTRID KEYLHA PORTILLO GUIZADO con DNI Nro.: 71786961 presentado por: con DNI Nro.: para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO DE MINAS

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 03 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 08 %.

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

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	<input checked="" type="checkbox"/>
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	<input type="checkbox"/>
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	<input type="checkbox"/>

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 21 de ABRIL de 20 25



Firma

Post firma MIGUEL VERA MIRANDA

Nro. de DNI 23876027

ORCID del Asesor 0000-0002-9349-8463

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oíd: 27259:451045704 ✓

ASTRID KEYLHA PORTILLO GUIZADO

"DISEÑO DE VOLADURA Y SIMULACIÓN PARA EL CONTROL DE VIBRACIONES DE LAS ESTRUCTURAS GEOTÉCNICAS EN LA

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:451045704

Fecha de entrega

21 abr 2025, 9:01 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

21 abr 2025, 9:05 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

TESIS KEYLHA PORTILLO TURNITING.pdf

Tamaño de archivo

6.0 MB

113 Páginas

25.577 Palabras

147.667 Caracteres

8% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- ▶ Bibliography
- ▶ Quoted Text
- ▶ Cited Text
- ▶ Small Matches (less than 10 words)

Top Sources

- 7%  Internet sources
- 1%  Publications
- 4%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

1 Integrity Flag for Review

-  **Hidden Text**
395 suspect characters on 10 pages
Text is altered to blend into the white background of the document.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino. Gracias por darme la sabiduría, la paciencia y la determinación para superar cada desafío y alcanzar este logro.

A mis padres Karlha y Francisco por su amor incondicional, su sacrificio y su apoyo constante. Gracias por enseñarme a creer en mí misma y por estar siempre a mi lado, impulsándome a seguir adelante.

A mis hermanos Karlheni, Alejandro y Andy por su cariño, comprensión y por ser mi fuente de alegría y motivación en todo momento

A mi familia, en especial a mi tía Nilda, Idalida y Cristina por su respaldo inquebrantable, por ser mi refugio y por brindarme su amor en cada etapa de este proceso.

Este trabajo es el reflejo del amor, el esfuerzo y el apoyo de cada uno de ustedes. ¡Gracias por ser mi motor y mi inspiración!

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, a la escuela profesional de Ingeniería de Minas por brindarme el espacio, los recursos y las oportunidades para crecer académica y personalmente. Gracias por fomentar un ambiente de aprendizaje que me ha permitido desarrollar mis habilidades y alcanzar esta meta.

Al Mgt. Miguel Vera Miranda, por su dedicación, orientación y constante apoyo durante todo el proceso. Su experiencia, paciencia y valiosos consejos han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo, y me han inspirado a superarme cada día y a todos los docentes, por compartir su conocimiento, por desafiarme y motivarme a ir más allá de mis propios límites.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo optimizar los parámetros de voladura mediante simulaciones computarizadas, con el fin de controlar las vibraciones generadas y proteger las estructuras geotécnicas sensibles de la mina Galinheiro, como las cavidades naturales y presas de relaves. La metodología aplicada fue de tipo descriptivo, enfocada en la recopilación y análisis de datos operativos y geológicos, para ajustar variables como el tipo de explosivo, distancia a estructuras críticas y tiempos de detonación. Se utilizaron herramientas tecnológicas como el software I-BLAST para simular escenarios de voladura, lo que permitió realizar un diseño detallado de cargas, secuencias y vibraciones. A partir de estos análisis, se aplicó una ley de atenuación ($K = 168.97$, $\text{Alfa} = -0.82$) que permitió sectorizar las cargas y reducir significativamente el impacto vibratorio. Se emplearon cargas de ANFO y emulsión de 50 kg, 60 kg y 70 kg, con retardos de 21 ms entre taladros y 159 ms entre filas. Los resultados mostraron una reducción del 51% en las vibraciones en la estructura crítica MP-09 y un control efectivo en otras zonas protegidas. La fragmentación alcanzó un P80 de 422 mm (mejor que el valor simulado) y el desplazamiento fue de 23 m, cumpliendo con los requerimientos operacionales. En conjunto, el estudio demuestra la eficacia del diseño propuesto para minimizar los impactos ambientales y estructurales, mejorando además la eficiencia del proceso de voladura.

Palabras claves: Diseño de voladura, Vibraciones, P80, Velocidad Pico Particula, Campo Lejano.

ABSTRACT

The objective of this work is to optimize the blasting parameters through computer simulations, in order to control the vibrations generated and protect the sensitive geotechnical structures of the Galinheiro mine, such as natural cavities and tailings dams. The methodology applied was descriptive, focused on the collection and analysis of operational and geological data, to adjust variables such as the type of explosive, distance to critical structures and detonation times. Technological tools such as I-BLAST software were used to simulate blasting scenarios, which allowed a detailed design of charges, sequences and vibrations. Based on these analyses, an attenuation law ($K = 168.97$, $\text{Alpha} = -0.82$) was applied to sectorize the loads and significantly reduce the vibration impact. ANFO and emulsion loads of 50 kg, 60 kg and 70 kg were used, with delays of 21 ms between holes and 159 ms between rows. The results showed a 51% reduction in vibration in the critical MP-09 structure and effective control in other protected areas. Fragmentation reached a P80 of 422 mm (better than the simulated value) and displacement was 23 m, meeting operational requirements. Overall, the study demonstrates the effectiveness of the proposed design in minimizing environmental and structural impacts, while improving the efficiency of the blasting process.

Key words: Blasting design, Vibrations, P80, Peak Particle Velocity, Far Field.

ÍNDICE

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPITULO I	14
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	14
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	15
1.2.1 Problema General	15
1.2.2 Problema Especifico	15
1.3. OBJETIVOS	15
1.3.1 Objetivo General	15
1.3.2 Objetivos Específicos	15
1.4. JUSTIFICACIÓN	15
1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	16
1.5.1 Delimitación Temporal	16
1.5.2 Delimitación Espacial	16
1.6. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	16
1.6.1 Hipótesis general	16
1.6.2 Hipótesis específicas	16
1.7. IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE VARIABLES	17
1.7.1 Variables	17
1.8. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	17
2. CAPITULO II	18
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	18
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	18
2.1.1 Antecedentes Internacionales	18
2.1.2 Antecedentes Nacionales	19
2.1.3 Antecedentes Locales	21
2.2. MARCO TEÓRICO	22
2.2.1 Macizo rocoso	22

2.2.2	Voladura	22
2.2.3	Teoría de explosivo.....	23
2.2.4	Sistema de iniciación.....	25
2.2.5	Diseño de voladura	25
2.2.5.1.	Diseño geométrico de voladura	26
2.2.5.2.	Diseño de carguío	30
2.2.5.3.	Diseño de secuencia	32
2.2.5.4.	Mecanismo de fragmentación	33
2.2.6	Vibraciones generadas por las voladuras.....	34
2.2.6.1.	Tipos de ondas	35
2.2.6.2.	Parámetros de ondas	36
2.2.7	Daño inducido por las vibraciones	37
2.2.7.1.	Modelos de vibraciones	37
2.2.7.2.	Influencia de las vibraciones en campo lejano	38
2.2.8	Equipos de medida de las vibraciones.....	40
2.2.9	Control de vibraciones	40
2.2.10	Normal internacionales.....	41
2.2.11	Brasil - Norma ABNT-NBR 9653	42
2.2.12	Simulación con software IBLAST	42
2.2.12.1.	Simulación de vibración IBLAST	44
2.3.	DEFINICIÓN DE TERMINOS.....	46
2.3.1	Diseño de voladura	46
2.3.2	Vibraciones.....	46
2.3.3	Velocidad pico partícula	46
2.3.4	Campo lejano	47
2.3.5	P80	47
3.	CAPITULO III.....	48
	MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN	48
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	48
3.2.	NIVEL DE INVESTIGACIÓN	48
3.3.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	48
3.4.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	48
3.4.1	Técnicas	48
3.4.1.1.	Documentario	48
3.4.1.2.	Trabajos de campo.....	48
3.4.2	Instrumentos e equipos.....	49
3.4.2.1.	Ficha documental.....	49

3.4.2.2. Libreta de campo.....	49
3.5. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE DATOS	49
3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE ANÁLISES DE RESULTADOS	49
4. CAPITULO IV	50
ANÁLISIS DEL DISEÑO DE VOLADURA	50
4.1. Información general de resultados y análisis de las voladuras ocurridas en la zona norte banco 1400	50
4.2. Evaluación del proyecto: Zona/Polígono: Mina Galinheiro/ POL63_68 – N° 375 - DNA 52	
4.2.1 Parámetros de perforación.....	52
4.2.2 Parámetros de voladura	52
4.2.2.1. Diseño de cargas.....	53
4.2.2.2. Diseño de secuencia de salida	55
4.2.2.3. Análisis de vibraciones.....	57
4.2.2.4. Análisis de Fragmentación	58
4.2.2.5. Costo de voladura	59
4.3. Diseño de los parámetros de voladura óptimos para el control de vibraciones en el proyecto: Zona/Polígono: Mina Galinheiro / POL122_74 – N° 381- DNA.....	60
4.3.1 Parámetros de perforación.....	60
4.3.2 Diseño de voladura para el control de vibraciones	61
4.3.2.1. Análisis de ley de atenuación.....	61
4.3.2.2. Estudio de onda elemental	68
4.3.2.3. Diseño de carga.....	73
4.3.2.4. Diseño de secuencia de salida	80
4.3.2.5. Control de vibraciones.....	83
4.3.2.6. Simulación de diseño.....	86
4.3.2.7. Costo de Voladura	90
5. CAPITULO V	91
RESULTADOS Y DISCUSIONES	91
5.1. <i>Resultado</i> de voladura.....	91
5.1.1 Resultados de vibraciones	91
5.1.2 Resultado de fragmentación	93
5.1.3 Resultado de desplazamiento	94
5.2. Discusión.....	95
CONCLUSIONES	97
RECOMENDACIONES	98
BIBLIOGRAFÍA	99

ANEXOS	101
ASPECTOS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO	101
UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	101
Ámbito de investigación	101
Accesibilidad	101
Clima	102
Flora	102
Fauna	102
Mamíferos terrestres	102
Mamíferos voladores	103
Entomofauna – Dípteros	103
Entomofauna – Lepidóptera	103
Entomofauna – Apifauna	104
GEOLOGÍA REGIONAL	104
Complejos metamórficos	106
Supergrupo Río das velhas	106
Grupo Quebra Osso	106
Grupo Nova Lima	106
Grupo Maquiné	107
Supergrupo de Minas	107
Grupo Tamanduá	107
Grupo Caraça	108
Grupo Itabira	108
Grupo Piracicaba	108
Supergrupo Carretera Real	109
Grupo Sabará	109
Grupo Itacolomi	109
Diques máficos	109
Depósitos Cenozoicos	110
GEOLOGÍA LOCAL	111
OPERACIONES UNITARIAS	114
Perforación	114
Voladura	115
Carguío y transporte	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Macizo rocoso fragmentado.....	22
Figura 2: Proceso de detonación de una carga explosiva	24
Figura 3: Diseño de voladura.....	26
Figura 4: Efecto de tipo de esquema sobre la fragmentación en una voladura	30
Figura 5: Distribución de cargas	31
Figura 6: Mecanismo de fractura	34
Figura 7: Tipo de onda.....	36
Figura 8: Propiedades de la onda.....	37
Figura 9: Esquema de daño inducido por la voladura	37
Figura 10: Sismógrafo tipo Gaya	40
Figura 11: Limite de vibraciones	42
Figura 12: Estructura del modelo DNA-Blast.....	44
Figura 13: Sectorización de diseños de carga.....	54
Figura 14: Secuencia de salida - Temporización	55
Figura 15: Isolíneas de tiempos y ventana de tiempos - Temporización	56
Figura 16: Registro de vibraciones.....	57
Figura 17: Análisis de fragmentación mediante el software IBLAST	59
Figura 18: Voladuras realizadas en la zona norte de la mina Galinheiro.....	61
Figura 19: Modelo predictivo para Cavidade MP-09	66
Figura 20: Modelo predictivo para Cavidade MP-11	67
Figura 21: Modelo predictivo para Barragem Vargem Grande	68
Figura 22: Registro de vibración para el estudio de onda elemental.....	70
Figura 23: Configuración en el Software I-Blast para el análisis de onda elemental	71
Figura 24: Análisis de onda elemental en el software I-Blast.....	72
Figura 25: Mapeo geológico del polígono 122_74	74
Figura 26: Simulación de vibraciones respecto distancia y cargas.....	75
Figura 27: Sectorización de cargas según simulación de vibraciones	77
Figura 28: Diseño de cargas.....	79
Figura 29: Diseño de secuencia en líneas y temporización	81
Figura 30: Isolíneas de tiempos y ventana de tiempos	82
Figura 31: Simulación de vibraciones en las estructuras geotécnicas con el diseño propuesto	84
Figura 32: Monitoreo y simulación de vibraciones en dirección a las estructuras críticas....	85
Figura 33: Análisis de energía.....	86
Figura 34: Configuración para la simulación en 4D de fragmentación	87
Figura 35: Simulación de fragmentación en 4D con el software I-Blast	88
Figura 36: Simulación de P:80 con el software I-Blast.....	89
Figura 37: Simulación de desplazamiento del macizo rocoso	90
Figura 38: Registros de vibraciones en las estructuras geotécnicas.....	92
Figura 39: Registros de vibraciones en dirección las estructuras geotécnicas	93
Figura 40: Análisis de fragmentación.....	93
Figura 41: Resultado del análisis de fragmentación real	94
Figura 42: Resultado del desplazamiento real	95
Figura 43: Localización de la mina Galinheiro.....	101
Figura 44: Columna estratigráfica según el nuevo mapa del Cuadrilátero Ferrífero.....	105
Figura 45: Sección geológica típica de la Mina Galinheiro basada en sondajes	112
Figura 46: Mapa Geológico da região da Mina Galinheiro	113

Figura 47: Perforación de taladros de producción	114
Figura 48: Carguío de taladros com ANFO mediante camión fabrica	115
Figura 49: Carguío de taladros con Emulsión mediante camión fabrica	116
Figura 50: Carguío de taladros con HA73G mediante camión fabrica	116
Figura 51: Sistema de iniciación	117
Figura 52: Carguío y transporte	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Operacionalización de variables	17
Tabla 2	Relación de rigidez	27
Tabla 3	Relación de tipo de roca	29
Tabla 4	Relación de tipo de roca/Factor de carga	32
Tabla 5	Normativa internacional en el manejo de voladuras	41
Tabla 6	Propiedades geológicas Mina Galinheiro	51
Tabla 7	Propiedades de los explosivos	51
Tabla 8	Parámetros de perforación.....	52
Tabla 9	Registro de vibraciones Real vs Simulado	57
Tabla 10	Costos de voladura	60
Tabla 11	Parámetros de perforación	61
Tabla 12	Construcción de ley de ley de atenuación para Cavidade MP-09 – Escenario 01	63
Tabla 13	Construcción de ley de ley de atenuación para Cavidade MP-09 – Escenario 02	64
Tabla 14	Construcción de ley de ley de atenuación para Cavidade MP-09 – Escenario 03	65
Tabla 15	Resultados de vibraciones en la Cavidad MP-11	67
Tabla 16	Resumen de parámetros de las voladuras en la zona Norte, Mina Galinheiro	69
Tabla 17	Tiempos de retardo vs Vibraciones	72
Tabla 18	Comparativos de costos según explosivos	75
Tabla 19	Costos de Voladura en Mina Galinheiro / POL122_74 – N° 381- DNA.....	90
Tabla 20	Registro de vibraciones reales vs simulado en las estructuras geotécnica	91
Tabla 21	Registro de vibraciones reales vs simulado en dirección las estructuras geotécnicas.....	92
Tabla 22	Rutas de acceso a Mina Galinheiro	102
Tabla 23	Flota de perforadoras en la mina Galinheiro	114
Tabla 24	Flota de equipos de transporte.....	117
Tabla 25	Flota de equipos de carguío	118

INTRODUCCIÓN

En la minería a cielo abierto, la voladura constituye una etapa crítica del proceso extractivo, ya que permite la fragmentación del macizo rocoso para su posterior manipulación. Sin embargo, este proceso genera ondas sísmicas que pueden causar daños considerables a estructuras cercanas, especialmente aquellas de carácter geotécnico como presas de relaves, cavidades naturales o infraestructuras civiles. En ese contexto, el control de vibraciones inducidas por voladuras se ha convertido en una necesidad imperiosa, no solo para preservar la integridad de estas estructuras, sino también para cumplir con normativas ambientales y de seguridad.

La presente investigación se desarrolló en la mina Galinheiro, ubicada en el estado de Minas Gerais, Brasil, donde coexisten actividades mineras con estructuras geotécnicas. Esta realidad plantea el desafío de optimizar los diseños de voladura para lograr una fragmentación eficiente sin comprometer la estabilidad de las estructuras geotécnicas adyacentes. Para ello, se empleó el software especializado I-BLAST, el cual permitió simular distintos escenarios de voladura, analizar la propagación de las vibraciones y ajustar los parámetros operativos como la carga explosiva, tiempos de retardo y secuencia de disparo.

El estudio adopta un enfoque descriptivo y analítico, fundamentado en datos reales recolectados en campo, con el objetivo de construir leyes de atenuación específicas para cada zona crítica y evaluar el impacto de las vibraciones generadas. A través de este análisis, se logró reducir en más del 50% la incidencia de vibraciones en la estructura crítica Cavidade MP-09, demostrando la efectividad del diseño propuesto.

Este trabajo representa un aporte significativo en la búsqueda de prácticas sostenibles y seguras en la minería moderna, proponiendo una metodología replicable para el diseño de voladuras controladas mediante simulación, garantizando así la protección del entorno y la eficiencia operativa del proceso minero.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Uno de los problemas actuales en el rubro de la minería es el diseño de parámetros óptimos de voladura para el control de vibraciones en las estructuras geotécnicas, para evitar la ruptura de cavidades que son zonas protegidas por el estado y de no ser cuidadas de manera correcta esto provocaría el cierre o la suspensión definitiva del proceso de voladura para la extracción del material minero. Otro factor a tener en cuenta es el control de la presa de relaves minero que con vibraciones que están fuera del rango de 1 mm/s según la norma llegan a colapsar provocando daño irreversible en la estructura y el medio ambiente, evidenciando que los protocolos de voladura no presentan un adecuado diseño de voladura

Durante este proceso de voladura se crean ondas de choque y presión de gas que provocan microfisuras en la roca. A continuación, la roca se fractura cuando el gas se expande en el interior de las fisuras. La roca se fractura físicamente como resultado de la presión del gas. Sin embargo, la masa rocosa sufre daños debido a que parte de la energía del explosivo se libera en forma de vibraciones.

La mina Pico es un yacimiento de hierro a tajo abierto que comprende dos yacimientos Galinheiro y Sapecado, en la actualidad se viene realizando el proceso de extracción de ambos en fase 4, dentro de la extensión de la mina de Galinheiro se encuentran estructuras geotécnicas (presas de relaves, cavidades y estructuras civiles), las cavidades naturales subterráneas, están protegidas medioambientalmente, estas son una parte única y muy especial del entorno natural de la mina de Galinheiro, siendo de fundamental importancia acciones de conservación, mitigación de los impactos de las voladuras, por otro lado las presas de relaves están protegidas por seguridad debido a las tragedias ocurridas con la ruptura de estas, siendo fundamental su estabilidad, las mismas que están expuestas a las vibraciones generadas por las voladuras, es por ello que estas deben ser monitoreadas y evaluadas aplicando técnicas que nos permitan diseñar la voladura y realizar las simulaciones del diseño con el fin de minimizar el efecto de estas, el adecuado monitoreo de la medición de velocidad de partículas posee diversas ventajas en cuestión de elaborar los criterios de diseño de la voladura, dentro de estas la evalúa la carga operativa en función de la distancia de la estructura que queremos proteger, el consumo específico del explosivo, el hecho de que debemos utilizar la energía necesaria para romper la roca, el uso de tiempos entre taladros y líneas que eviten el acoplamiento de las ondas y permitan un buen desplazamiento de la roca para ellas, un conocimiento profundo de la estructura geotécnica, los tiempos de inicio de la

secuencia, los criterios que se pueden utilizar para determinar su eficacia, su interacción y, por último, la optimización global del diseño para reducir el nivel de vibración.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Problema General

P. ¿Cuál es la mejor manera de diseñar los parámetros de voladura mediante simulación para regular las vibraciones en las estructuras geotécnicas de la mina de Galinheiro, en el estado brasileiro de Minas Gerais?

1.2.2 Problema Específico

P1. ¿Cómo pueden controlarse las vibraciones inducidas por las voladuras en las estructuras geotécnicas de la mina de Galinheiro, en Minas Gerais (Brasil)?

P2. ¿Qué tecnología nos permitirá simular las vibraciones y el diseño propuesto para el control en las estructuras geotécnicas en la mina Galinheiro – Minas Gerais - Brasil?

P3. ¿Cuál será grado de fragmentación simulado aplicando el diseño de voladura propuesto para el control de vibraciones en las estructuras geotécnicas en la mina Galinheiro – Minas Gerais - Brasil?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

O. Diseñar los parámetros de voladura para el control de vibraciones en las estructuras geotécnicas mediante la utilización de simulaciones en la mina Galinheiro – Minas Gerais – Brasil.

1.3.2 Objetivos Específicos

O1. Realizar la simulación de vibraciones con el diseño de voladura propuesta en la mina Galinheiro – Minas Gerais – Brasil

O2. Controlar las vibraciones producto de la voladura en las estructuras geotécnicas en la mina Galinheiro – Minas Gerais – Brasil.

O3. Determinar el grado de fragmentación aplicando el diseño de voladura propuesto para el control de vibraciones en las estructuras geotécnicas en la mina Pico Brasil

1.4. JUSTIFICACIÓN

El estudio se enfoca en diseñar los parámetros óptimos de voladura para controlar las vibraciones en las estructuras geotécnicas de la mina Galinheiro. Esto se logrará mediante la

selección de carga operante, consumo de explosivo, tiempos de retardo y secuencia de salida, que son parámetros fundamentales para minimizar las vibraciones. Se utilizará el software I-Blast para modelar las vibraciones que se generarán en diferentes escenarios de voladura. Las simulaciones permitirán prever las zonas de mayor impacto y ajustar los parámetros antes de la ejecución real. La modelación de distintos escenarios ayudará a evaluar cómo cada parámetro influye en las vibraciones producidas, facilitando la identificación de configuraciones que maximicen la eficiencia de la voladura mientras minimizan el impacto en las estructuras geotécnicas, es esencial controlar y minimizar las vibraciones para evitar accidentes y mantener la integridad de las estructuras.

Uno de los desafíos clave en el diseño de voladuras es lograr un equilibrio adecuado entre la fragmentación óptima del material rocoso y el control de las vibraciones generadas. Dada la proximidad de las estructuras geotécnicas en la mina Galinheiro, es crucial ajustar los parámetros de voladura para lograr la fragmentación necesaria sin comprometer la estabilidad de dichas estructuras.

1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 *Delimitación Temporal*

El estudio se llevó a cabo en los meses de enero hasta Julio del año 2024.

1.5.2 *Delimitación Espacial*

El estudio está ubicado en la mina Galinheiro, situado geográficamente en la región de Itabirito, estado de Minas Gerais, República Federal de Brasil en el área de operaciones mineras.

1.6. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1 *Hipótesis general*

H. Diseñando los parámetros óptimos de voladura y utilizando los resultados de simulación nos permite controlar las vibraciones en las estructuras geotécnicas en la mina Galinheiro – Minas Gerais - Brasil.

1.6.2 *Hipótesis específicas*

H1. Se controlará las vibraciones realizando un estudio a campo lejano en las estructuras geotecnias en la mina Galinheiro – Minas Gerais – Brasil.

H2. Se realizará la simulación de vibraciones aplicando el diseño de voladura propuesto con el software IBlast.

H3. Se analizará el grado de fragmentación P80 pos voladura, aplicando el diseño propuesto y simulado para controlar las vibraciones en las estructuras geotecnias en la mina Galinheiro – Minas Gerais - Brasil.

1.7. IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE VARIABLES

1.7.1 Variables

Variable dependiente: Diseñar los parámetros de voladura.

Variable independiente: Controlar las vibraciones en las estructuras geotécnicas.

1.8. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 1

Operacionalización de variables

TIPO DE VARIABLES	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
Variable Independiente	Diseñar parámetros de voladura	- Cantidad de carga	Kilogramo
		- Tiempos de retardo	Milisegundos
		- Secuencia de salida	Milisegundos
		- Factor de carga	Kilogramo/Tonelada
		- Fragmentación	Milímetro
Variable Dependiente	Control de Vibraciones en las estructuras geotécnicas	- Velocidad Pico	Milímetro/segundo
		Partícula	
		- Costos	

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 *Antecedentes Internacionales*

Autor: (Jorge & Juan, 2011).

Artículo Científico: “Modelización de parámetros de voladura para la optimización del proceso minero: la voladura computarizada”.

Revista científica: IX Jornadas Iberoamericanas de materiales de construcción – Ecuador.

Este trabajo presenta una metodología para optimizar las voladuras en minería a cielo abierto mediante un enfoque que integra diseño, monitorización y análisis de resultados. Se utilizan herramientas tecnológicas como escaneo láser, monitoreo digital y análisis informático para obtener datos precisos que permiten mejorar la perforación, optimizar el uso del explosivo y reducir impactos ambientales. La propuesta sigue un sistema cíclico, donde los resultados de cada voladura alimentan el diseño de las siguientes, dando lugar al concepto de voladura computarizada.

Autor: (Perez, 2018).

Título de Tesis: “Optimización de voladuras y vibraciones generadas”.

Universidad: Universidad Politécnica de Cartagena – Colombia.

El objetivo fue desarrollar una metodología de recopilación de datos en campo para optimizar el diseño de voladuras en minería a cielo abierto. A través del análisis de parámetros como las velocidades de partícula, los tiempos de respuesta de las ondas, la fragmentación del material, la disposición de escombros y las características geotécnicas del macizo rocoso, se busca establecer relaciones entre el comportamiento de la voladura y las propiedades de la roca, para contribuir a reducir el consumo de explosivos, controlar las vibraciones y mejorar la calidad del producto final, promoviendo una operación más eficiente y sostenible.

Los resultados obtenidos demuestran que los macizos más compactos y duros presentan mayores velocidades de vibración debido a una propagación más eficiente de las ondas sísmicas. Asimismo, se identificó que las discontinuidades del terreno afectan directamente la eficiencia de la fragmentación, y que factores como la secuenciación del disparo y la inclinación de los taladros inciden en la disposición final del material detonado.

Autor: (Rezaeineshat, Monjezi, Mehrdanesh, 2020).

Artículo Científico: “Optimización del diseño de voladuras en minas de caliza a cielo abierto con el objetivo de reducir la vibración mediante técnicas robustas”.

Revista Científica: Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources – Australia.

El objetivo de este estudio fue aplicar modelos para predecir las vibraciones del suelo causadas por las voladuras en minas. Para ello, se analizaron 112 voladuras, cuyas mediciones precisas se utilizaron para construir un modelo de red neuronal artificial (ANN) que predice la velocidad de partícula pico (PPV). Los parámetros de entrada considerados fueron la carga, espaciado, carga máxima por retardo, distancia desde la cara de voladura al punto de monitoreo y la calidad de la roca, mientras que el parámetro de salida fue el PPV.

El modelo ANN, se empleó como función objetiva en un algoritmo competitivo imperialista (ICA) para minimizar el PPV. El algoritmo ICA logró reducir las vibraciones en un 59% al optimizar los parámetros de carga (2,9 m), espaciado (4,4 m) y carga por retardo (627 kg). Demostró ser más preciso que otros modelos de predicción utilizados en el estudio. Los resultados indicaron que los factores más influyentes en las vibraciones son la distancia a la explosión y la carga máxima por retardo, mientras que la carga, el espaciado y la calidad de la roca tuvieron menor impacto.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Autor: (Delgado, 2014).

Título de Tesis: “Estrategias en el diseño de perforación y voladura para estructuras aledañas controlando vibraciones y rocas al aire en minas a tajo abierto”.

Universidad: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

El objetivo fue diseñar una metodología que garantizara la seguridad en las voladuras, evitando las rocas volantes y controlando las vibraciones cerca de estructuras críticas, como la chancadora primaria y el grifo. Para lograrlo, se establecieron parámetros específicos de voladura, tiempos y configuraciones de retardo, utilizando tanto detonadores electrónicos como no electrónicos, y aplicando la detonación secuencial. Se usó el método de onda elemental, cumpliendo con las normativas internacionales. Se diseñaron voladuras para dos casos de estudio: la chancadora primaria y el grifo Sur, desarrollando procedimientos detallados para perforación, voladura y disparo, con controles específicos para cada etapa del proceso.

Los resultados obtenidos mostraron la efectividad de las estrategias aplicadas en el diseño de perforación, la configuración de las voladuras (carga, secuencia de salida y simulaciones), el control de eyección y la evaluación de vibraciones. En todos los casos, no se generaron daños a las infraestructuras cercanas, lo que demuestra que la metodología propuesta es eficaz para optimizar el diseño de las voladuras, asegurando la seguridad de las estructuras y controlando las vibraciones en el campo lejano.

Autor: (Valencia, 2019).

Título de Tesis: “Diseño de voladura para la optimización de fragmentación en mineral y desmonte, mediante el control de vibraciones y velocidad de detonación en mina San Rafael MINSUR s.a.”.

Universidad: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

El objetivo fue diseñar la secuencia de voladura, tomando en cuenta la clasificación geomecánica RMR, el tipo de explosivo comercial, la distribución de carga y el desacoplamiento de la energía del explosivo, con el fin de mejorar la fragmentación P(80) en frentes y tajos de taladros largos de menos de 6 pulgadas. Los procedimientos incluyeron diagnósticos sobre el uso de romper bancos en la chancadora primaria, pruebas de diseño de voladuras, mediciones de vibraciones, velocidad de detonación, fragmentación y optimización de voladuras.

Los resultados mostraron que la secuencia de voladura, utilizando detonadores Exsanel de periodos corto y largo y distintos tipos de explosivos como Dinamita, ANFO y emulsiones encartuchadas, permitió obtener una fragmentación de P (80) menor a 6.73 pulgadas. Las vibraciones promediaron 40 mm/s en intervalos de tiempo de entre 500 y 6000 segundos. La velocidad de detonación alcanzó 3640 m/s en el tajo 4370-1225 del nivel 4390 con explosivo ANFO y diámetro de 64 m.

Autor: (Cano, 2019).

Título de Tesis: “Estudio de vibraciones para la selección de explosivo Óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. Filial de Hochschild”.

Universidad: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

El objetivo fue analizar las vibraciones generadas por la detonación de explosivos para seleccionar el más adecuado, con el fin de reducir los costos operativos en perforación, voladura, transporte y chancado primario en la mina Selene, a la vez que se minimiza el impacto en las áreas cercanas. Se mide la velocidad de las partículas producidas por la detonación de cada carga explosiva para evaluar su eficiencia, su interacción con cargas

adyacentes y, en general, el rendimiento del diseño. La técnica de monitoreo de vibraciones es clave en el diagnóstico, control, modelado y optimización de las voladuras. Los resultados indican que la dinamita es el explosivo más eficiente, ya que reduce el factor de carga, minimiza las vibraciones y disminuye la dilución en la explotación, lo que contribuye a la reducción de costos operativos en esta fase de la minería.

Autor: (Ollero, 2021).

Título de Tesis: “Reducción de vibraciones en el Municipio de Santo Domingo con la aplicación de un nuevo diseño de voladura en el tajo 333 – 311 Mina Jabalí”.

Universidad: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

El objetivo de este estudio fue determinar el diseño óptimo de voladura a través del análisis de los niveles de vibraciones. Se propuso un nuevo diseño de voladura para reducir estos niveles según normas internacionales. Para ello, se midió la velocidad de las partículas generadas por un nuevo modelo de carga explosiva y una disposición innovadora de taladros. Este enfoque permitió evaluar la eficiencia relativa del diseño, los resultados en fragmentación del macizo rocoso y la velocidad pico de partículas, lo que definió el rendimiento general. Como resultado, se logró reducir las vibraciones en el municipio de Santo Domingo, desde un VPS de 11.08 mm/s (pico más alto) a 2.73 mm/s (mínimo) en el punto 02 – CASA DE DOÑA ESTER, y de 2.451 mm/s (máximo) a 0.453 mm/s (mínimo) en el punto 01 – CAMPAMENTO CIS.

2.1.3 Antecedentes Locales

Autor: (Oliveira, 2022).

Título de Tesis: “Control de vibraciones generadas por la voladura de rocas em estructuras geotécnicas”.

Universidad: Universidad Federal de Ouro Preto.

Tiene por objeto controlar las vibraciones procedentes de las voladuras en estructuras críticas (presas, cavidades, diques, taludes y estructuras de construcción), alterando los parámetros de voladura al mismo tiempo que mejora la fragmentación, para control de las vibraciones fueron realizados los monitoreos de las voladuras con sismógrafos y construidas las leyes de atenuación en dirección a cada región crítica. Como base para ese trabajo fue utilizado el software de simulación de voladuras, que permitió la simulación en 4D (3D + tiempo) de las vibraciones, fragmentación, ultra lanzamiento, etc. La comparación entre las vibraciones simuladas y reales se mostró adherente de acuerdo con el método de distancia escalonada a raíz cuadrada, de acuerdo con los coeficientes K y Alfa encontrados para cada

dirección. La separación de las cargas explosivas en los agujeros con la utilización de cubiertas intermedias realizadas con residuos de perforación se mostró una forma eficaz de reducción de la carga máxima por espera, el uso de detonadores electrónicos también ha demostrado ser eficaz en el control de la dispersión de los tiempos de retardo y por lo tanto en el control de la carga máxima en espera.

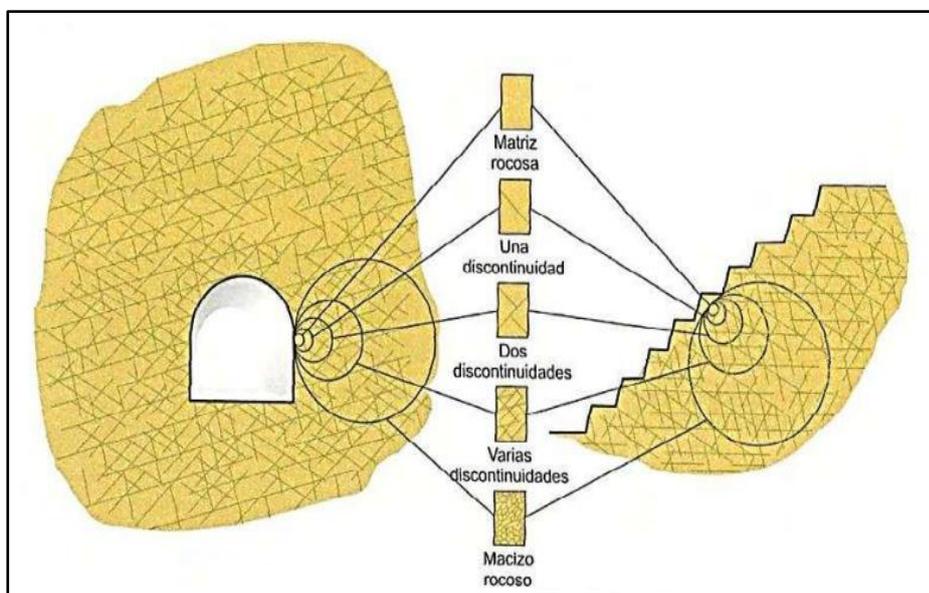
2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1 Macizo rocoso

El estudio de la estructura y las propiedades del macizo rocoso es un aspecto clave en el diseño y ejecución de voladuras, ya que influye directamente en la eficiencia y seguridad del proceso de excavación. Según Valdir (2019), el macizo rocoso es un medio discontinuo compuesto por la roca y sus discontinuidades. En este sentido, el macizo rocoso *in situ* incluye no solo el tipo de litología, sino también todas sus discontinuidades estructurales, como sistemas de diaclasas, planos de cizallamiento y fallas. Las propiedades de resistencia y deformabilidad del macizo están principalmente condicionadas por estas discontinuidades, que actúan como planos de debilidad. Esta característica es especialmente relevante en operaciones de minería a cielo abierto.

