



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

**Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica**

**Escuela Profesional de Ingeniería de Minas**

**Control de vibraciones para evitar daños a los taludes en  
el yacimiento tipo Skarn**

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

**AUTOR**

Marco Antonio VIERA MENDOZA

**ASESOR**

Mg. Víctor Abel TOLENTINO YPARRAGUIRRE

Lima, Perú

2022



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Viera, M. (2022). *Control de vibraciones para evitar daños a los taludes en el yacimiento tipo Skarn*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería de Minas]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---

## Metadatos complementarios

<b>Datos de autor</b>	
Nombres y apellidos	Marco Antonio Viera Mendoza
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	45204507
URL de ORCID	No aplica
<b>Datos de asesor</b>	
Nombres y apellidos	Victor Abel Tolentino Yparragierre
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06656686
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0003-4401-8846">https://orcid.org/0000-0003-4401-8846</a>
<b>Datos del jurado</b>	
<b>Presidente del jurado</b>	
Nombres y apellidos	Alfonso Alberto Romero Baylon
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	31625834
<b>Miembro del jurado 1</b>	
Nombres y apellidos	Mariano Pacheco Ortiz
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06284228
<b>Miembro del jurado 2</b>	
Nombres y apellidos	David Ysaac Melgar Cabana
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	41423051

<b>Datos de investigación</b>	
Línea de investigación	No aplica
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Universidad Nacional Mayor de San Marcos País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Latitud: -12.056445 Longitud: -77.085994
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2017 - 2022
URL de disciplinas OCDE	<a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.06">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.06</a>



**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**  
(Universidad del Perú - Decana de América)  
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

Av. Colonial cdra. 53 – Ciudad Universitaria  
Central Telefónica: 619-7000 anexos: 1110 - 1111  
Lima 1 – Perú

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO  
PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS**

*En las instalaciones de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el 21, del mes de noviembre del 2022, siendo las 20:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado*

*Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS de Don: **MARCO ANTONIO VIERA MENDOZA**, Bachiller en Ingeniería de Minas, quien sustentó la Tesis Titulada: “**CONTROL DE VIBRACIONES PARA EVITAR DAÑOS A LOS TALUDES EN EL YACIMIENTO TIPO SKARN**”, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero de Minas.*

*Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:*

*Aprobado*

.....  
*El Jurado procedió a la calificación, cuyo resultado fue la nota de:*

*14 (Catorce)*  
.....

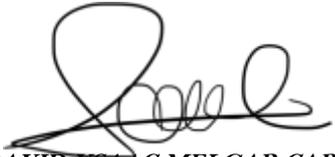
*Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Miembro Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS**, a Don **MARCO ANTONIO VIERA MENDOZA**.*

*Siendo las **21:35** horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.*

*Ciudad Universitaria, 21 de noviembre del 2022*

  
**Dr. ALFONSO ALBERTO ROMERO BAYLÓN**  
MIEMBRO PRESIDENTE

  
**Mg. MABILANO PACHECO-ORTÍZ**  
MIEMBRO

  
**Mg. DAVID YSAAC MELGAR CABANA**  
MIEMBRO

## RECOMENDACIONES

*Se recomienda: que el Planteamiento General y específico del problema, alinear con los Objetivos Generales y Específicos con las conclusiones y recomendaciones en número y relación lógica*

---

**NOTA OBTENIDA:** 14 (Catorce)

**PÚBLICO ASISTENTE:** (Nombre, apellido y DNI)



# UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad del Perú - Decana de América)

## FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

*“Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional”*

### INFORME DE EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD

#### DIRECTOR DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

Dr. Jorge Enrique Soto Yen

#### OPERADOR DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES

Tec. Alexander Iván Luyo Sánchez

#### DOCUMENTO EVALUADO:

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas titulado: «CONTROL DE VIBRACIONES PARA EVITAR DAÑOS A LOS TALUDES EN EL YACIMIENTO TIPO SKARN»

#### AUTOR DEL DOCUMENTO:

Bach. MARCO ANTONIO VIERA MENDOZA

#### FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO:

17/11/2022

#### FECHA DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES:

17/11/2022

#### SOFTWARE UTILIZADO

Turnitin

#### CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES

- Excluye textos entrecorridos
- Excluye fuentes para buscar similitud
- Excluye Bibliografía
- Excluye cadenas menores a 40 palabras

#### PORCENTAJE DE SIMILITUDES SEGÚN PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES

Diez Por ciento (10 %)

#### FUENTES ORIGINALES DE LAS SIMILITUDES ENCONTRADAS

▪ idoc.pub	2%
▪ documents.mx	1%
▪ docplayer.es	1%
▪ www.grin.com	1%
▪ www.coursehero.com	1%



# UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad del Perú - Decana de América)

## FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

*“Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional”*

▪ datospdf.com	1%
▪ www.mindomo.com	1%
▪ vbook.pub	1%
▪ mundometales.cl	1%
▪ doku.pub	<1%
▪ dokumen.tips	<1%
▪ www.aele.com	<1%
▪ edisciplinas.usp.br	<1%
▪ qdoc.tips	<1%
▪ kupdf.net	<1%
▪ tesis.ipn.mx	<1%
▪ bibliotecas.unsa.edu.pe	<1%
▪ www.buenastareas.com	<1%
▪ pt.slideshare.net	<1%

### OBSERVACIONES

Ninguna

### CALIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD

Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones

**17/11/2022**



**UNMSM**

Firmado digitalmente por SOTO YEN  
Jorge Enrique FAU 20148092282  
hard  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 18.11.2022 09:49:29 -05:00

**DR. JORGE ENRIQUE SOTO YEN**  
**DIRECTOR**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

A Dios, por guiarme en la vida y hacerme una persona de bien y poder ser parte de las personas que queremos un mundo mejor, A mi madre por todo el apoyo brindado siempre.

## RESUMEN

En la actualidad, el control de las vibraciones originadas por la ejecución de una o más voladuras es un importante factor a considerar cuando se requiere que los taludes de un yacimiento sean más estables y el resultado de la voladura sea el esperado. Cada yacimiento minero existente en el Perú posee características geotécnicas que los diferencian unos de otros. Los depósitos o yacimientos tipo Skarn se refieren a rocas que contienen minerales calcosilicatados de grano grueso, los Skarn más evidentes se desarrollan cuando la roca encajonante es una roca sedimentaria de composición carbonatada.

Durante la vida útil de una operación minera, la mayoría de sus componentes y, en específico, los taludes del tajo principal deben alcanzar una estabilidad física hasta el cierre de la unidad minera, debido a ello, un punto clave que hay que tener presente es el aspecto geotécnico, como por ejemplo la dureza de la roca, el esfuerzo a la compresión uniaxial, presencia de familia de estructuras y demás que sean relacionadas al estado del macizo rocoso, todo ello tomando en cuenta que la ejecución del proceso de voladura libera energía en forma de vibraciones, que no necesariamente ayudan en la fragmentación de la roca, sino que originan una perturbación de estructuras cercanas a la fuente de explosión. En tal sentido, la presente tesis plantea diseños alternativos en Perforación y Voladura para reducir el daño generado sobre el macizo rocoso y de esta manera tener un mayor control del impacto de la voladura sobre los taludes del yacimiento.

## **ABSTRAC**

Currently, the control of vibrations caused by the execution of one or more blasts is an important factor to consider when it is required that the slopes of a deposit be more stable and the result of the blast is as expected. Each existing mining deposit in Peru has geotechnical characteristics that differentiate them from each other. Skarn-type deposits or deposits refer to rocks that contain coarse-grained calc-silicate minerals. The most evident Skarns develop when the enclosing rock is a sedimentary rock with a carbonate composition.

During the useful life of a mining operation, most of its components and, specifically, the slopes of the main pit must reach physical stability until the closure of the mining unit, due to this, a key point that must be kept in mind is the geotechnical aspect, such as the hardness of the rock, the uniaxial compressive stress, the presence of a family of structures and others that are related to the state of the rock mass, all of this taking into account that the execution of the blasting process releases energy in the form of vibrations, which, however, help in the fragmentation of the rock, but rather cause a disturbance of structures close to the source of the explosion. In this sense, this thesis proposes alternative designs in Drilling and Blasting to reduce the damage generated on the rock mass and thus have greater control of the impact of blasting on the slopes of the deposit.

## **AGRADECIMIENTO**

El autor agradece y considera un honor haber sido alumno de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. En especial a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, donde permaneció los años que estuvo estudiando del cual pudo aprovechar tanto su conocimiento teórico-práctico y lecciones de vida, para completar su formación profesional.

Además, un agradecimiento al Ing. Enrique Guadalupe por alentarme a finalizar el presente trabajo.

## INTRODUCCION

Las operaciones de voladuras son una de las etapas más importantes del ciclo minero y sus resultados determinan en gran medida la productividad y el costo de las operaciones posteriores. En la última década se ha registrado un proceso de crecimiento significativo, y con ello, el desarrollo de controles para mitigar los impactos generados por las vibraciones que se emiten por la ejecución de la voladura. Cada uno de los controles de mitigación existentes son aplicados en función del tipo de yacimiento, sus principales características físicas y químicas, así como también, de la competencia de la roca que conforma los taludes. Ante esta realidad, es necesario monitorear y controlar los efectos de las vibraciones y, si es necesario, rediseñar el procedimiento de voladura para minimizar sus efectos.

Este trabajo muestra cómo es posible controlar las vibraciones producidas por la voladura, específicamente en un yacimiento de tipo Skarn, con la finalidad de reducir el daño y/o sobre rotura sobre los taludes del tajo.

Se comenzará con un primer capítulo describiendo la problemática, objetivos, justificación e importancia del estudio realizado. Además, se realizará una descripción específica sobre la metodología empleada y el marco teórico referente al tema central del estudio.

En un segundo, tercer y cuarto capítulo se ahondará sobre información teórica y técnica operativa del yacimiento tipo Skarn.

El quinto, sexto y séptimo capítulo abordarán temas específicos sobre variables de diseño controlables de voladura, control de vibraciones para evitar daños al talud y análisis técnico para el control de vibraciones del diseño de la Perforación y Voladura.

Finalmente presentamos las recomendaciones de acuerdo a los resultados y cálculos realizados, tanto los teóricos como los hallados en la práctica. Completamos el estudio con algunos datos importantes que fueron anexados.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	3
<b>ABSTRAC</b> .....	4
<b>INTRODUCCION</b> .....	6
<b>CAPITULO I</b> .....	15
<b>DISEÑO DE LA INVESTIGACION</b> .....	15
<b>1.1 Definición de los Términos</b> .....	15
<b>1.2 Presentación del Problema</b> .....	19
<b>1.3 Objetivos</b> .....	19
<b>1.3.1 Objetivo general:</b> .....	19
<b>1.3.2 Objetivos específicos:</b> .....	19
<b>1.4 Justificación de la investigación</b> .....	20
<b>1.5 Importancia del estudio</b> .....	20
<b>1.6 Hipótesis</b> .....	21
<b>1.7 Metodología</b> .....	21
<b>1.8 Marco teórico</b> .....	21
<b>1.8.1 Conceptos Básicos</b> .....	22
<b>1.8.2 Diseño de voladuras</b> .....	36
<b>1.8.3 Voladura en bancos</b> .....	39
<b>1.8.4 Diseño de mallas</b> .....	45
<b>1.8.5 Diseño de tajo abierto</b> .....	46
<b>1.8.6 Diseño de taludes</b> .....	47
<b>1.8.7 Ondas de Vibraciones</b> .....	50
<b>1.8.8 Modelo de Vibraciones</b> .....	56
<b>CAPITULO II</b> .....	59
<b>GENERALIDADES</b> .....	59
<b>2.1 Generalidades</b> .....	59
<b>2.1.1 Ámbito de estudio</b> .....	59
<b>2.1.2 Ubicación y accesos</b> .....	59
<b>2.1.3 Topografía y fisiografía</b> .....	60
<b>2.1.4 Clima</b> .....	60

2.1.5	Recursos de la zona .....	61
2.1.6	Reseña de la unidad .....	61
2.2	Tipo del método de explotación .....	62
2.3	Planeamiento de minado .....	62
2.3.1	Diseño de Open pit .....	63
2.3.2	Programa de producción .....	65
<b>CAPITULO III.....</b>		<b>67</b>
<b>GEOLOGÍA.....</b>		<b>67</b>
3.1	Depósitos Tipo Skarn.....	67
	Skarn de Sn .....	71
	Skarn de W.....	71
	Skarn de Cu .....	72
	Skarn de Zn-Pb .....	75
	Relaciones Skarn-Pórfidos.....	78
	Pórfido asociado .....	78
	Metamorfismo de contacto.....	80
	Endoskarn.....	81
	Exoskarn.....	82
<b>EVOLUCIÓN DEL SKARN .....</b>		<b>82</b>
	Metamorfismo isoquímico .....	82
	Skarn metasomático - fase progradada.....	83
	Skarn retrogrado .....	83
3.2	Geología regional.....	83
3.3	Geología local .....	85
3.4	Fases de intrusión .....	86
3.5	Geología Estructural .....	88
3.6	Geomorfología .....	89
3.7	Geoquímica.....	89
3.8	Hidrogeología.....	90
<b>CAPITULO IV .....</b>		<b>91</b>
<b>PROPIEDADES FISICO-MECANICAS DEL MACIZO ROCOSO .....</b>		<b>91</b>
4.1	Introducción .....	91
4.2	Propiedades de la roca.....	91

4.2.1	Peso específico .....	91
4.2.2	Densidad.....	91
4.2.3	Porosidad .....	93
4.2.4	Esponjamiento .....	93
4.3	Resistencia de las rocas .....	93
4.3.1	Resistencia dinámicas a la compresión .....	94
4.3.2	Resistencia dinámicas a la tracción .....	95
4.3.3	Resistencia dinámicas al cizallamiento .....	96
4.4	Clasificación geotécnica .....	96
<b>CAPITULO V .....</b>		<b>103</b>
<b>VARIABLE DE DISEÑO CONTROLABLES DE VOLADURA, PRINCIPALES FORMULAS DE CALCULO EN VOLADURAS .....</b>		<b>103</b>
<b>VARIABLE DE DISEÑO CONTROLABLES DE VOLADURA .....</b>		<b>103</b>
5.1	Perforación.....	103
5.2	Variables de diseño .....	104
5.3	Altura de banco.....	105
5.4	Diámetro de taladro. ....	105
5.5	Longitud de taladro.....	106
5.6	Burden.....	106
5.7	Espaciamiento (E) .....	107
5.8	Taco .....	107
5.9	Sobre perforación .....	107
<b>PRINCIPALES FORMULAS DE CALCULO EN VOLADURAS.....</b>		<b>108</b>
Formulas base.....		108
5.11	Formula de Andersen.....	108
5.12	Formula de Langefors.....	109
5.13	Formula de C. Konya.....	109
5.14	Formula de Ash .....	110
<b>CAPITULO VI .....</b>		<b>112</b>
<b>CONSIDERACIONES PARA EL CONTROL DE VIBRACIONES PARA EVITAR DAÑOS A LOS TALUDES .....</b>		<b>112</b>
6.1	Antecedentes de Perforación y Voladura.....	112
6.1.1	Diseño de Perforación .....	112

<b>5.1.2 Diseño de Voladura</b> .....	114
<b>5.1.3 Diseño para el control de las vibraciones y el daño</b> .....	115
6.2 Variables Geotécnicas .....	116
6.2.1 Análisis Estructural del yacimiento .....	117
6.2.2 Orientación de Taludes .....	118
6.2.3 Estratificación, Estructura y Propiedades. ....	119
6.2.4 Tipos de Rotura .....	121
5.3 Modelo de diseño de taludes.....	124
6.3.1 Variable en los taludes .....	125
6.3.2 Métodos Empíricos para Determinar el Ángulo Global de un Talud. ....	126
6.3.3 Métodos para determinar el Factor de Seguridad de un Talud.....	128
6.3.4 Aplicación a estabilidad de taludes.....	130
6.3.5 Fase de Diseño Mineros de los taludes.....	131
6.4 Monitoreo de taludes.....	133
6.4.1 Análisis de errores.....	133
6.4.2 Factores de Corrección .....	134
6.4.3 Velocidad de colapso .....	135
6.4.4 Etapas del deslizamiento .....	135
<b>CAPITULO VII</b> .....	136
<b>ANALISIS TECNICOS PARA EL CONTROL DE VIBRACIONES DEL DISEÑO DE LA PERFORACION Y VOLADURA</b> .....	136
7.1 Calidad de la perforación .....	136
7.1.1 Dispersión de taladros de perforación.....	136
<b>7.1.2 Dispersión en espaciamento de taladros de producción.</b> .....	140
<b>7.1.3 Dispersión real entre taladros a cara de banco posterior, cresta y pie del canco inferior</b> .....	141
7.2 Consideraciones Operacionales .....	142
7.2.1 Control operacional para el tipo de yacimiento Skarn.....	142
7.2.2 Delimitación del área de voladura .....	142
7.2.3 Materiales de taco a usar .....	143
7.2.4 Limpieza del área para perforar .....	143
7.2.5 Iniciación de pre corte .....	144
7.3 Análisis de la fragmentación.....	145
7.4 Análisis y propuestas para voladuras de contorno .....	148

7.5 Análisis de estabilidad del daño de taludes.....	150
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>153</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>153</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>153</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>155</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipo de reacción en función de la cinética química.....	25
Figura 2. Zona del proceso de detonación.....	27
Figura 3. Presión de detonación (Pd) y presión de burbuja (pe) de dos tipos de explosivos.....	28
Figura 4. Influencia del diámetro de la carga sobre la velocidad de detonación. (Ash, 1977).....	29
Figura 5. Esfuerzos generados en función del tiempo a diferentes distancias del centro del taladro (Langefors).....	31
Figura 6. Tipos de fisuras en las proximidades del taladro.....	33
Figura 7. Agrietamiento debido a la tracción generada por la onda reflejada.....	34
Figura 8. Estados de flexión de un banco con distintas Relaciones H/B (Ash). ....	37
Figura 9. Parámetros de voladuras.....	39
Figura 10. Mallas de perforación.....	45
Figura 11. Mallas cuadradas de perforación.....	46
Figura 13. Esquema de diseño del talud.....	63
Figura 14. Esquema de ancho de rampa.....	65
Figura 15. Desprendimientos de bloque caída libre.....	100
Figura 16. Volcadura de bloques.....	100
Figura 17. Deslizamiento planar en macizo rocoso.....	101
Figura 18. Deslizamiento en forma de cuña.....	101
Figura 19. Deslizamiento rotacional.....	101
Figura 20. Desprendimiento lateral.....	102
Figura 21. Esquema de perforación en litología caliza/mármol.....	113
Figura 22. Esquema de perforación en litología caliza/monzonita.....	114
Figura 23. Vista de sección con esquema de carga de explosivos para el control de vibraciones.....	115
Figura 24. Vista de sección con esquema de carga de explosivos para el control de vibraciones.....	116
Figura 25. Análisis estructurales en las diferentes etapas a) Fase de superficie. b) Fase Final.....	118
Figura 26. Análisis estructurales de la ruptura planar.....	122
Figura 27. Análisis estructurales de la ruptura en cuña.....	122
Figura 28. Análisis estructurales de la ruptura en vuelco.....	123
Figura 29. Análisis estructurales de la ruptura circular.....	124
Figura 33. Componentes geométricos analizar en el talud por el control de vibraciones.....	131
Figura 34. Se muestra la posición de los taladros diseñados como la de los realmente perforados.....	137
Figura 35. La dispersión de la posición de empate de los taladros de Producción, siendo el promedio del error de 0.5m (6% respecto al valor del burden de diseño, 8.2m).....	137
Figura 36. Se indica la dispersión de la posición de empate de los taladros Amortiguados, siendo el promedio del error de 0.3m (6.7% respecto al espaciamiento de diseño, 4.5m).....	139
Figura 37. Se indica la dispersión de la posición de empate de los taladros Buffer, siendo el promedio del error de 0.25m (7.1% respecto al espaciamiento de diseño, 3.5m).....	139
Figura 38. Espaciamiento de taladros de producción.....	140
Figura 39. Diseño de voladura con respecto a la ubicación de crestas y pie.....	141
Figura 45. Perfil evaluado en los taludes para el control de vibraciones.....	152

## INDICE DE TABLAS

“Tabla 1. Conversión de velocidades a distintos diámetros.” .....	23
Tabla 2. Ensayos de perforación. ....	24
Tabla 3. Valores orientativos de la RCS para algunos tipos de rocas.....	35
Tabla 4. Producción de hora media. ....	40
Tabla 5. Altura de banco. ....	41
Tabla 6. Altura de banco según retacado. ....	41
Tabla 7. Sobre perforación.....	42
Tabla 8. Esquemas de perforación.....	44
Tabla 9. Métodos para el diseño de taludes.....	49
Tabla 10. Edades radiométricas del Batolito Andahuaylas-Yauri. ....	88
Tabla 11. Propiedades físico – mecánicas de la roca. ....	95
Tabla 12. Tabla de Fallas por su forma y definición.....	99
Tabla 13. Diseños de perforación en producción según litología.....	112
Tabla 14. Diseños de perforación en contorno según litología. ....	113
Tabla 15. Tabla de explosivos por tipo de roca y calidad de taladros en producción (Taladros secos y Taladros con agua). ....	114
Tabla 16. Tabla de explosivos por tipo de roca y calidad de taladros en contorno (Buffer, Piloto y Pre – Corte). ....	115
Tabla 17. Definición de orientación de taludes por dominio estructural.....	118
Tabla 18. Total de datos estructurales disponibles (jointsy estratificaciones) por dominio estructural..	120
Tabla 19. Propiedades estructurales.....	121
Tabla 20. Fragmentación medida en zona de Calizas .....	145
Tabla 21. Características de roca intacta de la zona Caliza.....	146
Tabla 22. Características de roca intacta en roca Caliza. ....	147

## CAPITULO I

### DISEÑO DE LA INVESTIGACION

#### 1.1 Definición de los Términos

Para entender el presente informe se debe tener en cuenta los siguientes conceptos:

**Software:** Programa de características de modelamiento, análisis, diseño utilizado en minería.

**Voladura de rocas:** Proceso en el cual la presión de gases generados por el explosivo dentro del taladro, originan una gran concentración de energía produciendo dos efectos: fragmentación y desplazamiento.

**Talud:** Pared o muro en la superficie inclinada con respecto a la horizontal que presenta un ángulo, esta puede resistir la presión que se ejerce fuerzas del propio terreno.

**Altura de banco:** En minería a tajo abierto se define como el parámetro de las alturas de los taludes que definen los segmentos, la altura de los bloques se usan para explotar o extraer de un tajo.

**Angulo de reposo:** Máximo ángulo de talud en el que materiales sueltos tales como tierras o rocas fragmentadas permanecen estables.

**Banco:** Es la parte de los recortes horizontales del piso a lo largo de los cuales se realiza el minado en una mina de tajo abierto. Cuando las fases minado progresan a niveles inferiores bajos, se opta por dejar bancos de seguridad en las paredes para que capturen cualquier caída de roca que pueda caer desde arriba.

**Berma:** Es la cara superior del banco. Se utiliza como vía de acceso para realizar el carguío, como barrera protectora para la circulación de los camiones.

**“Booster:** Alto explosivo utilizado para mejorar la detonación de la columna explosiva (aumentar la velocidad de detonación). Por lo general se utilizan explosivos de alta velocidad de detonación.”

**“Burden:** Distancia más próxima desde la perforación hacia la cara libre o banco de explotación.”

**Carguío:** Una de las etapas del proceso de minería a tajo abierto. Esto se aplica especialmente a la carga de material mineralizado o desmonte en la mina. La carga se realiza en rampas de carga especialmente diseñadas.

**Cuerpo de mineral:** Dentro de un yacimiento se pueden encontrar concentraciones naturales de material mineralizado de leyes explotables se puede extraer y vender con una ganancia.

**Densidad o peso específico:** Se entiende por peso específico el peso de la muestra sobre el peso del agua a 4 Celsius, cuando de ambas sustancias se contrastan

volúmenes iguales. Dicho valor depende de dos parámetros: la clase de átomos y la estructura cristalina.

**Depósito:** Es un yacimiento con un cuerpo mineralizado que se ha delimitado físicamente con ley promedio suficiente de mineral o no metálica para garantizar la exploración y/o los gastos de desarrollo cuando es favorable la explotación se hacen los procesos de perforación, excavación de zanjas y/o trabajos subterráneos.

**Desbroce:** El proceso de remoción de material o roca sobreyacente para el inicio de extracción al depósito mineral.

**Dureza:** La capacidad que tiene el mineral para rayar o dejarse rayar por otros minerales u objetos; depende de la estructura cristalina, y por lo tanto de la fuerza de enlace químico.

**Estudio geotécnico:** El estudio geotécnico sirve como herramienta importante para recolectar datos de todos los detalles geológicos, geoquímicos, geofísicos y geotécnicos del área de trabajo, así como para realizar recomendaciones a nivel de diseño, tales como en las estructuras a construir y el talud a excavar.

**Extracción:** En los yacimientos, en las minas, se extrae tanto el material que interesa económicamente, que se llama mena, como una gran parte de material que lo acompaña, que generalmente no se utiliza y que se llama ganga.

**Fragmentación:** Material que ha reducido su tamaño producto de la voladura, quedando listo para el carguío y transporte. El grado de fragmentación se mide en cuanto al tamaño medio obtenido y su distribución.

**“Geofísica:** Rama de la física que se preocupa de estudiar la Tierra. Utiliza las propiedades físicas, tales como las sísmicas, gravimétricas, eléctricas, térmicas, radiométricas y magnéticas, del medio rocoso para determinar la composición y comportamiento dinámico de las rocas y materiales que componen la Tierra.”

**Geotecnia:** Rama de la geología que estudia las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles de los materiales provenientes del medio geológico.

**“Malla de perforación:** Plano que identifica la disposición de la perforación en una zona determinada de la mina. Este plano sirve para realizar la perforación. Contiene la siguiente información básica: zona, número de perforaciones, profundidad y diámetro de perforación.”

**Mina de tajo abierto:** Es la explotación de una mina que está enteramente en la superficie. También se le llama de corte abierto o a cielo abierto, se pueden dar de minerales llamado tajo abierto o no metálicos llamados canteras.

**Pre-stripping:** Es la etapa de desarrollo y la construcción para acondicionar la mina para la explotación. Es el trabajo realizado para extraer la roca sin valor comercial (estéril) que cubre las reservas minerales.

**Perforación diamantina:** Perforación rotatoria de roca que corta una muestra de roca que se recupera en secciones cilíndricas largas de dos centímetros o más de diámetro.

**“Ondas de explosión:** Una explosión provoca ondas de presión en el medio que se produce. Las explosiones se pueden dividir como deflagración según si las ondas son

subsónicas y detonaciones si son supersónicas (ondas de choque). Las velocidades deben considerarse respecto del medio de propagación (explosivo).”

**Zona de cizalla:** incumbe a una zona ancha de deformación, generada bajo condiciones dúctiles a dúctiles-frágiles (pliegues de arrastre).

**Zona de fallamiento:** Se encuentra compuesta por numerosas superficies de discontinuidades frágiles, subparalelas e interconectadas, estrechamente espaciadas con presencia de brecha de falla.

## 1.2 Presentación del Problema

¿Determinar los niveles de daño generado en los taludes del yacimiento tipo Skarn?

### Problemas Específicos:

- Falta de diseños alternativos para Perforación y Voladura para reducir el daño generado sobre el macizo rocoso.
- No se realiza el análisis del modelamiento y comportamiento de las vibraciones generadas por la voladura.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general:

Identificar el control adecuado de vibraciones, para evitar daños a los taludes en el yacimiento tipo Skarn.

### 1.3.2 Objetivos específicos:

- Generar diseños alternativos de Perforación y Voladura para reducir el daño generado sobre el macizo rocoso.
- Analizar el modelamiento y comportamiento de las vibraciones generadas por la voladura.

#### **1.4 Justificación de la investigación**

La presente tesis tiene por finalidad mejorar la estabilidad de los taludes que conforman un yacimiento tipo Skarn, esto, teniendo en cuenta que un diseño inadecuado de carga y amarre influye en la generación de sobre quiebre, perturbando la masa rocosa de los taludes.

Los altos niveles de vibración producen perturbación en los taludes y más aún en las fallas, por lo que es necesario establecer diseños de carga y amarre que permitan generar un perfil uniforme para así compensar los costes de saneo y mantenimiento de taludes ya que estos son necesarios para asegurar las condiciones de trabajo.

#### **1.5 Importancia del estudio**

La importancia del presente estudio radica en la generación de un alto grado de confiabilidad al yacimiento tipo Skarn respecto a la estabilidad de sus taludes, esto debido a los monitoreos de las vibraciones resultantes de la voladura, lo cual permitirá tomar medidas correctivas que puedan evitar daños a los taludes y, permitiendo considerar las pendientes adecuadas para estos.

