



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



**DISEÑO DE PILARES MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN
GEOMECÁNICA DE LA MASA ROCOSA EN LA MINA
WILSANDER DE LA CORPORACIÓN MINERA
ANANEA S.A.**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. YEP IVAN AQUINO NEYRA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PUNO - PERÚ

2021



DEDICATORIA

A Dios por darme la dicha de tener a mi familia que es mi activo máspreciado, de vivir y disfrutar cada partida diaria a su lado. Por abonarme reservas de salud para lograr mis objetivos, y subvencionar infinita bondad y amor.

*Con amor y admiración a mis padres **Carmen Rosa Neyra Chambilla** y **Francisco Juan Aquino Venturo**, desde que nací e incluso antes, ya buscaban formas de entregarme lo mejor. Han trabajado duro, y sin importar el cansancio siempre tienen una sonrisa que ofrecer, me enseñaron que el mejor camino es el correcto. Los amo.*

*Entre senderos oscuros y nevados, dejamos huella en la roca, buscando que nada derrumbe las esperanzas, y que no sepulte nuestros anhelos. Minero sigue soñando cielo arriba en las noches estrelladas con un filón de amor. A mi filón de amor **Maritza Lucero Quispe Monteagudo**.*

Yep Ivan Aquino Neyra



AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi alma mater, la Universidad Nacional del Altiplano Puno, a la Facultad de Ingeniería de Minas, por haberme dado la oportunidad de alcanzar uno de mis objetivos.

A todo el personal docente y administrativo de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano, en especial al Dr. Jorge Gabriel Durant Broden, gracias por las enseñanzas impartidas y la dedicación otorgada, por el apoyo constante para el desempeño de un buen trabajo y el logro de mis metas.

Mi agradecimiento a la contrata minera Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A., por haberme dado la oportunidad de desarrollar este proyecto de investigación en su infraestructura.

Yep Ivan Aquino Neyra



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 16

ABSTRACT..... 17

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA 18

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 19

1.2.1. Problema general 19

1.2.2. Problemas específicos 19

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... 19

1.3.1. Objetivo general 19

1.3.2. Objetivos específicos 20

1.4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS 20

1.4.1. Hipótesis general 20

1.4.2. Hipótesis específicas 20

1.5. VARIABLES 20

1.5.1. Variable independiente 20

1.5.2. Variable dependiente 21

1.6. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 21

1.6.1. Aplicabilidad 21



1.6.2.	Generación de nuevos conocimientos.....	21
1.6.3.	Limitaciones del estudio	21
1.6.4.	Viabilidad del estudio	22

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	23
2.2.	BASES TEÓRICAS	26
2.2.1.	Diseño Geomecánico	26
2.2.2.	Diseño de pilares.....	28
2.2.3.	Determinación del esfuerzo inducido	30
2.2.4.	Diseño de pilares en la Mina Wilsander	30
2.2.5.	Determinación de la calidad del macizo rocoso mediante la caracterización geomecánica	31
2.2.6.	Diseño empírico de pilares considerando la calidad del macizo rocoso.....	31
2.2.7.	Caracterización del macizo rocoso	33
2.2.8.	Resistencia a la Compresión Uniaxial	34
2.2.9.	Uso de los datos de la RCU de otras zonas.....	34
2.2.10.	Resistencia a la compresión uniaxial con el esclerómetro.....	35
2.2.11.	Determinación de la resistencia en el diseño de pilares.....	36
2.2.12.	Fórmulas para determinar la resistencia de los pilares	37
2.2.13.	Condiciones geomecánicas y dimensiones de minado	38
2.2.14.	Tipos de cámaras y pilares.....	39
2.2.15.	Desempeño de las fórmulas	39
2.2.16.	Determinación del esfuerzo sobre el pilar	40
2.2.17.	Evaluación de la recuperación.	41
2.2.18.	Tensiones verticales inducidas.....	41



2.2.19.	Determinación del factor de seguridad	42
2.3.	CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE RMR DE BIENIAWSKI	43
2.3.1.	Parámetros de RMR	44
2.4.	DEFINICIONES CONCEPTUALES	48
2.4.1.	Roca pizarra	48
2.4.2.	Pilar en una excavación subterránea	48
2.4.3.	Pilares en función al tiempo.....	48
2.4.4.	Tipos de pilares	48
2.4.5.	Roca intacta.....	48
2.4.6.	Roca estratificada.....	49
2.4.7.	Macizo rocoso	49
2.4.8.	Estructura de masa rocosa.....	49
2.4.9.	Zonificación geomecánica	49
2.4.10.	Geomecánica.....	50
2.4.11.	Caracterización geomecánica	50
2.4.12.	Dominio estructural	50
2.4.13.	Discontinuidades.....	51

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	52
3.1.1.	Fases de la investigación.....	52
3.2.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	52
3.3.	NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	53
3.4.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	54
3.4.1.	Población	54
3.4.2.	Muestra	55



3.5.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	56
3.6.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	56
3.6.1.	Recolección de datos por fuentes primarias, secundarias y terciarias	56
3.6.2.	Técnicas de análisis de datos	58
3.6.3.	Técnicas de procesamiento de la información	58
3.6.4.	Codificación.....	59
3.6.5.	Tabulación	59
3.6.6.	Instrumentos.....	59
3.6.7.	Aspectos éticos	60
3.7.	ÁMBITO DE ESTUDIO	60
3.7.1.	Ubicación	60
3.7.2.	Accesibilidad.	61
3.7.3.	Clima y vegetación	61
3.7.4.	Recursos Humanos	61
3.7.5.	Estratigrafía local.....	61
3.7.6.	Recursos naturales	62
3.7.7.	Formación Sandia	62
3.7.8.	Formación Ananea.....	62
3.7.9.	Formación del yacimiento	63
3.7.10.	Tectónica.....	63
3.7.11.	Fallamiento	63
3.7.12.	Geología económica	63
3.7.13.	Geología de minas	64



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO	65
4.1.1. Caracterización geomecánica mediante RMR de Bieniawski.	65
4.1.2. Propiedades físicas de las muestras	67
4.1.3. Determinación de la RCU por el método destructivo	68
4.1.4. Determinación de la RCU por el método no destructivo	69
4.1.5. Resultados de la RCU por el método no destructivo	69
4.1.6. Evaluación de los resultados por el método destructivo y no destructivo.	71
4.1.7. Determinación del índice RQD.....	71
4.1.8. Determinación del RMR básico.....	71
4.1.9. Determinación del RMR corregido.....	72
4.1.10. Avance paralelo a las discontinuidades	73
4.1.11. Demostración de la primera hipótesis específica.....	74
4.1.12. Discusiones respecto a la calidad del macizo rocoso	74
4.2. DISEÑO DE LOS PILARES	75
4.2.1. Condiciones de minado actual	75
4.2.2. Evaluación del esfuerzo inducido	75
4.2.3. Esfuerzo vertical	75
4.2.4. Cálculo del esfuerzo inducido para cámaras y pilares cuadrados.....	78
4.2.5. Diseño de los pilares con cámara de 2.50 m x 2.50 m.....	78
4.2.6. Diseño de los pilares con cámara de 3.00 m x 3.00 m.....	91
4.2.7. Diseño de los pilares con cámara de 3.50 m x 3.50 m.....	103
4.2.8. Resumen del diseño de los pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 2.50 m x 2.50 m.	115
4.2.9. Resumen del diseño de los pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 3.00 m x 3.00 m.	117



4.2.10.	Resumen del diseño de los pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 3.50 m. x 3.50 m.	117
4.2.11.	Diseño de los pilares considerando el índice RMR de Bieniawski	118
4.2.12.	Resumen de la evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales para cámara de 2.50 m x 2.50 m.	123
4.2.13.	Resumen de la evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales para cámara de 3.00 m. x 3.00 m.	123
4.2.14.	Resumen de la evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales para cámara de 3.50 m x 3.50 m.	124
4.2.15.	Discusiones respecto al diseño de pilares	125
V.	CONCLUSIONES.....	128
VI.	RECOMENDACIONES	129
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130

Área : Ingeniería de Minas.

Tema : Mecánica de rocas, geomecánica, geotecnia.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 26 de febrero de 2021



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Geometría de un pilar in-situ.....	27
Figura 2. Falla progresiva del pilar con una relación original de w/h de 1.7.	28
Figura 3. Pilar que adopta la forma típica de reloj de arena.	29
Figura 4. Distribución de los pilares y sus esfuerzos inducidos.	29
Figura 5. Proyección del pilar sobre la superficie.	30
Figura 6. Comparación de las fórmulas analizadas según su razón w/h	33
Figura 7. Efecto forma de los pilares.	37
Figura 8. Efecto tamaño de los pilares.	37
Figura 9. Representación gráfica del método del área tributaria.....	40
Figura 10. Representación gráfica del esfuerzo sobre el pilar.....	40
Figura 11. Geometría y distribución de los pilares cuadrados.....	42
Figura 12. Variación de las tensiones inducidas de acuerdo a la distancia del frente de la excavación.....	43
Figura 13. Flujograma de las técnicas e instrumentos de recolección de datos	57
Figura 14. Identificación de las discontinuidades en la progresiva 402,00 a 420,00 m. 66	
Figura 15. Presencia de cuñas en el techo.	66
Figura 16. Densidad de los polos.....	66
Figura 17. Orientación de 4 familias.	67
Figura 18. Diagrama de Rosseto.....	67
Figura 19. Resultado del laboratorio de la RCU en la FIM de la UNA.	69
Figura 20. Toma de los datos con el esclerómetro.	69
Figura 21. Avance paralelo a las discontinuidades.....	73
Figura 22. Registro de la variación de la geometría del pilar para cámara de 2.50 m x 2.50 m.....	76



Figura 23. Registro de la variación de la geometría del pilar para cámara de 3.00 m. x 3.00 m.....	77
Figura 24. Registro de la variación de la geometría del pilar para cámara de 3.50 m x 3.50 m.....	78
Figura 25. Diseño de los pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 2.50 m x 2.50 m.....	116
Figura 26. Diseño de los pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 3.00 m x 3.00 m.....	117
Figura 27. Diseño de los pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 3.50 m x 3.50 m.....	118
Figura 28. Evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales con cámara de 2.50 m x 2.50 m.....	123
Figura 29. Evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales con cámara de 3.00 m. x 3.00 m.....	123
Figura 30. Evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales con cámara de 3.50 m x 3.50 m.....	125
Figura 31. Ubicación de la UEA Ana María	137
Figura 32. Histograma del espaciado de las 4 familias.	138
Figura 33. Histograma de la persistencia de las 4 familias.....	139
Figura 34. Histograma de la apertura de las 4 familias.	140
Figura 35. Histograma de la rugosidad de las 4 familias.....	141
Figura 36. Histograma del relleno espesor de las 4 familias.	142
Figura 37. Histograma de las alteraciones de las 4 familias.....	143
Figura 38. Histograma de la presencia de agua subterránea de las 4 familias.....	144
Figura 39. Propiedades físicas de la muestra de roca en la Mina Wilsander.....	145



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Criterio de aceptabilidad para pilares mineros.	43
Tabla 2. Clase y tipo de roca según el RMR.....	44
Tabla 3. Calidad del macizo rocoso según el RQD	45
Tabla 4. Ábaco de las características de las discontinuidades.	45
Tabla 5. Ábaco de valoración de la condición de las discontinuidades.....	46
Tabla 6. Ábaco de valoración según Bieniawski 1989.....	46
Tabla 7. Ábaco para corrección por orientación propuesto por Bieniawski 1989.....	47
Tabla 8. Ajustes por orientación de las juntas.	47
Tabla 9. Operacionalización de variables.	56
Tabla 10. Acceso al centro poblado de La Rinconada.....	61
Tabla 11. Resumen del dominio estructural en la progresiva 402.00 m - 420.00 m.	68
Tabla 12. Valores obtenidos con el esclerómetro en la progresiva 402.00 m a 420.00 m.	70
Tabla 13. Valores más altos obtenidos con el esclerómetro tipo L.	70
Tabla 14. RMR básico de la Progresiva 402.00 m a 420.00 m.....	72
Tabla 15. RMR corregido de la Progresiva 402.00 m a 420.00 m.	72
Tabla 16. Calificación del macizo rocoso en la progresiva 402.00 m a 420.00 m.	73
Tabla 17. Calidad del macizo rocoso.....	73
Tabla 18. Registro de la variación de la geometría del pilar para cámara de 2.50 m x 2.50 m.....	76
Tabla 19. Registro de la variación de la geometría del pilar para cámara de 3.00 m x 3.00 m.....	77
Tabla 20. Registro de la variación de la geometría del pilar para cámara de 3.50 m x 3.50 m.....	77
Tabla 21. Características del pilar de 1.50 m x 1.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m. .	80



