

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



**DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL MACIZO
ROCOSO EN LA PROFUNDIZACIÓN DEL AVANCE EN LA
ZONA ESPERANZA DEL NIVEL 23 MEDIANTE UN ANÁLISIS
GEOMECÁNICO EN LA UNIDAD MINERA AMERICANA DE
CÍA. MINERA CASAPALCA**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. ALVARO MARTIN CAÑAPATAÑA CCORA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PUNO – PERÚ

2019



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL MACIZO ROCOSO EN LA PROFUNDIZACIÓN DEL AVANCE EN LA ZONA ESPERANZA DEL NIVEL 23 MEDIANTE UN ANÁLISIS GEOMECÁNICO EN LA UNIDAD MINERA AMERICANA DE CÍA. MINERA CASAPALCA

TESIS PRESENTADA POR:

Bach. ALVARO MARTIN CAÑAPATAÑA CCORA
PARA OPTAR DEL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO DE MINAS

APROBADO POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE:



M.Sc. Ing. MARIO SERAFIN CUENTAS ALVARADO

PRIMER MIEMBRO:



M.Sc. Ing. AMERICO ARIZACA AVALOS

SEGUNDO MIEMBRO:



M.Sc. Ing. LUCIO RAÚL MAMANI BARRAZA

DIRECTOR / ASESOR:



M.Sc. Ing. FELIPE MAMANI OVIEDO

Área : Ingeniería de Minas

Tema : Mecánica de rocas, geomecánica y geotecnia

FECHA DE SUSTENTACIÓN 03 DE MAYO DEL 2019

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación de tesis, se lo dedico a mis Padres: el Sr. Candelario Cañapataña Halanoca, a mi Madre, la Sra. Gabina Ynes Ccora Condori por darme sus sabios consejos y apoyo constante.

A mis hermanos Luz Marina, Rodrigo, sobrino Dyland y a una persona en especial que ha brindado su compañía, comprensión y todo su apoyo incondicional en mi vida profesional por darme las fuerzas para continuar con mi carrera profesional.

AGRADECIMIENTO

Hacemos constar nuestro agradecimiento a la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, por constituirse en el alma Mater de mi formación Profesional, y mi más sincera gratitud y agradecimiento a todos los docentes ingenieros en general que conforman la Facultad de Ingeniería de Minas, quienes con sus enseñanzas y expresiones que nos brindaron durante nuestros estudios universitarios, nos ayudaron en el logro de nuestros objetivos y metas que trazamos al iniciar nuestra carrera profesional.

Mi agradecimiento especial a la Empresa Minera Casapalca S.A.A – Unidad de Producción Americana por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo de investigación, a los ingenieros y trabajadores que conforman la familia de “operaciones mina” quienes con sus sugerencias, apoyo y colaboración hicieron enormes contribuciones en la realización del presente trabajo de investigación.

Alvaro Martin Cañapataña Ccora

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....3
AGRADECIMIENTO4
ÍNDICE GENERAL5
ÍNDICE FIGURAS9
ÍNDICE DE TABLAS11
ÍNDICE DE ANEXOS.....14
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS15
RESUMEN16
ABSTRACT.....17

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema 19
 1.1.1. Descripción del problema 19
 1.2. Formulación del problema..... 19
 1.2.1. Problema general 19
 1.2.2. Problemas específicos..... 19
 1.3. Formulación de hipótesis 20
 1.3.1. Hipótesis general 20
 1.3.2. Hipótesis específica 20
 1.4. Justificación del problema 20
 1.5. Objetivos de la investigación..... 21
 1.5.1. Objetivo General..... 21
 1.5.2. Objetivo Específico 21
 1.6. Viabilidad del estudio 21

CAPÍTULO II
REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación..... 22
 2.2. Bases teóricas 25
 2.2.1. Geomecánica 25
 2.3. Clasificaciones geomecánicas 25

2.3.1.	Clasificación geomecánica <i>RMR Bieniawski</i> 1976	26
2.3.2.	Clasificación geomecánica <i>RMR</i> de <i>Bieniawski</i> 1989.....	29
2.4.	Índice de la calidad de la roca <i>Q</i>	43
2.4.1.	Tabla de valores de los seis parámetros característicos del sistema <i>Q</i> <i>Barton</i>	45
2.5.	Índice de resistencia geológica (<i>GSI</i>).....	53
2.5.1.	Criterio de rotura de <i>Hoek y Brown</i>	54
2.5.2.	Resistencia a la compresión simple o uniaxial	55
2.6.	Método de elementos finitos usando software <i>phase2</i>	56
2.6.1.	Generación de los Elementos Finitos	57
2.6.2.	Tipos de elementos	59
2.6.3.	Tipos de elementos usados por el <i>Phase2</i>	60
2.6.4.	Tipos de Restricciones en método de elementos finitos.....	60
2.6.5.	Metodología para la resolución de problemas en Ingeniería.....	60
2.6.6.	Generalidades del método de los elementos finitos.....	61
2.6.7.	Excavación en malla triangular	62
2.6.8.	Excavación en malla cuadrada	62
2.6.9.	Metodología para la resolución de problemas en Ingeniería.....	64

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	Diseño metodológico	65
3.1.1.	Tipo de investigación.....	65
3.1.2.	Diseño de la investigación.....	65
3.1.3.	Procedimientos de contractación de hipótesis	65
3.2.	Población y muestra.....	66
3.2.1.	Población	66
3.2.2.	Muestra	66
3.3.	Operacionalización de variables	67
3.3.1.	Variable independiente	67
3.3.2.	Variable dependiente	67
3.4.	Técnicas de recolección de datos.....	67
3.4.1.	Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	68

3.5.	Características del área de estudio.....	72
3.5.1.	Unidad de estudio	72
3.5.2.	Descripción de la propiedad y ubicación.....	72
3.5.3.	Accesibilidad	73
3.5.4.	Clima, flora y fauna	73
3.5.5.	Geomorfología.....	74
3.6.	Geología local.....	74
3.6.1.	Fisiografía:.....	74
3.7.	Geología económica	75
3.8.	Geología regional	75

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1.	Caracterización geomecánica del lugar de estudio.....	76
4.2.	Clasificación geomecánica RMR de Bieniawski 1989.....	76
4.2.1.	Resistencia de la roca	76
4.2.2.	Designación de la calidad de roca – <i>RQD</i>	80
4.2.3.	Espaciamiento de discontinuidades	81
4.2.4.	Condición de las discontinuidades	82
4.2.5.	Presencia de agua subterránea	86
4.2.6.	Orientaciones de las discontinuidades.....	87
4.2.7.	Valoración del macizo rocoso (<i>RMR</i>)	89
4.2.8.	Elección del tipo de sostenimiento según el <i>RMR</i>	90
4.2.9.	Valoración de la clasificación geomecánica <i>RMR</i> año 1976	91
4.2.10.	Estabilidad de roca dura para diseño en excavaciones	92
4.3.	Clasificación geomecánica del índice <i>Q</i> de Bartón.....	93
4.3.1.	Clasificación geomecánica <i>Q</i> de <i>Bartón</i>	93
4.3.2.	Elección del tipo de sostenimiento según <i>Barton</i>	98
4.4.	Índice de resistencia geológico <i>GSI Hoek & Brown</i>	100
4.5.	Caracterización de la masa rocosa modelamiento con <i>Software</i>	101
4.5.1.	Distribución de discontinuidades.....	102
4.5.2.	Propiedades físico - mecánicas del macizo rocoso según <i>software rock data</i>	103

4.5.3. Análisis con el <i>Phase2</i>	104
4.6. Discusiones.....	107
CONCLUSIONES	110
RECOMENDACIONES	111
BIBLIOGRAFÍA	112
ANEXOS.....	115

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Gráfico de rango crítico y comparación SVM (tres grupos) vs Lang.	28
Figura 2. Periodo crítico: SVM comparación (binario probabilístico) vs Lang	28
Figura 3. Para obtener la resistencia uniaxial a partir de rebotes del esclerómetro.	30
Figura 4. Resistencia.....	30
Figura 5. Parámetro RQD.	33
Figura 6. Espaciamiento de discontinuidad.	34
Figura 7. Presencia de falla.....	35
Figura 8. Persistencia.....	36
Figura 9. Perfiles normalizados para la obtención del JRC (Hoek, 2007).....	38
Figura 10. Relleno de discontinuidad	39
Figura 11. Orientación de las discontinuidades.	43
Figura 12. Tensiones principales.	56
Figura 13. Método de elementos finitos.	56
Figura 14. Generación de elementos finitos.	57
Figura 15. Proceso de análisis físico mediante elementos finitos.....	58
Figura 16. Tipos de elementos finitos.....	59
Figura 17. Tipos de elementos usados por phase2.....	60
Figura 18. Tipos de restricciones phase2.....	60
Figura 19. Proceso de discretización.	61
Figura 20. Generalidades del método de elementos finitos.	61
Figura 21. Tipo de excavación en malla triangular.	62
Figura 22. Tipo de excavación en malla cuadrada.....	62
Figura 23. Determinación de la resistencia de la roca con el martillo Schmidt.	78
Figura 24. Resistencia en Compresión Uniaxial, UCS (MPa).....	79
Figura 25. Índice de calidad de la Roca RQD (%).	81
Figura 26. Rango crítico desarrollado por Lang.	93
Figura 27. Diseño de sostenimiento en base a la clasificación de Barton – Q para 3 y 5. ..	99
Figura 28. Se muestra el diagrama de Rosetas de los datos en general tomados en el cruce 212 del Nv 23 Unidad Americana.	102

Figura 29. Se muestra el diagrama de Planos Principales de los datos en general tomados el Crucero 212 NW.	103
Figura 30. Parámetros para el macizo rocoso.	104
Figura 31. Sección transversal del XC-212 NW del Nv. 23, mostrando el nivel freático de la veta de la mina Casapalca.	105
Figura 32. Relación esfuerzo principal y como actúa alrededor del crucero.	106
Figura 33. Se muestra una mayor concentración de areolas con esfuerzos horizontales indicando relajamiento del macizo rocoso a largo plazo.	106
Figura 34. Vista de los esfuerzos de corte y tensión, además del factor de seguridad.	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación RMR 76	27
Tabla 2. Tabla para obtener la resistencia uniaxial a partir de rebotes del esclerómetro. ...	31
Tabla 3. Calidad del macizo rocoso según el índice RQD.	32
Tabla 4. Para obtener la resistencia uniaxial a partir de rebotes del esclerómetro.	34
Tabla 5. Muestra la puntuación de la persistencia según su longitud.	36
Tabla 6. Muestra la puntuación de la apertura según la separación de caras.	37
Tabla 7. Muestra la puntuación del relleno según el tipo de relleno.	39
Tabla 8. Descripción de la meteorización de la masa rocosa (ISRM, 1978).	40
Tabla 9. Muestra la puntuación de la meteorización según el nivel de meteorización.	41
Tabla 10. Muestra la puntuación del agua.	42
Tabla 11. Clasificación geomecánica de Bieniawski	42
Tabla 12. Índice de la calidad de la roca en función de RQD	43
Tabla 13. Valoración de la calidad de la roca.....	45
Tabla 14. Número de discontinuidades.....	46
Tabla 15. Factor de rugosidad de las discontinuidades.	47
Tabla 16. Factor de alteración de las discontinuidades A.....	48
Tabla 17. Factor de alteración de las discontinuidades B.....	49
Tabla 18. Factor de alteración de las discontinuidades C.....	49
Tabla 19. Factor de reducción por contenido de agua en fracturas.	50
Tabla 20. Factor de reducción por tensiones A.	51
Tabla 21. Factor de reducción por tensiones B.....	52
Tabla 22. Factor de reducción por tensiones C.....	53
Tabla 23. Cuadro de operacionalización variables.	67
Tabla 24. Distancias hacia el proyecto.	73
Tabla 25. Ensayo de carga puntual para determinar la UCS de la roca.....	77
Tabla 26. Pruebas de martillo de Schmidt.	78
Tabla 27. Resumen de prueba de Carga puntual y martillo Schmidt.	79
Tabla 28. Carga puntual MPa.	79
Tabla 29. Determinación del <i>RQD</i> usando la fórmula de <i>Palstrom</i>	80
Tabla 30. Muestra la valorización del <i>RQD</i>	80

Tabla 31. Determinación del espaciamiento para la Progresiva 01 al 05 y su val.....	81
Tabla 32. Determinación del estado de las discontinuidades para la P 01 y su val.	82
Tabla 33. Determinación del estado de las discontinuidades para la P 02 y su val.	83
Tabla 34. Determinación del estado de las discontinuidades para la P 03 y su val.	83
Tabla 35. Determinación del estado de las discontinuidades para la P 04 y su val.	84
Tabla 36. Determinación del estado de las discontinuidades para la P 05 y su val.	85
Tabla 37. Determinación de la presencia de agua para la Progresiva 01 y su valorización.	85
Tabla 38. Determinación de la presencia de agua para la Progresiva 02 y su valorización.	86
Tabla 39. Determinación de la presencia de agua para la Progresiva 03 y su valorización.	86
Tabla 40. Determinación de la presencia de agua para la Progresiva 04 y su valorización.	87
Tabla 41. Determinación de la presencia de agua para la Progresiva 05 y su valorización.	87
Tabla 42. Determinación de la orientación de las discontinuidades para la P. 01 y su valorización.....	88
Tabla 43. Determinación de la orientación de las discontinuidades para la P. 02 y su valorización.....	88
Tabla 44. Determinación de la orientación de las discontinuidades para la P. 03 y su valorización.....	88
Tabla 45. Determinación de la orientación de las discontinuidades para la P. 04 y su valorización.....	89
Tabla 46. Determinación de la orientación de las discontinuidades para la P. 05 y su valorización.....	89
Tabla 47. Calculo del <i>RMR</i> de acuerdo a la valorización de cada parámetro.....	90
Tabla 48. Elección del tipo de sostenimiento por Bieniawski, progresivas 1, 2 y 4.	91
Tabla 49. Elección del tipo de sostenimiento por Bieniawski, progresivas 3 y 5.	91
Tabla 50. Valoración geomecánica.....	92
Tabla 51. Sistema de calificación del índice Q Progresiva 1.....	96
Tabla 52. Sistema de calificación del índice Q Progresiva 2.....	97
Tabla 53. Sistema de calificación del índice Q Progresiva 3.....	97
Tabla 54. Sistema de calificación del índice Q Progresiva 4.....	97
Tabla 55. Sistema de calificación del índice Q Progresiva 5.....	98
Tabla 56. Puntuación ESR, según el tipo de excavación.....	98

Tabla 57. Clasificación geomecánica GSI de las 5 Progresiva.....	101
Tabla 58. Cuadro de resúmenes de las clasificaciones geomecánicas.....	101
Tabla 59. Parámetros de ángulo de fricción y cohesión.	103
Tabla 60. Análisis con el Phase2.	105

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Plano geológico

Anexo 2. Datos de recolectados con el martillo Schmidt

Anexo 3. Mapeo geomecánico RMR y GSI – progresiva 1

Anexo 4. Mapeo geomecánico RMR y GSI – progresiva 2

Anexo 5. Mapeo geomecánico RMR y GSI – progresiva 3

Anexo 6. Mapeo geomecánico RMR y GSI – progresiva 4

Anexo 7. Mapeo geomecánico RMR y GSI – progresiva 5

Anexo 8. Plano de ubicación

Anexo 9. Plano de zonificación geomecánica

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RMR	: Clasificación de la masa rocosa
RQD	: Índice de calidad de la roca
GSI	: Índice de resistencia geológico
JRC	: Coeficiente de rugosidad de la junta
P	: Progresiva
Vmax	: Valoración máxima
Vmin	: Valoración mínima
Prom	: Promedio
Km	: Kilometros
Hrs	: Horas
ESR	: Factor de estado tensional
ISRM	: Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas
Ja	: Índice de alteración de discontinuidad
Jn	: Número de discontinuidades
Jr	: Factor de rugosidad de discontinuidad o juntas
JRC	: Coeficiente de rugosidad de la junta
Jw	: Coeficiente de reducción por contenido de agua en fracturas
SRF	: Factor de reducción de tensión
UCS	: Resistencia a la compresión uniaxial
UTM	: Universal Transverse Mercator (Sistema de coordenadas mundial)
WGS	: Sistema geodésico mundial 1984

RESUMEN

El presente estudio de investigación se ha desarrollado en la unidad minera Americana de Cía. minera Casapalca ubicado políticamente en el distrito de Chicla, provincia de Huarochirí y departamento de Lima. En el cual viene realizando una labor de preparación que servirá de crucero y se ubicará en el nivel 23 a una profundidad de 1 380 metros, esta labor tendrá un total de 500 metros, donde para la investigación se formuló la siguiente pregunta; ¿Cómo determinar las condiciones de macizo rocoso en la zona esperanza del nivel 23 para aplicar el soporte requerido mediante un análisis geomecánico? Además, se planteó el objetivo de determinar las condiciones del macizo rocoso en la zona esperanza del nivel 23 para aplicar el soporte requerido mediante un análisis geomecánico. Se aplicará un método descriptivo, porque se describe las características del macizo rocoso con la finalidad de determinar las condiciones de estabilidad del macizo rocoso causado por factores influyentes que causan desprendimiento de rocas, en base a las descripciones realizadas se planteó realizar un análisis geomecánico usando las clasificaciones geomecánicas del RMR, Q y GSI así mismo el uso del software Phase2.0 v.8.00, donde se determinó el factor de seguridad y el soporte que se va a requerir. Se aplicó los métodos numéricos como el Dips y Phase se simuló la estabilidad del crucero donde se determinó un factor de seguridad sin sostenimiento de 1.1 y con sostenimiento de 1.58, siendo para cada clasificación geomecánica una roca buena con una litología arenisca silicificada – epidotizada además. Como resultados se llegó a tener un RMR promedio de la roca de 59.4, un Índice Q promedio de 11.47, y GSI promedio de 53.4.

Palabras Claves: Macizo rocoso, análisis geomecánico, Dips.

ABSTRACT

The present research study has been developed in the American mining unit of Cía. Casapalca mine located politically in the district of Chicla, province of Huarochirí and department of Lima. In which has been doing a preparation work that will serve as a cruise and will be located at level 23 at a depth of 1 380 meters, this work will have a total of 500 meters, where the following question was asked for the investigation; How to determine the rock mass conditions in the hope zone of level 23 to apply the required support through a geomechanical analysis? In addition, the objective is to determine the conditions of the rock mass in the hope area of level 23 to apply the required support through a geomechanical analysis. A descriptive method will be applied, because the characteristics of the rock mass are described in order to determine the conditions of stability of the rock mass caused by influencing factors that cause rockfall, based on the descriptions made, a geomechanical analysis using the geomechanical classifications of the RMR, Q and GSI, as well as the use of the Phase2.0 v.8.00 software, where the security factor and the support that is going to be required were determined. The numerical methods such as the Dips and Phase were simulated the stability of the cruise where a safety factor without support of 1.1 was determined and with support of 1.58, being for each geomechanical classification a good rock with an silicified - epidotized sandstone lithology. The results were an average RMR of the rock of 59.4, an average Q-Index of 11.47, and an average GSI of 53.4.

Key words: Rocky massif, geomechanical analysis, Dips.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En la unidad minera Americana de Cía. Minera Casapalca que se encuentra en el departamento de Lima, teniendo como método de explotación convencional de corte y relleno ascendente y teniendo como extracción Cu, Ag, Pb y Zinc. En el ciclo de minado, las actividades de sostenimiento y saber la calidad de roca son etapas importantes para la estabilidad del macizo rocoso, el factor de seguridad y así tener condiciones seguras para poder continuar realizando los trabajos que correspondan en el crucero 212 del nivel 23, es lo que se fundamenta en la presente tesis titulada “Determinación de las condiciones del macizo rocoso en la profundización del avance en la zona esperanza del nivel 23 mediante un análisis geomecánico en la unidad minera Americana de Cía. Minera Casapalca”.

El presente trabajo de investigación es dividido en cuatro capítulos, para el capítulo, se considera el planteamiento del problema, los objetivos así como la justificación del porque se está desarrollando la tesis, en el capítulo II, se tiene los antecedentes similares a la tesis planteada y también se tiene las bases teóricas que servirán para reforzar las terminaciones usadas, en el capítulo III, se indica la metodología que se aplica para el diseño de la tesis así como la descripción del lugar donde se ubica el área de estudio, y en el último capítulo se muestra las respuestas y las discusiones realizadas con otros autores.

1.1. Planteamiento del problema

1.1.1. Descripción del problema

En la unidad Minera Americana de Cia. Minera Casapalca, se viene realizando labores de avance esto en base a las perforaciones de exploración. El crucero 212 que ubica en el nivel 23, el cual presenta problemas en las condiciones del macizo rocoso quien genera problemas de caída de rocas y podría originar malas condiciones de trabajo hacia el personal que labora en el avance y traería consigo accidentes e incidentes es donde se plantea realizar análisis geomecánico usando las clasificaciones geomecánicas de RMR, Q y GSI y también el software Phase 2 v.8.00, en base a estos análisis se determinar cómo son las condiciones del macizo rocoso y ver que soportes son recomendable a fin de garantizar condiciones de seguridad buenas para todo el personal.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

- ¿Cómo determinar las condiciones de macizo rocoso en la zona esperanza del nivel 23 para aplicar el soporte requerido mediante un análisis geomecánico en la Unidad Minera Americana de Cía. Minera Casapalca?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo realizar el análisis geomecánico mediante el método empírico de clasificaciones geomecánicas y uso de software de elementos finitos en la Unidad Minera Americana de Cía. Minera Casapalca?
- ¿Cómo determinar las condiciones del macizo rocoso en la zona esperanza del nivel 23 mediante un análisis geomecánico en la Unidad Minera Americana de Cía. Minera Casapalca?
- ¿Cómo determinar el soporte requerido mediante un análisis geomecánico por método empírico y uso de software elementos finitos en la Unidad Minera Americana de Cía. Minera Casapalca?

1.3. Formulación de hipótesis

1.3.1. Hipótesis general

- Con la realización de análisis geomecánico se determinó las condiciones de macizo rocoso en la zona esperanza del nivel 23 para su diseño del soporte requerido en la Unidad Minera Americana de Cía. Minera Casapalca.

1.3.2. Hipótesis específica

- Mediante el método empírico de clasificaciones geomecánicas y uso de software de elementos finitos se determinó realizar el análisis geomecánico en la Unidad Minera Americana de Cía. Minera Casapalca.
- El análisis geomecánico permitió determinar las condiciones del macizo rocoso en la zona esperanza del nivel 23 en la Unidad Minera Americana de Cía. Minera Casapalca.
- El análisis geomecánico por método empírico y uso de software de elementos finitos permitió aplicar el soporte requerido en la Unidad Minera Americana de Cía. Minera Casapalca.

1.4. Justificación del problema

En la Unidad Minera Americana de Cía. Minera Casapalca se viene realizando avances en el nivel 23 de la zona esperanza con la finalidad de mantener la extracción del mineral programado, en la realización de los trabajos se presentó problemas de estabilidad en el crucero 212 debido a que se tiene fallas y otros factores influyentes que originan estos problemas al macizo rocoso y podrían originarse desprendimiento de rocas y de acuerdo al reglamento de seguridad y salud ocupacional D. S. 023 EM. Todas las labores de preparación o explotación donde labore los trabajadores deben ofrecer condiciones óptimas de seguridad, Además de acuerdo a la estadística de accidentes fatales realizada por el ministerio de energía y minas, la mayor cantidad de accidentes son por caída de rocas por lo que se justifica la investigación haciendo el análisis geomecánico del crucero 212 y ver como son las condiciones del macizo rocoso.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo General

- Determinar las condiciones del macizo rocoso en la zona esperanza del nivel 23 para aplicar el soporte requerido mediante un análisis geomecánico en la Unidad Minera Americana de Cía. Minera Casapalca

1.5.2. Objetivo Específico

- Realizar el análisis geomecánico mediante el método empírico de clasificaciones geomecánicas y uso de software de elementos finitos en la Unidad Minera Americana de Cía. Minera Casapalca.
- Determinar las condiciones del macizo rocoso en la zona esperanza del nivel 23 mediante un análisis geomecánico en la Unidad Minera Americana de Cía. Minera Casapalca
- Determinar el soporte requerido mediante un análisis geomecánico por método empírico y uso de software de elementos finitos en la Unidad Minera Americana de Cía. Minera Casapalca

1.6. Viabilidad del estudio

El trabajo de investigación está directamente relacionado con la actividad minera subterránea, considerando que la minería es una fuente de desarrollo del país, en lo económico, social y conociendo su grado de importancia es viable para su desarrollo según los avances de la tecnología minera, para su ejecución se cuenta con recursos económicos y recursos humanos.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación

Según Pérez (2012), en su tesis “Mejoras en el 2011 en la unidad Uchucchacua de la compañía de minas buenaventura S.A.A”, Universidad Nacional de Ingeniería, en sus conclusiones menciona: se profundizo la rampa 760 ya llego al Nv 3 920 según lo programado, actualmente se encuentra conectada al Pique Master, lo que nos permite realizar la limpieza del fondo del Pique desde la rampa, así como la ventilación de la Rp 760 por debajo del Nv 3990. También se evita la acumulación de agua en fondo del pique.(Centeno, 2014)(Centeno, 2014)(Centeno, 2014)(Centeno, 2014)(Centeno, 2014)

Según Berroa (2016), en su tesis “Optimización de las operaciones mineras mediante la profundización de la rampa negativa entre los niveles 2 900-2 650 VANKAR EIRL SAC – Minera Aurífera Retamas” Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, en sus conclusiones menciona: En el tramo inicial de la ejecución de la rampa negativa, se presentó roca tipo IV B y presencia de agua por los que se tuvo muchas demoras por la inestabilidad del terreno; al encontrar roca competente tipo III B desde la progresiva -200, se cumplió con los objetivos programados de la contrata VANKAR EIRL. , tales como el avance mensual de 100 m. por mes, con las condiciones y características del diseño.