Figura 1

Macizo rocoso fragmentado



Fuente: Libro de voladura de rocas (Valdir, 2019)

2.2.2 Voladura

La voladura implica el empleo de cargas explosivas distribuidas en taladros dentro de un área específica, detonando según una secuencia planificada para obtener desplazamiento

y fragmentación sin alterar agentes externos según (Lopez, 1987) :Tres factores clave influyen en una voladura

- Cantidad de carga: relacionada con la cantidad de explosivo utilizada, determinada por los objetivos deseados.
- Distribución de energía: relacionada con la geometría de la distribución generada por el explosivo, transformando la energía química en mecánica. Una distribución inadecuada puede resultar en fragmentación deficiente o efectos no deseados en el proyecto.
- Confinamiento de energía: se refiere al confinamiento dentro del taladro, donde se ubica el explosivo. Este asegura que los gases generados trabajen adecuadamente antes de liberarse por la zona de menor resistencia.

Estos factores son fundamentales para garantizar una voladura eficaz y controlada, reduciendo riesgos y optimizando los resultados deseados en cuanto a desplazamiento y fragmentación.

2.2.3 Teoría de explosivo

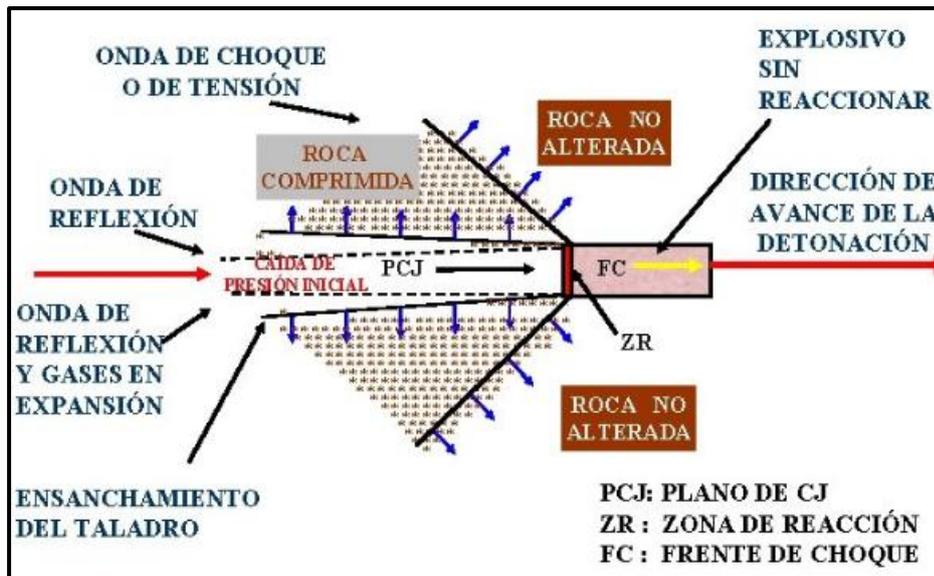
Un diseño de voladura eficiente requiere considerar los principios de la teoría de explosivos para seleccionar adecuadamente el tipo de explosivo y comprender su interacción con el macizo rocoso. En este sentido, (Lopez, 1987) señala que el objetivo principal del uso de explosivos en la voladura de rocas es liberar energía química de forma monitorizada en tiempo y espacio, con el propósito de fragmentar el material.

La degradación de una sustancia explosiva se clasifica en tres tipos: combustión, deflagración y detonación. La combustión se considera una reacción química que libera calor; la deflagración es categorizado como proceso exotérmico cuya velocidad de descomposición está sujeta de la conductividad térmica, y no supera los 1000 m/s; mientras que la detonación se conoce como proceso físico-químico caracterizado por su alta velocidad de reacción y la formación de sustancias gaseosas a temperaturas elevadas, lo que genera una fuerza expansiva significativa.

De acuerdo con (Lopez, 1987), al iniciarse el explosivo, el primer fenómeno que se produce es una onda de choque que se propaga a través de su propia masa, activando la porción de explosivo adyacente y provocando una reacción en cadena. Sin embargo, si la onda de presión se propaga en dirección opuesta a la masa no detonada, puede generarse un régimen de deflagración lenta, en el que la reacción va perdiendo energía progresivamente, impidiendo así la activación completa del explosivo restante.

Figura 1

Proceso de detonación de una carga explosiva



Fuente: Libro Manual de perforación y voladura de rocas (Lopez, 1987)

Según (Lopez, 1987) La clasificación de los explosivos está en función a la velocidad de onda de choque en dos grupos principales.

a) Los explosivos lentos o deflagrantes, cuya velocidad de reacción es inferior a 2000 m/s, fueron los primeros en desarrollarse. Funcionan mediante deflagración, un proceso que se considera una forma rápida de combustión. Ejemplos típicos de este tipo de explosivos incluyen la pólvora, los propulsores de cohetes y los fuegos artificiales.

b) Por otro lado, los explosivos rápidos o detonantes, con velocidades que oscilan entre 2000 m/s y 7000 m/s, se subdividen en dos categorías: primarios y secundarios.

- Los explosivos primarios se caracterizan por su alta sensibilidad y capacidad energética, por lo que se utilizan principalmente como iniciadores para detonar explosivos secundarios. Algunos compuestos comunes en esta categoría son el fulminato de mercurio, la pentrita y la hexolita.
- Los explosivos secundarios, utilizados principalmente en la fragmentación de rocas, son menos sensibles que los primarios, pero proporcionan un mayor rendimiento. Esto se debe a la combinación de propiedades como sensibilidad controlada, alta densidad, potencia energética, y resistencia al agua, entre otros factores.

A su vez, los explosivos industriales se clasifican en dos grupos según su nivel de consumo:

- Agentes explosivos: Son mezclas que, por lo general, no contienen ingredientes explosivos por sí mismos, salvo en casos particulares. Los principales ejemplos incluyen ANFO, ALANFO, emulsiones y ANFO pesado.
- Explosivos convencionales: Estos requieren componentes intrínsecamente explosivos para su fabricación, los cuales actúan como sensibilizadores de las mezclas. Entre los más conocidos se encuentran los explosivos gelatinosos, pulverulentos y de seguridad.

2.2.4 Sistema de iniciación

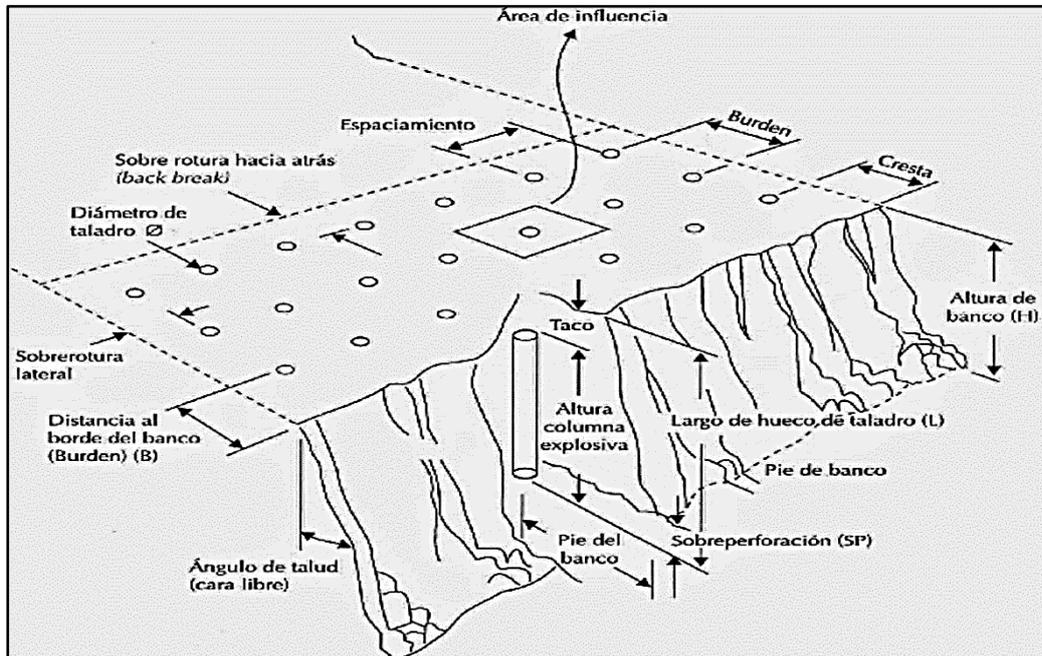
Existen tres categorías de sistemas de iniciación: eléctricos, no eléctricos y electrónicos. Los sistemas eléctricos se ponen en marcha mediante corriente eléctrica que calienta un compuesto pirotécnico, desencadenando un dispositivo de retardo que lleva a la detonación de una carga primaria de PETN. Entre los detonadores no eléctricos se encuentran cordones detonantes, espoletas, mechas y tubos de choque. Los sistemas electrónicos emplean microchips para gestionar los retardos, utilizando una cápsula detonante, un microchip, un condensador y una carga primaria. Los detonadores eléctricos y no eléctricos del tipo tubo de choque presentan diversas opciones de retardos organizadas en series MS (milisegundos) y LP (largo período). La serie MS abarca retardos desde 0 ms hasta 500 ms, con intervalos de 25 ms. En cuanto a la serie LP, consta de alrededor de 20 retardos con tiempos variables entre 200 y 400 ms. Los detonadores electrónicos programables ofrecen flexibilidad con retardos ajustables desde 0 ms hasta 20000 ms, con una dispersión de 1 ms o 0,1%. A pesar de su flexibilidad, estos sistemas presentan inconvenientes, como altos costos, tasas de fallas elevadas y complejidad, siendo más adecuados para voladuras de gran escala con diámetros de perforación más extensos. (Paul & Lusk, 2011).

2.2.5 Diseño de voladura

(FAMESA, 2019) De acuerdo con el cálculo y diseño de las voladuras, las variables de diseño controlables se clasifican en: Geométricas (diámetro, longitud de taladro, burden, espaciamiento, taco, entre otras), Físicas-químicas del explosivo (tipos de explosivo, potencia, energía, sistemas de cebado, etc), Tiempos (tiempos de retardo y secuencia de iniciación)

Figura 2

Diseño de voladura



Fuente: Libro Manual de perforación y voladura (FAMESA, 2019)

2.2.5.1. Diseño geométrico de voladura

2.2.5.1.1. Diámetro de taladro

La selección del diámetro de perforación en el diseño de voladuras es un aspecto crítico que afecta diversos elementos del proceso. Según (FAMESA, 2019) la decisión del diámetro apropiado se basa en variables como:

- Propiedades del macizo rocoso.
- Grado de fragmentación a obtener
- Altura del banco.
- Diseño de las cargas.
- Las dimensiones del equipo.
- Económica del proceso de perforación y voladura.

Optar por un diámetro pequeño implica costos elevados en perforación, cebado e iniciación, así como un mayor tiempo y mano de obra en operaciones como carga, taco y conexión. Por otro lado, aumentar el diámetro conlleva ventajas como una mayor velocidad de detonación, reducción de los costos totales, mecanización en la carga de explosivos y un mejor rendimiento en la perforación y la excavación. No obstante, es esencial equilibrar el aumento del diámetro con la necesidad de mantener una fragmentación constante. Si se aumenta el diámetro mientras se busca conservar la fragmentación, puede ser necesario aumentar el consumo específico de explosivos, ya que las cargas estarán menos

uniformemente distribuidas en el interior del macizo rocoso. Además, el incremento en el diámetro también implica una mayor longitud de taco, lo que puede generar problemas potenciales como la formación de bloques en la parte alta del taladro. En operaciones de voladuras a tajo abierto, los diámetros abarcan un amplio rango, desde 50 mm hasta 380 mm, La elección del diámetro de perforación debe ser cuidadosa y considerar estos factores para lograr una voladura eficiente, segura y económicamente viable.

2.2.5.1.2. **Altura de banco**

La eficiencia de las voladuras depende en gran medida de la rigidez del bloque rocoso frente a los taladros, siendo clave la relación entre la altura del banco (H) y la longitud de base (L). Esta proporción influye directamente en el desplazamiento y la deformación del macizo rocoso, especialmente en el centro del banco.

Cuando $H/L = 1$, se produce una fragmentación gruesa, con efectos no deseados como sobre excavación y formación de “toe” (material sin volar en la base). Estos efectos se reducen cuando $H/L = 2$ y desaparecen completamente al alcanzar una proporción $H/L \geq 3$, considerada óptima según (Ash, 1997).

Tabla 2

Relación de rigidez

Relación de rigidez	1	2	3	4
Fragmentación	Pobre	Regular	Buena	Excelente
Sobrepresión de aire	Severa	Regular	Buena	Excelente
Roca en vuelo	Severa	Regular	Buena	Excelente
Vibración del terreno	Severa	Regular	Buena	Excelente
Comentarios	Rompimiento trasero severo y problemas de piso. No se dispara vuelva a diseñar	Rediseñe si es posible	Buen control y fragmentación	No hay mayores beneficios con el incremento de la relación de rigidez arriba de 4.

Fuente: Diseño de voladura (Ash, 1997)

2.2.5.1.3. **Burden**

Según (Valdir, 2019) el burden se define como la distancia entre dos líneas consecutivas de taladros o entre la cara libre del banco y la primera fila de perforaciones. Un burden demasiado

reducido puede provocar el lanzamiento de fragmentos hacia la cara libre, exceso de ruido, altos niveles de onda aérea y una fragmentación excesivamente fina.

Por el contrario, un burden demasiado amplio puede causar ultra lanzamiento del material, aumento de las vibraciones y de la onda aérea, mala fragmentación del macizo rocoso y acumulación de material no fragmentado ("toe") en la base del banco. Además, burdens excesivos generan un confinamiento elevado en los taladros, lo que incrementa significativamente las vibraciones por cada kilogramo de explosivo utilizado.

2.2.5.1.4. Espaciamiento

Según (Valdir, 2019) la distancia entre taladros sucesivos de la misma línea es conocida como espaciamiento, que complementa que espaciamientos muy pequeños pueden generar exceso de fragmentación entre taladros y bloques más grandes delante de la línea de taladros, por otro lado, espaciado más grande que el ideal puede generar menor fragmentación entre taladros y un frente remanente muy irregular. Aclara que las mallas pueden ser de tipo cuadrado, rectangular o estancadas. Las mallas cuadradas y rectangulares son de fácil perforación, las estancadas son de más difícil perforación, pero distribuyen el explosivo de forma más homogénea por el macizo rocoso. Las mallas triángulo equilátero tienen la relación $E/B = 1,15$, son preferibles para rocas duras y compactas, aumentando la fragmentación del macizo rocoso. Por último, las mallas alargadas tienen una alta relación E/B (superior a 1,75) y son más adecuado para rocas friables y suaves, consiguiendo la desventaja por el corto separación que puede aumentar la posibilidad de lanzamiento de material rocoso.

2.2.5.1.5. Longitud de taladro

La longitud del taladro es un elemento clave en el diseño de la voladura, ya que influyedirectamente en la selección del diámetro y el burden. Según Valdir (2019), esta se compone de la altura del banco más una sobre perforación adicional que permite una adecuada fragmentación del material. Dicha sobre perforación, que debe ser al menos de 0.3 veces al valor del burden, evita la formación de resaltos en la base (toes), los cuales dificultan las labores de limpieza y requieren operaciones secundarias de voladura.

$$L = H + 0.3B$$

donde:

H: altura del banco

B: Burden

2.2.5.1.6. Taco

El taco corresponde a la parte superior del taladro que se rellena con material inerte, cuya función principal es confinar los gases generados durante la voladura, favoreciendo así una adecuada fragmentación de la roca. Una longitud de taco insuficiente puede provocar la liberación prematura de gases, lo que conlleva riesgos como ondas aéreas y proyecciones peligrosas. Por el contrario, un taco excesivo puede originar acumulación de bloques en la parte alta del banco, escaso esponjamiento del material y mayores niveles de vibración. Según López (1987), al determinar la longitud del taco se deben considerar el tipo y tamaño del material utilizado, así como la longitud de la columna. Aunque comúnmente se emplea el detrito de perforación por su disponibilidad, se ha comprobado que materiales granulares angulosos, provenientes del chancado, ofrecen mejor resistencia a la eyección. El tamaño óptimo de las partículas oscila entre $1/17 D$ y $1/25 D$. En la práctica, la longitud del taco debe aumentar cuando disminuye la competencia o calidad de la roca, variando entre $20D$ y $60D$. Siempre que sea posible, se recomienda mantener una longitud superior a $25D$ para minimizar los efectos negativos como ondas aéreas, proyecciones, cortes irregulares y sobre excavaciones. Se pueden considerar los siguientes criterios

Tabla 3

Relación de tipo de roca

TIPO DE ROCA	VOLADURA NORMAL(D)	VOLADURA CONTROLADA (D)	MATERIAL DE TACO
Dura	20	30	Árido triturado
Semidura	30	40	Detritus de perforación
Media (meteorizada)	25	35	Áridos triturados detritus de perforación
Blanda	15	25	Detritus de perforación

Fuente: Manual de perforación y voladura (Lopez, 1987)

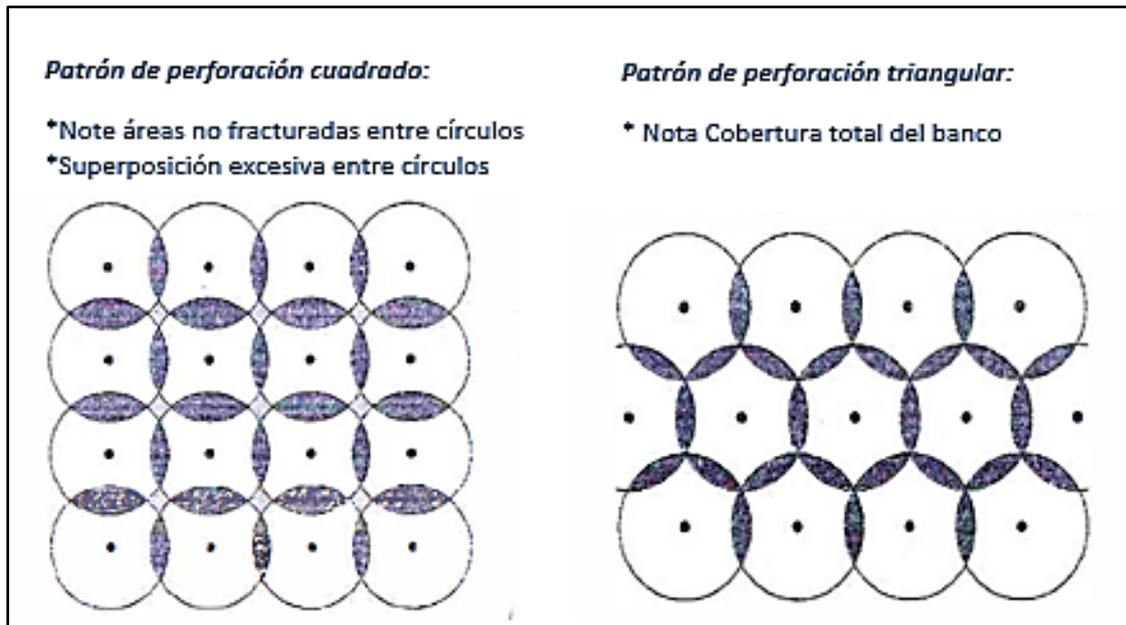
2.2.5.1.7. Esquemas de perforación

Para las voladuras en banco, los esquemas de perforación más comúnmente utilizados son los cuadrangulares (cuadrados o rectangulares), ya que facilitan el replanteo de los puntos de emboquille. Sin embargo, existen configuraciones más eficientes, como los esquemas "a tres bolillos", dentro de los cuales destaca el formado por triángulos equiláteros. Este último ofrece una distribución más uniforme de la energía del explosivo en la roca, lo que se traduce en una fragmentación más eficaz. Además, proporciona mayor flexibilidad para el diseño de

la secuencia de encendido y la dirección de salida de la voladura (FAMESA, 2019) .La correcta

Figura 3

Efecto de tipo de esquema sobre la fragmentación en una voladura



elección del patrón de perforación permite reducir zonas sin fracturar dentro del radio de influencia del explosivo, optimizando así el resultado general de la voladura.

Fuente: Manual de perforación y voladura (FAMESA, 2019)

2.2.5.2. Diseño de carguío

2.2.5.2.1. Tipo de explosivo

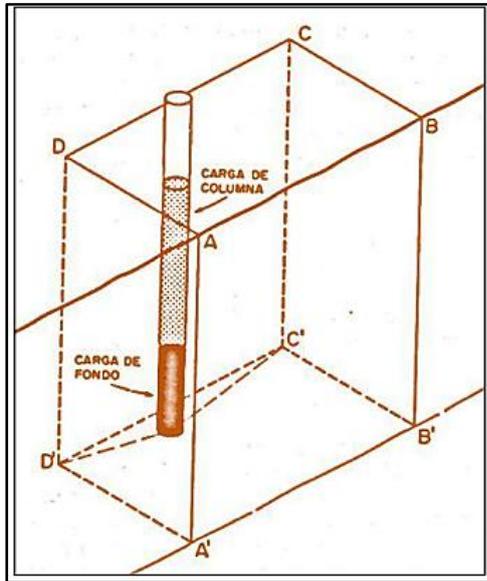
La elección adecuada del explosivo en una operación de voladura debe considerar cuidadosamente tanto las propiedades geomecánicas de la roca como las características técnicas de los explosivos disponibles en el mercado. Esta selección permite determinar si se requiere un explosivo con mayor o menor potencia, velocidad de detonación o densidad, con el objetivo de lograr una fragmentación eficiente y controlada del material.

2.2.5.2.2. Distribución de explosivos en los taladros

Las voladuras en banco, la distribución de la energía del explosivo no es uniforme a lo largo de toda la altura del banco. De hecho, para lograr la fractura de la roca, la energía generada debe ser suficiente para superar la resistencia a la tracción en la sección C'D'D'C' y la resistencia al corte o cizallamiento en la sección A'B'C'D', definido según (Lopez, 1987)., como se ilustra en la imagen correspondiente.

Figura 4

Distribución de cargas



Fuente: Manual de perforación y voladura (Lopez, 1987)

Dado que la resistencia al corte es mayor que la resistencia a tracción, es necesario aplicar una distribución selectiva de la carga explosiva. Para ello, la energía en el fondo del taladro debe ser entre 2 y 2.5 veces superior a la de la columna. Para esto es necesario utilizar utilizando explosivos de alta densidad y gran potencia en la base, como emulsiones o explosivos gelatinosos, y explosivos de menor densidad y potencia media en la columna, como el ANFO o emulsiones livianas.

Carga de fondo: La carga de fondo es aquella porción del explosivo que se coloca en la parte más baja del taladro, caracterizada por su alta densidad y potencia, necesaria para fracturar la zona más confinada de la roca y asegurar una adecuada rotura hasta el nivel del piso. Según López (1987), esta carga debe tener una longitud mínima equivalente al 60% del burden ($0,6 B$), de modo que su centro de gravedad se ubique al mismo nivel o ligeramente por encima del fondo del banco. Por su parte, Langefors señala que extender esta carga más allá del valor del burden no genera beneficios significativos en la rotura a nivel del pie del banco, por lo cual se recomienda mantenerla entre $0,6$ y $1,3 B$. En la práctica, una opción eficiente consiste en emplear ANFO aluminizado, hidrogeles o emulsiones con longitudes que oscilan entre 8 y 16 diámetros de taladro (D). Estos explosivos, aunque presentan consumos específicos más altos, permiten una mejor fragmentación, desplazamiento y esponjamiento del material, reduciendo problemas de repiés y contribuyendo a optimizar los costos globales de operación, que incluyen perforación, voladura, carga, transporte y chancado.

Carga de columna: Se ubica sobre la carga de fondo y puede ser de menos densidad, potencia o concentración ya que el confinamiento de la roca en este sector del taladro es

menor. La altura de la carga de columna se calcula por la diferencia entre la longitud del taladro y la suma la carga de fondo más el taco; Donde: CC: Carga de columna(m); B: Burden (m).

$$CC = 2.3xB$$

2.2.5.2.3. Factor de carga y potencia

De acuerdo con López (1987), la cantidad de explosivo requerida para una voladura puede expresarse como el volumen de roca a fragmentar por metro cúbico (factor de carga) o por tonelada (factor de potencia). Este factor tiende a incrementarse cuando se utilizan taladros de mayor diámetro, cuando la roca presenta alta resistencia, o cuando se exige un mayor nivel de fragmentación, desplazamiento y esponjamiento. También puede aumentar debido a una distribución inadecuada de la carga o por tiempos de retardo poco efectivos entre las detonaciones.

Aunque un mayor factor de carga implica un mayor consumo de explosivos, también puede mejorar notablemente la fragmentación del material, facilitar su desplazamiento y esponjamiento, y reducir la formación de repiés (toes). Esto, a su vez, contribuye a optimizar los costos globales del proceso, que incluyen la perforación, voladura, carga, transporte y trituración. En la tabla siguiente se presentan valores típicos del factor de carga utilizados en diferentes tipos de roca durante voladuras en bancos de minería a cielo abierto.

Tabla 4

Relación de tipo de roca/Factor de carga

TIPO DE ROCA	FACTOR DE CARGA (kg/m ³)
Rocas masivas y resistentes	0,6 – 1,5
Rocas de resistencia media	0.3 – 0,6
Rocas muy fracturadas, alteradas o blandas	0.1 – 0.3

Fuente: Manual de perforación y voladura (Lopez, 1987)

2.2.5.3. Diseño de secuencia

La planificación de los intervalos de retardo entre taladros y la secuencia de detonación es fundamental en el diseño de voladuras, ya que permite minimizar las cargas dinámicas transmitidas al terreno y, con ello, disminuir los niveles de vibración. Esta estrategia no solo optimiza los procesos de fractura de la roca, sino que también facilita un mayor control sobre

el movimiento del material, evita la sobreexcavación, reduce la formación de repiés (toes) y limita las proyecciones indeseadas (FAMESA, 2019).

2.2.5.4. Mecanismo de fragmentación

Según López (1987), la detonación de un explosivo dentro de la roca involucra dos fases principales en el proceso de liberación de energía.

- En la primera, se genera una fuerte onda de choque, producto de la liberación súbita de energía en un tiempo extremadamente corto. Esta onda inicial se relaciona con los esfuerzos de tensión aplicados sobre la roca.
- En la segunda fase, los gases que se forman en la zona de reacción alcanzan elevadas presiones y temperaturas, transmitiendo la energía termodinámica, también conocida como energía de burbuja.

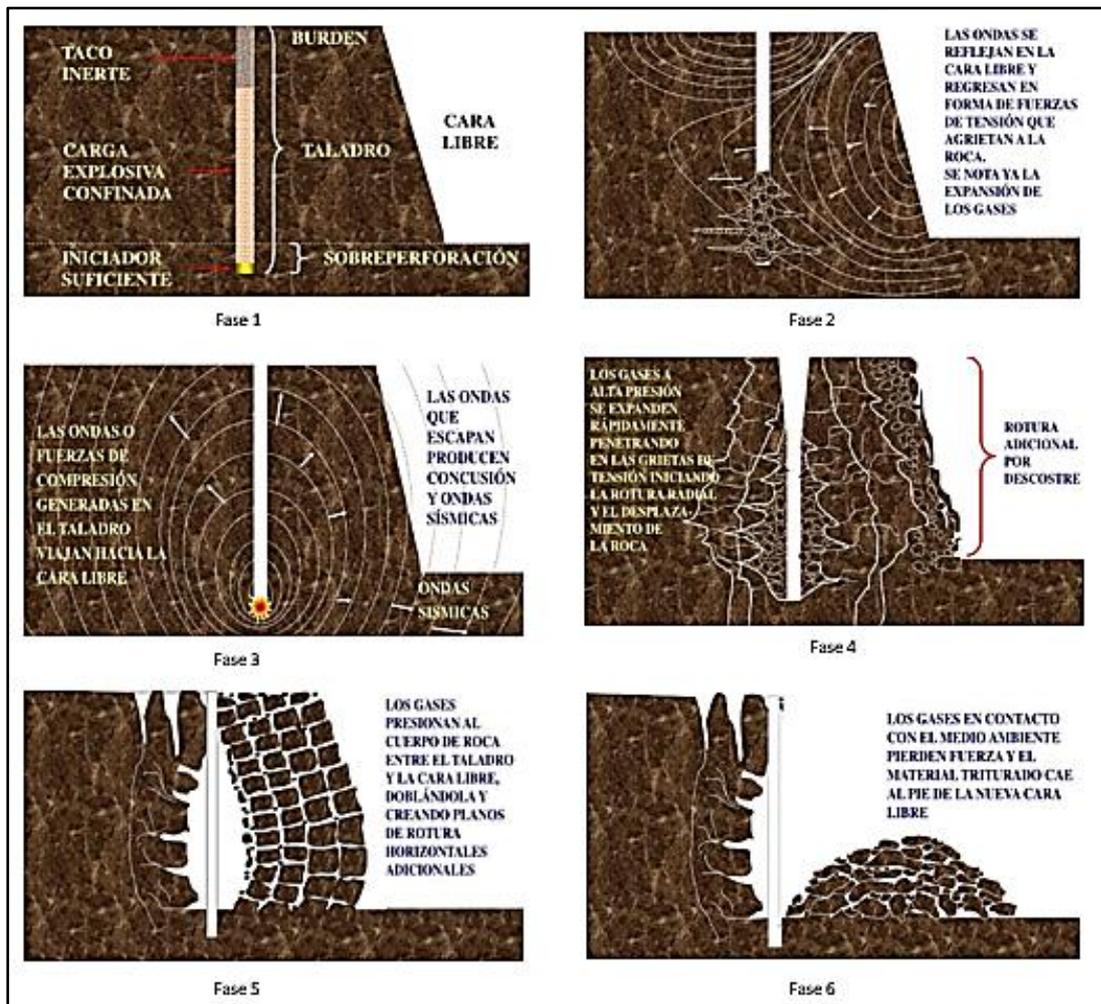
Al detonar un explosivo confinado en un taladro, se produce una onda de detonación que se propaga a través del macizo rocoso ejerciendo una fuerte compresión. Esta onda inicial viaja a velocidades entre 3.000 y 5.000 m/s, generando tensiones tangenciales que favorecen la aparición de grietas radiales en la roca circundante. Estas grietas actúan como zonas de debilidad (en un radio aproximado de 2 a 4 veces el diámetro del taladro), que facilitan posteriormente la fragmentación. Aproximadamente un 30% de la energía de la onda de choque se consume en este proceso de fractura inicial. Al llegar a una cara libre, la onda de compresión se refleja como una onda de tracción, la cual vuelve a ingresar al macizo. Dado que la resistencia de la roca a la tracción es considerablemente menor que a la compresión (alrededor de una décima parte), esta onda reflejada produce nuevas fisuras. Sin embargo, este mecanismo representa solo entre el 5% y el 15% de la energía total liberada, y por sí solo no es suficiente para causar una fragmentación completa.

Las grietas generadas se amplían posteriormente debido a la expansión de los gases y a los esfuerzos de tracción provocados por la compresión radial. Una vez que la masa de roca situada entre los taladros y la cara libre colapsa, se libera de forma violenta la energía acumulada en el sistema, lo que induce esfuerzos adicionales de tracción que completan el proceso de fractura del macizo.

(Lopez, 1987). identifica al menos ocho mecanismos principales involucrados en la fragmentación de roca mediante explosivos: trituración localizada, formación de grietas radiales, reflexión de la onda de choque, extensión y apertura de dichas grietas, fracturación por alivio de carga, cizallamiento, rotura por flexión y colisión entre fragmentos.

Figura 5

Mecanismo de fractura



Fuente: Manual de perforación y voladura (Lopez, 1987)

2.2.6 Vibraciones generadas por las voladuras

Las vibraciones producidas durante una voladura corresponden a la transmisión de energía en forma de ondas mecánicas a través de un medio sólido. Este fenómeno involucra una fuente emisora de vibraciones y un receptor que las percibe, desarrollándose como un movimiento ondulatorio. En el caso de una detonación dentro de un barreno, la explosión de un explosivo confinado genera de manera instantánea un volumen significativo de gases sometidos a altas presiones y temperaturas. Esta liberación súbita actúa como un impacto sobre las paredes del taladro, propagándose como una onda de deformación en la roca circundante.

La geometría de la carga influye directamente en la forma de propagación de esta onda. Por ejemplo, una carga cilíndrica produce una onda de deformación cilíndrica, mientras que una carga puntual o de forma esférica genera una onda esférica. Cuando la distancia desde el barreno es considerable en comparación con su longitud, la explosión puede considerarse como puntual, y por tanto, la onda generada se comporta como esférica.

La magnitud de la tensión inducida en el medio disminuye a medida que aumenta la distancia desde el punto de detonación. En distancias cortas entre barrenos, la propagación de las vibraciones se realiza casi de forma completamente elástica, mediante ondas esencialmente elásticas, con una pérdida mínima de energía (Jose, Jorge, & Juan, 2013)

2.2.6.1. Tipos de ondas

Las vibraciones generadas por las voladuras se propagan a través de los materiales como ondas sísmicas, dividiéndose en dos grupos distintos: según (Lopez, 1987).