Tabla 22. Características del pilar de 2.00 m x 2.00 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m. .	81
Tabla 23. Características del pilar de 2.50 m x 2.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m. .	83
Tabla 24. Características del pilar de 3.00 m x 3.00 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m. .	84
Tabla 25. Características del pilar de 3.50 m x 3.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m. .	86
Tabla 26: Características del pilar de 4.00 m x 4.00 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m. .	87
Tabla 27: Características del pilar de 4.50 m x 4.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m. .	89
Tabla 28. Características del pilar de 5.00 m x 5.00 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m. .	90
Tabla 29. Características del pilar de 1.50 m x 1.50 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m. .	92
Tabla 30. Características del pilar de 2.00 m x 2.00 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m. .	94
Tabla 31. Características del pilar de 2.50 m x 2.50 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m. .	95
Tabla 32. Características del pilar de 3.00 m x 3.00 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m. .	97
Tabla 33. Características del pilar de 3.50 m x 3.50 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m. .	98
Tabla 34. Características del pilar de 4.00 m x 4.00 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m. .	100
Tabla 35. Características del pilar de 4.50 m x 4.50 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m. .	101
Tabla 36. Características del pilar de 5.00 m x 5.00 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m. .	103
Tabla 37. Características del pilar de 1.50 m x 1.50 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m. .	105
Tabla 38. Características del pilar de 2.00 m x 2.00 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m. .	106
Tabla 39. Características del pilar de 2.50 m x 2.50 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m. .	108
Tabla 40. Características del pilar de 3.00 m x 3.00 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m. .	109
Tabla 41. Características del pilar de 3.50 m x 3.50 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m. .	111
Tabla 42. Características del pilar de 4.00 m x 4.00 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m. .	112
Tabla 43. Características del pilar de 4.50 m x 4.50 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m. .	114
Tabla 44. Características del pilar de 5.00 m x 5.00 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m. .	115
Tabla 45. Diseño de los pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 2.50 m x 2.50 m.....	116
Tabla 46. Diseño de los pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 3.00 m x 3.00 m.....	116



Tabla 47. Diseño de los pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 3.50 m x 3.50 m.....	117
Tabla 48. Características del ancho del pilar de 1.50 m x 2.20 m.	119
Tabla 49. Características del ancho del pilar de 2.00 m x 2.20 m.	119
Tabla 50. Características del ancho del pilar de 2.50 m x 2.20 m.	120
Tabla 51. Características del ancho del pilar de 3.00 m x 2.20 m.	120
Tabla 52. Características del ancho del pilar de 3.50 m x 2.20 m.	121
Tabla 53. Características del ancho del pilar de 4.00 m x 2.20 m	121
Tabla 54. Características del ancho del pilar de 4.50 m x 2.20 m.	122
Tabla 55. Características del ancho del pilar de 5.00 m x 2.20 m	122
Tabla 56. Evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales con cámara de 2.50 m x 2.50 m.....	124
Tabla 57. Evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales con cámara de 3.00 m x 3.00 m.....	124
Tabla 58. Evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales con cámara de 3.50 m x 3.50 m.....	125
Tabla 59. Matriz de consistencia	134
Tabla 60. Registro de las discontinuidades.....	135
Tabla 61. Registro de las discontinuidades (continúa).	136



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

CMASA	: Corporación Minera Ananea Sociedad Anónima.
FIM	: Facultad de Ingeniería de Minas
FS	: Factor de Seguridad.
GPa	: Giga pascales.
GSI	: Índice de estructura geológica.
Hp	: Altura de carga.
Ja	: Índice según la alteración en la superficie de las fracturas o su relleno.
Jr	: Índice según la rugosidad de la superficie de las fracturas.
Jw	: Coeficiente reductor por presencia de agua.
Lp	: Largo del pilar.
Lo	: Largo de la cámara.
MPa	: Mega pascales.
Q	: Índice tunelero de Barton.
RCU	: Resistencia a la compresión uniaxial.
RMRb	: Rock mass rating básico.
RMRc	: Rock mass rating ajustado.
RQD	: Rock quality designation.
SRF	: Stress reduction factor.
S _p	: Resistencia del pilar.
UNA	: Universidad Nacional del Altiplano.
W _o	: Ancho de la cámara.
W _p	: Ancho del pilar.
Ø	: Angulo de fricción.
σ _p	: Esfuerzo inducido.
σ _v	: Esfuerzo vertical sobre el sostenimiento.



RESUMEN

En la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A. se observó la ocurrencia de falla de pilares, lo que ocasiona la caída de rocas, debido a ello el objetivo fue diseñar pilares mediante la caracterización geomecánica de la masa rocosa. El método de investigación que se utilizó es el descriptivo ya que permite la descripción o identificación de cada uno de los componentes esenciales, y aplicado. Los resultados obtenidos de acuerdo a las mediciones y cálculos realizados son: La resistencia a la compresión uniaxial es 97.7 MPa, el índice de designación de la calidad de la roca es de 94%, el índice de calidad del macizo rocoso básico es 68 mientras que el índice de calidad del macizo rocoso ajustado es 56. Al aplicar el método de Lunder y Pakalnis se logra diseñar un pilar cuadrado con dimensiones de 2.50 m x 2.50 m y cámara cuadrada con dimensiones de 2.50 m x 2.50 m obteniendo que el valor del factor de seguridad es 1.37, dicho valor es cercano a 1.40 que es el más apropiado en las condiciones actuales de la operación de minado, sin embargo la recuperación es del 75%; Mientras que al aplicar la propuesta de Gonzales de acuerdo a un índice de calidad del macizo rocoso ajustado de 56 en un pilar cuadrado de 4.50 m x 4.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m el factor de seguridad es 1.20 con una recuperación del 59%; resultando este último el más apropiado considerando el factor de seguridad, ya que incluye la aplicación del índice RMR.

Palabras claves: Macizo rocoso, calidad, diseño, pilar, factor de seguridad.



ABSTRACT

At the Wilsander contract of the Corporación Minera Ananea S.A., pillars are failing, causing rocks to fall. Thus, the objective of this research is to determine the quality of rock mass at production work and design adequate pillars. The method employed is descriptive as it allows the description or identification of each of the essential components. The results of the measurements and calculations are: The Uniaxial Compressive Strength of the rock is 97.7 MPa, the rock quality designation index is 94%, the basic rock mass quality index is 68 and the adjusted quality index of the rock massif is 56. Applying the method established by Lunder and Palkanis, it is possible to design a square pillar of 2.50 m × 2.50 m for a square chamber of 2.50 m × 2.50 m and obtain a safety factor of 1.37, close to 1.40 which is the most appropriate value for actual conditions in the operation; however, recovery is only 75%. Whereas, when applying Gonzales proposal, for an adjusted rock mass quality index of 56, a square pillar of 4.50 m × 4.50 m and a chamber of 2.50 m × 2.50, we obtain a safety factor of 1.20 and a recovery of 59%. Thus, the latter is the most adequate design, considering the safety factor; since it includes the application of RMR index.

Keywords: Rocky massif, quality, design, pillar, safety factor.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

La Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A. se encuentra en el distrito de Ananea, provincia de San Antonio de Putina, tiene problemas de desprendimiento de rocas por agrietamiento, lajamiento y falla de la estructura de los pilares de auto soporte, lo que ocasiona la caída de rocas del techo de la labor de producción. El método de minado es por cámaras y pilares con circado, con ocasionales soportes de madera y pilares de roca in situ no sistemáticos como forma de auto soporte, este método se caracteriza por realizar el arranque de mineral estéril conformado por roca pizarra dejando la veta en el techo de la excavación y, posteriormente se realiza el arranque de la veta mineralizada conocido como circado dejando pilares de roca para sostener el techo.

En algunos pilares se presentan grietas naturales y artificiales, producidas por las voladuras y por procesos de ruptura progresiva que han generado el desprendimiento de rocas en vista de que los pilares no tienen dimensiones adecuadas para el soporte natural, el agrietamiento de pilares ocasiona el desprendimiento de rocas del techo de la labor de producción con circado.

Teniendo presente estos problemas de desprendimiento de rocas se plantea el método de la caracterización geomecánica de la masa rocosa para determinar su calidad, éste consiste en la evaluación minuciosa de las discontinuidades mediante la clasificación geomecánica de Bieniawski 1989, para diseñar un tamaño adecuado de pilares y cámaras.



De acuerdo a ello es posible diseñar pilares con dimensiones específicas a fin de evitar posibles fallas por la presencia de grietas en los pilares con daños a las instalaciones existentes en la labor minera, daños a los equipos y principalmente a los trabajadores.

Por lo que se considera una necesidad primordial plantear un diseño de pilares de auto soporte con las dimensiones adecuadas que garanticen la estabilidad de la masa rocosa y de ser necesario un sostenimiento apropiado conforme a la realidad geoes estructural del macizo rocoso.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

¿Cómo se pueden diseñar los pilares en la labor de producción con circado mediante la caracterización geomecánica de la masa rocosa en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo se puede caracterizar la masa rocosa para determinar su calidad en la labor de producción con circado en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.?
- ¿Cómo se pueden diseñar los pilares en la labor de producción con circado de acuerdo a la caracterización de la masa rocosa en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.?

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivo general

Diseñar los pilares mediante la caracterización geomecánica de la masa rocosa en la labor de producción con circado en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.



1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la calidad de la masa rocosa mediante la caracterización geomecánica en la labor de producción con circado en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.
- Diseñar los pilares en la labor de producción con circado de acuerdo a la caracterización de la masa rocosa en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.

1.4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

1.4.1. Hipótesis general

Mediante la caracterización geomecánica de la masa rocosa se logran diseñar los pilares en la labor de producción con circado en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.

1.4.2. Hipótesis específicas

- Mediante la caracterización geomecánica se logra determinar la calidad de la masa rocosa en la labor de producción con circado en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.
- Con la caracterización de la masa rocosa se logran diseñar los pilares en la labor de producción con circado en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.

1.5. VARIABLES

1.5.1. Variable independiente

Calidad del macizo rocoso de la labor de producción con circado en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.



1.5.2. Variable dependiente

Diseño de pilares en la labor de producción con circado en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.

1.6. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1. Aplicabilidad

Los resultados de esta investigación realizada en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A., son aplicables en: Operaciones mineras subterráneas con métodos de explotación por cámaras y pilares con soporte natural. Además son útiles para empresas mineras dedicadas a la extracción de recursos minerales por método de minado subterráneo que buscan evitar el desprendimiento de rocas.

1.6.2. Generación de nuevos conocimientos

Los resultados del diseño de pilares mediante la caracterización de la masa rocosa con dimensiones adecuadas para uso de soporte natural en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A., generarán nuevos conocimientos en la investigación científica, debido a que su versatilidad permite aplicar el método utilizado en cualquier excavación subterránea con sostenimiento natural mediante pilares, cabe indicar que en muchos casos puede requerir de un sostenimiento según las características del macizo rocoso. Al mismo tiempo constituye un aporte para todos aquellos que se dedican a la actividad minera subterránea.

1.6.3. Limitaciones del estudio

Las limitaciones más incidentes en el desarrollo del presente trabajo de investigación están en la disponibilidad de equipos para realizar las mediciones in situ, codificación de datos de entrada y salida; sin embargo, los resultados fueron satisfactorios.