## **1.6 Hipótesis**

“Considerando que aplicando un diseño de voladura personalizado de acuerdo a las particularidades geomecánicas del macizo rocoso y el uso adecuado de explosivos se logre disminuir el daño generado por la voladura en los taludes finales del yacimiento tipo skarn, logrando de esta manera el control de la estabilidad del talud.”

## **1.7 Metodología**

“El presente trabajo de investigación según la información a recopilar es de enfoque mixto que, según Hernández, Fernández & Baptista (2014), “consiste en recopilar, analizar e integrar tanto investigación cuantitativa como cualitativa; se utiliza cuando se requiere una mejor comprensión del problema de investigación, y que no se podría dar cada uno de estos métodos por separado. Se gana amplitud y profundidad en la comprensión y corroboración, a la vez que compensa las debilidades inherentes del uso de cada enfoque por separado”.

“En nuestro caso se evaluó aspectos con respecto al registro de vibración que genera un solo taladro con carga típica en la zona próxima a los taludes, con la finalidad de determinar el retardo adecuado que nos dé un registro de vibraciones con menor nivel.”

## **1.8 Marco teórico**

El titular minero debe cumplir con todo lo solicitado en el Reglamento 024-2016 EM en todos los ítem que se hace mención.

El control de vibraciones para evitar el daño a los taludes hace referencia que el titular minero está obligado a monitorear las vibraciones resultantes de la voladura para tomar controles necesarios.

Se debe realizar estudios geotécnicos con el fin de mantener operaciones seguras y operativas las labores mineras, tales como, taludes altos, bancos y otros.

La pendiente del tajo será establecida bajo condiciones seudo estáticas asumiendo las máximas aceleraciones sísmicas y demás parámetros.

### **1.8.1 Conceptos Básicos**

#### **Velocidad de Penetración**

La velocidad de penetración conseguida por un equipo rotopercutivo depende de los siguientes factores:

- Características Geomecánicas, mineralógicas y de abrasividad de las rocas.
  - Potencia de percusión de la perforadora.
  - Diámetro de taladro.
  - Longitud de perforación.
  - Diseño del equipo y condiciones de trabajo, y
  - Eficiencia de la operación
- 
- **Extrapolación de datos reales**

Cuando se conoce la velocidad de penetración para un diámetro dado puede estimarse la que se conseguirse con el mismo equipo y un diámetro menor y mayor. Tabla 1.

$$F = \left(\frac{D1}{D2}\right)^{1.5}$$

Se usará la siguiente tabla para calcular los diámetros de taladro a perforar.

“Tabla 1. Conversión de velocidades a distintos diámetros.”

Diámetro Taladro (mm)	127	114	112	89	76	70	64	57	51	48	44	41	38
127	1.00	1.17	1.40	1.71	2.15	2.46	2.83	3.31	3.96	4.35	4.82	5.41	6.10
114	0.85	1.00	1.19	1.45	1.83	2.09	2.41	2.82	3.37	3.71	4.11	4.61	5.19
112	0.72	0.84	1.00	1.22	1.54	1.75	2.02	2.36	2.82	3.11	3.45	3.86	4.35
89	0.59	0.69	0.82	1.00	1.26	1.44	1.65	1.94	2.32	2.55	2.82	3.17	3.56
76	0.46	0.55	0.65	0.79	1.00	1.14	1.31	1.54	1.84	2.02	2.24	2.51	2.82
70	0.41	0.48	0.57	0.70	0.88	1.00	1.15	1.35	1.61	1.77	1.97	2.20	2.48
64	0.35	0.42	0.50	0.61	0.76	0.87	1.00	1.17	1.40	1.54	1.71	1.91	2.15
57	0.30	0.35	0.42	0.52	0.65	0.74	0.85	1.00	1.19	1.31	1.46	1.63	1.84
51	0.25	0.30	0.35	0.43	0.54	0.62	0.72	0.84	1.00	1.10	1.22	1.37	1.54
48	0.23	0.28	0.32	0.39	0.49	0.56	0.65	0.82	0.84	1.00	1.11	1.24	1.40
44	0.21	0.24	0.29	0.35	0.45	0.51	0.59	0.69	0.76	0.90	1.00	1.12	1.26
41	0.19	0.22	0.26	0.32	0.40	0.45	0.52	0.61	0.73	0.81	0.89	1.00	0.08
38	0.16	0.19	0.23	0.28	0.34	0.40	0.46	0.54	0.65	0.72	0.79	0.89	1.00

Fuente “Manual de perforación y voladuras de rocas” Lopez Jimeno.

- **Ensayos de perforación**

Para determinar parámetros de tipo de roca, una aproximada entre la relación de acuerdo a su compresión, los índices de dureza Mohs y Vickers, y el índice de perforabilidad DRI; el presente ensayo infiere de reproducir el fenómeno real de rotopercusión, con el empleo de una taladradora. Tabla 2.

**Tabla 2. Ensayos de perforación.**

TIPO DE ROCA	RC (MPA)	DUREZA MOHS	DUREZA VICKERS	COEFICIENTE PROTADIAKONOV	INDICE DRI	CLASIFICACION
Carbon, Marmol	10	<3.7	<200			Blanda
Pizarras	20			<3	>70	
Carbon. Limolitas	30	2.5				
Pizarras	40	4.8	100-400			
Calizas, Filitas	60	4.4	400	2	80	
Esquito micáceo, granito	70					Media
Conglomerados,	80					
serpentina	90	5.9	500	10	44	
Clorita	110	5	600	7	64	
Neis, Anfibolita						
Cuarcita, Diabasa	120					Dura
Granito, Pegmatita	130					
Granodiorita, Diorita	140					
Esquistomicáceo/cuarcítico	150					
Arenisca, Taconita	160					
Basalto, Andesita, Riolita	170					
Traquita	180					
Gabro, Grauwaca	190	6.5	900	17	28	Muy Dura
Cuarcita	250					
Esquisto cuarcítico	300					
Neis	350	>5.9	>700	>15	<44	

Gabro, Taconita	400					
-----------------	-----	--	--	--	--	--

Fuente "Manual de perforación y voladuras de rocas" Lopez Jimeno.

- **Deflagración y Detonación**

Los explosivos químicos, según sus condiciones que sean sometidos, pueden dar como resultado diferentes comportamientos de carácter explosivo.

- **Combustión**

Es toda reacción química capaz de desprender calor, pudiendo ser o no concebido por nuestros sentidos.

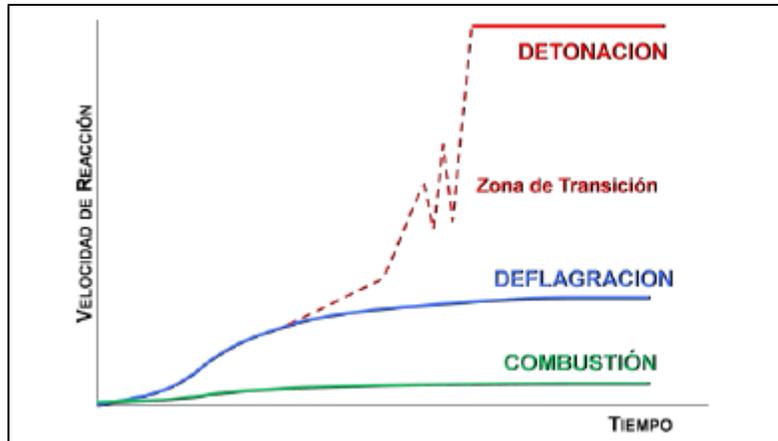
- **"Deflagración"**

Es un proceso exotérmico que en la transmisión de la reacción de descomposición se basa principalmente la conductividad térmica."

- **"Detonación"**

Es un proceso físico-químico caracterizado por su gran velocidad de reacción y formación de gran cantidad de productos gaseosos a elevada temperatura, que adquieren una gran fuerza expansiva."

Figura 1. Tipo de reacción en función de la cinética química.



- **Mecanismo de detonación**

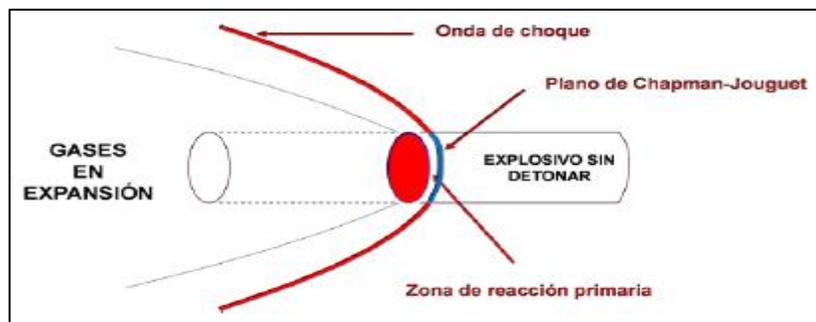
Comienza la zona de explosivo que todavía no ha detonado.

Comienza en la zona de reacción primaria, avanza propagándose a una velocidad de varios miles de metros por segundo (velocidad de detonación), en la cual tienen lugar las reacciones más rápidas y violentas, estas producen un movimiento energético de las partículas próximas. Este movimiento se propaga en forma de onda de choque de muy alta presión a todo el medio circundante. Esta reacción de presión se denomina presión de detonación.

Se cree que la zona de reacción secundaria, donde se acumulan los productos explosivos, viajan más lentamente que la onda de choque y ocurren una serie de reacciones adicionales, es la fuente de la mayoría de los gases reactivos. Se caracteriza por una presión inferior a la anterior, conocida como presión de estallido o presión de burbuja, provocada por la expansión de todos estos productos gaseosos.

La superficie de división entre las zonas primaria y secundaria, aunque no es exactamente plana, se conoce con el nombre de “Plano de Chapman-Jouguet”

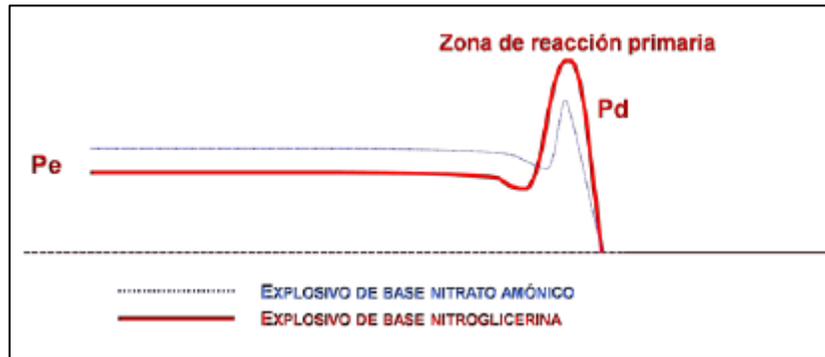
Figura 2. Zona del proceso de detonación



La composición y propiedades del explosivo determinan, entre otras cosas, la velocidad de detonación y la presión de la burbuja y la explosión. Como se muestra en la Figura 1; Por ejemplo, un explosivo a base de nitroglicerina tendrá una velocidad de detonación alta, así como una presión detonación alta.

Por otro lado, el volumen relativamente bajo de los gases que se producen la detonación de la nitroglicerina determina que la presión de burbuja sea también baja. Por el contrario, un explosivo de nitrato de amonio, que detonan más lentamente, pero produce más gases tendran una presión de detonación más baja, pero una presión de burbuja más alta.

Figura 3. Presión de detonación (Pd) y presión de burbuja (pe) de dos tipos de explosivos.



La presión de la onda de detonación viene dada por la fórmula:

$$Pd = d \cdot v \cdot u$$

Siendo:

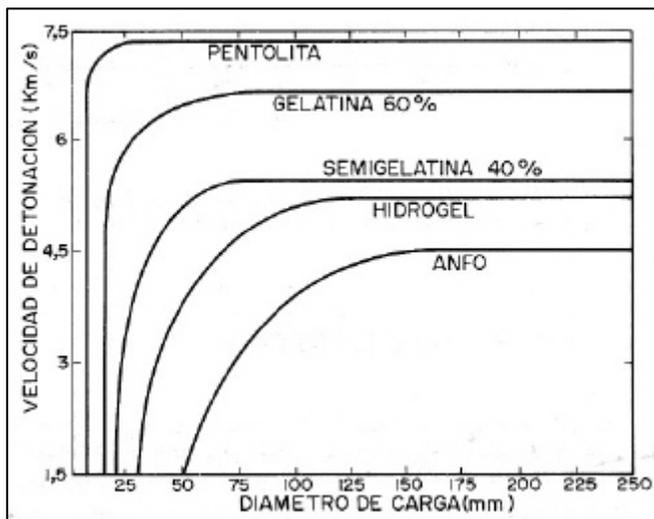
- Pd: Presión de la onda (presión de detonación)
- d: densidad del medio (explosivo)
- v: velocidad de propagación (velocidad de detonación)
- • u: velocidad de partícula

#### • Velocidad de detonación

Es la velocidad a la que la onda de detonación se expande a través del explosivo y, por lo tanto, las propiedades que define la liberación de energía.

“Los factores que afectan a la "VD" son: la densidad de la carga, el diámetro, el confinamiento, la iniciación y el envejecimiento del explosivo. Para los tres primeros, conforme aumentan dichos parámetros las "VD" resultantes crecen significativamente. Figura 4.”

Figura 4. Influencia del diámetro de la carga sobre la velocidad de detonación. (Ash, 1977)



Fuente “Manual de perforación y voladuras de rocas” Lopez Jimeno.

- **Resistencia al agua**

Es la capacidad de soportar la exposición prolongada al agua sin perder sus propiedades. Varía según la composición del explosivo y suele estar relacionado con el contenido de nitroglicerina o aditivos especiales, por lo que las resinas, hidrogeles y emulsiones son altamente impermeables. Las sales oxidantes como el nitrato de amonio en ANFO reducen en gran medida la permeabilidad al agua porque son muy higroscópicas.

En la minera que se realiza el presente estudio tiene periodos de lluvia muy largos que se debe bombear los taladros.

- **Mecanismo de Fragmentación de la roca**

En la detonación de un explosivo podrían dividirse en dos fases:

- ❖ La primera etapa, representada por la presencia de una onda de detonación de mayor o menor velocidad, característica que representa el mayor poder rompedor del explosivo, y
- ❖ La segunda etapa, representada por la formación de un gran volumen de gases a elevada temperatura.

Si el explosivo está confinado dentro de un taladro y se detona, se genera una onda de detonación que se propaga a través de la roca circundante. En un punto cercano al taladro esa onda de detonación tiene un efecto de compresión al llegar al mismo, pero al sobrepasarlo, esta fuerza se convierte en un esfuerzo de tracción. Esta primera onda de choque viaja a través de la roca circundante velocidades entre 3.000 y 5.000 m/s.

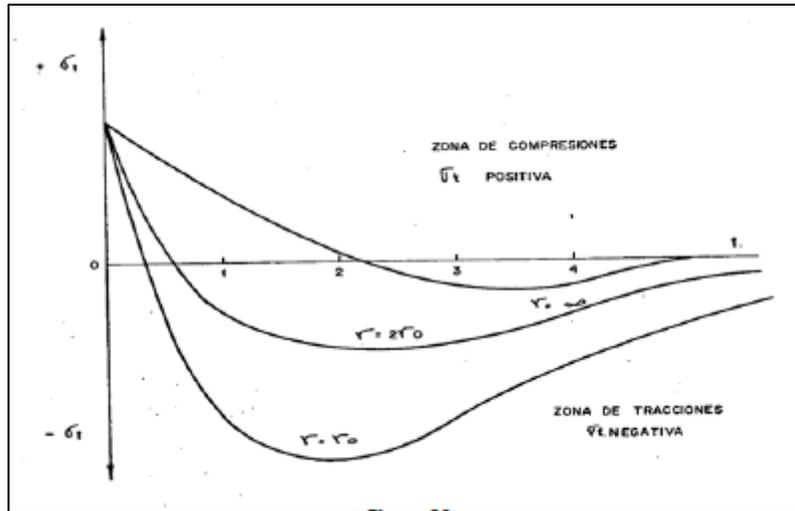
Este cambio de compresión a tracción puede mostrar en la Figura 5; para el caso de un taladro perforado en el macizo rocoso sin cara libre. La resistencia a la tracción de la roca es de 10 a 100 veces menor que su resistencia a compresión. Será más propicio a producir su rotura por un efecto a tracción.

Debido a esta consideración puede decirse que la fragmentación de la roca se debe a estos dos fenómenos:

- Expansión de los gases
- Reflexión de las ondas de compresión

Cuando una onda de compresión viaja de un medio mayor resistividad a un medio de menor resistividad, parte de ella se transmite a éste último como onda compresión y otra parte se refleja hacia atrás como onda de tracción.

Figura 5. Esfuerzos generados en función del tiempo a diferentes distancias del centro del taladro (Langefors)



Fuente "Manual de perforación y voladuras de rocas" Lopez Jimeno

Se entiende por resistividad característica ( $Z$ ) al producto de la densidad del medio ( $\rho$ ) por la velocidad de propagación de la onda en el mismo ( $c$ ). Así, se puede diferenciar entre resistividad característica de la roca y del explosivo:

La resistividad de la roca se define como:

$$Z_{Roca} = \rho_{Roca} \cdot c_{Roca}$$

Siendo:

$\rho$ : densidad de la roca

$c$ : Velocidad de propagación de las ondas en la roca

De manera genérica, puede decirse que, cuanto más blanda es la roca, la velocidad de propagación de las ondas es menor.

Del mismo modo, para el explosivo:

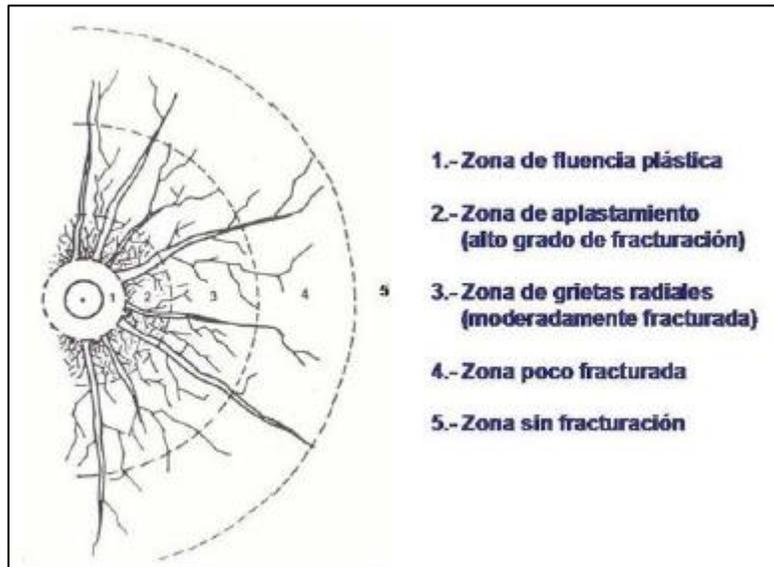
$$Z_{\text{Explosivo}} = \rho_{\text{Explosivo}} \cdot C_{\text{Explosivo}}$$

Para observar el mecanismo de fractura de la roca se realizó un ensayo consistente en la voladura de un único taladro, sin ningún tipo de cara libre, de modo que se concluye que en la zona anexa al taladro se han producido los siguientes fenómenos (Figura 6).

“• Ensanchamiento del taladro por rotura plástica de la roca, motivado por el efecto de compresión de la onda de detonación.”

“• Creación de fisuras (a veces microfisuras) generadas por ese efecto de tracción de la onda de detonación. Estas fisuras son de tipo radial y a veces muy difíciles de observar.”

“Figura 6. Tipos de fisuras en las proximidades del taladro.”

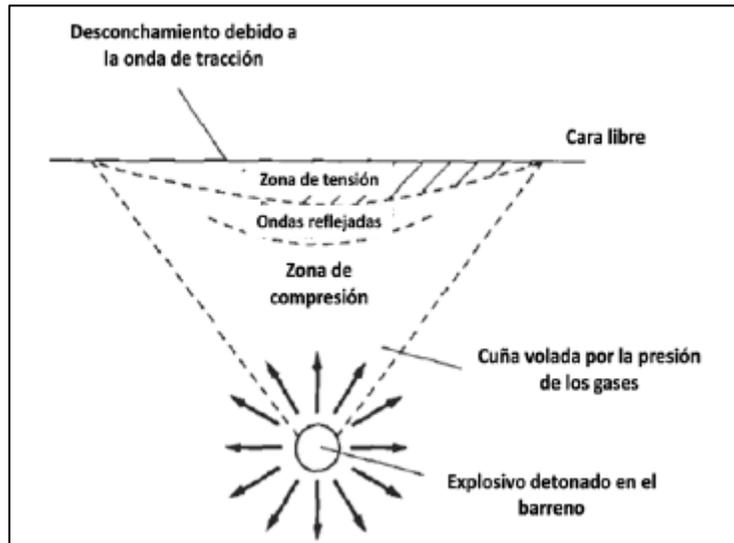


Fuente “Manual de perforación y voladuras de rocas” López Jimeno

En la primera fase inicial para la rotura de la roca. Esta se emplea la parte de energía del explosivo que corresponde a la onda de detonación y que no alcanza valores superiores al 10% de la energía total del explosivo, ni aún en el caso de explosivos de elevado poder rompedor.

Si hay una superficie de una cara libre en las proximidades del taladro, la onda de choque se reflejará en esa superficie y causará un esfuerzo de tracción en ella, y se encuentra que la roca tiene libertad de desplazamiento que permite la ampliación del radio fisurado y el fracturamiento de la roca en esa cara libre en tanta mayor profundidad cuanto mayor es la carga y su grado de confinamiento, mayor potencia y poder rompedor del explosivo y menor es la distancia a la superficie libre.

Figura 7. Agrietamiento debido a la tracción generada por la onda reflejada.



Fuente "Manual de perforación y voladuras de rocas" Lopez Jimeno

A la primera etapa de formación de grietas y fracturamiento le sigue una segunda etapa, más lenta, en la cual los gases del explosivo a alta presión y temperatura ingresan a las grietas creadas originalmente por la onda de detonación, abriéndolas totalmente y lanzando la roca hacia adelante en su frente libre.

- **Factores que influyen en el mecanismo de rotura de la roca**

Dentro del mecanismo de rotura de la roca son diversos los factores que tienen influencia directa en la fracturación del macizo rocoso, pudiendo distinguirse efectos diferentes.

Los diferentes factores pueden diferenciarse entre factores intrínsecos a la roca, o bien, factores propios de los explosivos a utilizar.

- **Influencia de las características de la roca**

Las rocas se comportan de manera muy diferente a la onda de detonación del explosivo en lo que respecta al inicio de la primera etapa de formación de fisuras, primordialmente y de origen del fenómeno de rotura y fragmentación.

Por lo general, la volatilidad de una roca esta relaciona con su dureza. Las rocas más duras requieren una mayor cantidad de explosivo para ser volada. Esto no es correcto porque además de la dureza se debe tomar en cuenta el aspecto fragilidad.

Una roca dura pero frágil (por ejemplo, la cuarcita) responde muy bien a esta onda primaria y en consecuencia sobre ella se producen importantes fisuras que en la segunda etapa del trabajo de los gases de explosión son amplia- das. La roca es frágil y fragmenta fácilmente.

**Tabla 3. Valores orientativos de la RCS para algunos tipos de rocas.**

<b>Tipo de roca</b>	<b>Resistencia a compresión (Kg/cm2)</b>
Caliza terrosa blanda	130-250
Caliza grano medio	400-450
Caliza dura grano fino	700-1200
Pizarras	120-200
Cuarcitas	400-600
Granitos	900-1800
Basaltos	400-900

Fuente “Manual de perforación y voladuras de rocas” E.T.S. DE INGENIEROS DE MINAS DE MADRID, 2013

### **1.8.2 Diseño de voladuras**

La voladura la disposición de un grupo de taladros, en los que se ha colocado una cantidad específica de explosivo y se inicia en una secuencia tal que logre el resultado de fragmentación y desplazamiento deseados, sin afectar a elementos externos así misma.

Esta definición no se especifica la ubicación de la voladura, siendo posible la ejecución de voladuras a tajo abierto o bien en interior (en trabajos subterráneos), cada una con características diferentes. Además, esta definición se introducen serie de conceptos que se desarrollarán más, por ejemplo:

- Disposición de taladros: se ubicación la disposición de los taladros en la voladura.
- Carga de explosivo: cantidad de agentes explosivos por taladro.
- Secuencia: orden de detonación de los taladros
- Fragmentación: distribución de tamaños de la pila de roca volada.
- Desplazamiento: movimiento de la pila de roca volada.

Principales parámetros a considerar para el presente trabajo:

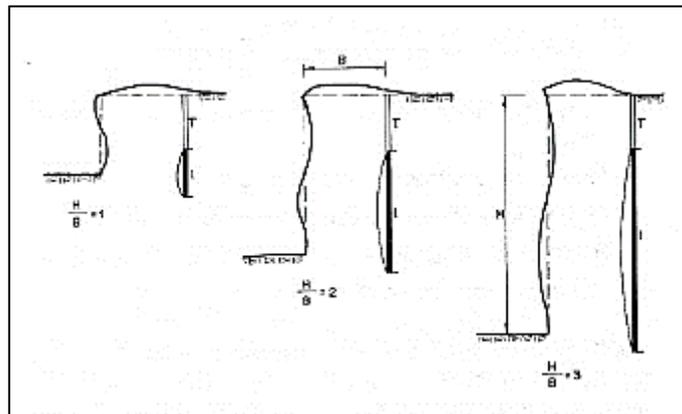
- **Altura de banco**

La dureza del macizo rocoso situado delante de los taladros tiene una gran influencia sobre los resultados de las voladuras. Cuando la relación "H/B» es grande, el desplazamiento y deformación de la roca es fácil, particularmente en el centro del banco. Ash (1977) señala que la relación óptima es "H/B:2: 3».

Si "H/B = 1», se obtendrá una fragmentación gruesa con problemas de sobre excavación y repiés.

Con "H/B = 2» se aminoran estos efectos, eliminándose en su totalidad con "H/B: 2: 3».

“Figura 8. Estados de flexión de un banco con distintas Relaciones H/B (Ash).”



“Fuente “Manual de perforación y voladuras de rocas” Lopez Jimeno”

- **Burden**

Esta es la distancia desde el taladro a la cara libre más cercana, orientando perpendicularmente a las líneas de los taladros. Los factores a considerar al elegir la selección del burden son: altura de banco, dureza de roca, estructura de la roca, explosivo usado, desplazamiento deseado y fragmentación requerida.

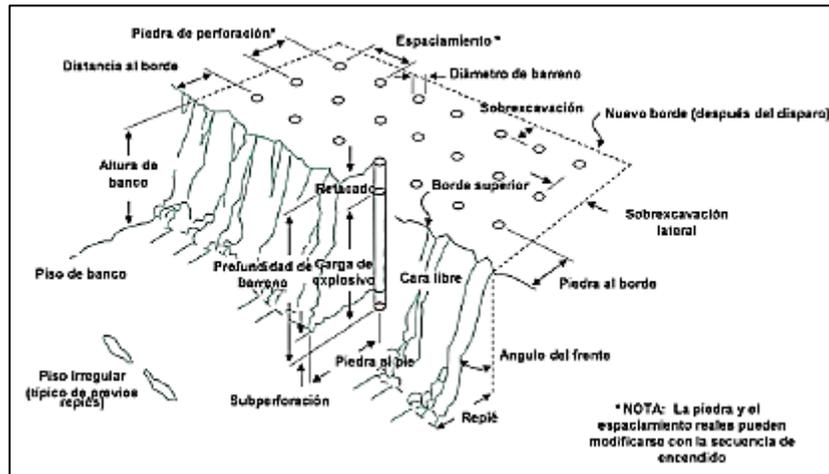
- **“Espaciamiento**

Se define como la distancia entre taladros de una misma fila perpendiculares al burden. Se calcula en relación a la longitud del burden. La distribución de la energía explosiva, es óptima cuando el espaciamiento es igual a 1.15 veces el burden, y el patrón está en forma triangular, se debe tener en cuenta que cuando existen juntas principales paralelas a la cara libre, se pueden permitir espaciamientos más grandes.”

- **Angulo de frente**

Ángulo del talud definido entre dos bancos adyacentes. Puede expresarse bien con respecto a la vertical, o bien respecto a la horizontal.

Figura 9. Parámetros de voladuras.



Fuente “Manual de perforación y voladuras de rocas” Famesa, 2019

### 1.8.3 Voladura en bancos

Dentro del diseño se debe considerar de acuerdo el tamaño de diámetro que se va usar para voladuras de gran diámetro como es el caso de la minera se considera los siguientes parámetros.