Según Vela (2013), en su tesis “profundización de la mina Casapalca mediante el diseño y construcción del pique inclinado 016 zona veta oroya - niveles 14 al 18” Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, en sus conclusiones menciona: A raíz del agotamiento de las reservas actuales de la mina, encima del nivel 14 y con el objetivo de extraer en el menor tiempo posible el mineral de los bloques generados entre el Nv. 14 y el Nv. 18, de las dos vetas principales, es decir, Ximena y Oroya, surge la necesidad de realizar un pique inclinado 016, entre estos niveles para la extracción de las reservas. De acuerdo al plan anual de minado, la meta de producción anual de las vetas Ximena y Oroya será de 10 000 TM/año (400 TMD), durante 8 años”.

Según Arias (2013), en su tesis “planeamiento y diseño del sistema de extracción del proyecto de profundización de la U.O San Braulio UNO” Pontificia Universidad Católica del Perú, en sus conclusiones menciona: Respecto al planeamiento de la ejecución de la infraestructura necesaria para el sistema de extracción del proyecto de profundización, se estimó un tiempo de 90 días para realizar todas las obras, que incluye el alcance al nivel 3880 mediante una rampa negativa, el pique inclinado, los desquiches y cuadrados de las estaciones de pique en los dos niveles, el tendido de los rieles en estas estaciones y a lo largo del pique, y por último, el armado de la plataforma e instalación del winche. Finalmente, se presenta las duraciones de dichas actividades, así como la ruta crítica del desarrollo del sistema de extracción.

Según Prado (2015), en su tesis “proyecto de profundización del pique vertical 650 Álex, del nivel 10 al nivel 16, unidad minera americana de empresa minera Casapalca S. A. 2013” Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en sus conclusiones menciona: Se opta por profundizar el pique vertical 650 en la zona de cuerpo Mery desde el nivel 10 hasta el nivel 16 por ser más dinámico en la extracción de mineral, de personal y además en casos de emergencia se evacua de en tiempo optimo al personal accidentado. La profundización del pique vertical tiene menor distancia desde el punto de izaje hasta el punto de descarga de mineral en el nivel 1 a diferencia del pique inclinado o la rampa.

Según Rojas (2008), en su tesis. Indica que las condiciones de presencia de agua desde la superficie hasta el Nv. - 100 o - Nv. 120 son por lo general secas. Las zonas de humedad y

en algunos casos de goteos esporádicos están asociadas al agua proveniente de las operaciones de perforación para la voladura. El agua de filtración de las perforaciones, tiene efecto adverso en las condiciones de estabilidad de las excavaciones rocosas. En los niveles inferiores la presencia del agua es significativa, debido a las filtraciones provenientes de la perforación posible mapa freática presente en el lugar. Para propósitos de analizar los esfuerzos y las deformaciones alrededor de las excavaciones subterráneas, se ha estimado que el esfuerzo vertical in-situ es 4.0 MPa. La constante “k” (relación de los esfuerzos horizontal a vertical) para determinar el esfuerzo in-situ horizontal, fue estimada en 1.0.

Según Gutiérrez (2017), “Indica que con los nuevos diseños de bancos tendrán un Factor de seguridad de 1.1 para su estabilidad, esto reducirá los riesgos y peligros. Para una altura de banco de 10 m los ángulos de talud serán de 75° y para bancos de 12 m. los ángulos de talud serán de 65° y así se evitará los accidentes que con frecuencia solían suceder.”

Según Moscoso y Sacha (2015), “El diseño del sostenimiento se realizará en base a toda la información que se ha tenido disponible, información que ha sido desarrollada mediante mapeos geotécnicos de las excavaciones existentes en el Nv. 720 en los alrededores del área del nuevo pique y del loguero geomecánico del Sondaje PQ-12-03 realizado desde superficie hasta los 1003.6 m de profundidad.”

Según Murillo (2008), en su tesis “El sistema de sostenimiento que más se utiliza en las labores de desarrollo, preparación y explotación en la mina Huanzalá de Santa Luisa, son los pernos cementados. Sin embargo, el sistema de sostenimiento shotcrete, cables bolting se utilizan en zonas de acuerdo al tipo de terreno y la tabla geomecánico y con el software Phase2 es una herramienta importante que permite determinar entre otras cosas el tipo de sostenimiento de labores, tipo de voladura a realizar, determina la sección de excavaciones subterráneas a realizar.”

Según Chura (2006), en su tesis “La clasificación geomecánica obtenido en la ejecución del presente proyecto nos da a conocer que, según el RMR89 de Bieniawski, da como resultado una calidad de tipo III, roca regular en pizarra y calidad buena tipo II en cuarcita, el dominio estructural de la caracterización geomecánica en ambas calidades de rocas se

muestra es un mecanismo de falla de tipo cuña, debido a un comportamiento de discontinuidades de dos a tres familias presentes”

Según Soto (2016), en su tesis. Las características estructurales y geológicas de la zona de estudio, determinaron las clasificaciones de Roca RMR y Q, además determinaron la clasificación de los suelos (material fluvio glacial) presentes en el portal de entrada y de salida del túnel. Dichas clasificaciones determinaron el tipo de sostenimiento a utilizar en los tramos de Roca según las recomendaciones de *Bieniawski y Barton*.

Según Medina (2017), en su tesis. Mediante las caracterizaciones geomecánica del macizo rocoso y su evaluación se determinó las dimensiones de las cámaras es de 4.5 metros de ancho y los pilares de 2 metros de ancho en los de forma cuadrada. La resistencia de los pilares cuadrados es de 4.78 MPa y las principales variables que influyen en su estabilidad son la resistencia del pilar, y el esfuerzo inducido de la masa rocosa.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Geomecánica

La geomecánica es la disciplina que estudia las características mecánicas de los materiales geológicos que conforman las rocas de formación. Esta disciplina está basada en los conceptos y teorías de mecánica de rocas y mecánica de suelos

2.3. Clasificaciones geomecánicas

La clasificación de los macizos rocosos con fines geotécnicos, cuya finalidad es la obtención de parámetros geomecánicos para su empleo en el diseño y proyecto de las obras de ingeniería.

Los macizos rocosos, como medios discontinuos, presentan un comportamiento geomecánico complejo que, de una forma simplificada, puede ser estudiado y categorizado en función de su aptitud para distintas aplicaciones. Con este objetivo surgieron las clasificaciones geomecánicas, que aportan, mediante la observación directa de las características de los macizos rocosos y la realización de sencillos ensayos, índices de calidad

relacionados con los parámetros geomecánicos del macizo y sus características frente a los sostenimientos de túneles y taludes y la excavabilidad de las rocas, entre otros (G. Vallejo, 2002).

2.3.1. Clasificación geomecánica *RMR Bieniawski 1976*

El sistema *RMR* fue puesto a punto por el Profesor *Bieniawski*, hace 50 años aproximadamente, para clasificar geomecánicamente los macizos rocosos y, desde entonces, se ha convertido en un referente mundial para clasificar los macizos rocosos, establecer sus propiedades tenso-deformacionales y estimar empíricamente el sostenimiento de las excavaciones subterráneas.

El *RMR* clasifica los macizos rocosos de 0 a 100 puntos donde cada parámetro tiene una valorización y estos varían de acuerdo al año de actualización, es decir el *RMR* del año 1976 tiene los mismos parámetros a la actualización del *RMR* del año 1989 pero estos parámetros tienen diferente valorización (Ver Tabla 1).

2.3.1.1. Estabilidad de roca dura para diseño de *span* en excavaciones

Muchos métodos para diseñar espacios abiertos en excavaciones subterráneas se han desarrollado en el pasado, a menudo a través de análisis empíricos. El método de diseño empírico denominado "gráfico de rango crítico" fue desarrollado por *Brennan Lang* (*Universidad de British Columbia*) en 1994, para proporcionar una herramienta de diseño práctica desarrollada específicamente para tramos en excavaciones de tipo de entrada. Se basa en una extensa base de datos de historia de casos de minería de corte y relleno en Canadá, y define roca estable, potencialmente inestable e inestable en áreas de expansión en un gráfico de clasificación de masa rocosa, *Bieniawski, Z.T. (1976) RMR 76*, parámetro de rendimiento de masa de roca contra el lapso entre pilares. Este gráfico ha sido aceptado por muchas operaciones mineras para el diseño de tramo inicial de topes de corte y llenado, y permite que un operador evalúe la estabilidad de las aberturas de la mina con respecto a una masa rocosa.

Tabla 1.
Clasificación RMR 76

PARAMETRO		ESCALA DE VALORES							
1	Resistencia de la roca intacta	carga puntual	80 kg/cm ²	40-80 kg/cm ²	20 - 40 kg/cm ²	10 - 20 kg/cm ²	10 kg/cm ²		
		compresión simple	2000 kg/cm ²	1000 - 2000 Kg/cm ²	500 1000 Kg/cm ²	250 - 500Kg/cm ²	100 - 250 Kg/cm ²	30 - 100 Kg/cm ²	10 - 30 Kg/cm ²
	VALOR		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90-100%	75-90%	50 - 75%	25-50%		25%	
	VALOR		20	17	13	8		3	
3	ESPACIO DE JUNTAS		3 m	1-3 m	0.3 - 1 m	50 - 300 mm		50 mm	
	VALOR		30	25	20	10		5	
4	Condición de juntas		Muy rugosas sin continuidad cerradas paredes de roca dura.	Ligeramente rugosa, < 1mm de separación paredes de roca	Ligeramente rugosa, < 1 mm de separación paredes de roca suave.	Espejo de falla o relleno de espesor < 5mm o abiertos 1-5 mm		Relleno blando de espesor > 5mm. Ó abiertas > 5 mm	Fisuras continuas
	VALOR		25	20	12	6		0	
5	Aguas Subterránea	Cant. Infiltración 10 m. de túnel	Ninguna		25 litros/min	25 - 125 litros/min		> 125 litros/min	
		Presión de agua/ Esfuer. Principal		Cero	0.0 - 0.2	0.2 - 0.5		0.5	
	Situación General		Totalmente Seco		Solo húmedo agua insterst.	Ligera presión de agua		Serios problemas de agua	
	VALOR		10		7	4		0	

Fuente: Brennan Lang, 1976

El gráfico de rango crítico desarrollado por Lang consta de dos líneas rectas que dividen el RMR 1976 como se muestra en la (Figura 1) en comparación con el gráfico de división en tres zonas (roca estable, potencialmente inestable e inestable).

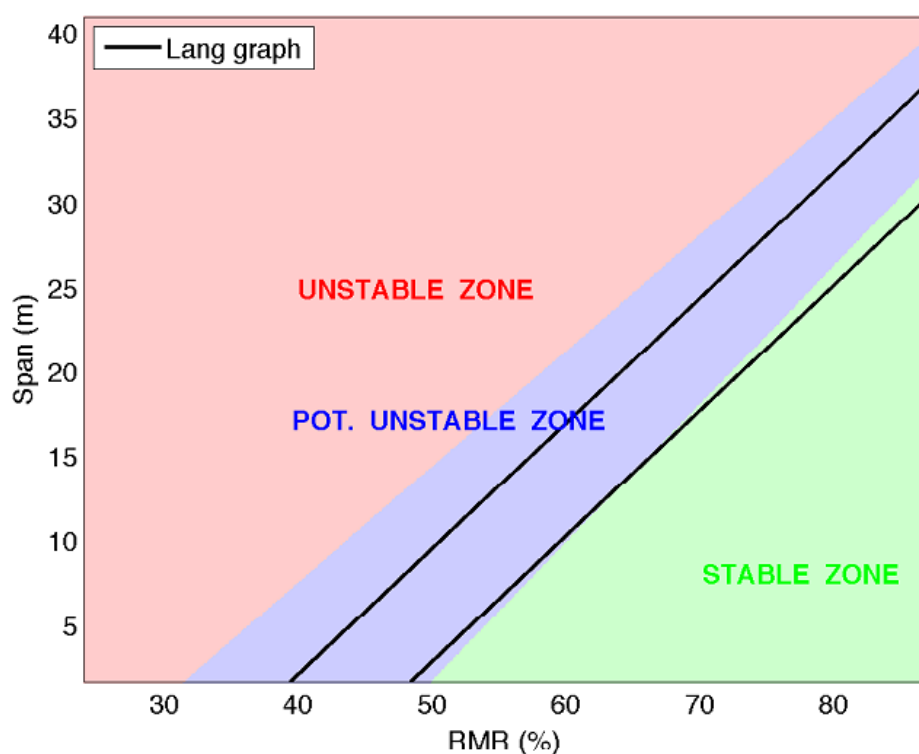


Figura 1. Gráfico de rango crítico y comparación SVM (tres grupos) vs Lang.
Fuente: Brennan Lang, 1994.

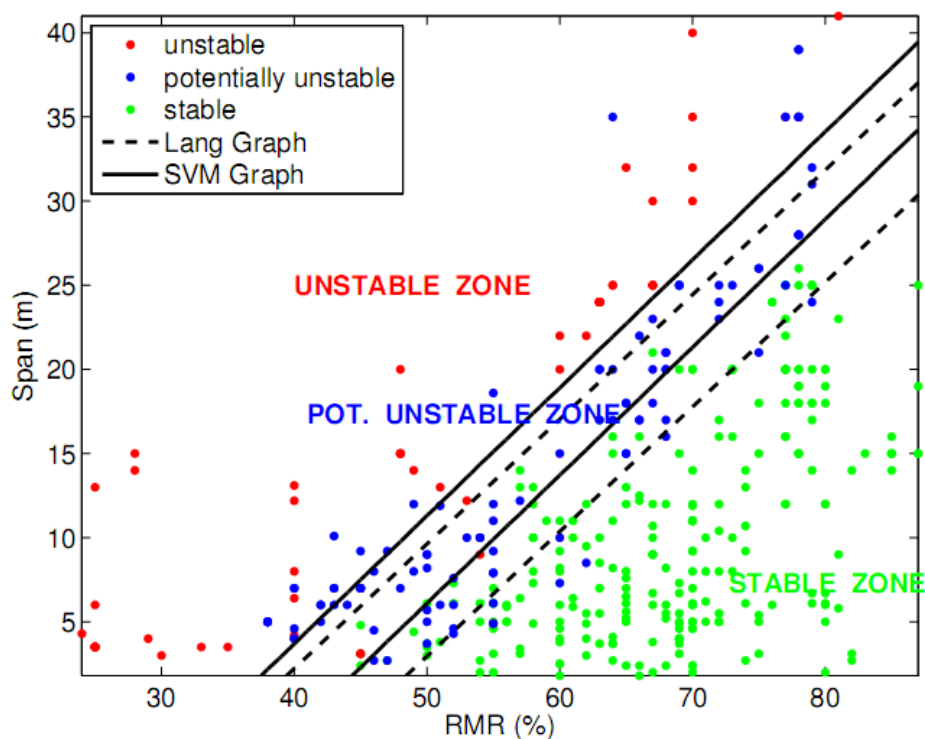


Figura 2. Periodo crítico: SVM comparación (binario probabilístico) vs Lang
Fuente: Brennan Lang, 1994.

El gráfico de rango crítico desarrollado por *Lang* consta de dos líneas rectas que dividen el *RMR* 1976 como se muestra en la (Figura 2) en comparación con el gráfico de división en tres zonas (roca estable, potencialmente inestable e inestable).

2.3.2. Clasificación geomecánica *RMR* de *Bieniawski* 1989

Desarrollada por *Bieniawski* en 1973, con actualizaciones en 1979 y 1989, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo y de excavación y sostenimiento en túneles. Esta clasificación tiene en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos. (*M. Gijon et al.*, 2014).

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- Parámetro *RQD*.
- Espaciamiento de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Orientación de las discontinuidades.

2.3.2.1. Resistencia uniaxial de la matriz rocosa (MPa)

La resistencia de la matriz rocosa puede ser estimada en el afloramiento mediante índices de campo o a partir de correlaciones con datos proporcionados por sencillos ensayos de campo, como el ensayo de carga puntual PLT o el martillo Schmidt.

El ensayo de carga puntual o de rotura entre puntas, PLT, permite obtener un índice, *I_x*, correlacionable con la resistencia a compresión simple. Mediante el martillo Schmidt o esclerómetro se mide la resistencia al rebote de una superficie rocosa, que se correlaciona con la resistencia a compresión simple. En ambos casos es recomendable tomar un número elevado de medidas y realizar su análisis estadístico. Con los valores de resistencia obtenidos con estos métodos se puede clasificar la matriz rocosa en base a los criterios (*Vallejo et al.*, 2014).

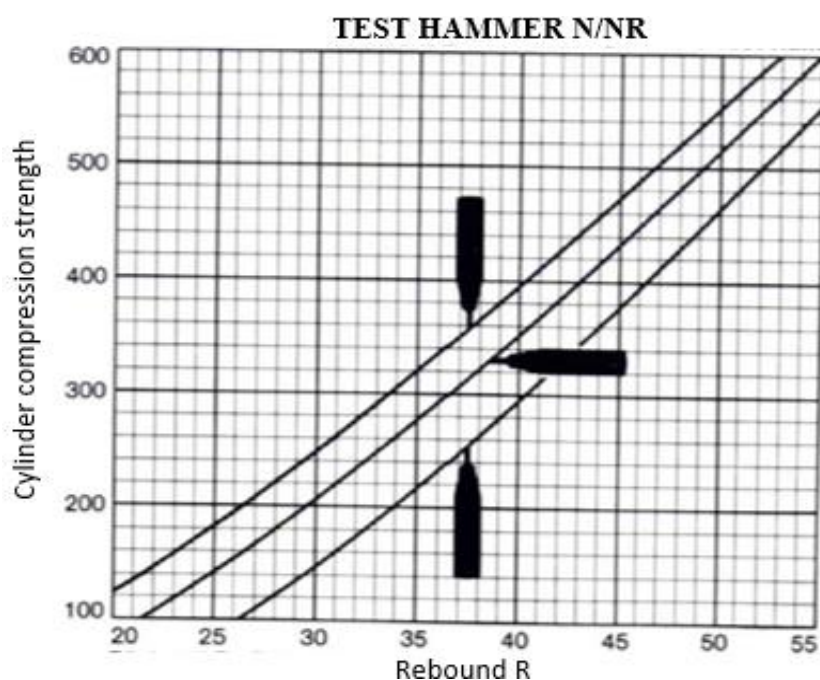


Figura 3. Para obtener la resistencia uniaxial a partir de rebotes del esclerómetro.
Fuente: Bordehore, 2010.

Se toman unos mínimos de cinco medidas no superpuestas por estación. De todos modos, el propio martillo *Schmidt* dispone de una tabla de conversión. Debe de tenerse en cuenta que la escala de presión no aparece siempre en las mismas unidades. No todas las veces puede estimarse la resistencia de la roca a partir del martillo (*Bordehore, 2010*).



Figura 4. Resistencia

Tabla 2 .

Tabla de estimación de terreno en la resistencia en la compresión uniaxial.

Grado	Descripción	Identificación de campo	Resistencia a compresión simple MPa
R1	Roca muy blanda	Deleznable bajo golpes fuertes con la parte puntiaguda del martillo geólogo; puede desconcharse con una navaja.	1 – 5
R2	Roca blanda	Puede desconcharse con dificultad con una navaja; se pueden hacer marcas poco profundas golpeando fuertemente la roca con la punta del martillo.	5 – 25
R3	Roca moderadamente dura	No se puede rayar o desconchar con una navaja; las muestras se pueden romper con un golpe firme con el martillo.	25 – 50
R4	Roca dura.	Se necesita más de un golpe con el martillo geólogo para romper la muestra.	50 – 100
R5	Roca muy dura.	Se necesitan muchos golpes con el martillo geólogo para romper la muestra.	100 – 250
R6	Roca extremadamente dura.	Sólo se pueden romper esquirlas de la muestra con el martillo geólogo.	> 250

Fuente: Bordehore, 2010.

2.3.2.2. Parámetro *RQD*

El índice *RQD* representa la relación entre la suma de las longitudes de los fragmentos de testigos mayores de 10 cm y la longitud total del tramo considerando. Sin embargo y metodologías para estimarlo en afloramientos. (*J. G00utierrez et al., 2007*).

$$RQD = \frac{\sum \text{longitud de los trosos de testigos} \geq 10\text{cm}}{\text{Longitud total}} \times 100\%$$

Tabla 3.
Calidad del macizo rocoso según el índice *RQD*.

<i>RQD</i> %	Calidad
<25	Muy mala
25-50	Mala
50-75	Media
75-90	Buena
90-100	Muy buena

Fuente: Bieniawski, 1989.

Hay dos metodologías a seguir para el cálculo de *RQD*, una la de *Priest y Hudson*, que emplea las es el de las fracturas por metro lineal y la segunda, la de *Palstrom*, que emplea el índice volumétrico J_v (*Bordehore, 2010*).

– ***Priest y Hudson***

Tomamos una línea con cinta métrica en el entorno de la estación geomecánica o entre varias de ellas alineadas (tomaremos en general tantas como zonas diferenciadas estimemos, aunque habitualmente será suficiente con un par de ellas si el macizo es muy semejante en toda la longitud investigada).

Medimos todas las juntas que interceptan nuestra línea “grosso modo” y la dividimos por la longitud de la línea, siendo este el parámetro “ λ ”. Para la determinación del *RQD* del macizo podemos emplear dos formulaciones las cuales requieren unos parámetros “de campo” diferentes. Nosotros de momento nos limitaremos a aplicar la formulación de *Priest y Hudson* que requiere de λ (juntas por metro lineal).

$$RQD = 100 * e^{-0,1\lambda} (0,1\lambda + 1)$$

– ***Palstrom***

También podemos calcular el *RQD* con la formulación de *Palstrom*, a partir del índice volumétrico de juntas:

$$J_v = \sum 1/S_i; \text{ Donde } S_i \text{ es el espaciado medio de cada familia de juntas.}$$

$$RQD = 115 - 3,3J_v$$

$$RQD = 100 \text{ si } J_v < 4,5$$

Podemos realizar un ensayo “*tilt test*” para obtener el ángulo de rozamiento básico de la junta, que si no se obtiene habitualmente de la bibliografía. Puede realizarse a partir de testigos o de fragmentos rocosos con juntas (*Bordehore, 2010*).



Figura 5. Parámetro RQD.

2.3.2.3. Espaciamiento de las discontinuidades

El espaciado de las discontinuidades es un factor que influye en el tamaño de los bloques de roca (caída de cuñas), así como en la permeabilidad del macizo rocoso (permeabilidad secundaria o por fracturación) que condiciona la circulación de agua, el espaciado es la separación en perpendicular de dos juntas de una misma familia. Cuanto más separadas estén las juntas más estable y resistente será el macizo rocoso.

Este parámetro es de crucial importancia para los cálculos “realistas” de cuñas y para estudiar el efecto de escala en el criterio de rotura de *Hoek – Brown*; no en vano este criterio es aplicable o bien a macizos rocoso sin fracturas o bien intensamente fracturados de tal forma que se trata de un medio continuo homogéneo y sin direcciones preferentes de anisotropía (*Sociedad Nacional de Minería Petroleo y Energía, 2014*).

Tabla 4.

Para obtener la resistencia uniaxial a partir de rebotes del esclerómetro.

Descripción	Espaciado de las juntas	Tipo de macizo rocoso
Muy ancho	> 3 m	Sólido
Ancho	1 – 3 m	Masivo
Moderadamente cerrado	0.3 – 1 m	Bloques
Cerrado	50 – 300 mm	Fracturado
Muy cerrado	< 50 mm	Machacado

Fuente: Bieniawski, 1989.**Figura 6.** Espaciamiento de discontinuidad.**2.3.2.4. Condición de las discontinuidades**

Es el parámetro 4 de la clasificación de *Bieniawski* siguiendo la nomenclatura de la descripción del *RMR* y subdividimos la condición o estado de las discontinuidades en 5 subcategorías (*Tapahuasco, 2015*).

- **Tipos de discontinuidades**

Dependiendo de cómo se presenten estas discontinuidades o rasgos estructurales dentro de la masa rocosa, ésta tendrá un determinado comportamiento frente a las operaciones de minado (*Bordehore, 2010*).

Los principales tipos de discontinuidades presentes en la masa rocosa son:

- **Planos de estratificación:** dividen en capas o estratos a las rocas sedimentarias.
- **Fallas:** son fracturas que han tenido desplazamiento. Éstas son estructuras menores que se presentan en áreas locales de la mina o estructuras muy importantes que pueden atravesar toda la mina.
- **Zonas de corte:** son bandas de material que pueden ser de varios metros de espesor, en donde ha ocurrido fallamiento de la roca.
- **Diaclasas:** también denominadas juntas, son fracturas que no han tenido desplazamiento y las que más comúnmente se presentan en la masa rocosa.
- **Planos de foliación:** se forman entre las capas de las rocas metamórficas dando la apariencia de hojas o láminas.
- **Contactos litológicos:** que comúnmente forman, por ejemplo, la caja techo y caja piso de una veta.