Ya que se procuró que los datos de campo obtenidos del macizo rocoso sean los más representativos, considerando esta realidad en el presente trabajo de investigación se tomaron en cuenta datos primarios y secundarios.

1.6.4. Viabilidad del estudio

Considerando el minado por método subterráneo de cámaras y pilares con circado, el desarrollo del presente trabajo de investigación es viable porque existen problemas de desprendimiento de rocas del techo en la zona circundante a los pilares.

Además se observa el agrietamiento de los pilares en vista que las dimensiones son pequeñas y no adecuadas, debido a ello se presentan desprendimientos de rocas.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

En el presente trabajo se han revisado las investigaciones referidos al diseño empírico de pilares, por lo que constituyen el marco de referencia que permite ubicar el tema de investigación dentro del área del conocimiento general. Se tienen los siguientes antecedentes:

Medina V. (2017), indica que la Corporación Minera Ananea S.A. en la actualidad realiza la explotación de recursos minerales auríferos por el método convencional de cámaras y pilares, siendo la sección de la galería de extracción de minerales aproximadamente de 2.50 m x 2.00 m en el portal, y las dimensiones de cámaras de 6.00 m y pilares de 1.00 m. El objetivo del proyecto de investigación es trabajar teniendo el factor de seguridad por encima del valor mínimo aceptable 1.50, basado en las características geomecánicas del macizo rocoso se logra diseñar cámaras y pilares óptimos de 4.50 m de ancho de la cámara y 2.00 m de ancho del pilar, teniendo como resultado el factor de seguridad 2.40, esto dará una estabilidad en seguridad de operación, así no afectará la integridad física del personal, equipos y otros.

Castro A., Bustos Y., España X. (2010), mencionan que en Colombia son muy pocos trabajos de ingeniería sobre el diseño de pilares de roca en minería; se presenta el procedimiento y los resultados obtenidos para dimensionar los pilares rocosos de explotaciones subterráneas de vetas auríferas situadas en los Distritos Mineros de Segovia-Remedios en el Departamento de Antioquia. Se utilizó información de la resistencia a la compresión simple proveniente del ensayo de carga puntual y levantamientos geotécnicos (...).



Se encontraron mecanismos de ruptura de pilares y se proponen ábacos de diseño relacionando sus dimensiones, esfuerzo y resistencia por compresión, obteniéndose un factor de seguridad determinista.

Según Mori R. (2017), menciona que se ha hecho el análisis y estudio de la geometría de los pilares y el tajo, la calidad del macizo rocoso y el costo que implica considerar este método de recuperación. La geometría del tajo implica determinar la ineficiencia de algunos métodos, y la dimensión de los pilares y las cámaras permiten determinar el factor de seguridad del tajo, la geomecánica permite desarrollar las zonas de alto riesgo y la garantía de estabilidad al recuperar los pilares, así mismo también permite determinar el factor de seguridad del tajo, lo cual es una consideración importante para conocer la condición del tajo y el efecto frente a la aplicación del método de pilares artificiales. Y por último el costo que se genera al aplicar el método de recuperación de pilares con pilares artificiales, permitirá determinar si es rentable este método.

Según Ortiz O., Canchari G. (2013), afirman que el buen diseño de los pilares es de gran importancia para brindar sostenimiento de bajo costo y alta seguridad por largos periodos en la explotación minera subterránea. Es por lo tanto fundamental conocer las variables que influyen el comportamiento de los pilares subterráneos. Este estudio analiza las posibles variables que inciden en la resistencia y en la generación de esfuerzos de los pilares subterráneos en modelos de dos dimensiones.

El material utilizado para pruebas de laboratorio consta de placas transparentes birrefringentes sensibles a esfuerzos de compresión, tensión y corte. Ante la acción de esfuerzos, la placa genera bordes o franjas que representan niveles calibrados de esfuerzo. Se obtuvo dos modelos analíticos que pueden aplicarse en el dimensionamiento de pilares para sostenimiento minero subterráneo.



Según Yrarrazaval M. (2013), tradicionalmente la estimación de la resistencia de pilares de roca se efectúa mediante fórmulas empíricas, que relacionan la resistencia a la compresión uniaxial de la roca, la calidad de la roca y las dimensiones del pilar. El objetivo de este trabajo es realizar un estudio del desempeño estadístico de las formulas actuales utilizadas para el diseño de pilares de roca de manera que permita identificar las fórmulas más apropiadas. Se tiene un total de 267 casos históricos con información sobre geometría, calidad de la roca, profundidad y esfuerzo solicitante entre otros. Se considera como una condición estable cuando se obtiene un factor de seguridad sobre 1.4, siendo inestable para un factor de seguridad entre 1.0 y 1.4 y una condición de falla cuando la fórmula entrega un factor de seguridad menor a 1.0.

González, C., Álvarez, M., Menéndez A., et al. (2006), indican que los métodos de diseño de pilares en minas subterráneas se basan fundamentalmente en fórmulas empíricas que no toman en cuenta la calidad del macizo rocoso, esto los hace difíciles de aplicar en otro tipo de terrenos distintos a los utilizados para establecer cada fórmula empírica, el presente trabajo examina las fórmulas empíricas existentes para luego proponer una modificación de estas fórmulas ajustando la resistencia de los pilares en base al índice RMR, se analiza el factor de seguridad de los pilares para cada fórmula modificada y se realiza un estudio de falla por cortante si existen planos de debilidad, se calcularon los factores de seguridad de los pilares de una mina de mármol situada en Alicante, la introducción del índice RMR en las fórmulas da como resultado un mejor ajuste de la resistencia de cada pilar a las características del macizo rocoso.

Según García J.A. (2018), el avance en la investigación ha permitido desarrollar nuevas metodologías de diseño que no dejan de ser empíricas, los métodos de diseño para el método de minado Post-Pillar son escasos.



Una de las motivaciones de este trabajo es brindar una metodología que permita el diseño de rebajes para el método Post-Pillar con base en criterios de mecánica de rocas. Esta metodología parte de métodos analíticos tradicionales aplicados al diseño de rebajes para el método de Salones (cámaras) y Pilares, a partir de las geometrías obtenidas en los métodos tradicionales se generan modelos numéricos con las propiedades mecánicas del yacimiento. Los modelos numéricos permiten observar la estabilidad general del rebaje, el efecto de la esbeltez de pilares al avanzar la excavación y el efecto de confinamiento del relleno sobre los pilares.

Córdova D. (2005), argumenta respecto a la geomecánica en minado subterráneo, seguridad y economía, específicamente respecto a seguridad y economía indica que la reducción en los costos de rehabilitación de áreas inestables de pilares y cámaras representa un ahorro potencial por la no interrupción de la producción a causa de problemas de inestabilidad por falla de pilares, no se ocasiona una reducción de ganancia en la producción por la dedicación del personal a esta tarea en lugar de dedicarse a la rehabilitación de áreas inestables, se produce mayor recuperación del mineral por adecuados diseños geomecánicos. Considerar la extracción de minerales por métodos de minado subterráneo involucra la generación de un conjunto de excavaciones, de diferentes formas, tamaños y orientaciones, y que a su vez estas cumplen funciones específicas en el proceso productivo.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Diseño geomecánico

El diseño geomecánico de pilares según Puentes A., Villalobos S. y Villalobos F. (2008), en la minería subterránea es un tema que ha sido estudiado históricamente por muchos investigadores, aunque su uso fundamental se concentra mayormente en el método de explotación por cámaras y pilares.

En la actualidad se utilizan métodos empíricos, así como modelamiento numérico para lograr el diseño óptimo de pilares y que mejor se ajuste a las condiciones presentes en la mina en cuestión. Los métodos empíricos existentes se basan en el estudio de la relación entre la resistencia y la carga a la que estarían expuestos los pilares.

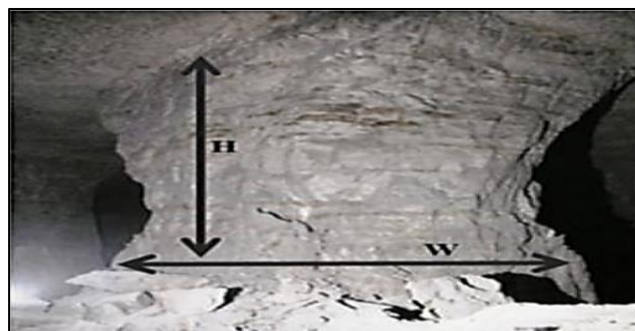
En minería subterránea, los pilares son la roca in-situ que queda entre dos o más excavaciones según Martin y Maybee, y, por lo tanto, son el principal soporte utilizado para resistir colapsos y hundimientos. Estos se encuentran distribuidos y diseñados de tal manera que se maximice la recuperación de la unidad de explotación a través de un método seguro y viable, por lo que su diseño debe basarse en un análisis de cargas y resistencias del macizo rocoso en estudio (como se citó en Puentes A., Villalobos S. y Villalobos F., 2008), ver Figura 1.

Para Villalobos (2015, como se citó en Puentes A., Villalobos S. y Villalobos F., 2008), la estabilidad de los pilares se estima mediante el factor de seguridad (FS), el cual se define a partir de la relación entre la resistencia del pilar (capacidad) con la carga o el esfuerzo vertical (solicitud) inducido que actúa sobre éste.

A partir de una compilación de las metodologías existentes se determinó la resistencia de pilares en roca dura, para posteriormente, utilizarlas en el caso particular del diseño de pilares en la mina el Teniente, ver Figura 2.

Figura 1

Geometría de un pilar in-situ.



Nota. Tomada de Puentes A. Villalobos S. y Villalobos F. (2008).

Figura 2

Falla progresiva del pilar con una relación original de w/h de 1.7.



Nota. Tomada de Puentes A. Villalobos S. y Villalobos F, (2008).

2.2.2. Diseño de pilares

Según Castro A., Bustos Y., España X. (2010), el planeamiento minero en vetas auríferas es altamente dependiente de la variabilidad geológica de la mineralización; en la pequeña minería esta variabilidad está caracterizada durante la propia explotación, las operaciones mineras se realizan según el método de cámaras y pilares, con ocasionales postes de madera, palancas de acero y pilares de roca in situ no sistemáticos en auto soporte, el método de cámara y pilares no sistemático se caracteriza por realizar el arranque de la veta mineralizada y de la roca de respaldos de manera parcial, dejando pilares de roca para sostener el techo. En estos casos, para Maybee (2000, como se citó en Castro A., Bustos Y., España X. 2010), hay tres modos de falla de pilares:

- Falla estructuralmente controlada,
- Falla por esfuerzos inducidos progresivos.
- Explosión de pilares.

Cuando en el pilar están presentes discontinuidades cuya resistencia al esfuerzo cortante es inferior a la componente de cizalla en ese plano, la discontinuidad se propagará por exceso de esfuerzo cortante a menos que el pilar sea reforzado, ver Figura 3. El objetivo del diseño de pilares es maximizar la recuperación de la unidad básica de explotación a través de un diseño seguro y viable.

El diseño de pilares debe obedecer a un análisis de las cargas (el esfuerzo inducido) y la resistencia del macizo rocoso, ver Figura 4.

Figura 3

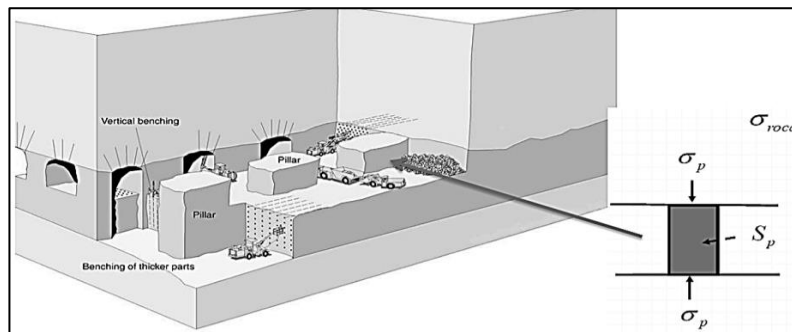
Pilar que adopta la forma típica de reloj de arena.