Las voladuras que se realiza en los bancos son aquellas que la detonación se da en los taladros verticales o subverticales, utilizando como cara libre un frente paralelo a los mismos.

- **Diámetro de perforación**

Para alguna de las voladuras de pequeño diámetro, la elección de este parámetro se realiza a partir de la producción horaria y tipo de roca que se desea fragmentar, Tabla 4.

Tabla 4. Producción de hora media.

Diámetro del taladro (mm)	Producción horaria media (m <sup>3</sup> b/h)		
	Roca blanda <70 MPa	Roca media-dura 70 – 180 MPa	Roca muy dura >180 MPa
200	600	150	50
250	1200	300	125
311	2050	625	270

“Fuente “Manual de perforación y voladuras de rocas” Famesa, 2019”

- **Altura de banco.**

La altura de banco se considera la relación del alcance a las excavadoras de cables y el diámetro de perforación.

Según la capacidad de carga de los equipos, la altura en metros puede estimarse con la siguiente expresión:

$$H = 10 + 0,57 (C_c - 6)$$

donde:

C = Capacidad del lampón de la excavadora (m<sup>3</sup>).

Teniendo en cuenta la resistencia de la roca, la dimensión de «H» puede también estimarse a partir de «D» con los valores medios indicados en la Tabla 5.

En algunos casos, la altura de banco está limitada por la geología del yacimiento, la necesidad de controlar de la dilución del mineral y por consideraciones de seguridad, como se indicada.

“En general, en explotaciones metálicas se mantiene una relación «H/B < 2».”

Tabla 5. Altura de banco.

Variables de diseño	Resistencia de la roca (MPa)		
	Blanda <70	Medio – dura 70-180	Muy dura >180
Altura de banco - H	52D	44D	37D

Fuente “Manual de perforación y voladuras de rocas” Famesa, 2019

- **Taco**

Es la longitud de retacado de un material que se determina en función del diámetro y la resistencia de la roca, Tabla 6.

Tabla 6. Altura de banco según retacado.

Variables de diseño	Resistencia de la roca (MPa)		
	Blanda <70	Medio – dura 70-180	Muy dura >180
Retacado - T	40D	32D	25D

Fuente “Manual de perforación y voladuras de rocas” Famesa, 2019

- **Sobre perforación**

La sobre perforación puede calcularse a partir del diámetro de los taladros. Tabla 7

Cuando se perforan taladros en forma vertical, la sobre perforación de la primera fila alcanza valores de 10 -12 D.

Se pueden emplear longitudes de sobre perforación menores que las indicadas en los siguientes casos:

- Planos horizontales de estratificación y coincidentes con el pie del banco.
- Aplicación de cargas selectivas de explosivo.
- Empleo de taladros inclinados.

**Tabla 7. Sobre perforación.**

Variables de diseño	Diámetro del Taladro (mm)	
	180-250	250-450
Sobreperforación - J	7-8D	5-6D

Fuente "Manual de perforación y voladuras de rocas" Famesa, 2019

- **Inclinación**

De acuerdo a los trabajos que se realizan los diámetros es muy frecuente el empleo de la perforación rotativa.

“Debido a los inconvenientes que plantea el ángulo del mástil en este tipo de perforadoras, sobre todo en rocas duras, se utiliza sistemáticamente la perforación vertical. “

- **Esquemas de perforación**

El tamaño del burden «B», como ya se ha indicado, es función del diámetro de la carga, de la resistencia de la roca y de la energía específica del explosivo utilizado.

El diámetro de la columna de explosivo suele coincidir con el diámetro de perforación, ya que a menudo se utilizan materiales de agentes a granel y sistemas mecanizados de carga desde camión que permiten, además de un ritmo de llenado alto, variar las características del explosivo a lo largo de dicha columna.

En la Tabla 8; se indican los valores recomendados del burden y el espaciamiento en función del tipo de roca y explosivo utilizado.

Tabla 8. Esquemas de perforación.

Tipo de explosivo	Variables de diseño			
		Blanda <70	Media-dura 70-180	Muy dura >180
Anfo	Burden – B	28D	23D	21D
	Espaciamiento - S	33D	27D	24D
Hidrogeles y emulsiones	Burden – B	38D	32D	30D
	Espaciamiento - S	45D	37D	34D

“Fuente “Manual de perforación y voladuras de rocas” Famesa, 2019”

- **Esquemas de perforación**

En las grandes explotaciones a cielo abierto se ha venido utilizando de forma regular el ANFO como carga única, debido a las siguientes ventajas:

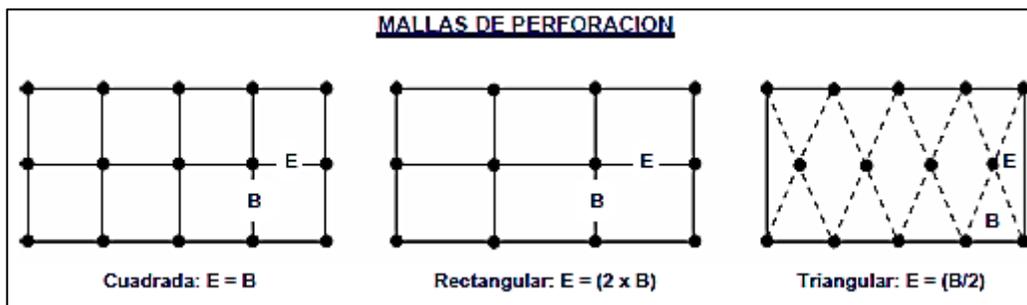
- Bajo coste
- Elevada Energía de Burbuja
- Seguridad
- Facilidad de mecanizar la carga, etc.

#### 1.8.4 Diseño de mallas.

En las grandes mineras se utilizan diferentes consideraciones para el tipo de distribución de taladros de una voladura, tomando diferentes consideraciones, pero generalmente las básicas son el burden y el espaciamiento y su directa vinculación con la profundidad de taladros.

El diseño de una voladura de banco se puede considerar en tramos para la perforación, denominándose malla cuadrada, rectangular y triangular o alterna, basándose en la dimensión del burden.

Figura 10. Mallas de perforación.



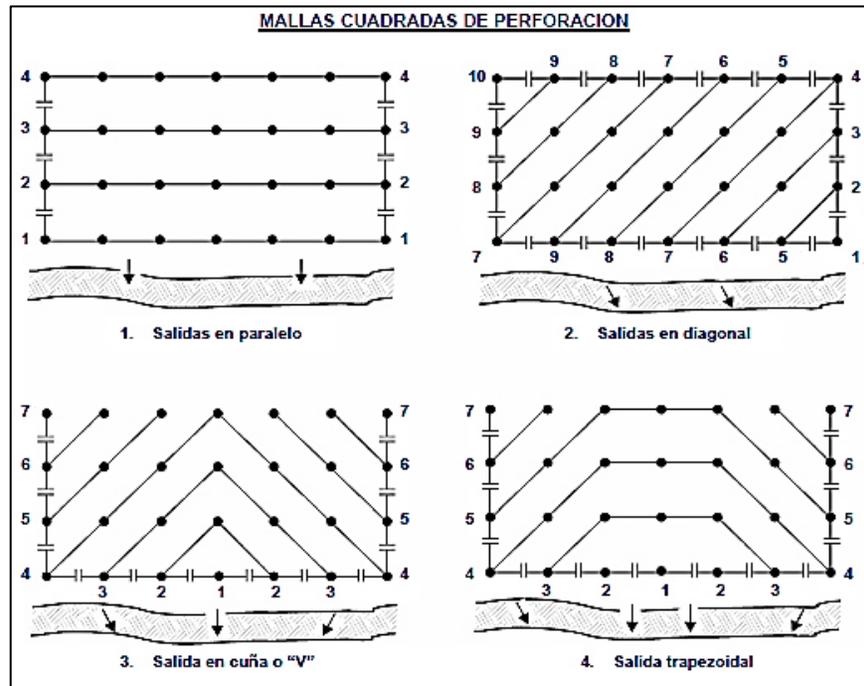
Fuente "Manual práctico de voladura" EXSA

Se utilizan diferentes métodos de amarre de los accesorios y diferentes tiempos de arranque de los taladros se aplican para obtener la más conveniente fragmentación y forma de acumulación de los detritos, para las posteriores operaciones de carguío y transporte del material.

"Los diferentes métodos de amarre de las conexiones entre taladros de los trazos de perforación anteriores, determinan el diseño de mallas de salida,

siendo las más empleadas la longitudinal, cuña, diagonal (Echelón) trapezoidal y las combinadas. Ejemplos con malla cuadrada:”

Figura 11. Mallas cuadradas de perforación.



Fuente "Manual práctico de voladura" EXSA

### 1.8.5 Diseño de tajo abierto

Debido a la ubicación del yacimiento se recomienda que las paredes tengan una relación menor con respecto al desbroce.

Según el (DS 024-2016-EM) se tiene que cumplir con las siguientes características, de acuerdo a condiciones geomecánicas del depósito se considerará la altura y taludes bancos, gradientes y ancho de rampa, talud de

operación y talud final del tajo, ancho mínimo de bermas de seguridad, condición de tránsito de equipos y trabajadores.

“Gradientes de las rampas no sean mayores al doce por ciento (12%).”

“Construir rampas o vías amplias de no menos de tres (3) veces el ancho del vehículo más grande de la mina, vías de doble sentido y no menos de dos (2) veces de ancho de vías de un solo sentido.”

El software usado para el modelamiento del tajo es MineSight, del cual se determinó los siguientes parámetros de diseño:

- Ángulo de cara de banco: 65°.
- Altura de banco de 15 m.
- Doble banco de 30 m.
- Factor de Seguridad: 1.1
- Probabilidad de falla: 25% - 10%
- Ancho de bermas o banquetas de 8.5 m
- Ancho de rampa: 36 m.
- Pendiente de rampas: de 9%.

#### **1.8.6 Diseño de taludes**

Resultado de la recolección de datos geotécnicos y caracterización del macizo rocoso; es el análisis de datos para el inicio de la etapa del modelo de gestión de taludes.

“La geología estructural, litología y otros aspectos geológicos relacionados al mecanismo de falla, las propiedades físico - mecánicas de la roca o suelo y la influencia del agua subterránea son datos esenciales de entrada, para un adecuado y eficiente diseño de taludes.”

Particularmente dependiendo de la magnitud del problema de taludes; se construyen sectores o dominios lito-estructurales del talud para realizar un análisis y diseño óptimo, dentro de cada sector, la resistencia de la roca, las estructuras geológicas y otros factores son más o menos uniformes.

Para el diseño de taludes depende varios factores como la geometría del talud y la relación entre la carga que tiende a producir la inestabilidad y la resistencia de la roca o suelo en contra de la falla.

El objetivo es encontrar la configuración óptima que garantice la seguridad y económico del talud; así como mínimo riesgo de impacto ambiental. El diseño dependerá en gran medida de la calidad de los datos de entrada.

Es importante entender que el análisis no es igual a diseño. El análisis genera resultados numéricos, conclusiones y recomendaciones para considerar el diseño. Mientras que el diseño se basa en el análisis preciso, identificar componentes de la ingeniería y consiste de criterios de diseño, dimensiones, geometría y detalles del talud diseñado.

“Tabla 9. Métodos para el diseño de taludes.”

Método	Equilibrio Limite	Modelos Numéricos	Probabilísticos
Datos de Entrada	Geometría, modo de falla, cohesión, fricción, presencia de agua, condiciones de carga, sismicidad	Geometría, esfuerzos de campo, propiedades físicas, mecánicas y elásticas de terreno, presión de agua, ley constitutiva del terreno.	Geometría, condiciones de carga, presencia de agua; funciones de probabilidad de propiedades de terreno, sismicidad.
Resultados	Factor de seguridad	Esfuerzo de campo, desplazamiento y velocidad del deslizamiento	Probabilidad de falla.
Limitaciones	No considera la deformación de terreno	Requiere definición clara de ley de comportamiento de terreno	Requiere apropiada distribución de probabilidad de los datos de entrada.

“Fuente “Análisis y diseño de taludes mediante métodos computacionales” Dante Morales, 2000”

- **Criterios de diseño**

En minas a tajo abierto el criterio de diseño debe tener en cuenta los tres componentes principales del talud, es decir, la configuración geométrica de los bancos, el ángulo de talud general y el ángulo de talud interrampa.

- **Diseño de talud interrampa**

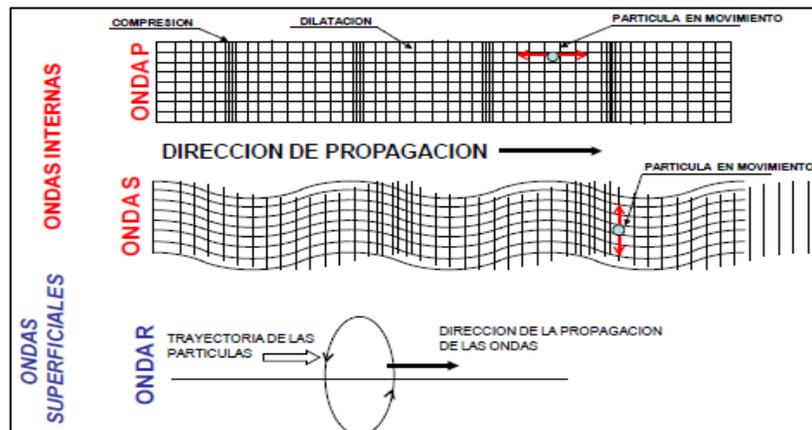
Considerando la altura de banco seleccionado y del ángulo de banco recomendado tenemos que los ángulos interrampa para diferentes zonas de diseño estarán definidos de acuerdo a los datos obtenidos en campo y necesidades de operación minera con equipo disponible.

### 1.8.7 Ondas de Vibraciones

Las vibraciones se generan debido al efecto de la voladura que se transmite a través del macizo rocoso como ondas sísmicas se van desplazando en forma radial a partir de la detonación, este tipo de ondas se clasifican en dos tipos: Las ondas Internas y las ondas superficiales.

Dentro de las ondas internas principales nos encontramos las Ondas Longitudinales o Primarias “P” y las Transversales o Secundarias “S”.

Figura 12. Ondas Vibracionales (Ondas Internas y Externas)



Fuente: Libro de Vibraciones de Exsa

- **Ondas Primarias o Longitudinales “P”**

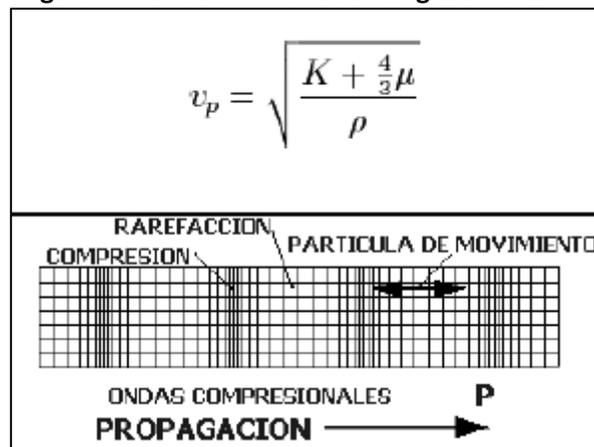
Las ondas P (Primarias o Primae) son las ondas longitudinales o compresionales esto origina que el suelo sea alteradamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación.

Las ondas tipo P, generalmente viajan a una velocidad de 1.73 a diferencia de las ondas S y se desplazan a través de cualquier tipo de material liquido o sólido.

Las velocidades típicas son de 1450 m/s en el agua y cerca de 500m/s el granito.

En un medio homogéneo e isótropo la velocidad de propagación de las ondas P es:

“Figura 14. Ondas Primarias o Longitudinales “P””



Fuente. Manual de Tronadura de Enaex. Año 2002

De la formula;

*K: es el módulo de incompresibilidad.*

*μ: es el modelo de corte o rigidez*

*ρ: la densidad del material a través del cual se propaga la onda mecánica.*

*De los parámetros mencionados, la densidad es la que presenta menor variación por lo que la velocidad está principalmente determinada por  $K$  y  $\mu$ .*

- **Ondas Secundarias y Transversales “S”**

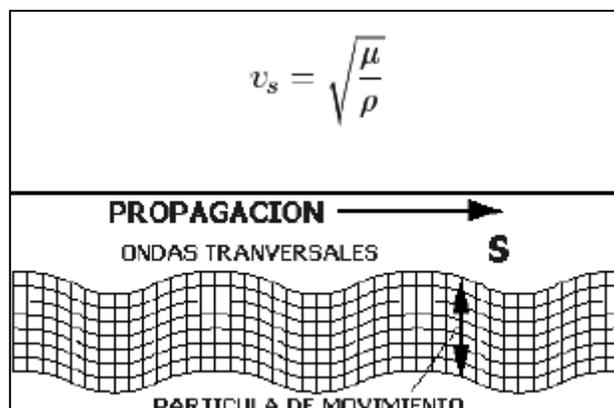
Las Ondas S (Secundarias o Secundae) son ondas donde el desplazamiento es transversal a la dirección de propagación.

La velocidad es menor con respecto a las ondas primarias. Debido a ello, éstas se presentan en el terreno después que las ondas primarias.

Estas ondas con las que generan oscilaciones durante el movimiento sísmico y las que producen la mayor parte de los daños solo se trasladan en elementos sólidos.

La velocidad de propagación de las ondas S en medios homogéneos e isotrópicos depende del módulo de corte  $\mu$  y la densidad  $\rho$  del material.

**Figura 15. Ondas Secundarias o Transversal “S”**



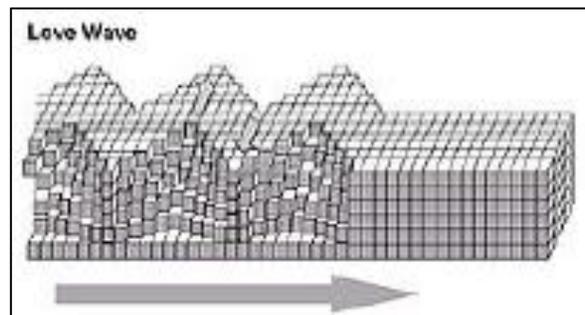
**Fuente. Manual de tronadura de Enaex. Año 2002**

- **Ondas Superficiales**

**Onda Tipo Love.** Las ondas de love son ondas superficiales que producen un movimiento horizontal de corte en superficie.

El modelo matemático de ondas fue desarrollado en 1911 por el matemático neozelandés A.E.H. Love quien enuncia que la velocidad de las ondas Love es un 90% de las ondas S y ligeramente superior a la velocidad de las ondas Rayleigh.

**Figura 16. Ondas Secundarias o Transversal "S"**



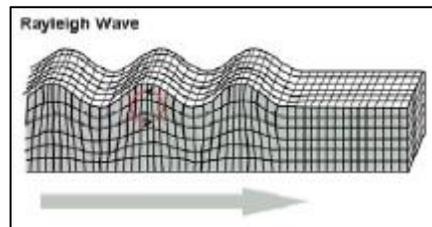
**Fuente. Manual de Tronadura de Enaex. Año 2002**

- **Ondas Tipo Rayleigh.**

Las ondas Rayleigh, se llaman ground roll, son ondas superficiales que producen un movimiento elíptico retrogrado del suelo.

Estas ondas son más lentas que las ondas de cuerpo y su velocidad de propagación es en un porcentaje menor casi a un 70% de la velocidad de las ondas S.

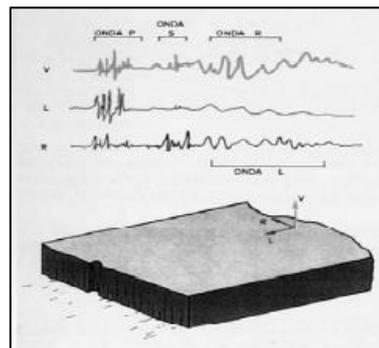
**“Figura 17. Ondas Secundarias o Transversal “W””**



**“Fuente. Manual de Tronadura de Enaex. Año 2002.”**

El grafico se expresa que las ondas primarias y secundarias cómo interactúan en ondas superficiales. El grafico mostrado se puede analizar el registro obtenido de las voladuras del modelo y las pruebas de ondas elemental.

**Figura 18. Ondas vibratoriales en una superficie en sus respectivos planos**



**“Fuente. Manual de Tronadura de Enaex. Año 2002.”**

- **Parámetros de la onda sinusoidal**

Dado que las ondas se propagan en diferentes velocidades y los tiempos de retardo utilizados en voladuras varían diferentemente, las ondas generadas se superponen unas a otras en el tiempo y el espacio en diferentes condiciones tanto geométricos y secuencia de iniciación, por lo que los resultados de movimientos pueden ser complejo.

Entonces se analizarlas se requiere sensores que tengas tres direcciones: radial, transversal y vertical.

La conducción de una onda sísmica por un medio rocoso se produce en cada punto de este movimiento se le atribuye a generar una vibración.

La vibración generada por las voladuras consiste en considerar estos como en ondas tipo sinusoidal.

Dónde:

A: Amplitud (Desplazamiento máximo de un punto desde su posición de reposo).

V: Velocidad de Partícula (Velocidad a la que se desplaza el punto)

a: Aceleración (Ritmo de cambio de velocidad)

f: Frecuencia (Numero completo de oscilaciones o ciclos por segundos)

T: Periodo (Inverso de la frecuencia)

Matemáticamente el desplazamiento “y” en cualquier instante equivale a:

$$y = A * \text{sen}(\omega * t)$$

Siendo:

$$\omega = 2\pi * f = 2\pi * \left(\frac{1}{T}\right)$$

La longitud de la onda “ $\lambda$ ” para una velocidad de propagación “ $V_c$ ” es:

$$\lambda = V_c * T = V_c * \left(\frac{1}{f}\right)$$

Las relaciones entre el desplazamiento, la velocidad y la aceleración de partícula son:

$$y = A * \text{sen}(\omega * t)$$
$$v = \frac{dy}{dt} = A * \omega * \text{cos}(\omega * t)$$
$$a = \frac{dv}{dt} = -A * \omega^2 * \text{sen}(\omega * t)$$

Cuando solo se tienen en cuenta los valores máximos absolutos de tales parámetros, las relaciones anteriores se convierten en:

$$v_{\text{máx}} = A * \omega = A * 2\pi * f$$
$$a_{\text{máx}} = A * \omega^2 = A * 4\pi^2 * f^2 = v_{\text{máx}} * 2\pi * f$$

### 1.8.8 Modelo de Vibraciones

El elemento principal para el proceso, evaluación y optimización del proceso de voladura, es puede predecir a con modelos matemáticos, las consecuencias y beneficios al introducir distintos cambios en los parámetros más importantes.

Del modelamiento de vibraciones se puede predecir diferentes divisiones de vibración en un punto específico de acuerdo de un diseño de voladura.

Existen varios modelos experimentales que expresan la velocidad de las partículas en función del explosivo detonado y la distancia a la que se registra la detonación. Los más conocidos se encuentra el modelo general y el modelo de regresión múltiple. Sin tener en cuenta la simetría de carga particular y se utiliza la expresión descrita por la ecuación.

$$PPV = K * D^{\alpha}$$

Donde :  
 PPV : Velocidad de Partícula Peak (mm/s)  
 D : Distancia Escalar  
 K : Factor de Velocidad  
 α : Factor de Atenuación

En la ecuación, “D” se llama distancia escalar, da cuenta de la influencia de la distancia en (m) y la cantidad de explosivos detonada en forma instantánea en (kg).

El criterio mejor se expresa el comportamiento de la vibración generada por el tipo de explosivo utilizado en voladuras a tajo abierto, es el de DEVINE puesto que, al utilizar las cargas explosivas con geometría cilíndricas, se tiene que las distancias deben ser corregidas por la raíz cuadrada de la carga.

$$PPV = K * \left( \frac{d}{W^{1/2}} \right)^{\alpha}$$

Donde :  
 PPV : Velocidad de Partícula Peak (mm/s)  
 W : Peso de la carga explosiva  
 d : Distancia entre el punto de medición y la carga explosiva detonando  
 K : Factor de Velocidad  
 α : Factor de Atenuación

De la ecuación “W” viene hacer la carga detonada en forma instantánea en kilogramos y “d” la distancia a la cual se cuántica la velocidad de partida.”

“Teóricamente, este criterio es al que mejor representa el comportamiento de la vibración para el campo lejano (aproximadamente  $d > 3$  largo de carga), generadas por el tipo de cargas explosivas usadas en voladuras a tajo abierto. “

- **Modelo matemático campo Lejano “Devine”**

El análisis de datos de los registros de vibraciones, considera la velocidad de la partícula que genera cada carga o grupos de cargas en la voladura y posteriormente agrupar estas por sectores.

## CAPITULO II

### GENERALIDADES

#### 2.1 Generalidades

##### 2.1.1 Ámbito de estudio

Minería a Tajo Abierto

##### 2.1.2 Ubicación y accesos

La mina del presente estudio se ubica en el departamento de Apurímac, entre la cordillera Este y Oeste de los Andes Peruanos. Ubicado cerca de las coordenadas geográficas:

- 14° 05' S
- 72° 22' O

El yacimiento se accede por vía terrestre por medio de la carretera Cusco, con aproximadamente 8 horas de trayecto. Como referencia, se ubica a 70 kilómetros, en línea recta, al sudeste de la ciudad de Abancay.

**“Figura 13. Ubicación del yacimiento.”**



“Fuente “Imágenes Google””

### **2.1.3 Topografía y fisiografía**

El yacimiento de cobre es de tipo Skarn y su área es de topografía muy accidentada.

La altitud máxima del yacimiento es de 4500 m.s.n.m y la mínima es de 3300 m.s.n.m., de acuerdo con la división que hizo el Dr. Pulgar Vidal (1948).

### **2.1.4 Clima**

La temperatura ambiental media anual de la zona del Yacimiento es de 13.6 ° C (durante el período comprendido entre mayo y septiembre la temperatura media mensual es inferior a 0 ° C).

### **2.1.5 Recursos de la zona**

Donde se ubica el yacimiento tipo Skarn se encuentran cantidades de recursos minerales aprovechables con contenido de molibdeno y cobre.

Respecto al recurso hídrico, el agua fresca proviene del río Challhuahuacho (800 L/s).

### **2.1.6 Reseña de la unidad**

**(Información proporcionada de MINERO PERU)** En la conquista española se realizaron trabajos buscando la zona oro y plata, como lo evidencian las labores mineras encontradas de “medias barretas” siendo visualizadas en el Yacimiento de Charcas. Con posteridad, Antonio Raimondi en su obra “EL PERU”, se refiere a la zona como “Minas de Cotabambas”.

En investigaciones concretas sobre actividad minera que se desarrolló en Ferrobamba – Chalcobamba se registraron recién a partir de 1906; en esta fecha, los señores Adolfo Milfiker y Pedro José Rosas denunciaron la zona del yacimiento de cobre y, en 1911, transfieren sus concesiones a la compañía inglesa Ferrobamba Limited.

En 1942, la Cerro de Pasco Corp. Firmo una opción de compra con los propietarios de las concesiones Ferrobamba.

En 29 de octubre de 1970 las concesiones mineras fueron revertidas al estado y fueron asignadas a MINERO – PERU.

## **2.2 Tipo del método de explotación**

Debido al tamaño del yacimiento mineralizado, el volumen de extracción, el tipo de material, características geotécnicas del macizo rocoso y tipo de mineral; el método de explotación es el de Minería superficial o Tajo Abierto.

## **2.3 Planeamiento de minado**

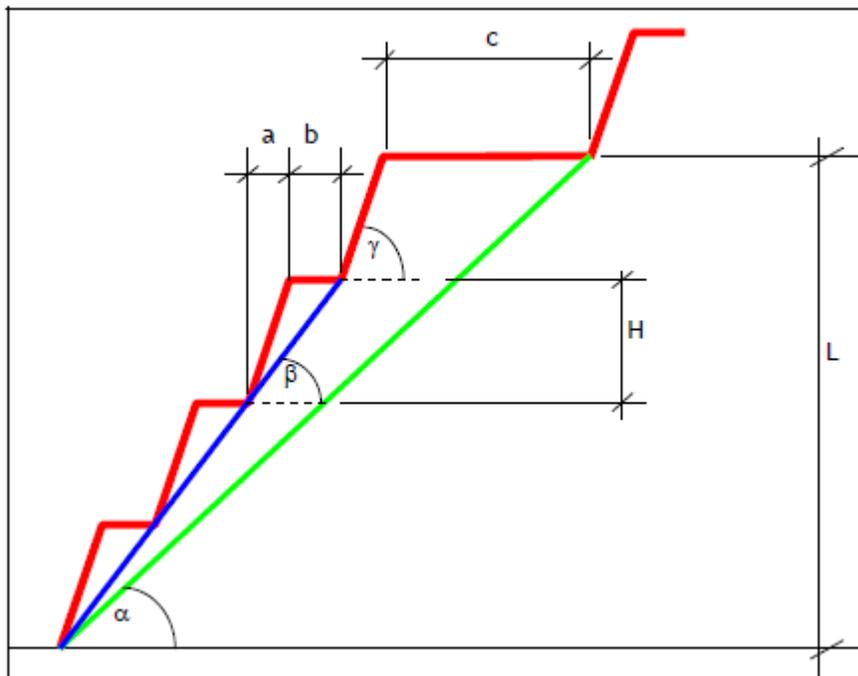
El Estudio de Factibilidad de la Unidad Minera se basan en los recursos minerales del yacimiento y con ellos se han determinado las reservas de minerales, cálculos financieros y planes de mina asociados a este estudio, obteniendo como resultado tres depósitos: Ferrobamba, Chalcobamba y Sulfobamba. Se han contemplado tres modelos de bloques diferentes para cada depósito, actualizando el modelo geológico, interpolación de ley, clasificación de recursos y asignación de densidad. La evaluación de los tres depósitos considera la incorporación de nuevos datos de perforación correspondientes a las campañas de 2008. Estos corresponden estrictamente al llenado de perforaciones geológicas y delineación de los tres depósitos que prueban los elementos estimados.