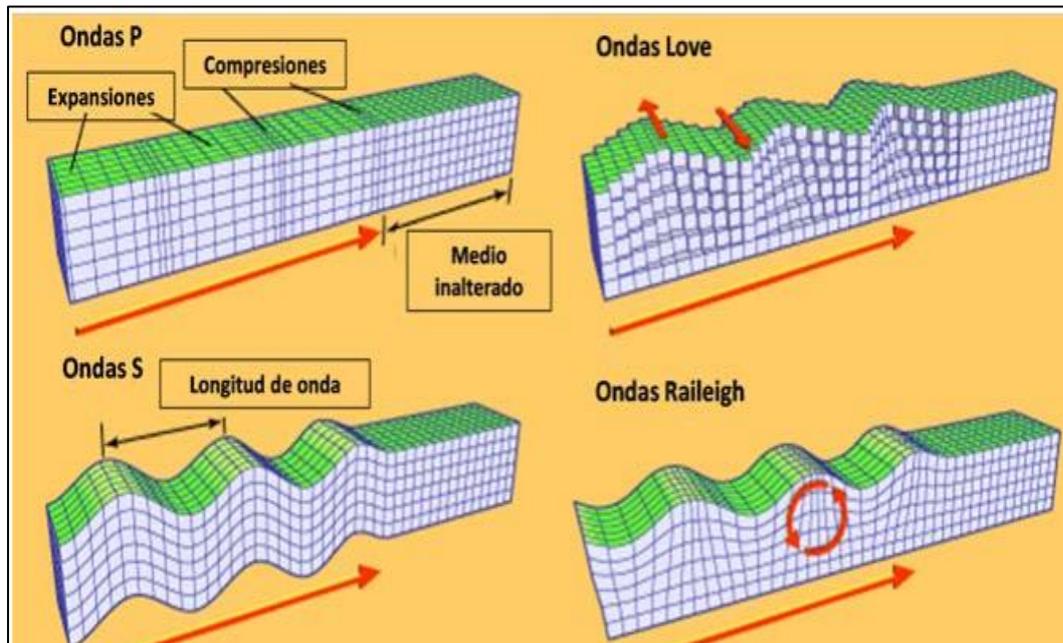
Las ondas generadas durante una voladura pueden clasificarse en internas y superficiales, según el medio por el que se propagan. Las ondas internas se desplazan dentro del macizo rocoso y se dividen en dos tipos principales: las ondas longitudinales (P), que provocan movimientos de las partículas en la misma dirección en la que viaja la onda, y las ondas transversales (S), que inducen desplazamientos perpendiculares a la trayectoria de propagación.

Por otro lado, las ondas superficiales se desplazan únicamente por la superficie del terreno. Este tipo de ondas incluye las Rayleigh (R) y las Love (L). Las ondas Rayleigh se propagan en un plano vertical y horizontal (ZX), generando movimientos elípticos que combinan efectos de compresión, expansión y corte, y su velocidad corresponde aproximadamente al 90% de la velocidad de las ondas S. En cambio, las ondas Love se mueven en el plano horizontal (XY), también con oscilaciones elípticas, y presentan una velocidad comparable a la de las ondas Rayleigh.

Cabe destacar que las ondas Love solo se presentan en medios donde existe una capa superficial en contacto con el aire, superpuesta a otra capa en la que la velocidad de propagación de las ondas S es mayor. Este tipo de ondas también puede generarse cuando la velocidad de las ondas transversales aumenta con la profundidad en materiales estratificados.

Figura 6

Tipo de onda



Fuente: Perforación y voladura de rocas en minería (Jose, Jorge, & Juan, 2013)

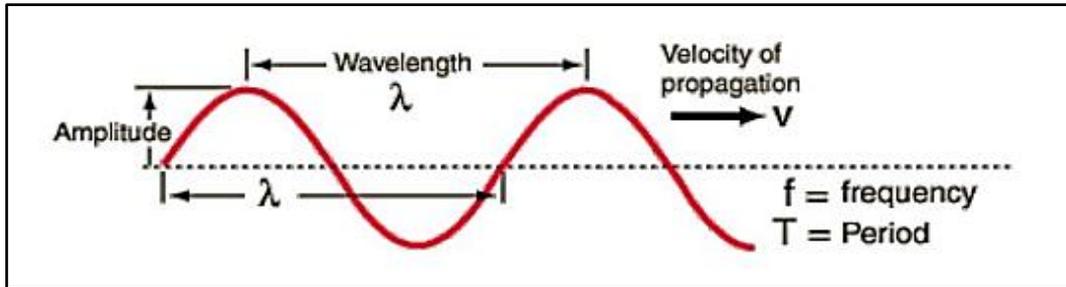
2.2.6.2. Parámetros de ondas

De acuerdo con (Lopez, 1987), las propiedades fundamentales que definen la propagación de ondas sísmicas son las siguientes:

- Frecuencia: Corresponde al número de ciclos de compresión y expansión que se producen en un segundo.
- Amplitud: Representa el valor máximo de presión alcanzado en el medio, y está vinculado con el desplazamiento que experimentan las partículas debido a la acción de la onda.
- Duración: Se refiere al tiempo total durante el cual un determinado punto del medio permanece sometido a vibraciones.
- Longitud de onda: Es la distancia que recorre una onda durante un ciclo completo de compresión y dilatación.
- Velocidad de propagación: Indica la rapidez con la que la onda avanza a través del medio, y no debe confundirse con la velocidad individual de movimiento de las partículas del entorno.

Figura 7

Propiedades de la onda



Fuente: Perforación y voladura de rocas en minería (Jose, Jorge, & Juan, 2013)

2.2.7 Daño inducido por las vibraciones

2.2.7.1. Modelos de vibraciones

En la actualidad, la velocidad pico de partícula (PPV) se utiliza como uno de los principales parámetros para evaluar el posible daño que pueden causar las vibraciones sísmicas generadas por voladuras. Para anticipar el comportamiento de esta variable bajo determinadas condiciones de detonación, se han desarrollado diversos modelos predictivos. Dependiendo de la ubicación de los sensores de medición y del efecto de la explosión sobre los taludes, pueden aplicarse dos enfoques distintos para estimar el daño inducido por las vibraciones.

Figura 8

Esquema de daño inducido por la voladura



Fuente: Estudio de vibraciones inducidas por la tronadura de rocas (Isidora, 2018)

2.2.7.2. Influencia de las vibraciones en campo lejano

En zonas alejadas del punto de detonación, conocidas como campo lejano, la propagación de las vibraciones se ve significativamente influenciada por las propiedades del macizo rocoso, especialmente por su grado de fracturamiento. En materiales alterados o suelos muy fracturados, las ondas sísmicas tienden a atenuarse rápidamente, lo que complica su análisis y predicción.

- Los modelos tradicionales utilizados para estimar los efectos de las vibraciones presentan importantes limitaciones. Por ejemplo, aunque la cantidad de explosivo detonado por intervalo puede indicar la magnitud de la voladura, no proporciona información sobre cómo está distribuido el explosivo dentro del macizo, un factor que influye directamente en la forma y amplitud de las ondas generadas. Asimismo, los modelos empíricos suelen centrarse únicamente en estimar la velocidad pico de partícula (PPV), sin tener en cuenta la forma completa de la señal, la cual puede ser determinante según el tipo de daño que se desea prevenir.
- Otro aspecto relevante es que estos modelos requieren ajustes constantes, ya que cualquier cambio en la configuración de la voladura o en las condiciones geológicas implica la necesidad de recalibrar las constantes empíricas utilizadas.

Además de su función principal es fragmentar y desplazar la roca, las detonaciones generan ondas sísmicas que pueden afectar tanto al macizo como a infraestructuras cercanas. Cuando la frecuencia dominante de estas ondas coincide con la frecuencia natural de una estructura, se puede producir un fenómeno de amplificación, incrementando el riesgo de daño estructural. Por tanto, el uso de modelos más precisos y adaptativos se vuelve fundamental para evaluar con mayor exactitud los impactos de las voladuras en el entorno. (Isidora, 2018)

2.2.7.2.1. Modelo de campo lejano

Modelo Devine: El modelo propuesto por Devine simplifica la voladura asumiéndola como una fuente puntual de energía, es decir, como si el registro sísmico proviniera de una carga concentrada en un solo punto. Este enfoque considera que el explosivo está completamente acoplado al medio rocoso, y no incorpora en su análisis aspectos importantes como la secuencia de detonación ni los retardos entre taladros.

$$V = H \left(\frac{D}{W^{0.6}} \right)^{-\beta}$$

Para estimar la **velocidad pico de partícula (PPV)** generada por las vibraciones sísmicas, este modelo emplea las siguientes variables:

- **D**: Distancia entre el punto de medición (sensor) y el área de la voladura, expresada en metros.
- **W**: Masa total de explosivo detonada por intervalo o retardo, en kilogramos.
- **H y β** : Constantes adimensionales que reflejan propiedades geomecánicas del macizo rocoso, determinadas a partir de ensayos realizados en campo.

2.2.7.2.2. Modelo de campo cercano

Modelo de Holmberg y Persson: Según Holmberg y Persson (1977), las ondas sísmicas generadas por una voladura se propagan a través del macizo rocoso con una trayectoria elíptica, disminuyendo su intensidad a medida que se alejan de la fuente. El daño que se produce alrededor del barreno cargado es consecuencia de la ruptura del medio elástico y homogéneo por donde se transmiten dichas ondas.

Este modelo considera la carga explosiva como una columna compuesta por una serie de elementos cilíndricos infinitesimales, cada uno con una longitud diferencial **dx** y una carga lineal **q**, que representa el peso de explosivo por unidad de longitud. A partir de esta distribución, se determina el peso total del explosivo en función del tramo analizado.

$$W = q \cdot dx$$

De acuerdo con Holmberg y Persson, la **velocidad pico de partícula** puede determinarse en función de la geometría de la carga explosiva y de la expresión general obteniendo la velocidad de peak, describe el comportamiento de las partículas durante la propagación de la onda sísmica.

$$v = K [(q/R_0) + [\tan^{-1} Z/ R_0 + \tan^{-1} Z-h/R_0]]$$

Donde:

v = velocidad peak de partícula.

K, α, β = Constantes empíricas determinadas por monitoreo en campo lejano

q = Densidad lineal de carga [kg/m].

h = Largo total de la carga en el pozo [m].

x = Posición de carga elemental medido desde el fondo del pozo [m].

R_0 = Distancia de medición desde la carga [m]

2.2.8 Equipos de medida de las vibraciones

La medición de las vibraciones generadas por voladuras en el macizo rocoso requiere de un sistema compuesto por varios elementos (Jose, Jorge, & Juan, 2013)

Entre ellos se encuentran los **sensores sísmicos**, como geófonos o acelerómetros, que se colocan directamente en el terreno. Estos dispositivos están conectados mediante **cables** que transmiten las señales hacia un **sismógrafo**, el cual se encarga de amplificar, registrar y almacenar la información. Finalmente, los datos recolectados son procesados mediante un **software especializado** instalado en un computador, permitiendo su análisis e interpretación

Figura 9

Sismógrafo tipo Gaya



Fuente: DNA Blast

2.2.9 Control de vibraciones

Un aspecto clave en la evaluación y mejora de las operaciones de voladura es la capacidad de predecir los niveles de vibración, específicamente la velocidad de partícula, en ubicaciones determinadas a partir del diseño de voladura. Para este propósito, es común emplear modelos empíricos basados en datos obtenidos directamente en terreno, los cuales permiten formular ecuaciones generales que relacionan la velocidad de partícula con la cantidad de explosivo utilizado y la distancia al punto de interés.

Además de cumplir su función principal fragmentar y desplazar la roca, la voladura libera energía en forma de ondas sísmicas que pueden generar daños significativos, incluso a gran distancia. Estas ondas pueden afectar estructuras geológicas, infraestructura crítica e incluso edificaciones cercanas, especialmente cuando se presentan con altas amplitudes y frecuencias dominantes bajas, lo que incrementa los desplazamientos y el potencial de daño

en el macizo rocoso. Para lograr un control efectivo de estos efectos, es fundamental tener en cuenta múltiples factores asociados al diseño y ejecución de la voladura. (Ollero, 2021).

- Función cíclica de las vibraciones
- Características básicas de las ondas
- Propiedades físico - mecánicas de las rocas
- Mezcla explosiva
- Características geológicas y geotécnicas.

2.2.10 Normal internacionales

Cada país cuenta con **regulaciones específicas** para el control de vibraciones generadas por voladuras, adaptadas a sus condiciones locales y características socio estructurales. A pesar de sus diferencias, estas normas comparten criterios comunes, como la **clasificación de distintos tipos de estructuras**, la **variación de los límites permisibles de velocidad de vibración según la frecuencia**, y el uso de **análisis espectral (FFT)** para determinar la frecuencia dominante de las ondas. En general, los estudios de registro y control de vibraciones se desarrollan con el objetivo de **prevenir posibles daños** en edificaciones o infraestructuras cercanas, en cumplimiento con la normativa vigente.

Tabla 5

Normativa internacional en el manejo de voladuras

País de procedencia	Nombre de reglamentación	Fecha de expedición
Alemania ^a	DIN 4150	1975
Brasil	ABNT NBR9653	2018
Escocia	USBM R18507	2000
EE. UU. - Federal	OSM 817.67	1980
EE. UU. - Federal	UNE 22-381-93	1983
España	Recomendaciones GFEE	1993
Francia	ISO 4866	2001
Internacional	UNI 9916	1990
Italia	NZS 4403	1991
Nueva Zelanda	NP2074	1976
Portugal	BSI 6472	1983
Reino Unido	BSI 7385	1992
Reino Unido	ss 460 48 46	1993
Sueca	SN 640 312 ^a	1991
Suiza		1992

Fuente: Normativa de vibraciones República Federal de Brasil

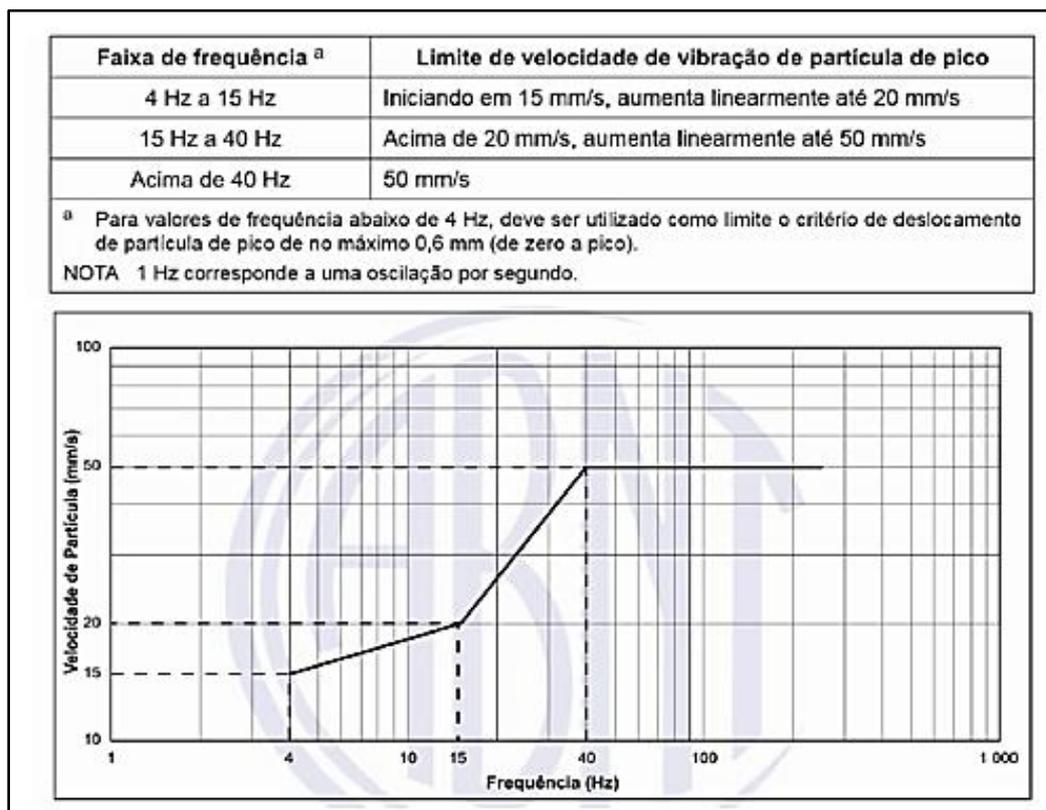
2.2.11 Brasil - Norma ABNT-NBR 9653

La norma ABNT NBR 9653 "Guía para evaluar los efectos provocados por el uso de explosivos en las minas y en áreas urbanas" especifica la metodología para disminuir las amenazas características a las detonaciones de rocas con uso de explosivos en las mineras y en el sector de la construcción, estableciendo directrices conciliables con la tecnología actual, destinada a proteger a los residentes próximos a estas empresas, en cuanto a los daños estructurales y medios sugeridos según la respuesta humana.

Con respecto a las vibraciones transmitidas por el terreno, esta norma establece que el riesgo de que se produzcan daños inducidos por las mismas debe evaluarse considerando la magnitud y la frecuencia de la velocidad de partícula. Los límites por encima de los cuales pueden producirse daños varían desde 15 mm/s para una frecuencia de 4 Hz, hasta 50 mm/s para frecuencias mayores de 40 Hz. (ABTN, 2018).

Figura 10

Límite de vibraciones



Fuente: Norma ABNT NBR 9653

2.2.12 Simulación con software IBLAST

Según (Bernard, 2008), la descripción de los efectos de una voladura puede ser dividida de la siguiente manera:

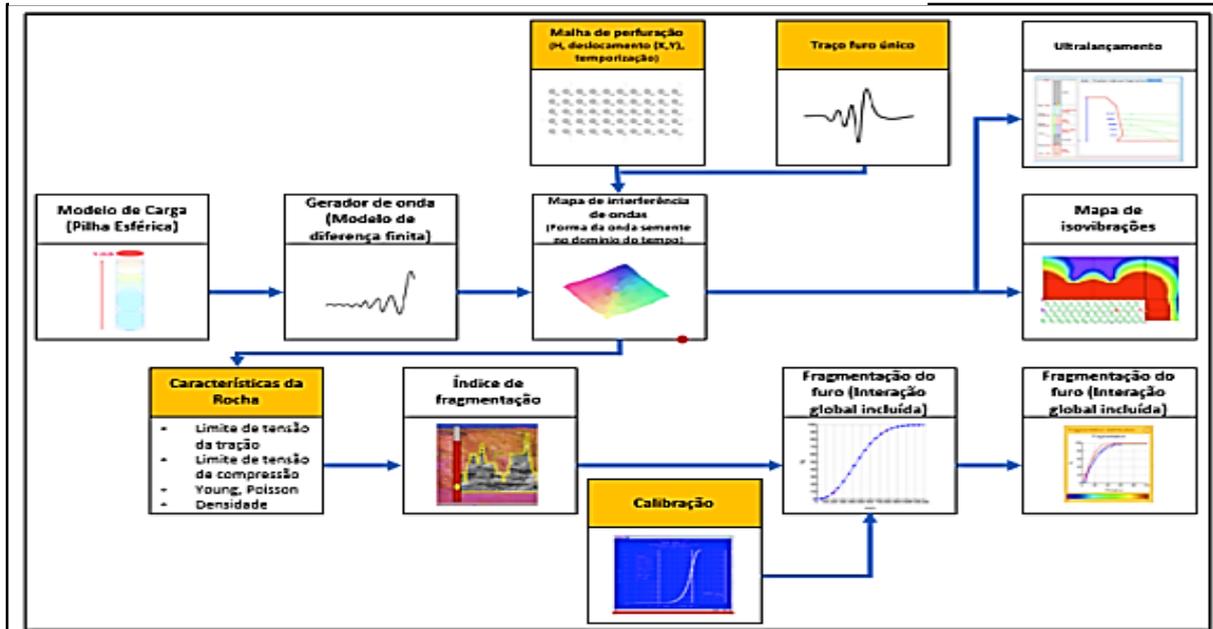
- La carga explosiva se detona y se divide en alta presión y temperatura.
- Los gases se presionan contra el agujero que contiene el explosivo y crea un campo de tensión en la roca.
- Este campo de tensión, debido a su aspecto impulsor, genera onda de tensión que se dispersa en la roca y la daña.
- Este daño es el centro de las grietas en la roca.
- La presión del gas se reduce a través de las fisuras formadas, en consecuencia, separando los fragmentos de roca.
- La presión de los gases aplicada a la cara de los fragmentos produce fuerzas que propulsen los fragmentos.
- Los fragmentos adoptan una trayectoria balística.
- En las áreas donde el daño a la roca no fue suficiente para crear fragmentos, la onda de tensión continúa su trayectoria hasta que la energía se agota, a través de la vibración del macizo rocoso.

DNA-Blast, es un modelo que fue construido alrededor de mecanismos elementales (genes), cada uno describe aspectos del mecanismo general, conectándose entre sí a través de interacciones. La descripción anterior permite modelar los efectos de una detonación a través de los siguientes genes:

- Gen de detonación (que describe la evolución de la presión después de la detonación).
- Gen de propagación de la onda de tensión (resultante de la presión de campo).
- Gen de interferencia de onda (en caso de cargas explosivas múltiples).
- Gen de daño a la roca (debilidades relativas a las características del material de acuerdo con la tensión).
- Gen de agrietamiento según el daño.
- Gen balístico (trayectoria de los fragmentos).

Figura 11

Estructura del modelo DNA-Blast



Fuente: (Bernard, 2008)

2.2.12.1. Simulación de vibración IBLAST

Según (Bernard, 2008), hay muchos métodos utilizados para predecir las vibraciones creadas por una voladura, en un punto dado. Los dos métodos más utilizados son el de carga máxima por espera (distancia escalonada) y el de la forma de onda de la semilla (onda Elemental).

(Bernard, 2008) propone un diseño que puede modelar las vibraciones de una manera confiable con el modelo DNA-Blast, en el área alrededor del desmonte, mientras son considerados todos los parámetros clave (geología, posición de los agujeros, cargas en los agujeros y secuencia de iniciación). A través del principio de la onda Elemental, que dice que la firma sísmica de un desmonte es la suma de todas las firmas sísmicas de todas las cargas del desmonte, ya descrito de forma matemática anteriormente, se tiene que la ecuación: puede ser escrita de la siguiente manera:

$$SG(f) = F(f) \cdot S(f)$$

SG(f) = Es la amplitud de la transformada de Fourier de SG(t).

S(f) = Es la amplitud de la transformada de Fourier de S(t).

F(f) = Representa la función de amplificación.

$$F(f) = \left(\sum_{i=1}^N a_i (\cos 2\pi \Delta_i) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N a_i (\sin 2\pi \Delta_i) \right)^2$$

Llamándose D_0 la distancia de referencia entre la carga por retardo y el punto de monitoreo de la firma sísmica y aplicando la ley clásica de disminución de la amplitud para un solo agujero, se obtienen:

$$V_0 = K \cdot \left(\frac{D_0}{\sqrt{Q}} \right)^\alpha e V_i = \left(\frac{D_i}{\sqrt{Q}} \right)^\alpha$$

Así que se tiene:

$$V_i = \left(\frac{D_i}{D_0} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{\sqrt{Q_0}}{\sqrt{Q_i}} \right)^\alpha \cdot V_0 = a_i \cdot V_0$$

Por tanto:

$$a_i = \left(\frac{D_i}{D_0} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{\sqrt{Q_0}}{\sqrt{Q_i}} \right)^\alpha$$

De las ecuaciones anteriores se desprende que:

Donde:

$$\Delta t_i = \Delta_i + \frac{D_i}{V_p}$$

Δ_i = representa el tiempo de retardo de la secuencia de iniciación.

D_i/V_p = representa el tiempo de retardo de la trayectoria de la onda sísmica entre la carga y el punto de control.

(Bernard, 2008) también informa que al asumir que la frecuencia dominante de la firma sísmica de una carga es idéntica para todas las cargas, es posible, por lo tanto, calcular el factor de amplificación sísmica en cualquier punto alrededor de voladura cabe señalar que:

- El factor de amplificación tiene en cuenta la posición de los orificios, la secuencia de iniciación y la carga en cada agujero.
- El factor de amplificación depende exclusivamente del tiempo de llegada del trazo sísmico, la posición de las cargas y la frecuencia.
- El factor de amplificación será utilizado en el modelo de DNA-Blast con los siguientes objetivos.

- Identificar el nivel de vibración en un punto dado multiplicándolo por espectro de la firma sísmica y realizando la transformación inversa de Fourier.
- Buscar una secuencia de iniciación que conduzca a una reducción del nivel de vibraciones en el área.
- Para modelar y optimizar la fragmentación. Este factor permite la amplitud generada por cada agujero corregido en el modelo de fragmentación de ADN-Blast.

Por último, cabe señalar que el factor de amplificación permite una fácil convolución del rastro sísmico y la obtención de una firma sísmica elemental a partir de la firma sísmica general del desmonte.

2.3. DEFINICIÓN DE TERMINOS

2.3.1 *Diseño de voladura*

El diseño de voladura es un proceso técnico que consiste en planificar de forma precisa el uso de explosivos para lograr una fragmentación eficiente del macizo rocoso, especialmente en operaciones mineras. Este diseño abarca la configuración de los taladros, la selección y dosificación del explosivo, los tiempos de retardo, así como la geometría general de la voladura. Su objetivo principal es optimizar la rotura de la roca, reducir impactos negativos como vibraciones excesivas o sobre excavación, y proteger las estructuras cercanas. Un diseño bien ejecutado no solo mejora el rendimiento operativo, sino que también contribuye a la reducción de costos en todo el proceso extractivo. (FAMESA, 2019).

2.3.2 *Vibraciones*

Las vibraciones son fenómenos asociados a la transmisión de energía a través de un movimiento ondulatorio que se propaga dentro de un medio. Este proceso involucra una fuente emisora, responsable de generar las vibraciones, y un receptor, que las percibe. La propagación se manifiesta como una onda que viaja por el medio, transportando energía desde el punto de origen hasta el entorno afectado. (Jose, Jorge, & Juan, 2013).

2.3.3 *Velocidad pico partícula*

La velocidad pico de partícula (VPP) representa el valor máximo de velocidad alcanzado por las partículas de un material durante la propagación de una onda vibratoria, como las generadas en explosiones controladas. En operaciones mineras y de construcción, este parámetro es fundamental para monitorear y mitigar los efectos de las vibraciones, permitiendo evaluar con precisión el impacto de las voladuras sobre el entorno y las estructuras cercanas. (Valdir, 2019)

2.3.4 Campo lejano

Es la región más alejada del punto de detonación. A medida que te alejas del lugar de la explosión, los efectos de las ondas de vibración disminuyen. En el campo lejano, los niveles de vibración son generalmente menores y tienen menos probabilidad de causar daños significativos. La evaluación del campo lejano es esencial para comprender cómo las vibraciones se propagan a través del terreno y cómo afectan las áreas circundantes. Esto ayuda a implementar medidas de control y mitigación para garantizar que los niveles de vibración estén dentro de límites seguros y cumplan con las regulaciones ambientales y de seguridad.

2.3.5 P80

(McKenzie, 1994) La fragmentación de rocas se evalúa mediante el término P80, que indica que el 80 por ciento del material analizado tiene una fragmentación por debajo del valor específico establecido.

CAPITULO III

MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Pertenece al tipo APLICATIVO, porque aporta conceptos teóricos necesarios que permite solucionar el problema de investigación y controlar las operaciones en la mina do Pico Brasil.

3.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Es de nivel DESCRIPTIVO, CORRELATIVO Y PROSPECTIVO, porque describe datos y características de un fenómeno o situación en una circunstancia temporal, además esta investigación obtiene información independiente o en conjunto sobre los conceptos y variables a las que se destinen.

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

- **Población:** 11 Voladuras de zona Norte – Banco 1400 - Mina Galinheiro – Minas Gerais - Brasil. (N=11)
- **Muestra:** 1 voladura de zona Norte - Banco 1400 - Mina Galinheiro – Minas Gerais – Brasil. (M=1)

3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.4.1 Técnicas

3.4.1.1. Documentário

La revisión de fuentes bibliográficas cumple un papel fundamental al proporcionar soporte teórico confiable para la investigación, además de ofrecer una visión estructurada y contextual de las condiciones reales del proyecto. En este proceso se incluyen aspectos clave como la ubicación de la mina, sus características geológicas a nivel local y regional, las estructuras geotécnicas presentes, así como la normativa sobre vibraciones y los modelos de simulación aplicables.

3.4.1.2. Trabajos de campo

Se define trabajos de campo al transcurso del tiempo en el cual se desarrolla el tratamiento de la investigación, el trabajo de campo realizado incluye las siguientes actividades:

- Acompañamiento del cargamento de taladros con explosivos.
- Acompañamiento en la temporización de la malla de voladura.
- Conferencia de profundidad, taco intermedio y final.

- Instalación de sismógrafos.
- Verificación de registros sismográficos.
- Mapeo con drone para análisis granulométrico.

3.4.2 Instrumentos e equipos

La investigación utiliza instrumentos de recolección como los siguientes.

3.4.2.1. Ficha documental

- Planos de voladura.
- Planos de ubicación de puntos sismográficos.

3.4.2.2. Libreta de campo

- Croquis de cargamento.
- Croquis temporización real.

3.5. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE DATOS

El tratamiento de datos se realizará con la información recopilada de campo, estos serán clasificados, registrados, tabulados, para el caso de vibraciones las lecturas realizadas por los sismógrafos han sido descrito mediante sismogramas, toda nuestra información fue analizada e interpretada por el software IBLAST y programas computacionales como: Microsoft Excel, Word, Paint, AutoCAD.

3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE ANÁLISES DE RESULTADOS

Se realizará el análisis mediante cuadros comparativos de voladuras empleadas con anterioridad y la aplicación del diseño de voladura propuesta que implicará una reducción de vibraciones en las estructuras geotécnicas.

CAPITULO IV

ANÁLISIS DEL DISEÑO DE VOLADURA

4.1. Información general de resultados y análisis de las voladuras ocurridas en la zona norte banco 1400

Con el objetivo de optimizar los parámetros de voladura y mantener las vibraciones dentro de límites aceptables, se han analizado los datos de 11 voladuras realizadas. Entre ellas, la correspondiente al proyecto Zona/Polígono: Mina Galinheiro/POL63_68 excedió el umbral de vibración permitido en la cavidad MP-09, en dirección suroeste (S-W). A partir de esta evaluación, se procederá al diseño de nuevos parámetros de voladura optimizados para futuras operaciones, tomando como referencia los resultados obtenidos en las voladuras anteriores. Para asegurar la efectividad de este diseño, es importante tener en cuenta que:

- Se mantienen en las mismas condiciones geológicas y geotécnicas.
- Se mantiene las mismas propiedades del explosivo.
- Mantienen la misma secuencia de salida.
- Mantienen las mismas geometrías de la voladura (burden, espaciamiento, diámetro, profundidad).

Condiciones Geológicas: En la mina Galinheiro predomina dos tipos de geologías importantes denominadas Itabirito compacto e Itabirito Friable compuestas por Hematita, Magnetita, Goetita, etc. A continuación, se detallará la información geológica necesaria para el diseño y simulación (ver tabla 06), Para nuestro caso de estudio ambos proyectos se encuentran en la zona de Itabirito friable y compacto.

Tabla 6*Propiedades geológicas Mina Galinheiro*

Geología	Itabirito Friable	Itabirito compacto
Densidad (kg/m ³)	2.40	3.15
Velocidad Onda P (m/s)	3200.00	3500.00
Resistencia a la compresión (MPa)	22.00	74.00
Resistencia a la tracción (MPa)	2.20	7.40
Módulo de Young (GPa)	2.60	10.40
Coefficiente de Poisson	0.27	0.23

Fuente: Área de geología Mina VALE

Propiedades del explosivo: En el estudio en el en la mina Galinheiro Zona Norte se utilizaron 3 tipos de explosivos con iniciación electrónica, se detallará las propiedades de dichos explosivos (ver tabla 07).

Tabla 7*Propiedades de los explosivos*

	ANFO	EMULSIÓN	HEAVY ANFO 70/30
Densidad (kg/m ³)	810.00	1100.00	1150.00
Velocidad de detonación ideal (m/s)	3800.00	4100.00	4100.00
Velocidad de detonación real (m/s)	3791.80	4785.90	4250.60
Diámetro Critico (mm)	40.00	80.00	70.00
	Detonadores electrónicos	Detonadores no eléctricos (Buck up)	
Tiempo de retardo (ms)	0 - 14000	500.00	

Fuente: Ficha técnica - ENAEX

4.2. Evaluación del proyecto: Zona/Polígono: Mina Galinheiro/ POL63_68 – N° 375 - DNA

Mediante el reporte Pos Voladura del proyecto N° 375 se llevó a cabo la revisión de los resultados correspondientes al proyecto de la voladura del banco 1400, ubicada en la zona Norte del tajo Galinheiro.

4.2.1 Parámetros de perforación

En el proyecto de voladura N° 375 se ha perforado 539 taladros con diseño de perforación tipo triangular, los parámetros de perforación se muestran a continuación (ver tabla 08).

Tabla 8

Parámetros de perforación

Parámetros	N°375
N° de taladros perforados	539
N° de taladros cargados	383
Burden (m)	4.3
Espaciamiento (m)	5.2
Longitud de taladro (m)	9.00
Diámetro de taladro (pul)	8.00
Sobre perforación (m)	1.00
Altura de banco(m)	8.00

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Parámetros de voladura

En el proyecto de voladura N° 375 se cargaron 383 taladros obteniendo las siguientes cantidades de mineral volado:

- Volumen de mineral total: 101678.10 m³.
- Tonelaje de mineral total: 274137.00 t.

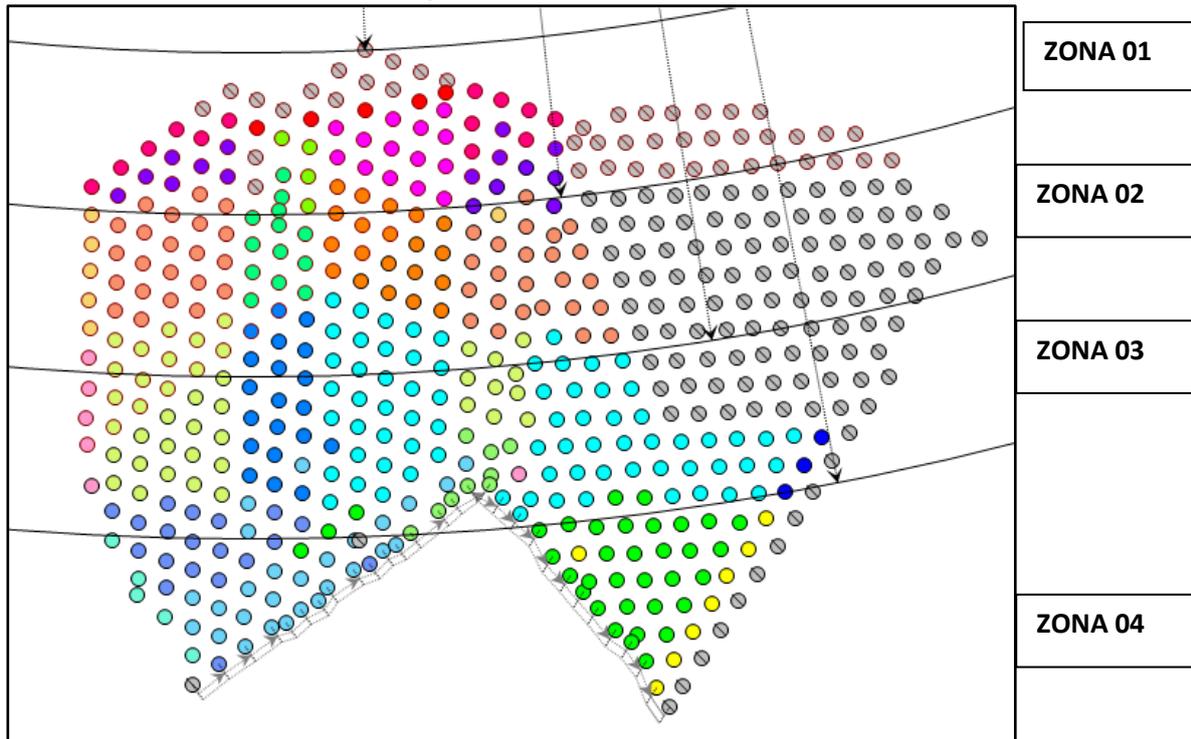
4.2.2.1. Diseño de cargas

En el diseño de cargas correspondiente al proyecto de voladura N.º 375, se llevó a cabo una zonificación del área mediante la segmentación en regiones específicas. Esta segmentación se basó en simulaciones de distancia aplicando la ley de atenuación, con el propósito de minimizar las vibraciones que pudieran afectar las estructuras geotécnicas circundantes.