Nota. Tomada de Castro A., Bustos Y., España X. (2010).

Figura 4

Distribución de los pilares y sus esfuerzos inducidos.



Nota. Tomada de Puentes A. Villalobos S. y Villalobos F. (2008).

El problema está enfocado considerando globalmente los esfuerzos que se ejercen sobre un pilar, donde:

- σ_{roca} : Campo de esfuerzos presente en el macizo rocoso
- σ_p : Campo de esfuerzos actuando sobre el pilar
- S_p : Resistencia del pilar

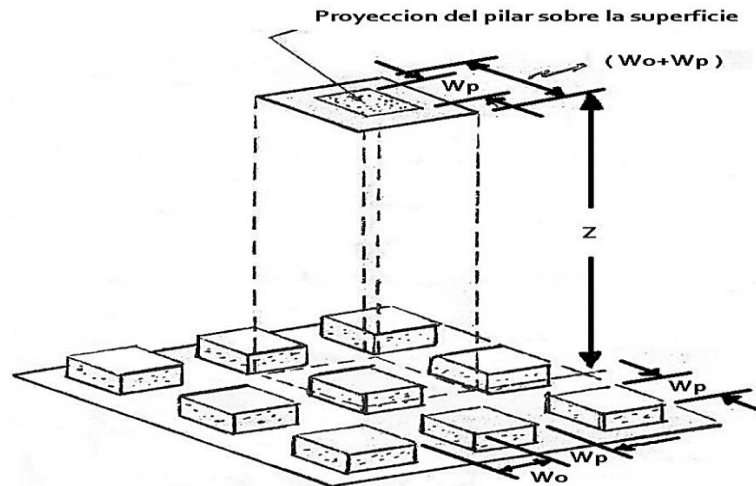
Sobre este enfoque se han desarrollado varias teorías como:

- Teoría de área atribuida (Área tributaria).
- Teoría del arco.
- Modelo de la cavidad creada en un medio infinito.

- Modelo de la viga o de la placa (cuando existen estratos horizontales).
- Métodos numéricos, con elementos finitos.

Figura 5

Proyección del pilar sobre la superficie.



Nota. Tomada de Puentes A. Villalobos S. y Villalobos F. (2008).

2.2.3. Determinación del esfuerzo inducido

Los esfuerzos inducidos se refieren al esfuerzo vertical de acuerdo a la geometría del pilar, se determinan considerando la carga litostática conocido como sobre carga que se encuentra por encima del excavación subterránea, en donde intervienen la densidad, gravedad, altura de la carga. Como se muestra en la fórmula:

$$\sigma_v = \gamma * g * Z$$

Donde:

- g: Gravedad
- Z: Altura de la sobrecarga
- γ : Densidad de la roca

2.2.4. Diseño de pilares en la Mina Wilsander

El diseño adecuado puede prevenir colapsos y hundimientos, el método de cámaras y pilares, según García J.A. (2006) se desarrolla comúnmente en filones de hasta 30° de buzamiento.



La falla de los pilares es debido a una sobreexplotación en la mina combinado con un mal diseño de pilares, al respecto, Salamon y Munro (1967, como se cita en García J.A., 2006) realizaron un retro-análisis para obtener una fórmula que representara la resistencia óptima de los pilares. Esto llevó a que otros autores realizaran estudios en minas donde los pilares presentaban fallas en su estructura en otras partes del mundo como Canadá, Suecia y Groenlandia, para el diseño de pilares existen distintas metodologías empíricas, estos métodos muchas veces no consideran la calidad del macizo rocoso y que solo se encuentra expuesto a compresión. Afirma, Mori R. (2017) que, por otro lado, muchas de las fórmulas utilizadas hoy en día sólo consideran la geometría del pilar y el valor de la compresión uniaxial de la roca (RCU) obtenido en laboratorio, pero no consideran la calidad de la roca o si presentan sistemas de discontinuidades.

2.2.5. Determinación de la calidad del macizo rocoso mediante la caracterización geomecánica

Para Álvarez L. (2017), la clasificación geomecánica de Bieniawski 1989 permite generar un criterio de evaluación para poder tomar las decisiones más apropiadas en cuanto al diseño de la fortificación, dimensionamiento de espacios subterráneos y pilares para una labor determinada, teniendo la información suficiente requerida, mediante una evaluación de los parámetros geomecánicos de dominio estructural del macizo rocoso. Cabe destacar que, en la fortificación y dimensionamiento general en la minería, la experiencia es muy importante a la hora de tomar una decisión.

2.2.6. Diseño empírico de pilares considerando la calidad del macizo rocoso

González (2006, como se citó en Puentes A., Villalobos S. y Villalobos F., 2008), realizó una extrapolación de la resistencia de la roca intacta modificando así la fórmula propuesta por Hedley y Grant y considerando la calidad del macizo rocoso mediante el RMR de Bieniawski.

Por lo que se entiende que la fórmula propuesta por González toma como base la fórmula propuesta por Hedley y Grant. Sin embargo, él modifica el valor de S_p igualándolo a la resistencia del macizo rocoso, la cual se dice que se obtiene extrapolando la resistencia de la roca intacta mediante una fórmula que depende del RMR. Por consiguiente, la fórmula propuesta por él queda como sigue:

$$S_p = RCU \times e^{\frac{RMR-100}{20}} \left(\frac{w^{0.50}}{h^{0.75}} \right)$$

Donde:

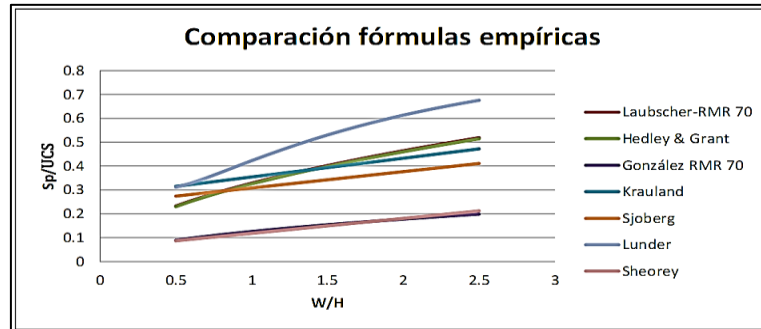
- S_p : Resistencia del pilar.
- RCU: Resistencia a la compresión uniaxial.
- RMR: Índice RMR de la calidad del macizo rocoso.
- w, h : Ancho y alto del pilar respectivamente.

González (2006, como se citó en Puentes A., Villalobos S. y Villalobos F., 2008), validó su metodología mediante un estudio de caso de una mina de mármol ubicada en España. Sin embargo, los datos utilizados por este autor, presentan calidades de macizo rocoso (RMR) entre 50 y 79. Para Yrarrazaval M. (2013), la estimación de la resistencia de pilares se efectúa mediante fórmulas que relacionan la resistencia a la compresión uniaxial de la roca, la calidad de la roca y las dimensiones del pilar. Adicionalmente, la fórmula a utilizar debe ser capaz de escalar la resistencia a la compresión uniaxial de un ensayo de laboratorio a la escala de un pilar. Se considera como una condición estable cuando se obtiene un factor de seguridad sobre 1.4, inestable para un factor de seguridad entre 1.0 y 1.4 y una condición de falla cuando la fórmula entrega un factor de seguridad menor a 1.0. Para esto se aíslan los pilares barrera donde el largo juega un rol importante, para estudiar el desempeño de las fórmulas a escala de laboratorio, se recopila una base de datos de ensayo de compresión uniaxial que contiene 579 datos para distintos tipos de roca y geometría.

Con estos datos se analiza el desempeño de cada fórmula para estimar la resistencia del testigo, utilizando el coeficiente de determinación, ver Figura 6.

Figura 6

Comparación de las fórmulas analizadas según su razón w/h .



Nota. Tomada de Yrarrazaval M. (2013).

2.2.7. Caracterización del macizo rocoso

Según Córdova D. (2005), la caracterización apropiada de los macizos rocosos mediante la evaluación del dominio estructural y la caracterización geomecánica se realizan haciendo uso de las clasificaciones geomecánicas más usadas como el RMR de Bieniawski, el Índice de Q de Nick. Barton, el GSI de Hoek y Paul Marinos o el RMI de Palstrom. Para Mamani F. (2017), la caracterización del macizo rocoso en términos geotécnicos es la determinación de la calidad del macizo rocoso corroborada, en donde se evalúa el dominio estructural de la masa rocosa. Rojas S. (2009), indica que los parámetros geotécnicos fundamentales son: Las discontinuidades, la resistencia al corte, la deformabilidad, la permeabilidad y el estado original de esfuerzos, la isotropía y la anisotropía tanto para macizos en rocas duras como en rocas blandas.

Es necesario conocer las diversas circunstancias de inestabilidad que entre muchas podemos mencionar a los siguientes:

- Calidad del macizo rocoso.
- Mal diseño en el trazo de la perforación y voladura.
- Mala disposición de los elementos de soporte.



2.2.8. Resistencia a la Compresión Uniaxial

Es denominada también resistencia compresiva uniaxial (RCU) y se define como el esfuerzo máximo que soporta la roca sometida a compresión, es el esfuerzo de compresión axial máximo que puede tolerar una muestra cilíndrica recta de material antes de fracturarse. Se conoce también como la resistencia a la compresión no confinada, porque el esfuerzo de confinamiento se fija en cero, en este caso, la resistencia a la compresión uniaxial, se mide en una prensa hidráulica que registra el esfuerzo compresor aplicado sobre una probeta de material en una dirección del espacio, y la deformación lineal inducida en esa misma dirección.

2.2.9. Uso de los datos de la RCU de otras zonas

La información obtenida de la investigación se utiliza para construir una clasificación geomecánica de macizo rocoso, y para análisis numérico, desde el punto de vista de Hoek, Kasier, & Bawden (1995), el mapeo estructural de las discontinuidades, pruebas de laboratorio de muestras de testigos obtenidas de perforaciones subterráneas y medición de tensiones in situ (lugar específico) son informaciones requeridas en la descripción completa de la masa rocosa.

Además, pueden utilizarse para el análisis preliminar de la inestabilidad alrededor de las aberturas típicas de las excavaciones, no mencionan el uso de información de la RCU de otras zonas para la caracterización del macizo rocoso, considerando la seguridad del personal y los equipos.

Gonzales de Vallejo L. (2002) indica que la meta principal es poder describir la masa rocosa con la mayor precisión posible en una zona específica, enfatizando que una información de otra zona puede ser tomada como referencia, pero no para realizar cálculos de calidad del macizo rocoso in situ.



Recopilación de datos geológicos. Debe ser metódica para garantizar que todos sean relevantes. Hoek, Kasier, & Bawden (1995), indican que cuando se dispone de muy poca información sobre el macizo rocoso el uso de clasificación geomecánica del macizo rocoso puede ser beneficioso.

Córdova D. (2005), resalta la importancia del uso del esquema de clasificación geomecánica como una lista de verificación para asegurar toda la información relevante, lo que nos indica que no es recomendable tomar informaciones geológicas de otras zonas y promediar con los datos de la zona de estudio para determinar la calidad del macizo rocoso. Con el uso de dos o más clasificaciones geomecánicas se pretende construir una imagen aproximadamente real de la composición y características del macizo rocoso respecto a su calidad, afirman Hoek, Kasier, & Bawden (1995).

2.2.10. Resistencia a la compresión uniaxial con el esclerómetro

Las características, principio de funcionamiento y procedimiento de utilización del Martillo Schmidt (esclerómetro) según la norma ASTM D5873-05, Normas: ISRM, sirven para estimar en el campo o en laboratorio la resistencia a compresión simple de la roca ensayada a partir de la medida del rebote proporcionada por el martillo. Previamente al año 2009, ISRM recomendaba únicamente el martillo de tipo L; ahora los dos están permitidos. El martillo tipo N se usaba mayoritariamente para concreto. Sin embargo, es menos sensible a las irregularidades de la superficie ensayada y sería por tanto preferible para la realización de ensayos de campo. La norma ASTM no especifica el tipo de martillo. La condición de las superficies es de particular importancia, a pesar de su aparente simplicidad el Martillo Schmidt ha demostrado ser útil en resistencia de la roca:

- El ensayo permite estimar de forma aproximada la resistencia a compresión simple mediante una sencilla correlación, siendo aplicable a la matriz rocosa, y discontinuidades.