### 2.3.1 Diseño de Open pit

La determinación de las reservas contenidas en el pozo óptimo para Ferrobamba, Chalcobamba y Sulfobamba se realizó utilizando el algoritmo de Lerchs & Grossmann incorporado en el software Whittle 4X, que combina la aplicación de la ecuación de beneficios y costos.

Basándose en los siguientes parámetros se tomaron las siguientes recomendaciones durante la etapa de diseño operacional de las fases de minería:

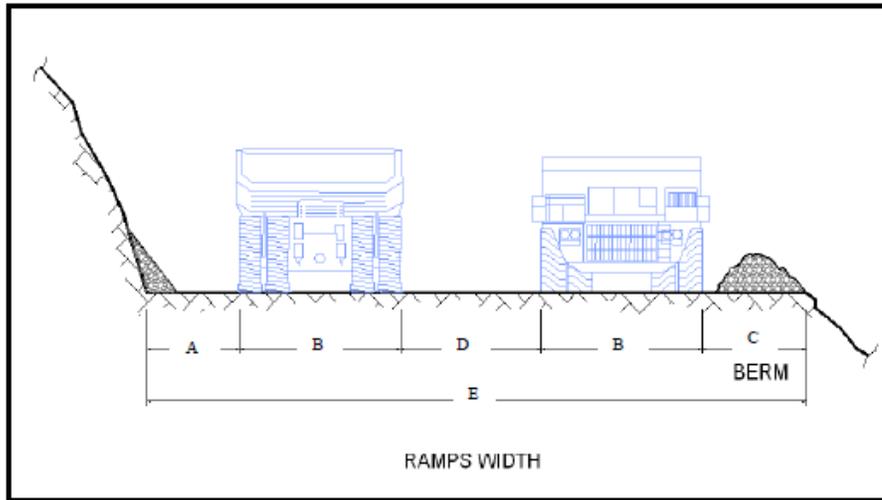
Figura 12. Esquema de diseño del talud.



Fuente "Manual de perforación y voladuras de rocas" Famesa, 2019.

- Angulo global del talud: Corresponde al ángulo entre los extremos de la cresta y pie.
- Angulo del banco de la cara: Este ángulo de la cara del banco de diseño basado en la ruptura esperada u óptima a las condiciones de excavación.
- Altura de Banco (H): 15m para un banco simple y 30m para el banco doble.
- Interramp Slope Height (L): Corresponde a la altura máxima en la que una pendiente puede pasar, o dejando una berma de retención del mismo ancho que la pendiente para asegurar la estabilidad del paquete de banco. 240 m han sido considerados como máximos.
- Split (a): Corresponde a la distancia horizontal entre la pata y la ceja de un banco.
- Ancho de berma (b): dependerá del ángulo de pendiente interrampa, la altura del banco y el ángulo de la cara del banco
- de la cara del banco.
- Ancho de pendiente (c): Corresponde a la anchura mínima que permite el tránsito seguro de camiones, en este caso se han considerado 35 metros basados en un camión típico de 300 toneladas.

Figura 13. Esquema de ancho de rampa.



Fuente "Internet."

### 2.3.2 Programa de producción

Para el programa de producción se tomaron los siguientes criterios en el planteamiento de la extracción:

- El plan solo incluye recursos medidos e indicados, contenidos dentro del Pit final.
- El plan de la mina se desarrolla sobre una base anual.
- La producción de mineral de mina se estima en función de la capacidad de tratamiento de la planta, inicialmente con capacidad de 140 000 tn/día.
- El movimiento total de roca y el grado de corte de material entregado al proceso es determinado mediante la optimización binaria basada en la relación costo- Teoría de la Oportunidad.

- Los resultados obtenidos del plan de mina expresado pueden variar.
- La vida de la mina alcanza 20 años de la producción más un año de pre stripping.
- Del material procesable total, el pórfido de sulfuro representa 61% de la alimentación de la planta, Skarn 37% y brechas 2%

## CAPITULO III

### GEOLOGÍA

#### 3.1 Depósitos Tipo Skarn

##### Generalidades

Los depósitos minerales del tipo Skarn son yacimientos de reemplazo metasomático caracterizados por la presencia de minerales calcosilicatados faneríticos de grano grueso, de Ca, Fe, Mg y Mn. Reemplazan selectivamente a rocas carbonatadas y pueden asociarse con mineralización metálica de W, Cu, Zn, Pb, Sn, Fe-Ca y menor AuAg. (Townley, B. 2001. Metalogénesis: Hidrotermalismo y Modelos de Yacimientos.)

Los skarns pueden estar formadas por proceso de metamorfismo regional o de contacto y también por diferentes variedades de procesos metasomáticos que indica la presencia de fluidos de origen magmático, metamórfico, meteórico y/o marino.

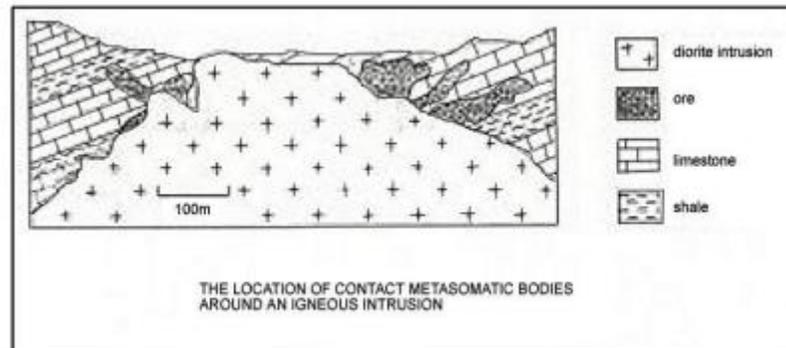
Se encuentran cerca de plutones, a lo largo de fallas y zonas de cizalla, en sistemas geotérmicos poco profundos, en el suelo marino, y en profundidades de la corteza baja en terrenos metamórficos a gran profundidad.

Lo que tienen en común estos distintos ambientes, y lo define a la roca como Skarn es la mineralogía, que incluye una variedad de minerales calco-silicatos y

otros minerales relacionados, a menudo presencia principalmente de granate y piroxena.

Por lo tanto, la presencia de Skarn no indica necesariamente un contexto geológico específico o una composición específica del protolito. En cambio, su evolución indica que la combinación de temperatura, presión, líquido y la composición de la roca caja estuvo dentro del rango de estabilidad de los minerales Skarn identificados.

Figura 21. Perfil de Formación.

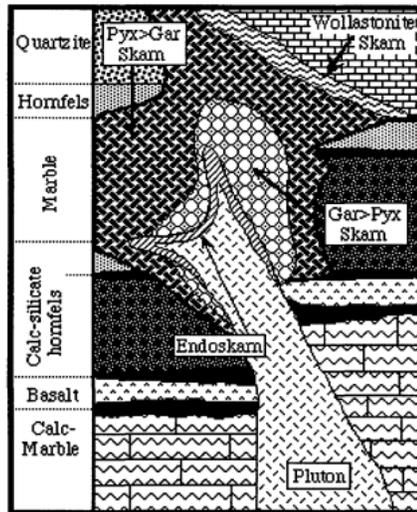


Fuente: Einaudi, M.T., Meinert, L.D., and Newberry, R.J., 1981, Skarn deposits

“Llámense yacimientos exoskarn los criaderos de skarn ubicados en las rocas inmediatas al cuerpo intrusivo y llámense endoskarn a las rocas formadas como resultado de la sustitución metasomática de las rocas de la parte periférica del cuerpo intrusivo.”

La mayor parte del skarn son formaciones de exoskarn, generalmente ubicadas en las rocas encajantes a lo largo del contacto inmediato con el cuerpo intrusivo (Smirnov V.I. et al., 1985).

“Figura 22. Perfil de Formación.”



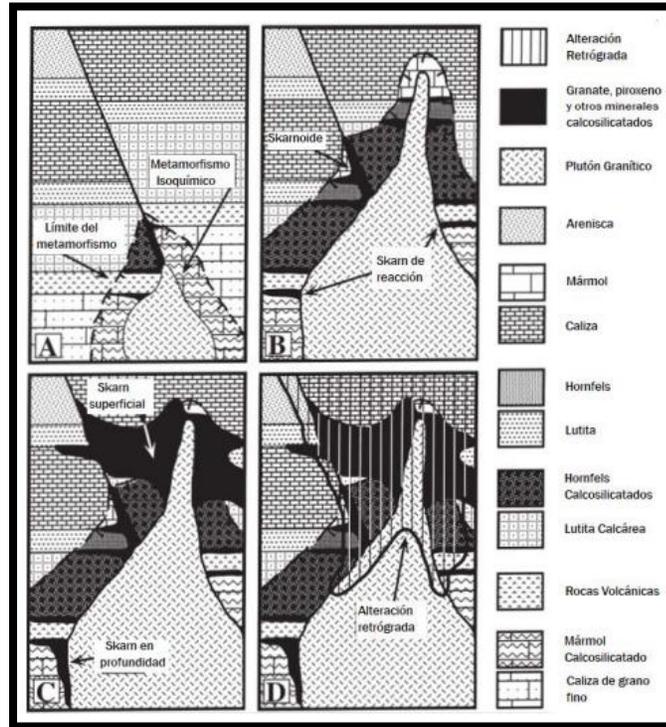
Fuente: Einaudi, M.T., Meinert, L.D., and Newberry, R.J., 1981, Skarn deposits

“En la formación de los skarn, (A) un intrusivo causa un metamorfismo de contacto en rocas sedimentarias, (B) ocurriendo una recristalización metamórfica y cambios de fase en el protolito con metasomatismo local y circulación de fluidos (alteración progradada) (Meinert, 1992).”

“(C) Luego ocurre una cristalización y liberación de una fase acuosa resultando en un metasomatismo en el skarn controlada por fluidos, y “

“(D) finalmente, el plutón se enfría, ocasionando una división de una fase de vapor y circulación de fluidos más fríos, lo que causa una alteración retrógrada (Meinert, 1992).”

Figura 23. Etapas de Formación de un Yacimiento Tipo Skarn (modificado de Meinert, 1983).



Fuente: Einaudi, M.T., Meinert, L.D., and Newberry, R.J., 1981, Skarn deposits

Zonación que sucede en la mayoría de los skarn la cual copia la geometría del contacto del plutón y los flujos de fluidos. Los Skarn, endoskarn y exoskarn regionales más cercanos tienen un alto contenido de Granate.

Las zonas distales son más ricas en piroxeno, mientras que la región mas frontal asociada con mármoles puede estar dominada por piroxenoides o vesubianita.

Los principales productos de depósitos de tipo skarn incluye: Fe, Cu, W, C (grafito), Zn, Pb, Mo, Sn, U, Au., granate, talco y wollastonita.

Los minerales calcosilicatados diópsido (clinopiroxeno), andradita (granate cálcico) y wollastonita (piroxenoide) son minerales predominantes en el skarn mineralizados e indican que, entre con otras cosas, el rango de formación de skarn es en general de 400°-600°C.

Aunque los skarn de Zn-Pb se forman a temperaturas más bajas, generalmente las temperaturas altas se asocian de formación de skarn. La presión no es fija y estos depósitos se forman de 1 a varios Km de profundidad.

### **Skarn de Sn**

Estos yacimientos se encuentran cercanos a zonas de granitos típicamente alcalinos (tipo "S") en ambientes intrusivos intracontinentales (ej. Bolivia). Se les asocia mineralización de Sn conjuntamente con trazas de F, Rb, Li, Be, W y Mo.

Estos yacimientos poseen bajos contenidos de sulfuros y altos contenidos de óxidos en la mena. Estos yacimientos son de pequeño volumen y baja ley, máximo 30 Mt métricas a 0.1 – 0.4% Sn. No tienen sentido económico rentable.

(INGLOMAYOR. Section C. Volume 19(2020))

### **Skarn de W**

Estos yacimientos ocurren en ambientes de margen continental y están asociados con magmas de subducción calcoalcalinos del tipo "I" de composición granodiorítica y cuarzo-monzonítica, emplazados en secuencias de rocas

calcáreas – lutíticas. Los minerales calcosilicatados típicos son granates, piroxenos, scheelita y wollastonita.

Estos minerales tienen la temperatura más alta entre minerales de skarn. La alteración tipo skarn ocurre en el contacto inmediato entre el intrusivo y la roca huésped calcárea, tanto a de exoskarn como endoskarn.

En general estos yacimientos están asociados a intrusivos relativamente profundos, de buena cristalización y textura fanerítica granular. Pueden convertirse en skarn de Cu, o presentarse en contacto inmediato, con muy pequeño desarrollo en skarns de Cu. (INGLOMAYOR. Section C. Volume 19(2020))

### **Skarn de Cu**

También están relacionados a ambientes de margen continental asociados, relacionados a magmas calcoalcalinos del tipo “I”, específicamente stocks y pórfidos granodioríticos/ dacíticos y cuarzo monzoníticos. Skarns de Cu cálcicos se encuentran próximos o en contacto con el cuerpo intrusivo.

Tienen un alto contenido de granates y una alta proporción granate/piroxeno. También se observa unas altas concentraciones de magnetita – hematita, lo que indica un ambiente oxidante. Los sulfuros típicos son pirita, calcopirita y menor bornita y esfalerita, indicando un pequeño grado de sulfuración.

Estos yacimientos pueden estar relacionados a pórfido cupríferos o bien a pórfidos estériles. En el caso de skarns asociados a pórfidos de cobre, estos pueden alcanzar grandes volúmenes (50 a 500 Mt para el caso de pórfidos cupríferos epizonales emplazados en rocas carbonatadas).

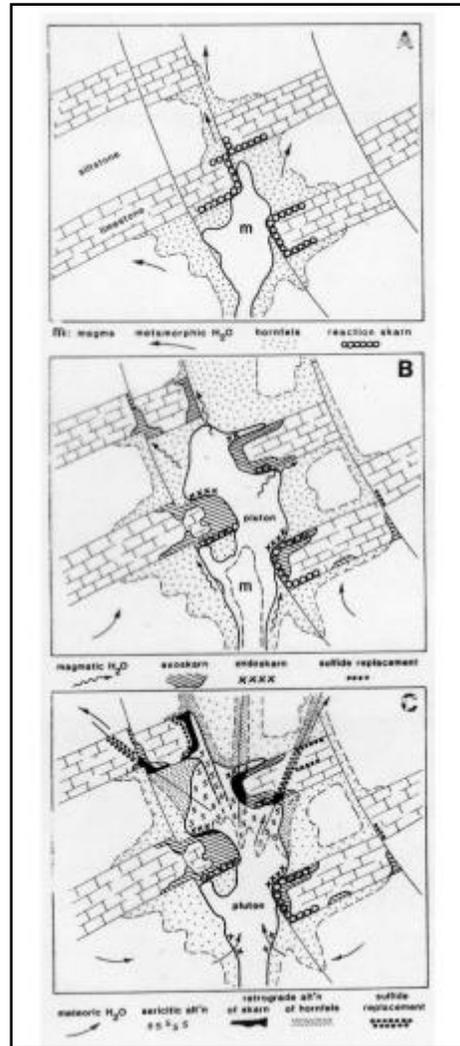
Estos depósitos se originan entre temperaturas entre 500° y 300° C. Scheelita posiblemente se genera en contacto entre roca huésped e intrusivo ( $\text{Ca}(\text{WO}_4, \text{MO}_4)$ ; mineral de alta temperatura). En el caso de skarn de Cu asociado a pórfidos estériles, estos tienden a ser de pequeño volumen, 1 a 50 Mt.

En el caso de skarn de Cu relacionados a un sistema del tipo pórfido cuprífero, existe asociaciones entre los eventos de alteración metasomática de skarn y la evolución de alteración del pórfido (Figura 18). La modificación progradada del skarn se relaciona con la alteración potásica y está zonada con respecto al núcleo potásico. Los granates son más andradíticos a más grosularíticos desde el contacto hacia afuera. Los piroxenos desde diopsido a hedenbergita a wollastonita, desde el contacto hacia afuera.

La proporción de granate/ piroxeno disminuye exposición al contacto hacia afuera. En las etapas más avanzadas de la evolución del sistema de pórfido cuprífero, ocurre el colapso del sistema hidrotermal, dándose alteración fílica en el pórfido, y alteración retrograda en el skarn. Esta alteración retrograda se superpone a la progradada, siendo muy destructiva. Se caracteriza por tremolita-

actinolita, smectita, siderita, calcita, talco, epidota, clorita, con óxidos y/o sulfuros de fierro. (INGLOMAYOR. Section C. Volume 19(2020))

Figura 24. Evolución de alteración progradada y retrogradada en sistema de Skarn de contacto y comparada con la evolución de alteración en pórfidos asociados (modificado de Meinert, 1992).



Fuente: Einaudi, M.T., Meinert, L.D., and Newberry, R.J., 1981, Skarn deposits

## Skarn de Zn-Pb

Corresponden situaciones metasomáticas de los cuerpos mineralizados de posición y relación con respecto a una intrusiva variable, pero siempre distales. Estos yacimientos ocurren en márgenes continentales de subducción también asociados a fuente de fluidos hidrotermales a intrusivos granodioríticos y cuarzo monzonitas calcoalcalinas del tipo "I".

En contraste con los skarns de cobre, la mineralogía skarn progradada está dominada por piroxenos (proporción granate/ piroxeno bajo) de composición CaFe y Mn (piroxenos hedenbergita – johansenita; granates andradita – almandino-spesartina). Esta composición es apreciada en la figura, diagrama composicional, donde muestra la distribución composicional de estos minerales de skarn distal.

"Las leyes típicas de Zn varían entre 6 y 12%, menor Pb (razón Zn/Pb 1/1 a 2/1) y menor Cu. En algunos casos se ha reportado contenidos de 1 a 9 oz. de Ag y 1 a 2 g/t Au."

"Estos yacimientos ocurren distales a los contactos intrusivos, generalmente a lo largo de contactos litológicos y/o estructurales. "

"No se observa una aureola de metamorfismo centrada en el skarn, pero si una zonación de granates a piroxenos desde un alimentador hacia afuera. Los sulfuros están asociados con los piroxenos."

“La alteración retrograda está caracterizada por ilvaita (Mn), anfibolas (actinolita-tremolita) y clorita.”

“Estos yacimientos están hospedados en rocas carbonatadas ya sea relacionados a granodioritas (desde batolitos profundos hasta stocks y diques epizonales) o en otros casos sin ninguna relación a intrusivos visibles.”

“De acuerdo con su posición y relación con intrusivos existe una subclasificación de skarns de Zn-Pb (Einaudi et al., 1981). Cercanos a batolitos, de ambiente profundo.”

Estos tienden a ser pequeños, bajo en Mn y ricos en hedenbergita, con mineralización de sulfuros en el skarn, con bajo desarrollo de reemplazo en la roca calcárea huésped. 17 Cercanos a stocks epizonales con amplio desarrollo de skarn (350° y 500°C).

“Estos son ricos en Mn, domina johansenita. Los sulfuros están relacionados con los piroxenos. Distales a fuente ígnea. Estos son ricos en Mn, domina la johansenita.”

“Normalmente existe un cuerpo alimentador y una zonación de minerales de skarn desde ella, desde granates a piroxenos hasta caliza fresca.”

“Los fluidos hidrotermales están fuertemente controlados por canales de permeabilidad. Vetas de carbonatos con minerales de Mn calcosilicatados (no son skarn en estricto rigor).”

“Corresponden a vetas de cuarzo-carbonatos (calcita, siderita, rodocrosita, etc.) con trazas de minerales calcosilicatados. Ocurren a temperaturas bajo los 300° C y son distales a su fuente.”

“Bajo contenido de sulfuros y de escasa relevancia económica. Representan el límite más distal a mineralización del tipo skarn.”

“Cabe destacar que el volumen de mineralización/ alteración de un skarn en general estará controlado por el volumen de fluido hidrotermal exsuelto desde su fuente magmática y de la distancia de transporte.”

“Por otra parte, el potencial de mineralización será dependiente de la profundidad y porcentaje de cristalización del magma relacionado, siendo de mayor potencial aquellos skarns de carácter epizonal.”

## **Relaciones Skarn-Pórfidos**

“Existe una relación intrínseca que existe entre las intrusiones multifásicas de niveles batolíticos (diorítica-granito) y los plutones precursores son determinantes para la generación de depósitos como rocas hospedantes.”

“Los plutones precursores con respecto a los stocks del pórfido pueden estar separados por un intervalo de tiempo de 1 a 2 ma. o menos, ellos son considerados como de media a alta cristalización de la corteza, y varían de magmas máficos a félsicos que asciende desde un reservorio más profundo para desarrollar un sistema pórfidoskarn.”

### **Pórfido asociado**

El pórfidos son forma del resultado de procesos magmáticos-hidrotermales, caracterizados en muchos casos por la presencia de minerales de mena como los sulfuros y los óxidos, en vetas y diseminados, la alteración presente en los pórfidos suele ser pervasiva y zonada de acuerdo con el tipo de alteración, la relación tectónica se da a través de zonas de subducción y arcos de isla. Los pórfidos pueden clasificarse de acuerdo al metal económico como de AuCu-Mo-W-Sn, y los tamaños varían desde el Cu>Mo>Au>Sn>W.

Consideremos eventualidades en los pórfidos se relacionan a magmas de composición andesítica a dacítica, los mismos que pueden originar los pórfidos económicos, además este magmatismo tiene que ser calcoalcalino o alcalino; para que un magma sea considerado fértil tiene que contener un porcentaje mayor de 4% de agua aproximadamente dentro de su composición, esta característica es determinada por la presencia de fenocristales de hornblenda.

“En control de pórfidos magmáticos sobre los elementos de mena, están en función del grado de evolución estructural, fraccionación y estado de oxidación, los pórfidos económicos se relacionan con magmas relativamente oxidados y poco evolucionados, siendo un magma evolucionado aquel que se ha formado lejos del manto y de sus elementos compatibles; el grado de oxidación de un sistema químico está determinado por la presencia del  $Fe^{+3}$ , el cual se encuentra en la magnetita, el  $Fe^{+2}$  denota el estado de reducción y está relacionado a la ilmenita. La reducción de un magma oxidado se da cuando este asociado con rocas básicas, es decir rocas carbonatadas, carbón, u otro material orgánico, además si la corteza por la cual asciende el magma contiene paquetes de rocas ricas en materia orgánica estos se van a reducir a través de su recorrido.”

## **Metamorfismo de contacto**

Se originan mediante la formación de aureolas adyacentes al plutón a altos grados de temperatura, pueden extenderse por kilómetros en ambientes relativamente profundos, en ambientes subvolcánicos a superficiales el metamorfismo es de menor magnitud; el metamorfismo isoquímico se denomina de contacto, que no es más que la deshidratación y decarbonatación de las rocas sedimentarias como las calizas, margas, lutitas, etc.

“La formación del metamorfismo isoquímico varía entre 1,000 a 10,000 años, en esta fase no circulara fluidos y solo la temperatura juega un papel importante en su formación. Como propiedad mecánica de la roca, esta disminuye su permeabilidad y volumen, pero aumenta su fragilidad haciendo que sea susceptible a una porosidad secundaria. Las etapas de metamorfismo son esencialmente estériles de minerales de mena, pero al parecer origen de formación temprana de minerales, en el caso de los hornfels calcáreos estos son fácilmente fracturados durante la adaptación estructural ocurrida en el emplazamiento de magma o debido a la pérdida de volátiles, esto genera un incremento en la porosidad.”

“Los calcosilicatos formados durante el metamorfismo de contacto, reflejan los componentes de los protolitos originalmente sedimentarios; en muchos casos las impurezas dominantes de los mismos son el magnesio y el aluminio, y los minerales calcosilicatos resultantes son la grosularita y diópsido; los protolitos

sedimentarios ricos en hierro, forman rocas metamórficas con calcosilicatos ricos en hierro; la distinción de los calcosilicatos de origen metamórfico y de origen metasomático es muy compleja, en algunos casos el criterio usado para su diferenciación dada la complejidad, está dado a partir del número de fases de formación, mientras que los calcosilicatos 21 metamórficos tienen una gran número de fases para la formación de sus componentes, los metasomáticos tienen muy pocas fases con respecto a sus componentes. Las reacciones entre la fase metamórfica y la fase metasomática en los depósitos del tipo Skarn son importantes porque los minerales metamórficos son sobreimpuestos y alterados por el metasomatismo tardío, las asociaciones mineralógicas pueden conducir a un mejor entendimiento de las condiciones generales de presión y temperatura del sistema en la formación temprana de Skarn, y a entender la distribución termal y patrones de flujo de fluidos en aureolas de contacto. Las reacciones metamórficas involucran solamente cambios en la cantidad de componentes volátiles presentes en la roca, como son el O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, y están en función de las condiciones de presión, temperatura y la fugacidad de estos componentes volátiles.”

### **Endoskarn**

Se origina dentro del plutón, es generado a partir de la circulación continua de fluidos hidrotermales, sus espesores varían de acuerdo a las condiciones fisicoquímicas de formación del Skarn. El endoskarn es más abundante en sistemas someros, es decir en las zonas laterales del contacto, en cambio poco

probable que ocurra en zonas de cúpula. Su formación se debe al intercambio metasomático entre el plutón y los componentes aportantes de Ca y Mg del exterior (roca caja).

### **Exoskarn**

Se originó a partir del reemplazamiento metasomático de rocas carbonatadas con contenidos de calcio (calizas) o magnesio (dolomitas) relacionadas a la generación de granates-piroxenos, poseen una morfología tabular o lenticular de hasta 500m de distancia del intrusivo en el caso de skarn proximales, se formación principalmente se da en los techos de las intrusiones (cúpulas), y raramente en las zonas laterales siendo los mismos de baja ley.

## **EVOLUCIÓN DEL SKARN**

### **Metamorfismo isoquímico**

La formación vuelve a la etapa de la recristalización metamórfica y cambios mineralógicos reflejando el protolito y circulación de fluidos gracias a las alta temperatura sigue formando minerales calcosilicatados. Incluye además el desarrollo de: mármol, rocas córneas, cuarcitas, skarn de reacción, skarnoides, talco y wollastonita hacia la periferia.

### **Skarn metasomático - fase progradada**

Se forma por la cristalización del magma y separación de una fase fluida. Se originan principalmente minerales anhidros por acción de fluidos de derivación magmática a temperaturas de 400°-800°C produciendo la obliteración de la textura original del protolito. Por lo que generalmente en esta etapa ocurre o comienza la mineralización.

### **Skarn retrogrado**

Se manifiesta en el enfriamiento del plutón y la circulación de aguas de temperatura más baja, posiblemente meteóricas, oxigenadas, causando alteración retrógrada de los minerales calcosilicatados metamórficos y metasomáticos. En esta etapa se forman nuevos minerales hidratados de temperatura más baja, a partir de los minerales anhidros previamente formados.

## **3.2 Geología regional**

El yacimiento se ubica en la franja de yacimientos de skarn de Cu (Mo-Au), asociados a sistemas tipo pórfido, ubicados en la parte sureste del Perú.