Los ajustes en la carga se realizaron considerando la longitud efectiva de los taladros y el tipo de explosivo empleado, teniendo en cuenta las condiciones geológicas particulares del terreno. Asimismo, se tomaron medidas para evitar daños en el banco adyacente y reducir el riesgo de retroceso de rotura (back break). A continuación, se presentan los diseños de carga establecidos:

Figura 12

Sectorización de diseños de carga

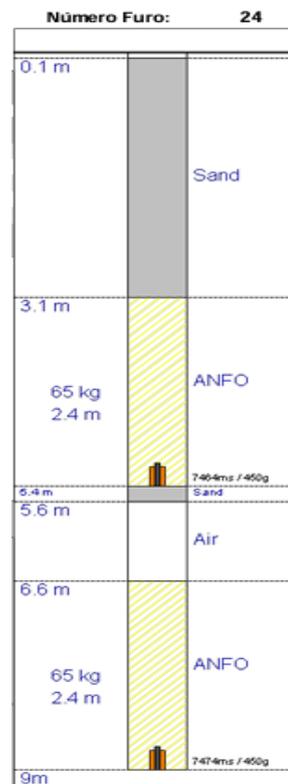
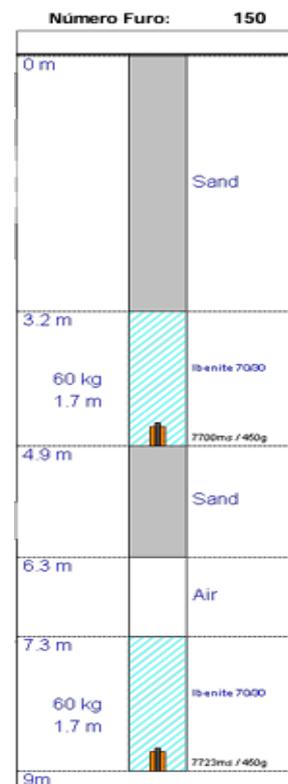
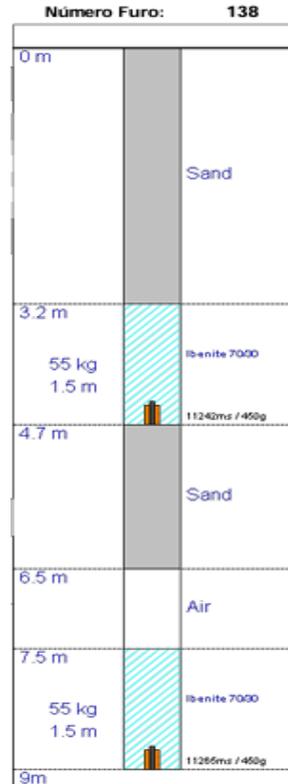
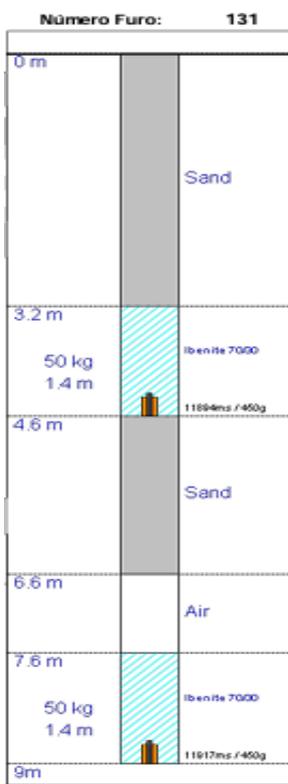


ZONA 01:
HEAVY ANFO 70/30
ANFO
EMULSIÓN
2x50 kg – 9m.

ZONA 02:
HEAVY ANFO 70/30
ANFO
EMULSIÓN
2x55 kg – 9m.

ZONA 03:
HEAVY ANFO 70/30
ANFO
EMULSIÓN
2x60 kg – 9m.

ZONA 04:
Heavy ANFO 70/30
ANFO
2x65 kg – 9m.



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

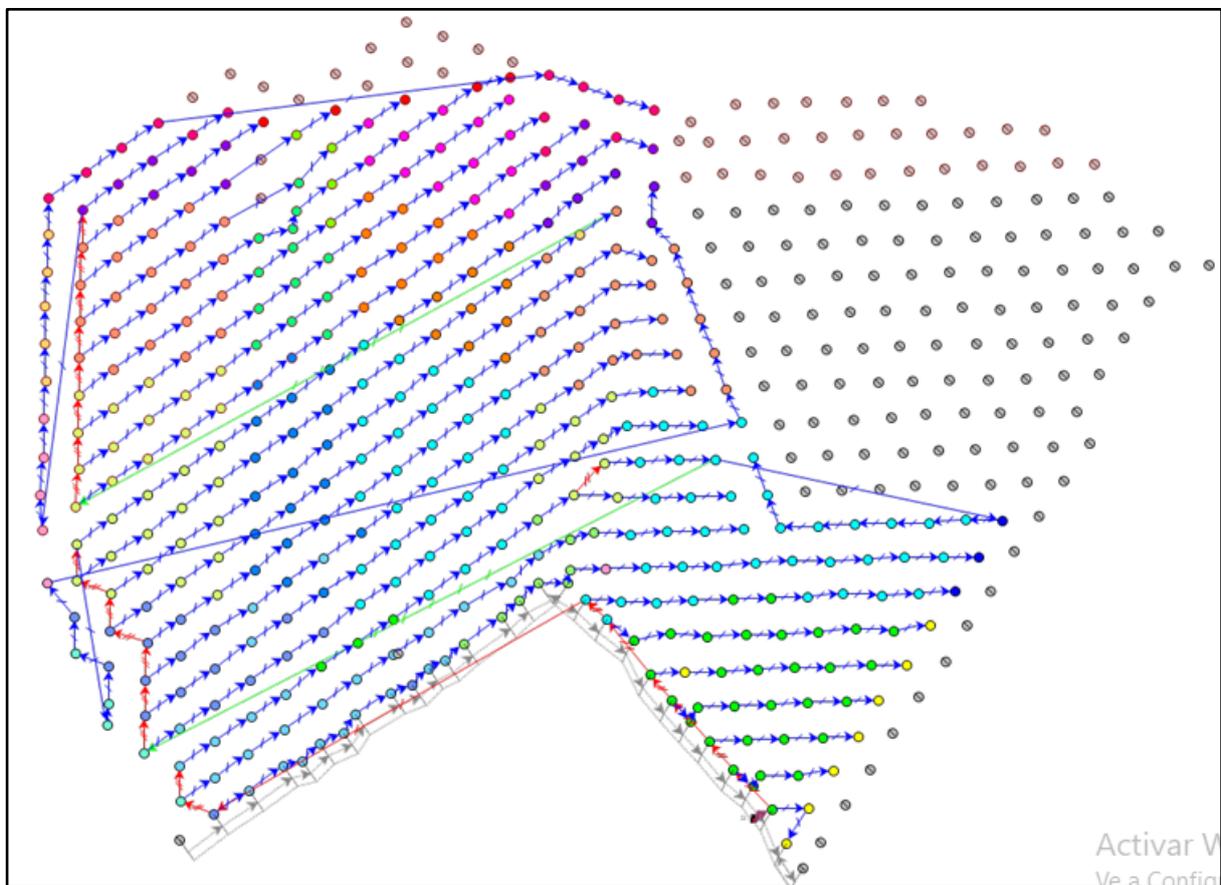
4.2.2.2. Diseño de secuencia de salida

Para el presente proyecto, se diseñó una secuencia de salida tanto en líneas como por bloques, tomando en cuenta la cantidad de detonadores electrónicos y el hecho de que se trata de una voladura controlada, con un diseño de cargas en decks. Esta planificación está orientada a limitar los efectos de las vibraciones. Se establecieron los siguientes tiempos:

- Tiempo de entre taladros y decks: 25ms
- Tiempo entre líneas: 326 ms
- Tiempo entre bloques: 2200 ms

Figura 13

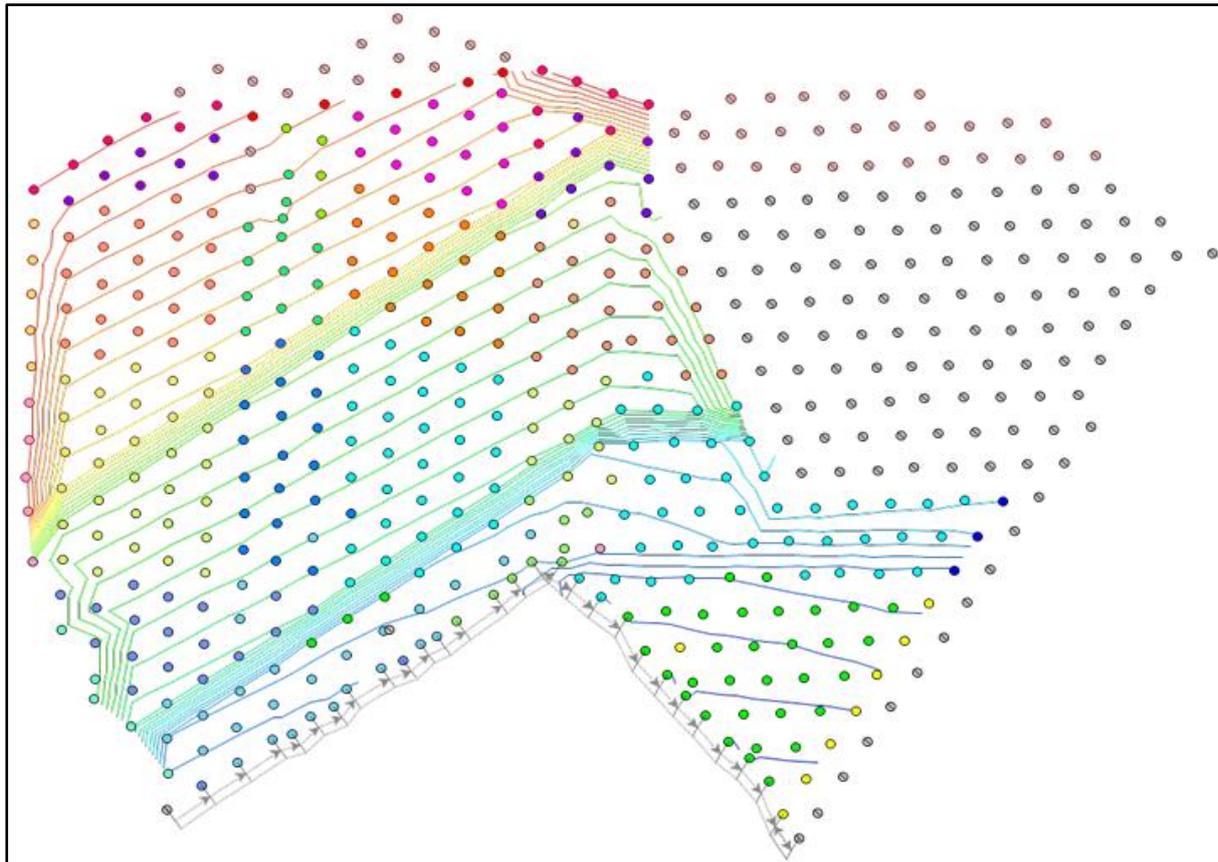
Secuencia de salida - Temporización



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

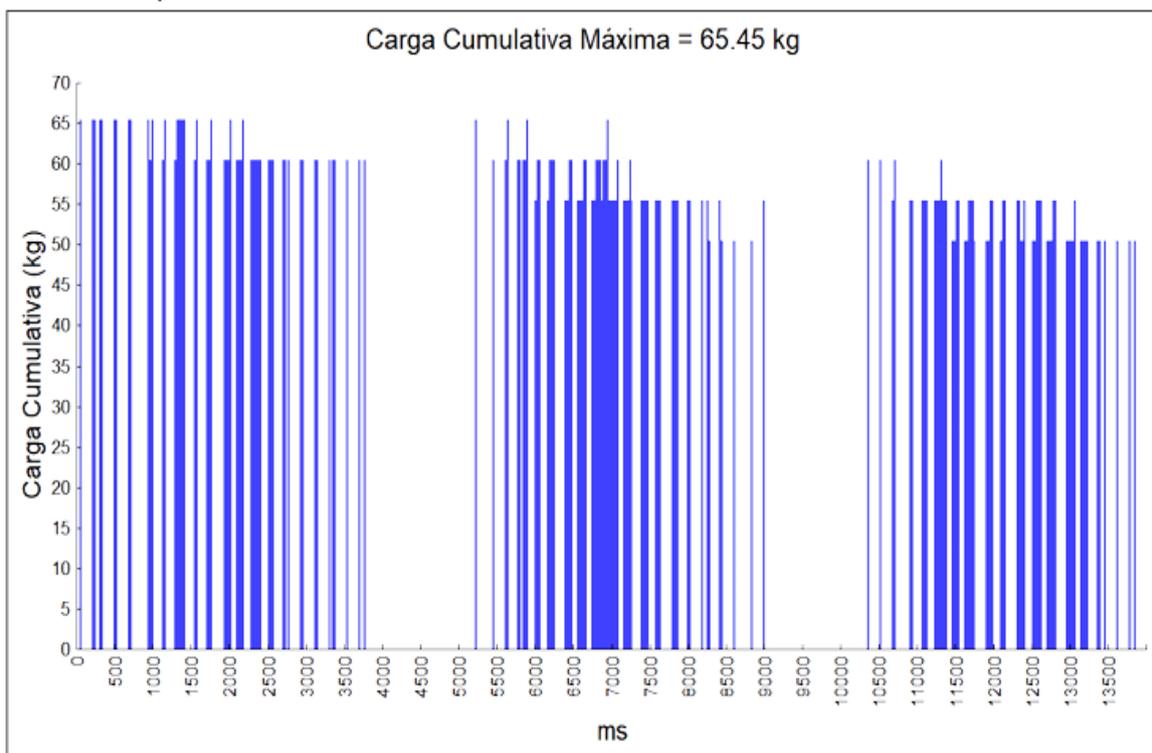
Figura 14

Isolíneas de tiempos y ventana de tiempos - Temporización



Mínimo De Retardo Entre Cargas (Exceto Zero): 3 ms

Janela De Oportunidad : 1 ms



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

4.2.2.3. Análisis de vibraciones

Para este el presente proyecto se ha controlado vibraciones en 2 estructuras geotécnicas críticas: Cavidade MP-09 y Cavidade MP-1. A continuación se detalla los resultados de vibraciones:

Figura 15

Registro de vibraciones



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

Tabla 9

Registro de vibraciones Real vs Simulado

Zona	X	Y	Z	Distancia	Carga (kg)	K	Alfa	Limite VVP	VVP Simulado	VVP Real	Diferencia %
Cavidade MP-09	619696.00	7764751.00	1540.00	510.90	65.00	100.37	-0.73	5.00	4.51	6.80	50.78
Cavidade MP-11	619423.90	7764032.20	1493.15	231.90	65.00	188.95	-0.88	15.00	10.24	9.44	-7.81

Fuente: Elaboración propia.

Con los parámetros de voladura (diseño de carga, secuencia de salida, tiempos de taladros y líneas y ley de atenuación) asignados para este proyecto se ultrapasa en 50.78 % el límite máximo permisible de vibraciones en la Cavidade MP-09, lo que nos conlleva a un mal control de vibraciones para dicha estructura geotécnica.

4.2.2.4. Análisis de Fragmentación

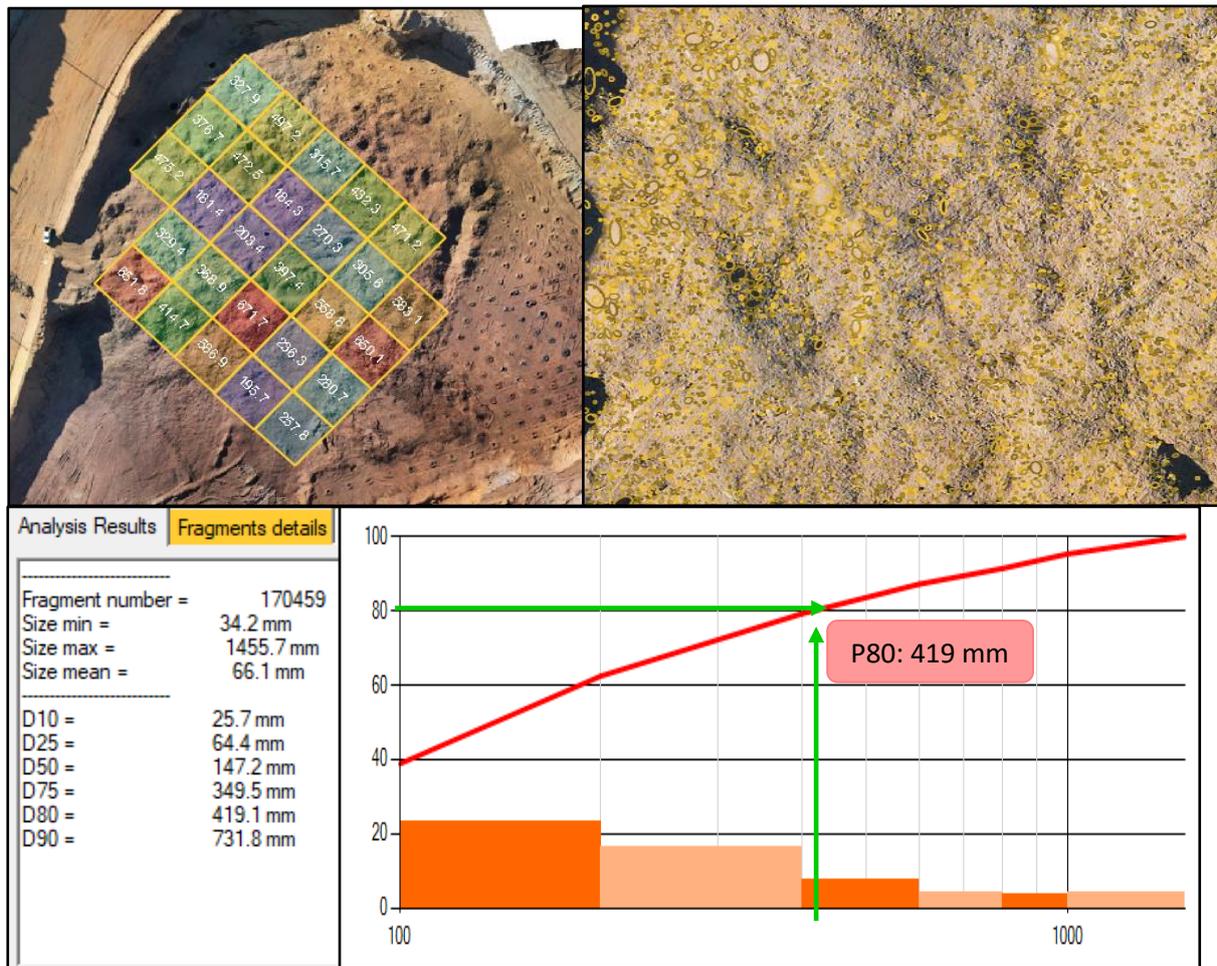
Para esta mina en particular, el P80 requerido por el cliente es de 450 mm. El proceso de fragmentación posterior a la voladura se lleva a cabo de la siguiente manera.

Se realiza el levantamiento de la malla detonada utilizando un dron, captura las imágenes obtenidas son procesadas en el software I-blast, el cual genera como resultado un archivo denominado "Ortofoto.bmp".

A continuación, se analiza el grado de fragmentación de la ortofoto, asignando cuadrículas que permiten al software calcular la granulometría de cada área. Con esta información, se determina el tamaño medio y el P80.

Figura 16

Análisis de fragmentación mediante el software IBLAST



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

Para este proyecto con los parámetros de voladura asignado nuestro P80 fue de 419 mm, valor próximo al solicitado por planta.

4.2.2.5. Costo de voladura

Para el costo de voladura se calcula mediante el producto de la cantidad de insumos por su precio unitario, el resumen del costo de la voladura descrita se detalla:

Tabla 10*Costos de voladura*

INSUMO	CANTIDAD	PU(US\$/KG)	COSTO
ANFO (Kg)	19500	0.517	10081.5
EMULSIÓN(Kg)	4230	0.443	1873.89
HEAVY ANFO(Kg)	17861	0.465	8305.365
BOOSTER 450g(Unid)	720	11	7920
DETONADORES ELECTRONICOS(Unid)	720	23	16560
DETONADORES NO ELECTRICOS	720	3	2160
BACKUP (Unid)			
AIR DECK (Unid)	383	6	2298
COSTO DE EXPLOSIVOS(US\$)			49198.755
COSTO DE EXPLOSIVOS (US\$/TON)			0.17946777

Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

4.3. Diseño de los parámetros de voladura óptimos para el control de vibraciones en el proyecto: Zona/Polígono: Mina Galinheiro / POL122_74 – N° 381- DNA

4.3.1 Parámetros de perforación

Para el proyecto de estudio N° 381, los parámetros de perforación son dados por planeamiento mina, se tiene planeado perforar 316 taladros, tipo de malla triangular y geología: Friable/compacto, los parámetros de perforación se detallarán a continuación (ver tabla 11).

Tabla 11

Parámetros de perforación

Parámetros	N°381
Nivel (msnm)	1400
N° de taladros perforados	263
Burden (m)	4.3
Espaciamiento (m)	5.2
Longitud de taladro (m)	8.00
Diámetro de taladro (pul)	8.00
Sobre perforación (m)	1.00
Altura de banco(m)	9.00

Fuente: Área de planeamiento mina VALE.

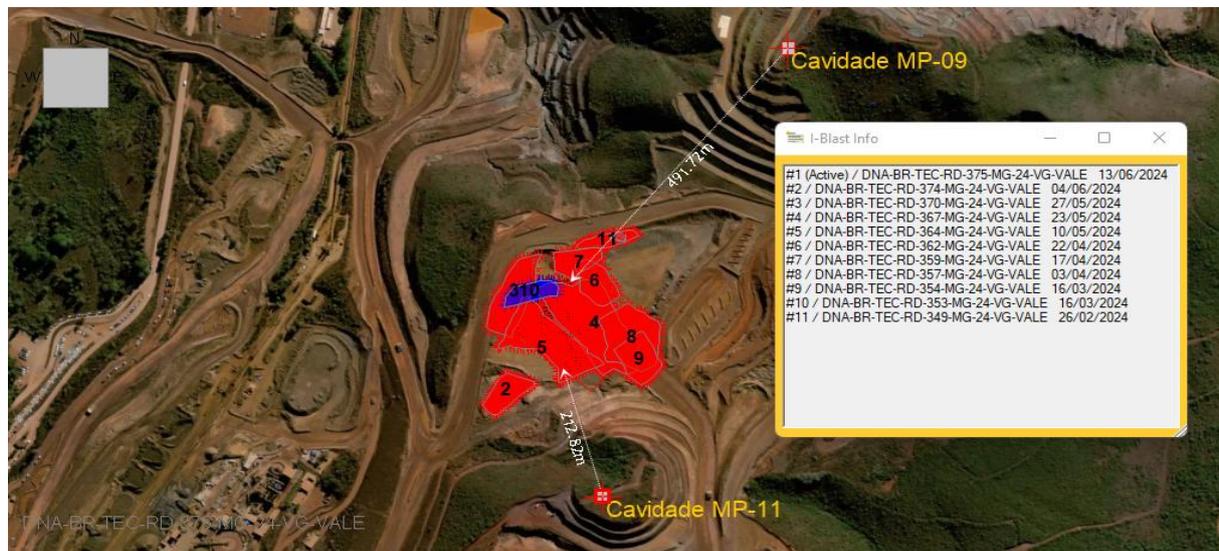
4.3.2 Diseño de voladura para el control de vibraciones

4.3.2.1. Análisis de ley de atenuación

Con el propósito de definir los parámetros más adecuados para un control eficiente de las vibraciones, se efectuó un análisis técnico de 11 voladuras ejecutadas en el sector norte de la mina Galinheiro. Todas las voladuras fueron direccionadas estratégicamente y contaron con monitoreo de vibraciones en tres estructuras geotécnicas consideradas críticas: la cavidad MP-09, la cavidad MP-11 y la presa Vargem Grande.

Figura 17

Voladuras realizadas en la zona norte de la mina Galinheiro.



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

Para la simulación de vibraciones, es fundamental contar con un modelo predictivo, y en este estudio se empleará la distancia escalada de Devine. La determinación de las constantes k y α es esencial para su aplicación, y para ello se requiere realizar una regresión lineal.

A raíz del adelanto en la tecnología y a la existencia de software especializado en minería, se podrán obtener estos valores de manera más precisa. En este caso, se utilizará el software I-Blast, que permite obtener los valores necesarios de forma más rápida y eficiente.

Para llevar a cabo un análisis eficaz de la ley de atenuación en procesos de voladura, es fundamental disponer de una cantidad suficiente de registros. En este contexto, se requiere al menos tres mediciones: dos de ellas son necesarias para trazar la curva, mientras que la tercera se emplea para calibrarla. La elección de datos con propiedades particulares es clave para establecer la ley de atenuación más representativa en cada zona evaluada.

En el proyecto en cuestión, el objetivo es controlar las vibraciones generadas por las voladuras en dos estructuras críticas: Cavidad MP-09 (con un límite de 5 mm/s), Cavidad MP-11 (con un límite de 15 mm/s) y Barragem Vargem Grande (con un límite de 1 mm/s), se llevaron a cabo 11 voladuras, todas con características similares y orientadas hacia las dos estructuras críticas. Cada una de estas voladuras fueron monitoreadas mediante sismógrafos, lo que permitirá obtener una ley de atenuación más precisa y óptima.

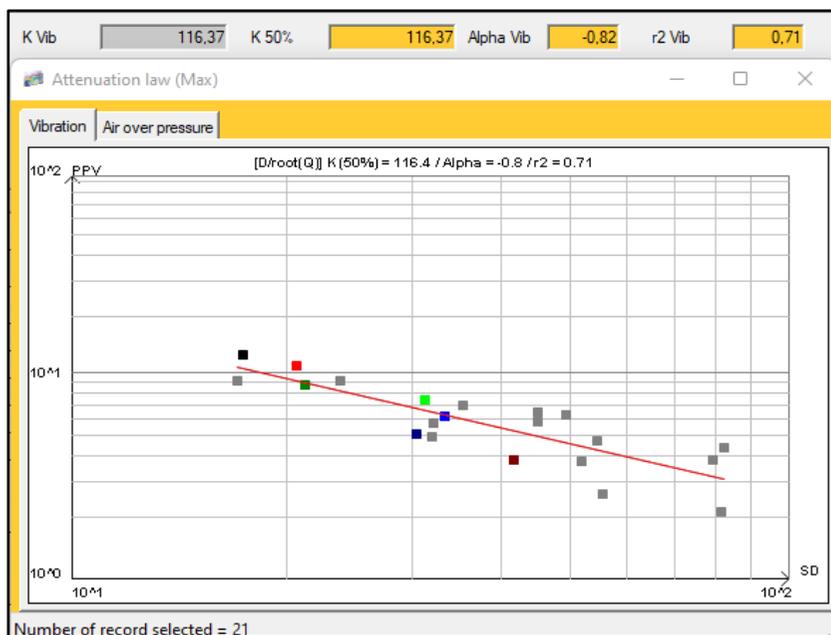
4.3.2.1.1. Análisis de ley de atenuación Cavidade MP-09

A continuación, se presenta el análisis de las leyes de atenuación, evaluadas con diferentes niveles de confiabilidad, se encontró 3 modelos predictivos óptimos para la simulación de vibración en la estructura geotécnica más crítica Cavidade MP-09.

Tabla 12

Construcción de ley de ley de atenuación para Cavidade MP-09 – Escenario 01

N° Voladura	CME (kg)	Vibraciones		Ley de Atenuación 50%			Simulación	Diferencia	Ley de Atenuación 75%			Simulación	Diferencia	Ley de Atenuación 85%			Simulación	Diferencia	Ley de Atenuación 95%			Simulación	Diferencia
		D(m)	PPV Real	k	Alfa	R ²			k	Alfa	R ²			k	Alfa	R ²			k	Alfa	R ²		
364	70.45	571.26	4.560	116.37	-0.82	0.71	3.65	24.77	138.47	-0.82	0.71	4.35	4.85	152.95	-0.82	0.71	4.80	-5.07	168.97	-0.82	0.71	5.31	-14.07
367	55.45	509.03	4.890	116.37	-0.82	0.71	3.64	34.28	138.47	-0.82	0.71	4.33	12.85	152.95	-0.82	0.71	4.79	2.16	168.97	-0.82	0.71	5.29	-7.52
370	65.45	531.14	3.920	116.37	-0.82	0.71	3.76	4.13	138.47	-0.82	0.71	4.48	-12.49	152.95	-0.82	0.71	4.95	-20.77	168.97	-0.82	0.71	5.47	-28.28
375	130.45	547.83	6.800	116.37	-0.82	0.71	4.87	39.64	138.47	-0.82	0.71	5.79	17.36	152.95	-0.82	0.71	6.40	6.25	168.97	-0.82	0.71	7.07	-3.83



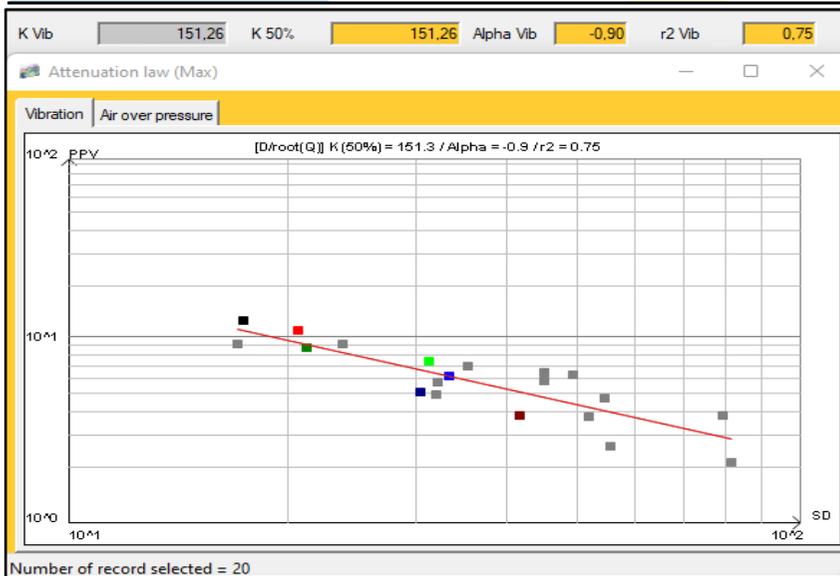
Modelo Predictivo 01

Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

Tabla 13

Construcción de ley de ley de atenuación para Cavidade MP-09 – Escenario 02

N° Voladura	CME (kg)	Vibraciones		Ley de Atenuación 50%			Simulación	Diferencia	Ley de Atenuación 75%			Simulación	Diferencia	Ley de Atenuación 85%			Simulación	Diferencia	Ley de Atenuación 95%			Simulación	Diferencia
		D(m)	PPV REAL	k	Alfa	R ²			k	Alfa	R ²			k	Alfa	R ²			k	Alfa	R ²		
364	70.45	571.26	4.560	151.26	-0.9	0.75	3.39	34.54	178.52	-0.9	0.75	4.00	13.99	196.26	-0.9	0.75	4.40	3.69	218.23	-0.9	0.75	4.89	-6.75
367	55.45	509.03	4.890	151.26	-0.9	0.75	3.38	44.84	178.52	-0.9	0.75	3.98	22.73	196.26	-0.9	0.75	4.38	11.63	218.23	-0.9	0.75	4.87	0.39
370	65.45	531.14	3.920	151.26	-0.9	0.75	3.50	11.97	178.52	-0.9	0.75	4.13	-5.13	196.26	-0.9	0.75	4.54	-13.71	218.23	-0.9	0.75	5.05	-22.39
375	130.45	547.83	6.800	151.26	-0.9	0.75	4.64	46.43	178.52	-0.9	0.75	5.48	24.07	196.26	-0.9	0.75	6.03	12.85	218.23	-0.9	0.75	6.70	1.49



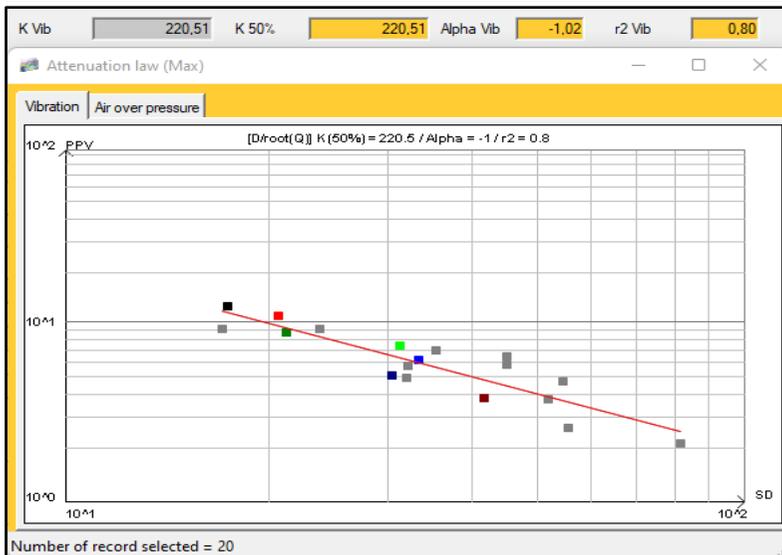
Modelo Predictivo 02

Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

Tabla 14

Construcción de ley de ley de atenuación para Cavidade MP-09 – Escenario 03

N° Voladura	CME (kg)	Vibraciones		Ley de Atenuación 50%			Simulación	Diferencia	Ley de Atenuación 75%			Simulación	Diferencia	Ley de Atenuación 85%			Simulación	Diferencia	Ley de Atenuación 95%			Simulación	Diferencia
		D(m)	PPV REAL	k	Alfa	R²																	
364	70.45	571.26	4.560	105.81	-0.77	0.8	4.10	11.11	123.15	-0.77	0.8	4.78	-4.53	134.3	-0.77	0.8	5.21	-12.46	152.95	-0.78	0.8	5.69	-19.82
367	55.45	509.03	4.890	105.81	-0.77	0.8	4.09	19.56	123.15	-0.77	0.8	4.76	2.72	134.3	-0.77	0.8	5.19	-5.81	152.95	-0.78	0.8	5.67	-13.72
370	65.45	531.14	3.920	105.81	-0.77	0.8	4.22	-7.09	123.15	-0.77	0.8	4.91	-20.18	134.3	-0.77	0.8	5.36	-26.80	152.95	-0.78	0.8	5.85	-32.98
375	130.45	547.83	6.800	105.81	-0.77	0.8	5.37	26.56	123.15	-0.77	0.8	6.25	8.74	134.3	-0.77	0.8	6.82	-0.29	152.95	-0.78	0.8	7.47	-8.99



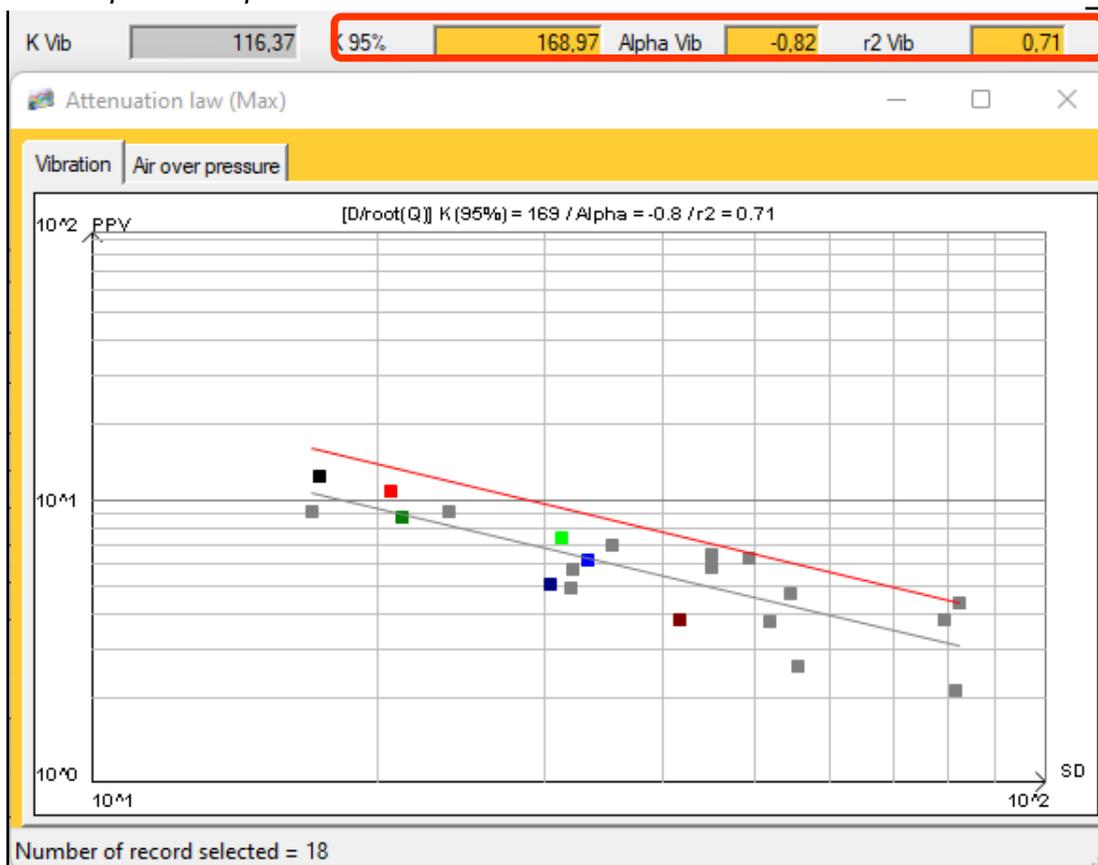
Modelo Predictivo 03

Fuente: Software I-BLAST versión 8.2

Según el análisis de las leyes de atenuación, se seleccionará el **MODELO PREDICTIVO 01** que presenta mínimas diferencias entre el VPP real y el VPP simulado (nuevo modelo predictivo), con un nivel de confianza del 95%. Esto, debido a la importancia crítica de la estructura geotécnica frente a las vibraciones generadas por las voladuras.