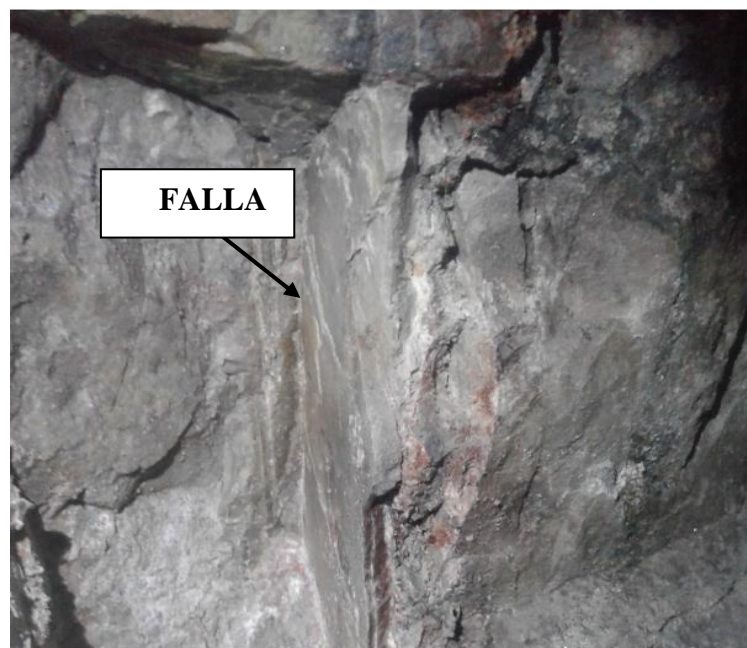


Figura 7. Presencia de falla.

– **Persistencia**

El concepto de persistencia se refiere a la extensión o tamaño de una discontinuidad. Este parámetro se puede estimar (en ausencia de excavación)

observando las longitudes de las superficies estudiadas en los afloramientos. Es habitual distinguir la continuidad de un estrato o diaclasa según la dirección de rumbo o buzamiento. Se trata de indicar desde donde empieza y hasta donde llega la junta en varias direcciones. Tiene gran importancia en el estudio de la estabilidad de taludes puesto que marca la extensión de los posibles deslizamientos planos y el tamaño de las cuñas que puedan formarse (Sociedad nacional de minería petróleo y energía, 2014).

Tabla 5.

Muestra la puntuación de la persistencia según su longitud.

Grado	Descripción	Continuidad	Rango RMR
1	Muy pequeña	< 1 m	6
2	Pequeña	1 – 3 m	4
3	Media	3 – 10 m	2
4	Alta	10 – 20 m	1
5	Muy alta	> 20 m	0

Fuente: Bieniawski, 1989.



Figura 8. Persistencia.

– **Apertura**

Es la separación entre los labios de las discontinuidades. Cuanta más separación más inestable es el conjunto, siendo además zonas de preferencia para la

circulación de agua y la presencia de materiales arcillosos que restan resistencia al macizo (Sociedad nacional de minería petróleo y energía, 2014).

Tabla 6.
Muestra la puntuación de la apertura según la separación de caras.

Grado	Descripción	Separación de caras	Rango RMR
1	Abierta	> 5mm	0
2	Moderadamente abierta	1 – 5 mm	1
3	Cerrada	0.1 – 1 mm	4
4	Muy cerrada	< 0.1 mm	5
5	No tiene	0	6

Fuente: Bieniawski, 1989.

– Coeficiente de rugosidad de la junta JRC

Es la aspereza o irregularidad de la superficie de la discontinuidad. Cuanto más rugosa sea mayor será la resistencia de los labios de la discontinuidad. Intuitivamente tiene implicación en la cohesión y ángulo de fricción de la junta, es decir en la denominada resistencia al corte (*Gutierrez et al., 2017*).

La importancia de la rugosidad disminuye al aumentar la apertura, el espesor del relleno o cualquier desplazamiento sufrido con anterioridad, empleamos los perfiles normalizados que indican ondulación en una parte y JRC (rugosidad) en la otra (*Bongiorno et al., 2012*), (Ver Figura 9).

Barton y Choubey (1974), desarrollaron un modelo empírico para poder estimar la envolvente de la resistencia al corte para discontinuidades con cualquier tipo de rugosidad.

Este criterio es una forma sencilla para poder estimar la resistencia al corte de una discontinuidad mediante ensayos relativamente simples. Se basa en la siguiente expresión:

	JRC=0-2
	JRC=2-4
	JRC=4-6
	JRC=6-8
	JRC=8-10
	JRC=10-12
	JRC=12-14
	JRC=14-16
	JRC=16-18
	JRC=18-20

Figura 9. Perfiles normalizados para la obtención del JRC (Hoek, 2007).
Fuente: Bieniawski, 1989.

$$\tau = \sigma_n \tan (\varphi_b + JRC) \log_{10}$$

Donde *JRC* es el coeficiente de rugosidad de la discontinuidad y *JCS* es la resistencia a compresión simple de los labios en la discontinuidad. El valor de *JRC* depende del grado de rugosidad de la discontinuidad y varía desde cero para superficies lisas (Tauta, 2009).

– **Relleno**

Se debe de indicar si no hay, si este es duro (filón) o de arcilla, etc. Con el espesor que deberá más o menos coincidir con la apertura de la junta; a excepción de que sólo tengamos parte de la junta rellena (algo no muy frecuente).

Tabla 7.

Muestra la puntuación del relleno según el tipo de relleno.

Grado	Descripción	Rango RMR
1	Relleno blando > 5 mm	0
2	Relleno blando < 5mm	1
3	Relleno duro > 5mm	2
4	Relleno duro < 5mm	4
5	ninguno	6

Fuente: Bieniawski, 1989.**Figura 10.** Relleno de discontinuidad

– Meteorización

La meteorización de las rocas se refiere a la modificación en la composición o estructura de una roca situada en la superficie terrestre o en sus proximidades, debido a la acción de los agentes atmosféricos.

La descripción del estado de meteorización del material rocoso es de particular importancia al considerar las rocas desde el punto de vista resistente, ya que la meteorización tiene efectos profundos en las propiedades físicas y mecánicas del material rocoso (Belandria & Bongiorno, 2012).

Tabla 8.Descripción de la meteorización de la masa rocosa (traducido de la *ISRM*, 1978).

Termino	Descripción	Grado
Fresco	No se aprecian signos visibles de alteración; como mucho ligeras decoloraciones en las discontinuidades más relevantes.	I
Ligeramente meteorizado	La decoloración indica meteorización material rocoso y de las superficies de las discontinuidades. Todo el material rocoso puede estar descolorido por efecto de la meteorización y puede haber ciertas zonas más débiles externamente que en condiciones frescas (sanas).	II
Moderadamente meteorizado	Menos de la mitad del material rocoso esta descompuesto o desintegrado en suelo. Hay presente zonas de roca sana o descolorida a modo de entramado discontinuo o como fragmentos aislados.	III
Muy meteorizado	Mas de la mitad del material rocoso esta descompuesto o desintegrado en suelo. Hay presente zonas de roca sana o descolorida a modo de entramado discontinuo o como fragmentos aislados.	IV
Completamente meteorizado	Todo el material rocoso esta descompuesto o desintegrado y ha dado paso a un suelo. La estructura original del macizo rocoso esta sensiblemente intacta.	V
Suelo residual	Toda la roca se ha convertido en suelo. La estructura del macizo rocoso y la fábrica han desaparecido. Hay un gran aumento de volumen, pero el suelo no ha sido transportado de forma significativa.	VI

Fuente: APS blastrocnics.

Tabla 9.

Muestra la puntuación de la meteorización según el nivel de meteorización.

Grado	Descripción	Grado
1	Descompuesta	0
2	Muy meteorizada	1
3	Moderadamente meteorizada	3
4	Ligeramente meteorizada	5
5	No meteorizada	6

*Fuente: Bieniawski, 1989.***2.3.2.5. Condiciones hidrogeológicas**

La circulación de agua en los macizos rocosos se realiza principalmente por las discontinuidades: fallas, diaclasas, juntas, en lo que se denomina permeabilidad secundaria.

No se tiene en cuenta en nuestro caso las rocas sedimentarias, donde la circulación de agua se produce por los poros de la roca (permeabilidad primaria). Sólo en zonas concretas de los yacimientos estudiados se produce circulación de agua primaria de relativa importancia en los jabres de descomposición granítica y gneises que descansan sobre macizos rocosos relativamente impermeables que hacen la función de sello inferior del acuífero.

El agua circula en esta interfase y pasa a filtrarse al subsuelo en zonas de fractura muy determinada. Es el caso de la circulación de agua a lo largo de zonas concretas del arroyo de la mina de Bustarviejo o el acuífero de la mina Fernandito de Garganta de los Montes.

Esta circulación de fluidos a mayor escala en grandes fracturas da lugar a la mayoría de los manantiales ferruginosos y arsenicales de la Sierra, tales como las fuentes de Oteruelo del Valle y Miraflores posiblemente ligadas a grandes fracturas.

Tabla 10.
Muestra la puntuación del agua.

Grado	Descripción	Rango RMR
1	Completamente seco	15
2	Semi húmedo	10
3	Húmedo	7
4	Mojado	4
5	Flujo de agua	0

Fuente: Bieniawski, 1989.

2.3.2.6. Orientación de las discontinuidades

La orientación de la discontinuidad se describe por el rumbo y el buzamiento de la misma. Por lo general los macizos rocosos presentan familias de discontinuidad o sistemas de discontinuidad.

El primer término se refiere a un conjunto de diaclasas paralelas, el segundo tiene que ver con agrupaciones típicas de diaclasas cada una de las cuales por lo general presenta la misma historia de esfuerzos.

Esta característica controla la posibilidad de que se presente condiciones favorables o desfavorables de estabilidad, según la manera como influya la redistribución de esfuerzos en los planos de discontinuidad.

Tabla 11.
Clasificación geomecánica de *Bieniawski* corrección por orientación de juntas.

Dirección y buzamiento	Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy favorable
Túneles	0	-2	-5	-10	-12
Valoración Cimentación	0	-2	-7	-15	-25
Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Fuente: Bieniawski, 1989.

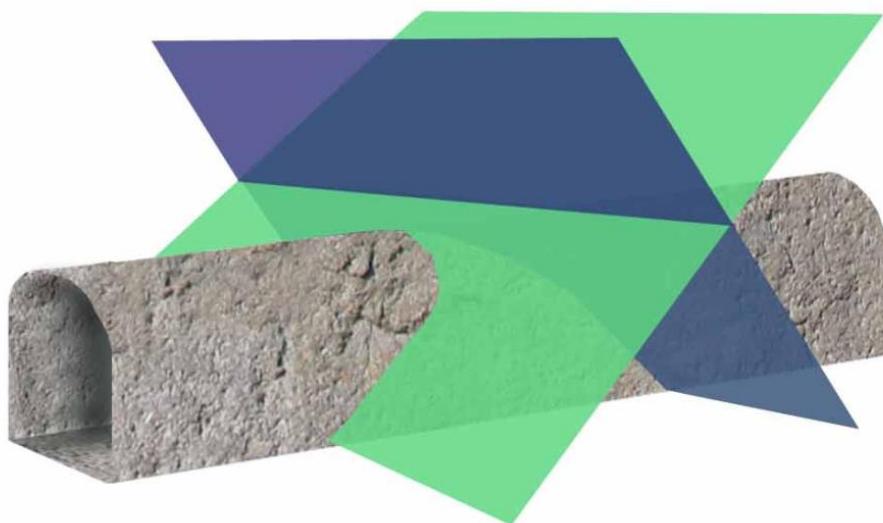


Figura 11. Orientación de las discontinuidades.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía.

2.4. Índice de la calidad de la roca Q

En la explicación del significado de los parámetros usados para determinar el valor de Q , *Barton* (1974) ofrecen los siguientes comentarios:

La clasificación Q fue desarrollada en 1974 por *Barton, Lunde y Lien* a partir de la información de numerosos túneles. Posteriormente ha sido revisada en varias ocasiones. La contenida en este post es la Clasificación Q *Barton*, 2000.

Tabla 12.

Índice de la calidad de la roca en función de RQD
Índice de calidad de la roca

Descripción	RQD %
Muy pobre	0 - 25
Pobre	25 - 50
Regular	50 - 75
Buena	75 - 90
Excelente	90 - 100

Fuente: *Barton*, 1974.

Nota:

- i) Estimar el RQD con 5% de aproximación
- ii) Cuando no se disponga de testigos

$$RQD = 115 - 3.3 J_v$$

Donde:

J_v : Número de Diaclasas por m³

- iii) Si el RQD es menor de 10, emplear un valor nominal 10

Esta clasificación geomecánica permite estimar parámetros geotécnicos del macizo rocoso y lo que es más importante diseñar sostenimientos para túneles y otras excavaciones subterráneas.

Sobre la base de una evaluación de un gran número de casos históricos de excavaciones subterráneas (1974), del Instituto Geotécnico de Noruega, propusieron un Índice de Calidad Tunelera (Q) para la determinación de las características de la masa rocosa y de los requerimientos de sostenimiento de los túneles. El valor numérico de este índice Q varía sobre una escala logarítmica desde 0.0001 hasta un máximo de 1,000, y está definido por:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Donde: Se calcula mediante 6 parámetros geotécnicos según la siguiente expresión:

- **RQD** : Índice de calidad de la roca es decir la relación en tanto por ciento entre la suma de longitudes de testigo de un sondeo mayores de 10cm y la longitud total. Barton indica que basta tomar el RQD en incremento de 5 en 5, y que como mínimo tomar $RQD = 10$
- **J_n** : varía entre 0,5 y 20, y depende del número de familias de juntas que hay en el macizo.
- **J_r** : varía entre 1 y 4, y depende de la rugosidad de las juntas.
- **J_a** : varía entre 0,75 y 20, y depende del grado de alteración de las paredes de las juntas de la roca.

- **Jw**: varía entre 0,05 y 1 Parámetro basado en la presencia de agua.
- **SRF**: Factor de reducción de esfuerzos y depende del estado tensional de la roca.

A partir de la puntuación obtenida en cada bloque podremos conocer que término tiene mayor o menor peso en la evaluación del índice Q y por tanto su influencia en la calidad del macizo rocoso.

2.4.1. Tabla de valores de los seis parámetros característicos del sistema Q Barton.

a) Índice de calidad de la roca (RQD)

Se trata de un índice para medir el grado de un macizo rocoso a partir de testigos de sondeo y puede determinarse de forma online según la fórmula RQD del enlace.

Se mide en porcentaje y los valores inferiores al 25% nos indican un macizo muy fracturado y de una calidad muy mala mientras que, en el otro extremo, los valores de RQD superiores al 90% nos indican un macizo rocoso nada o muy poco fracturado y por tanto de calidad excelente.

El índice Q varía entre 0,001 y 1000 clasificándose el macizo rocoso como:

Tabla 13.
Valoración de la calidad de la roca

Calidad	Valoración
Excepcionalmente buena	1 000 - 400
Extremadamente buena	400 - 100
Muy buena	100 - 40
Buena	40 - 10
Regular	10 - 4,0
Pobre	4 - 1,0
Muy pobre	1 - 0,1
Extremadamente pobre	0,1 - 0,01
Excepcionalmente pobre	0,01 - 0,001

Fuente: Barton, 1974.

b) Es el índice de diaclasado (J_n)

De forma similar el RQD , nos indica el grado de fracturación del macizo rocoso. Presenta unos valores comprendidos entre 0,5 para rocas masivas sin diaclasar y un valor de 20 para rocas trituradas pasando por una, dos, tres, cuatro o más familias de discontinuidades (*Bordegore, 2010*).

Tabla 14.
Número de discontinuidades

Descripción	J_n
Masiva o con muy poca discontinuidad	0,5 – 1,0
Un sistema de discontinuidad	2
Un sistema de principal y uno secundario	3
Dos sistemas de discontinuidad	4
Dos sistemas principales y uno secundario	6
Tres sistemas de discontinuidades	9
Tres sistemas principales y uno secundario	12
Cuatro sistemas de discontinuidades o mas (roca muy fracturada)	15
Roca triturada (Terrosa)	20

Fuente: Barton, 1974.

Nota:

i) Para intersecciones de túneles, usar $(3.0 * J_n)$

ii) Para portales usar $(2.0 * J_n)$

c) Es el índice de rugosidad de las discontinuidades o juntas (J_r)

Contiene 9 clasificaciones desde A hasta J diferenciándose dos grupos: por un lado, las diaclasas que están en contacto o cuyas caras están en contacto ante un desplazamiento inferior a 10 cm y aquellas juntas que no estarán en contacto ante desplazamientos cortantes (*Bordegore, 2010*).

Los valores de J_r están comprendidos entre 4 y 0,5 y pueden distinguirse: Diaclasas discontinuas – diaclasas onduladas, rugosas o irregulares – diaclasas onduladas, lisas – diaclasas onduladas, perfectamente lisas- diaclasas planas, rugosas o irregulares – diaclasas planas, lisas – diaclasas planas, perfectamente lisas – diaclasas con relleno de minerales arcillosos de espesor suficiente que no permiten el contacto de las caras de la discontinuidad – diaclasas con relleno arenoso, gravoso o roca triturada de espesor suficiente para no permitir en contacto entre las caras de la discontinuidad.

Tabla 15.
Factor de rugosidad de las discontinuidades.
Factor de rugosidad de las discontinuidades

Descripción	J_r
A Diaclasas discontinuas	4
B Rugosas e irregulares, onduladas	3
C Lisas, Onduladas	2
D Lustrosas Ondulantes	1,5
E Rugosas o irregulares, planares	1,5
F Lisas, Planares	1
G Lustrosas, Planares	0,5
H Zona conteniendo arcillas en cantidad suficiente como para impedir el contacto entre las superficies que limitan la fractura.	1
J Zona de material arenoso en cantidad suficiente como para impedir el contacto entre las superficies que limitan la fractura.	1

Fuente: Barton, 1974.

NOTAS.

En grupos A hasta la G, el contacto entre las superficies de la discontinuidad se logra con desplazamientos de cizalla inferiores a los 10 cm.

Las descripciones se refieren a las características de pequeña escala y características de escala intermedia, en ese orden.

En los grupos H y J no se produce contacto entre las superficial ocurrir desplazamientos de cizalla.

- * Agregar 1,0 cuando el espaciamiento medio de las diaclasas fuera superior a 3 cm.
- * $J_r = 0,5$ puede ser usado para juntas planares lustrosas que tienen alineaciones, siempre que las alineaciones están orientadas para la resistencia mínima.

d) Es el índice de alteración de las discontinuidades (Ja)

Como su nombre indica mide las alteraciones de las juntas. Se distinguen tres grupos dependiendo de si están o no en contacto los planos de discontinuidad:

- a) contacto entre los planos de discontinuidad.
- b) contacto entre los planos de discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10 cm.
- c) no existe contacto entre los planos de las juntas ante un desplazamiento.

Dentro de cada grupo hay varios campos en función del grado de alteración y presencia de minerales arcillosos cuyos valores extremos oscilan entre 0,75 para las discontinuidades cerradas, duras, sin reblandecimiento, impermeable, cuarzo y 20 para las discontinuidades abiertas con rellenos de arcilla gruesos.

Tabla 16.
Factor de alteración de las discontinuidades A.

	Descripción	Ja
a) Contacto entre superficies de la discontinuidad (sin relleno de mineral, solo recubrimientos)		
A	Ajustadas, rellenas con material compacto	0,75
B	Superficies inalteradas, ligeras manchas de oxidación	1
C	Superficies ligeramente alteradas, cubiertas con material granular no arcilloso, producto de la desintegración de la roca.	2
D	Capas superficiales de material limoso o	3

	arcilloso arenoso, con una pequeña fracción cohesiva.	
E	Capas superficiales de arcilla (caolinita, mica cloritas, etc.) cantidades pequeñas de arcilla expansiva en capas de 1- 2 mm de espesor	4

Fuente: Barton, 1974.

Tabla 17.

Factor de alteración de las discontinuidades B

b) Contacto entre superficies de la discontinuidad se produce después de 10cm de (relleno de mineral fino).

F	Relleno granular no cohesivo, roca desintegrada libre de partículas arcillosas.	4
G	Material con alto grado de consolidación, relleno continuo (hasta de 5mm. de espesor) de material arcilloso compacto.	6
H, I	Relleno continuo (hasta de 5mm. De espesor) de material arcillosos compacto con bajo grado de consolidación.	8
J	Relleno continuo de arcilla expansivas (Montmorillonita) el valor de Ja dependerá del % de expansión, el tamaño de las partículas arcillosas, la accesibilidad del agua, etc.	8 - 12

Fuente: Barton, 1974.

Tabla 18.

Factor de alteración de las discontinuidades C.

c) No contacto entre superficies de la discontinuidad después de cizalla

K, L.	Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcilla	6 - 8 ó
M	(ver G, H, J para la descripción de los tipos de arcilla)	8 - 12
N	Zona de arcilla limosa o arenosa	5
O, P,	Zonas potentes y continuas de arcilla (ver G, H, J para la descripción de los tipos de arcilla)	10 - 13 ó
Q		13 - 20.

Fuente: Barton, 1974.

e) Factor de reducción por la presencia de agua (Jw)

Se trata de un coeficiente que minora el índice Q en función de la entrada de agua a la excavación. Alcanza un valor máximo de 1,0 para excavaciones secas o pequeñas surgencias y un valor mínimo de 0,05 para fluencias excepcionalmente altas o de presión elevada de carácter persistente (>10 kg/cm²).

Tabla 19.
Factor de reducción por contenido de agua en fracturas.

	DESCRIPCION	Jw
A	Secas o flujos bajos (5 l/min)	1
B	Flujos a presiones medias que ocasionen erosión del material de relleno	0,66
C	Flujos o presiones altas en roca competente con diaclasas sin relleno	0,5
D	Flujos a presiones altas con erosión considerable del material de relleno	0,33
E	Flujos o presiones excepcionalmente altas luego de la voladura disminuyendo con el tiempo	0,2 – 0,1
F	Flujos o presiones excepcionalmente altas sin que ocurra una disminución en el tiempo	0,1 – 0,05

Fuente: Barton, 1974.

Notas

- i) Factores C a F son estimaciones básicas. Aumentar Jw si se han instalado medidas de drenaje.
- ii) Especiales problemas causados por la formación de hielo no son considerados.
- iii) Para la caracterización general de las masas de roca distantes de las influencias de excavación, el uso de Jw = 1,0, 0,66, 0,5, 0,33, etc., aumenta con la profundidad como por ejemplo 0 - 5m, 5 – 25 m, 25 – 250 m a > 250 m se recomienda, si se asume que RQD / Jn es lo suficientemente bajo (ejemplo 0,5 - 25) para una buena conectividad hidráulica. Esto le ayudará a ajustar Q para algunos de las tensiones efectivas y los efectos de ablandamiento de agua, en combinación con los valores apropiados de caracterización SRF. Correlaciones con módulo de deformación estática y la profundidad dependen de la velocidad sísmica. En la práctica usar estos valores cuando se desarrollan.

f) Factor de estado tensional (SRF)

Significa Stress Reducción Factor en inglés y es un factor que evalúa el estado tensional del macizo rocoso. El valor fluctúa entre 0,5 y 400.

Se distinguen 4 grupos para evaluar el coeficiente SRF:

- zonas débiles que interceptan a la excavación pudiendo producirse desprendimientos de roca a medida que la excavación del túnel va avanzando
- rocas competentes, problemas tensionales en las rocas
- rocas deformables: flujo plástico de roca incompetente sometida a altas presiones litostáticas.
- rocas expansivas: actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua.

Tabla 20.
Factor de reducción por tensiones A.

Descripción	SRF
A) Las zonas débiles interceptan a la excavación, pudiendo producirse desprendimientos de rocas a medida que la excavación del túnel va avanzando.	
A Muchas zonas débiles de arcilla con evidencias de desintegración química roca circundante muy suelta cualquier profundidad	10
B Zona débil aislada con arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad menor 50m).	5
C Zona débil aislada con arcilla o roca desintegrada, profundidad mayor 50m.	2,5
D Muchas zonas de falla en roca competente, roca circundante suelta. (cualquier profundidad).	7,5
E Zona de falla aislada en roca competente profundidad menor a 50 m.	5
F Zona de falla aislada en roca competente profundidad mayor a 50 m.	2,5
G Diaclasas abiertas y sueltas roca intensamente fracturada, en terrones, cualquier profundidad.	5

Fuente: Barton, 1974.

Nota:

- i) Reducir estos valores de *SRF* por 25 - 50% si las zonas de fallas influyen, pero no interceptan la excavación.

Tabla 21.

Factor de reducción por tensiones B.

B) Rocas competentes, problemas tensionales en las rocas		sc/s1	sq/sc	SRF
H	Tensiones bajas, poca profundidad, diaclasas abiertas.	> 200	< 0,01	2,5
J	Tensiones moderadas, condiciones tensionales favorables.	200 - 10	0,01 - 0,3	1
K	Tensiones elevadas, estructura muy compacta. Normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales.	10 - 5	0,3 - 0,4	0,5 - 2
L	Lajamiento moderado de la roca después de 1 hora en rocas masivas.	5 - 3	0,5 - 0,65	5 - 50
M	Lajamiento y estallido de la roca después de pocos minutos en rocas masivas.	3 - 2	0,65 - 1	50 - 200
N	Estallidos violentos de roca (deformación explosiva) y deformaciones dinámicas inmediatas en rocas masivas.	< 2	> 1	200 - 400

Fuente: Barton, 1974.

Nota:

- ii) Para campos in - situ fuertemente anisotrópico (si se ha medido): cuando $5 \leq s1/s3 \leq 10$, reducir *sc* en $0,75sc$, cuando $s1/s3 > 10$, reducir *sc* a $0,5sc$.

Donde:

sc=esfuerzo compresivo sin confirmar, *s1* y *s3* son los esfuerzos principales mayores y menores y *sq*=esfuerzo tangencial máximo (estimado de la teoría de la elasticidad).

- iii) Existen algunos registros disponibles que señalan que la altura del techo de la excavación a superficie es mejor que el ancho de la labor.

Para este caso se sugiere incrementar de 2,5 a 5 para estos casos (ver H)."

Tabla 22.
Factor de reducción por tensiones C.

C) Rocas deformables: flujo plástico de roca incompetente a altas presiones litostáticas	sq/sc	SRF
O Presión de deformación suave	1 - 5	5 a 10
P Presión de deformación intensa	> 5	10 a 20

D) Rocas expansivas: Actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua		
R Presión de expansión suave		5 - 10
S presión de expansión intensa		10 - 15

Nota:

iv) Casos de deformaciones de roca pueden ocurrir para profundidades $H > 350 \cdot Q^{1/3}$. La resistencia a la compresión de la masa rocosa puede ser estimada como $q = 7 \cdot g \cdot Q^{1/3}$, donde $g =$ densidad de la roca (gm/cc).