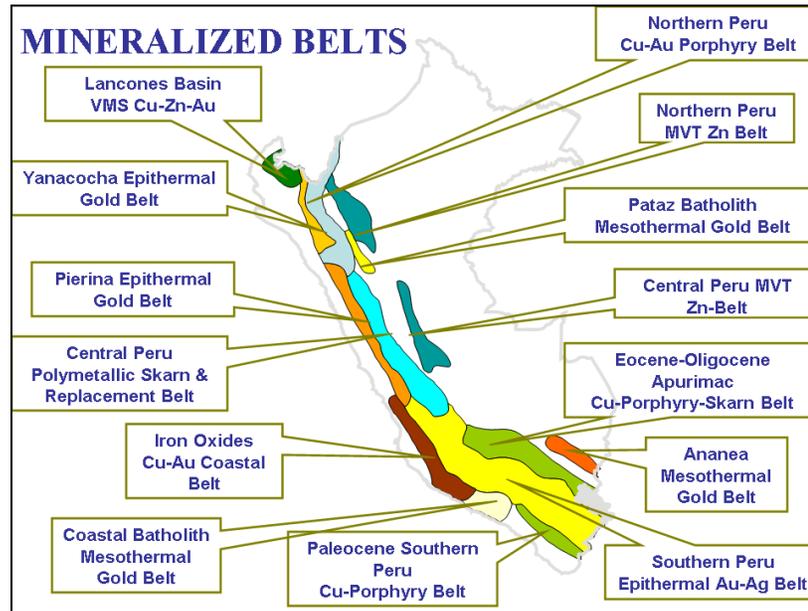
Esta franja metalogenética está controlada por el batolito Andahuaylas-Yauri del Eoceno-Oligoceno, que se ha emplazado en unidades sedimentarias del Mesozoico, siendo la de mayor importancia la formación Ferrobamba (Cretáceo inferior a superior).

Las rocas intrusivas del batolito, en contacto con las calizas Ferrobamba, originaron metamorfismo de contacto y en algunos lugares cuerpos de skarn con mineralización de Cu (Mo-Au).

El batolito Andahuaylas-Yauri se ha emplazado al sur de la "Deflexión de Abancay", con lineamientos de dirección NO-SE, NE-SO y otros que fueron generados principalmente por la Orogenia Andina.

Dentro de este contexto geológico regional, está localizado en el cinturón porfirítico/skarn Cu-Mo-Au denominado Skarn belt Andahuaylas-Yauri situado al SE del Perú, en una zona de anomalía atribuida a la orogénesis Inca del Eoceno al Oligoceno temprano (M. Brookes, 2005); este cinturón metalogénico está hospedado principalmente en el Batolito de Andahuaylas-Yauri, el cual presenta intrusiones múltiples de composición calcoalcalina. Las principales deformaciones en la región, causantes del fallamiento y plegamiento son asociadas a la fase Inca (J. Perelló et al, 2002).

Figura 25. Mapa de minas con Yacimientos tipo skarn Perú.



Mapa metalogenético del Perú, mostrando las principales franjas mineralizadas (Cardozo, 2002)

### 3.3 Geología local

El yacimiento se observa las siguientes rocas de naturaleza ácida como (granodiorita) a intermedia (monzonita) que intruyen a las rocas sedimentarias y entre ellas a las calizas de la Formación Ferrobamba. Las monzonitas asociadas a los yacimientos de Ferrobamba, Chalcobamba, Charcas, Sulfobamba y Azuljaja obedecen a un alineamiento estructural ONO-ESE según informes en el EIA de la misma dirección que el trend del batolito Andahuaylas – Yauri.

## **Rocas Sedimentarias**

Entre las unidades litológicas sedimentarias mencionadas anteriormente, afloran únicamente las calizas Ferrobamba hacia la esquina noreste del yacimiento.

Estas calizas de color gris, bastante distorsionadas y cruzadas por algunas fallas inversas de rumbo aproximado E-O, muestran hacia el Sur, en contacto con los intrusivos, una gradación a mármol hornfels y Skarn.

## **Rocas Intrusivas**

De composición intermedia acida, afloran a manera de apófisis y diques dentro del cuerpo principal de hornfels y skarns y, como masa continua, limitando el yacimiento hacia los extremos Este, Oeste y Sur del área.

### **3.4 Fases de intrusión**

La actividad magmática del Eoceno-Oligoceno, en el sureste peruano ha emplazado una serie de cuerpos intrusivos calcoalcalinos, en múltiples fases intrusivas, conocida como Batolito de Andahuaylas-Yauri (300 km x 60 km); evento que comprende fases plutónicas, intrusiones de stocks, sills y diques de pórfidos hipabisales. Estos intrusivos estarían íntimamente relacionados a lineamientos regionales andinos de rumbo general NO - SE; como el lineamiento mayor de Berenguela-Tintaya-Katanga-Las Bambas-Cotabambas.

En general, se pueden distinguir 5 periodos de fase intrusivas dentro de la secuencia magmática del Eoceno-Oligoceno de la franja cuprífera Andahuaylas-Yauri:

“• Iniciando con el emplazamiento de rocas de composición principalmente diorítica, de grano fino a medio, con edades radiométricas entre 43 y 40 Ma.”

“• Fase de Intrusión de granodioritas y granodioritas-porfíricas, hornbléndicas, de color gris claro a oscuro, equigranulares, con edades radiométricas entre 39 y 37 Ma.”

• Emplazamientos de stocks de pórfidos monzoníticos, cuarzo monzoníticos y cuarzo dioríticos, a esta etapa se le atribuye el evento hidrotermal cuprífero de la franja Andahuaylas - Yauri. Evidencias de alteración-mineralización, tanto en la monzonita como en las rocas huéspedes que intruye, son reconocidas en proyectos y minas de esta franja cuprífera.

“Usualmente son fases que se presentan en centros de mineralización como en los distritos de Tintaya, Katanga, Huinchos, Ferrobamba, Chalcobamba, Sulfobamba, Los Chancas y otros centros de menor relevancia. En estos centros han desarrollado cuerpos de skarn de granate – piroxeno – magnetita y algunos sistemas del tipo pórfido asociados a los skarn. Las edades radiométricas de la alteración-mineralización van de los 38 a los 32 Ma.”

“• Inmediatamente después ocurre el emplazamiento de pequeños stocks y diques de un pórfido cuarzo monzonítico, con fenocristales de cuarzo y ortoclasa

muy desarrollados, no presenta ni alteración ni mineralización hidrotermal y está considerado como estéril. “

“• Emplazamiento de diques y pequeños stocks básicos, principalmente dacitas y andesitas, evidentemente post-minerales, que en algunos casos engloban a las zonas mineralizadas reduciendo sustancialmente su volumen.”

Tabla 10. Edades radiométricas del Batolito Andahuaylas-Yauri.

Area	Litología	Estado	Mineral Datado	Método	Año (MA)	Fuente
Tintaya	Dacita	Fresca	Homblenda	K-Ar	32.5 ± 1.0	Noble, 1984
Tintaya	Dacita	Alterada	Biotita	K-Ar	33.7 ± 1.0	Noble, 1985
Quechuas	Cuarzo Monzonita	Alterada	Whole rock	K-Ar	37	Yoshikawa, 1976
Chalcobamba	Cuarzo Monzonita	Alterada	Homblenda	K-Ar	32.6 ± 1.0	Noble, 1985
Antapaccay	Skarn		Molibdenita	Re-Os	42	Methur, 2000
Chalcobamba	Skarn		Calcopirita	Re-Os	29 ± 8.0	Ruiz & Methur, 2001
Chalcobamba	Skarn		Magnetita	Re-Os	29 ± 8.0	Ruiz & Methur, 2002
Ferrobamba	Skarn		Molibdenita	Re-Os	33.5 ± 0.2	Ruiz & Methur, 2003
Katanga			Biotita	K-Ar	31.6 ± 0.8	Perelló & otros, 2003
Livitaca			Biotita		40.3 ± 1.0	Perelló & otros, 2003
Progreso			Homblenda		39.7 ± 1.9	Perelló & otros, 2003

Fuente “Minero Perú”

### 3.5. Geología Estructural

La distribución y ocurrencia en franjas de la magnetita, calcopirita y los minerales de ganga; así como el emplazamiento de algunos diques y apófisis de intrusivos en forma casi paralela a estas franjas, parecen haber sido controlados por la diferencia en composición original y los planos de estratificación de la caliza reemplazada.

Solamente pocas fallas menores de diferente orientación y con muy poco desplazamiento que no indican tener mayor relación con los procesos de mineralización, se observan en forma muy localizada en el yacimiento.

Un sistema muy conspicuo de fracturamiento paralelo de orientación aproximadamente E-O se presenta cruzando la monzonita porfirítica, en la esquina noreste, y la granodiorita en el lado sur del yacimiento.

### **3.6. Geomorfología**

Las geoformas que se encuentran en el área de estudio están relacionadas a relieves montañosos estructurales con procesos de glaciación en las partes altas y procesos de erosión fluvial en las partes bajas. Las geoformas que predominan en el área de estudio corresponden a las unidades geomorfológicas denominadas como montañas con ladera de pendiente fuerte y montañas con ladera de pendiente moderada.

### **3.7. Geoquímica**

El programa de caracterización geoquímica complementaria se realizó en las muestras de relaves de Sulfobamba y Ferrobamba, roca de desmonte del depósito Ferrobamba, así como en las muestras colectadas de las Canteras, DME, DMO y los depósitos mixtos DME/DMO. Todas las muestras se sometieron a pruebas estáticas para evaluar el potencial de generación de acidez y la lixiviación de metales de las muestras. A un subconjunto de muestras de relaves

se realizaron pruebas cinéticas para evaluar el potencial de generación de acidez y lixiviación de metales de las muestras a largo plazo

### **3.8. Hidrogeología**

Los estudios realizados en el área de la Minera describen un medio hidrogeológico conformado por depósitos cuaternarios; materiales volcánicos, rocas intrusivas, calizas y skarn, con distintas propiedades hidráulicas. En el caso de las calizas se observan distintos estados de karstificación.

Fallas y fracturas también participan en el flujo subterráneo. La recarga se produce por precipitación y según la formación varía entre 50 y 550 mm/año. La descarga de las unidades hidrogeológicas se produce en los manantiales y ríos de las sub-cuencas de la zona de estudio. El sistema hidrogeológico natural se encuentra modificado debido a la explotación del Tajo Ferrobamba y al bombeo de agua subterránea en su entorno.

## CAPITULO IV

### “PROPIEDADES FISICO-MECANICAS DEL MACIZO ROCOSO”

#### 4.1 Introducción

Existen diferentes parámetros de propiedades físico-mecánicas del macizo rocoso que se usan para el diseño de taludes, pero por un tema operativo y de efecto solo se mencionaran los principales.

#### 4.2 Propiedades de la roca

##### 4.2.1 Peso específico

El peso específico de las rocas que se harán para el talud está dado por el peso de parte dura respecto a la unidad de volumen. Se expresa por:

$$p = G / V_d$$

p: peso específico de la roca (g/cm<sup>3</sup>)

G: peso de la muestra de la roca (g)

V<sub>d</sub>: volumen de la muestra de la roca (cm<sup>3</sup>)

##### 4.2.2 Densidad

“La densidad estará definida por la relación entre la masa que contiene la unidad de volumen. Se expresa por:”

$$\delta = M/V$$

$\delta$ : Densidad de roca (g/cm<sup>3</sup>)

M: Masa de la roca (g)

V: Volumen de roca (cm<sup>3</sup>)

El peso específico y la densidad de la roca están ligados entre si por la siguiente relación:

$$p = \delta \cdot g$$

p: peso específico de la roca (g/cm<sup>3</sup>)

$\delta$ : Densidad de roca (g/cm<sup>3</sup>)

g: aceleración de la fuerza de la gravedad (cm/seg<sup>2</sup>)

Las rocas de baja densidad son propensas a la deformación y rompen con facilidad, requiriendo un factor de energía relativamente bajo, mientras las rocas de mayor densidad demandan de una mayor cantidad de energía para lograr una fragmentación satisfactoria, óptimo desplazamiento y adecuado esponjamiento del material volado (VIII Seminario Internacional de Explosivos –INDUMIL noviembre de 2009, BOGOTÁ).

### **4.2.3 Porosidad**

Los cálculos se dan a partir del coeficiente de porosidad, que es adimensional, es igual a la relación del volumen de los poros para el volumen total de la muestra, Se expresa por:

$$e = V_p/V$$

### **4.2.4 Esponjamiento**

Es el material removido aumenta su volumen por consecuencia de la extracción, la relación del volumen de la roca después del disparo para el volumen de la misma del macizo.

$$K_e = V_e/V$$

## **4.3 Resistencia de las rocas**

La resistencia de las rocas se entiende como la capacidad de resistir esfuerzos externos sean naturales o inducidos sin destruirse. Estos esfuerzos pueden ser de compresión, tracción y cizallamiento.

La resistencia de las rocas puede modificarse en función al estado en que se encuentren, así como un estado triaxial la resistencia es mayor que un estado biaxial y este a su vez es mayor a un estado mono axial.

### 4.3.1 Resistencia dinámicas a la compresión

Es la fuerza requerida para romper la carga de muestra sometida (presión) sin que la roca esté sostenida por los lados. Esta resistencia se puede determinar mediante dos ensayos, carga puntual o compresión uniaxial.

El prueba de ensayo de carga puntual se lo realiza con muestras de rocas irregulares, por lo que las pruebas ensayo de compresión uniaxial implica aplicar cargas compresivas axiales progresivamente mayores, a probetas de muestras de roca cilíndricas regulares.

$$R_{cop} = P_{cop}/F$$

$R_{cop}$ : Límite de resistencia (kg/cm<sup>2</sup>)

$P_{cop}$ : Carga para la destrucción de la probeta (kg)

$F$ : Superficie de sección de la probeta (cm<sup>2</sup>)

Tabla 11. Propiedades físico – mecánicas de la roca.

TIPO DE ROCA	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (Kg/cm <sup>2</sup> )	DENSIDAD (Tm /m <sup>3</sup> )
Andesita	1.500-2.500	2,5 a 2,8
Arcillita	280-800	2,2 a 2,7
Arenisca	80-2.000	1,6 a 2,9
Basalto	2.000-4.000	2,7 a 2,8
Caliza	800-1.500	1,5 a 2,8
Conglomerado	1.400	2,0 a 2,7
Cuarcita	900-4.700	2,3 a 2,7
Dacita	1200-5000	2,5 a 2,75
Diabasa	1.600-2.400	2,8 a 3,1
Dolomía	360-5.600	2,2 a 2,9
Esquisto	108-2.300	2,7 a 2,9
Gabro	1500-2800	2,8 a 3,1
Gneis	1.500-3.000	2,5 a 2,8
Granito alterado	108-1.450	2,5 a 2,6
Granito sano	800-2.700	2,5 a 2,8
Grauvaca	2.000-2.500	2,6 a 2,7
Marga	35-1.970	2,6 a 2,7
Mármol	800-1.500	2,6 a 2,8
Micacita	200-653	2,4 a 3,2
Pizarra	2.000-2.500	2,7 a 2,8
Riolita	800-1600	2,45 a 2,6
Traquita	3.300	2,70
Yeso	40-430	2,2 a 2,3

“Fuente “Gonzales Vallejo”

#### 4.3.2 Resistencia dinámicas a la tracción

Esto se determina por resultado de un esfuerzo compresivo, la tensión horizontal y un esfuerzo compresivo variable. Se utiliza Ensayo de Tracción indirecta (método de Brasil), para determinar de forma sencilla consiste en someter una probeta cilíndrica a una carga lineal compresiva por medio de planchas de un prensa que actúan a lo largo de su diámetro, se aplica la carga hasta que la muestra de roca llegue a su destrucción, la probeta rocosa suele romperse en la mayoría de los casos separándose en dos mitades según su eje de carga diametral.

$$R_{tr} = 2 \times P / \pi \times D \times t$$

$R_{tr}$ : Resistencia a la tracción (kg/cm<sup>2</sup>)

P: Magnitud de fuerza compresora (Kg)

D: diámetro de disco de roca (cm)

t: Grosor del disco de la roca (cm)

### **4.3.3 Resistencia dinámicas al cizallamiento**

La resistencia al cizallamiento es creada una parte de un cuerpo solido en relación con el resto. La relación existe entre la fuerza tangencial de ruptura, con respecto a la superficie lineal de corte, determina el valor de esta resistencia.

$$r_c = P/F$$

## **4.4 Clasificación geotécnica**

La importancia de la geotecnia para el control de vibraciones para evitar el daño en taludes, se debe considerar como tema criticó, la variación del procedimiento operacional se puede determinar como algo catastrófico, desde los puntos de vista en lo económico puede ser pérdidas millonarias, desde el punto de vista geotécnico implica demoras operacionales, riesgos a los equipos o personas lo más valioso que se tiene en las unidades mineras, el control de vibraciones ayuda contribuir en la operación directamente puesto que ajustando la voladura se logra tener un mejor talud, en el ángulo del talud, como posibles daños que se pueden evitar.

- Los factores geológicos en la mayoría de casos son los problemas que se encuentran en la geotecnia.
- Los procesos geológicos modifican en la mayoría el comportamiento de los materiales, alterando el medio físico y ocasionando problemas geotécnicos.
- El agua es una condición presente en la mayoría de terrenos en el Perú, es el que mayor incidencia en los comportamientos geotécnicos en los materiales.

### **Tipo de Clasificación.**

La clasificación de macizos rocosos para consideraciones geotécnicas, es obtener los parámetros geomecánicas para su uso dentro del diseño.

Gracias a las clasificaciones geomecánicas, que permiten la observación directa de las características de los macizos rocosos y la realización ensayos sencillos, los indicadores de calidad son observados permiten obtener parámetros geomecánicos del macizo y su característica en el sostenimiento de talud.

Identificando características del macizo rocoso se consideran en las distintas clasificaciones son:

- Resistencia del material rocoso.
- Índice RQD.
- Espaciado de las discontinuidades.
- Orientación de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Estructura geológica y fallas.

- Filtraciones y presencia de agua.
- Estado tensional.

Las dos primeras clasificaciones geomecánicas más utilizadas en la actualidad son la RMR y el Q, el comportamiento de un macizo rocoso competente generalmente depende de las características de las discontinuidades, además de la litología e historia de la geología evolutiva, la resistencia al corte, la rugosidad, el tipo de falla, relleno que se pueda encontrar puede determinar la estabilidad del talud.

### **Tipo de Fallas.**

La clasificación se base en el reconocimiento de los factores geológicos que hacen condicionante a una falla.

Los tipos de deslizamientos de taludes suceden de diversas maneras y aún continua cierto grado de incertidumbre en su predictibilidad, rapidez de ocurrencia y área afectada. Sin embargo, existen ciertas condiciones que te ayudan a identificar y reconocer áreas potenciales de falla, lo cual permite el tratamiento del talud para eliminar, minimizar o reducir a un mínimo el riesgo de falla.

**“Tabla 12. Tabla de Fallas por su forma y definición.”**

TIPO DE FALLA	FORMA	DEFINICION
Desprendimientos	Caída libre	Desprendimiento repentino de uno o más bloques de suelo o roca que descienden en caída libre gravitatoria.
	Volcadura	Caída de un bloque de roca con respecto a un pivote ubicado debajo de su centro de gravedad.
Derrumbes	Planar	Movimiento lento o rápido de un bloque de suelo o roca a lo largo de una superficie de área plana.
	Rotacional	Movimiento relativamente lento de una masa de suelo, roca o combinación de los dos a lo largo de una superficie curva de falla bien definida.
	Desparramamiento lateral	Movimiento de diferentes bloques de suelo con desplazamientos distintos.
	Deslizamientos de escombros	Mezcla de suelo y pedazos de roca moviéndose a lo largo de una superficie de roca planar.
Avalanchas	De roca o escombros	Movimiento rápido de una masa incoherente de escombros de roca o suelo-roca donde no se distingue la estructura original del material.

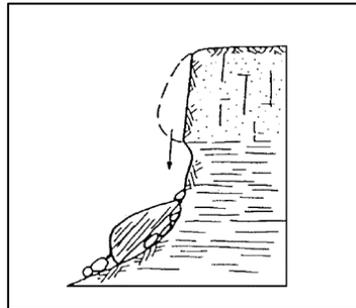
Flujo	De escombros	Suelo o suelo-roca moviéndose como un flujo viscoso, desplazándose usualmente hasta distancias mucho mayores de la falla. Usualmente originado por exceso de presiones de poros.
-------	--------------	--

“Fuente: La clasificación de fallas de taludes adaptada a Hunt (1984).”

### Falla de Desprendimiento.

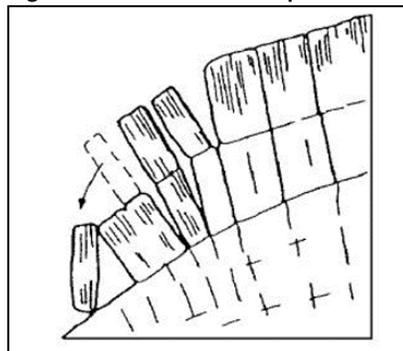
Los desprendimientos se producen generalmente en taludes verticales o casi verticales en suelos débiles o moderadamente fuertes y masivos rocosos fracturados. Comunmente, antes de la falla ocurre un desplazamiento, el cual puede ser identificado por la presencia de grietas de tensión.

Figura 14. Desprendimientos de bloque caída libre.



Fuente “Gonzales de Vallejo”

Figura 15. Volcadura de bloques.

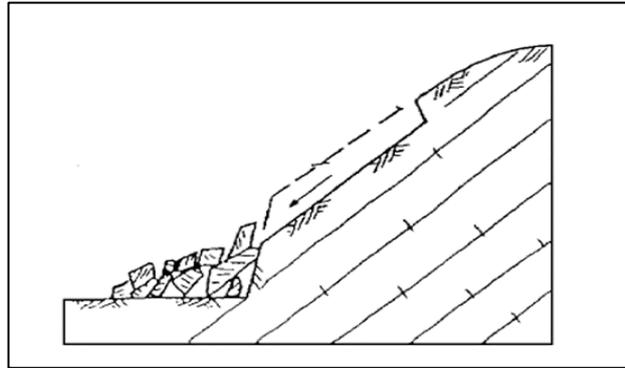


Fuente “Gonzales de Vallejo”

## Falla de Derrumbes

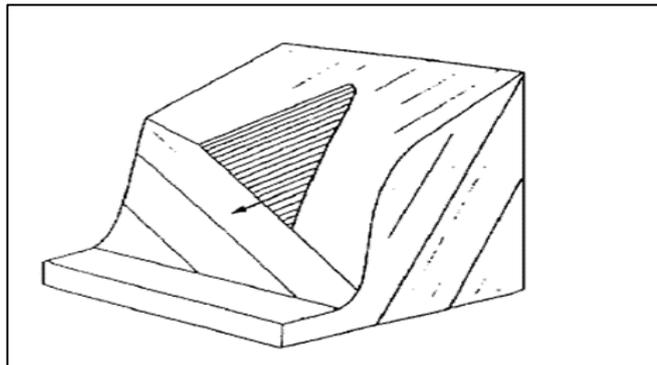
Los derrumbes se encuentran relacionados a fallas de suelos y rocas, y de acuerdo con la forma de la superficie de falla se dividen en planares, deslizamientos (laterales) cuñas, y rotacionales.

Figura 16. Deslizamiento planar en macizo rocoso.



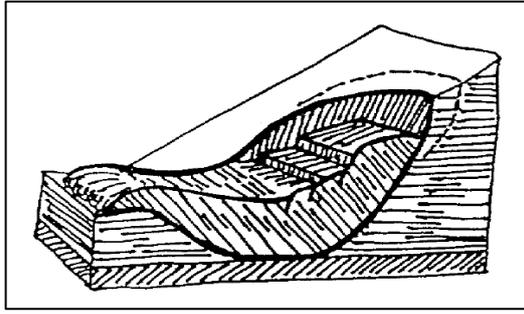
Fuente "Gonzales de Vallejo"

Figura 17. Deslizamiento en forma de cuña.



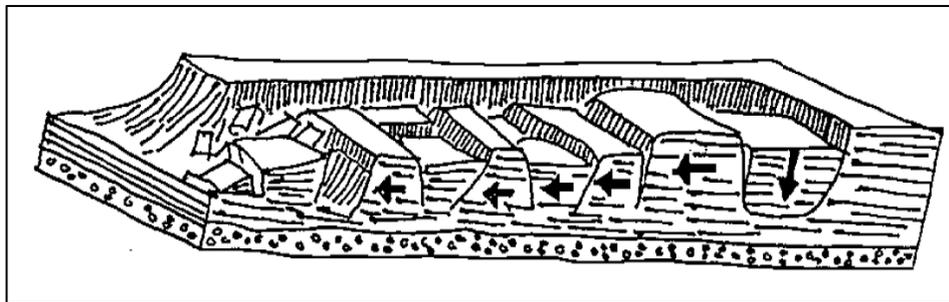
Fuente "Gonzales de Vallejo"

Figura 18. Deslizamiento rotacional.



Fuente "Gonzales de Vallejo"

Figura 19. Desprendimiento lateral.



Fuente "Gonzales de Vallejo"

## CAPITULO V

### VARIABLE DE DISEÑO CONTROLABLES DE VOLADURA, PRINCIPALES FORMULAS DE CALCULO EN VOLADURAS

#### VARIABLE DE DISEÑO CONTROLABLES DE VOLADURA

##### 5.1 Perforación.

Es el número de taladros perforados para obtener una determinada cantidad o volumen de roca, depende de esta función de la volabilidad de las rocas. Para obtener una determina perforación específica si se requiere una cierta cantidad de material, se tiene que llevar a cabo un cálculo la cual se realiza con la siguiente fórmula (Pernia, 2011).

$$PS = \frac{\left(\frac{hH}{\cos\beta} + J\right)}{\frac{B}{\cos\beta} \times S \times H}$$

Donde:

H = Altura de Banco (m)

J= Sobre – perforación (m)

B = Burden (m)

S = Espaciamiento (m)

B = Angulo de los barrenos con respecto a la vertical (grados)

## 5.2 Variables de diseño

Son todas las variables que se incluyen en la formulación del diseño de voladura de acuerdo a los parámetros de cada minera para realizar una voladura adecuada.

H = Altura de banco

D = Diámetro de taladro (carga a granel)

L = Longitud del taladro

d = Diámetro de la carga (encartuchados)

B = Burden nominal

S = Espaciamiento nominal

L<sub>v</sub> = Longitud de la voladura

A<sub>v</sub> = Anchura de voladura

B = Burden efectivo

S = Espaciamiento efectivo

T = Taco

J = Sobreperforación

l = longitud de carga

$\Theta$  = Angulo de salida

v/w = Grado de equilibrio

t<sub>r</sub> = tiempo de retardo

### **5.3 Altura de banco.**

Dado que la altura de banco tiene una influencia directa en el resultado de las voladuras, los diseños mediante los disparos a realizarse dependen de la consideración de la altura de los bancos en el cálculo.

### **5.4 Diámetro de taladro.**

El diámetro del taladro óptimo para el diseño de una malla de voladura depende de las características del macizo rocoso que se va a disparar, el P80 que se quiere obtener al final de la voladura, la altura del banco diseñado y la cantidad de explosivo a cargar en los taladros.

También depende del costo que generará el proceso de la perforación y voladura. El diámetro utilizado por lo general supera las 10", lo que también afecta a la VOD del explosivo, al ser mayor la carga del explosivo, el material volado será mayor sin necesidad de incrementar los metros perforados (Pernia, 2011).

Para determinar el diámetro óptimo en la práctica, se consideran tres aspectos:

- a) La disponibilidad y aplicabilidad del equipo de perforación en el trabajo proyectado.
- b) La altura de banco proyectada y la amplitud o envergadura de las voladuras a realizar.
- c) La distancia límite de avance proyectado para el banco.

## 5.5 Longitud de taladro

Se considera a la suma de altura de banco más la sobre perforación necesaria por debajo del nivel o razante del piso para garantizar su buena rotura y evitar que queden lomos o resaltos (toes) y salga optimo el proceso, que afectan al trabajo del equipo de limpieza y deben ser eliminados por rotura secundaria. Este sobre perforación debe ser por lo menos de 0,3 veces el valor del burden, por tanto:

$L = (0,3 \times B)$  donde:

L = Longitud de taladro (m)

B = burden

## 5.6 Burden.

Se refiere a un parámetro más para determinante de las mallas de voladura. Depende directamente del diámetro de perforación, de las propiedades de la roca, altura de banco y las especificaciones del explosivo a emplear. Se determina en razón del grado de fragmentación y al desplazamiento del material volado que se quiere conseguir.

“Si el burden es excesivo, la explosión del taladro encontrará mucha resistencia para romper adecuadamente al cuerpo de la roca, los gases generados tenderán a soplar y a caracterizar la boca del taladro. “

“Por el contrario, si es reducido, habrá exceso de energía, la misma que se traducirá en fuerte proyección de fragmentos de roca y vibraciones.”

## **5.7 Espaciamiento (E)**

Se da cuando distancia entre taladros de una misma fila que se disparan con un mismo retardo o con retardos diferentes y mayores en la misma fila. Se calcula la relación con la longitud del burden, a la secuencia de encendido y el tiempo de retardo entre taladros.