Figura 18

Modelo predictivo para Cavidade MP-09



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2

4.3.2.1.2. Análisis de ley de atenuación Cavidade MP-11

Para la estructura crítica Cavidade MP-11 se realiza la actualización de la ley de atenuación, en función de los resultados obtenidos de las voladuras realizadas en su zona de influencia. Esto responde al hecho de que, en las voladuras evaluadas, la discrepancia entre los valores simulados y reales del VPP se mantiene dentro de un margen del $\pm 30\%$, como se evidencia:

Tabla 15

Resultados de vibraciones en la Cavity MP-11

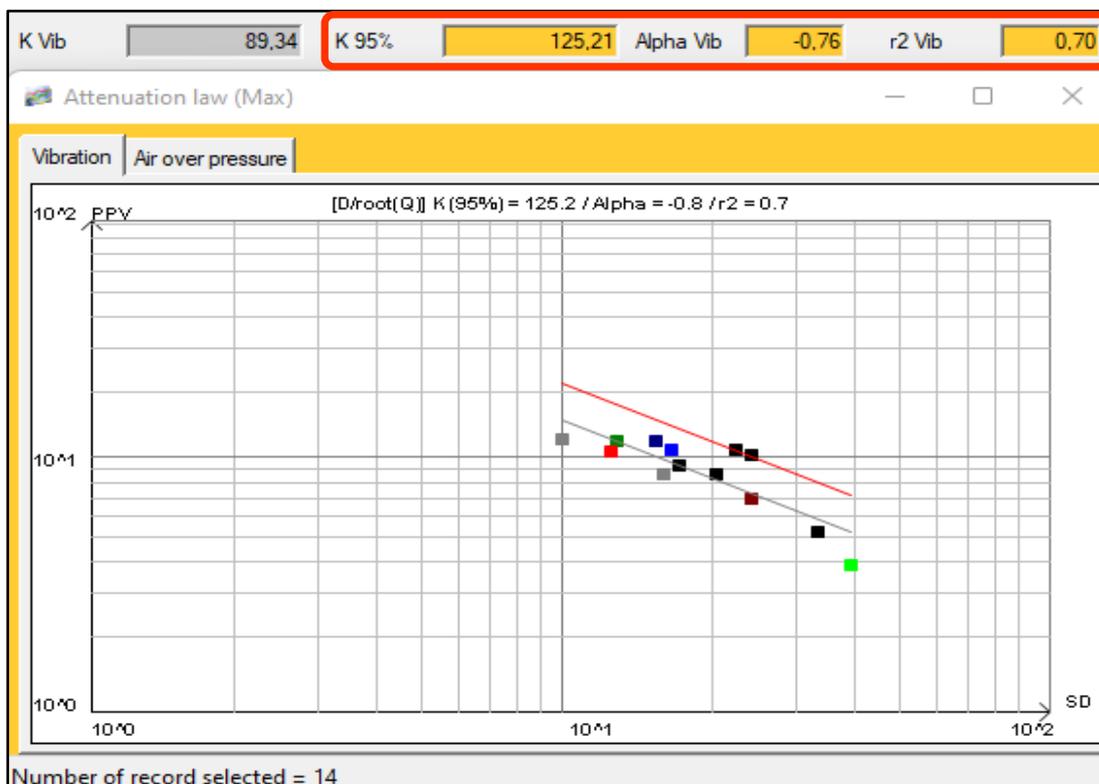
N° Voladura	Fecha	Carga Máxima por Espera (kg)	Sismografía			Ley de Atenuación		
			Distancia (m)	PPV Real	Simulación	Diferencias	k	Alfa
349	26/02/25	70.00	398	2.560	2.620	-2.290	248.73	-0.18
353	16/03/25	90.00	338	4.030	3.680	9.511	248.73	-0.18
354	16/03/25	165.90	1991	9.810	12.660	-22.512	609.38	-1.24
357	03/04/25	80.00	209	10.180	11.980	-15.025	609.38	-1.24
359	12/04/25	90.00	361	5.040	5.350	-5.794	395.53	-1.18
362	22/04/25	90.00	315	5.460	6.540	-16.514	395.53	-1.18
364	25/04/25	70.00	208	11.370	8.770	29.647	395.53	-1.18
374	04/06/25	90.00	212	11.810	11.180	5.635	353.54	-1.11
375	11/06/25	130.00	232	9.440	10.240	-7.813	188.95	-0.88

Fuente: Software I-BLAST versión 8.2

Se realizó el análisis y se obtuvo un nuevo modelo predictivo actualizado con un nivel de confiabilidad de 95 %, que integra todos los registros sismográficos obtenidos durante el monitoreo de las voladuras mencionadas:

Figura 19

Modelo predictivo para Cavity MP-11



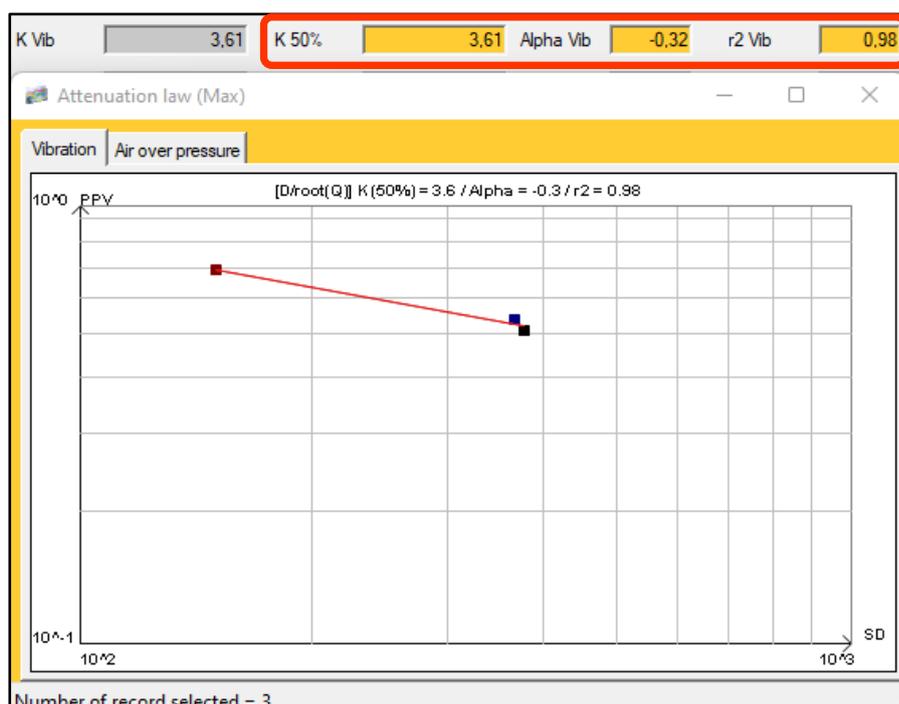
Fuente: Software I-BLAST versión 8.2

4.3.2.1.3. Análisis de ley de atenuación Barragem Vargem grande

A pesar de que esta estructura crítica se encuentra a una distancia de 3640 m de la voladura en estudio, resulta fundamental realizar la simulación para este punto debido a que el límite es extremadamente bajo y se trata de una estructura de alta vulnerabilidad. Para este caso específico, se ha implementado un modelo predictivo previamente establecido a través de un estudio de onda elemental, para la zona norte de la mina Galinheiro, el cual permite estimar de manera precisa a un nivel de confiabilidad de 50%:

Figura 20

Modelo predictivo para Barragem Vargem Grande



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2

4.3.2.2. Estudio de onda elemental

Dentro de las voladuras realizadas en la zona norte de la mina Galinheiro, se llevó a cabo un total de 04 estudios de ondas elementales, cuyo objetivo es determinar el tiempo de acoplamiento y los retardos óptimos entre taladros y filas óptimas para controlar las vibraciones generadas por las detonaciones.

Para el caso específico en estudio, se tomará como referencia la onda elemental correspondiente al proyecto 359, debido a que presenta la mayor carga explosiva y resulta ser la más representativa en cuanto a la generación de vibraciones y la propagación de la onda sísmica.

Tabla 16

Resumen de parámetros de las voladuras en la zona Norte, Mina Galinheiro

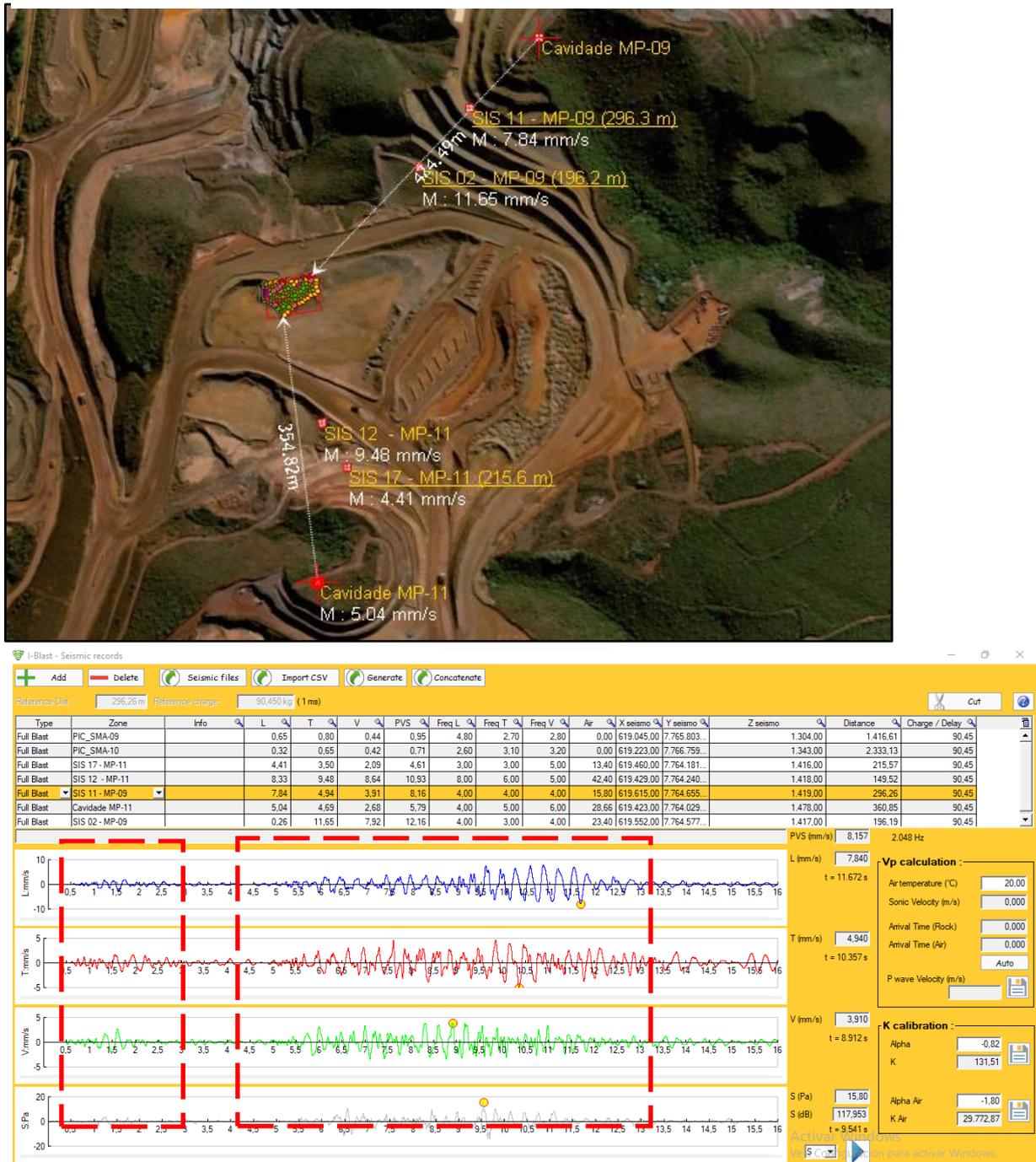
N° Voladura	Geometría de malla			Explosivos y Accesorios			Carga Máxima por Espera (kg)	F.P (kg/m³)	Tiempos (ms)	Tipo de roca	Onda Elemental
	B(m)	E(m)	P(m)	ANFO (kg)	Emulsión(kg)	HA 70/30 (kg)					
349	2.94	3.7	6	-	70.00	-	70.45	0.93	23/326	Friavel/ Compacto	NO
353	4.09	6.2	8.38	-	90.00	-	90.45	0.82	23/326	Friavel/ Compacto	SI
354	4.12	4.85	9	-	100.00	-	165.90	0.84	23/326	Friavel/ Compacto	SI
357	3.1	8.6	9.5	-	80.00	-	80.45	0.57	23/326	Friavel/ Compacto	NO
359	4.3	5.2	10.5	-	90.00	-	90.45	0.72	23/326	Friavel/ Compacto	SI
362	4.3	6.2	12	-	90.00	-	90.45	0.7	23/326	Friavel/ Compacto	NO
364	4.3	6.2	11	-	70.00	-	70.45	0.452	23/326	Friavel/ Compacto	NO
367	4.3	6.2	11	60.00	55.00	60.00	60.45	0.414	23/326	Friavel/ Compacto	NO
370	4.3	6.2	9	65.00	-	65.00	65.45	0.53	23/326	Friavel/ Compacto	NO
374	2.6	8.6	8.1	90.00	90.00	90.00	90.45	0.61	23/211	Friavel/ Compacto	NO
375	4.3	6.2	9.4	65.00	65.00	65.00	130.45	0.459	23/326	Friavel/ Compacto	NO

Fuente: Elaboración propia

Para el estudio de la onda elemental, del proyecto 359 se utilizará el registro obtenido del punto de monitoreo SIS 11, ubicado cerca de la estructura crítica Cavidade MP-09. En dicho registro, se puede observar tanto la vibración generada por la onda elemental (correspondiente a un solo taladro) como la vibración resultante de la detonación completa de la voladura. Este análisis permitirá evaluar la propagación y la intensidad de las ondas sísmicas generadas, así como su comportamiento en relación con las características de la voladura y su impacto en la estructura crítica.

Figura 21

Registro de vibración para el estudio de onda elemental

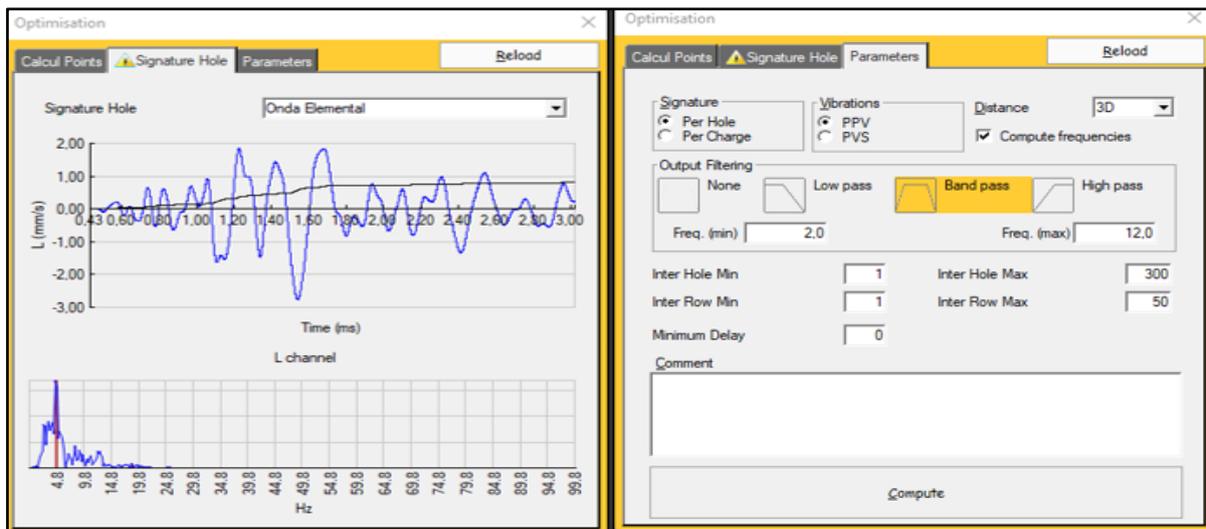


Fuente: Software I-BLAST versión 8.2

Para llevar a cabo el estudio de la onda elemental en el software I-Blast, se requiere únicamente el registro de la vibración generada por dicha onda. Este registro se debe ingresar al software en la sección de 'Optimización', configurando los parámetros de análisis de la onda elemental en función de la carga explosiva y la vibración resultante (VPP), con una frecuencia de propagación medida en campo lejano entre 2 y 12 Hz. Esta configuración permite que el software realice el análisis de la onda elemental en un modelo tridimensional (3D), evaluando con precisión los tiempos entre taladros y filas.

Figura 22

Configuración en el Software I-Blast para el análisis de onda elemental



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

4.3.2.2.1. Optimización de tiempos

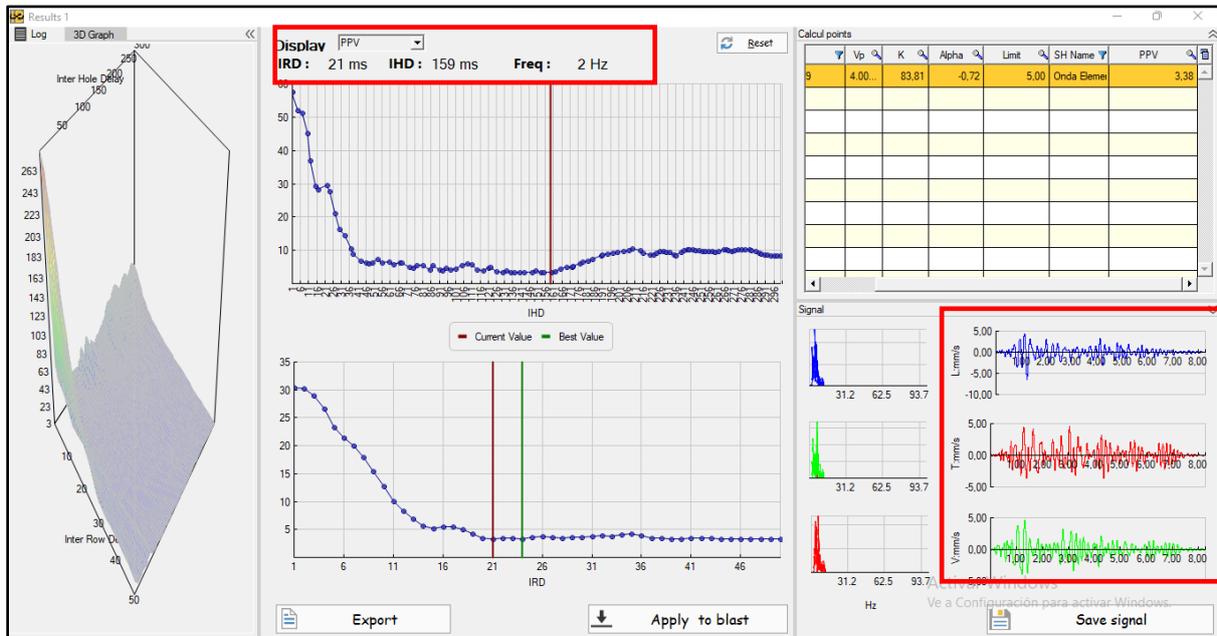
Los tiempos óptimos de retardo entre taladros y entre filas son fundamentales para minimizar la transferencia de energía sísmica y controlar las vibraciones generadas por la voladura. Se realizó el análisis de onda elemental y se determinó:

- Tiempo óptimo entre taladros: 21 ms.
- Tiempo óptimo entre filas: 159 ms.

Los tiempos de retardo fueron configurados con el objetivo de optimizar la secuencia de detonaciones, lo que permite un mejor control en la propagación de las ondas sísmicas. Esta estrategia contribuye a disminuir el valor pico de partícula (VPP) y, en consecuencia, reduce el impacto de las vibraciones sobre las estructuras próximas.

Figura 23

Análisis de onda elemental en el software I-Blast.



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

A mismo se obtiene una simulación de la propagación de las vibraciones generadas por la voladura utilizando los tiempos determinados a través de la onda elemental. En esta simulación, se observa una reducción del 44.65% de vibración en el punto de análisis en comparación con los valores medidos en campo.

Tabla 17

Tiempos de retardo vs Vibraciones

	Tiempo entre taladros	Tiempos entre filas	VPP Real (mm/s)	VPP simulado (mm/s)	Diferencia (%)
SIS 11 Real	23	211	7.84		
SIS 11 Onda elemental	21	159		3.38	44.65

Fuente: Elaboración propia

4.3.2.3. Diseño de carga

En el diseño de carga para la mina Galinheiro, es esencial considerar dos parámetros clave: las vibraciones inducidas por la voladura y el factor de carga.

Registro de carga por vibración: Según lo establecido en el apartado 4.3.2.1.1, la ley de atenuación de vibraciones describe la relación entre la intensidad vibratoria y la distancia al punto de explosión. A través de simulaciones de propagación sísmica, se define la carga máxima admisible por sector, utilizando una distribución escalonada basada en la distancia, con el fin de reducir posibles impactos negativos sobre estructuras geotécnicas sensibles.

Factor de carga y eficiencia de fragmentación: Para asegurar una fragmentación adecuada durante la voladura, se ha determinado un factor de potencia mínimo de 0,450 kg/m³. Este valor garantiza una correcta distribución del explosivo en el banco, promoviendo una ruptura eficiente del material, evitando tanto la subcarga que provocaría fragmentos finos como el exceso de explosivo, que podría generar bloques de gran tamaño.

Selección de tipo de explosivo

Para realizar un análisis de selección de explosivos en la zona Norte de Galinheiro, basado en vibraciones, geología y costos, se tiene que considerar lo siguiente:

Análisis de Vibraciones:

Explosivo ANFO: Tras el análisis de las vibraciones generadas por diferentes tipos de explosivos, se ha observado que el ANFO produce menores niveles de vibración sísmica en comparación con otros explosivos más potentes. Este comportamiento es beneficioso para minimizar los impactos en las estructuras geotécnicas y reducir el riesgo de daño a dichas. Sin embargo, a pesar de sus bajas vibraciones, el ANFO tiene una baja energía de detonación y una baja velocidad de detonación, lo que limita su capacidad para generar la fragmentación adecuada en formaciones rocosas más duras o semi-compactas.

Análisis Geológico:

Formaciones Rocosas en la Zona de Voladura: De acuerdo con el análisis geológico realizado en las distintas estaciones del proyecto, se identificaron dos tipos principales de formaciones rocosas en el área de voladura: roca friable y roca compacta, cada una con características específicas que influyen en la selección y diseño de la carga explosiva.

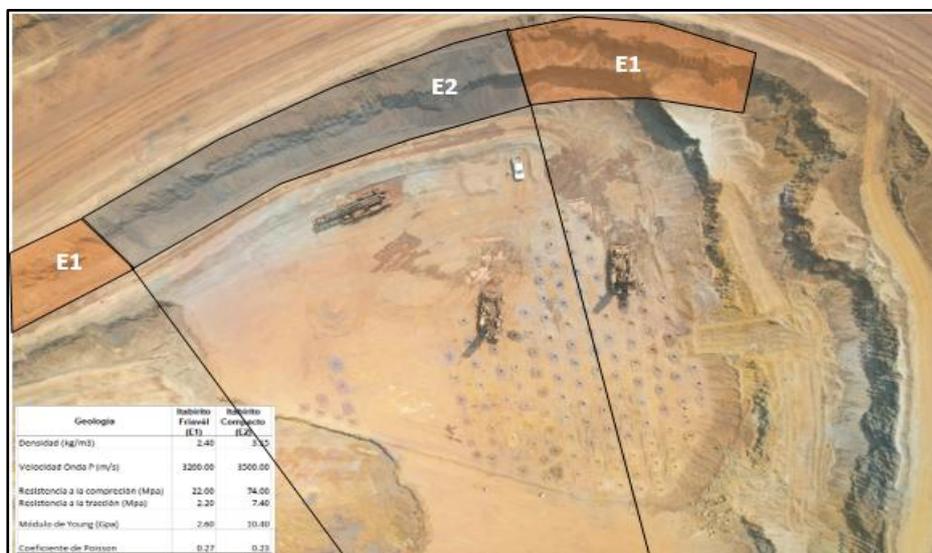
Roca Friable: Se caracteriza por su baja cohesión y fragilidad, lo que implica una menor resistencia al esfuerzo. Para este tipo de material, se recomienda el uso de cargas explosivas de baja potencia, con el fin de evitar una fragmentación excesiva y asegurar un aprovechamiento eficiente del explosivo.

Roca Compacta: Presenta una alta cohesión y resistencia mecánica, lo que exige el empleo de explosivos con mayor potencia de detonación para garantizar una fragmentación adecuada y controlada. En este caso, el uso de ANFO resulta ineficiente, ya que no cuenta con la energía necesaria para romper eficazmente estas formaciones.

Selección de Explosivos: Dado lo anterior, se descarta el uso de ANFO en rocas compactas, optando en su lugar por explosivos de mayor poder energético como la emulsión explosiva y el Heavy ANFO, los cuales ofrecen una mayor capacidad de fragmentación en formaciones de alta resistencia.

Figura 24

Mapeo geológico del polígono 122_74



Fuente: Área de geología mina VALE

Análisis de Costos:

Explosivo Emulsión: En cuanto al costo-beneficio, los explosivos de Emulsión ofrecen una alta potencia de detonación y una buena velocidad de detonación, lo que los hace ideales para la fragmentación eficiente en rocas compactas, y su costo es más competitivo en comparación con el Heavy ANFO. La emulsión es una opción efectiva para cumplir con los objetivos de fragmentación, sin incurrir en los altos costos asociados a otros explosivos más potentes.

Heavy ANFO: Aunque el Heavy ANFO tiene una mayor potencia que el ANFO convencional y ofrece una buena capacidad de fragmentación, su costo es considerablemente más alto, lo que lo hace menos rentable para el proyecto en comparación con la emulsión.

Tabla 18

Comparativos de costos según explosivos

Precios de agentes	US\$/kg	Emulsión	ANFO	Heavy ANFO
Emulsión Matriz	0.44329	99%		70%
Nitrato	0.519		94%	27%
D2	0.48442		6%	2%
Solución G	0.49652	1%		1%
Precio (U\$/KG)		0.443	0.517	0.465
VOD		4800	3800	5100

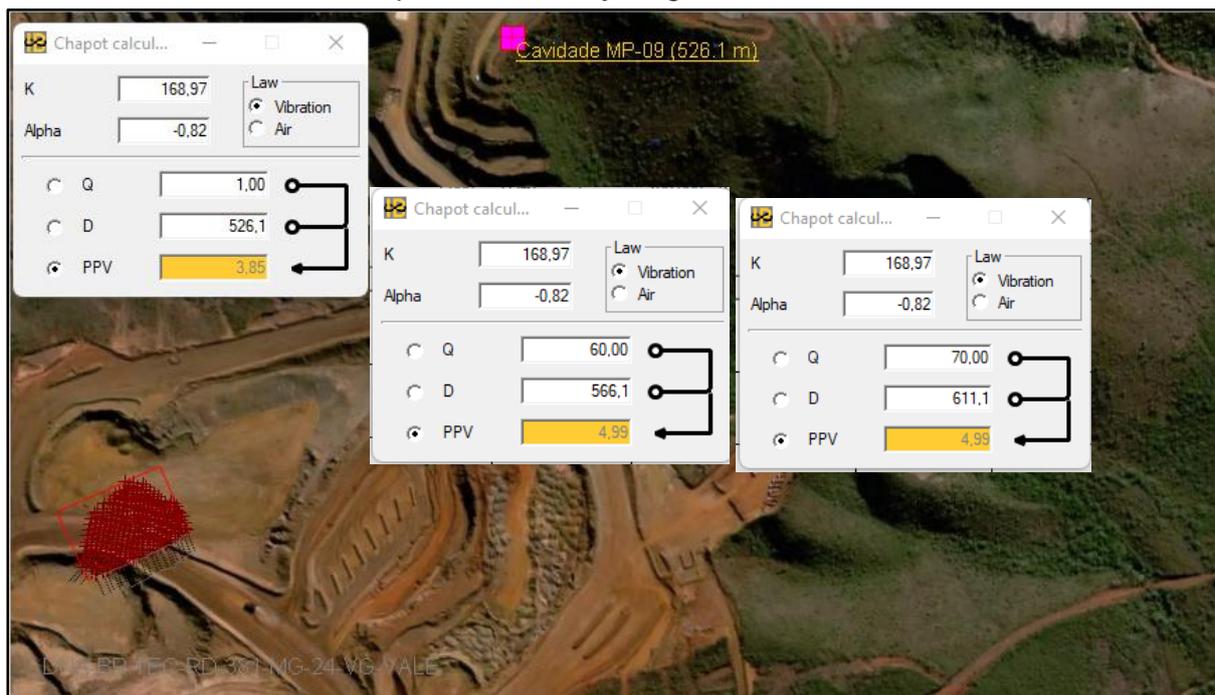
Fuente: Elaboración propia

4.3.2.3.1. Modelos de carga

La simulación predictiva permitirá una delimitación precisa de los modelos de carga, ajustando la cantidad de explosivo y la distancia escalonada de manera óptima para lograr la fragmentación requerida, mientras se asegura que las vibraciones generadas no superen el límite de VPP establecido para la Cavidade MP-09. Este enfoque garantizará una voladura eficiente y controlada, minimizando los impactos negativos sobre la estabilidad geotécnica de las estructuras cercanas.

Figura 25

Simulación de vibraciones respecto distancia y cargas.



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

Análisis de Carga Limitada Según Distancia y Simulación de Vibraciones para la Estructura Geotécnica Cavidade MP-09:

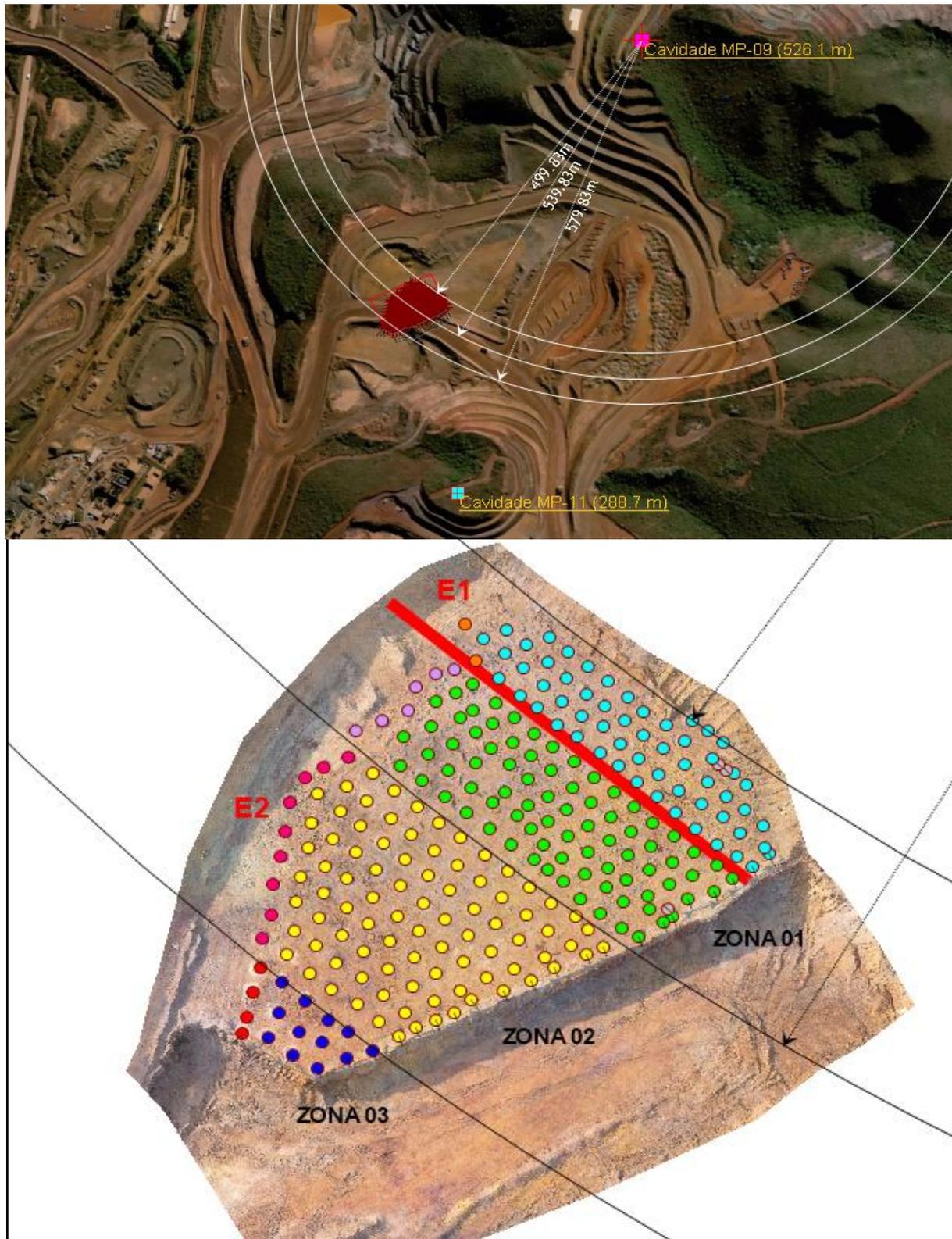
A una distancia de 549,10 m desde el primer taladro del proyecto hasta la estructura geotécnica Cavidade MP-09, se ha determinado, mediante la simulación de vibraciones, que la CME es de 50 kg. Dentro de un radio de influencia de 40 metros, esta carga no genera VPP que superen el límite crítico establecido para la Cavidade MP-09.