D) Rocas expansivas: Actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua

R Presión de expansión suave	5 - 10
S presión de expansión intensa	10 - 15

Fuente: Barton, 1974.

2.5. Índice de resistencia geológico (GSI)

El parámetro *GSI* (*Geological Strength Index*) nació para caracterizar tenso-deformacionalmente el macizo rocoso, según el criterio de rotura de *Hoek y Brown*, no para clasificar un terreno de cara al sostenimiento.

El *GSI* no tiene en cuenta la corrección por orientación de la excavación, que si tiene en consideración el *RMR* sobre el *RMR*

Determinado terreno rocoso fracturado, con un *GSI* concreto, en función de la dirección en la que se excave, tendrá una estabilidad diferente (y un sostenimiento) en función de la dirección de sus fracturas. Esta consideración si la tiene en cuenta el *RMR*, pues el *RMR* básico se corrige en función de la orientación de las facturas y avance del túnel. Estas consideraciones no aparecen en el *GSI*.

Por ejemplo, si las fracturas son paralelas, el techo requerirá más sostenimiento que si vienen oblicuas a 75° , pero ambos terrenos tienen el mismo *GSI*. En el *GSI* no hay ninguna recomendación en función del tipo de excavación, que sí figura en el *RMR* y en el *Q* (con *De*). Asimismo, a igual *GSI*, si la roca tiene mayor coherencia, esta requerirá mayor sostenimiento, hecho que se tiene en cuenta el índice *Q* a través del *SRF*.

Si aparece agua, y de nuevo el *GSI* es el mismo, las necesidades de sostenimiento aumentan y ambos *RMR* y *Q* prestan un especial hincapié con parámetros exclusivos para el agua (*RMR5* y *Jw* respectivamente).

Si las condiciones cambian además de un nuevo *RMR* y *Q* es preciso volver a verificar estos sostenimientos recomendados mediante cálculos de tensión – deformaciones (elementos o diferencias finitas en 2D o 3D según el caso).

Con el fin de ampliar el rango de aplicación del criterio generalizado, sobre todo a macizos rocosos de mala calidad, y emplear parámetros más geológicos para la evaluación de su resistencia, *Hoek* (1994) y *Hoek et al*, (1995) han propuesto un índice geológico de resistencia, *GSI* (*geological strength index*), que evalúa la calidad del macizo en función del grado y las características de la fracturación, estructura geológica, tamaño de los bloques y alteración de las discontinuidades.

$$GSI = RMR - 5$$

2.5.1. Criterio de rotura de *Hoek y Brown*

Es un criterio de rotura válido para macizos rocosos isótropos, y tienen en cuenta los factores que determinan la rotura de un medio rocoso a gran escala, como son la no linealidad con el nivel de tensiones, la influencia del tipo de roca y del estado del macizo, la relación entre la resistencia a la compresión y a la tracción, la disminución del ángulo de rozamiento con el aumento de la tensión de confinamiento, etc.

El criterio fue desarrollado inicialmente para aplicación a macizos rocosos fracturados sin alteración matriz rocosa resistente, asumiendo que los bloques de roca están en contacto unos con otros y que la resistencia del macizo está controlada por la resistencia de las continuidades. La resistencia del macizo queda definida por la expresión (*Hoek y Brown*, 1980), (Tapahuasco, 2015).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ei} \sqrt{m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ei}} + s}$$

Donde:

σ_1 y σ_3 son los esfuerzos principales mayor y menor en rotura.

σ_{ei} es la resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa.

M y s son constantes adimensionales que dependen de las propiedades del macizo rocoso, del tipo de roca y de la frecuencia y características de las discontinuidades.

El valor de σ_{ei} debe de obtenerse en ensayos de compresión simple de laboratorio o, en su defecto, puede estimarse a partir del ensayo PLT.

2.5.2. Resistencia a la compresión simple o uniaxial

La resistencia uniaxial es el máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión uniaxial, determinada sobre una probeta cilíndrica sin confinar en el laboratorio, y viene dada por:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} = \frac{\text{Fuerza compresiva aplicada}}{\text{Área de aplicación}}$$

También se puede estimar de forma apropiada a partir de índices obtenidos en sencillos ensayos de campo, como el ensayo de carga puntual, PLT, o el martillo. Con los valores obtenidos por cualquiera de estos dos métodos se puede clasificar la roca por su resistencia (L. C. de Vallejo et al., 2014).

Los índices de campo permiten una aproximación inicial al valor de la resistencia de la roca. Los criterios para su identificación, así como el valor de resistencia que se corresponde con cada uno de ellos.

La resistencia a tracción es el máximo esfuerzo que soporta el material ante la rotura por tracción. Se obtiene aplicando fuerzas traccionales o distensivas a una probeta cilíndrica de roca en laboratorio.

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{A} = \frac{\text{Fuerza de traccion aplicada}}{\text{Área - seccion de probeta}}$$

El valor de σ_1 de la matriz rocosa suele variar entre 5 y 10 % del valor de su resistencia a compresión simple, aunque para algunas rocas sedimentarias es del 14 al 16% (Duncan, 1999).

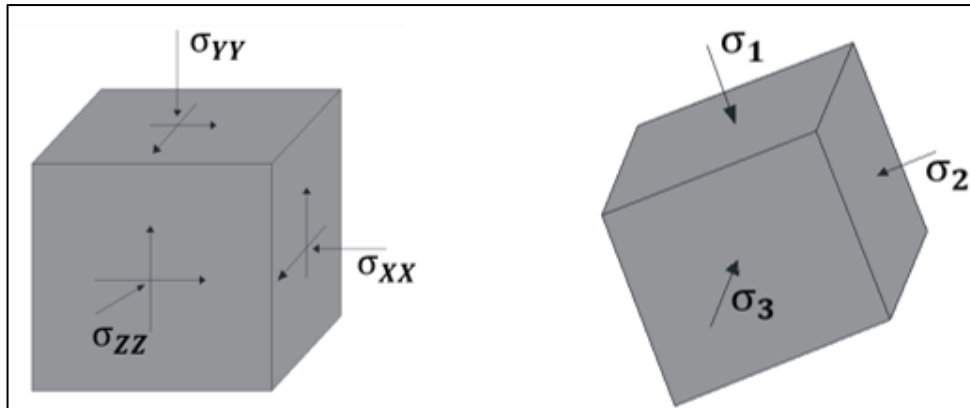


Figura 12. Tensiones principales.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía.

2.6. Método de elementos finitos usando software phase2

Este método constituye un método numérico destinado a resolver mediante ecuaciones matriciales las ecuaciones diferenciales que se plantean en sistemas discretos (estructuras) o continuos (campos) (Rodriguez, 2018).

Actualmente, se considera al método de las diferencias finitas como una subclase del método de los elementos finitos y de hecho se puede demostrar que el método de elementos finitos se reduce al método diferencias finitas cuando las mallas son regulares.

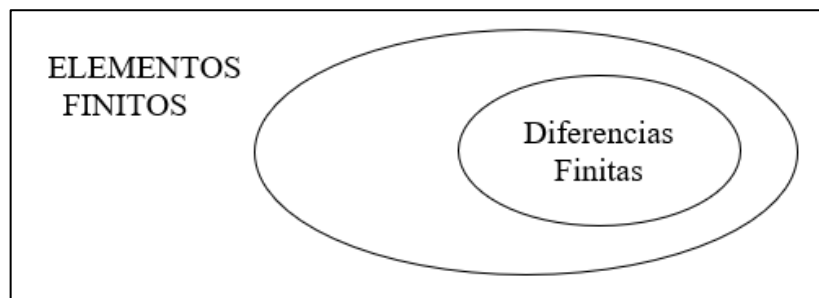


Figura 13. Método de elementos finitos.

Fuente: Rocscience phase2

Las aplicaciones actuales del método son muy extensas e incluyen sistemas lineales y no lineales, estáticos, dinámicos tales como mecánica de sólidos, teoría de la elasticidad, mecánica de fluidos, transmisión de calor y electromagnetismo.

En el caso de sistemas continuos, el método consiste en discretizar el dominio de interés en elementos finitos y resolver, mediante una función de prueba o de aproximación, la ecuación que rige el sistema en cada elemento finito para luego sumar todas las soluciones.

Dado un recinto cerrado los pasos para la resolución son:

- Dividir el recinto en elementos finitos: triángulos (3 nodos), tetraedros (4 nodos), etc.
- Deducir la ecuación que describe el potencial f dentro de un elemento finito.
- Plantear las ecuaciones que dan las condiciones de ajuste de las soluciones en las fronteras de los elementos finitos.
- Calcular los potenciales en los nodos de cada elemento finito mediante algunos de los métodos que luego de mencionarán.
- Resolver las ecuaciones algebraicas planteadas.

2.6.1. Generación de los Elementos Finitos

- Los contornos pueden ser irregulares
- Los elementos finitos serán tan chicos como lo considere el programador. Cuanto más varía el potencial, los elementos finitos deberán ser más chicos (Rodríguez, 2018).

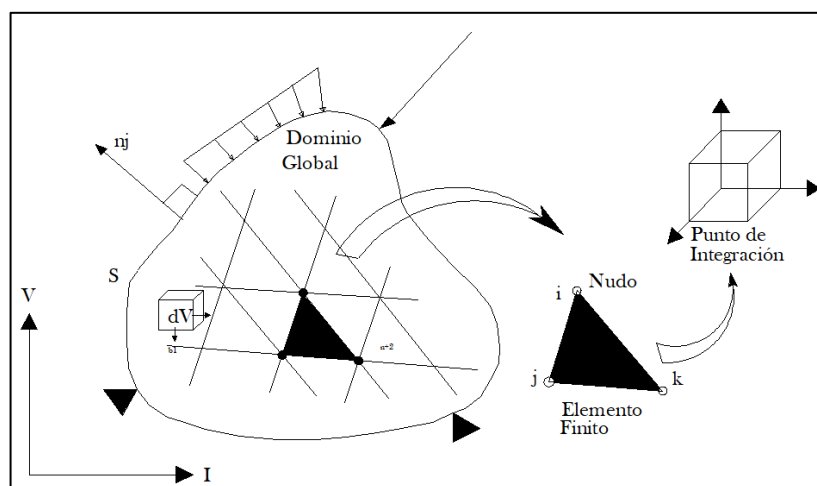


Figura 14. Generación de elementos finitos.

Fuente: Rocscience phase2

El método de elementos finitos trata de un método general para la solución de problemas de contorno gobernados por ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales. En esencia se trata de una técnica que sustituye el problema diferencial por otro algebraico, aproximadamente equivalente, para el cual se conocen técnicas generales de resolución. Para ello hace uso de la "discretización" o subdivisión de una región sobre la cual están definidas las ecuaciones en formas geométricas simples denominadas elementos finitos. Las propiedades materiales y relaciones gobernantes en estos elementos se expresan en función de los valores desconocidos en las "esquinas" de los elementos o nodos (Ver Figura 19).

El proceso de análisis de un problema físico mediante elementos finitos se muestra (Ver Figura 15). La geometría puede ser definida por el analista o creada a partir de algún programa CAD. El segundo paso consiste en definir el modelo matemático a resolver.

Este es el paso fundamental donde se especifica el tipo de ecuaciones a determinar, las condiciones de borde, propiedades materiales, y otros detalles acerca del método en sí mismo. Una vez efectuada dicha definición el programa resuelve automáticamente las ecuaciones pertinentes y provee los resultados en una forma apropiada para el analista (Rodriguez, 2018).

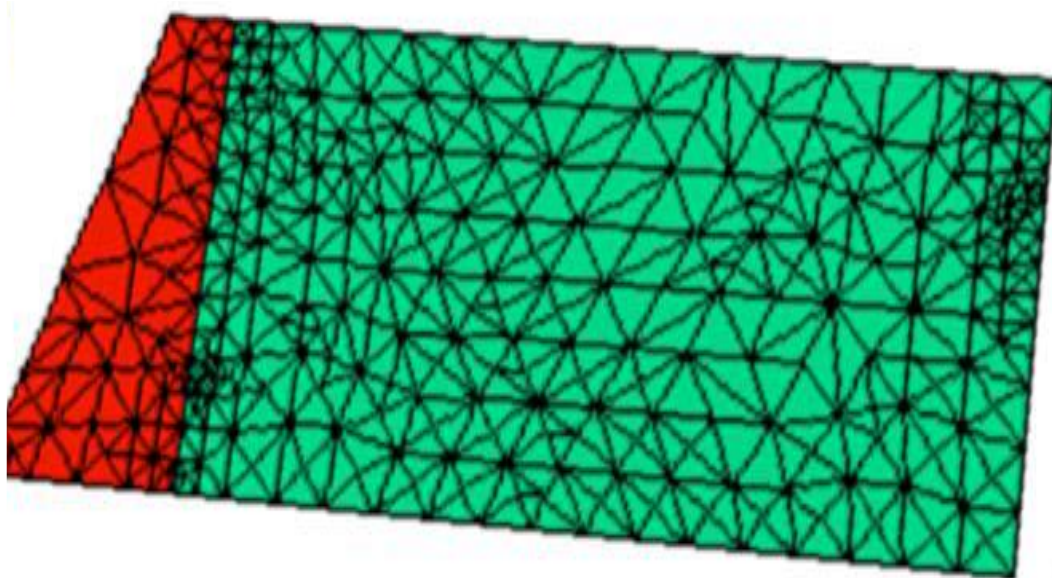
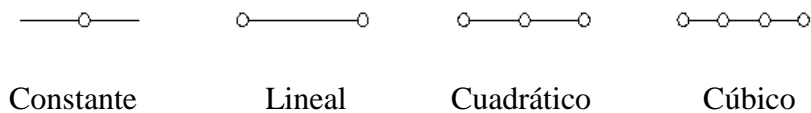


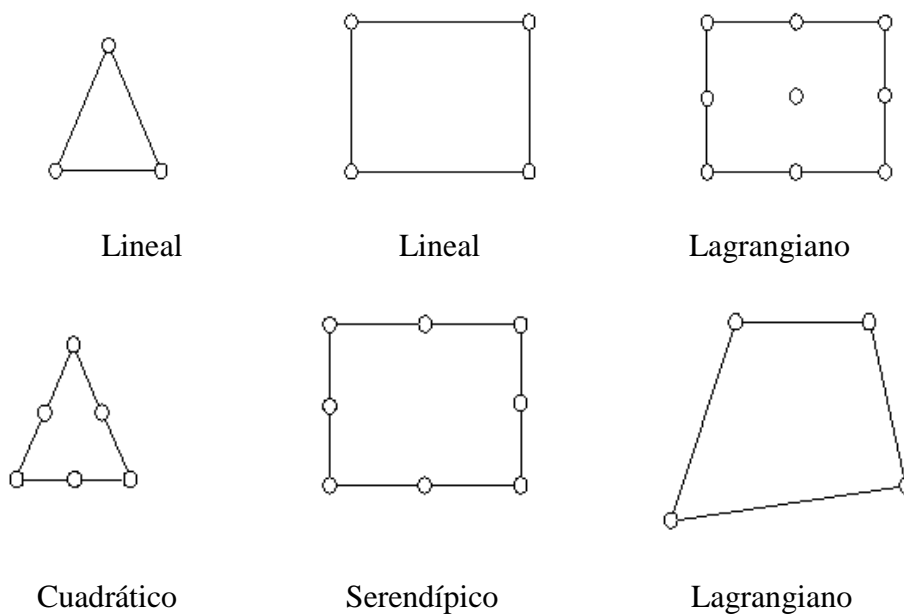
Figura 15. Proceso de análisis físico mediante elementos finitos.
Fuente: Rocscience phase2

2.6.2. Tipos de elementos

UNIDIMENSIONAL



BIDIMENSIONALES



TRIDIMENSIONAL

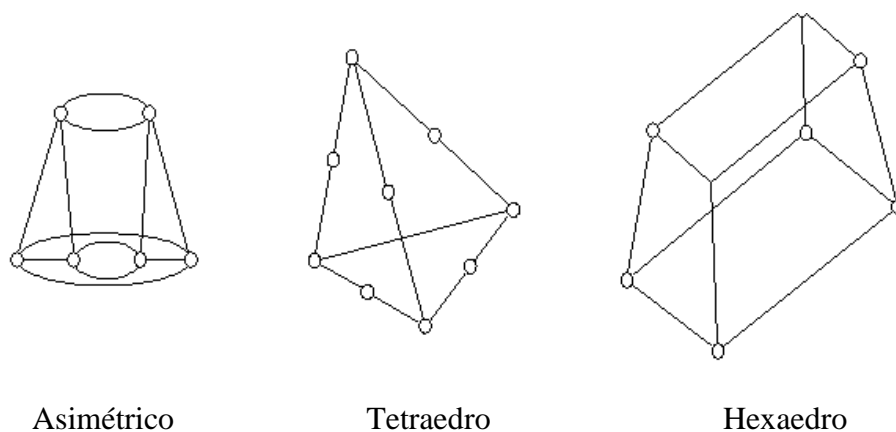


Figura 16. Tipos de elementos finitos.
Fuente: Rocscience phase2

2.6.3. Tipos de elementos usados por el Phase2

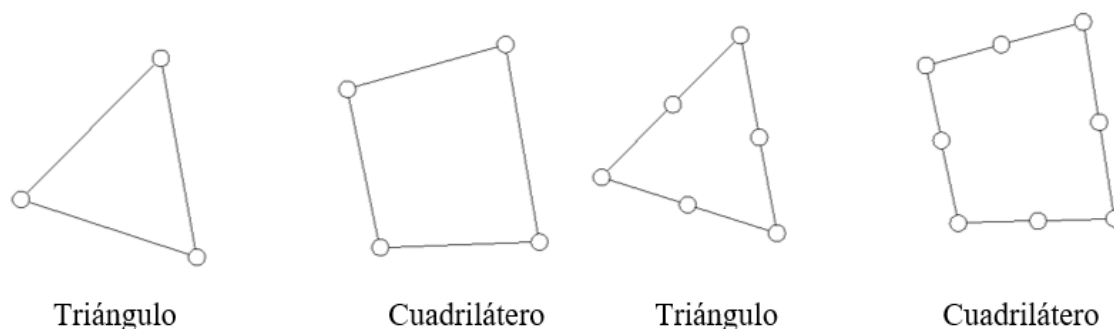


Figura 17. Tipos de elementos usados por phase2.
Fuente: Rocscience phase2

2.6.4. Tipos de Restricciones en método de elementos finitos

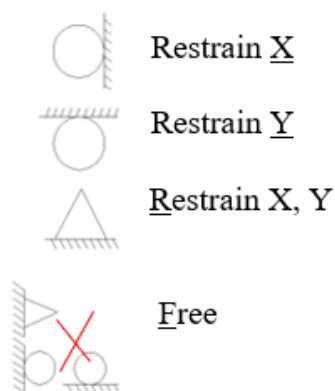


Figura 18. Tipos de restricciones phase2.
Fuente: Rocscience phase2.

2.6.5. Metodología para la resolución de problemas en Ingeniería

Discretización, es el proceso de modelación de un cuerpo que consiste en la división equivalente del mismo, es un sistema conformado por cuerpos más pequeños (elementos finitos) interconectados por medio de puntos comunes o nodos, los cuales forman superficies y se comportan como volúmenes de control independiente, los que a su vez son afectados por condiciones de frontera que afectan al cuerpo estudiado como un todo. Durante la aplicación del método de elementos finitos, en lugar de intentar resolver el problema como un todo en una sola operación se divide el cuerpo del problema en un número finito de elementos los

cuales a su vez se resuelven simultáneamente y se obtienen los resultados de un todo conformado por cada resultado arrojado por los elementos finitos (Rodriguez, 2018).

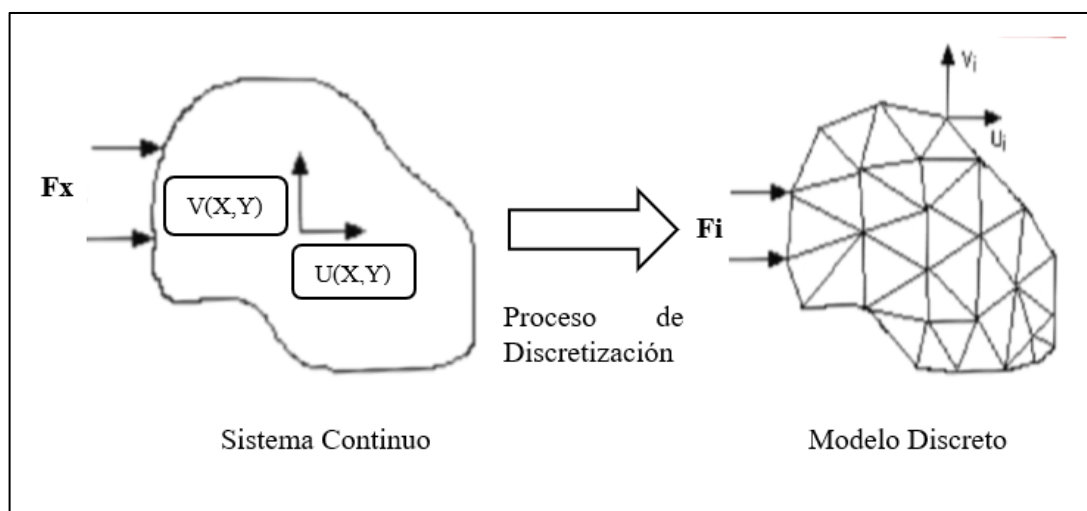


Figura 19. Proceso de discretización.

Fuente: Rocscience phase2.

2.6.6. Generalidades del método de los elementos finitos

- Implementación del método de elementos finitos: la puesta en marcha de un programa debe comenzar con un análisis de los objetivos.
- Visión general del método de elementos finitos: la estructura analizada es dividida en pequeños elementos los cuales están conectados en sus nodos.

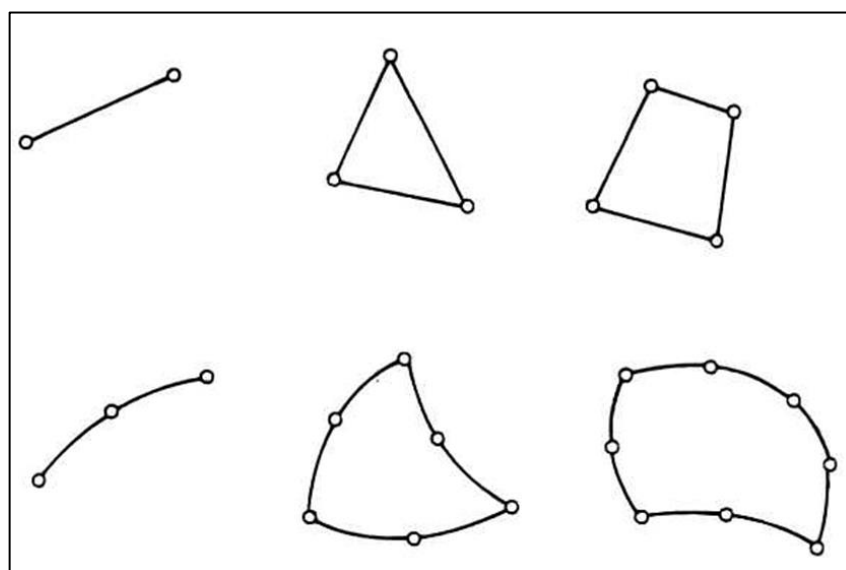


Figura 20. Generalidades del método de elementos finitos.

Fuente: Rocscience phase2

2.6.7. Excavación en malla triangular

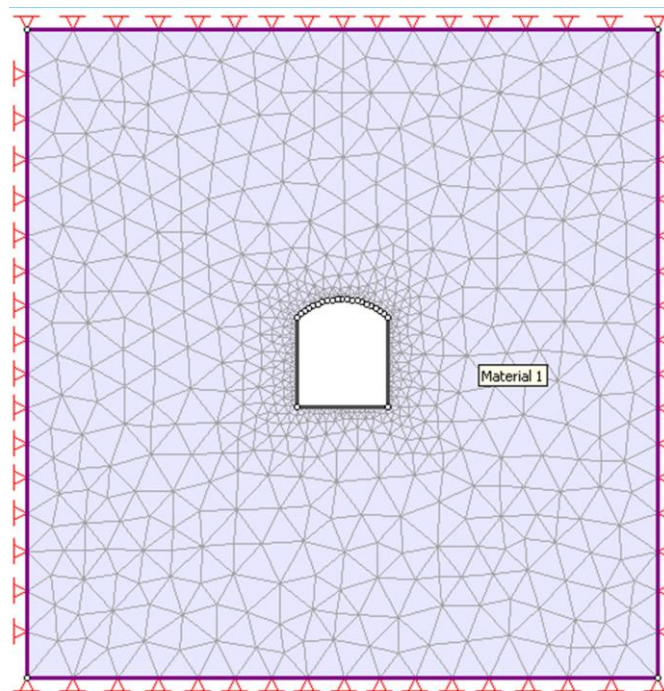


Figura 21. Tipo de excavación en malla triangular.
Fuente: Rocscience phase2

2.6.8. Excavación en malla cuadrada

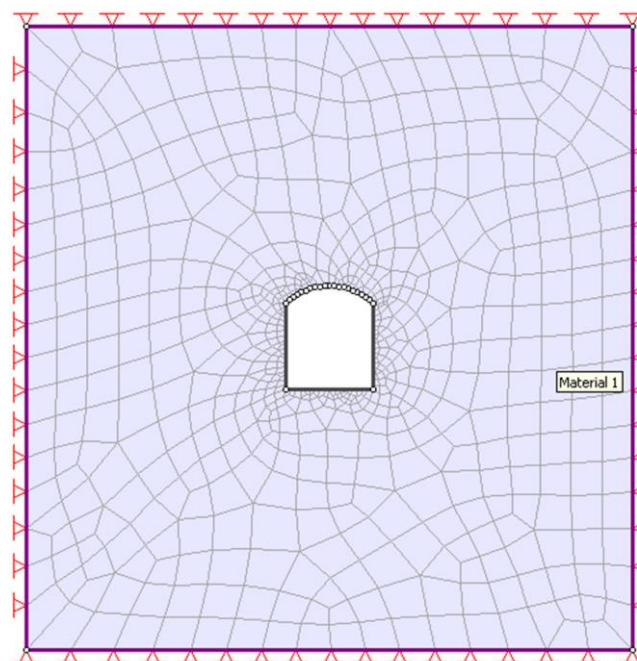


Figura 22. Tipo de excavación en malla cuadrada.
Fuente: Rocscience phase2

A continuación, se presentan de manera resumida las ecuaciones en las que se fundamenta el método de elementos finitos (Rodríguez, 2018).