En el diseño, normalmente es igual al burden para malla de perforación cuadrada  $E = B$  y de  $E = 1,3$  a  $1,5 B$  para malla rectangular o alterna.

## **5.8 Taco**

“Es la longitud de la parte superior del taladro que se rellena con un material detrítico, inerte como la grava, para confinar y aislar los gases producidos en el disparo y se pueda realizar la fragmentación sin problema alguno.”

## **5.9 Sobre perforación**

Es da principalmente en los taladros verticales para mantener la rasante del piso.

Si resulta es corta normalmente se producirán lomos en el terreno, pero si es excesiva se producirá una sobre excavación con un incremento de vibraciones y sobre costo de perforación.

## PRINCIPALES FORMULAS DE CALCULO EN VOLADURAS

### Formulas base.

Según criterios técnicos de acuerdo a diferentes propuestas de cálculo para el burden, que involucran varios parámetros de perforación, de la roca y algunas del explosivo a usar:

#### 5.11 Formula de Andersen

Propuesta inicial:

$$B = K \times \sqrt{D} \times L$$

B = Burden

D = Diametro (pies)

L = Longitud de barreno (pies)

K = Constante empirica

,

Pero en muchos casos la K = 1 dio buenos resultados quedo:

$$B = \sqrt{D} \times L$$

## 5.12 Formula de Langefors

Generalmente verificamos la potencia relativa del explosivo, el grado de compactación, una constante de la roca y su grado de fracturamiento, mediante la siguiente fórmula:

$$B = (db/33) \times \sqrt{\frac{(P \times S)}{c \times f \times (E/B)}}$$

Donde:

B: burden(m)

P: grado de compactación que puede estar entre 1,0 y 1,6 kg/dm<sup>3</sup>

S: potencia relativa del explosivo (por ejemplo, de 1,3 para una Gelatina Especial).

c: constante para la roca, generalmente entre 0,45 y 1,0.

f: grado de fractura. Para taladro vertical el valor es de 1,0, taladros inclinados 0.9, taladros inclinados 0.85.

E: espaciamiento entre taladros.

E/B: radio de espaciamiento a burden. db: diámetro de broca.

Langefors muestra una relación que determina el radio de “diámetro de broca a burden”.

## 5.13 Formula de C. Konya

Se guía de las teorías del Dr. Ash. Determina el burden con base en a la asociación entre el diámetro de la carga explosiva y la densidad, tanto del explosivo como de la roca, según:

$$B = 3,15 \varnothing_e \times \sqrt[3]{\frac{\rho_e}{\rho_r}}$$

Donde:

B: burden, en pies.

$\varnothing_e$ : diámetro del explosivo, en pulgadas

$\rho_e$ : densidad del explosivo.

$\rho_r$ : densidad de la roca.

### 5.14 Formula de Ash

Como recomendación usar la constante kb que depende de la clase de roca y tipo de explosivo empleado:

$$B = \frac{(kb \times \varnothing)}{12}$$

Donde:

B: burden.

$\varnothing$ : diámetro de taladro.

kb: constante, según el siguiente cuadro:

TIPO DE EXPLOSIVO	CLASE DE ROCA		
	BLANDA	MEDIA	DURA
• Baja densidad (0,8 a 0,9 g/cm <sup>3</sup> ) y baja potencia	30	25	20
• Densidad media (1,0 a 1,2 g/cm <sup>3</sup> ) y potencia media	35	30	25
• Alta densidad (1,3 a 1,6 g/cm <sup>3</sup> ) y alta potencia	40	35	30

Fuente: Manuel de voladura, Famesa 2019

“Matriz de comparación de fórmulas de cálculo del burden en voladura.”

PARAMETROS UTILIZADOS	ANDERSEN	FRAENKEL	PEARSE	HINO	ALLSMAN	ASH	LANGFORS	HANSEN	UCAR	KONYA	FOLDESI	PRAILLET	L. JIMENO	BERTA	CARR	KONYA Y WALTER
DIAMETRO DEL BARRENO O DE LA CARGA	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
ALTURA DE BANCO								X	X			X				
LONGITUD DE BARRENO	X	X														
RETACADO												X				
SOBREPERFORACION												X				
LONGITUD DE CARGA		X						X	X							
INCLINACION DEL BARRENO							X							X		
DENSIDAD DE LA ROCA					X	X				X			X		X	X
RESISTENCIA DE LA ROCA O INDICES EQUIVALENTES		X	X	X							X	X		X		
CONSTANTES O FACTORES DE ROCA	X		X				X	X								
VELOCIDAD SISMICA DEL MACIZO ROCOSO													X	X	X	X
DENSIDAD DEL EXPLOSIVO						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
VELOCIDAD DE DETONACION						X					X	X	X	X	X	
PRESION DE DETONACION			X	X	X											
CONSTANTE BINOMICA ROCA-EXPLOSIVO				X												
RATIO PIEDRA/ESPACIAMIENTO							X									
POTENCIA DEL EXPLOSIVO							X									
EQUIPO DE CARGA												X				

Fuente: Manuel de voladura, Famesa 2019.

## CAPITULO VI

### CONSIDERACIONES PARA EL CONTROL DE VIBRACIONES PARA EVITAR DAÑOS A LOS TALUDES

#### 6.1 Antecedentes de Perforación y Voladura.

La información descrita en las tablas forma parte de los parámetros de perforación y voladura usados en el tajo abierto del caso en estudio.

##### 6.1.1 Diseño de Perforación

###### 6.1.1. A. Producción

Tabla 13. Diseños de perforación en producción según litología.

Parámetro	Marmol	Monzonita	Skarn
Diámetro del taladro (pulg)	12 ¼	12 ¼	12 ¼
Altura de banco (m)	15	15	15
Sobreperforación (m)	2	1.5	1.5
Profundidad Taladro (m)	17	16.5	16.5
Burden (m)	8.26	7.83	7.39
Espaciamiento (m)	9.50	9.00	8.50
Volumen/Taladro(m3)	1177.2	1056.5	942.4
Densidad (TM/m3)	2.72	2.63	3.83
Toneladas/Taladros <sup>Tm</sup>	3201.9	2778.7	3609.4
Perforación específica (TM/m)	188.3	168.4	218.7

Fuente "propia"

### 6.1.1. B. Control de Talud

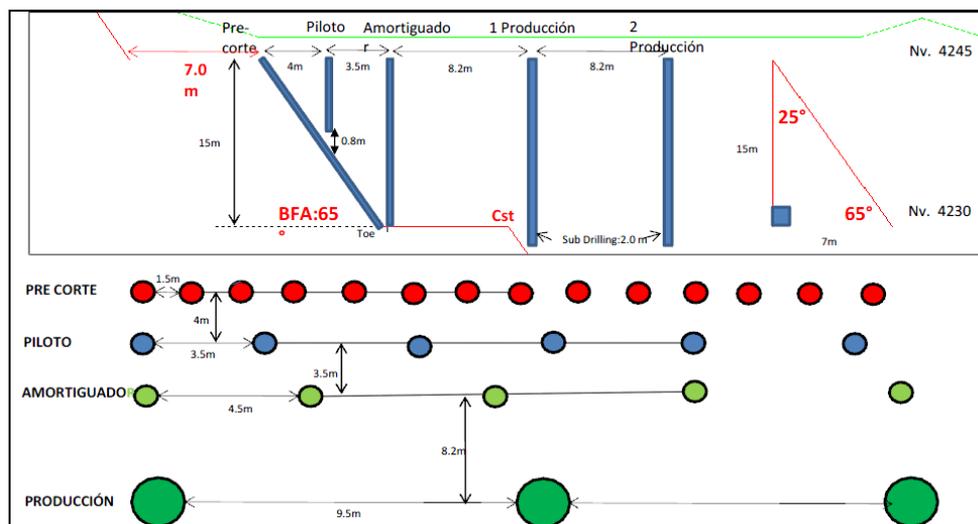
Tabla 14. Diseños de perforación en contorno según litología.

	Marmol	Monzonita
Diámetro del taladro (pulg)	5	5
Altura de banco (m)	15	15
Inclinación (grad)	65	65
Profundidad Taladro (m)	16.5	16.5
Espaciamiento (m)	1.50	1.50
Area/Taladro (m2)	24.75	24.75
Densidad (TM/m3)	2.7	2.6

Fuente "propia"

### Diseño de malla – Roca Caliza / Mármol (12 ¼)

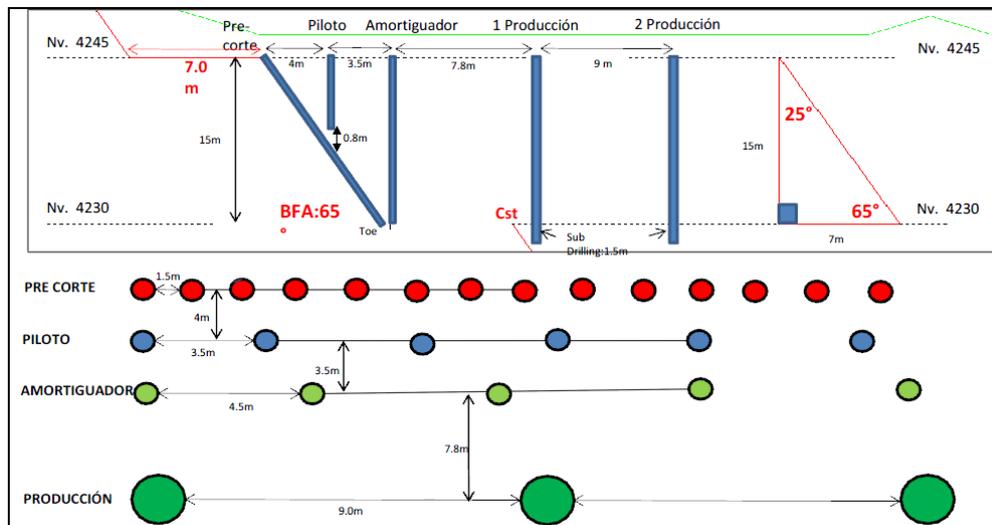
Figura 20. Esquema de perforación en litología caliza/mármol.



Fuente "propia"

## Diseño de malla – Roca Monzonita (12 ¼)

Figura 21. Esquema de perforación en litología caliza/monzonita.



Fuente "propia"

### 5.1.2 Diseño de Voladura

#### Diseños de carga por el tipo de roca

Tabla 15. Tabla de explosivos por tipo de roca y calidad de taladros en producción (Taladros secos y Taladros con agua).

	Taladros secos			Taladros con agua		
	Carga HA46 (m)	Taco (m)	FC (kg/Ton)	Carga HA64 (m)	Taco (m)	FC (kg/Ton)
Monzonita	7.0	9.5	0.204	6.5	10.0	0.206
Skarn	7.5	9.0	0.269	7.0	9.5	0.273
Caliza	7.5	9.5	0.219	7.0	10.0	0.222
Marmol	8.0	9.0	0.233	7.5	9.5	0.238

Fuente "propia"

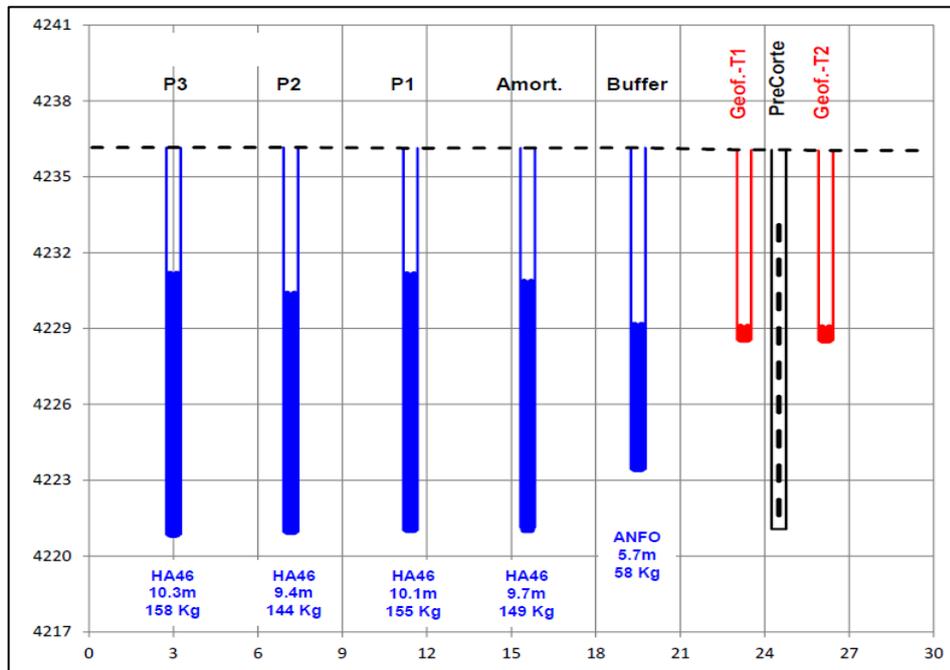
Tabla 16. Tabla de explosivos por tipo de roca y calidad de taladros en contorno (Buffer, Piloto y Pre – Corte).

	Buffer		Piloto		Pre-corte	
	Carga (m)	Taco (m)	Carga (m)	Taco (m)	Carga (m)	FP(Kg/m2)
Monzonita	9.5	6.5	1.9	4.4	12	0.47
Caliza	9.5	6.5	1.9	4.4	15.5	0.63

Fuente "propia"

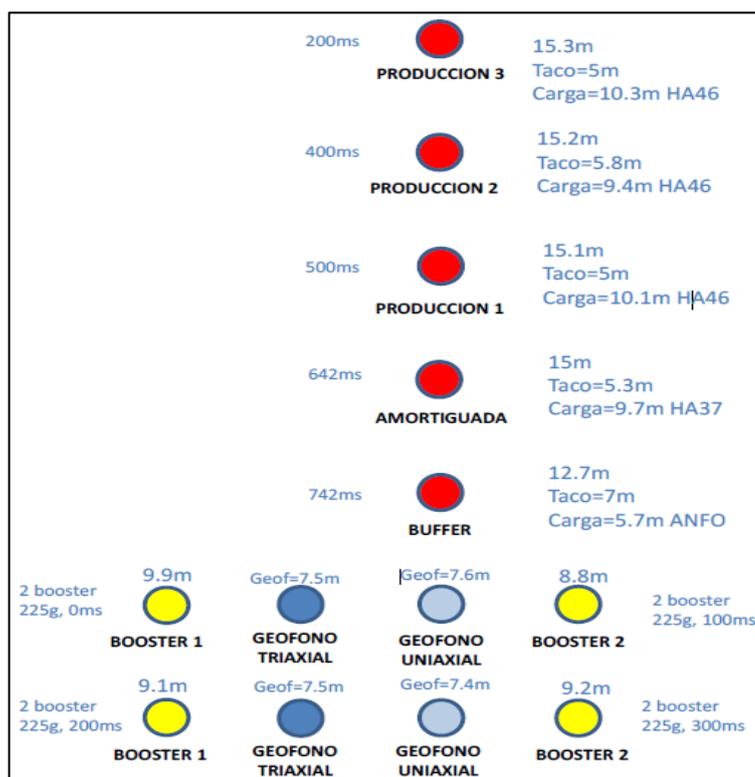
### 5.1.3 Diseño para el control de las vibraciones y el daño

Figura 22. Vista de sección con esquema de carga de explosivos para el control de vibraciones



Fuente "propia"

Figura 23. Vista de sección con esquema de carga de explosivos para el control de vibraciones.



Fuente "propia"

## 6.2 Variables Geotécnicas

En la unidad minera existen varias áreas en las que los cuerpos de skarn se han formado con mineralizaciones de Cu- (Mo, Au), así como algunos depósitos de pórfido de Cu (Mo) descubiertos hace algunos años. Al menos tres de estas áreas principales de mineralización han sido identificadas en la mina: Ferrobamba, Chalcobamba y Sulfobamba, cada una de ellas diferente en tiempo, espacio y contexto geológico. La mina muestra dominios estructurales de acuerdo a la estimación realizada en Factibilidad (Piteau, 2009) se debe considerar levemente a los distintos dominio estructural en superficie.

Ferrobamba se encuentra en la sección sureste del distrito minero. Es uno de los más importantes en términos de mineralización de Cu, con un

índice anómalo de oro, plata y molibdeno. El área con evidencia de mineralización se extiende por aproximadamente 300 hectáreas.

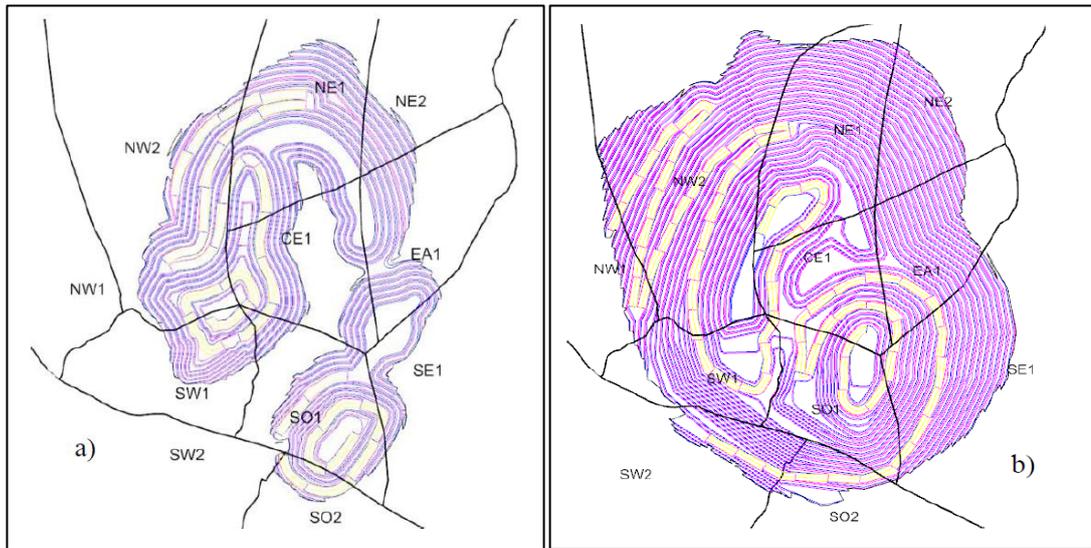
Chalcobamba se encuentra en el área central del distrito minero e incluye un área mineralizada de aproximadamente 300 hectáreas. Se considera un área importante debido a sus características mineralógicas.

Sulfobamba se encuentra en la zona centro oeste del distrito minero y cubre aproximadamente 400 hectáreas. En esta área, así como en las dos anteriormente descritas, la cal de Ferrobamba es cortada por la intrusión de varias fases y parte de esta área está cubierta por cajas cuaternarias, principalmente en la sección norte.

### **6.2.1 Análisis Estructural del yacimiento**

Los límites estructurales de la superficie respecto al tajo son distintos, se debe considerar como dominio estructural SO3 el cual desaparece a profundidad, asociado a un contacto litológico.

Figura 24. Análisis estructurales en las diferentes etapas a) Fase de superficie. b) Fase Final.



Fuente "propia"

### 6.2.2 Orientación de Taludes

Basado en la información obtenida se identificó las orientaciones de talud propuesta para el desarrollo en superficie y en la Fase final para cada dominio estructural.

Tabla 17. Definición de orientación de taludes por dominio estructural.

Dominio Estructural	Dip Direction (°)	
	Fase Final	Fase Superficie
CE 1	0 – 360	0 – 130 ; 220 -300
EA 1	180 – 280	140 – 10
NE 1	100 – 340	0 – 360
NE 2	210 – 270	200 - 240
NW 1	90 – 130	-
NW 2	60 – 210	90 - 190
SE 1	230 – 330	200 - 350

SO 3	-	-
SO 1	270 - 130	0 – 360
SW 1	260 – 100	320 – 160
SW 2	30 - 60	300 - 60

Fuente "propia"

### 6.2.3 Estratificación, Estructura y Propiedades.

Según la información estructural proporcionada los tipos de estructuras del tipo juntas presentes en cada dominio, se podría coexistir una estratificación (bedding), para los dominios EA 1, NE 2, NW 1 y NW 2; los cuales están asociados a la geotecnia denominada Factibilidad de Carbonatos.

La base de datos disponible, consistente en ventanas de mapeo ubicadas en diferentes dominios, cuenta con estructuras menores tipo joint y bedding. La muestra y distribución espacial de ventanas sobre la geometría del diseño del Tajo Final, y la cantidad de datos (polos) para cada dominio, respectivamente.

El criterio de apertura de ventanas para la definición de familias de diaclasas, fue cubrir aquellos sectores que representaran densidades de concentración mayores al 2% aproximadamente, de tal forma de caracterizar estas concentraciones mediante una distribución de Fisher.

**Tabla 18. Total de datos estructurales disponibles (jointsy estratificaciones) por dominio estructural.**

<b>Dominio Estructural</b>	<b>Polos</b>
CE 1	807
EA 1	398
NE 1	1420
NE 2	640
NW 1	331
NW 2	877
SE 1	307
SO 3	-
SO 1	1573
SW 1	1050
SW 2	97

Fuente "propia"

### **Propiedades de las estructuras**

La resistencia al corte se muestra en la siguiente Tabla 19. Estas propiedades son razonables si se toma en consideración que los defectos estructurales presentes en superficie (escala de banco) pierden completamente su cohesión debido a la apertura como producto de la voladura usada en el minado.

Tabla 19. Propiedades estructurales.

	Resistencia al corte de las estructuras			
	Cohesión (t/m <sup>2</sup> )		Fricción (°)	
	Valor	$\sigma$	Valor	$\sigma$
Escala de banco	0		35	
Escala inter - rampa	10		25	

Fuente "propia"

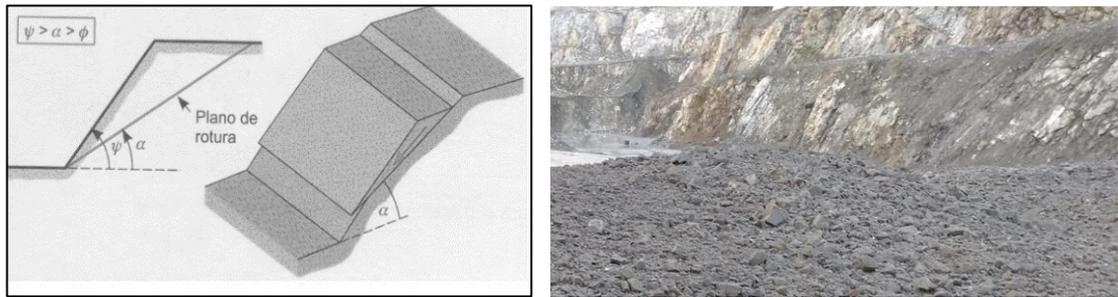
#### 6.2.4 Tipos de Rotura

Los diferentes tipos de roturas en los taludes de las mineras están condicionados por el grado de fracturación del macizo rocoso, por la orientación y distribución de las discontinuidades, en macizos rocosos duros o resistentes, las discontinuidades determinan la situación de los planos de rotura. De esta manera tenemos:

##### Rotura plana

Se produce por una superficie preexistente, que puede ser la estratificación, una junta tectónica, una falla, etc. Se dan por las condiciones básicas encontrándose a las discontinuidades buzando a favor del talud y con misma dirección.

Figura 256. Análisis estructurales de la ruptura planar.



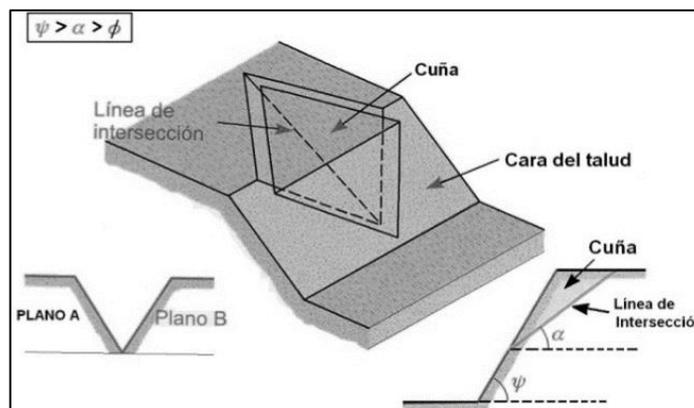
Fuente propia

Se aprecia al talud deslizándose por una falta de control en la voladura.

### Rotura cuña

“Se origina el deslizamiento de un bloque en forma de cuña, formado por dos planos de discontinuidad, a favor de su línea de intersección. Para que se produzca este tipo de rotura los dos planos deben aflorar a la superficie del talud.”

Figura 267. Análisis estructurales de la ruptura en cuña.



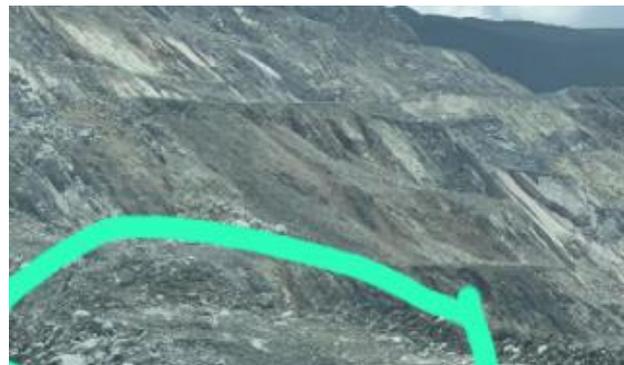
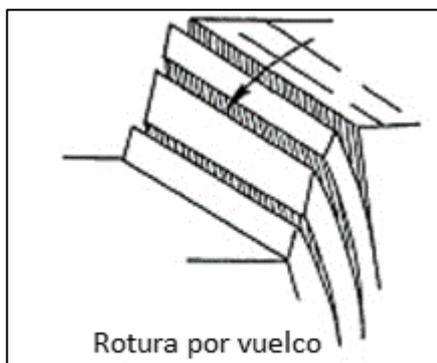


“Fuente propia”

### Rotura vuelco

Esto se demuestra por un caso de una familia de discontinuidades de orientación preferencial, está caracterizado por una misma dirección de pendiente que el talud y un sentido opuesto. Como podemos apreciar en el análisis cinemático realizado, las familias de discontinuidades presentes en el tajo, presentarían para un talud de  $70^\circ$  una falla tipo cuña.

Figura 278. Análisis estructurales de la ruptura en vuelco.

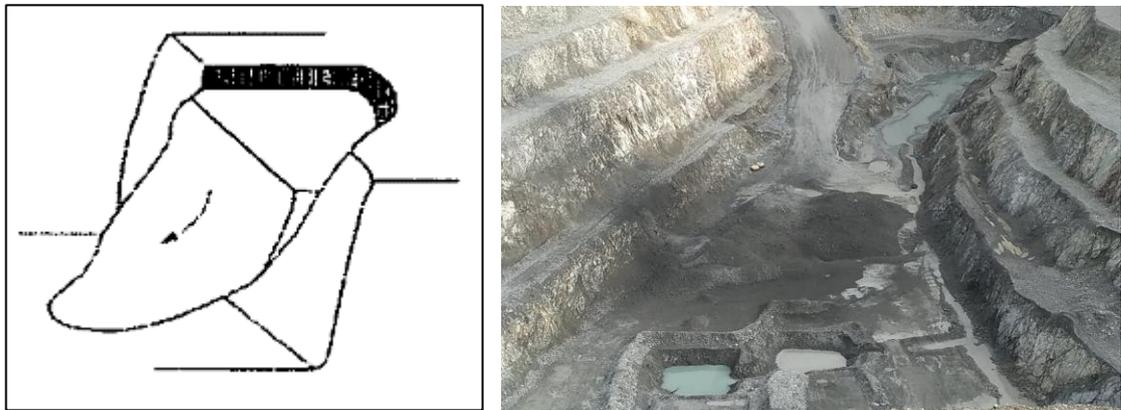


### Rotura circular

Este tipo de rotura se origina por el cizallamiento circular que se produce en las rocas dúctiles sin zona débil y que no presenta orientación crítica,

pero se puede combinar en otras ocasiones con un plano de deslizamiento.

Figura 289. Análisis estructurales de la ruptura circular.