A una distancia de 589,10 m, la CME permitida se incrementa a 60 kg, y, al igual que en el caso anterior, dentro de un radio de 40 metros, la simulación muestra que la VPP no excede el valor límite de la estructura.

A una distancia de 629,10 m, la carga máxima permitida es de 70 kg, y la simulación de vibraciones indica que no se supera el límite crítico de VPP. Esto garantiza que las vibraciones generadas durante la voladura se mantendrán dentro de los niveles seguros para la estructura Cavidade MP-09.

Figura 26

Sectorización de cargas según simulación de vibraciones



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

Después del análisis de sectorización, se han definido tres zonas de limitación en función de las cargas máximas permitidas y de acuerdo con el mapeo geotécnico realizado. Las zonas están determinadas por las distancias, mediante simulación de vibraciones que se realizaron para controlar el impacto sísmico sobre las estructuras cercanas.

Zona de Limitación 01:

En esta zona, se han considerado dos estaciones para la asignación de las cargas explosivas.

- Estación E1: Para esta estación, se cargó con 50 kg de ANFO, un explosivo de baja potencia, adecuado para mantener las vibraciones controladas y cumplir con la fragmentación necesaria en la roca friable.
- También se cargó con 50 kg de Emulsión, un explosivo de mayor potencia que el ANFO, utilizado para asegurar una fragmentación eficiente en las formaciones compactas, acorde con las características geotécnicas del terreno en esa zona.
- El factor de potencia requerido para la fragmentación en esta zona cumple con lo requerido.

Zona de Limitación 02 y 03:

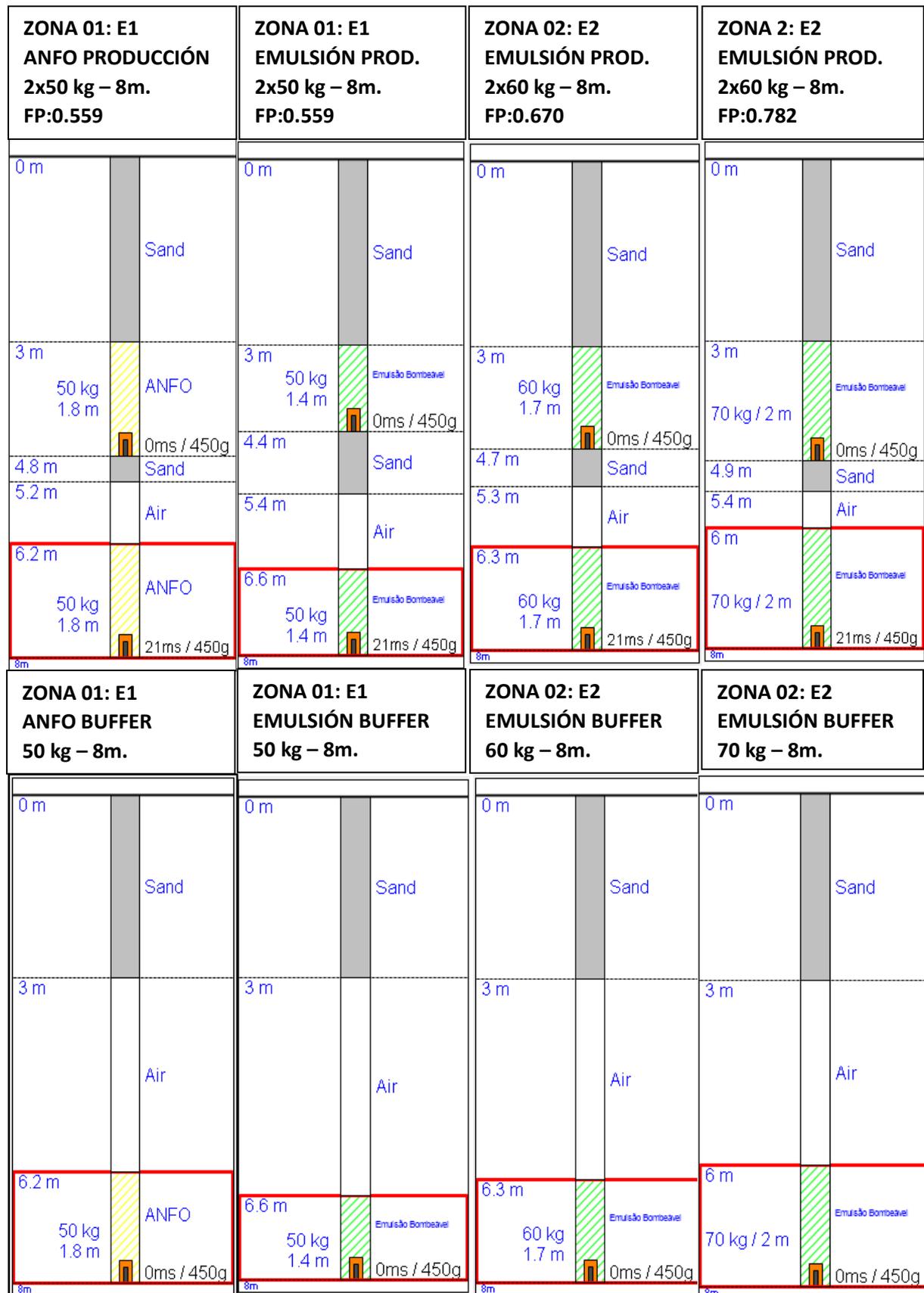
Las zonas 02 y 03 están ubicadas dentro de una misma estación debido a la proximidad geológica y las características de las formaciones rocosas. Las cargas máximas permitidas en estas zonas fueron determinadas según las simulaciones de vibraciones para evitar exceder los límites de velocidad de partículas pico (VPP):

- Zona 02: Se cargó con 60 kg de explosivo, lo que permite alcanzar una fragmentación adecuada en las formaciones compactas sin comprometer la estabilidad estructural de las estructuras geotécnicas.
- Zona 03: Se cargó con 70 kg de explosivo, ajustado para zonas de mayor dureza o rocas más resistentes, manteniendo las vibraciones bajo control y garantizando que la VPP no exceda.
- El factor de potencia requerido para la fragmentación en esta zona cumple con lo requerido.

Así mismo en cada zona de limitación, se han implementado taladros de buffer como medida preventiva para minimizar el impacto sobre el talud, el uso de taladros de buffer tiene como objetivo principal mitigar la transmisión de ondas sísmicas y evitar la desestabilización de la pared del talud, garantizando así un criterio de daño mínimo.

Figura 27

Diseño de cargas



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

4.3.2.4. Diseño de secuencia de salida

El diseño de secuencias de salida con tiempos óptimos de retardo juega un papel fundamental en la reducción de vibraciones durante las voladuras. Un análisis adecuado de las secuencias de disparo puede generar configuraciones que minimicen las vibraciones y maximicen la eficiencia del proceso.

En este proyecto, se adoptará un diseño de secuencias de salida lineales, aprovechando la cara libre como punto de inicio. Esta configuración no solo optimiza el uso del material explosivo, sino que también permite una dispersión eficiente de las ondas de choque, reduciendo significativamente el impacto de las vibraciones en las estructuras circundantes.

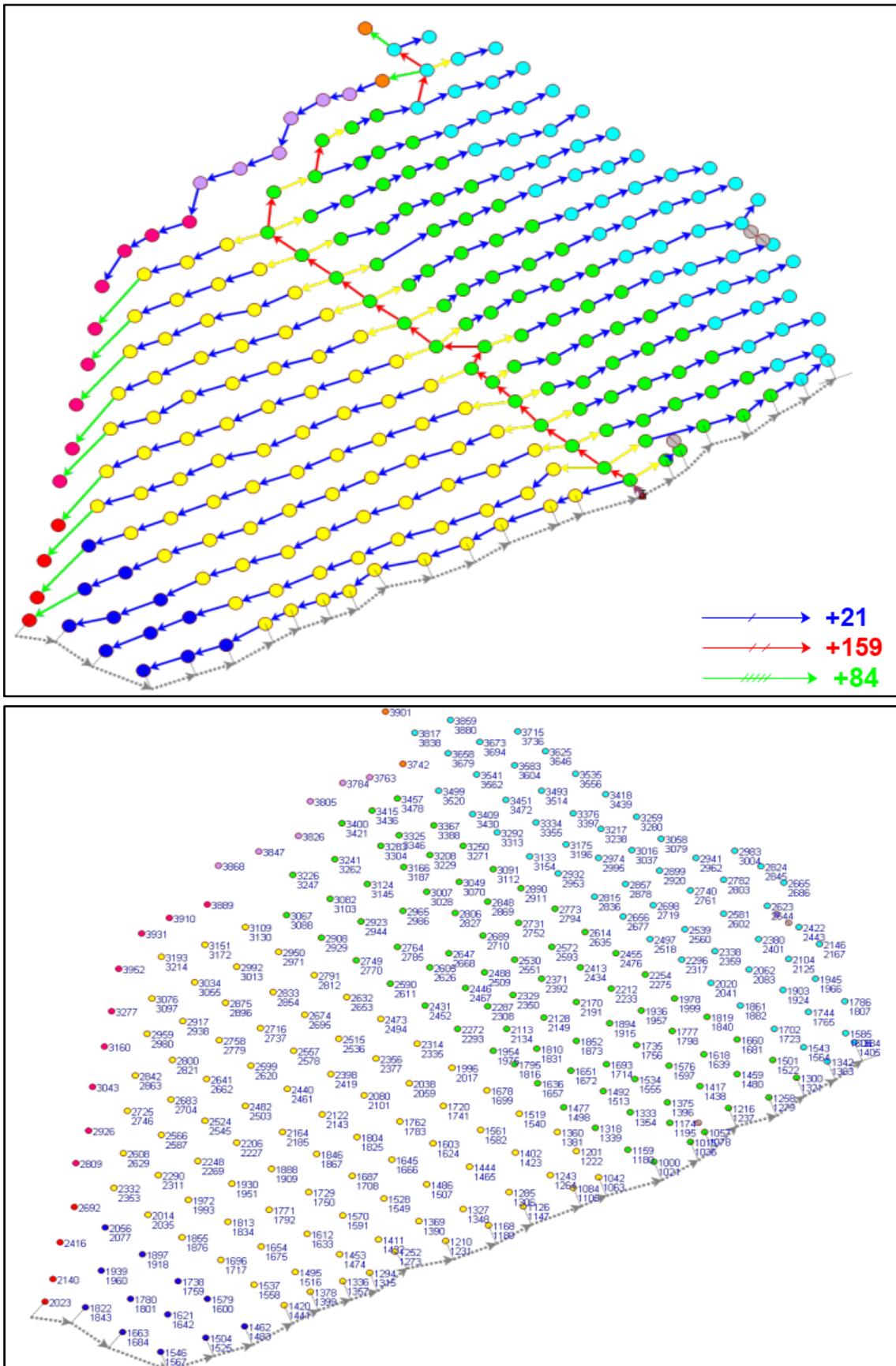
La secuencia en líneas es eficiente en voladuras debido a varios factores técnicos clave:

- Dispersión controlada de las ondas de choque: La detonación a lo largo de una línea permite que la liberación de energía se realice de manera ordenada y controlada. Esto reduce la interferencia entre las ondas de choque y minimiza los picos de vibración indeseados.
- Atenuación natural de las vibraciones: Las ondas de presión se disipan progresivamente a medida que se alejan de la cara libre, lo que ayuda a reducir las vibraciones antes de que lleguen a zonas sensibles o estructuras cercanas.
- Propagación unidireccional: La secuencia lineal asegura que la mayor parte de la energía se propague en una dirección controlada, evitando que las ondas se transmitan hacia zonas no deseadas o hacia estructuras cercanas.
- Optimización de los retardos: Los tiempos de retardo entre las cargas se pueden organizar de manera escalonada para maximizar la eficiencia de la detonación, lo que ayuda a minimizar las vibraciones generadas durante el proceso.
- Distribución uniforme de la energía: La secuencia lineal asegura una liberación más equilibrada de la energía, reduciendo la concentración de grandes cantidades de energía en un solo punto y, por lo tanto, el riesgo de daños por vibraciones.

A continuación, se presenta el diseño de secuencia propuesto para nuestro proyecto de estudio, con el objetivo de optimizar las voladuras y reducir las vibraciones generadas durante el proceso. Este diseño se basa en el análisis de las secuencias de disparo, aplicando tiempos óptimos de retardo para maximizar la eficiencia de la voladura y minimizar el impacto de las vibraciones en las estructuras geotécnicas.

Figura 28

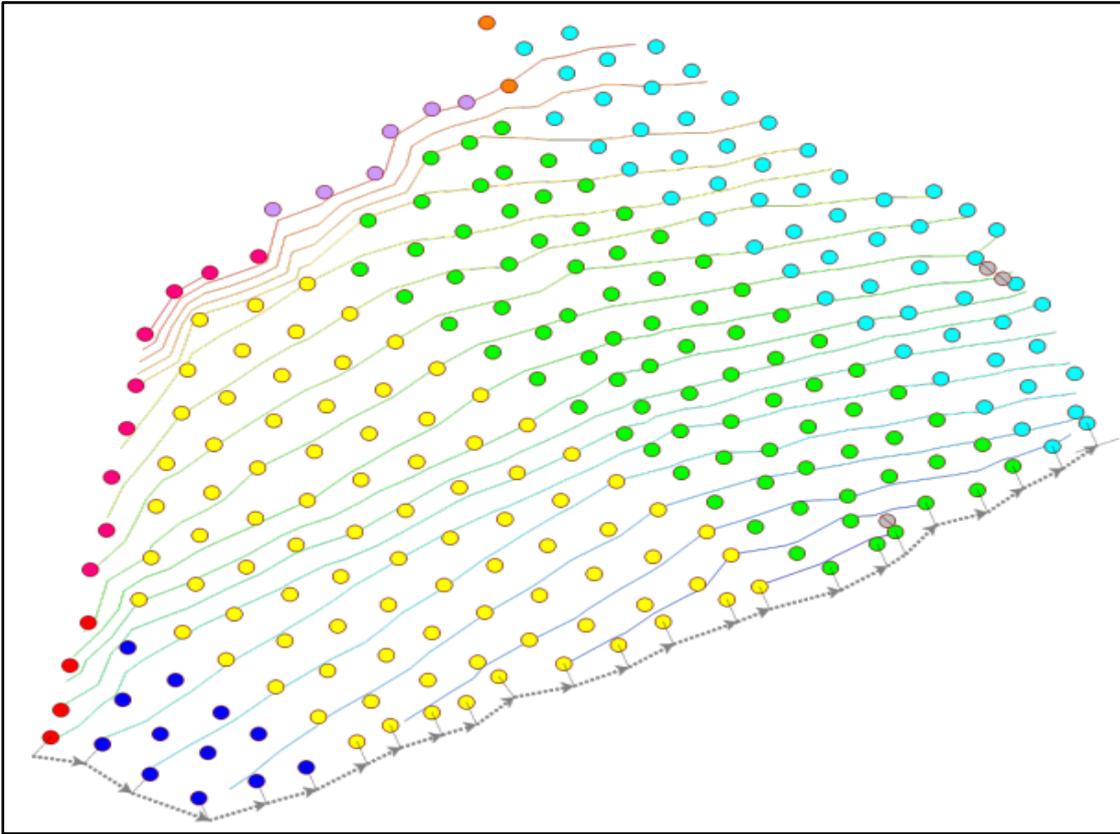
Diseño de secuencia en líneas y temporización



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

Figura 29

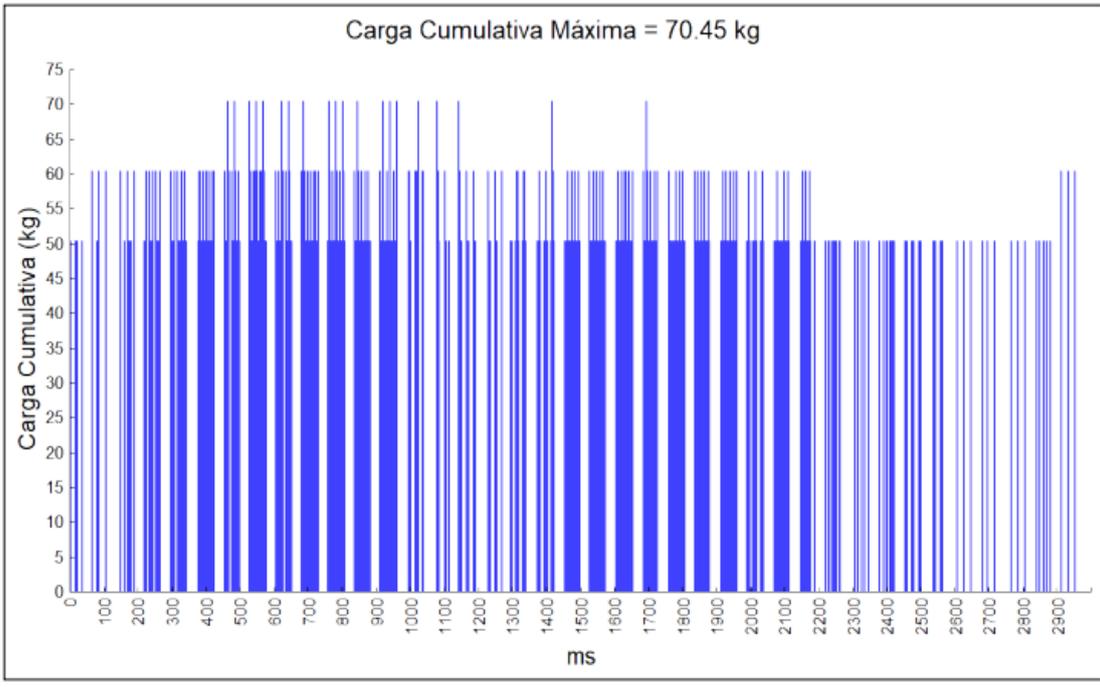
Isolíneas de tiempos y ventana de tiempos



A Análise Da Sequência De Iniciação

Mínimo De Retardo Entre Cargas (Exceto Zero): 3 ms

Janela De Oportunidade : 1 ms



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

4.3.2.5. Control de vibraciones

El control de vibraciones en la mina Galinheiro es un aspecto crucial para garantizar la seguridad de las estructuras geotécnicas cercanas. Las vibraciones generadas por las voladuras pueden provocar daños y alterar la estabilidad de estas. Para evitar estos problemas, es fundamental aplicar las medidas de control de vibraciones basadas en el análisis de factores clave como:

Limitación de Carga, Se limito la carga a través de la construcción del nuevo modelo predictivo tomando en consideración la distancia de las estructuras geotécnicas y los límites de vibraciones permisibles, este control adecuado de la carga ayuda a evitar el exceso de energía que podría generar ondas sísmicas excesivas.

Selección del Tipo de Explosivo, el tipo de explosivo utilizado influye directamente en la frecuencia y amplitud de las vibraciones generadas. Para nuestro proyecto de estudio se eligió dos tipos de explosivos adecuados para la geología del terreno.

Tiempos Óptimos de Retardo, los tiempos de retardo entre las detonaciones sucesivas es un factor crítico para la propagación de las ondas sísmicas generadas por la voladura. Se determino los tiempos de retardo óptimos que permitirá distribuir la liberación de energía de manera controlada, evitando picos de vibración dañinos para las estructuras cercanas.

Secuencia de Salida, la secuencia de salida es otro aspecto crítico en la estrategia de voladura. Se optó por un diseño de secuencia lineal utilizando la cara libre, ya que esta estrategia permite distribuir la energía de manera eficiente, dirigiendo la propagación de las ondas sísmicas hacia áreas controladas y no hacia las estructuras cercanas. Al utilizar la cara libre, se permite que la energía se libere hacia el aire o una zona sin obstáculos, reduciendo la intensidad de las vibraciones en las zonas sensibles. Este enfoque minimiza las vibraciones y mejora la eficiencia de la fragmentación del material.

4.3.2.5.1. Simulación de Vibraciones

Antes de llevar a cabo la voladura, es altamente recomendable realizar una simulación predictiva de las vibraciones en las estructuras geotécnicas cercanas utilizando el software I-BLAST. La predicción de las vibraciones generadas por la voladura es un componente esencial en el diseño de la voladura, ya que permite anticipar los efectos de las ondas sísmicas sobre las estructuras circundantes. Este proceso predictivo es crucial para minimizar el riesgo de daños en las infraestructuras geotécnicas cercanas y garantizar la seguridad de las mismas.

En nuestro proyecto de estudio, se presta especial atención a tres estructuras geotécnicas que requieren un cuidado más detallado debido a su cercanía a la zona de voladura. A continuación, se presenta la predicción de las vibraciones generadas por la voladura en dichas estructuras, con el objetivo de evaluar el impacto y tomar las medidas preventivas necesarias para mantener las vibraciones dentro de los límites permisibles establecidos para la seguridad de las infraestructuras.

Figura 30

Simulación de vibraciones en las estructuras geotécnicas con el diseño propuesto



Vibration level simulation									
Zone	X	Y	Z	Distance to blast	ppv	Charge per Delay	K	Alpha	Vp
Cavidade MP-11	619.430,00	7.764.028,00	1.489,00	278	8,71	70,45	125,21	-0,76	4.000
Barragem Vargem Gran	618.508,00	7.767.911,00	1.337,00	3.662	0,51	70,45	3,61	-0,32	4.000
Cavidade MP-09	619.703,16	7.764.748,30	1.539,51	549	4,92	70,45	168,97	-0,82	4.000

Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

4.3.2.5.2. **Monitoreo miento sismográfico**

El monitoreo continuo de las vibraciones en tiempo real durante la voladura es obligatorio en la mina Galinheiro y esencial para asegurar que las vibraciones no superen los niveles máximos permitidos, este proceso es indispensable para proteger las estructuras geotécnicas cercanas, cumplir con las normas de seguridad y optimizar el diseño de las voladuras de manera óptima, ajustando la carga de explosivos, la secuencia de detonación, los tiempos de retardo y otros parámetros para mantener las vibraciones dentro de los límites permisibles y reducir al mínimo los efectos negativos.

Para el monitoreo de vibraciones se utilizan sismógrafos ubicados en puntos estratégicos en dirección lineal de las estructuras geotécnicas y/o puntos definidos por el área de geotecnia.

Para nuestro proyecto de estudio se monitoreará dos estructuras críticas, 02 sismógrafos en dirección a Cavidade MP-09 y un sismógrafo en la misma cavidad, se refleja el mismo monitoreo de vibraciones para la Cavidad MP-11.

Figura 31

Monitoreo y simulación de vibraciones en dirección a las estructuras críticas



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

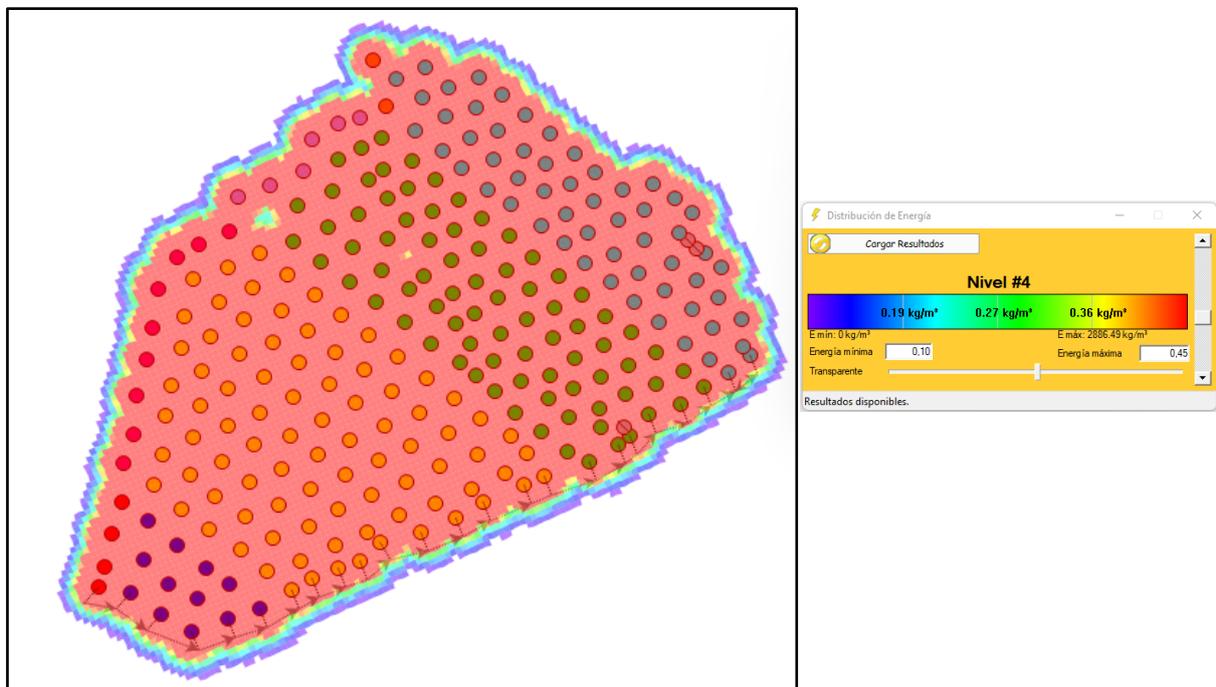
4.3.2.6. Simulación de diseño

4.3.2.6.1. Simulación de energía

El análisis energético en una voladura es fundamental para garantizar su eficiencia y seguridad, ya que permite optimizar el uso del explosivo en función de la fragmentación deseada y reducir impactos no deseados en estructuras cercanas. A través de este estudio, es posible ajustar parámetros clave como la carga y disposición de los taladros. En el caso del presente proyecto, la distribución de energía generada por las cargas explosivas ha resultado adecuada para los objetivos propuestos.

Figura 32

Análisis de energía



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

4.3.2.6.2. Simulación de fragmentación

La simulación de fragmentación en 4D es una herramienta avanzada del software I-BLAST para predecir y analizar cómo se romperá el material en una voladura, tomando en cuenta no solo la distribución espacial de los fragmentos, sino también el comportamiento temporal del proceso de fragmentación.

La simulación en 4D tiene como objetivo principal modelar el comportamiento de la voladura desde una perspectiva espacial y temporal. Para Optimizar el diseño de las voladuras y obtener una fragmentación más eficiente, reducir los costos operativos al minimizar el uso innecesario de explosivos y mejorar la calidad de la fragmentación, prevenir daños a las estructuras cercanas al ajustar la distribución y la energía de la voladura, prever

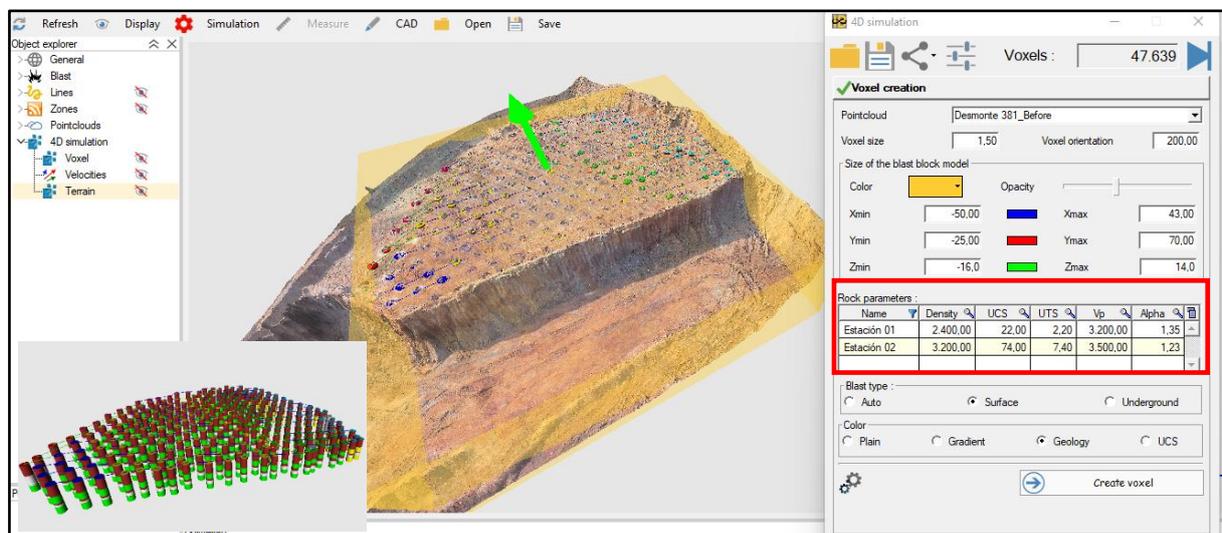
la evolución temporal de los fragmentos y su dispersión en la mina, lo que permite una planificación más precisa de las operaciones posteriores.

Para realizar la simulación de fragmentación en 4D necesitamos proporcionar información sobre la voladura:

- Propiedades geotécnicas de la roca
- Diseño de voladura propuesto.
- Delimitar la zona donde se creará los voxeles de simulación.

Figura 33

Configuración para la simulación en 4D de fragmentación



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

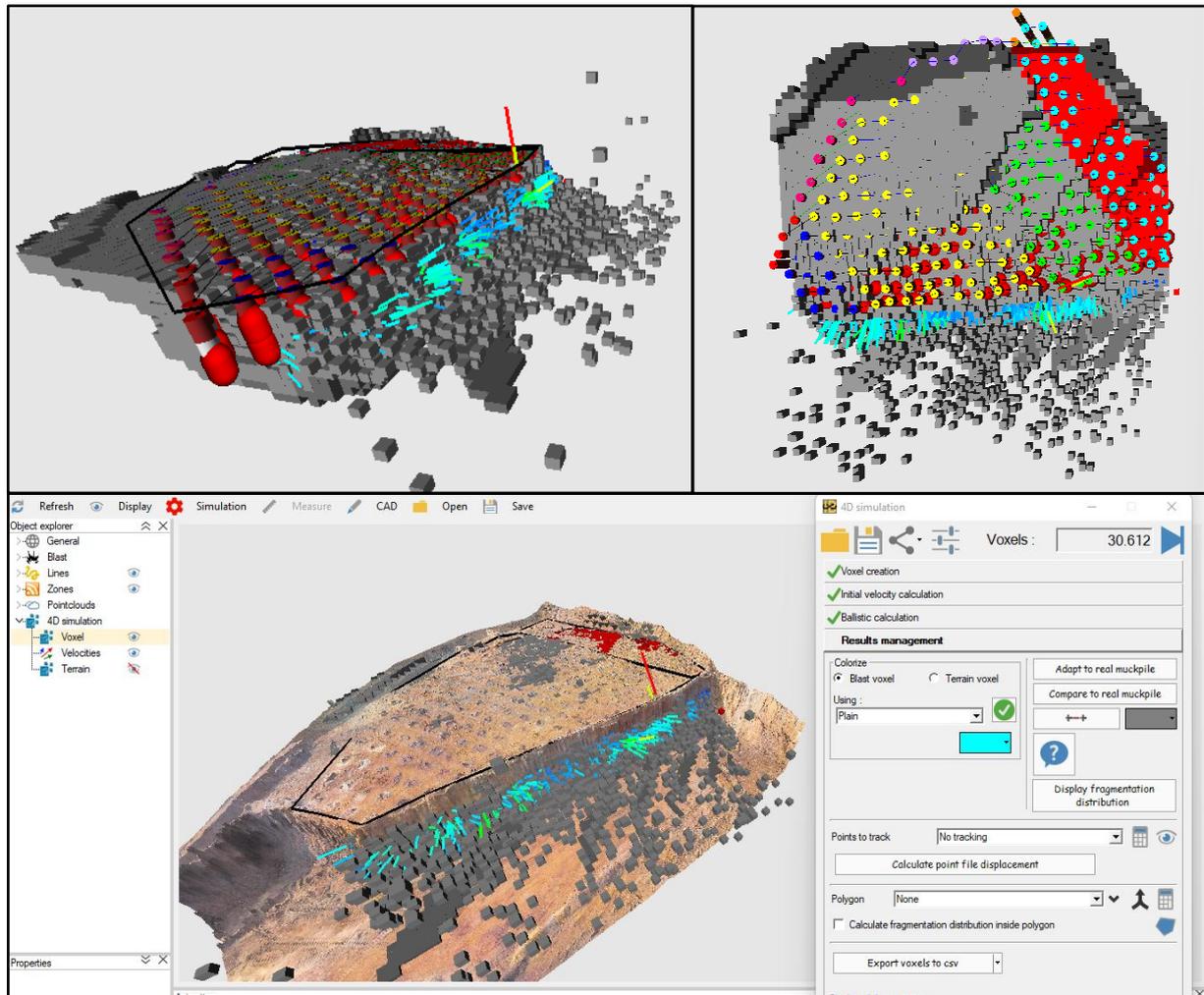
Proporcionada esta información I-BLAST simula el comportamiento de la roca al recibir la energía de la voladura. Esto incluye:

Cálculo del tamaño y distribución de los fragmentos: El software calcula cómo se rompen las partículas de roca basándose en la energía liberada propuesta según el diseño de voladura y las propiedades geotécnicas del material.

Simulación temporal (4D): Aquí es donde se integra la dimensión temporal. El software modela cómo los fragmentos se dispersan con el tiempo, visualizando la evolución del proceso desde la detonación inicial hasta la distribución final de los fragmentos.