- Las deformaciones (ϵ) están relacionadas con los desplazamientos (δ):

$$\{\epsilon\} = [B]\{\delta\}$$

- Asumiendo una respuesta linealmente elástica durante un proceso de carga o descarga, las tensiones (σ) están relacionadas con las deformaciones (ϵ):

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\}$$

- Las fuerzas (F) están relacionadas con los desplazamientos (δ) por:

$$\{f\} = [K]\{\delta\}$$

- Donde la matriz de rigidez k de un elemento puede ser obtenido con base a consideraciones energéticas:

$$[K] = \iiint_v [B]^T [D] [B] dx dy dz$$

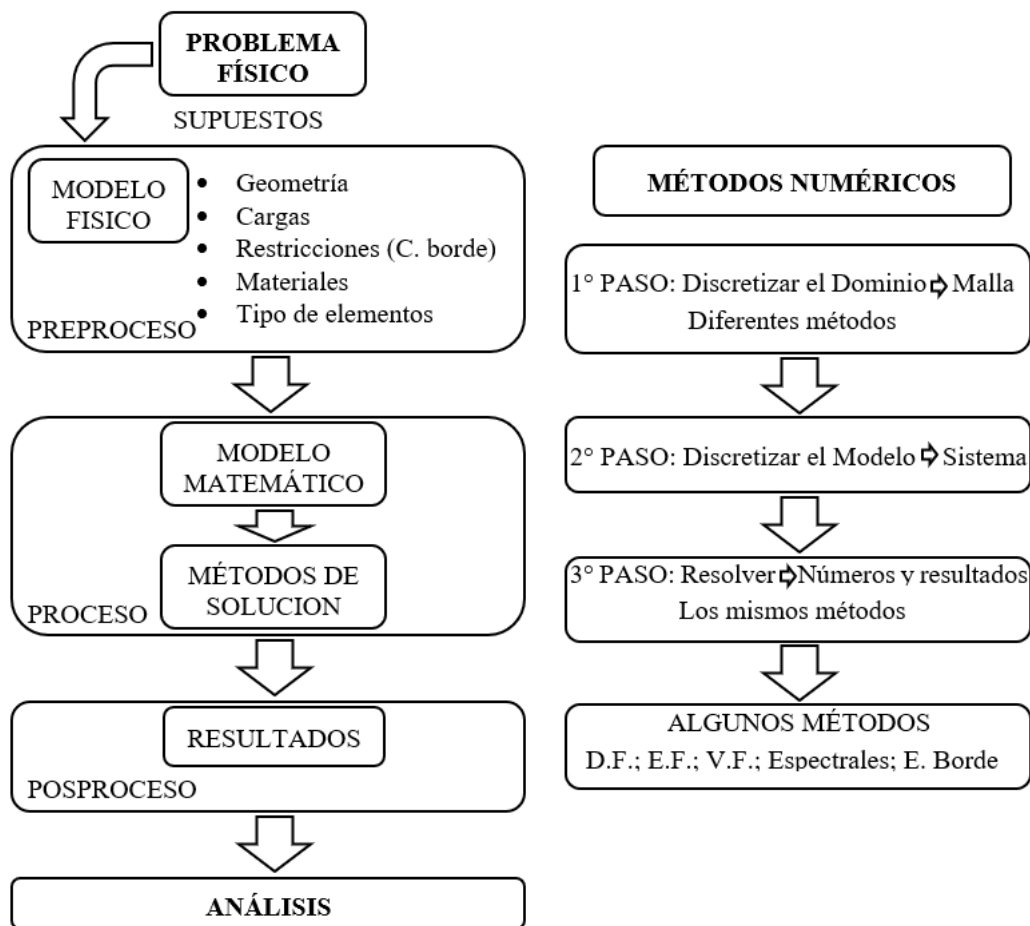
- Los elementos individuales son ensamblados con la ayuda de la computadora, para formar una representación numérica de toda la región considerada.

Esta colección ensamblada de elementos y nodos es la malla. El proceso de ensamble genera un gran sistema algebraico de ecuaciones que relaciona la fuerza total a cada elemento en la malla:

$$\{F\} = [K]\{\Delta\}$$

- El método de elemento finito permite el cálculo de las tensiones y deformaciones principales en cada elemento.

2.6.9. Metodología para la resolución de problemas en Ingeniería



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Diseño metodológico

3.1.1. Tipo de investigación

Se aplicará un método descriptivo, porque se describe las características del macizo rocoso con la finalidad de determinar las condiciones de estabilidad del macizo rocoso causado por factores influyentes que causan desprendimiento de rocas, en base a las descripciones realizadas se plantea realizar un análisis geomecánico usando las clasificaciones geomecánicas del *RMR*, *Q* y *GSI* así mismo el uso del software *Phase2.0 v.8.00*, donde se determinará el factor de seguridad y el soporte que se va a requerir.

3.1.2. Diseño de la investigación

Es un tipo de diseño descriptivo-correlacional porque primero se describe todas las características del macizo rocoso y luego en base a los resultados se usa la correlación para analizar los resultados obtenidos usando ábacos y tablas que ayudaran en el análisis geomecánico y ver en qué condiciones se encuentra el crucero 212.

3.1.3. Procedimientos de contractación de hipótesis

Para poder determinar las condiciones del macizo rocoso en el crucero 212 se realizó la caracterización geomecánica del lugar de estudio, donde a través de las clasificaciones geomecánicas como el *RMR* del año 1976 y 1989, el índice *Q* y el índice *GSI*. Para luego

realizar comparaciones a fin que por cada tipo de clasificaciones geomecánica se analice el tipo de roca obtenido y a la vez a través de los ábacos y tablas se determine el tipo de soporte requerido por cada progresiva.

También se aplicará elementos finitos para tener una simulación más realista y ver las condiciones del crucero, donde se usará los programas como *dips v.6.008* que básicamente harán ver cuántos sistemas de discontinuidades existe en el crucero 212 y ver cómo están orientados respecto a la orientación del crucero y el *phase2 v.8.005* se obtendrá el factor de seguridad que se encuentra el crucero y ver cómo actúan los esfuerzos alrededor de la excavación. Ambos programas son de la firma de *Rocscience*.

En base a los dos análisis se compararán y se evaluarán que los factores influyentes como la presencia de aguas termales con caudales fuertes y las fallas que intersecan el crucero (ver figura 28, del *dips* rosetas), no hacen que la roca del crucero 212 sea de mala calidad solo hacen que disminuyan en pequeños puntos el *RMR* y índice *Q*, por lo tanto, usando las clasificaciones geomecánicas y los elementos finitos se tendrá un adecuado soporte en el crucero.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

Para el siguiente trabajo de investigación la población está constituida por crucero 212 en donde se toma la muestra de 30 metros de la Unidad Americana de Cía. Minera Casapalca.

3.2.2. Muestra

La muestra es la parte de la población, para nuestro caso se tomará en el crucero 212 del nivel 23 con una longitud de 30 metros y una sección de 3.5 x 3.5 metros, de la Unidad Minera Americana de Cía. Minera Casapalca.

3.3. Operacionalización de variables

3.3.1. Variable independiente

Condiciones del macizo rocoso en la unidad minera Americana, Cía. Minera Casapalca – Lima.

3.3.2. Variable dependiente

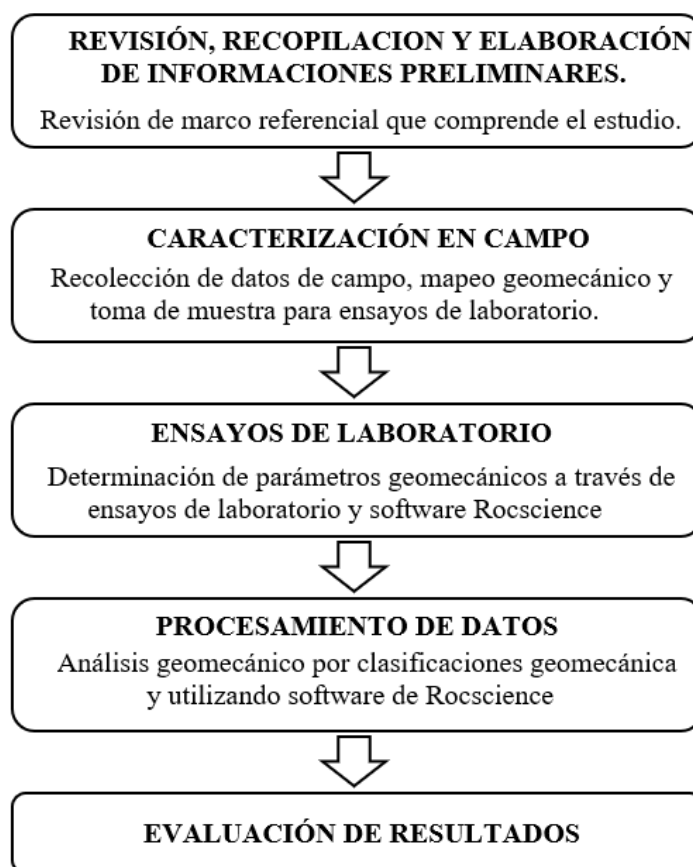
Análisis geomecánico en la unidad minera Americana, Cía. Minera Casapalca - Lima

Tabla 23.
Cuadro de operacionalización variables.

VARIABLES	DIMENSIÓN	INDICADORES	ÍNDICE	herramientas
Variable Independiente	Características del macizo rocoso	RMR	Roca Muy buena	Esclerómetro
		Índice Q	Roca buena	Brújula
Variable dependiente	Condiciones de inestabilidad	Índice GSI	Roca regular	Flexómetro
		Desprendimiento de rocas	Roca mala	Picsa
Variable dependiente	Soporte requerido	Soporte activo	Flujo de agua termal	Ábacos
		Soporte requerido	Sistemático	Ensayo de carga puntual
			Esporádico	<i>Software Rocsciencie</i>
			Bloques de rocas	Estadísticas
			Flujo de agua termal	Caudal

3.4. Técnicas de recolección de datos

El trabajo realizado comprende el estudio geomecánico del macizo rocoso para ver las condiciones a presentarse en el avance del Nv 23, se tiene que determinar el factor de seguridad de la excavación considerando la profundidad a 1 380 metros a la que se viene trabajando en el cual se realiza la toma de muestra de los 30 metros.



3.4.1. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

Objetivo específico 01.- Realizar el análisis geomecánico mediante el método empírico de clasificaciones geomecánicas y uso de software de elementos finitos en la Unidad Minera Americana de Cía. Minera Casapalca.

Para cumplir con este objetivo se realizó la recolección de datos relacionados con las características geomecánicas del macizo rocoso y se usará instrumentos de medición.

- **01 brújula marca Brunton:** Es un equipo diseñado para obtener orientaciones gracias al campo magnético terrestre, posee una aguja imantada que se dispone en la misma dirección que las líneas de magnetismo natural del planeta.
- **01 distanciómetro marca Leika:** es un instrumento electrónico de medición que calcula la distancia desde el dispositivo hasta el siguiente punto al que se apunte con el mismo.

- **01 esclerómetro marca Proeti:** es un instrumento de medición empleado, generalmente, para la determinación de la resistencia a compresión en hormigones ya sea en pilares, muros, pavimentos y rocas, para nuestro caso se usó un esclerómetro para rocas.
- **01 flexómetro marca Tools:** es un instrumento de medición, estos hechos de acero, son centimétricas e incluso algunas milimetradas, con las marcas y los números pintados o grabados sobre la superficie de la cinta
- **01 Pica:** Acero sólido forjado, de una sola pieza que tiene la función de partir rocas y de acuerdo a una tabla poder estimar su resistencia de la roca golpeada.
- **Tableros acrílicos A4:** Son tableros de madera de tamaño A-4 y servirá como apoyo para los formatos de registro.
- **Fichas geomecánicas:** Son hojas en A-4 diseñados en función a los datos que requerimos recolectar a fin poder caracterizar el macizo rocoso y su diseño se basa en el sistema de clasificación *RMR*, índice *Q* y *GSI*.
- **Planos topográficos:** Están diseñados en programas como *AutoCAD* o *MineSight* o *ArcGIS* donde se puede ver las labores que existen en la mina y servirán para zonificar las zonas de recolección de datos.
- **Equipo de martillo Schmidt:** Ideado en un principio para medir la resistencia a compresión simple del concreto, el martillo Schmidt se ha modificado convenientemente dando lugar a varios modelos, alguno de los cuales resulta apropiado para estimar la resistencia a compresión simple de la roca (*RCS*). El ensayo consiste en medir la resistencia al rebote de la superficie de la roca ensayada. La medida de rebote se correlaciona con la resistencia a compresión simple mediante un gráfico debido a *Miller* (1965) que contempla la densidad de la roca y la orientación del martillo respecto al plano ensayado.

- **Ábacos y tablas:** Se obtendrán de artículos científicos o libros de autores reconocidos en áreas como geomecánica o mecánica de rocas. Su uso se realizará para la obtención del tipo de roca otros datos más.

Objetivo específico 02.- Determinar las condiciones macizo rocoso en la zona esperanza del nivel 23 mediante un análisis geomecánico en la Unidad Minera Americana de Cía. Minera Casapalca.

Para cumplir con este segundo objetivo se usará el *software rocscience* como es el y *phase2* a fin de realizar simulaciones de la excavación y poder determinas las condiciones del macizo rocoso en la profundización de labores de preparación.

- **Laptop marca Acer:** Una laptop es una computadora portátil de peso y tamaño ligero, su tamaño es aproximado al de un portafolio donde se almacena programas.
- **Software Rocscience Dips v6.008:** *Dips* está diseñado para el análisis interactivo de datos geológicos basados en la orientación. permite al usuario analizar y visualizar datos estructurales siguiendo las mismas técnicas que se utilizan en estereotipos manuales. Además, tiene muchas características computacionales, como el contorno estadístico de la agrupación de orientación, la orientación de la media y el cálculo de confianza, la variabilidad de la agrupación y el análisis cualitativo y cuantitativo de los atributos de la característica.

Dips está diseñado para el análisis de características relacionadas con el análisis de ingeniería de estructuras de roca, sin embargo, el formato libre del archivo de datos *Dips* permite el análisis de cualquier información basada en la orientación (LAVteam, 2014).

- **Rocscience Phase2 v8.005:** Los modelos complejos, de múltiples etapas se pueden crear y analizar rápidamente, por ejemplo: túneles en roca débil o articulada, cavernas subterráneas, minas a cielo abierto y pendientes, terraplenes, estructuras de tierra estabilizadas por *MSE* y mucho más. Se puede abordar el fracaso progresivo, la interacción de apoyo y una variedad de otros problemas.

Phase2 ofrece una amplia gama de opciones de modelado de soporte. Los elementos de revestimiento se pueden aplicar en el modelado de hormigón proyectado, concreto, sistemas de conjuntos de acero, muros de contención, pilotes, revestimientos compuestos de múltiples capas, geotextiles y más. Las nuevas herramientas de diseño de revestimientos incluyen gráficos de capacidad de soporte que le permiten determinar el factor de seguridad de los revestimientos reforzados. Los tipos de pernos incluyen anclajes de extremo, totalmente unidos, pernos de cable, conjuntos partidos y amarres enlechados.

Una de las características principales de *Phase2* es el análisis de estabilidad de pendiente de elementos finitos que utiliza el método de reducción de la resistencia al corte. Esta opción está totalmente automatizada y se puede usar con los parámetros de resistencia *Mohr-Coulomb* o *Hoek-Brown*. Los modelos de pendiente se pueden importar / exportar entre Diapositiva y *Fase2*, lo que permite una comparación fácil del equilibrio límite y los resultados de elementos finitos.

Phase2 incluye análisis de infiltración de agua subterránea de elementos finitos y de estado estable integrado en el programa. No es necesario utilizar un programa de agua subterránea separado. La presión del poro se determina, así como el flujo y el gradiente, en función de las condiciones de los límites hidráulicos definidos por el usuario y la conductividad del material. Los resultados de la presión del poro se incorporan automáticamente en el análisis de estrés.

Los modelos de materiales para roca y suelo incluyen *Mohr-Coulomb*, *Generalized Hoek-Brown* y *Cam-Clay*. Las nuevas y potentes funciones de análisis para modelar la roca unida le permiten generar automáticamente redes de fracturas o uniones discretas de acuerdo con una variedad de modelos estadísticos (LAVteam, 2014).

- **Microsoft Excel:** Es una aplicación de hojas de cálculo que forma parte de la suite de oficina *Microsoft Office*. Es una aplicación utilizada en tareas financieras y contables, y análisis de una base datos con fórmulas, gráficos y un lenguaje de programación.

Objetivo específico 03. Determinar el soporte requerido mediante un análisis geomecánico por método empírico y uso de software de elementos finitos en la Unidad Minera Americana de Cía. Minera Casapalca.

Para cumplir con este objetivo termino de valorizar clasificaciones geomecánicas como el RMR y el índice Q. Y mediante las tablas y ábacos se recomienda un tipo de sostenimiento que está en función al tipo de roca. Entonces para su cumplimiento se usó los siguientes materiales:

- **Laptop marca Acer:** Es un equipo muy importante que almacena programas como el Excel, Word, programas de Rocscience y se puede almacenar artículos de investigación.
- **Programa Excel:** Es usado para procesar la data de caracterización geomecánica y poder obtener el RMR y índice de Q final que servirán para poder obtener el tipo de soporte a aplicar en el crucero 212.
- **Rocscience Phase2 v8.005:** Este programa de la firma de Rocscience usa los elementos finitos para poder simular las características del crucero y ver en qué condiciones se pueda encontrar en el terreno, nos permitirá obtener el factor de seguridad y ver cómo actúan los esfuerzos alrededor del crucero. Estos datos serán muy importantes permitirán saber si el crucero requiere de soporte y también ver en qué puntos se requieren taladros de alivio a fin de reducir los esfuerzos.

3.5. Características del área de estudio

3.5.1. Unidad de estudio

El estudio se ha realizó en la Unidad Minera Americana Cía. Minera Casapalca.

3.5.2. Descripción de la propiedad y ubicación

Las operaciones de la Compañía Minera Casapalca S.A. se ubican en el distrito de Chicla, Provincia de Huarochirí, Departamento de Lima. Geográficamente se localiza en la zona central, flanco Oeste de la Cordillera Occidental de los Andes a una altura promedio de 4 200 m.s.n.m, entre las coordenadas geográficas (Ver Plano 01).

Tabla 19.
Coordenadas UTM de la propiedad de Americana.

Este	Norte
366 000	870 4000
366 000	871 2000
374 000	870 4000
374 000	871 2000

Cía. Minera Casapalca es una mina polimetálica productora de plata, plomo, cobre y zinc, la bocamina principal Gubbins se encuentra a los 4200 m.s.n.m.

3.5.3. Accesibilidad

La carretera Central asfaltada siguiendo la ruta Lima – Casapalca con una distancia aproximada de 129 Km. En un tiempo de recorrido de tres horas aproximadamente. Carretera Central Asfaltada Huancayo – La Oroya - Casapalca con una distancia de 100 Km. En un tiempo de cuatro horas aproximadamente.

Tabla 24.
Distancias hacia el proyecto.

De	A	Tipo de Vía	Tiempo (Horas)	Distancia (km)
Desde Lima al Proyecto				
Lima	Casapalca	Asfaltada	3.33	124
Casapalca	Proyecto	Vía afirmada	0.25	2.5
Desde Oroya al Proyecto				
Oroya	Casapalca	Asfaltada	1.35	63
Casapalca	Proyecto	Vía afirmada	0.25	2.5

3.5.4. Clima, flora y fauna

En el sector geográfico que se emplaza la Mina Casapalca se aprecia dos estaciones bien definidas:

La temporada de lluvias comprendida entre los meses de Enero a Marzo caracterizada por fuertes precipitaciones con una Temperatura de 10 °C y disminuyendo a 0 °C con presencia de nieve.

El resto del año caracterizado por un clima seco casi todo el año, con lluvias aisladas, con cambio de temperaturas muy fuertes de -10 °C, siendo las más bajas en los meses de Junio – Agosto.

3.5.5. Geomorfología

La mina Casapalca se encuentra ubicada en el cinturón volcánico de la Cordillera Occidental Andina, muestra un relieve relativamente empinado, cuyas pendientes evidencian profunda erosión. Es evidente que el relieve ha sido modelado por acción glaciaria mostrándose en cotas más elevadas presencia de nieve perpetua. Así mismo se observa una geomorfología del tipo glaciaria, evidenciándose en las zonas altas presencia de nieve perpetua.

El afluente principal de la zona representado por el Rio Rímac surca de Este a Oeste drenando hacia el Océano Pacífico.

3.6. Geología local

3.6.1. Fisiografía:

La mina Casapalca está ubicada en la parte occidental de los Andes Centrales del Perú, dentro de un pequeño valle del tipo glaciaria con altitudes que llegan hasta los 5 000 m.s.n.m.

La topografía es abrupta con fuertes pendientes, existen depósitos coluviales en sus laderas. el clima es seco y frío; en los meses de diciembre – abril es lluvioso, entre mayo y noviembre es seco con “heladas”.

Las instalaciones de Compañía Minera Casapalca S.A. geológicamente se encuentran sobre depósitos cuaternarios, los cuales están suprayaciendo a rocas sedimentarias e intrusivas del Cretáceo Superior y Terciario Inferior.

3.7. Geología económica

La mina Casapalca es un yacimiento polimetálico cuyas reservas minerales se encuentran en vetas y en cuerpos, con mineralogía simple, los principales minerales son: esfalerita, galena, tetraedrita, calcopirita, pirita, cuarzo, calcita y rodocrosita.

3.8. Geología regional

La secuencia estratigráfica del distrito minero de Casapalca está constituida por rocas sedimentarias y rocas volcánicas interestratificadas, cuyas edades fluctúan desde el Cretácico Superior hasta el Cuaternario. Los ejes de las estructuras del distrito se orientan paralelamente a la dirección general de los Andes. La estructura principal, el “Anticlinal y Sinclinal Casapalca” constituye un pliegue moderadamente abierto en la porción central del distrito, el cual se cierra hacia el Norte, hasta construir una falla inversa de empuje con buzamiento al Este. Cuerpos intrusivos pequeños de composición intermedia se encuentran dentro de las secuencias sedimentarias y extrusivas; mostrando ellos una composición química similar diferenciándose únicamente en su carácter textural.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Caracterización geomecánica del lugar de estudio

Para determinar el tipo de roca en diversos puntos del crucero 212 donde se desarrolló la preparación, se realizó la caracterización geomecánica mediante progresivas a lo largo del crucero obteniendo 5 progresivas que se observan en la tabla siguiente donde se muestra los resultados de *RMR* obtenidos y a la vez se muestra la correlación del *GSI* de *Hoek* (2000).

Dentro de la caracterización del macizo rocoso algunos de estos parámetros, como la rugosidad, espaciado, continuidad, meteorización de juntas, apertura, presencia de agua y relleno, determinan el comportamiento mecánico y la resistencia al corte de las discontinuidades, todos estos parámetros son tomados en campo por progresivas, mostrados en los siguientes cuadros.

4.2. Clasificación geomecánica RMR de Bieniawski 1989

4.2.1. Resistencia de la roca

Tiene una valoración máxima de 15 puntos, y puede utilizarse como criterio el resultado del Ensayo de Resistencia a Compresión Simple (en laboratorio) o bien el Ensayo de Carga Puntual (*Point Load*). Para nuestro caso se realizó el ensayo de carga puntual para el crucero de estudio y utilizando el matillo *Smith*.

4.2.1.1. Resistencia de la roca intacta

Para estimar los parámetros de resistencia de la masa rocosa, se utilizó el criterio de falla de *Hoek & Brown* (2006), mediante el programa *Roc Data de Rocscience*. Para ello se tomaron los valores más representativos de calidad de la masa rocosa involucrada con cada dominio estructural, asimismo de resistencia compresiva Uniaxial de la roca intacta y de la constante “mi” de la roca intacta, desarrollados en este estudio. Como en el mapeo Geomecánico fueron observadas condiciones goteo a flujo de presencia del agua, los valores de calidad *RMR* corresponden a los valores de *GSI* (Índice de Resistencia Geológica).

A fin de verificar los resultados de los ensayos de Carga Puntual en rocas Arenisca Silicificadas y epidotización. muestran a continuación los resultados de los Ensayos de la carga puntual:

Tabla 25.

Ensayo de carga puntual para determinar la UCS de la roca.