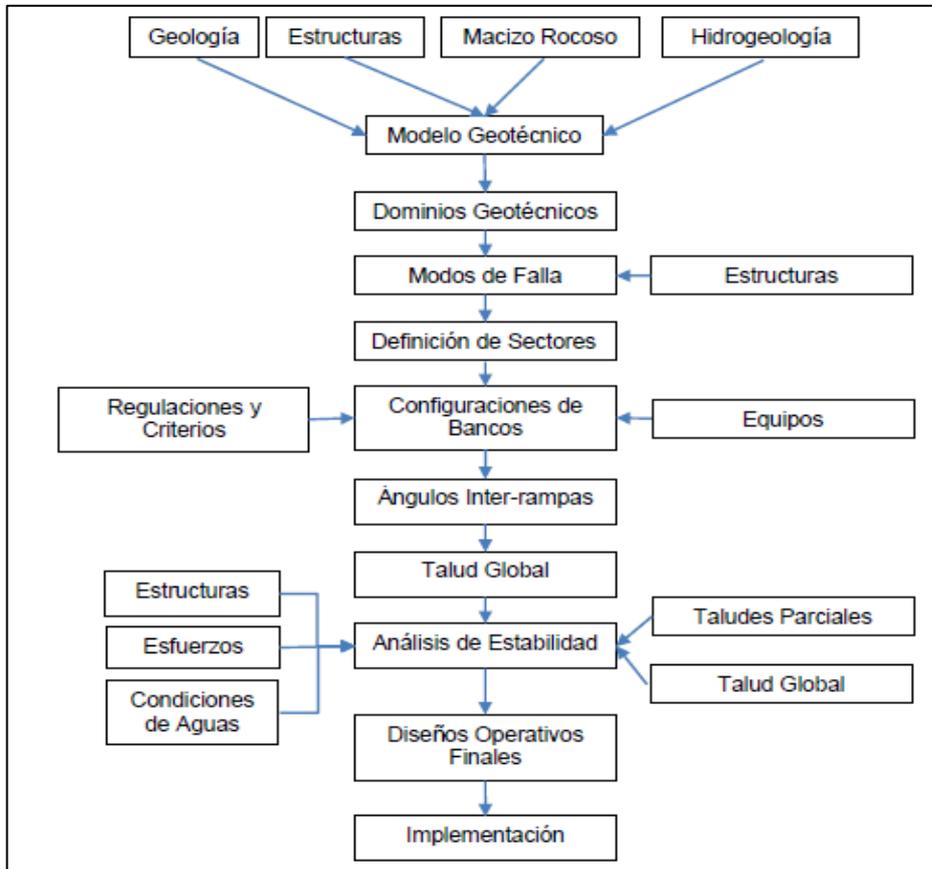
“Fuente propia”

### 5.3 Modelo de diseño de taludes

En el proceso de modelamiento de diseño de taludes se divide en diferentes partes optando criterios para determinadas características geológicas, geotécnicas y estructuras similares. Pero también deben considerarse características externas que intervienen en la fase de mina como el tipo de explosivo, accesorios, los equipos a usar, el ajuste de ellos condiciona a la funcionalidad de mi talud. Esto implica la evaluación de factores críticos que van a determinar el potencial modo de falla que puede presentar cada uno de los dominios a escalas de bancos, inter-rampa y global.

Una vez identificado y cuantifica, los parámetros de diseño se basan en cierto nivel de aceptabilidad que va estar definido a las políticas de compañía y las normas reguladoras.

Figura 30. Proceso esquemático de diseño de taludes en minera a tajo abierto.



Fuente propia

### 6.3.1 Variable en los taludes

En rocas duras, son las estructuras las que determinan el modo de falla, de esta manera los dominios geotécnicos se dividen en sectores para realizar un análisis cinemático del modo de falla que pueda presentar las estructuras a una escala de banco.

En el caso de un macizo rocoso con fracturas muy próximas entre sí o bien en roca, no existe un patrón estructural definido y la superficie deslizando es libre de encontrar la línea de menor resistencia.

En la escala de banco para taludes las variables más relevantes son:

- **Ángulo de Cara de Banco.** Este ángulo debe ser tal que permita una operación segura para las personas y equipos que van a estar operando. Se determina a través de un análisis cinemático.
- **Altura de Banco.** La altura de banco va a estar sujeta al tipo de equipo de carguío que se utiliza en la operación.
- **Ancho de Berma.** El ancho de berma debe ser de tal dimensión que permita la contención del desprendimiento de material, o bien de caída de roca desde bancos superiores. Hasta ahora la fórmula empírica que es utilizada en algunas operaciones mineras a cielo abierto viene dada por la fórmula de Ritchie modificada de acuerdo a Richard Call.

$$\text{Ancho Berma [m]} = (0.2 * \text{Altura Banco} + 4.5) \text{ [m]} \text{ [3]}$$

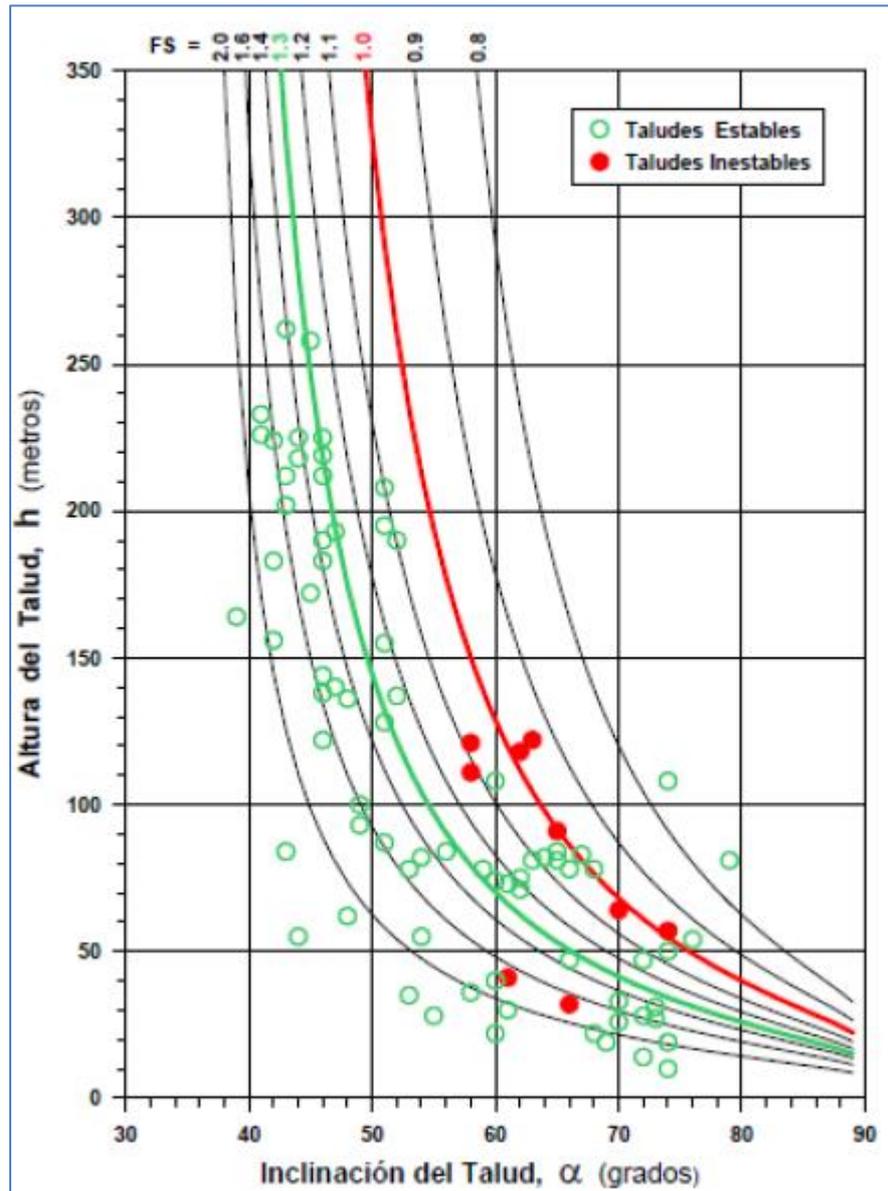
### **6.3.2 Métodos Empíricos para Determinar el Ángulo Global de un Talud.**

Cuando los datos referenciales son limitados y el modelo geotécnico no está completamente desarrollado, los gráficos empíricos pueden ser útiles

para establecer simulaciones de modelos para poder ajustar nuestros parámetros de control teniendo en cuenta las limitaciones respectivas.

Como referencia se usa el grafico de Hoek que relaciona el ángulo de talud con la altura del talud, basado en taludes estables e inestables. Este grafico no está asociado a características geotécnicas de los taludes y por la tanto tiene niveles de incertidumbre, Asumiendo ejemplos de taludes de 240 metros, con taludes de 15 metros a 30 metros con un ángulo global de  $65^\circ$  partiendo en la estabilidad que daría.

Figura 31. Altura de talud vs ángulo de talud para graficos empíricos de taludes de Hoek.



Fuente: (Ingeniería geológica Gonzales de Vallejo).

### 6.3.3 Métodos para determinar el Factor de Seguridad de un Talud

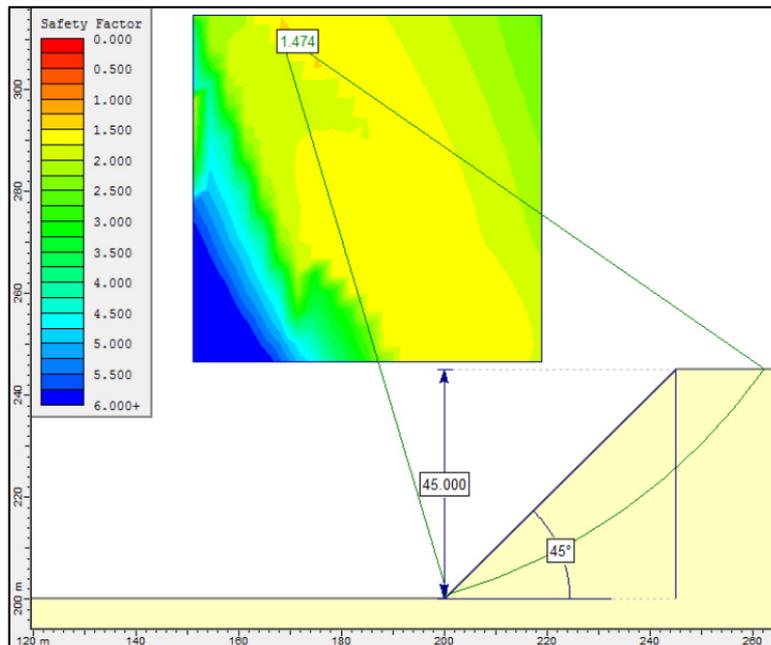
Actualmente existen software que permiten realizar la simulación del factor de seguridad mediante métodos empíricos que se hacen con parámetros establecidos. Entonces tenemos:

## Métodos de Equilibrio Límite de Bishop

Los métodos de equilibrio límite se hace un análisis en 2 dimensiones de un cuerpo dividido en “n” partes a lo largo de la superficie que usualmente es circular, pero puede considerarse de otras formas. El método más común usado es Bishop.

En la actualidad existe un software que permite calcular el factor de seguridad basado en el método de Bishop llamado Slide. En este software, se calcula el factor de seguridad para las superficies de falla generadas para cada centro de deslizamiento. Al realizar el análisis, el software por defecto arroja el valor mínimo del FS correspondiente a una superficie de falla considerando todas las superficies posibles.

Figura 32. Factor de seguridad simulado con parámetros establecidos.



Fuente propia

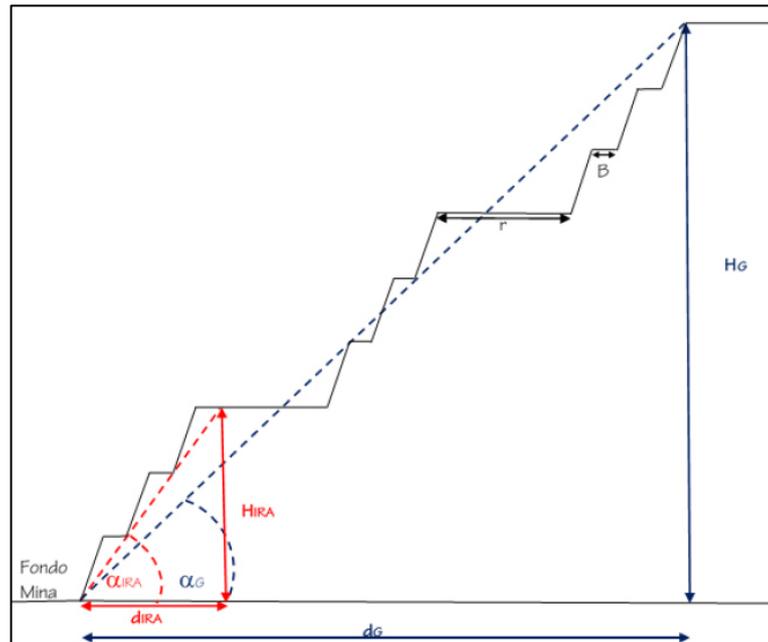
#### **6.3.4 Aplicación a estabilidad de taludes**

Es la determinación del análisis de estabilidad del talud el equilibrio global para obtener el ángulo de talud de acuerdo factor de seguridad para cada escenario. El análisis se basa en calcular con bermas geotécnicas para que se tenga un ángulo global de talud utilizando componentes geométricos del talud.

Como análisis de la estabilidad se lleva a cabo una comparación de resultados entre los gráficos de estabilidad de taludes de acuerdo a los ángulos de talud entre los ángulos  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $75^\circ$ , con respecto a los resultados obtenidos usando el método de equilibrio límite con el software Slide; Comparando con los métodos que salen de este.

Para determinar la cantidad de bermas geotécnicas necesarias a incorporar en el talud, referenciamos el ejemplo en el ángulo total global para el control del talud a través de las vibraciones de la voladura como perturban el macizo rocoso, el control de vibraciones estudiar cómo afecta el talud con sus componentes geométricos y ajustar hacer para mejorar el proceso en la operación.

Figura 29. Componentes geométricos analizar en el talud por el control de vibraciones.



Fuente propia

- $r$ := Ancho de rampa
- $B$ := Ancho de berma
- $H_g$ :=Altura de talud global
- $H_{IRA}$ :=Altura inter-rampa
- $\alpha_g$ :=Ángulo global de talud  $\alpha$
- $\alpha_{IRA}$ :=Ángulo inter-rampa
- $d_g$ :=Distancia horizontal global
- $d_{IRA}$ :=Distancia horizontal inter-rampa
- $N$ := Número de rampas.

### 6.3.5 Fase de Diseño Mineros de los taludes

Las fases de diseños mineros se harán mediante software, es importante mencionar que se considerara una pendiente promedio de 10% en las

rampas de acceso. Este criterio operacional es considerado por normativas legales vigentes en la industria minera.

El diseño del ancho de las rampas a utilizar depende del tipo de camión que se tiene en el proyecto además del volumen de movimiento a realizar cabe mencionar que todas las rampas tendrán muro de seguridad de acuerdo a las normas establecidas por el Reglamento Vigente en Perú.

Para análisis de los diseños se hará un análisis equivalente de los procesos en la unidad minera a lo largo de los años de acuerdo a la optimización del mercado es decir se tendrá que considerar variables para realizar las mejoras en la operación.

- Tonelaje Total
- Tonelaje de mineral
- Tonelaje de estéril
- Ley de Cu
- Razón estéril-mineral
- Fino de Cu contenido
- Beneficio marginal

Para llevar un mejor control operacional y de seguridad para los colaboradores de la empresa se hará el control de vibraciones en los taludes revisando las etapas y los factores a considerar dentro del diseño.

## **6.4 Monitoreo de taludes**

El monitoreo de los taludes es importante que se realice, existen diferentes formas de hacerlo en la actualidad se cuenta con instrumentación geotécnica para realizarlo en tiempo real y programas que se deben estar midiendo y asimilando los desplazamientos debido a las voladuras generadas todo esto es posible anticiparlo con un control debido.

En el control de vibraciones se realiza al proceso de voladura para evitar el daño a los taludes esto se hace mediante ajuste al proceso y monitoreo.

### **6.4.1 Análisis de errores**

Para analizar el control de vibraciones para evitar el daño en los taludes es de suma principal para determinar la metodología a seguir y el monitoreo en las etapas que se realizarán, midiendo el proceso y que permita definir los comportamientos del talud.

#### **Causa de los errores**

En la toma de datos, en el diseño de la operación existen errores, muchos de ellos se pueden eliminar y los que están fuera de nuestro alcance se controlan pero depende de la destreza del encargado.

Estos errores obedecen a tres causas principales:

### **Error Natural**

“Estos errores no son eliminados, pero son controlables. El clima (lluvias, vientos, movimientos sísmicos y cambios de temperatura) estos errores inciden directamente en la exactitud del análisis.”

### **Error Humano**

Se produce por la limitación del personal no calificado, distracción, percance que puede ocurrir en el momento.

### **Error Instrumental**

Debido a que los equipos no están calibrados, mal cuidado de los equipos y uso incorrecto del equipo para la tarea asignada.

### **Error Sistemático**

Los errores sistemáticos son los errores que se repiten siempre las mismas condiciones el grado de error es constante en el control.

### **6.4.2 Factores de Corrección**

Los factores de corrección se dan en el proceso de voladura ajustando los parámetros que se usan para el diseño de malla, esto se va adecuando de acuerdo a las necesidades a tener. Por motivos operacionales se realizan simulaciones que nos ayudan a tener el control necesario para evitar el daño a los taludes.

Se puede realizar una toma de datos constantemente con la finalidad de generar un registro histórico como control.

### **6.4.3 Velocidad de colapso**

Realizando el control de vibraciones se puede tener un pronóstico de colapso, al realizar el monitoreo de carga sísmica en el macizo rocoso debido a las fuerzas tensionales expuestas por la alteración del talud.

Un control adecuado con un análisis de registro “Desplazamientos en el tiempo” se puede observar y monitorear en el macizo rocoso es generalmente adecuado realizar controles continuos de preferencia en las zonas inestables de acuerdo a los materiales que presentemos por fases.

### **6.4.4 Etapas del deslizamiento**

En el análisis de registro se identifica estaciones de monitoreo para hacer un control efectivo en taludes de roca relativamente intacta, existen dos etapas principales de deslizamiento:

#### **Etapas regresiva**

“El comportamiento del macizo rocoso deslizante se estabiliza, esto es cuando las condiciones externas que perturban al macizo rocoso se eliminan, toda velocidad en esta etapa puede acelerar ligeramente, permanecer constante o desacelerar.”

#### **Etapas progresiva**

“En esta etapa el macizo rocoso se desplazará con una tasa de aceleración mayor a la velocidad en el punto de colapso, el control en esta etapa es mucho más frecuente que la etapa anterior.

## **CAPITULO VII**

### **ANALISIS TECNICOS PARA EL CONTROL DE VIBRACIONES DEL DISEÑO DE LA PERFORACION Y VOLADURA**

#### **7.1 Calidad de la perforación**

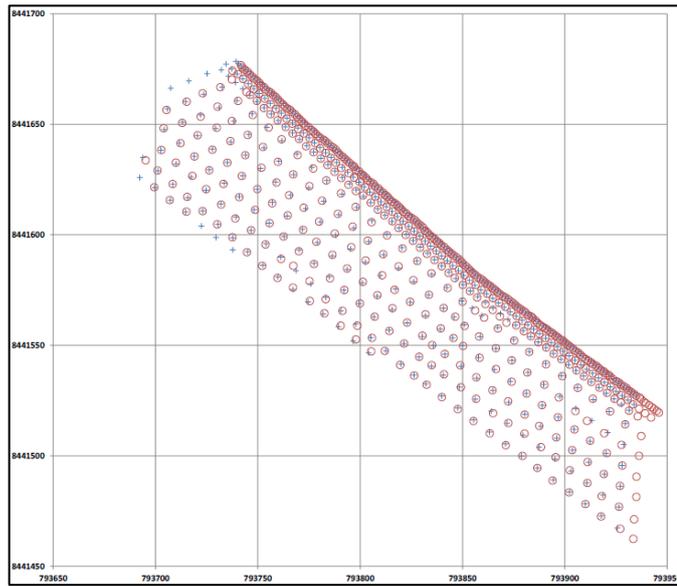
##### **7.1.1 Dispersión de taladros de perforación**

La implementación de diseños de voladura adquiere relevancia para el control de daño en los taludes, se define la distribución de energía (choque y gases) respecto a la pared, banco o berma, obligando en ocasiones a improvisar configuraciones de carga y retardos que no responden al fin buscado.

Para estimar la influencia que puede tener la implantación sobre el daño generado sobre el macizo rocoso remanente se analizó una de las voladuras, permitiendo cuantificar, al menos en forma localizada, las desviaciones de la perforación en términos de empatadura, largo y geometría (BxS).

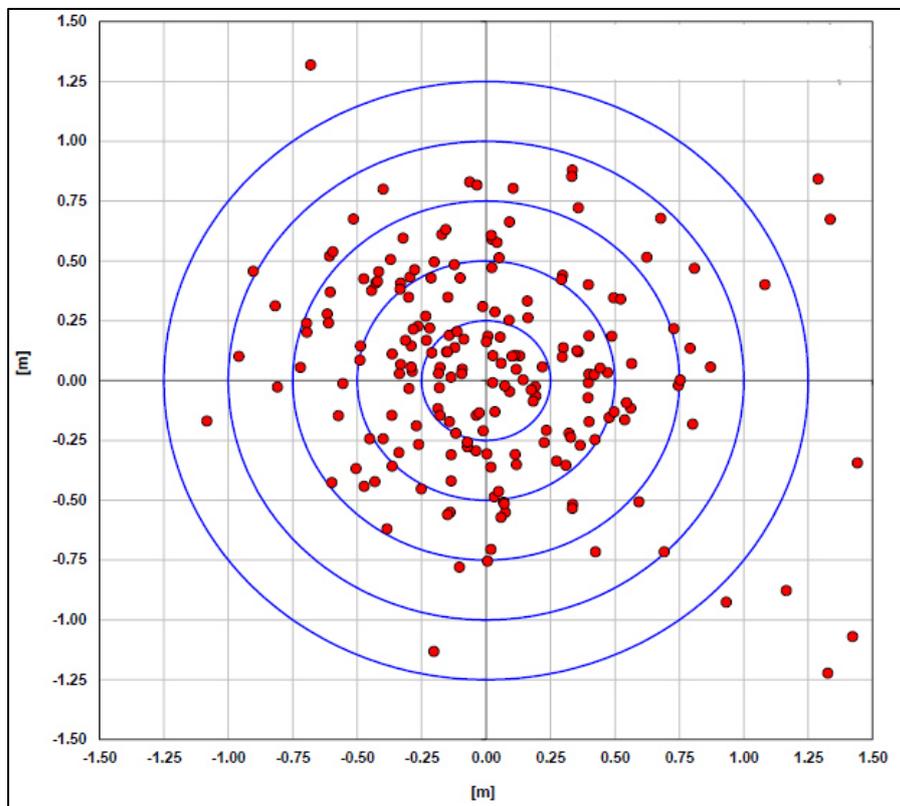
La imprecisión de la empatadura se origina de la conjunción de dos tipos de errores; el de lo planificado y lo efectivamente perforado.

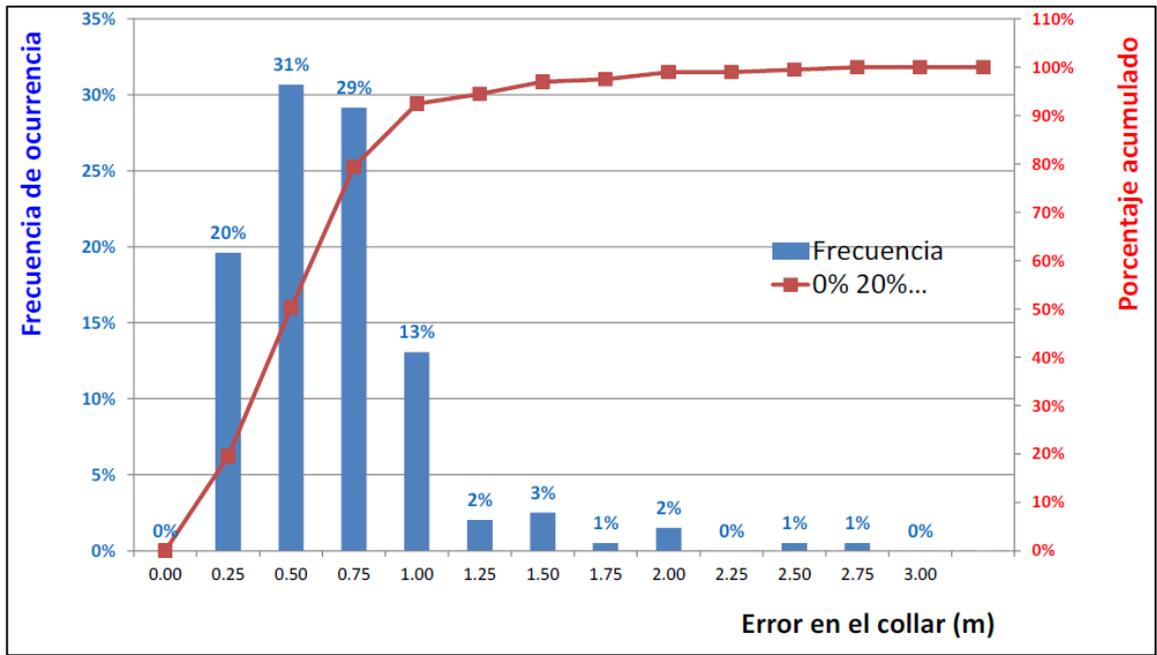
Figura 304. Se muestra la posición de los taladros diseñados como la de los realmente perforados.



Fuente propia

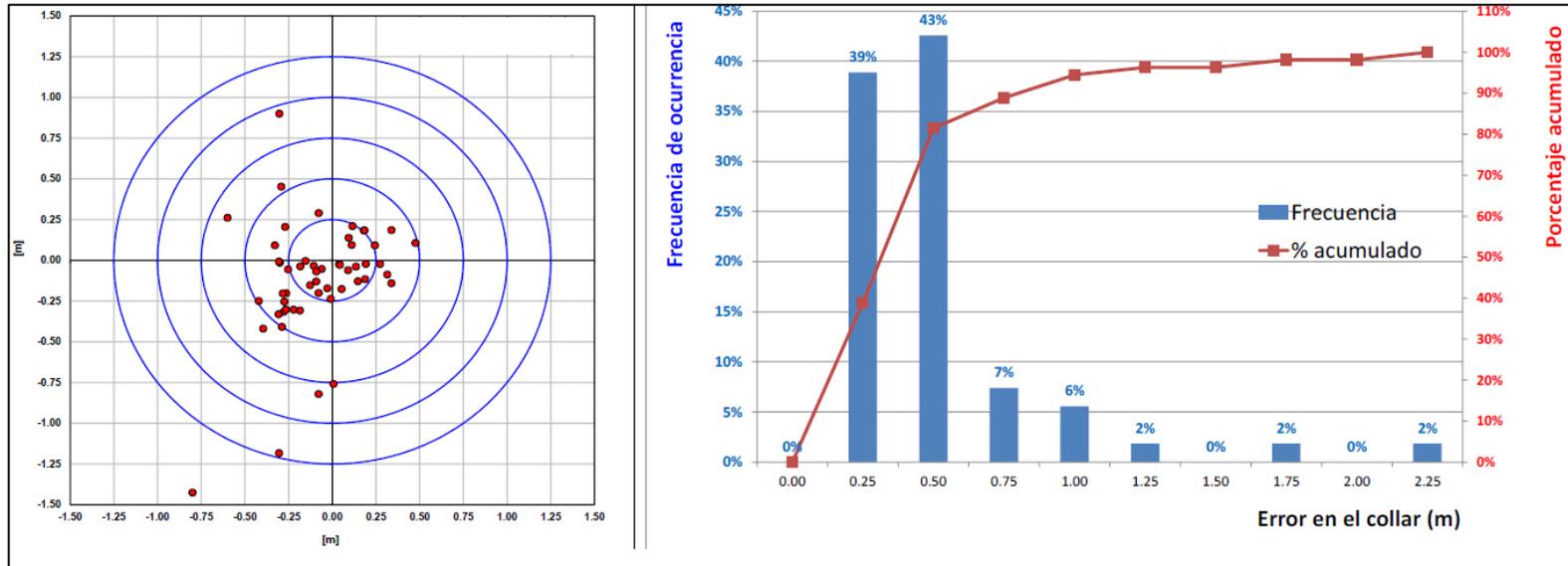
Figura 315. La dispersión de la posición de empuje de los taladros de Producción, siendo el promedio del error de 0.5m (6% respecto al valor del burden de diseño, 8.2m).