Figura 34

Simulación de fragmentación en 4D con el software I-Blast

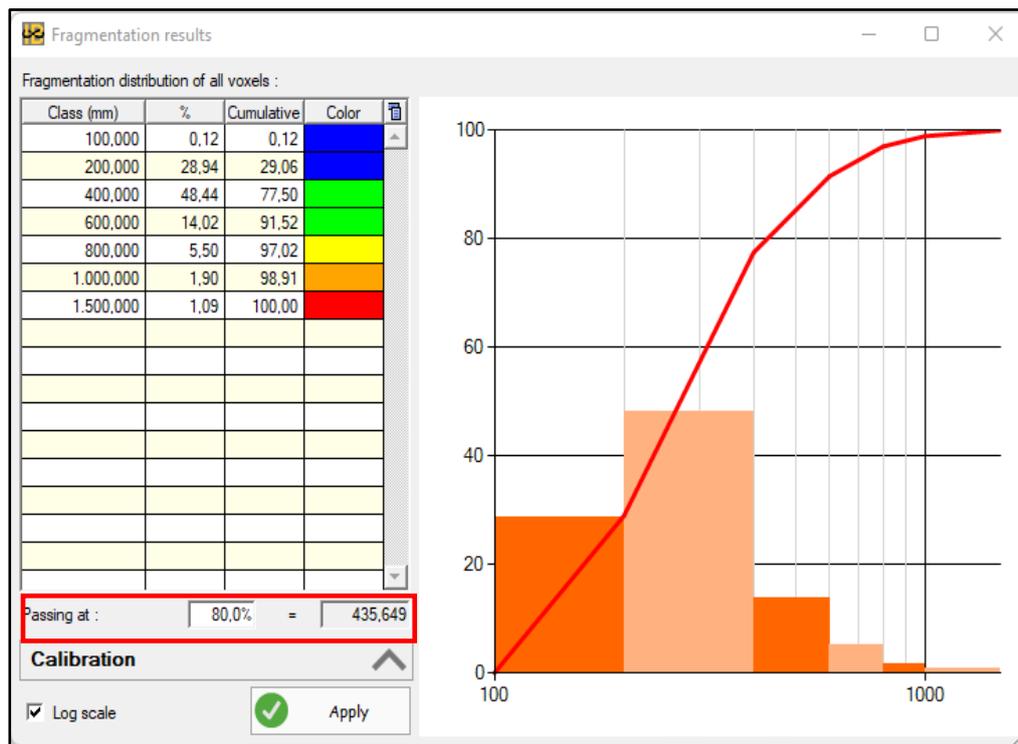


Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

Una vez completada la simulación, I-BLAST genera la curva de fragmentación que muestra la distribución del tamaño de los fragmentos generados dándonos el **P80** simulado para nuestro proyecto de estudio lo que permite evaluar la eficiencia de la voladura.

Figura 35

Simulación de P:80 con el software I-Blast



Fuente: Elaboración propia

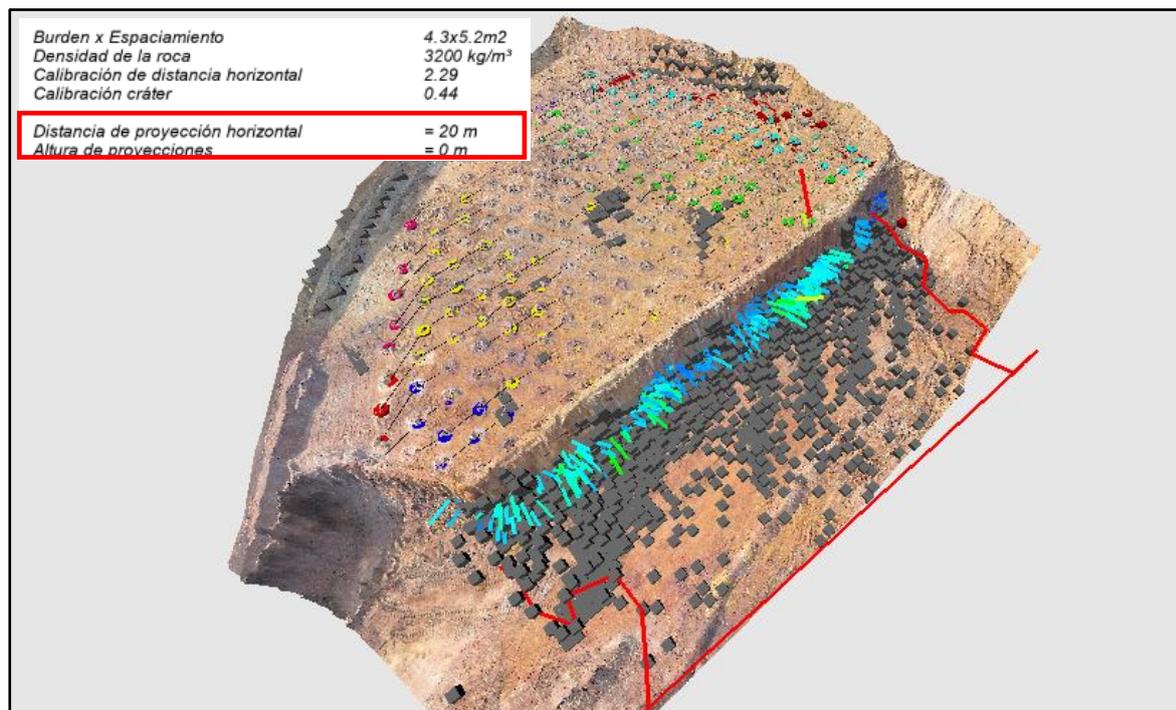
4.3.2.6.3. Simulación de desplazamiento

La simulación de desplazamiento de voladuras se refiere al modelado del comportamiento del terreno durante una voladura controlada. Este tipo de simulaciones es esencial para predecir el desplazamiento del terreno, la propagación de las ondas sísmicas, la fragmentación de las rocas y el impacto sobre las estructuras adyacentes. Estas simulaciones proporcionan información crucial para la optimización de diseños de voladuras, así como para mitigar riesgos y garantizar la seguridad de las operaciones.

Cuando se incorpora la simulación en 4D, la cual integra la dimensión temporal al análisis, se facilita la visualización y el estudio del desplazamiento del terreno a lo largo del tiempo, permitiendo observar la evolución de los efectos de la voladura desde su inicio hasta su estabilización. Tras la simulación de la fragmentación, que modela cómo las ondas de choque inducidas por la explosión fracturan las rocas y generan partículas de diversos tamaños, la simulación en 4D proporciona un análisis más detallado del comportamiento dinámico del terreno y los desplazamientos inducidos, para nuestro proyecto de estudio la simulación de desplazamiento es 20 m.

Figura 36

Simulación de desplazamiento del macizo rocoso



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

4.3.2.7. Costo de Voladura

El costo de voladura con los parámetros de diseños óptimos para el control de vibraciones se calcula mediante el producto de la cantidad de insumos por su precio unitario, el resumen del costo de la voladura descrita se detalla:

Tabla 19

Costos de Voladura en Mina Galinheiro / POL122_74 – N° 381- DNA

INSUMO	CANTIDAD	PU(US\$/KG)	COSTO
ANFO (Kg)	4500	0.517	2326.5
EMULSIÓN(Kg)	21460	0.443	9506.78
HEAVY ANFO(Kg)	0	0.465	0
BOOSTER 450g(Unid)	471	11	5181
DETONADORES ELECTRONICOS(Unid)	471	23	10833
DETONADORES NO ELECTRICOS BACKUP (Unid)	471	3	1413
AIR DECK (Unid)	246	6	1476
COSTO DE EXPLOSIVOS(US\$)			30736.28
COSTO DE EXPLOSIVOS (US\$/TON)			0.17767581

Fuente: Software I-BLAST versión 8.2

CAPITULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. Resultado de voladura

- Se ha detonado 246 taladros entre taladros de buffer y producción.
- El consumo de explosivo se detalla a continuación.

Voladura Explosivo Detonadores Actualizar			
Explosivos utilizados			
Descripción	Diámetro	Cantidad	Unidad
ANFO		4.500,00	kg
Emulsão Bombeável		21.460,00	kg
Booster 450g		471,00	u
Areia			
Detonadores electrónicos		471,00	u

- Se ha respetado el diseño de cargo propuesta según delimitación de zona geológicas y limitación por vibraciones.
- La secuencia de salida fue en líneas con tiempos entre taladros de 21ms y tiempo entre filas de 159ms.
- Se observo regular esponjamiento y buena fragmentación en la zona superficial.
- No se observó back break hacia el talud.

5.1.1 Resultados de vibraciones

Los resultados obtenidos en las estructuras geotécnicas críticas muestran una correlación altamente satisfactoria entre los datos simulados y los medidos, sin que se observe una superación del Valor de Pico de Vibración (VPP) límite establecido:

Tabla 20

Registro de vibraciones reales vs simulado en las estructuras geotécnica

Zona	X	Y	Z	Distancia a la voladura	Carga unitaria	K	Alfa	PPV Simulado	PPV Real	Diferencia
Cavidade MP-09	619.430,00	7.764.028,00	1.489,00	549	70.45	168.97	-0.82	4.92	4.48	-8.94%
Cavidade MP-11	618.508,00	7.767.911,00	1.337,00	278	70.45	125.21	-0.76	8.71	8.53	-2.07%
Barragem Vargem Grande	619.703,16	7.764.748,30	1.539,51	3662	70.45	3.61	-0.32	0.51	0.53	3.92%

Fuente: Elaboración Propia

Figura 37

Registros de vibraciones en las estructuras geotécnicas



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

Así mismo se ha procedido a la instalación de seis (6) sismógrafos con el fin de llevar a cabo un monitoreo preciso de las vibraciones en las estructuras geotécnicas Cavidade MP-09 y Cavidade MP-11. A continuación, se detallan los resultados obtenidos de dicha medición:

Tabla 21

Registro de vibraciones reales vs simulado en dirección las estructuras geotécnicas

Zona	X	Y	Z	Distancia a la voladura	Carga unitaria	K	Alfa	PPV Simulado	PPV Real	Diferencia
PT-01 - MP-09	619485.05	7764466.01	1413.00	174	50.45	168.97	-0.82	12.74	12.24	-3.92%
PT-02 - MP-09	619625.08	7764650.56	1492.00	415	60.45	168.97	-0.82	5.50	5.00	-9.09%
PT-01 - MP-11	619350.58	7764204.49	1410.00	69	70.45	125.21	-0.76	23.84	24.85	4.24%
PT-02 - MP-11	619379.32	7764140.5	1467.00	153	70.45	125.21	-0.76	11.09	13.55	22.18%

Fuente: Elaboración propia

Figura 38

Registros de vibraciones en dirección las estructuras geotécnicas



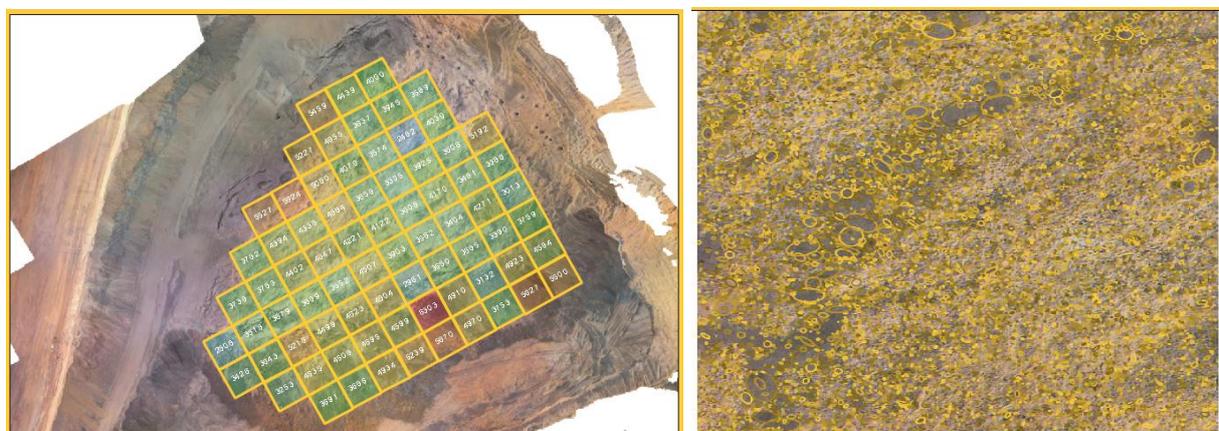
Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

5.1.2 Resultado de fragmentación

Se ha realizado la evaluación de fragmentación por medio de imágenes de drone y procesadas en el software I-Blast, se analiza el grado de fragmentación de la ortofoto, asignando cuadrículas que permiten al software calcular la granulometría de cada área. Con esta información, determina el tamaño medio y el P80.

Figura 39

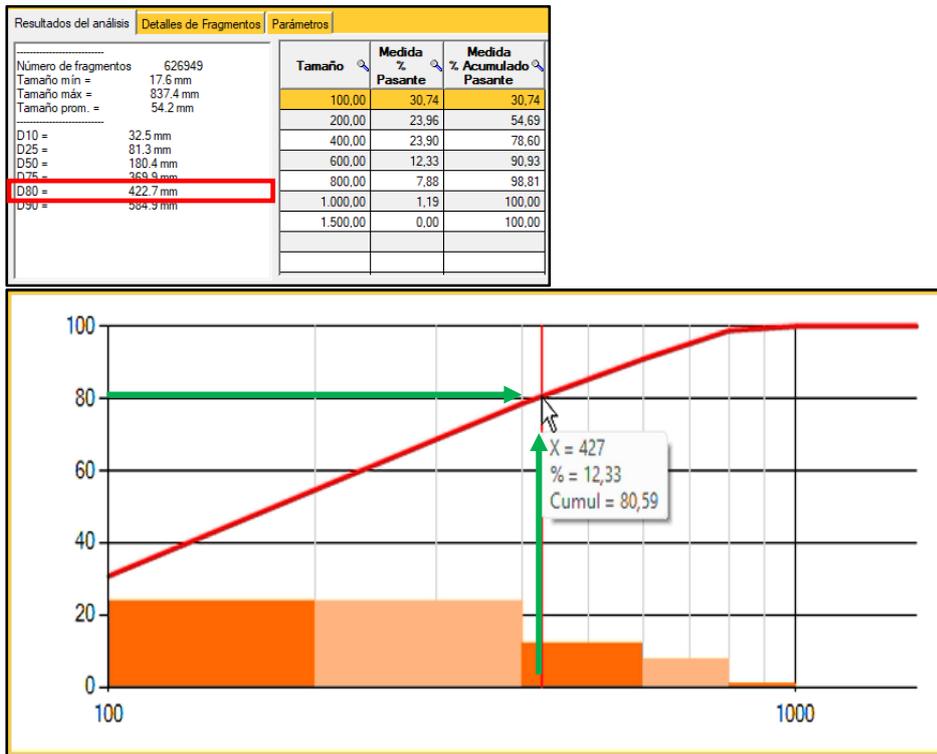
Análisis de fragmentación



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

Figura 40

Resultado del análisis de fragmentación real



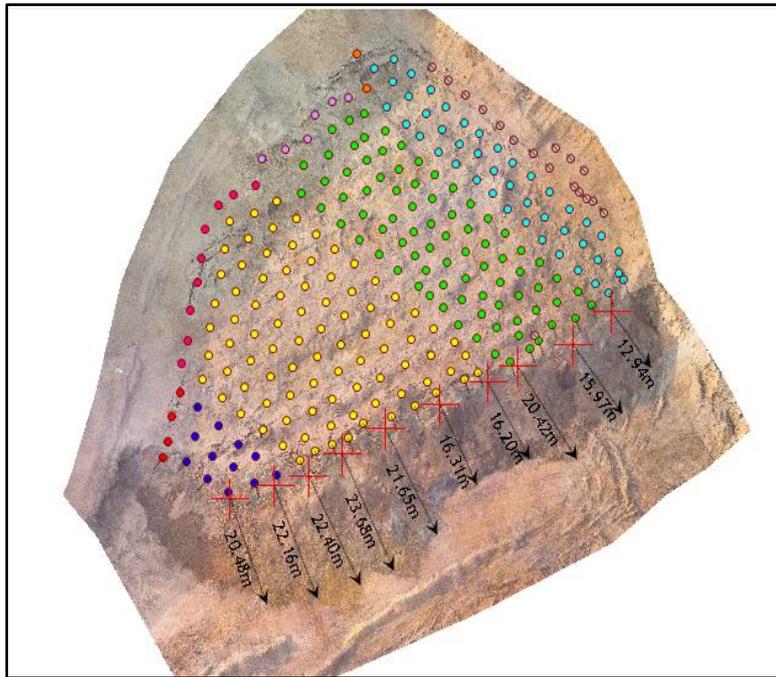
Fuente: Elaboración propia

5.1.3 Resultado de desplazamiento

A través del procesamiento de imágenes capturadas por dron, se lleva a cabo la generación de la nube de puntos del material volado. Posteriormente, mediante la utilización del software I-Blast, se determina el desplazamiento:

Figura 41

Resultado del desplazamiento real



Fuente: Software I-BLAST versión 8.2.

5.2. Discusión

- Según la norma (ABTN, 2018), el límite establecido de VPP en cavidades naturales es de 5 mm/s. En nuestro estudio, el VPP real reportado es de 4.48 mm/s, lo que se encuentra por debajo del límite máximo permitido, indicando que el valor está dentro del rango establecido por la normativa. Esto demuestra que los parámetros de la voladura han sido adecuadamente analizados y controlados, garantizando que las vibraciones no superen los niveles seguros y contribuyendo a la protección de las estructuras cercanas.
- En el estudio de Rezaeineshat, Monjezi y Mehrdanes (2020), se emplearon datos de 112 operaciones de voladura para desarrollar un modelo de red neuronal artificial (ANN) que predice la velocidad de partícula pico (PPV), logrando una reducción del PPV en un 59%. En nuestra investigación, se analizaron 11 proyectos de voladura en la misma área geotécnica, con el fin de construir un modelo predictivo mediante la aplicación de la distancia escalonada de DIVANE y el software de simulación I-Blast. En este enfoque, se optimizaron los parámetros más influyentes en la propagación de vibraciones, como la carga total de explosivo, los tiempos de retardo, la secuencia de voladuras y las simulaciones de propagación de ondas sísmicas. Como resultado, se alcanzó una reducción del PPV del 51%, lo que evidencia la eficacia de los métodos

de control basados en simulación numérica y análisis de parámetros dinámicos para minimizar las vibraciones a las estructuras geotécnicas.

- Según la tesis de (Ollero, 2021) para la reducción de vibraciones, se propone un nuevo modelo de diseño de voladura que considera un diseño adecuado de taladros y una distribución optimizada de la carga explosiva, lo cual permitió reducir el VPP (Valor Pico de Vibración) en un 77%, en nuestro trabajo de investigación, no nos limitamos únicamente a la carga explosiva para controlar las vibraciones, ya que se ha demostrado que otros factores también inciden en la reducción de las vibraciones sin afectar la fragmentación, que es un aspecto igualmente crucial, teniendo en cuenta esta diversidad de factores, nuestra investigación se centra en el control de diversos parámetros de voladura, tales como la carga explosiva, el tiempo de retardo, el diseño de la secuencia de salida y las simulaciones asociadas a estos elementos. De este modo, buscamos equilibrar eficazmente el control de vibraciones y una fragmentación adecuada, garantizando así un proceso de voladura eficiente y sostenible.
- Según (Delgado, 2014), el control de vibraciones en voladuras implica estrategias que abarcan el diseño de perforación, el diseño de voladura (carguío y secuencia de salida), el control de eyección y la evaluación de vibraciones, destacando que estas prácticas previenen daños a las infraestructuras cercanas. En nuestra investigación, se analizan todos estos factores mencionados, incorporando además la simulación del diseño de voladura mediante el software I-Blast. Esta herramienta nos permite obtener una visión más clara y precisa de los resultados en cuanto a niveles de vibración, fragmentación y desplazamiento, lo que optimiza el proceso y facilita la toma de decisiones.
- Según (Oliveira, 2022), Para el control de vibraciones, se aplicó el método de distancia escalonada a raíz cuadrada, determinando los coeficientes K y Alfa óptimos para cada dirección. Este enfoque demostró ser altamente eficaz en la limitación de la carga máxima de explosivo, un factor crucial en la generación de vibraciones. En el marco de nuestra investigación, se desarrollaron modelos predictivos utilizando los valores de K y Alfa específicos para cada tipo de estructura geotécnica crítica. Esta metodología permite optimizar la carga explosiva, asegurando un control preciso de las vibraciones y minimizando el riesgo de daño en las estructuras geotécnicas

CONCLUSIONES

1. Mediante el diseño optimizado de los parámetros de voladura, que incluyó la formulación de una ley de atenuación con valores de $K = 168.97$ y $\text{Alfa} = -0.82$, se procedió a sectorizar los esquemas de carga en función de las simulaciones de vibración y las condiciones geológicas del terreno. Para ello, se emplearon cargas de 50 kg, 60 kg y 70 kg, utilizando explosivos del tipo ANFO y emulsión. Además, se diseñó una secuencia de disparo en líneas, con tiempos de retardo ajustados a partir del análisis de la onda elemental: 21 ms entre taladros y 159 ms entre filas. Esta configuración permitió una distribución más eficiente de la energía generada durante la voladura.
2. El diseño implementado, se consiguió reducir en un 51% el impacto de las vibraciones sobre la estructura geotécnica crítica Cavidade MP-09. Asimismo, se logró un control efectivo de las vibraciones en las demás estructuras geotécnicas afectadas, asegurando una gestión adecuada de las dinámicas generadas por las voladuras.
3. Mediante el uso del software I-BLAST, se generaron simulaciones detalladas que abarcaron aspectos clave como el diseño de las cargas, la secuencia de disparos, los tiempos óptimos, las vibraciones, la fragmentación y el desplazamiento. Estos resultados permitieron realizar un análisis comparativo exhaustivo y obtener predicciones precisas, lo cual fue esencial para la optimización del proyecto.
4. Con el diseño propuesto, los resultados de la fragmentación mostraron un P80 de 422 mm, un 2.98% menor que el valor simulado, cumpliendo así con los requisitos establecidos por la planta. Además, el desplazamiento real registrado fue de 23 m, lo que se ajustó a las expectativas del proyecto, confirmando la eficacia del diseño de carga y la secuencia de disparos en la mejora de los resultados.

RECOMENDACIONES

1. El diseño realizado es aplicable al sector de estudio por lo cual se recomienda sectorizar las zonas más críticas en la mina – Área de P&V.
2. Para voladuras cercanas a las estructuras críticas se recomienda la construcción de la ley de atenuación con registros sismográficos en sentido a las estructuras para la correcta simulación de vibraciones – Área de Asistencia técnica.
3. Se recomienda continuar con los estudios de onda elemental y sectorizar los tiempos óptimos para las diferentes estructuras críticas – Área de asistencia técnica.
4. Se recomienda continuar con los trabajos de implementar mezclas explosivas menos energéticas en las voladuras de contorno, a fin de evitar el daño en las estructuras críticas – Área de asistencia técnica.

BIBLIOGRAFÍA

- ABTN. (2018). *Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivo nas minerações em áreas urbanas*. Brasil.
- Ash, R. (1997). *Diseño de voladura*. Mexico.
- Bernard, T. (2008). A unique Web based blasting simulator that allows the selection of best initiation sequence based on production objectives.
- Cano, J. (2019). *Estudio de vibraciones para la selección de explosivo Óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. Filial de Hochschild*. Cerro de Pasco-Perú.
- Delgado, M. (2014). *Estrategias en el diseño de perforación y voladura para estructuras aledañas controlando vibraciones y rocas al aire en minas a tajo abierto*. Arequipa - Perú.
- Dorr, J. (1969). *Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. Washington.
- EIA, A. (2022). *Supressão Áreas Licenciadas Cava Galinheiro e PDER Cianita | Mina do Pico*. Brasil.
- Endo, I., & Machado, R. (2002). *Reavaliação e novos dados geocronológicos (Pb/Pb e K/Ar) da região do quadrilátero ferrífero e adjacências*. Brasil.
- Endo, I., & Machado, R. (2002). *Reavaliação e novos dados geocronológicos (Pb/Pb e K/Ar) da região do quadrilátero ferrífero e*. Brasil.
- Endo, I., Machado, R., Galbiatti, H., Rossi, D., Zapparoli, A., Delgado, C., . . . Oliveira, M. (2020). *Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Brasil.
- FAMESA. (2019). *Manual de Perforación y Voladura*. Lima.
- Fernandes, E. Z. (2008). *Caracterização Física, Química, Mineralógica e Metalúrgica dos Produtos Granulados de Minério de Ferro*. Brasil.
- Isidora, L. (2018). *Estudio de vibraciones inducidas por la tronadura de rocas*. Chile.
- Jorge, C., & Juan, H. (2011). Modelización de parametros de voladura para la optimización del proceso minero: La voladura computarizada., (pág. 12). Ecuador .

- Jose, B., Jorge, C., & Juan, H. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Madrid.
- Konya, C., & Albaraan, E. (1998). *Diseño de voladura*. Mexico.
- Lopez, J. (1987). *Manual de Perforación y Voladura*. España.
- Machado, N., Schrank, A., Noce, C., & Gauthier, G. (1996). *Ages of detrital zircon from Archean-Paleoproterozoic sequences: Implications for Greenstone Belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil*. Brasil.
- Machado, R., & Endo, I. (2002). *Reavaliação e novos dados geocronológicos (Pb/Pb e K/Ar) da região do quadrilátero ferrífero e adjacências*. Brasil.
- McKenzie, C. (1994). *Estado del arte de la tronadura*. Chile.
- Oliveira, I. d. (2022). *Control de vibraciones generados por la voladura de rocas em estructuras geotecnicas*. Brasil.
- Ollero, J. (2021). *Reducción de vibraciones en el Municipio de Santo Domingo con la Cerro de Pasco-Perú*.
- Paul, W., & Lusk, B. (2011). *Explosives and blasting*. Estados Unidos.
- Perez, S. (2018). *Optimización de voladuras y vibraciones generadas*. Colombia.
- Rosiere, C., & Chemale, F. (2000). *Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero – Uma visão geral e discussão*. Brasil.
- Sanchidrian, J., & Muñiz, A. (2000). *Transmitted shock wave through the rock mass*. New Jersey.
- Silva, A. (1992). *Geologia e Petroquímica dos Enxames de Diques Máficos do Quadrilátero Ferrífero e Espinhaço*. Brasil.
- Valdir, C. (2019). *Voladura de rocas*. Brasil.
- Valencia, J. (2019). *Diseño de voladura para la optimización de fragmentación en el mineral y desmonte, mediante el control de vibraciones y velocidad de detonación en mina San Rafael MINSUR S.A. Arequipa-Perú*.
- Ventura, L. (2009). *Análise da Influência de Barreiras Hidráulicas no Padrão do Fluxo e na Estabilidade de Taludes de Cavas a Céu Aberto de Minas de Ferro do Quadrilátero Ferrífero*. Brasil.

ANEXOS

ASPECTOS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

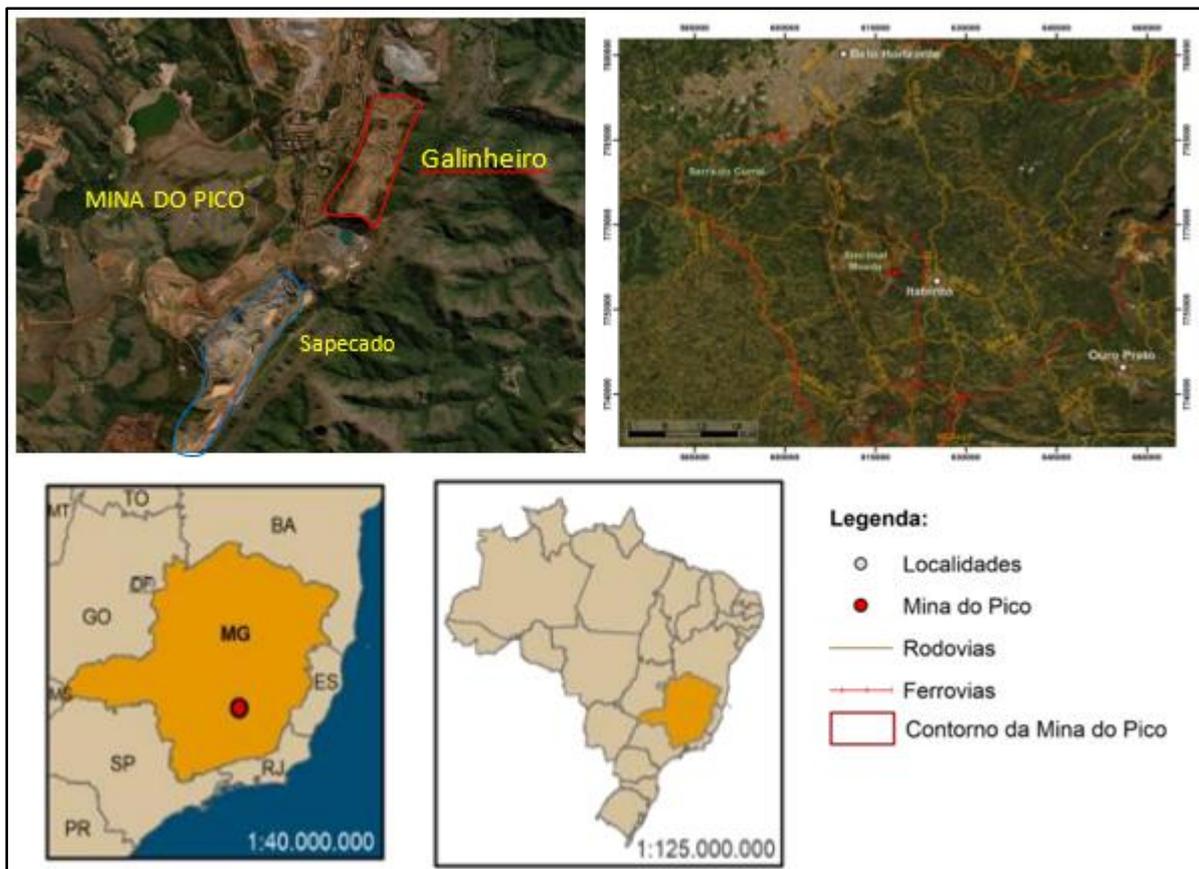
UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Ámbito de investigación

Mina do Galinheiro, perteneciente a la compañía minera Vale, está situado geográficamente en la región de Itabirito – Minas Gerais y geológicamente en la parte centro-sur del flanco este del Sinclinal Moneda, en el dominio occidental del cuadrilátero Ferrífero, entre las coordenadas 20°14'41" latitud S, 43°52'27" Longitud W y altitud 1440 m.s.n.m. coordenadas SAD (69) / UTM ZONE 23S.

Figura 42

Localización de la mina Galinheiro



Fuente: Google Earth 11 noviembre 2023

Accesibilidad

El acceso a la mina es realizado por la vía nacional BR-040, a partir de Belo Horizonte sentido Ouro Preto aproximadamente a 30 km. y vía nacional BR-356 sentido Itabirito hasta

la estación de la Policía Federal aproximadamente 12 km, en esta se encuentra un acceso a la derecha de 3 km que lleva a las instalaciones de la mina.

Tabla 22

Rutas de acceso a Mina Galinheiro

De	ASA	Tipo de vía	Tiempo (hr)	Distancia (km)
Belo Horizonte	Mina Galinheiro	BR-040 (asfaltada)	3	33
Itabirito	Mina Galinheiro	BR-356 (asfaltada)	00:40	15

Fuente: Elaboración propia

Clima

Esta zona tiene climas tropicales con veranos templados y húmedos, temperaturas diurnas de 37°C y temperaturas nocturnas de 27°C e inviernos secos con temperaturas diurnas de 25 °C y temperaturas nocturnas que descienden a 8°C.

Flora

En cuanto al estudio sobre la flora y la vegetación en contexto del área de este estudio (EIA, 2022), se registraron 702 especies vegetales, distribuidas en 357 géneros y 109 familias botánicas. Las 10 familias más representativas con mayor incidencia de especies fueron: Asteraceae (88 especies), Fabaceae (48 especies), Melastomataceae (45 especies), Myrtaceae (39 especies), Poaceae (37 especies), Orchidaceae (29 especies), Rubiaceae (24 especies), Solanaceae (22 especies), Apocynaceae (19 especies) y Euphorbiaceae (16 especies). En este sentido, los géneros más representativos fueron: Myrcia (Myrtaceae), Miconia (Melastomataceae), Solanum (Solanaceae), Baccharis (Asteraceae), Paspalum (Poaceae), Myrsine (Primulaceae), Vernonanthura (Asteraceae), Croton (Euphorbiaceae), Eugenia (Myrtaceae) y Mandevilla (Apocynaceae) y Mimosa (Fabaceae).

Fauna

Mamíferos terrestres

A través de los datos fueron diagnosticadas 27 especies de mamíferos pequeños no voladores para el área de estudio, dividiéndose en 5 familias y 2 órdenes: la familia Cricetidae (Rata de bosque) presentó 13 especies, Didelphidae (Zarigüeya) presentó 10 especies, Scuridae (Ardilla) con 2 especies, Caviidae (Conejo) y Erethizontidae (Eriso) con solo 1 representante cada uno.

A través de la recopilación de datos recabados para el área de estudio, se registraron la presencia de 27 especies de mamíferos terrestres de tamaño mediano a grande, Las especies diagnosticados se dividen en 7 órdenes y 13 familias. La familia Felidae (Jaguar) fue la más representativa, presentando 6 especies, seguida de Dasypodidae (Armadillo) con 4 especies, Canidae (Lobo guará) con 3 especies, Mustelidae (Hurón), Procyonidae (Mapache), Cervidae (Venando de bosque) y Mephitidae (Zorrillo) presentaron 2 especies cada una. Las demás familias presentaron solo 1 representante.

Entre los animales registrados con ocurrencia en el área de estudio 11 especies están clasificadas en grado de amenaza, Caititu (*Dicotyles tajacu*), Lobo guará (*Chrysocyon brachyurus*), Zorro del campo (*Lycalopex vetulus*), Jaguatirica (*Leopardus pardalis*), Gato del monte pequeño (*Leopardus guttulus*), Gato del mato (*Leopardus tigrinus*), Gato maracajá (*Leopardus wiedii*), Onza parda (*Puma concolor*), Jaguarundi (*Herpailurus yagouaroundi*), Nutria Neotropical (*Nutria longicaudis*), Guigó (*Callicebus nigrifrons*) (EIA, 2022)

Mamíferos voladores

Durante la recolección de datos en el área de estudio, se identificaron 20 especies de murciélagos pertenecientes a dos familias: Phyllostomidae y Vespertilionidae. La familia Phyllostomidae resultó ser la más predominante, con 15 especies (75%), mientras que Vespertilionidae representó el 25% restante con 5 especies. Cabe destacar que Phyllostomidae, considerada la familia de murciélagos neotropicales más diversa, incluye más de 200 especies distribuidas en 60 géneros. (EIA, 2022).