- Su uso está muy extendido debido a su facilidad y rapidez de utilización.
- Se puede determinar la dureza de las rocas.

Para el cálculo de la resistencia a la compresión uniaxial se usa:

$$\sigma_c = 10^{[(0.00088)(Pe)(Ir)]+1.01}$$

Donde:

- σ_c : Resistencia a la compresión uniaxial
- Ir: Promedio de rebotes
- Pe: Peso específico

2.2.11. Determinación de la resistencia en el diseño de pilares.

Si bien distintos autores han determinado un método específico para conocer la resistencia de los pilares en minería, estas fórmulas mantienen una estructura específica, las cuales relacionan las dimensiones de los pilares y las características geotécnicas de la roca:

$$S_p = S_o \left[A + B \left(\frac{w_p^\alpha}{h^\beta} \right) \right]$$

Donde:

- S_p : Resistencia del pilar.
- S_o : Resistencia del material.
- A, B, α , β : Constantes derivadas del ajuste de datos.
- w_p , h: Ancho y alto del pilar respectivamente.

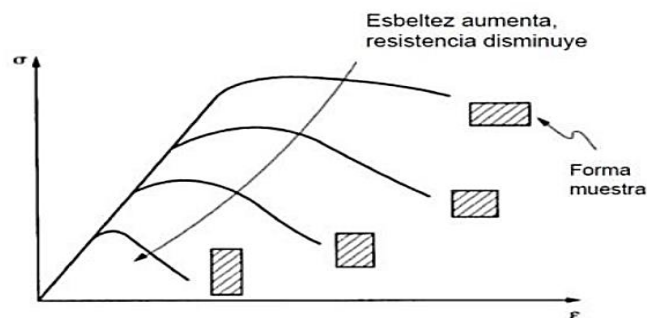
Es importante destacar que la resistencia del pilar se encuentra sujeta en gran manera a la geometría que éste posee, más aún a la relación entre su ancho y alto w/h. Según Lunder y Pakalnis (1997, como se citó en Puentes A., Villalobos S. y Villalobos F., 2008) las fórmulas empíricas pueden tomar dos formas, una que considera el efecto forma y otra que considera el efecto tamaño.

Las fórmulas “efecto forma”, consideran que pilares con igual relación w/h tendrán igual resistencia, independiente del volumen o tamaño del pilar y su resistencia se comportará de manera lineal con la forma del pilar.

Entonces, las fórmulas “efecto tamaño” plantean que al aumentar el volumen del pilar la resistencia disminuye, para una misma relación de forma w/h , ver Figuras 7 y 8

Figura 7

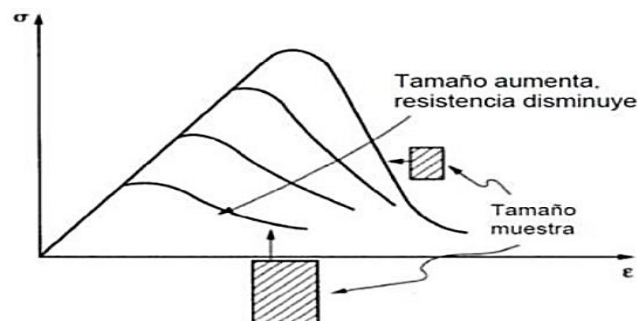
Efecto forma de los pilares.



Nota. Tomada de Puentes A. Villalobos S. y Villalobos F. (2008).

Figura 8

Efecto tamaño de los pilares.



Nota. Tomada de Puentes A. Villalobos S. y Villalobos F. (2008).

2.2.12. Fórmulas para determinar la resistencia de los pilares

Lunder y Pakalnis (1997, como se citó en Puentes A., Villalobos S. y Villalobos F., 2008), examinaron la distribución de los esfuerzos en pilares de roca dura en minas canadienses. Ellos, a diferencia de los demás autores, incluyen el efecto del parámetro k de confinamiento interno promedio, con esto demostraron que el confinamiento de los pilares incrementa significativamente a medida aumenta la relación w/h .

Además, la fórmula propuesta por estos autores fue modificada mediante el uso de modelamiento numérico y el criterio de falla para rocas de buena a muy buena calidad, la fórmula propuesta por los autores es la siguiente:

$$S_p = 0.44 RCU(0.68 + 0.52 k)$$

$$C_{pav} = 0.46 \left[\log \left(\frac{w}{h} + 0.75 \right) \right]^{\frac{1.4}{w/h}}$$

$$k = \tan \left[\arccos \left(\frac{1 - C_{pav}}{1 + C_{pav}} \right) \right]$$

Donde:

- S_p : Resistencia del pilar.
- RCU: Resistencia a la compresión uniaxial.
- k : Factor de escalamiento.
- C_{pav} : Confinamiento promedio de los pilares.
- w, h : Ancho y alto del pilar respectivamente.

2.2.13. Condiciones geomecánicas y dimensiones de minado

De acuerdo a las condiciones geomecánicas y las dimensiones del minado se puede considerar dos grupos de métodos de explotación, cámaras y pilares y cámaras vacías, se diferencia en el tamaño de las cámaras y en la forma de realizar el arranque de mineral. El método de explotación cámaras y pilares, es para la explotación de cámaras separados por pilares de sostenimiento del techo. La recuperación de los pilares puede ser parcial o total, en este último caso, la recuperación va acompañada del hundimiento controlado del techo que puede realizarse junto con la explotación o al final de la vida del yacimiento, lógicamente el hundimiento del techo en este caso es totalmente controlado, los factores dependen de:

- Estabilidad de la caja.
- Estabilidad de mineral.



- Potencia del mineral y presión de la roca.
- Discontinuidades geológicas como las fallas, pliegues, otros.
- Forma y tamaño del pilar.

Consideraciones para su aplicación:

- El cuerpo con buzamiento horizontal normalmente no debe exceder de 30°.
- El mineral y la roca encajonante debe ser relativamente competente.
- Minerales que no requieren de clasificación en la explotación.
- En depósitos de gran potencia y área extensa.

2.2.14. Tipos de cámaras y pilares

Pueden ser de forma circular, rectangular, cuadrada, irregular o corrida, es recomendable dejar espacios uniformes en las cámaras y pilares, sin embargo, en yacimientos pequeños se presenta una distribución aleatoria de los pilares. Las dimensiones de los pilares se pueden determinar por comparación entre la resistencia y la tensión vertical media que actúa sobre ellos, la resistencia de los pilares depende del material del cual está constituido (roca o mineral), de las discontinuidades geológicas, (Vergara R. 2013).

2.2.15. Desempeño de las fórmulas

Las fórmulas de pilares, a pesar de presentar buenos desempeños para pilares, fallan al analizar los ensayos de laboratorio, debido a que entregan valores muy pequeños para la resistencia de testigos de laboratorio. Esto se debe a que la mayoría de las fórmulas para el diseño de pilares no incorporan la calidad del macizo rocoso dentro de su expresión, por lo que subestiman la resistencia cuando se analizan casos con RMR mayores con los que fueron desarrolladas. Por otro lado, se tiene que solamente la fórmula propuesta por González es consistente para todos los rangos de RMR, teniendo que las otras fórmulas presentan un bajo desempeño para RMR bajos.

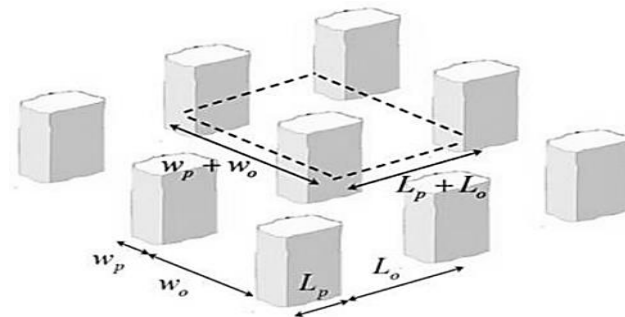
Esto ocurre debido a que las otras fórmulas (excepto Laubscher) no incorporan este factor dentro del cálculo de la resistencia, lo que provoca que un pilar de mejor calidad de roca se diseñe de la misma manera que un pilar de baja calidad de roca. Además, se obtiene que la manera de incorporar el RMR propuesto por González entrega mejores resultados que la forma propuesta por Laubscher.

2.2.16. Determinación del esfuerzo sobre el pilar

La obtención del esfuerzo sobre el pilar se puede realizar mediante modelamiento numérico, aunque normalmente se emplea el método del área tributaria. Este método según Maybee (2000, como se citó en Puentes A., Villalobos S. y Villalobos F., 2008) implica que la carga sobre cada pilar está en función de la columna vertical de roca que lo sobreyace de tal manera que considera que los esfuerzos se distribuyen homogéneamente sobre el pilar luego de realizar una excavación, ver Figuras 9 y 10.

Figura 9

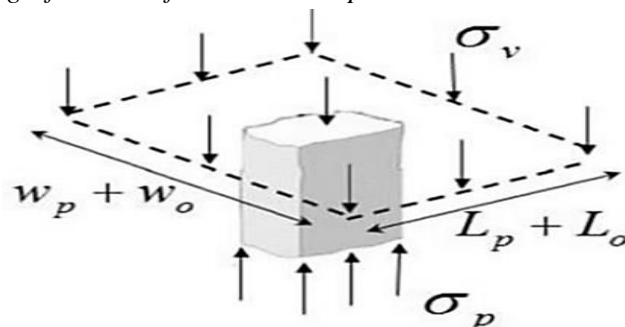
Representación gráfica del método del área tributaria.



Nota. Tomada de Yrarrazaval M. (2013).

Figura 10

Representación gráfica del esfuerzo sobre el pilar.



Nota. Tomada de Yrarrazaval M. (2013).

Para determinar el esfuerzo inducido se ha procedido conforme la propuesta de Lunder y Pakalnis (1997, como se citó en Puentes A., Villalobos S. y Villalobos F., 2008). La siguiente expresión determina el esfuerzo sobre el pilar de roca (esfuerzo inducido):

$$\sigma_p = \sigma_v * \frac{(w_p + w_o) * (l_p + l_o)}{w_p * l_p}$$

Donde:

- σ_p : Esfuerzo sobre el pilar (MPa).
- σ_v : Esfuerzo vertical in situ (MPa).
- w_o : Ancho de la cámara (m).
- l_o : Largo de la cámara (m).
- w_p : Ancho del pilar (m).
- l_p : Largo del pilar (m).

2.2.17. Evaluación de la recuperación.

Considerando la aplicación del método de explotación por cámaras y pilares cuadrados, se tiene que para la recuperación se calcula de la siguiente manera:

$$R_r = 1 - \left[\frac{w_p * l_p}{(w_p + w_o) * (l_p + l_o)} \right]$$

Dónde:

w_p es igual a l_p : Ancho y largo del pilar.

w_o es igual a l_o : Ancho y largo de la cámara.

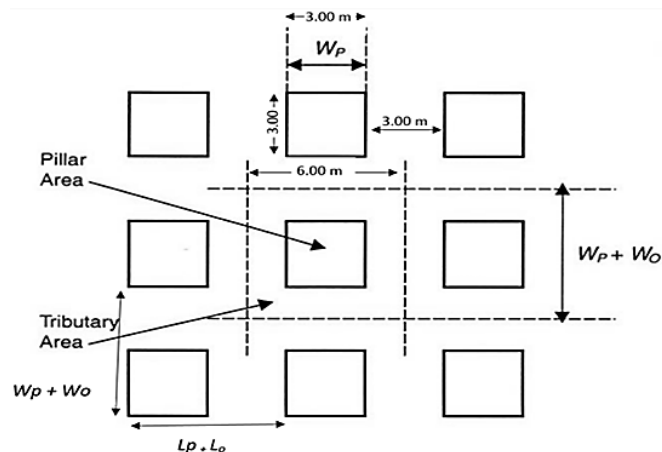
R_r : Recuperación.