N°	Carga (KN)	Carga (Kgf)	H (mm)	W (mm)	De	De2	Is	F.C	Is	Mpa
1	23.50	2396.34	60.0	36.00	52.4	2750	8.54	1.02	8.75	210.02
2	17.50	1784.51	60.0	36.00	52.4	2750	6.36	1.02	6.52	156.40
3	20.00	2039.44	60.0	36.00	52.4	2750	7.27	1.02	7.45	178.74
4	21.00	2141.41	60.0	36.00	52.4	2750	7.64	1.02	7.82	187.68
5	18.00	1835.50	60.0	36.00	52.4	2750	6.54	1.02	6.70	160.87
Promedio										178.74

Resistencia del resultado de las pruebas de carga puntual = **178.74 Mpa.**

4.2.1.2. Toma de datos con el martillo *Schmidt*

Para determinar la resistencia del macizo rocoso in situ, se va a requerir dos parámetros como el ángulo que se estará posicionado el martillo *Schmidt* que es de 90° y la densidad de a roca que deberá estar expresado en KN/m³(Ver Anexo 2).

Densidad 26 Tn/m³ = 26 KN/m³

4.2.1.3. Pruebas de martillo de Schmidt

Se realizaron pruebas con el martillo de Schmidt en los hastiales según los resultados se tiene un promedio de 55.

Tabla 26.
Pruebas de martillo de Schmidt.
Prueba del N° 23 XC 212 NW

Resumen	Prueba 01	Prueba 02	Prom.
Moda	60	54	60
SD	6	8	06
Media	55	54	55
Vmax.	60	64	60
Vmin.	40	39	40

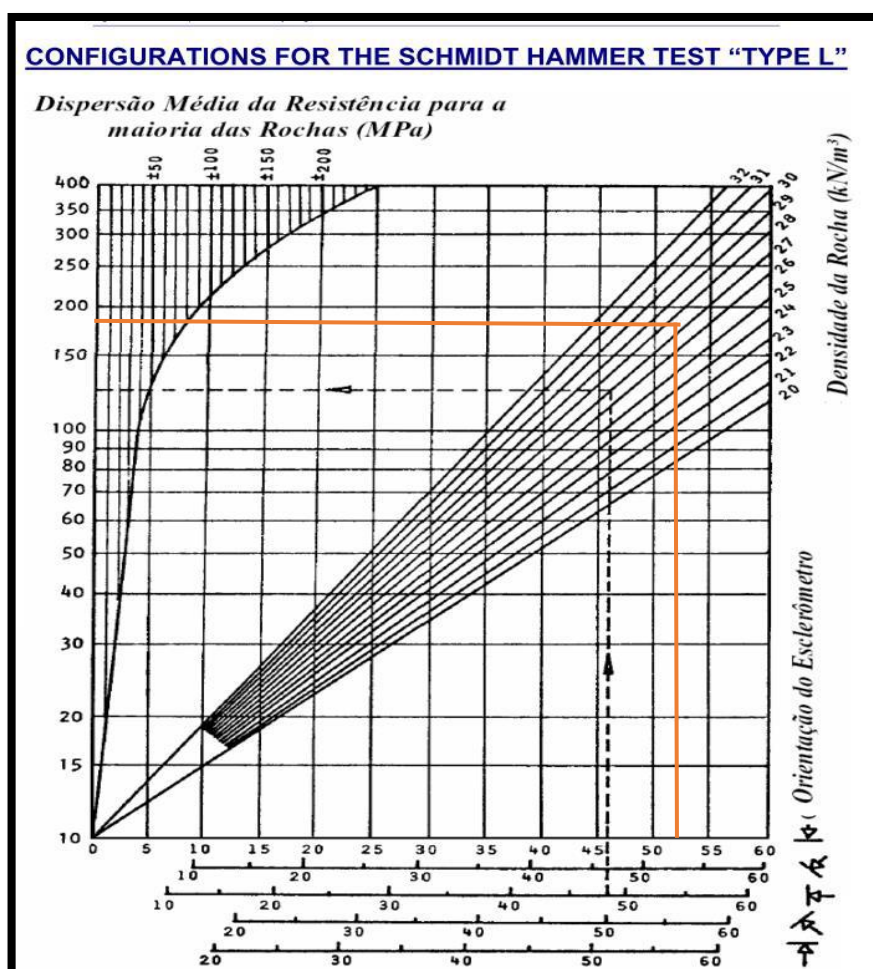


Figura 23. Determinación de la resistencia de la roca con el martillo Schmidt.

Resistencia del resultado pruebas con martillo Schmidt = **170 Mpa.**

Tabla 27.

Resumen de prueba de Carga puntual y martillo *Schmidt*.

Prueba	Resultado MPa
Carga Puntual	178,74
Martillo <i>Schmidt</i>	170,00

Ambas pruebas realizadas en encuentran en el rango de 100 a 250 MPa. Por donde se trabajó con 178,74 MPa ensayo de carga puntual.

Tabla 28.
Carga puntual MPa.

Índice de resistencia por ensayo de carga puntual [MPa]	Recomendable hacer ensayo de UCS						
	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1			
Resistencia a la compresión simple [MPa]	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	5 - 25	1-5	< 1
Valoración:	15	12	7	4	2	1	0
Marcador:		X					

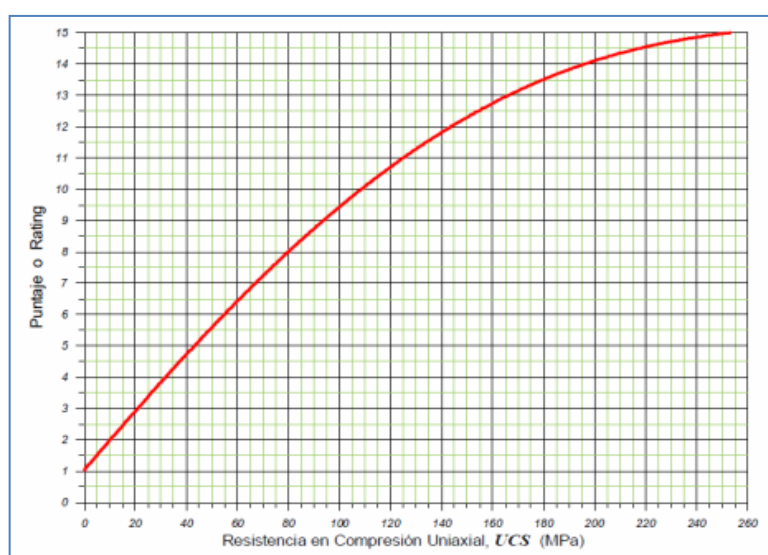


Figura 24. Resistencia en Compresión Uniaxial, UCS (MPa).

4.2.2. Designación de la calidad de roca – RQD

Tiene una valoración máxima de 20 puntos. Donde para nuestro caso se determinará mediante la formulación de *Priest y Hudson* a partir del índice volumétrico λ .

$$RQD = 100 * e^{-0,1\lambda} (0,1\lambda + 1)$$

Donde:

Si es el espaciado medio de cada familia de juntas

Tabla 29.
Determinación del RQD usando la fórmula de *Palstrom*.

Progresiva	Número total de juntas por m (λ)	RQD %	Litología	Calidad de la roca %	Tipo de roca
Progresiva 1	7.90	81.00	Arenisca	75 - 90	Buena
Progresiva 2	6.90	84.00	Arenisca	75 - 90	Buena
Progresiva 3	12.00	66.00	Arenisca	50 - 75	Regular
Progresiva 4	7.70	83.00	Arenisca	75 - 90	Buena
Progresiva 5	13.00	63.00	Arenisca	50 - 75	Regular

Tabla 30.
Muestra la valorización del RQD.

RQD%		100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	< 25
Progresiva 1	Valoración:	20	17	13	8	3
	Marcador:		X			
Progresiva 2	Valoración:	20	17	13	8	3
	Marcador:		X			
Progresiva 3	Valoración:	20	17	13	8	3
	Marcador:			X		
Progresiva 4	Valoración:	20	17	13	8	3
	Marcador:		X			
Progresiva 5	Valoración:	20	17	13	8	3
	Marcador:			X		

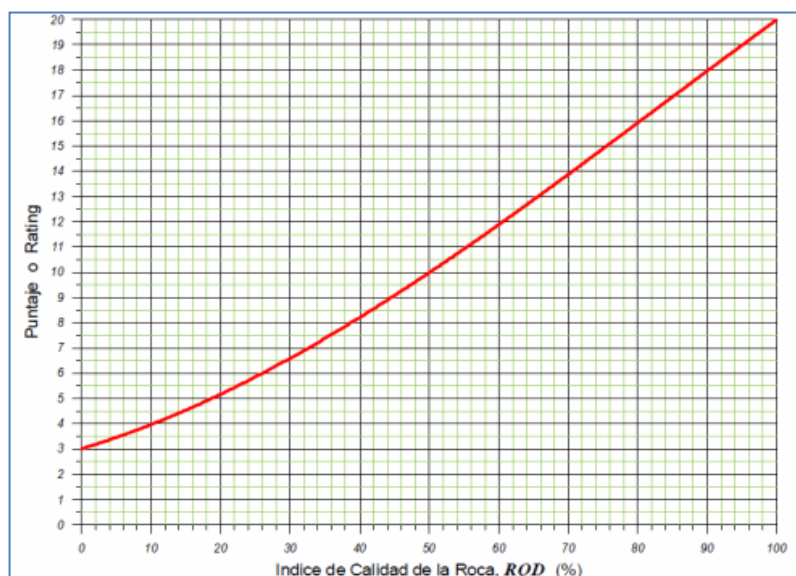


Figura 25. Índice de calidad de la Roca RQD (%).

4.2.3. Espaciamiento de discontinuidades

Tiene una valoración máxima de 20 puntos. El parámetro considerado es la separación en metros entre juntas de la familia principal de diaclasas de la roca.

Tabla 31.

Determinación del espaciamiento para la Progresiva 01 al 05 y su valorización.

Separación entre discontinuidades (m)		> 2	2 – 0,6	0,6 – 0,2	0,2 – 0,06	< 0,06
Progresiva 1	Valoración:	20	15	10	8	5
	Marcador:			X		
Progresiva 2	Valoración:	20	15	10	8	5
	Marcador:			X		
Progresiva 3	Valoración:	20	15	10	8	5
	Marcador:			X		
Progresiva 4	Valoración:	20	15	10	8	5
	Marcador:		X			
Progresiva 5	Valoración:	20	15	10	8	5
	Marcador:				X	

4.2.4. Condición de las discontinuidades

Es el parámetro que más influye, con una valoración máxima de 30 puntos, en la que el estado de las diaclasas se descompone en otros cinco parámetros: persistencia apertura, rugosidad, relleno y meteorización de la discontinuidad, para la siguiente investigación se tendrá cinco progresivas en donde se realizó el mapeo geomecánico.

Progresiva 01

Tabla 32.

Determinación del estado de las discontinuidades para la Progresiva 01 y su valorización.

Persistencia	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m
Valoración:	6	4	2	1	0
Marcador:			X		
Apertura	0 mm	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 – 5 mm	> 5 mm
Valoración:	6	5	4	1	0
Marcador:			X		
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo de falla
Valoración:	6	5	3	1	0
Marcador:			X		
Relleno	Ninguno	Duro con espesor<5mm	Duro con espesor>5mm	Blando con espesor<5mm	Blando con espesor>5mm
Valoración:	6	4	2	2	0
Marcador:		X			
Grado de intemperización	No afectado	Ligero	Moderado	Alto	Descompuesto
Valoración:	6	5	3	1	0
Marcador:		X			

Progresiva 02

Tabla 33.

Determinación del estado de las discontinuidades para la Progresiva 02 y su valorización.

Persistencia	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m
Valoración:	6	4	2	1	0
Marcador:				X	
Apertura	0 mm	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 – 5 mm	> 5 mm
Valoración:	6	5	4	1	0
Marcador:			X		
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo de falla
Valoración:	6	5	3	1	0
Marcador:			X		
Relleno	Ninguno	Duro con espesor<5mm	Duro con espesor>5mm	Blando con espesor<5mm	Blando con espesor>5mm
Valoración:	6	4	2	2	0
Marcador:	X				
Grado de intemperización	No afectado	Ligero	Moderado	Alto	Descompuesto
Valoración:	6	5	3	1	0
Marcador:		X			

Progresiva 03

Tabla 34.

Determinación del estado de las discontinuidades para la Progresiva 03 y su valorización.

Persistencia	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m
Valoración:	6	4	2	1	0
Marcador:			X		
Apertura	0 mm	< 0,1 mm	0,1 - 1,0mm	1 – 5 mm	> 5 mm
Valoración:	6	5	4	1	0
Marcador:			X		
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo de falla

Valoración:	6	5	3	1	0
Marcador:		X			
Relleno	Ninguno	Duro con espesor<5mm	Duro con espesor>5mm	Blando con espesor<5mm	Blando con espesor>5mm
Valoración:	6	4	2	2	0
Marcador:		X			
Grado de intemperización	No afectado	Ligero	Moderado	Alto	Descompuesto
Valoración:	6	5	3	1	0
Marcador:			X		

Progresiva 04

Tabla 35.

Determinación del estado de las discontinuidades para la Progresiva 04 y su valorización.

Persistencia	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m
Valoración:	6	4	2	1	0
Marcador:			X		
Apertura	0 mm	< 0,1 mm	0,1 - 1,0mm	1 – 5 mm	> 5 mm
Valoración:	6	5	4	1	0
Marcador:			X		
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo de falla
Valoración:	6	5	3	1	0
Marcador:		X			
Relleno	Ninguno	Duro con espesor<5mm	Duro con espesor>5mm	Blando con espesor<5mm	Blando con espesor>5mm
Valoración:	6	4	2	2	0
Marcador:		X			
Grado de intemperización	No afectado	Ligero	Moderado	Alto	Descompuesto
Valoración:	6	5	3	1	0
Marcador:		X			

Progresiva 05

Tabla 36.

Determinación del estado de las discontinuidades para la Progresiva 05 y su valorización.

Persistencia	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m
Valoración:	6	4	2	1	0
Marcador:				X	
Apertura	0 mm	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 – 5 mm	> 5 mm
Valoración:	6	5	4	1	0
Marcador:			X		
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espejo de falla
Valoración:	6	5	3	1	0
Marcador:		X			
Relleno	Ninguno	Duro con espesor<5mm	Duro con espesor>5mm	Blando con espesor<5mm	Blando con espesor>5mm
Valoración:	6	4	2	2	0
Marcador:			X		
Grado de intemperización	No afectado	Ligero	Moderado	Alto	Descompuesto
Valoración:	6	5	3	1	0
Marcador:		X			

Progresiva 01

Tabla 37.

Determinación de la presencia de agua para la Progresiva 01 y su valorización.

Caudal en 10m de túnel (litros/min)	Nulo	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125
Relación: Presión del agua en la junta // Tensión principal máxima (sW / s1)					
	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5
Condiciones generales	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo Chorreando
Valoración:	15	10	7	4	0
Marcador:	X				

4.2.5. Presencia de agua subterránea

La valoración máxima es de 15 puntos. La tabla 10 ofrece tres posibles criterios de valoración: estado general, caudal cada 10 metros de túnel y relación entre la presión del agua y la tensión principal mayor en la roca (Ver Tabla 37).

Progresiva 02

Tabla 38.

Determinación de la presencia de agua para la Progresiva 02 y su valorización.

Caudal en 10m de túnel (litros/min)	Nulo	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125
Relación: Presión del agua en la junta // Tensión principal máxima (sW / s1)	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5
Condiciones generales	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo Chorreando
Valoración:	15	10	7	4	0
Marcador:	X				

Progresiva 03

Tabla 39.

Determinación de la presencia de agua para la Progresiva 03 y su valorización.

Caudal en 10m de túnel (litros/min)	Nulo	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125
Relación: Presión del agua en la junta // Tensión principal máxima (sW / s1)	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5
Condiciones generales	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo Chorreando
Valoración:	15	10	7	4	0
Marcador:					X

Progresiva 04

Tabla 40.

Determinación de la presencia de agua para la Progresiva 04 y su valorización.

Caudal en 10m de túnel (litros/min)	Nulo	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125
Relación: Presión del agua en la junta // Tensión principal máxima (sW / s1)	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5
Condiciones generales	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo Chorreando
Valoración:	15	10	7	4	0
Marcador:		X			

Progresiva 05

Tabla 41.

Determinación de la presencia de agua para la Progresiva 05 y su valorización.

Caudal en 10m de túnel (litros/min)	Nulo	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125
Relación: Presión del agua en la junta // Tensión principal máxima (sW / s1)	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5
Condiciones generales	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo Chorreando
Valoración:	15	10	7	4	0
Marcador:					X

4.2.6. Orientaciones de las discontinuidades

Este parámetro tiene una valoración negativa, y oscila para túneles entre 0 y -12 puntos. Y esta en función del lugar donde se realice el levantamiento (túneles, cimentaciones y taludes) y también del buzamiento de la familia de diaclasas y de su rumbo en relación con el eje del túnel (paralelo o perpendicular), se establece una clasificación de la discontinuidad en cinco tipos: desde Muy Favorable hasta Muy Desfavorable.

Progresiva 01

Tabla 42.

Determinación de la orientación de las discontinuidades para la P. 01 y su valorización.

Dirección y buzamiento						
	Marcador	Muy Favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy Desfavorable
	X	0	-2	-5	-10	-12
Valoración		0	-2	-7	-15	-25
		0	-5	-25	-50	-60
Marcador:			X			

Progresiva 02

Tabla 43.

Determinación de la orientación de las discontinuidades para la P. 02 y su valorización.

Dirección y buzamiento						
	Marcador	Muy Favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy Desfavorable
	X	0	-2	-5	-10	-12
Valoración		0	-2	-7	-15	-25
		0	-5	-25	-50	-60
Marcador:			X			

Progresiva 03

Tabla 44.

Determinación de la orientación de las discontinuidades para la P. 03 y su valorización.

Dirección y buzamiento						
	Marcador	Muy Favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy Desfavorable
	X	0	-2	-5	-10	-12
Valoración		0	-2	-7	-15	-25
		0	-5	-25	-50	-60
Marcador:			X			

Progresiva 04

Tabla 45.

Determinación de la orientación de las discontinuidades para la P. 04 y su valorización.

Dirección y buzamiento						
	Marcador	Muy Favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy Desfavorable
	X	0	-2	-5	-10	-12
Valoración		0	-2	-7	-15	-25
		0	-5	-25	-50	-60
Marcador:			X			

Progresiva 05

Tabla 46.

Determinación de la orientación de las discontinuidades para la P. 05 y su valorización.

Dirección y buzamiento						
	Marcador	Muy Favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy Desfavorable
	X	0	-2	-5	-10	-12
Valoración		0	-2	-7	-15	-25
		0	-5	-25	-50	-60
Marcador:			X			

4.2.7. Valoración del macizo rocoso (RMR)

La valoración del macizo rocoso (*Rock Mass Rating*), introducido por *Bieniawski (1976)*, es posiblemente la clasificación geomecánica más usada, inicialmente pensado para valorar la estabilidad y los soportes requeridos en túneles. El *RMR* cuenta con 5 parámetros (Ver Tabla 47).

Resultados del *RMR* corregido, de la tabla 47.

RMR Corregido	Min	Promedio	Máximo
	45	60	69

Tabla 47.Calculo del *RMR* de acuerdo a la valorización de cada parámetro.

Parámetros del <i>RMR</i>	P. 1	P. 2	P. 3	P. 4	P. 5
	Puntaje				
1. Resistencia de la roca	12	12	12	12	12
2. <i>RQD</i>	17	17	13	17	13
3. Espaciamiento de juntas	10	10	10	15	8
4. Estado de las juntas	18	19	18	20	17
a. Persistencia	2	1	2	2	1
b. Apertura	4	4	4	4	4
c. Rugosidad	3	3	5	5	5
d. Relleno	4	6	4	4	2
e. Intemperización	5	5	3	5	5
5. Presencia de agua	15	15	0	10	0
<i>RMR</i> Básico	72	73	53	74	50
6. Orientación de las juntas	-5	-5	-5	-5	-5
<i>RMR</i> Corregido	67	68	48	69	45

De acuerdo a los cálculos realizados se tiene un *RMR* promedio de 60 que va a representar a toda el avance del cruce 212 a la vez se tiene un *RMR* mínimo de 45 que representa la zona más crítica del avance y de acuerdo al mapeo geomecánico realizado se puede identificar que son en las progresivas 3 y 5, (Ver Tabla 47) , donde se tiene la falla y la presencia de agua que se encuentra fluyendo lo que origina que el macizo rocoso sea de un calidad de roca regular también se tiene un *RMR* máximo de 69 que representa a las progresivas 1, 2 y 4, donde las condiciones del terreno son de calidad de roca buena y son buenas condiciones porque aquí no se tiene los mismos factores influyentes a comparación de las progresivas 3 y 5.

4.2.8. Elección del tipo de sostenimiento según el *RMR*

Con el resultado obtenido de la clasificación del macizo rocoso determinamos el tipo de sostenimiento que se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 48.

Elección del tipo de sostenimiento por *Bieniawski RMR*, para las progresivas 1, 2 y 4.

Clase de la masa rocosa	excavación	pernos de roca	Shotcrete	cimbras
II. Roca Buena. <i>RMR</i> : 61-80.	Frente completo, 1-1.5 m de avance, sostenimiento completo a 2 m del frente.	Localmente pernos de 3 m en la corona, espaciados a 2.5 m con malla de alambres.	50 mm en la corona, donde sea requerido.	ninguno.

Fuente: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.

Tabla 49.

Elección del tipo de sostenimiento por *Bieniawski RMR*, para las progresivas 3 y 5.

clase de la masa rocosa	excavación	pernos de roca	shotcrete	cimbras
III. Regular. <i>RMR</i> : 41-60.	Frente completo, 1.5 a 3 m de avance,	Localmente pernos de 3 a 4 m con separaciones de 1.5 a 2 metros en corona y hastiales.	50 mm en la corona	ninguno.

Fuente: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.

Mediante la clasificación *RMR* podemos definir que el tipo sostenimiento requerido es con la instalación de pernos helicoidal de 5' de longitud espaciados cada 1.50 m. en la corona y en las paredes, adicionalmente con Split set las cámaras de carguío.

4.2.9. Valoración del macizo rocoso usando la clasificación geomecánica *RMR* año 1976

Para lo cual se consideró los mismos datos obtenidos en la caracterización geomecánica del crucero 212 pero para obtener la valoración final del macizo rocoso se usó (Ver Tabla 1) de valorizaciones del año 1976, este se desarrolló en las progresivas 3 y 5 debido a que en esta parte se tiene una falla y además se tiene agua fluyendo.

Tabla 50.
Valoración geomecánica.

Categoría	Progresiva 3		Progresiva 5	
	Descripción	Clasificación	Descripción	Clasificación
<i>UCS</i>	1000 - 2000	12	1000 - 2000	12
	Kg/cm ²		Kg/cm ²	
<i>RQD</i>	50 – 75 %	13	50 – 75 %	13
Espaciamiento de las discontinuidades	0.3 - 1 m	20	50 – 300 mm	10
Condición de las discontinuidades	Ligeramente rugosa, < 1mm de separación	12	Ligeramente rugosa, < 1mm de separación	12
	paredes de roca suave		paredes de roca suave	
Agua subterránea		0		0
Orientación de las discontinuidades	Favorable	-5	Favorable	-5
Total, <i>RMR</i> 76		52		42

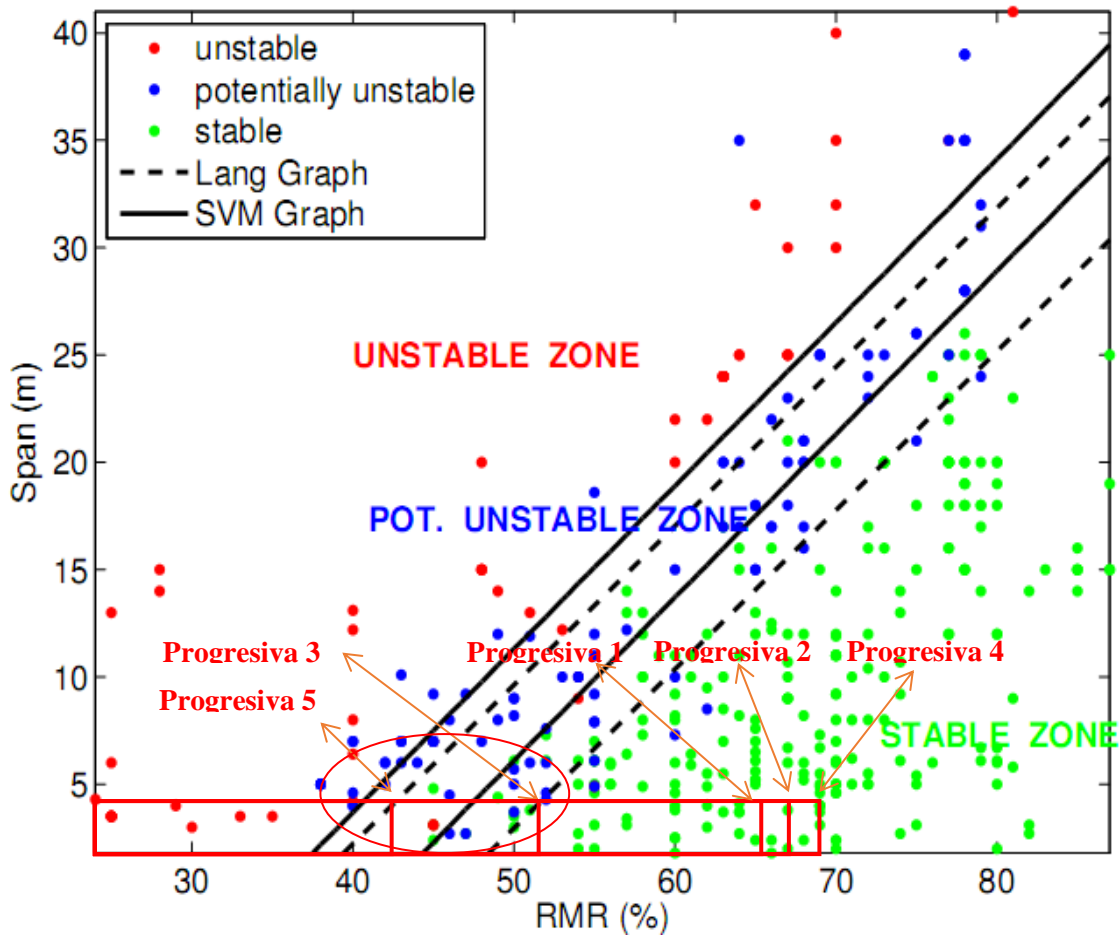
Donde para la progresiva 3 se tiene una *RMR* de 52 y para la progresiva 5 se tiene un *RMR* de 42, lo cual también nos indica que son rocas buenas

4.2.10. Estabilidad de roca dura para diseño en excavaciones

Se usa los gráficos realizado por *Lang* a fin de evaluar las condiciones de estabilidad del macizo rocoso que se realiza en base al ancho de excavación versus el *RMR* del año 1976. El crucero 212 tiene un ancho de 3.5 metros y el *RMR* para las progresivas 3 y 5 (Ver Tabla 51).