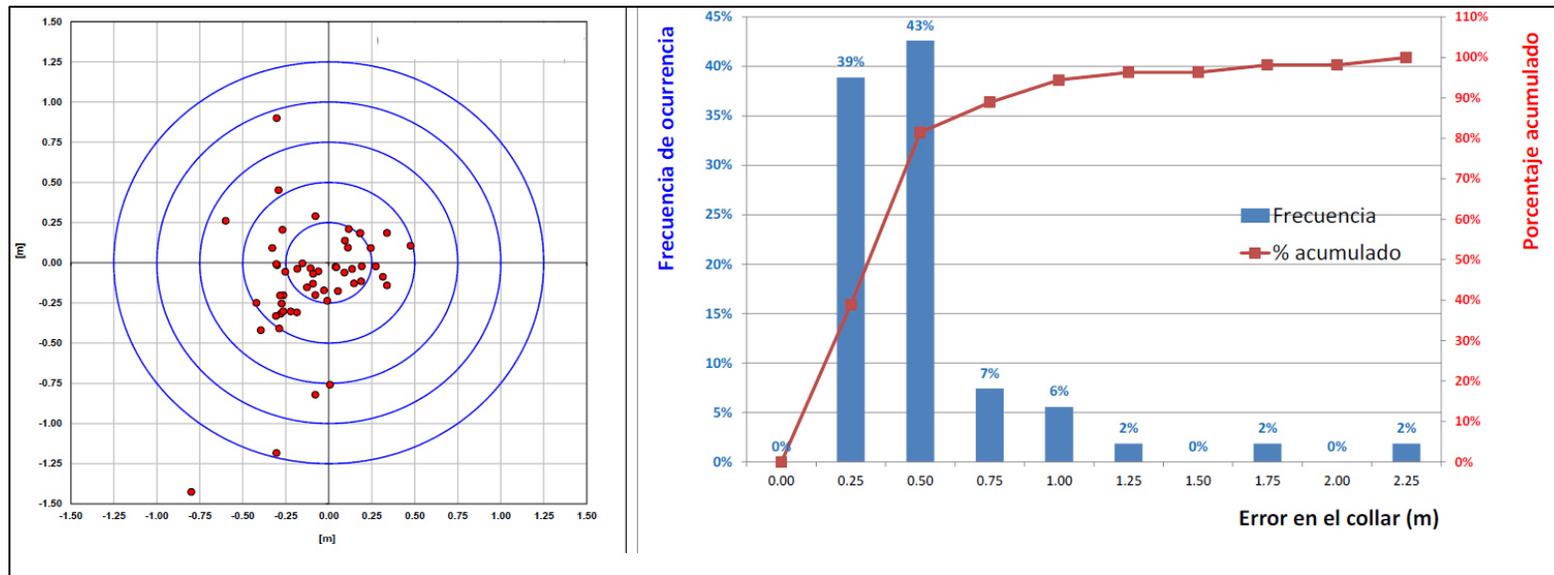
Fuente propia

Figura 326. Se indica la dispersión de la posición de empate de los taladros Amortiguados, siendo el promedio del error de 0.3m (6.7% respecto al espaciamiento de diseño, 4.5m).



Fuente propia

Figura 337. Se indica la dispersión de la posición de empate de los taladros Buffer, siendo el promedio del error de 0.25m (7.1% respecto al espaciamiento de diseño, 3.5m).

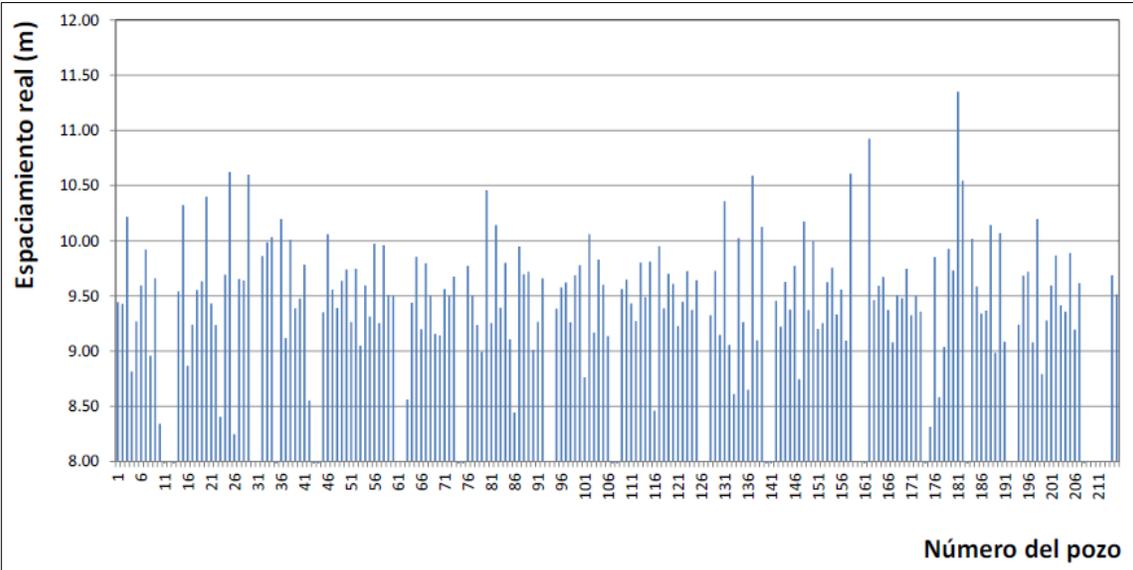


El corrimiento de los taladros de producción como el de los amortiguados no tiene una preferencia en alguna dirección, lo que no ocurre con los taladros piloto, los cuales indican una tendencia del corrimiento preferentemente en 2 cuadrantes o direcciones.

**7.1.2 Dispersión en espaciamiento de taladros de producción.**

Para el control de vibraciones se considera el 58% de los taladros tiene un espaciamiento bajo los 9.5m de diseño y el 87% tiene un espaciamiento bajo 10m. Esto implica la oportunidad de aumentar el diseño de los taladros de producción, ya que estos valores de espaciamiento reales mayores a lo nominales no afecta a los resultados de la voladura.

**Figura 348. Espaciamiento de taladros de producción.**

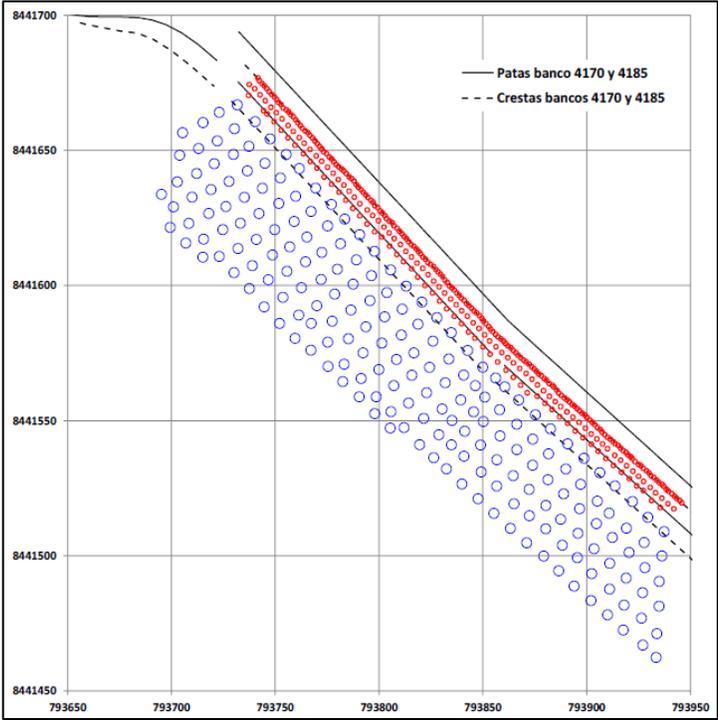


Fuente propia

### 7.1.3 Dispersión real entre taladros a cara de banco posterior, cresta y pie del canco inferior

En el diseño de voladura de un banco, la ubicación del pie del diseño (líneas discontinuas) y las crestas de diseño (líneas fragmentadas), corresponde a un análisis de diseños reales comparado con la simulación.

Figura 359. Diseño de voladura con respecto a la ubicación de crestas y pie.



Fuente propia

## 7.2 Consideraciones Operacionales

Es el resultado del trabajo en campo y la revisión operacional del procedimiento de perforación y voladura, se identifican algunos aspectos que influyen para el control de vibraciones para evitar daños.

### 7.2.1 Control operacional para el tipo de yacimiento Skarn

Uno de los controles que se realiza antes de realizar el carguío es que se debe asegurar que el taladro no se encuentre obstruido debido a la condición de la roca o en otras oportunidades, que no se haya perforado una cavidad hueca o con agua.

### 7.2.2 Delimitación del área de voladura

Las cintas son muy susceptibles a cortarse, no cumpliendo el objetivo de limitación al área de carguío de voladura, cuando ya está cargada. Además, la cinta está sobre la fila límite de la zona de voladura esto puede generar que las personas ajenas a la operación manipulen.

Figura 40. La zona delimitación del área de voladura se deben considerar conos y una distancia mayor.



Fuente propia

### 7.2.3 Materiales de taco a usar

Se utiliza detrito de perforación como material de taco, este es de granulometría fina y no es buen retenedor de gases, se agrava cuando hay lluvias por el clima propio de la zona. Se recomienda a usar es gravilla en vez del detrito; esta debe acopiarse cerca del área de voladura para mayor utilización y facilidad en el proceso en la operación.

Figura 41. Diferentes materiales de taco usado en la voladura.



Fuente propia

### 7.2.4 Limpieza del área para perforar

Se debe mejorar los accesos al área de perforación y voladura, mejorando el área se tiene mayor disponibilidad de los equipos para que puedan realizar sus operaciones, tanto la perforadora para la perforación como el camión fabrica para el carguío.

Figura 42. Limpieza del área de operación

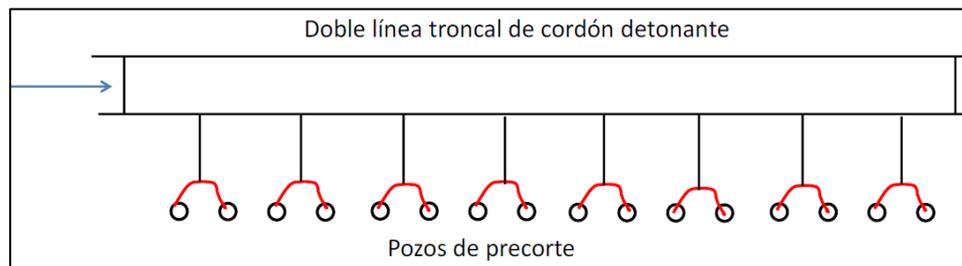


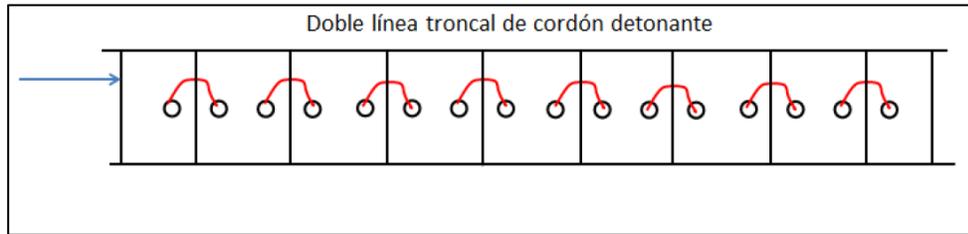
Fuente propia

### 7.2.5 Iniciación de pre corte

Actualmente, se utiliza el sostenimiento dentro del taladro amarrando las tiras de dos taladros contiguos, las que se inician utilizando una doble línea troncal de cordón detonante que va por un costado de la fila de Precorte, pero solo un cordón va desde la doble fila al cordón que une los 2 taladros. Esta doble línea debe realizarse de manera que la fila de Precorte quede entre las 2 de cordón, de esta forma cada par de taladros puede tener doble iniciación.

Figura 43. Se muestra la iniciación que actualmente se usa, comparando con la alternativa para un mejor control en la operación.





Fuente propia

### 7.3 Análisis de la fragmentación

Los resultados de la medición de fragmentación de la empresa especializada que hace la voladura mediante el procesamiento de imágenes digitales efectuados en la zona de Caliza arroja un valor de D80 en promedio de 8.76”

Con este valor se determina un factor de roca A para la Caliza, de esta manera se puede comparar la curva granulométrica con los diseños actuales, a fin de predecir la fragmentación de diseños propuestos tanto para la producción como para contorno.

Se utilizó una densidad de roca como 2.72 gr/cc y una Resistencia a la Compresión (UCS) de 97 MPa, valor equivalente al informado para las zonas de pruebas en caliza.

**Tabla 20. Fragmentación medida en zona de Calizas**

Resumen de fragmentación en zona de Calizas			
Equipo de Carguío	Banco	N° de fotos	D80(pulgadas)
Pala 03	4170	4	10.35
Pala 04	4155	4	8.33
Pala 11	4170	3	9.54
Pala 3 – 4	4170	4	8.85

Pala 3 – 4	4170	4	7.35
Pala 3 – 4	4170	2	8.16
Valor Promedio			8.76

Fuente propia

**Tabla 21. Características de roca intacta de la zona Caliza.**

ID de muestra	UCS (MPa)	Profundidad	Dureza	Módulo de Young (Mpa x 10 <sup>3</sup> )	Razon de Poisson
UCS08 – 11	89.37	121.25	4.5		
UCS08 – 17	122.42	128.57	4.5	51.48	0.325
UCS08 – 22	94.44	267.5	4	55.18	0.343
UCS08 – 26	94.76	47.86	4.5		
UCS08 – 28	88.25	107.39	4.5		
UCS08 – 27	85.89	51.53	4.5	56.05	0.258
UCS08 – 29	110.82	191.52	4.5	63.35	0.316

Fuente propia

### **Comparación de fragmentación según diseños de Voladura**

El objetivo de evaluar diferentes alternativas respecto a los resultados de fragmentación es evaluar los controles en la voladura. Para nuestro caso de estudio se analizó que utilizar un taco de 9.5m (excediendo por más de 30 veces el diámetro de 12 ¼”) equivale tener un explosivo en un 63% de banco volado. Esto genera que se genere sobre roturas y por ende daño los taludes.

La recomendación es asegurar el adecuado confinamiento y menor riesgo de flyrock, usando detritus de perforación como material de taco y que la longitud no sea menor de 25 veces el diámetro expresado en metros.

Para la recomendación se inicia con un cálculo conservador, asumiendo un taco superior de 8.0 m equivalente a 26 veces el diámetro (12 ¼”), lo cual significa que en la práctica se puede usar de manera efectiva el taladro perforado usando 1.5m de explosivo en la columna.

**Tabla 22. Características de roca intacta en roca Caliza.**

<b>PARAMETROS DE VOLADURA</b>	<b>ACTUAL</b>	<b>ALTERNATIVO</b>
UCS (MPa)	97	97
Densidad (g/cc)	2.72	2.72
Diámetro Perforación (mm)	311.2	311.2
Altura de Banco (m)	15	15
Burden (m)	8.26	9.00
Espaciamiento (m)	9.50	10.00
Taco (m)	9.5	8.0
<b>PROPIEDADES DEL EXPLOSIVO</b>		
Tipo de Explosivo	H46	H46
Longitud de Carga (m)	7.5	9.0
Densidad de Carga (g/cc)	1.23	1.23
Peso de la Carga (Kg)	701	842
<b>PARAMETROS CALCULADOS</b>		

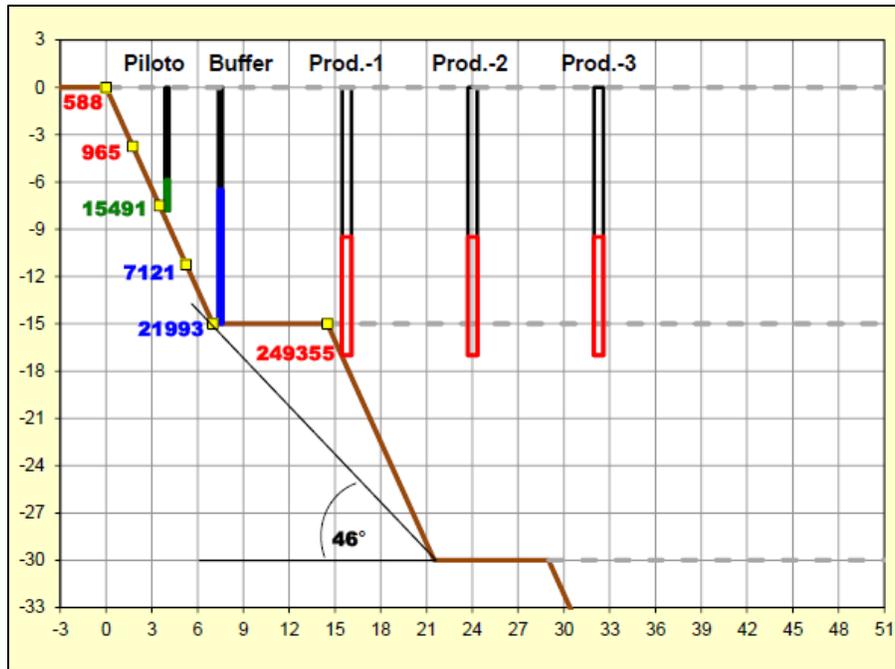
Longitud de Carga (m)	7.5	9.0
Carga por Taladro (Kg)	701.0	842.0
Factor de Carga (gr/Tn)	93.5	93.5
Perforación Específica (Ton/m)	188.3	216.0
Tonelaje por Taladro (tn)	3202	3672
PREDICCIÓN		
FRAGMENTACIÓN		
d50% (mm)	120	123
d80% (mm)	231	230
d80% (pulg)	9.1	9.1
d95% (mm)	376	367
Porcentaje Bajo el tamaño de 2 Pulg	31.1%	31.2%

Fuente propia

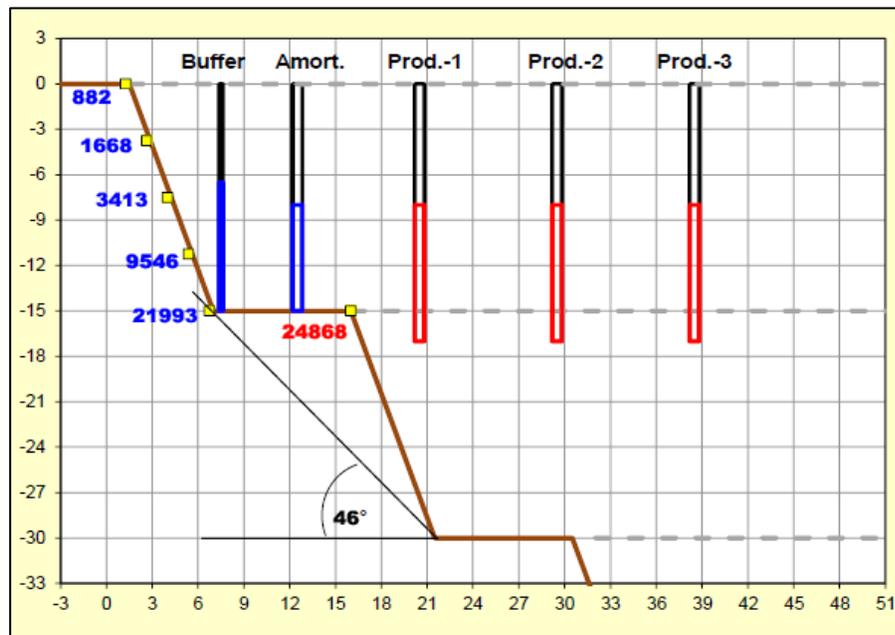
#### 7.4 Análisis y propuestas para voladuras de contorno

La simulación en el control de vibraciones de los modelos de campo cercano representativos en una muestra ha permitido comparar el diseño actual con diferentes alternativas para los diseños de perforación y voladura en el contorno, que son los que en definitiva determinarán la calidad con que se deja la roca remanente, el cumplimiento de la geometría y el diseño minero.

Figura 44. Esquema de vibraciones de voladura en la cara del banco la actual como la alternativa.



Fuente propia



Fuente propia

En resumen, el cambio:

La recomendación es aplicar conceptualmente el mismo diseño a los distintos sectores, usando la proporción y tipo de explosivo que cada zona amerite, extendiendo su aplicación por lo menos a varias voladuras a lo largo de cada banco, para por apreciación visual y por medición (cresta-toe) comparar y validar sus diferencias. Se recuerda que la diferencia o beneficios no serán visibles hasta el momento de desarrollar el segundo banco, dado que la cresta actual ya está dañada por la práctica del banco superior.

#### **7.5 Análisis de estabilidad del daño de taludes**

Para el control de los taludes se recomienda que el área de Geotecnia implemente y estandarice una metodología de evaluación objetiva de los bancos y taludes, a través de:

- Mediciones directas (conciliación topográfica) de las desviaciones con relación al diseño propuesto.
- Evaluación de la condición del talud final utilizando la cartilla de evaluación post carguío.

La evaluación final (que considera y combina ambos elementos, la conciliación y calidad del talud), permite identificar las desviaciones y orientar los trabajos necesarios para corregir.

El Factor de Diseño (FD) que evalúa el cumplimiento de la Geometría del Banco (pie, cresta, ángulo) y el Factor Condición (FC), que evalúa la Calidad de la pared y cara del Banco, son los parámetros empleados para cuantificar el resultado de la voladura en relación al daño que esta produce en la construcción de los nuevos bancos.

El Factor de Diseño (**FD**) debiera poder mejorarse cuando se disponga de un barrido topográfico en detalle (I-Site), datos con los cuales se puede realizar un análisis con múltiples perfiles (cada 1m a 5m). Este análisis permite evaluar en cada uno de estos perfiles y en asociación a cada voladura, el grado de cumplimiento en la geometría (diferencia en la cresta, diferencias en la pata y en el ángulo de cara de banco).

El Factor de Condición (**FC**) es un parámetro subjetivo definido por la apreciación del evaluador (Ing. Geotécnico y/o Geólogo) en relación al grado de seguridad que presenta la pared una vez que la pala ha cargado la totalidad del material volado.

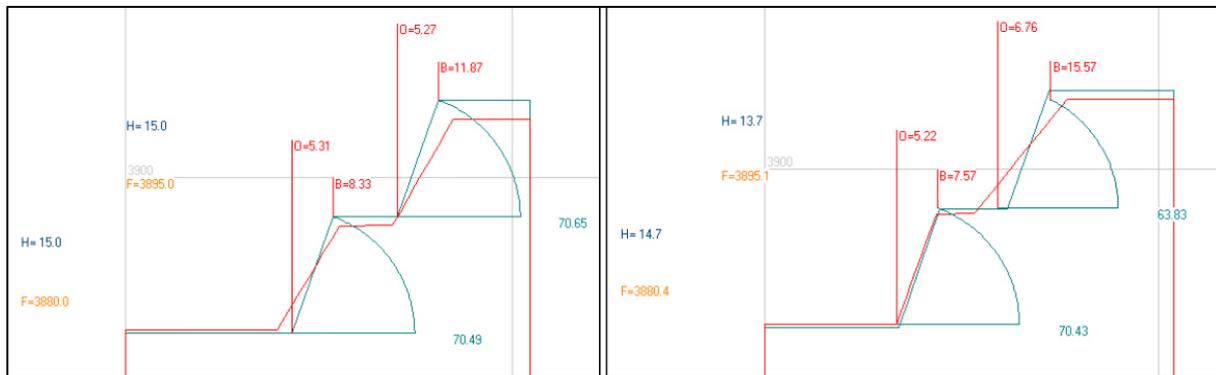
Según la determinación del área de Geotecnia, se deben evaluar los siguientes parámetros (con su respectiva ponderación):

- Grietas de Voladura
- Fracturas Abiertas
- Rocas sueltas en la Cara del talud

- Perfil de la Cara del talud

Rescatando el concepto de la “CONDICION”, es decir, de cómo quedó el banco en CALIDAD y SEGURIDAD, puede tener sentido revisar algunos de los parámetros evaluados y sus ponderadores, para la sumatoria final.

Figura 365. Perfil evaluado en los taludes para el control de vibraciones.



Fuente propia

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **CONCLUSIONES**

1. Las prácticas de Perforación y Voladura junto a la Prácticas Operativas de remate de banco, son determinantes en los resultados en cuanto al cumplimiento con la geometría (limpieza de bermas) y condición del macizo rocoso remanente. Considerando parámetros del banco se realizó diferentes pruebas de carga tanto en los taladros de producción, como línea buffer para obtener el diseño más óptimo de carga, llegando al diseño propuesto con carga desacoplada. Se Implementó diseños de voladura de control de vibraciones para estabilidad de salud de los bancos de minado para los diferentes tipos de roca del yacimiento tipo Skarn.
2. Mediante la recopilación de información data de monitoreo de vibraciones y de una correcta discriminación de la misma, se da la factibilidad de construir un modelo predictivo de vibraciones que refleje la realidad de los disparos de la operación minera pudiendo obtener de esta manera, un índice de confiabilidad aceptable.

### **RECOMENDACIONES**

1. Crear un compendio de Perforación y Voladura (Producción y Contorno) que refleje los diseños vigentes para las distintas rocas y zonas de la mina, esto permitirá evaluar y proponer una mejora continua en el proceso de Perforación y Voladura. Se recomienda disponer de procedimientos de trabajo internalizados

como estándares operacionales, capacitación y entrenamiento permanente y auditorías sistemáticas al proceso. Todas estas iniciativas permitirán incorporar las Mejores Prácticas, en orden a asegurar el cumplimiento del resultado esperado, tanto en términos de fragmentación como del daño inducido por voladura. El área de Geotecnia debe ser protagónica en las Voladuras de Contorno, desarrollando y participando en un protocolo que provea información útil para su diseño o ajuste, aprobando el diseño y ejecución, así como dando un <feedback> al área de voladura respecto del grado de cumplimiento de la geometría en bancos y bermas.

2. En el diseño del modelo predictivo de vibraciones se recomienda ajustar parámetros como; la calidad de la perforación debe recibir especial atención dado que determina como se distribuye la energía del explosivo en el macizo rocoso. La existencia de desviaciones puede generar zonas sobre o sub cargadas energéticamente. Igual o mayor rigurosidad será atendible en las Voladuras de Contorno (trim), en particular en el largo de la perforación (según cota collar), para ajustarse al diseño en cada zona y no dañar el banco inferior.

## **BIBLIOGRAFIA**

[1] Hoek, Evert., Carranza-Torres, Carlos., Corkum, Brent. 2002. Hoek-Brown Failure Criterion.

[2] Gonzales de Vallejo (2202), "Ingeniería Geológica", Pearson, Madrid.

[3] Terzaghi, K., Peck, R y Mesri, G. (1996). "Mecánica del Suelo en la Práctica de Ingeniería", 3rd Ed, John Wiley and Sons.

[4] EXSA, (2005). "Manual Práctico de Voladura", Lima-Perú, 4ta Edición

[5] Langefors U., B Kihlstrom, (1984). "Voladura de Roca", 4ta Edición, Editorial Quórum Books, Westport, New York- Estados Unidos

[6] López C. (2000). "Manual y Diseño de Perforación y Voladura de Rocas". España.

[7] ORICA MINING SERVICES, "Antecedentes En Vibraciones", Oms.

[8] KONYA, MANUAL DE KONYA.

[9] D.S. Nº 024-2016-EM.- Aprueba Reglamento De Seguridad E Higiene Minera.

- [10] McKenzie, Cameron: "Voladura para Ingenieros".
- [11] HOLMBERG, JOHANSSON, "Control De Daño En Tronaduras En Minería Civil Y Construcción", Viña Del Mar, Chile 1999
- [12] C. SCHERPENISSE, Curso De Perforación Y Voladura Para Exsa.
- [13] ENAEX S.A: Manual de tronadura; Perú; 2010.
- [14] SIPERVOL, 2015
- [15] Langefors, U. & Kihlström, B. 1967, The Modern Technique of Rock Blasting, Almqvist & Wiksell.
- [16] Pernia, J. (2011). Manual de perforación y voladura. Madrid: COMPOBEL S.A.
- [17] FAMESA, Manual de voladura; 2019
- [18] Townley, B. 2001. Metalogénesis: Hidrotermalismo y Modelos de Yacimientos. Geología Económica. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- [19] Tumialán. P.H, 2003, Compendio de yacimientos minerales del Perú, INGEMMET, boletín n°10, Serie B, Geología Económica, 619 p.
- [20] Meinert, L.D. 1993. Igneous petrogenesis and skarn deposits. In: KIRKHAM, R.V., SINCLAIR, V.D., THORPE, R.I., DUKE, J.M. (eds), Mineral Deposit Modelling. Geological Association of Canada, Special Publications ON 40, pp. 569–583.
- [21] Meinert, L. D. 1992. Skarns and skarn deposits. Geoscience Canada, 19(4).

[22] Meinert, L.D. 1983. Variability of skarn deposits – guides to exploration. In: BOARDMAN, S.J. (eds), *Revolution in the Earth Sciences*. Kendall-Hunt Publishing, Dubuque, Iowa, 301–316.