2.2.18. Tensiones verticales inducidas

Las tensiones verticales inducidas en la minería subterránea siempre se encuentran sujetas a grandes variaciones en su estructura, por ejemplo, para aumentar su tamaño se deben realizar más galerías, así como para aumentar la producción de la mina.

Figura 11

Geometría y distribución de los pilares cuadrados.



Nota. Tomada de Puentes A. Villalobos S. y Villalobos F. (2008).

Estas actividades mineras, pueden producir un desequilibrio en el macizo rocoso producto de una redistribución no homogénea del esfuerzo sobre los pilares adyacentes a los niveles de excavación.

Villalobos (2015, como se citó en Puentes A., Villalobos S. y Villalobos F., 2008), basándose en los resultados de simulaciones numéricas 3D, indica que los mayores cambios en las tensiones sobre el pilar se producen en las cercanías del frente de avance de la excavación, área que recibe el nombre de zona de transición. La Figura 12 muestra la variación de las tensiones inducidas a medida que la distancia al frente de excavación aumenta.

2.2.19. Determinación del factor de seguridad

Para medir la condición de estabilidad de los pilares de roca, se utiliza el factor de seguridad, el que definimos como una relación entre la resistencia del pilar y el esfuerzo que actúa sobre éste. De esta manera la expresión queda como se muestra a continuación:

$$FS = \frac{S_p}{\sigma_p}$$

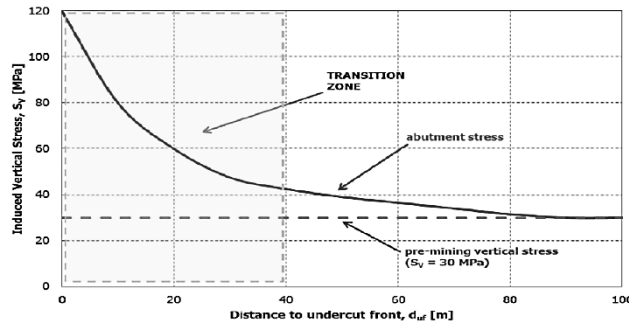
Donde:

- S_p : Resistencia del pilar (MPa).

- σ_p : Esfuerzo sobre el pilar (MPa).

Figura 12

Variación de las tensiones inducidas de acuerdo a la distancia del frente de la excavación.



Nota. Tomada de Puentes A. Villalobos S. y Villalobos F. (2008).

En la literatura existen algunos criterios de aceptabilidad para definir el valor que debe tomar el factor de seguridad en pilares mineros, los cuales se muestran en la Tabla 1. Vergara R. (2013), considera que para pilares de la mina El Teniente el factor de seguridad utilizado es 1.50.

Tabla 1

Criterio de aceptabilidad para pilares mineros.

ID	Autores	Factor de seguridad
1	Lunder y Pakalnis (1997)	>1.40
2	Salamon (1970)	>1.60

Nota. Tomado de Vergara R. (2013).

2.3. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE RMR DE BIENIAWSKI

El sistema de clasificación Rock Mass Rating o sistema RMR fue desarrollado por Z.T. Bieniawski durante los años 1972 y 1973, y ha sido modificado en 1976, 1979 y 1989, en base a más de 300 casos reales de túneles, cavernas, taludes y cimentaciones (Álvarez L. 2017). Actualmente se usa la edición de 1989, que coincide sustancialmente con la de 1979. La clasificación geomecánica de RMR de Bieniawski se obtiene realizando la suma de seis parámetros:

- Resistencia a la compresión simple de la roca matriz.
- RQD.



- Espaciamiento de las discontinuidades.
- Condición de las discontinuidades.
- Presencia de agua subterránea.
- Orientación de las discontinuidades.

Los objetivos de esta clasificación son:

- Determinar y/o estimar la calidad del macizo rocoso.
- Dividir el macizo rocoso en grupos de conducta análoga.
- Proporcionar una buena base de entendimiento de las características del macizo rocoso.
- Facilitar la planificación y el diseño de estructuras en roca, proporcionando datos cuantitativos necesarios para la solución real de los problemas de ingeniería.

El valor del RMR oscila entre 0 y 100, y es mayor cuanto mejor es la calidad de la roca. Bieniawski distingue cinco tipos o clases de roca según el valor del RMR, ver Tabla 2.

Tabla 2

Clase y tipo de roca según el RMR

Clase	RMR	Tipo de roca
Clase I	$RMR > 80$	Roca muy buena
Clase II	$60 < RMR < 80$	Roca buena
Clase III	$40 < RMR < 60$	Roca media
Clase IV	$20 < RMR < 40$	Roca mala
Clase V	$RMR < 20$	Roca muy mala

Nota. Tomada de Bongiorno N. (2012).

2.3.1. Parámetros de RMR

En las tablas adjuntas se indican los criterios de valoración utilizados para los distintos parámetros.

Resistencia de la roca: Tiene una valoración máxima de 15 puntos, y se puede obtener de 3 formas:

- Martillo de Schmidt.

- Ensayo de carga puntual.
- Ensayo de compresión simple y/o uniaxial.

RQD: Tiene una valoración máxima de 20 puntos, actualmente existen 4 formas de obtenerlo, en el presente trabajo de investigación se ha tomado la propuesta de cálculo del RQD en función del número de fisuras, por metro lineal, determinadas al realizar el levantamiento estructural en el área de la operación minera (OSINERGMIN 2017).

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$$

Siendo:

$$\lambda = \frac{\text{Número de fisuras}}{\text{metro}}$$

Tabla 3

Calidad del macizo rocoso según el RQD

RQD (%)	Calidad de Roca
<25	Muy Mala
25-50	Mala
50-75	Regular
75-90	Buena
90-100	Muy Buena

Nota. Tomado de Bongiorno N. (2012).

Espaciamiento entre las discontinuidades. Tiene una valoración máxima de 20 puntos, se refiere a la separación en metros entre juntas de la familia principal de diaclasas de la roca, en lo referente al espaciamiento de juntas, es la que se recomienda utilizar en la clasificación geomecánica de Bieniawski, ver Tabla 4.

Tabla 4

Ábaco de las características de las discontinuidades.

Descripción del espaciamiento	Espacio de las discontinuidades	Tipo de macizo rocoso
Muy ancho	> 3 m	Sólido
Ancho	1 – 3 m	Masivo
Moderadamente cerrado	0.30 – 1 m	En bloques
Cerrado	50 – 300 mm	Fracturado
Muy cerrado	< 50 mm	Machacado

Nota. Tomada de Bongiorno N. (2012).

Condición de las discontinuidades. Es el parámetro que más influye, con una valoración máxima de 30 puntos. Para Bhawani, S., & R.K., G. (2011), se puede aplicar el estado en que las diaclasas se descompone en otros cinco parámetros: persistencia, apertura, rugosidad, relleno y alteración de la junta, ver Tabla 5.

Tabla 5

Ábaco de valoración de la condición de las discontinuidades.

Parámetro	Valoración				
	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Persistencia	6	4	2	1	0
Apertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 - 10 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
	6	5	3	1	0
Rugosidad	Muy	Rugosa	Ligeramente	Ondulada	Suave
	6	5	3	1	0
Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm
	6	4	2	2	0
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente	Muy alterado	Descompuesto
	6	5	3	1	0

Nota. Tomada de Bongiorno N. (2012).

RMR Básico. Constituye la suma de 5 parámetros, no se considera en la sumatoria el descuento por la orientación de las discontinuidades.

Tabla 6

Ábaco de valoración según Bieniawski 1989.

Resistencia de la roca (Mpa)	Ensayo carga puntual	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	0
	Compr. simple	> 250	100 - 250	100 - 50	25 - 50	5 - 1 - <
Valoración		15	12	7	4	2 1 0
RQD %		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25
Valoración		20	17	13	8	3
Separación de las juntas		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2	< 0.06 m
Valoración		20	15	10	8	5
Estados diaclasas		Muy	Ligeramente	Ligeramente	Rellenos	Rellenos
Valoración		30	25	20	10	0
	Caudal en 10 m de túnel	Nulo	< 10 l/min	10 - 25	25 - 125	> 125
Presencia de agua	σ_w/σ_3	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5
	Estado	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo
Valoración		15	10	7	4	0

Nota. Tomado de Bongiorno N. (2012).

RMR Corregido. Constituye la sumatoria de seis parámetros geomecánicos, el último parámetro viene a ser el descuento por la orientación de las discontinuidades considerando la dirección de la excavación.

Presencia de agua. La valoración máxima es de 15 puntos. La Tabla 6 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.

Orientación de las discontinuidades. Este parámetro tiene una valoración negativa, y oscila para túneles entre 0 y -12 puntos.

Tabla 7

Ábaco para corrección por orientación propuesto por Bieniawski 1989.

Rumbo perpendicular al eje				Rumbo paralelo al eje del túnel		Buzamiento 0-20° (Independiente del rumbo)
Dirección según buzamiento		Dirección contra buzamiento		Buzamiento 45-90°	Buzamiento 20-45°	
Buzamiento 45-90°	Buzamiento 20-45°	Buzamiento 45-90°	Buzamiento 20-45°	Buzamiento 45-90°	Buzamiento 20-45°	
Muy Favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Con Bz de 68 NW Condición muy desfavorable	Regular	Desfavorable

Nota. Tomado de Bongiorno N. (2012).

En función 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.

Según el tipo, se aplica la puntuación especificada, ver Tablas 6, 7 y 8.

Tabla 8

Ajustes por orientación de las juntas.

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

Nota. Tomado de Bongiorno N. (2012).



2.4. DEFINICIONES CONCEPTUALES

2.4.1. Roca pizarra

Roca metamórfica homogénea formada por la compactación de arcillas a altas temperaturas. Se presenta generalmente en un color opaco azulado oscuro y se divide fácilmente en lajas u hojas planas, siendo por esta característica utilizada en cubiertas.

2.4.2. Pilar en una excavación subterránea

Es una estructura vertical compuesta de mena o de roca estéril que se encarga de recibir y soportar la carga que se encuentra sobre ella para evitar la convergencia o colapso de las excavaciones tales como son el acceso a la mina, las paredes o el techo de las cámaras de esta misma, es un elemento fundamental para el sostenimiento de labores mineras subterráneas, sistema de más bajo costo comparado con otro tipo de sostenimiento.

2.4.3. Pilares en función al tiempo

Los pilares pueden ser temporales o permanentes y se pueden realizar en roca estéril o en mineral. Se debe tener en cuenta que si un pilar se realiza en roca estéril, las variables que lo controlan son la estabilidad y competencia, (Ortiz O., Canchari G. 2013).

2.4.4. Tipos de pilares

Existen varios tipos de pilares, de acuerdo a la funcionalidad que se requiere, el tipo de yacimiento y macizo rocoso, estos pueden ser: Pilares cuadrados, pilares rectangulares y pilares irregulares.

2.4.5. Roca intacta

La roca matriz, matriz rocosa o roca intacta es el material rocoso no afectado por las discontinuidades, o los bloques de roca intacta que quedan entre las mismas; se caracterizan fundamentalmente por su densidad, deformabilidad y resistencia.



Las discontinuidades son las superficies que atraviesan al macizo rocoso haciéndole perder su continuidad y dividiéndolo en porciones más pequeñas de roca matriz; pueden ser de origen sedimentario o mecánico.

2.4.6. Roca estratificada

Está constituida por capas unitarias de roca con poca o ninguna resistencia a la separación a lo largo del plano de contacto entre estratos, debilitado debido a fracturas transversales existentes o generadas por la construcción de la excavación subterránea. Los desprendimientos son más comunes en este tipo de rocas debido a los planos de debilidad.