El gráfico de rango crítico desarrollado por *Lang* consta de dos líneas rectas que dividen el *RMR* 1976 como se muestra en la figura siguiente, donde se puede evaluar si la roca es estable, potencialmente inestable e inestable).

Figura 26. Rango crítico desarrollado por Lang.



Fuente: B. Lang, 1994

En base a la figura se tiene que para un ancho de 3.5 metros y con RMR de 52 y 42 se tiene una zona estable, a pesar que en el lugar se tiene factores influyentes como agua fluyendo y además la presencia de la falla.

4.3. Clasificación geomecánica del índice Q de Bartón

Para determinar la clasificación del macizo rocoso por el método Q en el Crucero 212 SW del Nivel 23 de la zona esperanza.

4.3.1. Clasificación geomecánica Q de Bartón

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Donde:

RQD : Índice de calidad de la roca.

Jn : Parámetro basado en el número de familias de discontinuidades.

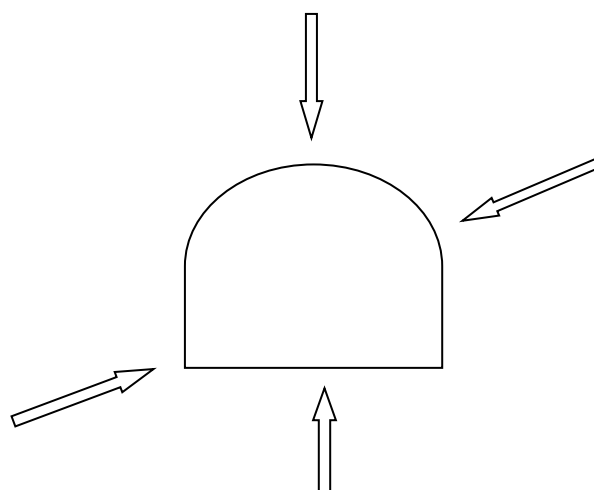
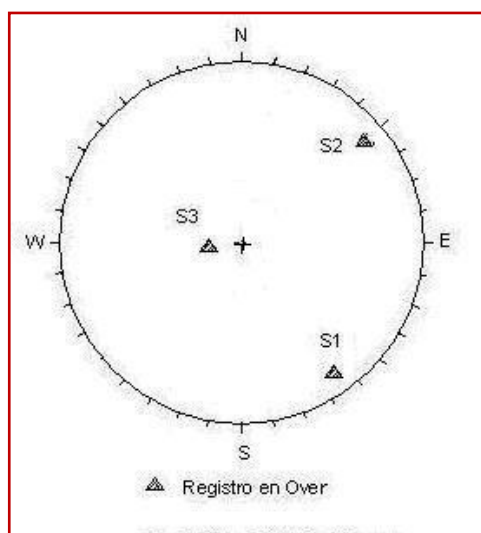
Jr : Parámetro basado en la rugosidad de las discontinuidades.

Ja : Parámetro basado en la alteración de las discontinuidades.

Jw : Parámetro basado en la presencia de agua.

SRF : Factor de reducción de esfuerzos.

Magnitud y orientación de los esfuerzos principales relacionado al Nv. 23 de la zona esperanza.



Es conocido que, en Mina Casapalca, en los niveles más profundos ocurren problemas relacionados a altos esfuerzos en roca competente presenta (Crujidos de roca a estallidos de rocas), pero en la zona del Crucero 212 solo se tuvo crujidos, reventones, y relajamiento del macizo rocoso.

Se desarrolló de la siguiente manera:

Esfuerzos de estado gravitacional

La zona en evaluación se encuentra ubicada a 1 380 metros con respecto a superficie.

Esfuerzo Vertical

$$\sigma_v = \gamma z$$

Dónde: σ_v es el esfuerzo vertical.

γ Densidad de la roca (2,6 ton/m³).

z Profundidad.

Desarrollando la ecuación se tiene que $\sigma_v = 35,88$ Mpa. ≈ 36 Mpa.

Esfuerzo Horizontal

Para la estimación del Ratio K se usó la ecuación de Sheorey:

$$k = 0,25 + 7E (0,001 + 1/z)$$

Dónde:

E = Modulo Elástico de campo (GPa), (53)

Z = Profundidad, mts. (1 380) Promedio.

Obteniéndose un $K = 0,89$

Desarrollando se tiene $\sigma_h = k \times \sigma_v$

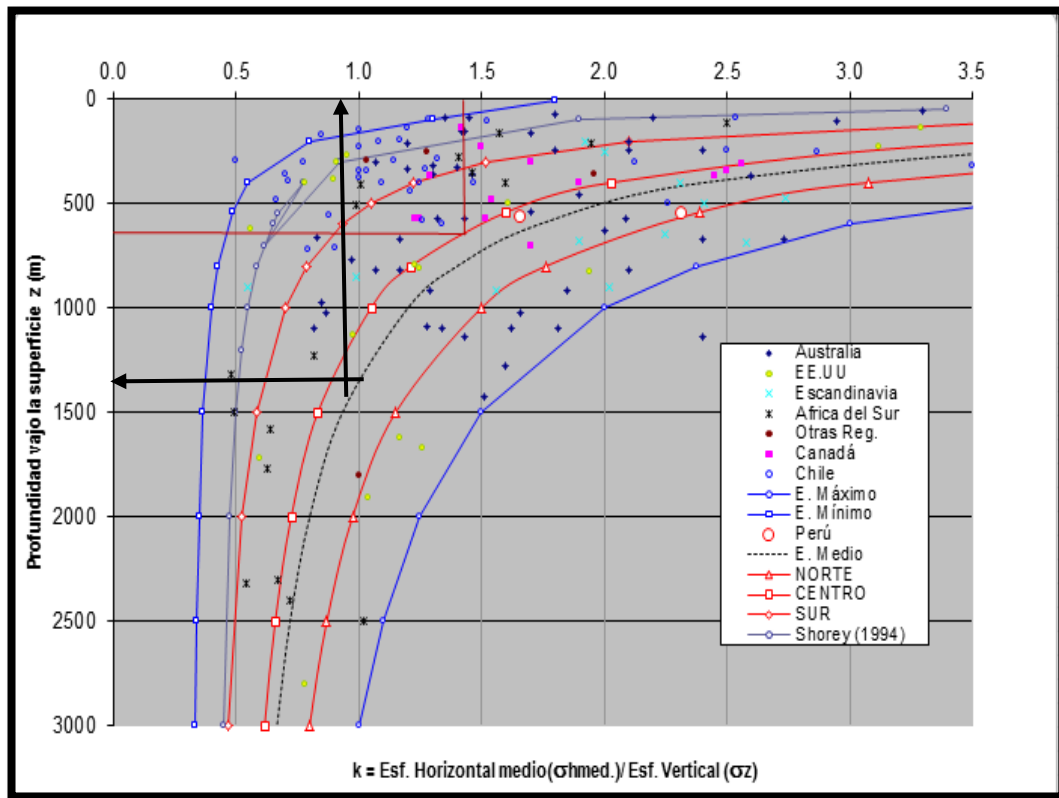
$$\sigma_h = 0,89 \times 36 = 32 \text{ Mpa, por lo tanto } \sigma_h \approx 32 \text{ Mpa.}$$

Entonces el valor del **SRF** se obtendría de la relación:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_1}$$

Reemplazando los valores se tendría:

$$178,74 \text{ MPa} / 32 \text{ MPa} ==> \text{nos da como resultado } \mathbf{5,31 \text{ MPa}}$$



La incidencia de estos parámetros en el comportamiento geomecánico de un macizo se expresa por medio del índice de calidad *RMR*, *rock mass rating*, que varía de 0 a 100.

Tabla 51.
Sistema de calificación del índice *Q* Progresiva 1.
Sistema de clasificación del Índice *Q*

Parámetros		Rango	Valor
RQD %	<i>RQD</i> %	81	81
Número de discontinuidades	<i>J_n</i>	4D	4
Número de rugosidad	<i>J_r</i>	Lisa onduladas	2
Número de alteración	<i>J_a</i>	ligeramente alt.	2
Número de agua subterránea	<i>J_w</i>	seco	1
Factor de reducción de esfuerzos	<i>SRF</i>	Tensión elevada	1.5
$Q = (RQD/J_n) \times (J_r / J_a) \times (J_w / SRF)$			13.57

Tabla 52.

Sistema de calificación del índice Q Progresiva 2.

Sistema de clasificación del Índice Q			
Parámetros		Rango	Valor
RQD %	<i>RQD %</i>	84	84
Número de discontinuidades	<i>Jn</i>	4 D	4
Número de rugosidad	<i>Jr</i>	Rugosa ondulada	3
Número de alteración	<i>Ja</i>	ligeramente alt.	2
Número de agua subterránea	<i>Jw</i>	seco	1
Factor de reducción de esfuerzos	<i>SRF</i>	Tensión elevada	1.5
$Q = (RQD/Jn) \times (Jr / Ja) \times (Jw / SRF)$			21.03

Tabla 53.

Sistema de calificación del índice Q Progresiva 3.

Sistema de clasificación del Índice Q			
Parámetros		Rango	Valor
RQD %	<i>RQD %</i>	66	66
Número de discontinuidades	<i>Jn</i>	6 D	6
Número de rugosidad	<i>Jr</i>	Rugosa ondulada	3
Número de alteración	<i>Ja</i>	ligeramente alt.	2
Número de agua subterránea	<i>Jw</i>	flujos	0,1
Factor de reducción de esfuerzos	<i>SRF</i>	Tensión elevada	1.5
$Q = (RQD/Jn) \times (Jr / Ja) \times (Jw / SRF)$			1.10

Tabla 54.

Sistema de calificación del índice Q Progresiva 4.

Sistema de clasificación del Índice Q			
Parámetros		Rango	Valor
RQD %	<i>RQD %</i>	83	83
Número de discontinuidades	<i>Jn</i>	4 D	4
Número de rugosidad	<i>Jr</i>	Rugosa ondulada	3
Número de alteración	<i>Ja</i>	ligeramente alt.	2
Número de agua subterránea	<i>Jw</i>	húmedo	1
Factor de reducción de esfuerzos	<i>SRF</i>	Tensión elevada	1.5
$Q = (RQD/Jn) \times (Jr / Ja) \times (Jw / SRF)$			20.63

Tabla 55.
Sistema de calificación del índice Q Progresiva 5.

Sistema de clasificación del Índice Q			
Parámetros		Rango	Valor
<i>RQD</i> %	<i>RQD</i>	63	63
Número de discontinuidades	<i>Jn</i>	6 D	6
Número de rugosidad	<i>Jr</i>	Lisa onduladas	3
Número de alteración	<i>Ja</i>	ligeramente alt.	2
Número de agua subterránea	<i>Jw</i>	flujos	0,1
Factor de reducción de esfuerzos	<i>SRF</i>	Tensión elevada	1.5
$Q = (RQD/Jn) \times (Jr / Ja) \times (Jw / SRF)$			1.04

El promedio del índice Q es de: **11.47**

4.3.2. Elección del tipo de sostenimiento según Barton.

Para la elección del tipo de sostenimiento usaremos la relación del diámetro equivalente (*De*) versus la clasificación de Barton (*Q*).

$$De = \frac{\text{Ancho, diametro de la excavacion}}{ESR}$$

ESR = Relacion de sostenimiento

Por ser una labor minera permanente que servirá para la extracción se le asigna un valor de 1,6 según la valoración en la Tabla 56.

Tabla 56.
Puntuación *ESR*, según el tipo de excavación.

TIPO DE EXCAVACIÓN	<i>ESR</i>
A Labores mineras de carácter temporal, etc.	2-5
B Galerías mineras permanentes, túneles de centrales hidroeléctricas (excluyendo las galerías de alta presión). Túneles piloto, galerías de avance en grandes excavaciones, cámaras de compensación.	1,6-2
C Cavernas de almacenamiento, plantas de tratamiento de aguas, túneles de carreteras secundarias y ferrocarril, túneles de acceso.	1,2-1,3

D Centrales eléctricas subterráneas, túneles de carreteras primarias y de ferrocarril, refugios subterráneos para defensa civil, emboquilles e intersecciones de túneles. 0,9-1,1

E Centrales nucleares subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones públicas y deportivas fábricas, túneles para buenas tuberías principales de gas. 0,5-0,8

Fuente: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.

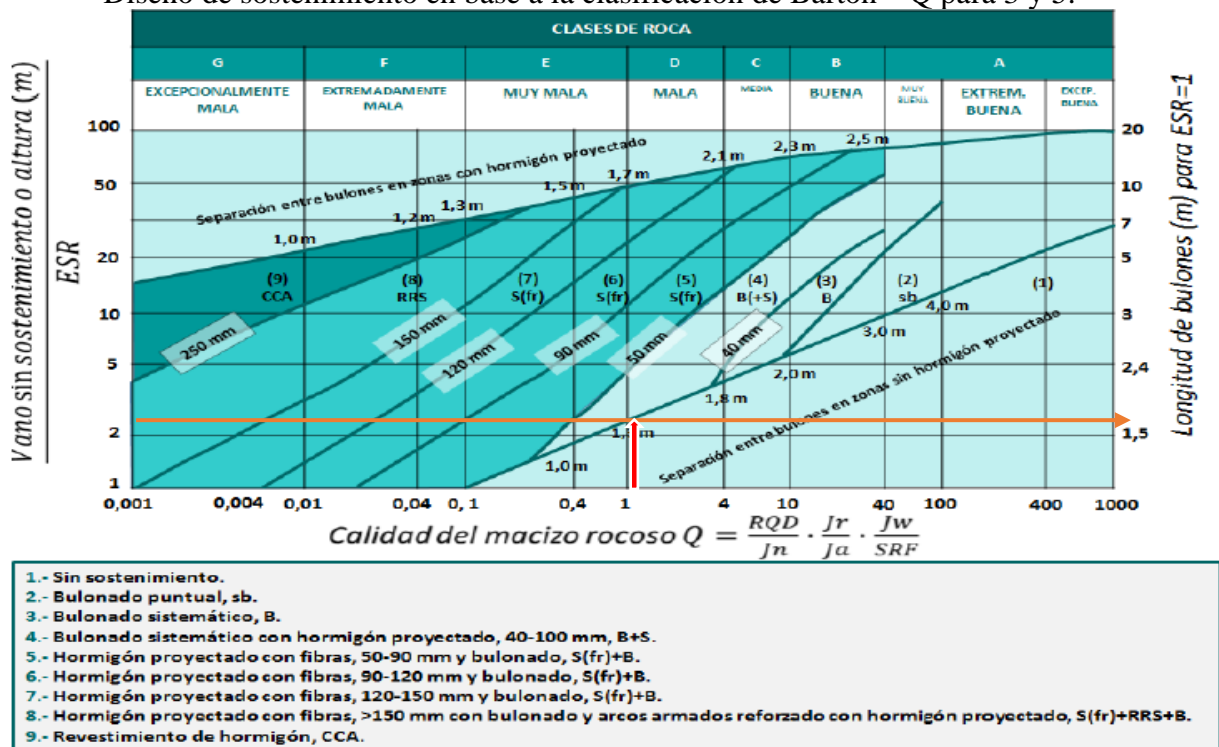
Reemplazando los valores se tendría:

$$De = 3,5/1.6 \implies De = 2.18$$

Con todos estos parámetros se propone un tipo de sostenimiento según Barton.

Figura 27.

Diseño de sostenimiento en base a la clasificación de Barton – Q para 3 y 5.



Fuente: Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía.

Según el criterio de Barton la recomendación sería de la instalación de pernos con longitudes de mínimo 5 pies, distribuidos sistemáticamente y espaciados cada 1 metro.

4.4. Índice de resistencia geológico *GSI Hoek & Brown*

Con la aparición del criterio de rotura de *Hoek & Brown* el uso del *RMR* ya no es adecuado, sobre todo para el caso de rocas débiles, y se introduce de esta forma el *GSI* (*Hoek, et al. 1995*).

El *GSI* es un sistema para la estimación de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso a partir de observaciones geológicas de campo, y cabe recalcar que el *GSI* no es una clasificación geomecánica.

Las relaciones existentes entre *GSI* y *RMR*, dependiendo del *RMR* utilizado, se detallan a continuación:

Para el caso de *RMR 76*

$$RMR\ 76 > 18 \rightarrow GSI = RMR$$

$$RMR\ 76 < 18 \rightarrow \text{No se puede utilizar el } RMR\ 76 \text{ para la obtención del } GSI$$

Para el caso de *RMR 89*

$$RMR\ 89 > 23 \rightarrow GSI = RMR\ 89 - 5$$

$$RMR\ 89 < 23 \rightarrow \text{No se puede utilizar el } RMR\ 89 \text{ para la obtención del } GSI$$

Hoek recomienda hacer siempre referencia a un rango numérico y nunca a un solo valor del *GSI* y también sugiere la posibilidad a falta de una apreciación directa en campo y solo para macizos rocosos caracterizados por un $GSI > 25$, a partir del *RMR* de *Bieniawski*, depurándolo del factor orientación de las discontinuidades y asignando 10 al factor agua. *Russo* (1998), propone estimar el *GSI* también a partir del índice *Q* de Barton, depurándolo del factor de tensión (*SRF*) y asignando 1 al parámetro agua (*J_w*), obteniendo luego, de acuerdo con la preexistente correlación entre *Q* y *RMR*:

$$GSI = 9 \lg Q' + 44$$

Tabla 57.
Clasificación geomecánica *GSI* de las 5 Progresiva.

Descripción	Clasificación geomecánica <i>GSI</i>		
	$GSI = RMR - 5$	$GSI = 9 \log Q' + 44$	
	<i>RMR</i>	<i>GSI</i>	<i>Q'</i>
Progresiva 01	67	62	13.57
Progresiva 02	68	58	21.03
Progresiva 03	48	43	1.10
Progresiva 04	69	64	20.63
Progresiva 05	45	40	1.04

Tabla 58.
Cuadro de resúmenes de las clasificaciones geomecánicas.

	Clasificaciones geomecánicas				
	Progresivas				
	1	2	3	4	5
	0 - 6 m	7 - 12 m	13 - 18 m	19 - 24 m	25 - 30 m
	Clasificación geomecánica <i>RMR</i> 1989				
<i>RMR</i>	67	68	48	69	45
Promedio	59.4				
	Sistema de clasificación del Índice - <i>Q</i>				
Índice <i>Q</i>	13.57	21.03	1.10	20.63	1.04
Promedio	11.47				
	Índice geológico estructural - <i>GSI</i>				
<i>GSI</i>	62	58	43	64	40
Promedio	53.4				

4.5. Caracterización de la masa rocosa modelamiento con *Software*.

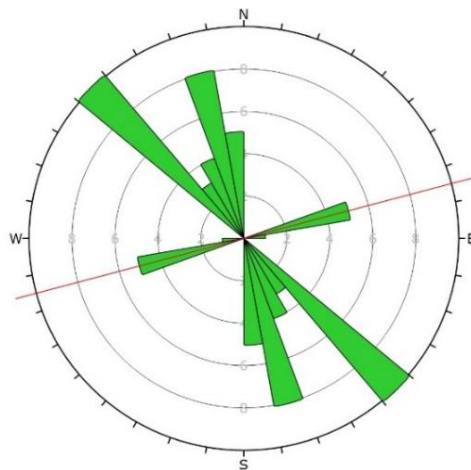
La caracterización de la masa rocosa en el crucero consistió en la toma de datos estructurales del buzamiento (*dip*) y dirección de buzamiento (*dip direction*), tomando el criterio de mapeo por estación; se llegaron a tomar 80 datos estructurales que representan las características de la roca en 30 metros del crucero.

4.5.1. Distribución de discontinuidades

Para establecer las características de la distribución de discontinuidades tanto mayores como menores, el procesamiento de los datos orientacionales se realizó mediante técnicas de proyección estereográfica, utilizando la versión avanzada del programa de computo *DIPS Versión 6.0* de la firma *Rocscience Inc*. Los análisis que en seguida se efectúan están referidos a las estructuras en general (compósito) y a las estructuras mayores y a las estructuras menores.

– Diagrama de Rosetas

En el crucero las discontinuidades de las familias principales se encuentran orientados sub paralelas a la dirección de la excavación, teniendo una orientación NW - SE, otra familia secundaria o aleatoria presenta direcciones NE - SW. Por lo que se tiene que el crucero no tendrá problemas de cuña.



Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	10 planes per arc
Planes Plotted	37
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

Figura 28. Se muestra el diagrama de Rosetas de los datos en general tomados en el crucero 212 del Nv 23 Unidad Americana.

– Diagrama de Planos Principales

Con el procesamiento de aproximadamente de los 80 datos estructurales en el *software Dips*, se ha identificado 02 concentraciones de discontinuidades, que tienen un mayor control estructural del crucero. En el procesamiento se aprecia la densidad máxima de la concentración principal es de 30,79%, que marca los puntos de intersección identificando los planos de las familias de discontinuidades (Ver Figura 28).

Donde a la vez se ubicaron 2 tipos predominantes de familias de discontinuidades en el arreglo estructural, siendo una falla y otra la veta, con sus respectivas orientaciones la familia 1 es 72/255 y la familia 2 es 64/222.

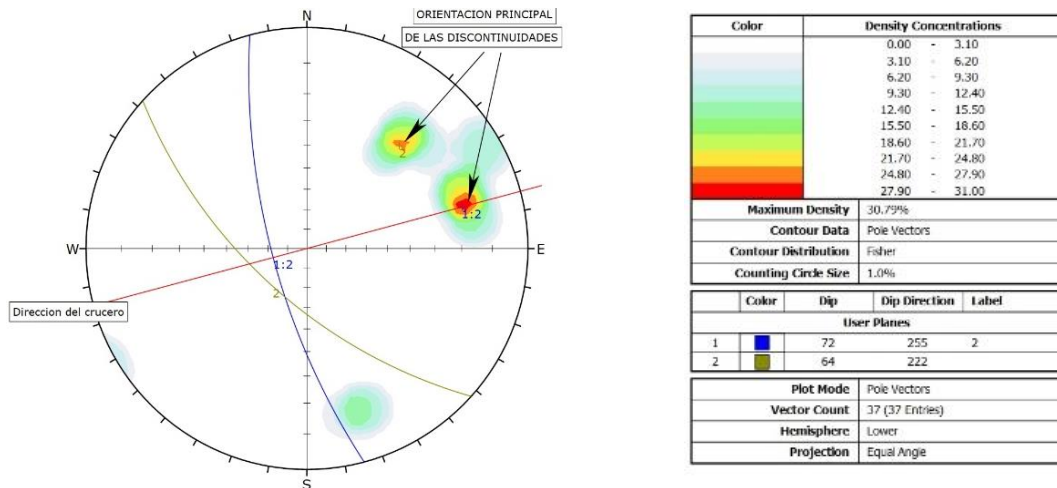


Figura 29. Se muestra el diagrama de Planos Principales de los datos en general tomados el Crucero 212 NW.

4.5.2. Propiedades físico - mecánicas del macizo rocoso según software rock data.

Para el cálculo de los esfuerzos inducidos se ha utilizado el Método Numérico de Elementos Finitos contenido en el Software Phases 2.0, se ha considerado la como litología arenisca silicificada y epidotizada como roca principal para la evaluación.

Para realizar el diseño calculamos antes la cohesion y el angulo de friccion con la ayuda del software RocData, los datos de entrada y salida de resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 59. Parámetros de ángulo de fricción y cohesión.

Parámetros	Valores	Unidades	Observaciones
<i>sigci</i>	174	MPa	Entrada
<i>Hoek-Brown</i>	<i>GSI</i>	70	Entrada
<i>Classification</i>	<i>mi</i>	17	Entrada
	<i>D</i>	0	Entrada
	<i>mb</i>	5,82282	Salida
<i>Hoek-Brown Criterion</i>	<i>s</i>	0,035674	Salida
	<i>a</i>	0,501355	Salida
	<i>Application</i>	Tunnels	Entrada

	<i>sig3max</i>	17,2826	MPa	Salida
<i>Failure Envelope Range</i>	<i>Unit Weight</i>	0,026	MN/m ³	Entrada
	<i>Tunnel Depth</i>	1 370	m	Entrada
	<i>c</i>	8,06637	MPa	Salida
<i>Mohr-Coulomb Fit</i>	<i>phi</i>	48,4496	degrees	Salida
	<i>sigt</i>	-1,06603	MPa	Salida
<i>Rock Mass Parameters</i>	<i>sigc</i>	32,7162	MPa	Salida
	<i>sigcm</i>	60,5336	MPa	Salida
	<i>Em</i>	31622,8	MPa	Salida

Obteniéndose los resultados de los parámetros para el macizo rocoso como se muestra a continuación. Ver figura 30.