Entomofauna – Dípteros

En el área de estudio se identificaron un total de 21 especies de dípteros, clasificadas en dos familias principales: Psychodidae (zancudos), con 7 especies registradas, y Culicidae (mosquitos), con 14 especies. No se detectaron especies en riesgo de extinción dentro de esta categoría durante el muestreo. (EIA, 2022)

Entomofauna – Lepidóptera

Con base en los estudios disponibles, se identificaron 141 especies de lepidópteros distribuidas en seis familias en la región evaluada. La familia más representativa fue Nymphalidae, con 100 especies registradas, seguida por Pieridae, con 18 especies. También se identificaron especies de Papilionidae (12), Hesperidae (5), Riodinidae (5) y Lycaenidae (1). No se registraron especies en estado de amenaza o peligro de extinción dentro del área de estudio. (EIA, 2022)

Entomofauna – Apifauna

Se han encontrado 64 especies de abejas en los trabajos consultados para el diagnóstico pertenecientes a la familia Apidae (Abejas), que poseen estructura especial para el transporte de néctar llamada corbícula. No se encontraron especies en peligro de extinción en el área de estudio. (EIA, 2022)

GEOLOGÍA REGIONAL

El área de estudio se sitúa en la región occidental del Cuadrilátero Ferrífero, específicamente en el borde centro-oriental del Sinclinal Moneda. Esta zona es de gran relevancia para Brasil debido a su riqueza en recursos minerales, particularmente hierro, y está compuesta por formaciones rocosas que registran parte significativa de la evolución geológica de la Tierra, vinculadas a los períodos Arqueano y Paleoproterozoico. Asimismo, conserva evidencias de más de tres siglos de explotación minera continua, centrada principalmente en la extracción de oro e hierro.

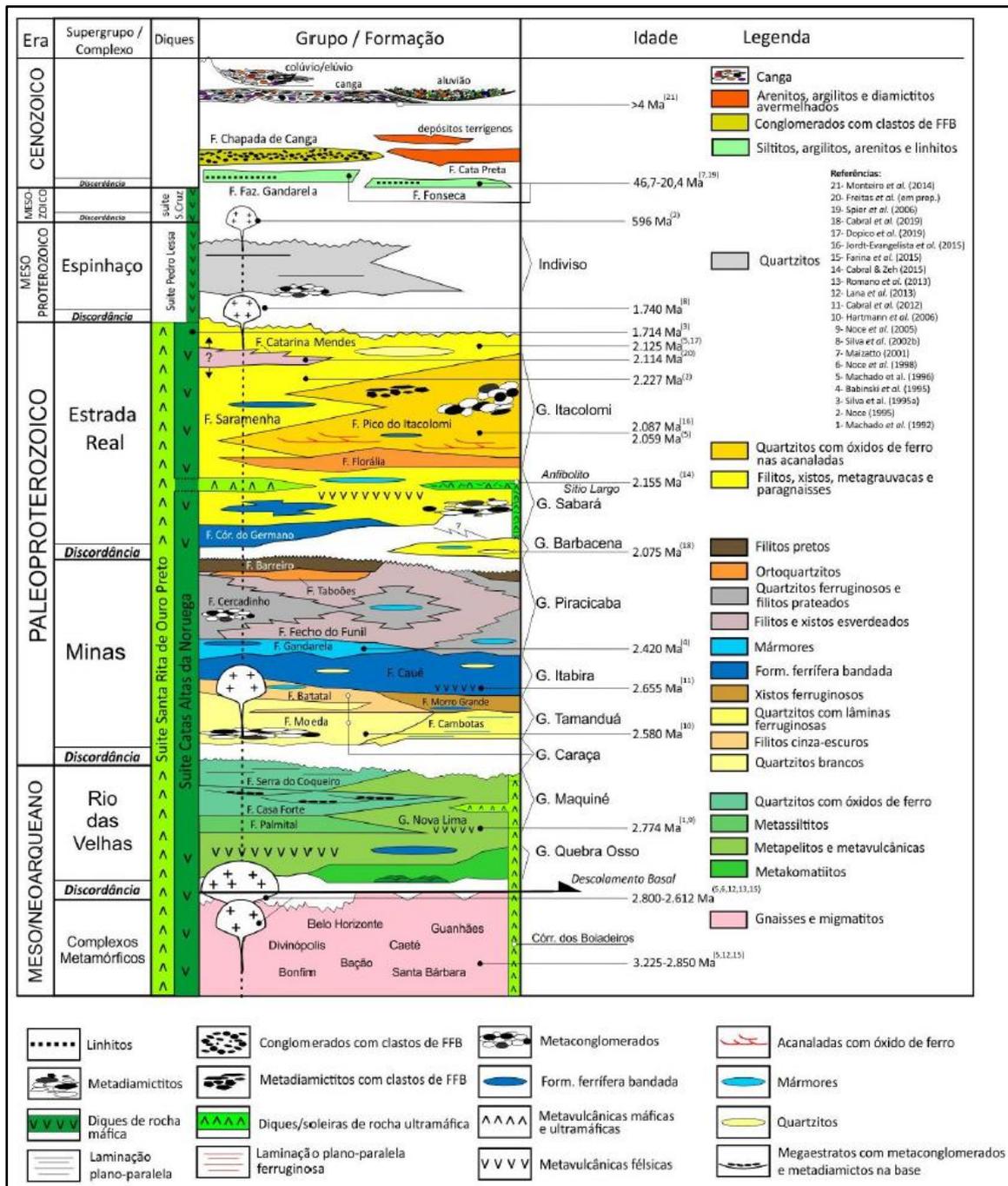
El distrito geológico del Cuadrilátero Ferrífero se ubica en la región central del estado de Minas Gerais y abarca una superficie aproximada de 7.000 km². Desde el punto de vista geotectónico, se asienta sobre el borde meridional del Cratón São Francisco, cuya consolidación ocurrió al final del ciclo Brasileño, posterior a los procesos orogénicos del Neoproterozoico que dieron origen a las fábricas geológicas conocidas como franjas brasileñas.

Las unidades litoestratigráficas aflorantes en el Cuadrilátero de Hierro (QFe) están formadas por:

- Complejos metamórficos (basamento arqueano).
- Una sucesión tipo greenstone belt de edad neoarqueana, caracterizada por secuencias metavulcanosedimentares de bajo-medio grado (Supergrupo Río das Velhas).
- Rocas sedimentarias de bajo grado-medio del Paleoproterozoico (Supergrupo Minas).
- Rocas metasedimentarias y metavolcánicas (Supergrupo Estrada Real).
- Metarenitos y metaconglomerados (Supergrupo Espinhaço).
- Intrusiones magmáticas.
- Apariciones restringidas de depósitos sedimentarios clásticos de edad cenozoica.

Figura 43

Columna estratigráfica según el nuevo mapa del Cuadrilátero Ferrífero



Fuente: Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero (Endo, y otros, 2020)

Complejos metamórficos

(Machado, Schrank, Noce, & Gauthier, 1996) Los complejos metamórficos que forman el subsuelo cristalino arquerano del QFe (ver Imagen 14) incluyen los complejos Bonfim, Santa Rita, Caeté, Belo Horizonte, Santa Bárbara y Bação. Estos complejos están compuestos principalmente por rocas gneísicas polideformadas (ortogneises) y migmatitas, con presencia subordinada de granitoides, anfibolitos e intrusiones máficas a ultramáficas. Entre ellos, los bloques que afloran cerca de la estructura del Sinclinal Moneda son el Complejo Bonfim, ubicado al oeste del sinclinal y el Complejo Bação situado al este, siendo este último el más cercano a la mina de Galinheiro.

Supergrupo Río das velhas

El Supergrupo Rio das Velhas se clasifica como una sucesión de tipo greenstone belt, compuesto por rocas basálticas, komatitos, lava riolítica e intercalaciones de rocas meta-sedimentarias. El vulcanismo félsico de esta unidad tiene una antigüedad de 2.776 Ma, coincidiendo con el plutonismo granítico en los complejos metamórficos de Caeté y Bonfim, mientras que las intrusiones de rocas máficas y ultramáficas se habrían producido alrededor de 2.675 Ma. Las rocas del supergrupo están altamente deformadas y presentan un metamorfismo que varía desde fases de esquisto verde hasta anfibolito. Originalmente, se dividieron en dos grupos: Nova Lima (inferior) y Maquiné (superior), separados por un contacto gradacional a discordante. Posteriormente, se añadió el Grupo Quebra Osso a esta clasificación (Endo, y otros, 2020).

Grupo Quebra Osso

El Grupo Quebra Osso es un conjunto de rocas metavolcánicas, ultramáficas y felsicas que se encuentran en el borde este del QFe, pertenecientes a la base del supergrupo Río das Velhas. (Endo, y otros, 2020)

Grupo Nova Lima

El Grupo Nova Lima está constituido principalmente por esquistos, xistos de clorita y filitos que muestran influencias de cizallamiento y actividad de fluidos hidrotermales. De forma subordinada, se encuentran grafito filito, formaciones ferríferas, dolomitas, esquistos cuarzo-ankerito, metagrauvas y cuarcitos. Este grupo experimentó metamorfismo durante el Neoarqueano Inferior (orogenia Rio das Velhas) bajo condiciones de anfibolito (Machado & Endo, 2002).

El Grupo Nova Lima se subdivide en tres unidades sedimentarias distintas: i) una unidad metavolcánica, que incluye rocas ultramáficas, metabasaltos, metatufos, komatiitos, serpentinitos, esteatitos y formaciones ferrosas del tipo Algoma; ii) una unidad

metasedimentaria química, compuesta por xistos carbonáticos, filitos de grafito y formaciones ferríferas; y iii) una unidad metasedimentaria clástica, formada por xistos de cuarzo, cuarcitos inmaduros y metaconglomerados.

Grupo Maquiné

El Grupo Maquiné se compone de areniscas marinas y aluviales, conglomerados y pelitos, y se interpreta como una secuencia de plataformas. Los depósitos de este grupo se formaron hace 2,66 Ga, al igual que el establecimiento de un enjambre de diques máficos en un régimen transpresional sinistral. El metamorfismo y la deformación de las rocas ocurrieron entre 2,61 Ga y 2,55 Ga, junto con la intrusión de plutones graníticos. Originalmente, el grupo Maquiné estaba dividido en dos formaciones distintas la Formación Palmital (inferior), caracterizada por esquistos cuarzo-clorita, pizarras, cuarcitas sericíticas, filitos de sericita y filitos cuartosos; y la Formación Casa Fuerte (superior), distinguida por cuarcitas sericíticas, cloríticas y filitos (Endo, y otros, 2020)

Supergrupo de Minas

(Endo, y otros, 2020) El Supergrupo Minas está constituido por los grupos Tamanduá, Caraça, Itabira y Piracicaba y se formó entre 2,58 Ga y 2,42 Ga. Este supergrupo se caracteriza por una secuencia metasedimentaria que ha sido metamorfoseada bajo condiciones de fácies de esquistos verde y que alcanza la fácies de anfibolito en las áreas Sureste y Noreste del Cuadrilátero Ferrífero. Se puede considerar como una sucesión continental-marina con un espesor aproximado de 3.424 m, representando una fase en la evolución de una cuenca de margen pasivo. Desde la base hacia la cima, se depositaron primero los metassedimentos clásticos de los grupos Tamanduá y Caraça durante la fase de ruptura y la transición al desarrollo del margen pasivo. Posteriormente, se depositaron los metassedimentos marinos del Grupo Itabira, en contacto gradacional, los cuales constituyen el registro completo de esta cuenca de margen pasivo e incluyen la Formación Cauê, donde se localizan las formaciones ferríferas del Cuadrilátero Ferrífero. Finalmente, se depositaron las rocas metassedimentarias marinas del Grupo Piracicaba.

Grupo Tamanduá

El Grupo Tamanduá de unos 1037 m de espesor, se formó en un ambiente aluvial a marino. (Endo, y otros, 2020) subdivide el Grupo Tamanduá en dos formaciones: i) Formación Cambas (inferior) compuesta por cuartetos, ortocuartzitos, cuarzos con hojas ferruginosas, pizarras cuarzosas y arcillosas, y ii) Formación Morro Grande (superior) Compuesto por pizarras filíticas y cuarzosas, pizarras ferruginosas y formaciones ferríferas dolomíticas.

Grupo Caraça

El Grupo Caraça está formado por rocas metasedimentarias, cuarcíticas y filíticas, y se divide en dos formaciones: la Formación Moneda y la Formación Batatal. La Formación Moneda (inferior), con aproximadamente 500 m de espesor, se depositó en un ambiente aluvial-litoráneo-marino bajo influencia tectónica. Esta formación está compuesta, desde la base hasta la cima, por cuarcitas finas a gruesas, así como filitos cuarcosos y sericíticos. La Formación Batatal (superior), con un espesor aproximado de 700 m, se caracteriza por filitos sericíticos y carbonosos. (Dorr, 1969).

Grupo Itabira

El Grupo Itabira tiene un espesor de aproximadamente 1.100 m y se considera una secuencia predominantemente marina que abarca ambientes desde superficiales hasta profundos. Está compuesto por dos formaciones: la Formación Cauê y la Formación Gandarela. La Formación Cauê, con un espesor de 350 m, es la principal fuente de mineral de hierro en el Cuadrilátero Ferrífero y está formada por itabiritos, itabiritos dolomíticos, itabiritos anfíbolíticos, así como filitos dolomíticos, filitos de hematita, cuarcitos y mármoles. La Formación Gandarela está esencialmente constituida por mármoles y mármoles dolomíticos, e incluye mármoles dolomíticos, filitos dolomíticos, dolomitas ferruginosas y filitos de itabiritos. (Dorr, 1969)

Grupo Piracicaba

El Grupo Piracicaba tiene un espesor de aproximadamente 1.280 m y se compone de las formaciones Cercadinho, Fecho do Funil, Tabões y Barreiro. Este grupo se caracteriza por rocas metasedimentarias clásticas y químicas, metamorfoseadas en cuarcitas puras y ferruginosas, metassiltitos, filitos (grafito, dolomítico y ferruginoso) y lentes de dolomita. Los metasedimentos clásticos presentan una granulometría que varía desde fina hasta gruesa y fueron depositados en ambientes de transgresión marina. La Formación Cercadinho está formada por cuarcitas ferruginosas, filitos ferruginosos, filitos plateados, así como dolomitas, xistos sericíticos y metaconglomerados; la Formación Fecho do Funil incluye filitos dolomíticos, filitos y dolomitas quartzosas arcillosas, además de metassiltitos; la Formación Tabões está compuesta por ortocuarzitas; y la Formación Barreiro se caracteriza por filitos, filitos grafitados y xistos en menor proporción. (Dorr, 1969)

Supergrupo Carretera Real

Se añadió un nuevo supergrupo Paleoproterozoico a la estratigrafía del Cuadrilátero Ferrífero: el Supergrupo Estrada Real. Este supergrupo se superpone al Supergrupo Minas a través de una discordancia que es estructuralmente concordante y gradacional en algunas áreas. En él se encuentran las rocas sedimentarias marinas del Grupo Sabará (anteriormente parte del Minas) y las rocas continentales del Grupo Itacolomi, así como las unidades del Grupo Barbacena. Este último grupo está compuesto por grafito xistos, gonditos, queluzitos, metacherts, xistos manganesíferos, micaxistos, cuarcitas, filitos y rocas metaultramáficas, que son correlativas con el Grupo Sabará. El Supergrupo Estrada Real representa una sucesión de flysch y molasa sinorogénica con un espesor mínimo de 3.625 m. (Dorr, 1969)

Grupo Sabará

El Grupo Sabará está compuesto por las formaciones Córrego do Germano, formada por formación ferrífera de tipo bandal granular y cuarzos ferruginosos, formación Saramenha, compuesto por xisto clorita, xisto mica con intercalaciones de metagrauvas, cuarcitos y formación ferrífera bandada, y por la Formación Catarina Mendes compuesta por biotita-cuarzo xistos, cuarcitos y filitos. La edad probable de este grupo proporcionada por los circos detríticos es de 2,125 +/- 4Ma (Dorr, 1969).

Grupo Itacolomi

El Grupo Itacolomi se considera una secuencia de rocas supracrustales metamorfoseadas, depositadas alrededor de 2.100 Ma. Este grupo está compuesto por la Formación Florarias (inferior), que incluye ortocuarcitas, y la Formación Pico do Itacolomi (superior), que forma parte del Grupo Itacolomi y está constituida en su mayoría por cuarcitas con estratificación cruzada acanalada, metaconglomerados, cuarcitas, itabirito, filitos y granito. El espesor del grupo varía entre 80 y 350 metros, dependiendo de la ubicación. (Dorr, 1969)

Diques máficos

En el Cuadrilátero Ferrífero (QFe) se identifican cuatro eventos de formación de diques máficos con edades que oscilan entre 1,7 y 1,5 Ga y hasta 120 Ma. Estos diques conservan en parte o en su totalidad su textura original y, en los diques poco o nada deformados, se mantiene la química primitiva, lo que sugiere una correlación con basaltos intraplásticos continentales. Las variaciones en las concentraciones de elementos traza incompatibles indican fuentes mantélicas diversas o procesos de contaminación crustal. Los diques

metamorfizados presentan una composición mineralógica típica de las fácies de esquistos verde. Estos diques máficos muestran un enriquecimiento en hierro y cortan todas las estructuras pre-cámbricas. (Silva, 1992)

Depósitos Cenozoicos

Los depósitos cenozoicos del Cuadrilátero Ferrífero (QFe) se distinguen por varios tipos de sedimentos. Estos incluyen la Formación Fonseca, que abarca síltitos, arcillitas, areniscas y linhitos, con un conglomerado basal cubierto por canga. Además, se encuentran coberturas detrítico-lateríticas que consisten en suelos lateríticos residuales, materiales arenos-arcillosos, concreciones ferruginosas y concentraciones supergénicas de óxidos de hierro. También se observan depósitos aluviales, que comprenden canchales lateríticos y depósitos lacustres de arcilla, arenisca y linhita. Otros depósitos incluyen antiguos depósitos aluvio-coluviales y residuales, que contienen arcilla, arenas, gravilla y bauxita residual, así como depósitos aluvio-coluviales y residuales más recientes. (Silva, 1992).

Las unidades litológicas del supergrupo Río das Velhas fueron fuertemente deformadas antes de la deposición del supergrupo Minas. Junto con complejos graníticos gnáissicos, actuaron como cimentación de la cuenca Proterósica Minas (Marshak et al. 1992). Entre 2.6 y 2.4 Ga la región evolucionó a una cuenca de margen pasivo, donde se depositaron los sedimentos del Supergrupo Minas. Las unidades supracrustales de los Supergrupos Río das Velhas y Minas fueron sometidas a doblamientos en gran escala, formando anticlinales y sinclinales y el subsuelo cristalino subyacente fue levantado. Se formaron zonas de cizallamiento en las regiones de contacto del subsuelo y rocas supracrustales. Chemale et al. (1994) enfatizaron el desarrollo de megatendones y la elevación de las rocas del subsuelo cristalino a un evento estructural extensional durante el Paleoproterozoico. Chauvet et al. (1994) propusieron un modelo asociando un evento tectonomagmático como causa de la elevación del subsuelo cristalino y el doblamiento regional a gran escala de las secuencias supracrustales. Alkmim y Marshak (1998) interpretaron estas estructuras como consecuencia de un cinturón doblado y con fallas de empuje, desarrollado después de 2.125 Ga, durante el cierre del lavabo de margen pasivo. También concluyeron que el evento mencionado fue seguido por la elevación de las cúpulas del subsuelo contra las rocas supracrustales en 2.095 Ga, debido a un colapso orogénico.

Durante el ciclo brasileño (650 - 500 Ma), los empujes con vergencia hacia el oeste se superpusieron a las estructuras más antiguas, causando la inversión, amplificación, Traslación y rotación de los pliegues sinusoidales y desarrollo de inversones y estructuras dobladas representadas por las zonas de cizallamiento, fallas de rasgado, zonas de transiciones y tipos

variados de pliegues de menor amplitud (Chemale et al. 1994, Chauvet et al. 1994, Alkmim y Marshak, 1998, Rosière et al. 2001).

GEOLOGÍA LOCAL

La mina de Galinheiro se ubica en el extremo norte del Sinclinal Moneda, El depósito mineral de la Mina de Galinheiro tiene una extensión de 1.400 x 1.300 metros e incluye las formaciones Cauê (FFB) y Gandarela (Grupo Itabira), así como los cuarzos de granulometría fina a media de la formación Moneda, que gradúan hacia filitos sericíticos, dolomíticos y cuartosos con lentes de meta-chert y filitos de la formación Batatal, ambos del Grupo Caraça. También se observan diques y soleras de rocas metabásicas intrusivas y depósitos cenozoicos arcillosos laterizados, además de colivios compuestos por bloques rodados de hematita, arcillas y cangas lateríticas.

Los cuerpos minerales de la mina están compuestos de mineral hematítico en forma de lentes con anchos que van desde metros hasta los centenares de metros y extensiones de 100 a 1000 metros. Hay dos tipos distintos de mineral de hierro en la mina Galinheiro: itabiritas de alta ley (>64% Fe) e itabiritas ricas y bajas en alúmina (52%<Fe<64%), ambas incrustadas en itabiritas de silicios pobres, de consistencia media, compactas y friables.

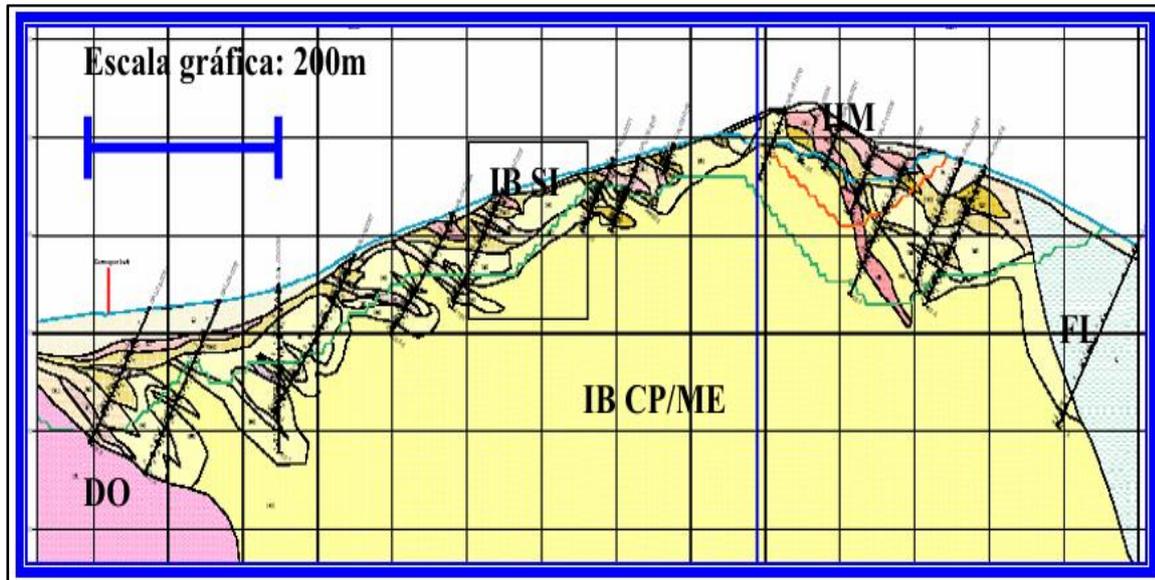
La geometría de los cuerpos de los minerales compactos es parcialmente controlada por un lecho que presenta pliegues a pequeña escala, con caída de los ejes de E a NE. El cuerpo compacto más grande se presenta como una lente vertical, presentando un bandeo definido por la alternancia entre las capas compactas y porosas. Una foliación tectónica está débilmente desarrollada, con cierta especularita orientada en zonas de cizalladura. El mineral brechado se produce en la base, compuesto por fragmentos de mineral compactos de varios centímetros en una matriz delgada. Los pliegues y fallas desarrollados durante la orogenia de Brasiliano, rotaron y elevaron los cuerpos compactos, desarrollando bandas de retorcimiento y fracturas que fueron responsables de la geometría final del depósito y permitieron la meteorización profunda de las itabiritas, generando los cuerpos de hematitas blandas y actuando como barrera hidrogeológica, generando hematitas blandas hasta 400 metros de profundidad. Mateados de itabirita y mineral compacto, cementados por arcillas, cuarzo y hematita se presentan en la base de pequeñas cuencas, de edad paleoceno a eoceno, distribuidas irregularmente a lo largo de la secuencia de la mina.

La hematita compacta, o hematitito, se forma a partir de procesos hidrotermales mineralizantes que se desarrollaron durante los eventos transamazónicos y brasileños, seguido por la verticalización de los cuerpos al final del Paleoproterozoico, coincidiendo con la formación de la estructura regional del Sinclinal Moeda. En la mina, el mineral de alteración supergénica suele presentarse como una capa delgada cubierta superficialmente por canga, que a menudo conserva la estructura original de los itabiritos o se transforma en una masa

esponjosa de bloques de hematita cimentados por limonita, acumulada en la base del Pico. El mineral brechado se desarrolla en fallas y zonas de cizallamiento, donde se encuentran fragmentos de hematita compacta o itabirita en una matriz de cuarzo, carbonato o hematita, apareciendo como bolsas discontinuas distribuidas de manera irregular (Rosiere & Chemale, 2000).

Figura 44

Sección geológica típica de la Mina Galinheiro basada en sondajes



Leyenda: HM – Mineral Hematítico; IB SI – Mineral de itabirito friable, IB CP/ME – Mineral de itabirito compacto/medio; FL – Filito; DO - Dolomita

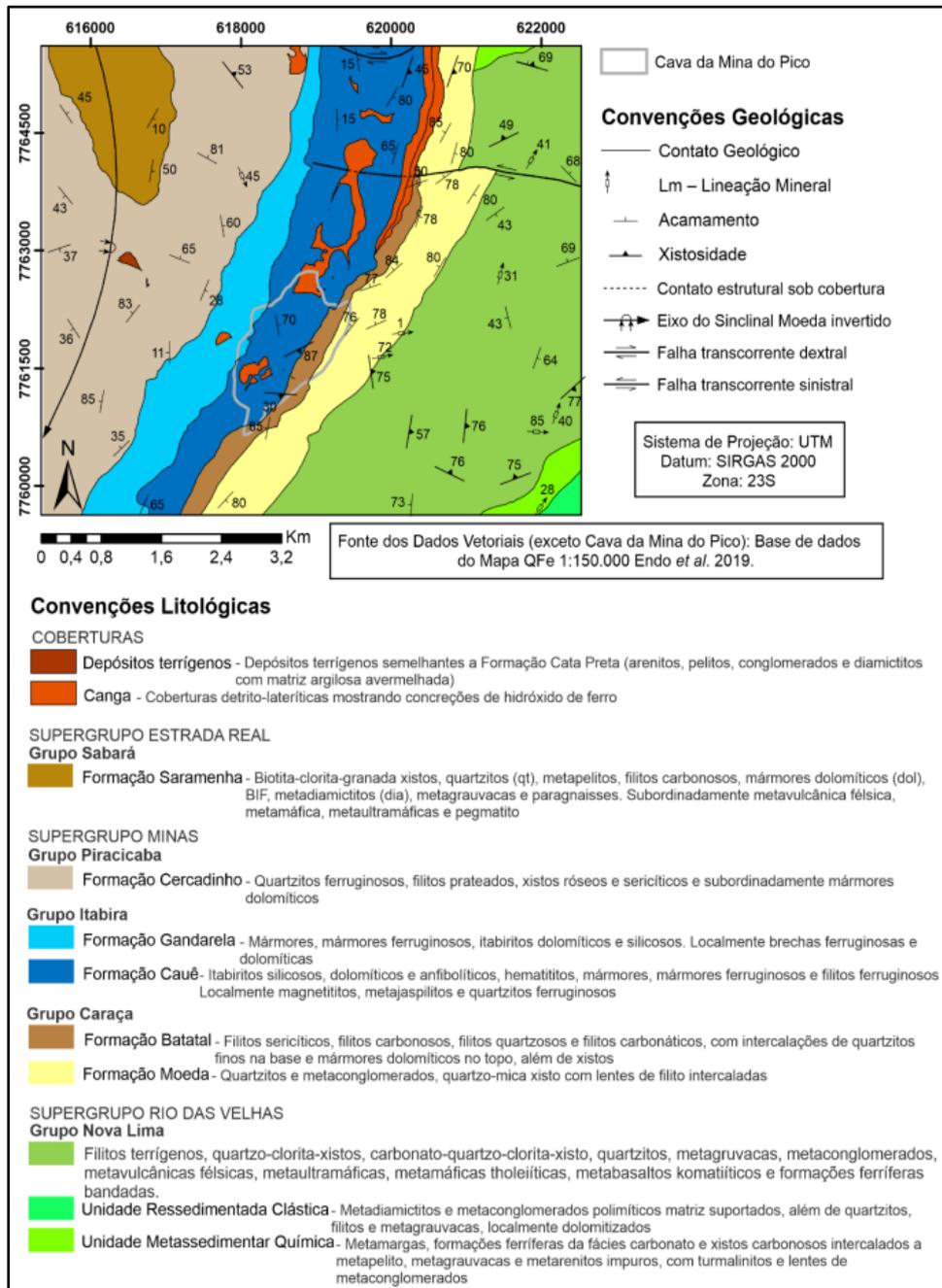
Fuente: Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero (Endo, y otros, 2020).

Los afloramientos del grupo Caraça se encuentran en la porción sureste de la mina, constituidos por cuarzitos de la Formación Moneda, superpuestos por filitos sericíticos de la Formación Batatal, alterados, con coloración gris clara o amarillenta. En la parte norte de la mina se encuentra un gran cuerpo intrusivo básico de dirección NE-SW y inmersión subvertical a NW que corta toda la secuencia metasedimentaria (Ventura, 2009), en la sección este de la mina se encuentran las litologías de la Formación Moneda y Batatal, así como la Formación Cauê, que aparece en forma de lentes de hematita compacta, hematita supergénica e itabiritos friables, con una notable variabilidad en el contenido de sílice. Dentro de la Mina de Galinheiro, las hematitas se distribuyen en dos principales dominios: i) En el área del Pico propiamente dicho, se encuentran itabiritos ricos y lentes de hematita, donde la hematita compacta está fracturada y rodeada por hematita supergénica. ii) En la parte norte y noreste de la mina, al sur del dique de rocas máficas y ultramáficas, y en contacto con el filito de la Formación Batatal, se hallan lentes de hematita supergénica junto con lentes de

hematita compacta, con espesores que varían entre 5 y 50 metros. En este último dominio también son comunes las intercalaciones de itabirito friable a compacto, que muestran grandes variaciones en el contenido de hierro.

Figura 45

Mapa Geológico da região da Mina Galinheiro



Fuente: Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero (Endo, y otros, 2020).

OPERACIONES UNITARIAS

Perforación

En la mina Galinheiro se realizan perforaciones de taladros de producción con diámetros 8" y 6 3/4" y taladros secundarios de 6 3/4", las mallas de perforación que se destacan en esta operación son las mallas triangulares y cuadradas según el diseño de acuerdo al tipo de material rocoso, la distribución de las maquinas perforadoras se realiza según el tipo de voladura (producción y secundaria).

La flota de perforadoras de detalla en la siguiente tabla:

Tabla 23

Flota de perforadoras en la mina Galinheiro

Material	Fabricante	Modelo	N° Unidades	Diámetro
	Caterpillar	MD 6290	5	8"
Mineral	Caterpillar	MD 6250	2	8"
	Atlas Copco	D65	2	6 3/4"
Desmonte	Atlas Copco	D65	2	6 3/4"

Fuente: Área de operaciones mina Vale

Figura 46

Perforación de taladros de producción



Fuente: Tajo Galinheiro

Voladura

En la mina Galinheiro se realizan voladuras de producción controladas cargados con explosivos como: ANFO, Heavy ANFO 70/30 y Emulsión 100% y voladuras secundarias cargadas con emulsión encartuchada Emultex PG, la empresa encargada del carguío de taladros es Enaex Brasil.

ANFO: Es un explosivo industrial de alto rendimiento compuesto por una mezcla de 94% de nitrato de amonio y 6% de diésel N° 2, caracterizado por su forma seca, homogénea y de fácil manejo. Esta combinación está diseñada para mantener un equilibrio adecuado de oxígeno, lo que garantiza una liberación de energía eficiente y una buena sensibilidad al iniciador. En la mina Galinheiro, el carguío de los taladros se lleva a cabo mediante el uso de camiones fábrica, los cuales permiten aplicar el ANFO directamente en el sitio de voladura.

Figura 47

Carguio de taladros com ANFO mediante camión fabrica



Fuente: Tajo Galinheiro

Emulsión: Una clase de alto explosivo que consiste en soluciones líquidas de un oxidante, combustible y agua mezclados con un sensibilizador y un emulsionante. Explosivo de gran velocidad con elevada energía y resistencia al agua. Este producto se bombea en forma mecanizada con equipos móviles camiones fabrica con mangueras (ver Imagen 19) y está recomendado como carga explosiva para todos los tipos de terreno. Propicia mayor razón de carga cuando comparado con los encartuchados, posibilitando ampliar la malla de perforación. Excelente para aplicaciones en diámetros de 2½" a 12½" en diferentes tipos de roca.

Figura 48

Carguío de taladros con Emulsión mediante camión fabrica



Fuente: Tajo Galinheiro

Ibenite (Heavy Anfo 70/30): Es una emulsión al 70% mezclada con Anfo al 30%, siempre con la emulsión en proporciones mayores. Esta mezcla tiene como característica el gran poder de choque, alta velocidad, nivel elevado de energía relativa por volumen, resistencia al agua y la posibilidad de variación de densidad. Se recomienda para rocas duras, densas y en pozos con presencia de agua. En la mina Galinheiro se realiza el carguío de los taladros con explosivo Ibenite a través de camiones fabrica.

Figura 49

Carguío de taladros con HA73G mediante camión fabrica



Fuente: Tajo Galinheiro

En la mina Galinheiro el sistema de iniciación es mediante detonadores eléctricos Daveytronic con Boosters de 450g y 900g y como medio de seguridad (Buck up) se utiliza detonadores con retardo de iniciación no eléctrica Brinel (ver imagen 21).

Figura 50

Sistema de iniciación



Fuente: Tajo Galinheiro

Carguío y transporte

El proceso de carguío y transporte desempeña un papel crucial dentro del ciclo de extracción de minerales, ya que implica cargar el material extraído del frente de minado y trasladarlo a una ubicación específica, como la chancadora, el stock, el botadero o la presa de relaves.

La mina Galinheiro cuenta con una flota de equipos de carga que consta por palas eléctricas, palas hidráulicas y cargadores frontales. Además, la flota de transporte consta por camiones mineros de marca Caterpillar. A continuación, se presenta el detalle de la cantidad de equipos disponibles.

Tabla 24

Flota de equipos de transporte

Tipo	Cantidad (unidad)	Modelo	Capacidad de carga
Camión	12	Caterpillar 789D	191 t
Camión	5	Caterpillar 785	139 t

Fuente: Área de operaciones mina

Tabla 25

Flota de equipos de carguío

Tipo	Cantidad (unidad)	Modelo	Capacidad de carga
Pala eléctrica	1	P&H 4100XPC	70 t
Pala hidráulica	1	CAT 6060S	50 t
Excavadora	4	Bucyrus RH170B	22 m3
Excavadora	5	Komatsu PC 2000	13 m3
Cargador frontal	3	CAT 994F	36 m3

Fuente: Área de operaciones mina

Figura 51

Carguío y transporte



Fuente: Tajo Galinheiro