2.4.7. Macizo rocoso

Es el conjunto de bloques de roca de diversa índole, afectados por discontinuidades. Mecánicamente los macizos rocosos son medios discontinuos, anisótropos y heterogéneos. Anisótropos porque según se considere la dirección de los planos de debilidad van a generar diferentes propiedades y comportamiento mecánico.

2.4.8. Estructura de masa rocosa

La resistencia de un macizo rocoso puede depender fuertemente de la estructura primaria del macizo. Esta puede conferirle propiedades de isotropía, en el caso de ser una masa homogénea, o de anisotropía (positiva o negativa), y ambas deben tenerse en cuenta, tanto en la faz de construcción como en la de diseño y cálculo de las estructuras. La estructura primaria está referida a la que es propia de la génesis de las rocas. Hay estructuras genéticas típicas para las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

2.4.9. Zonificación geomecánica

Proceso de delimitación de zonas en donde la masa rocosa tiene condiciones geomecánicas similares y por lo tanto también comportamiento similar.



En la explotación de minas subterráneas, se encuentra una amplia variedad de formas de los depósitos mineralizados, asimismo, una amplia variedad de características de la masa rocosa de los yacimientos.

2.4.10. Geomecánica

Es la conjunción de varias disciplinas (geología, mecánica de rocas, hidrogeología, etc.) que se encarga del estudio del macizo rocoso y su aplicación en resolver problemas constructivos en ese ambiente (minas subterráneas, superficiales, túneles, casa de fuerza, etc.), mediante el análisis de los índices geomecánicos del macizo rocoso, tales como: Índice Q, índice RMR e índice GSI.

2.4.11. Caracterización geomecánica

Es el proceso de designar la calidad del macizo rocoso basado en números y términos descriptivos de los rasgos que se presentan en cada una de ellas, es reportar las cualidades particulares, propias de cada macizo rocoso.

Así mismo determinar los procesos que influyen en las características geomecánicas del macizo rocoso en el que se desarrollan todas las actividades subterráneas, como: La condición de tensiones, la condición de discontinuidades, la condición de resistencia y la condición de hidrogeología.

2.4.12. Dominio estructural

Se define así, a la porción de masa de roca que está limitada por discontinuidades, donde todo lo que hay dentro es casi homogéneo, es decir se puede notar la presencia de diferentes sistemas o familias de discontinuidades que siguen una misma orientación. Cada uno de estos sistemas tendrán características diferentes y el más persistente controlara la inestabilidad de la excavación subterránea.



2.4.13. Discontinuidades

Las discontinuidades llamadas también diaclasas, juntas, son las superficies que atraviesan al macizo rocoso haciéndole perder su continuidad y dividiéndolo en porciones más pequeñas de roca matriz; pueden ser de origen sedimentario o mecánico, (Gonzales de Vallejo L., 2002).



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Es un instrumento de dirección “guía” con un conjunto de pautas, bajo las cuales se realiza una investigación, afirma Hernández et al (2014). Para Kerlinger (2002, como se citó en Hernández et al., 2014), el término diseño se refiere al plan o estrategia concebida para obtener la información que se desea, respecto a los componentes del diseño de investigación corrobora y señala “generalmente se llama diseño de investigación al plan y a la estructura de un estudio”.

Por lo que se concluye que el diseño de una investigación es el plan y estructura de una investigación concebidas para obtener respuestas a las preguntas de un estudio.

3.1.1. Fases de la investigación

El presente trabajo de investigación se ha ejecutado en función a tres fases:

- Fase 1. Recolección de la información del macizo rocoso en la labor minera de producción.
- Fase 2. Evaluación, cálculos y consolidación de la información en gabinete.
- Fase 3. Discusión de resultados y presentación del trabajo final.

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Cuando el pilar primordial es lograr la adquisición de nuevo discernimiento basado en el estudio del contexto real al margen de conseguir propósitos materiales, entonces para Muñoz R. (2011) el tipo de estudio es la investigación pura. En referencia al mismo autor es que los estudios de este tipo se realizan para resolver problemas de la población y estrechar vínculos con las universidades.



Las instituciones de educación técnica realizan este tipo de estudio con el fin de comunicar los resultados y experiencias comprobadas alcanzadas a la población por medio de documentación física, repositorios de tesis en temas de interés común. De acuerdo a lo fundamentado, este estudio busca aumentar las experiencias comprobadas por un lado desde el punto de vista descriptivo ya que permiten la descripción o identificación de cada uno de los componentes esenciales de las características del macizo rocoso, y por otro lado es aplicativo ya que los resultados se pueden aplicar en otras empresas con operaciones mineras subterráneas similares.

Es importante mencionar que la investigación documental consiste en un análisis de la información escrita sobre un determinado tema, con el propósito de establecer relaciones, diferencias, etapas, posturas o estado actual del conocimiento respecto al tema objeto de estudio, así lo señala Bernal T. (2010).

De acuerdo con Casares Hernández, et al. (1995, como se cita en Bernal T., 2010), la investigación documental depende fundamentalmente de la información que se obtiene o se consulta en documentos, entendiéndose por éstos todo material al que se puede acudir como fuente de referencia, sin que se altere su naturaleza o sentido, los cuales aportan información o dan testimonio de una realidad o un acontecimiento. Se realizó investigación documental para determinar algunos datos que complementen al logro de los objetivos para este estudio.

3.3. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

La investigación descriptiva según Bernal T. (2010), es uno de los tipos o procedimientos investigativos más populares y utilizados por los principiantes en la actividad investigativa. Los trabajos de grado, en los pregrados y en muchas de las maestrías, son estudios de carácter eminentemente descriptivo.



En tales estudios se muestran, narran, reseñan o identifican hechos, situaciones, rasgos, características de un objeto de estudio, o se diseñan productos, modelos, prototipos, guías, etcétera, pero no se dan explicaciones o razones de las situaciones, los hechos, los fenómenos, etcétera.

En esta investigación se describen las características del macizo rocoso en una circunstancia temporal y geográfica determinada, su finalidad es describir y/o estimar parámetros geomecánicos para determinar la calidad mediante las clasificaciones geomecánicas conocido también por el método empírico aplicado en la resistencia de pilares mineros, debido a ello es un estudio descriptivo.

Además, se explica el comportamiento de una variable en función de otra por ser estudios de causa-efecto requieren control, con lo se sitúa en el nivel explicativo.

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.4.1. Población

La población de acuerdo a Fracica (1988, como se cita en Bernal T., 2010), reúne todos los componentes que la investigación necesita las cuales según las referencias teóricas están inmersas en el estudio. Otra definición acerca de la población es que es el acumulado total de los elementos que se relacionan con el estudio. Arias F. (2006), indica una serie de recomendaciones con respecto a la delimitación de la población, sostiene que la población objetivo debe quedar delimitada con claridad y precisión en el problema de investigación y en el objetivo general del estudio.

Para esta investigación la población está constituida por un registro de 70 discontinuidades, que representan el conjunto de mediciones que se obtuvo del registro lineal, características estructurales, para la caracterización del macizo, dichos datos se evaluaron y analizaron para posteriormente definir la caracterización del macizo rocoso.



3.4.2. Muestra

La muestra para Bernal T. (2010), es la selección de un fragmento de la población, sobre la que se analizará el comportamiento de las variables que se investiga, a través de la obtención de datos resultantes de la cuantificación según los indicadores.

Es decir este fragmento es fuente para la recolección de datos y así realizar la ejecución de la investigación y obtener los resultados previstos.

Levin y Rubin (2004), indican el muestreo de juicio se utiliza la apreciación y el juicio del investigador encargado del estudio para definir los componentes que conformarán el fragmento de la población que serán unidades de información para la tesis.

Además, Hernández et.al (2014), sostiene que la finalidad de recolectar datos para una investigación es obtenerlos para que éstos se conviertan en información (de personas, comunidades, contexto o situaciones en profundidad) en las propias formas de expresión de cada uno. Esto, con el objeto de identificar y seleccionar la de mayor aporte y utilidad en el proceso indagatorio.

Finalmente, Arias F. (2006), indica una serie de recomendaciones con respecto a la delimitación de la población, así:

Los tesisistas e investigadores en formación que no cuenten con financiamiento, deben estudiar poblaciones finitas y accesibles. Si la población, por el número de unidades que la integran, resulta accesible en su totalidad, no será necesario extraer una muestra. Lo señalado por este autor permite inferir, que si se toma el total de la población entonces no se aplicará ningún criterio muestral y no es necesario realizar este cálculo. Para la selección de la muestra en esta investigación se realizó según lo sugieren Levin y Rubin (2004) y de acuerdo a la recomendación de Arias F. (2006), en consecuencia se ha tomado como muestra la totalidad de la población es decir las 70 discontinuidades obtenidas como datos de campo.

3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

A continuación se muestra la operacionalización de variables:

Tabla 9

Operacionalización de variables.

Variables	Indicadores	Índice	Instrumentos	Unidades
1.VARIABLE INDEPENDIENTE : Calidad del macizo rocoso de la labor de producción	Caracterización geomecánica del macizo rocoso	Densidad Resistencia del compresiva uniaxial Mapeo geomecánico RMR de Bieniawski	Investigación documental Investigación documental Esclerómetro Ábacos	g/cm ³ MPa Adimensional
2.VARIABLE DEPENDIENTE Diseño de pilares en la labor de producción con circado	Esfuerzo inducido Resistencia del pilar Factor de seguridad	Esfuerzo vertical Geometría del pilar Esfuerzo del pilar/esfuerzo inducido	Fórmulas Fórmulas Fórmulas	MPa MPa Adimensional

3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Es un procedimiento, o conjunto de procedimientos, regulado y provisto de una determinada eficacia. Las técnicas constituyen una de las partes más adelantadas de la actividad científica (Gortari E. 1979). Se dice que la técnica es un conjunto de instrumentos de medición, elaborados con base en los conocimientos científicos, el flujograma usado en la investigación se observa en la Figura 13.

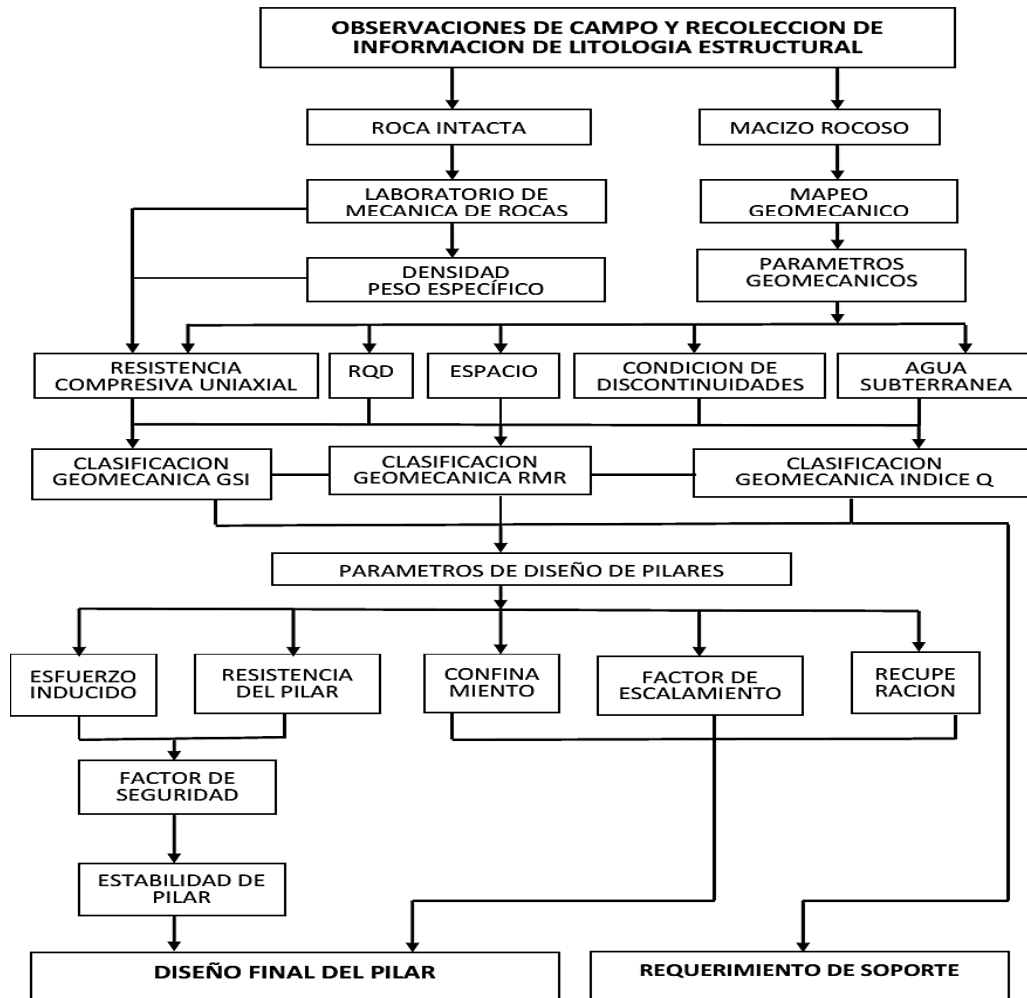
3.6.1. Recolección de datos por fuentes primarias, secundarias y terciarias

Hernandez et al (2014), sostiene que las investigaciones se originan a partir de ideas, las cuales pueden derivarse de distintas fuentes y su calidad no está necesariamente relacionada con la fuente de la que provienen, estas fuentes pueden ser primarias, secundarias y terciarias.