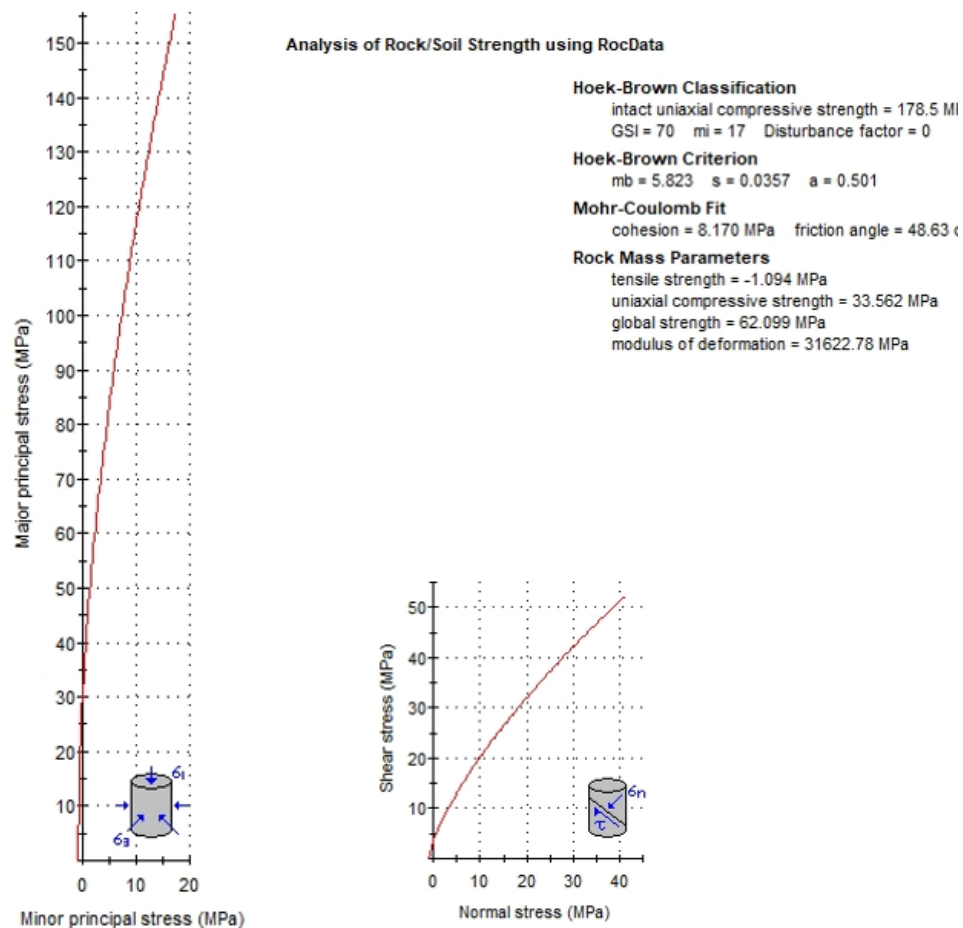


Figura 30. Parámetros para el macizo rocoso.

4.5.3. Análisis con el Phase2

A continuación, se muestra figuras que describen el área in - situ del cruce de la zona de estudio, donde se puede ver la veta esperanza y el nivel freático (Ver Figura 31).

Tabla 60.
Análisis con el Phase2.

Contenido	Dato	Unidad
Tipo de elasticidad	Isotrópico	
Módulo de <i>Poisson</i>	0.25	
Módulo de <i>Young</i>	64000	
Densidad	0.027	MN/m ³
Criterio de falla	<i>Hoek y Brown</i>	
Resistencia a la roca intacta	178.74	Mpa
Parámetro <i>mb</i>	5.82	
Parámetro <i>s</i>	0.035	
Parámetro de dilatación	0	
Parámetro residual <i>mb</i>	2	
Parámetro residual <i>s</i>	0.01	

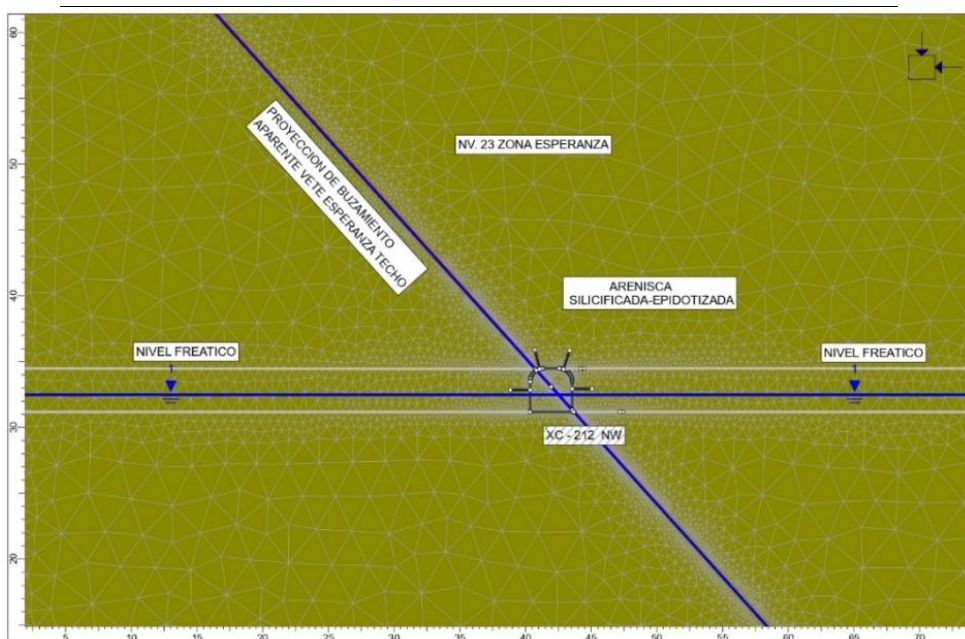


Figura 31. Sección transversal del XC-212 NW del Nv. 23, mostrando el nivel freático de la veta de la mina Casapalca.

En la figura 31, se tiene el cruce donde se puede ver el nivel freático, ya que uno de los factores influyentes de la zona de estudio es la presencia de agua subterránea siendo este un gran problema para continuar con las actividades normales del ciclo de minado.

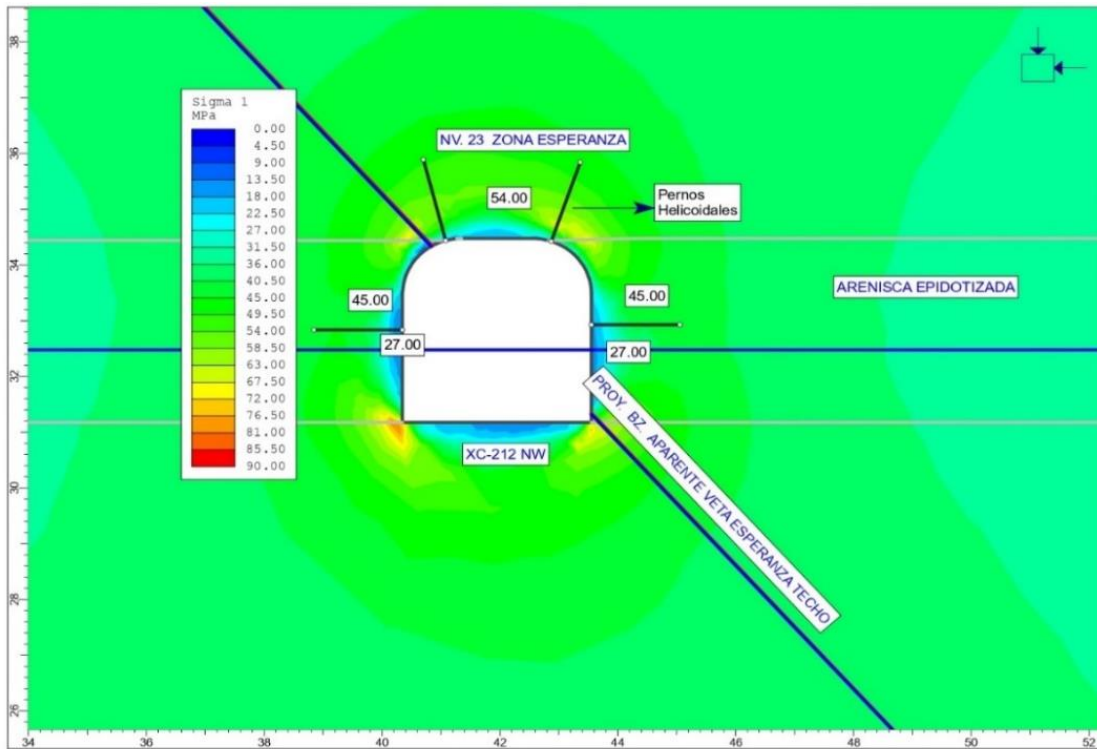


Figura 32. Relación esfuerzo principal y como actúa alrededor del crucero.

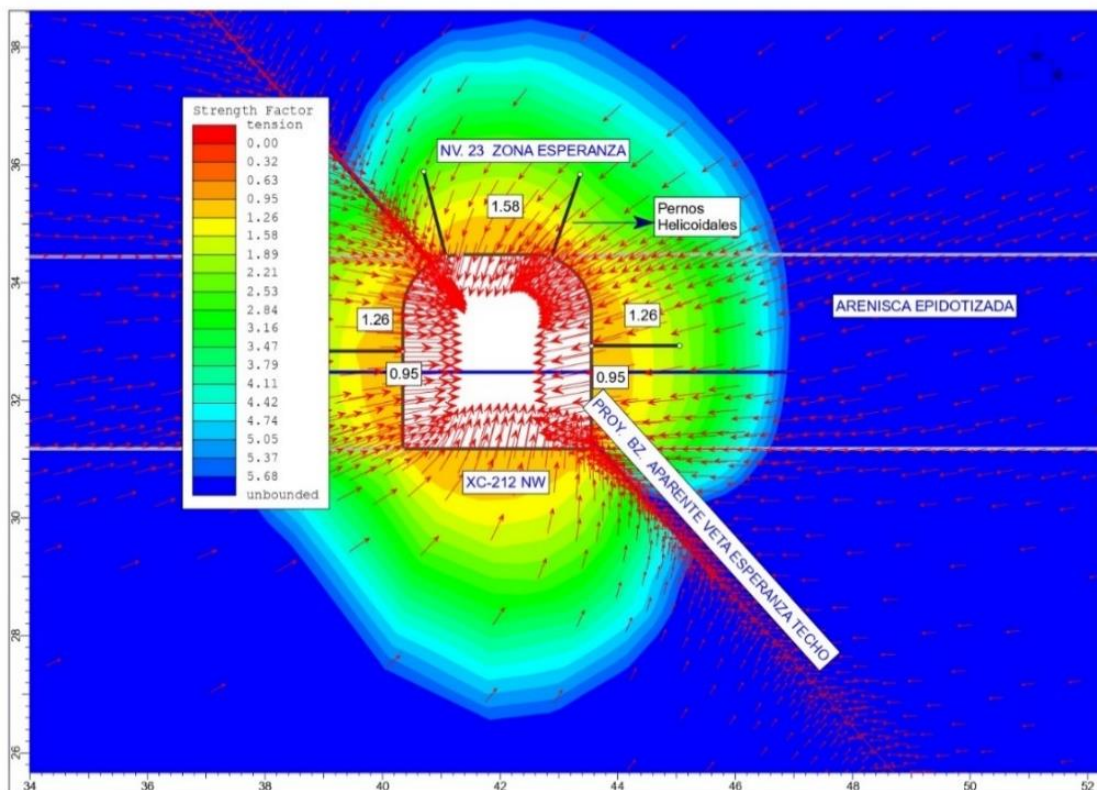


Figura 33. Se muestra una mayor concentración de areolas con esfuerzos horizontales indicando relajamiento del macizo rocoso a largo plazo.

En el cruce de estudio en el inicio de ciclo de minado en cada guardia se tiene que realizar taladros de alivio a fin de que pueda hacer la liberación de los esfuerzos, esto se realiza en los hastiales derecho e izquierdo de la labor.

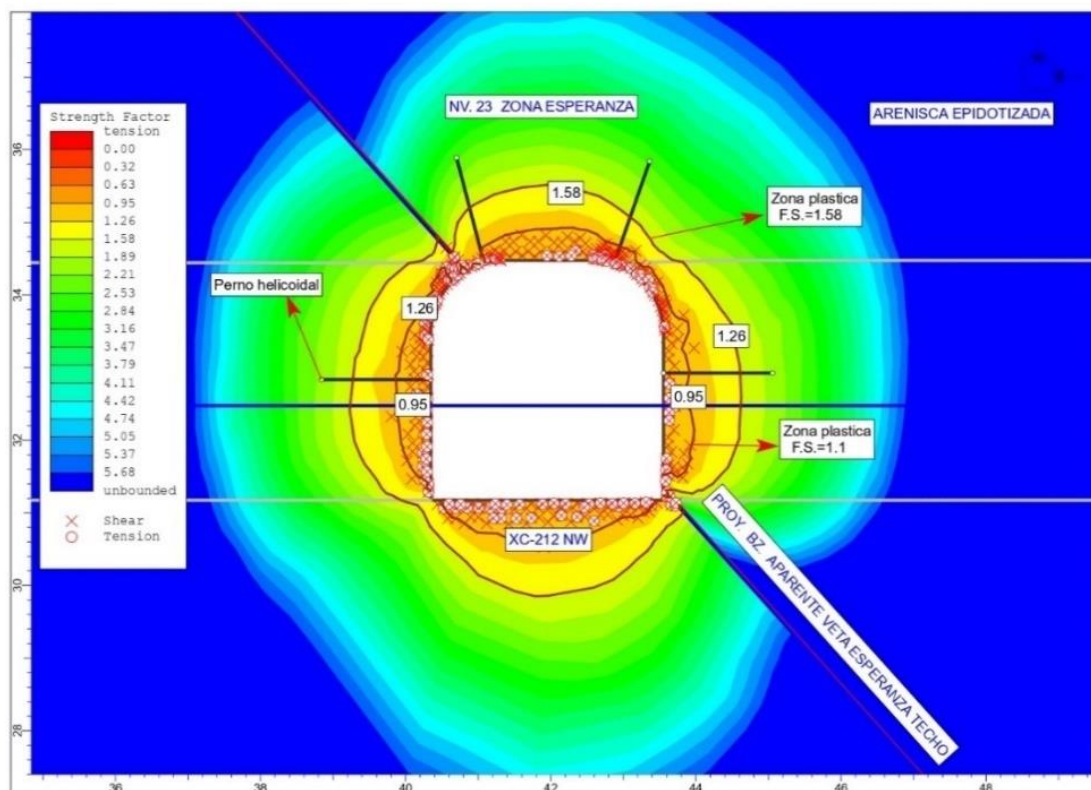


Figura 34. Vista de los esfuerzos de corte y tensión, además del factor de seguridad.

En la figura 34, se tiene el esquema de esfuerzos de corte y tensión que afectan a la excavación, y que son usados para determinar la zona plástica del cruce. La zona plástica calculada esta con un factor de seguridad de 1.1 y para poner el sostenimiento se considera una zona plástica con factor de seguridad de 1.58, a fin que los pernos helicoidales trabajen en el macizo rocoso.

4.6. Discusiones

- En relación a las condiciones de presencia de agua, Rojas (2008), indica q los niveles -100 y -200 se encuentran en condiciones secas, pero en situaciones se tiene humedad y goteos esporádicos que son por consecuencia del agua soltada a causa de la perforación con los equipos SIMBA H1254. Lo cual esta agua en consecuencia ocasiona condiciones adversas a la estabilidad de la excavación.

También indica que las excavaciones que fueron usado para su investigación se realizó en análisis de esfuerzo y deformaciones que sufre las excavaciones subterráneas estimando un esfuerzo vertical de 4 MPa y una constante de Shorey “k” de 1.

Para el caso de nuestra investigación en el cruce 212 se tiene que las progresivas 4 y 5 están en condiciones de agua con caudales fuertes y realizando el análisis geomecánico se comprobó que no causa inestabilidad significativa en la excavación, esto se comprobó usando la clasificación del RMR del 76 y 89 donde se usó el gráfico de Land que es aplicado a rocas duras, como es el caso nuestro, donde dio como resultado que la excavación se encuentra en una zona estable. Además, se sabe que esta labor de avance se encuentra a 1380 metros y nuestro cruce aún no ha sufrido las explosiones de rocas solo ha tenido problemas de relajamiento de rocas y crujido, por lo que se realiza taladros de alivio alrededor de la excavación a fin de controlar estos problemas descritos, para el caso de investigación se tiene una constante de shorey “k” de 0.89.

- En relación a la clasificación geomecánica, Chura (2006), en la ejecución del presente proyecto nos da a conocer que, según el RMR89 de Bieniawski, da como resultado una calidad de tipo III, roca regular en pizarra y calidad buena tipo II en cuarcita, el dominio estructural de la caracterización geomecánica en ambas calidades de rocas se muestra es un mecanismo de falla de tipo cuña, debido a un comportamiento de discontinuidades de dos a tres familias presentes.

Las clasificaciones geomecánicas usadas en la investigación presentada fueron el RMR de Bieniawski, el índice Q de Barton y el índice GSI de Hoek, para lo cual se realizó una caracterización geomecánica del cruce a fin de determinar el tipo de roca, donde resultó un RMR de 59.4 estando relacionado como roca buena, un Q de 11.4 y que también resulta como roca buena y un GSI de 53.4 entonces en base a estos datos se puede realizar el soporte de la excavación. Entonces comparando con, Chura (2006), resulta que se usaron las mismas clasificaciones

geomecánicas para poder ver la calidad de la roca y recomendar un soporte adecuado. Los parámetros geomecánicos a considerar dentro de la caracterización serán las propiedades de las discontinuidades y las propiedades del macizo rocoso el cual dará a conocer zonas y dominios geotécnicos.

- Las características estructurales y geológicas de la zona de estudio, Soto (2016), determinaron las clasificaciones de Roca RMR y Q, además determinaron la clasificación de los suelos (material fluvio glaciar) presentes en el portal de entrada y de salida del túnel. Dichas clasificaciones determinaron el tipo de sostenimiento a utilizar en los tramos de Roca según las recomendaciones de Bieniawski y Barton.

Para nuestra investigación se usaron las mismas clasificaciones geomecánicas así como también se mencionó en Chura (2006), ya que para poder determinar la calidad de roca y poder aplicar el soporte es importante aplicar las clasificaciones geomecánicas ya que se considera las características estructurales y geológicas de la zona de estudio.

CONCLUSIONES

Se determinó las condiciones del macizo rocoso mediante el uso de clasificaciones geomecánicas RMR, Q y GSI y también usando el software Phase2 se encontró como resultados del análisis geomecánico que el crucero 212 del nivel 23 se tiene condiciones estables en el macizo rocoso y de acuerdo al sostenimiento recomendado, no se presentará problemas de caída de roca.

Se realizó un mapeo geomecánico del crucero 212 del nivel 23 en la zona esperanza donde se aplicaron las clasificaciones geomecánicas a fin de tener un análisis geomecánico y se obtuvieron como resultados el RMR de 59.4, Q de Barton de 11.47 y el índice de GSI de 53.4 lo que indica que el crucero se encuentra en un macizo rocoso de buena calidad, también se usó el software Phase2 y el Dips donde resulto que se tiene un factor de seguridad 1.58 aplicando sostenimiento y un factor de seguridad de 1.11 sin sostenimiento, siendo en ambos casos un zona de trabajo seguro.

Para determinar las condiciones de estabilidad en el crucero 212, se aplicó el método de Lang donde se determinó la clasificación del RMR del año 1976 para la progresiva 3 un RMR de 52 y para la progresiva 5 un RMR de 42 y se usó el ancho del avance que es 3.5 m y aplicando el grafico de Lang, resulto que en el crucero 212 las progresivas 3 y 5 resulto como inestable esto porque tiene factores influyentes en la roca.

Se determino como sostenimiento la aplicación de mallas y pernos en el crucero 212, esto es debido que las clasificaciones geomecánicas como el RMR, Q y GSI dan como resultado una roca buena y también usando el phase2 se llega a un factor de seguridad de 1.58 con sostenimiento que básicamente son indicadores que en el macizo rocoso del crucero 212 son rocas de buena calidad a pesar de los factores influyentes que existe.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar ensayos de campo y laboratorio continua de acuerdo al avance del crucero 212 para realizar una comparación de cálculos y comportamiento del terreno a fin de estimar los resultados obtenidos.

Se recomienda hacer mapeos geomecánicos más detallados a fin de ofrecer condiciones óptimas de seguridad a los colaboradores de Cía. minera Casapalca.

Se recomienda usar el grafico de Lang para saber la estabilidad de las excavaciones en otras labores ya que tiene un uso práctico y rápido.

Se recomienda usar este análisis geomecánico al momento de planear la construcción de otras labores de avance, desarrollo y tajeos a fin de determinar las condiciones del macizo rocoso y ver que el factor de seguridad cumpla el estándar.

BIBLIOGRAFÍA

- Aquino, J. L. (2018). *“Evaluación geomecánica del macizo rocoso en la unidad de producción Orcopampa, para determinar un método de minado alternativo para la explotación en vetas angostas.”* Universidad Nacional de Ingeniería.
- Barton. (1974). *Correlación entre el índice RMR de Bieniawski y el índice Q de Barton. Informes de la Construcción, Vol. 69, 5, 14.* España.
- Belandria, N., & Bongiorno, F. (2012). *Clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos segun: Bieniawski, Barton, Hoek y Brown.* Colombia: Universidad de los andes.
- Berroa Suarez (2016), *“Optimización de las operaciones mineras mediante la profundización de la rampa negativa entre los niveles 2900-2650 VANKAR EIRL SAC – Minera Aurífera Retamas”*
- Bieniawski. (1989). *Evaluation of the deformation modulus of rock masses using RMR,* (Septima Ed). USA.
- Bordehore, L. J. (2010). *Clasificaciones geomecánicas y diseño empírico de sostenimiento,* (Segunda Ed). USA. 2, 23.
- Centeno, J. P. (2014). *Aplicación del sostenimiento estructural en Mina Ticlio.* Universidad Nacional de Ingeniería.
- Chura, W. L. (2006). *Caracterización geomecánica del macizo rocoso y su aplicación en el diseño de sostenimiento en labores de desarrollo de la unidad económica administrativa Ana María – La Rinconada.* Universidad Nacional del Altiplano.
- Flores, H. Z. (2007). *Aplicación práctica de la geomecánica en operación minera.* Universidad Nacional de Ingeniería.
- Galera, J. M., Alvarez, M., & Bieniawski, Z. T. (1979). Evaluation of the deformation modulus of rock masses using RMR. Comparison with dilatometer test. *USA, 1, 21.*
- Gutiérrez, L. Q. (2016). *Diseño de estabilidad de taludes para el nivel de resistencia al corte en el frente de minado del proyecto San Antonio y María – Ananea.* Universidad Nacional del Altiplano.
- Gutierrez, J. D. F. et al., (2017). Correlation between *Bieniawski’s* RMR index and Barton’s Q index in fine-grained sedimentary rock formations (Vol II). España.
- Huaranga, P. C. (2016). *Sismicidad en minería: análisis, interpretación y aplicación de controles - caso mina Yauliyacu.* Universidad Nacional de Ingeniería.

- LAVteam. (2014). Rocscience phase2 (Vol IV). Canada.
- Lang, B., & Bieniawski. (1994). *Critical Span Graph and Problem Statement – RMR 1976*. (Vol I). Canada.
- Medina, V. H. (2017), *Diseño de cámaras y pilares basado en las características geomecánicas del macizo rocoso en la Corporación Minera Ananea S.A.* Universidad Nacional del Altiplano.
- Moscoso, H. G., & Sacha, E. I. (2015). *Estudio comparativo entre la clasificación geomecánica de índice de resistencia geológica y rango del macizo rocoso en el sostenimiento de la masa rocosa.* Universidad Nacional de Huancavelica.
- Murillo, A. B. (2008). *Geomecánica aplicada en la prevención de pérdidas por caída de rocas mina Huanzalá - Cía. Minera Santa Luisa.* Universidad Nacional De Ingeniería.
- OSINERGMIN. (2017). *Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas* (Primera Ed). Lima.
- Palacios, J. E. Z. (2010). *Geomecánica en profundización mina de consorcio minero horizonte S.A. Unidad Parcoy.* Universidad Nacional de Ingeniería.
- Pérez Enríquez (2012), “Mejoras en el 2011 en la unidad Uchucchacua de la compañía de minas Buenaventura S.A.A”.
- Pomareda, E. S. L. (2016). *Estudio geotécnico aplicando modelos numéricos minería subterránea.* Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Raul, F. C. (2015). *Proyecto de profundización del pique vertical 790 oroya del nivel 11 al 18 Unidad Minera Americana Cia Minera Casapalca S.A.* Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga.
- Rodríguez, G. (2018). *subterránea I manejo del software phase2 - Rocscience.*
- Rojas, N. D. C. (2008). *Geomecánica en el minado subterráneo mina condestable.* Universidad Nacional de Ingeniería.
- Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía. (2014). *Manual de geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea* (Vol. I). Peru: Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía.
- Soto, A. C. (2016). *Diseño de sostenimiento en el túnel Wayrasencca – Ollachea.* Universidad Nacional del Altiplano.
- Tapahuasco, G. M. C. (2015). *Estudio de estabilidad de taludes en los macizos rocosos de la*

carretera Ticaco Candarave en las progresivas: 124+560 a 129+00KM. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

Tauta, J. F. C. (2009). Strength to the cutting in discontinuities with different degrees of roughness, *19*, 25.

Vallejo, L. C. et al., (2014). *Luis I. Gonzalez de Vallejo* (Vol II). Lima - Perú.

Viviana, L. et al., 2011). Estimation of mechanical properties of rock using artificial intelligence. España.

ANEXOS