Es evidente que, cuanto mejor se conozca un tema, el proceso de afinar la idea será más eficiente y rápido.

Figura 13

Flujograma de las técnicas e instrumentos de recolección de datos.



Desde luego, hay temas que han sido más investigados que otros y, en consecuencia, su campo de conocimiento se encuentra mejor estructurado. Estos casos requieren planteamientos más específicos; podríamos decir que hay:

- Temas ya investigados, estructurados y formalizados, sobre los cuales es posible encontrar documentos escritos y otros materiales que reportan los resultados de investigaciones anteriores.
- Temas poco investigados y no estructurados, los cuales requieren un esfuerzo para encontrar lo que escasamente se ha investigado.



- Temas ya investigados pero menos estructurados y formalizados, sobre los cuales se ha investigado aunque existen sólo algunos documentos escritos y otros materiales que reporten esta investigación; el conocimiento puede estar disperso o no ser accesible. De ser así, habría que buscar los estudios no publicados y acudir a medios informales, como expertos en el tema, profesores, amigos, etc. internet (incluyendo sus redes sociales) constituye una valiosa herramienta en este sentido.

3.6.2. Técnicas de análisis de datos

En el presente trabajo de investigación es sumamente importante realizar análisis estadístico, la información recolectada es representada en tablas de contingencia, con entradas e indicadores según las variables, o también representación mediante gráficos, los cuales se mencionaron en cada caso específico, en cuanto a la prueba o pruebas estadísticas a emplearse, se empleó la estadística descriptiva con el objeto de procesar las medidas necesarias de las cosas, individual y/o grupalmente, sin abrir juicio de calidad, valor, diferencia, importancia, etc., sobre las mismas. Y se empleó estadística inductiva ya que atiende a las necesidades de tomar decisiones a partir de esos valores; compara, afirma, infiere la probabilidad de la ocurrencia de tales valores, estima, etc.

3.6.3. Técnicas de procesamiento de la información

Considerando las características del trabajo de investigación se utilizó como técnicas a la codificación, tabulación (definición de tablas y gráficas) y cuadros de consistencia para el análisis cuantitativo y cualitativo del dominio estructural del macizo rocoso, que permite la ubicación de la concentración de polos en el diagrama π y diagrama β respectivamente con el apoyo del software Dips. A partir de estos datos se realiza la aplicación de las fórmulas descritas en la revisión de la literatura para lograr los objetivos planteados.



3.6.4. Codificación

La codificación implica preparar, agrupar y sintetizar las mediciones obtenidas para que puedan analizarse correctamente generalmente cuadros de doble salida, y asignarles un valor numérico que los represente. Es decir, a las categorías de cada ítem y variable se les asignan valores numéricos que tienen un significado, este procedimiento se ha realizado asignando valores numéricos para cada discontinuidad medida.

3.6.5. Tabulación

La planificación de las tablas y gráficos requerida por el estudio se especifica en la sección de Anexos en donde cada variable tiene su título respectivo, con los cuales se ha elaborado una base de datos en el ordenador, para su procesamiento.

3.6.6. Instrumentos

En el presente trabajo de investigación se han considerados los siguientes instrumentos:

- Cámara fotográfica.
- Guías de registro lineal de progresivas.
- Brújulas.
- Estación total.
- Equipo de GPS Navegador.
- Escalímetros.
- Cintas métricas.
- Equipos de seguridad minera.
- Pinturas para el marcado de las discontinuidades.
- Computadoras, laptops personales.
- Software Dips.
- Documentos relacionados al tema de investigación.



3.6.7. Aspectos éticos

Se han tomado en cuenta la originalidad de los trabajos de investigación similares tanto en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A., así como también investigaciones realizadas en otras empresas mineras conforme a normas existentes respecto a la autoría, realizando las citas que sean necesarias.

3.7. Ámbito de estudio

El trabajo de investigación se ha realizado en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A. Unidad Ana María en el centro poblado de la Rinconada.

3.7.1. Ubicación

La Unidad Ana María, se denomina como la zona de estudio que se encuentra ubicada políticamente en el distrito de Amanea, provincia de San Antonio de Putina, departamento de Puno, entre los 4900 a 5200 m.s.n.m., la Corporación Minera Ananea S. A., se encuentra ubicado entre las prolongaciones occidentales de los nevados de Ananea, pertenecientes a la cadena Aricoma o cordillera de Carabaya, en el paraje denominado Rinconada – Cerro lunar de Oro.

- Lugar de ubicación : Cerro lunar de Oro
- Distrito : Amanea
- Provincia : San Antonio de Putina
- Departamento : Puno

Las coordenadas geográficas y la elevación aproximada son:

- 14° 37' 10" Latitud Sur.
- 69° 26' 50" Longitud Norte.
- Elevación: 4800-5300 m.s.n.m.



3.7.2. Accesibilidad.

Es accesible por vía terrestre desde la ciudad de Juliaca por un recorrido al noreste mediante una carretera asfaltada en su mayor tramo y afirmada, llegando al centro poblado de La Rinconada, ver Tabla 10.

Tabla 10

Acceso al centro poblado de La Rinconada.

Destino	Tiempo (h)	Carretera	Distancia (Km)
Puno-Juliaca	1.00	Asfaltada	40
Juliaca - Putina	1.50	Asfaltada	89
Putina - Ananea	1.50	Asfaltada	62
Ananea - La Rinconada	0.50	Afirmada	20
La Rinconada - Corporación Minera Ananea S.A. CMASA	0.25	Afirmada	5
Total	4.75 horas		216 Km.

3.7.3. Clima y vegetación

El clima es frígido y seco con bruscos cambios de temperatura que alcanzan de día hasta 14° C y por las noches llega hasta que las aguas que fluyen se congelan; las precipitaciones fluviales comienzan a partir de los meses de octubre y noviembre, presentándose las más intensas entre los meses de diciembre a marzo. Por la condición frígida y seca la vegetación es muy limitada, hay escasos pastos silvestres.

3.7.4. Recursos Humanos

En su gran mayoría son personas desempleadas de los departamentos de Puno, Arequipa y Cuzco.

3.7.5. Estratigrafía local

Fundamentalmente en el área de la concesión, se tiene presencia de rocas metamórficas de variedad pizarra; estas pertenecen a la formación Ananea, que se sitúa en el Paleozoico medio.



3.7.6. Recursos naturales

Como recursos naturales de mayor importancia son la presencia de estructuras mineralizadas con mineral aurífero (oro); además se tiene el recurso líquido que es proveniente de los deshielos del glaciar, que se usan para el consumo doméstico y para la transformación del mineral (molienda y recuperación).

3.7.7. Formación Sandia

Se caracteriza porque en la Cordillera Oriental aflora una aparente continuidad estratigráfica, una secuencia de lutitas que varían de colores negras a claras y otra detrítica de cuarcitas con intercalaciones de lutitas negras, en Sandia el espesor de esta formación supera los 3500 m, reduciéndose hacia el sur; estratigráficamente pertenecen al Ordovícico medio.

3.7.8. Formación Ananea

En el área que abarca el yacimiento aurífero en la mina la Rinconada, se observan afloramientos consistentes en lutitas y pizarras que conforman la parte superior de la formación; generalmente tienen un rumbo promedio noreste a sureste y con buzamiento de 10° a 20° al suroeste.

- Espesor : +/- 800 metros.
- Rumbo : NW - SE 10° - 20°.
- Tamaño de Grano : Medio a fino.
- Color : Gris oscuro a negro.
- Textura : Varía de un lugar a otro.
- Variedad de Roca : Pizarra silisificada piritizada.



3.7.9. Formación del yacimiento

En la zona se aprecia formación de estratos de lutitas y arenisca en una cuenca intercontinental (formación Ananea), afectados por un leve metamorfismo regional, con mineralización de oro (baja ley).

3.7.10. Tectónica

La tectónica en el yacimiento juega un papel muy importante en cuanto a la concentración de Au libre en mantos Cuarzóferos, tanto los mantos cuarzóferos, así como los estratos de lutitas y pizarras han sido afectados por este fenómeno tectónico, observándose en interior mina y en superficie a manera de bloques de forma irregular, este fenómeno está relacionado a los inicios de la etapa de sedimentación que posteriormente originaron los estratos como se observa en la actualidad.

3.7.11. Fallamiento

Está relacionado a un periodo con fallas pre-minerales. Las fallas San Andrés, Esperanza, Carmen y Lunar se orientan hacia el noroeste y sureste de bajo ángulo con desplazamiento vertical al orden de centímetros, otro sistema de fallas importantes son las fallas San Francisco, Norma y Virginia completan un cuadro tectónico de fallamientos transversal de rumbo noreste y suroeste estas fallas son casi verticales y de alto ángulo con desplazamiento vertical inferior a 20 m.

3.7.12. Geología económica

Tanto en la sección San Francisco principalmente en Ana María I y en sección de Cerro Lunar Ana María III afloran en diferentes mantos en cuarzo aurífero con espesor que varían de 0.50 cm hasta 40.00 cm inter estratificado entre los paquetes de pizarra de la formación Ananea el rumbo general de los mantos es de este y oeste, y el buzamiento varia de 10 a 20 grados al suroeste.



Los mantos reconocidos están separados unos a otros desde los 2 m hasta los 70 m el aspecto de los mantos es sensiblemente lenticular la roca encajonante esta débilmente alterada, generalmente una decoloración de las pizarras que a veces esta finamente piritizada.

3.7.13. Geología de minas

Tajeos de mineral. Estos frentes tienen por finalidad entregar la mayor cantidad de mineral al menor costo, y entran en ejecución según disposición de la gerencia, en las caras libres o bloques que hicieron las labores de preparación, su rendimiento se debe a que al ejecutar los tajeos resultan más económicos que ejecutar frentes, debido a la menor cantidad de taladros perforados, menor uso de explosivos y una mayor cantidad de mineral para el recojo.

Circado. En este tipo de labores varía de acuerdo al ancho de sección de labor, y la “quiebra” del mineral se ejecuta por cada 3 metros de avance, la cual es evaluada por la gerencia para determinar cambio o continuidad de rumbos, y para una prospección de minerales a tajar.

Recojo de mineral o quiebra. Es la acción que permite recoger los minerales de cuarzo de los mantos que han sido circados, cuando la gerencia dispone las quiebras de mineral, se perforan taladros paralelos a los buzamientos de las circas, los cuales son disparados con cargas controladas para proceder a acoplar los minerales para su almacenamiento y posterior beneficio en la planta de amalgamación. Las quiebras de mineral se disparan mediante “cachitos”, o taladros paralelos a su buzamiento, cuando la cantidad de mineral que contienen las “circas” es considerable, y es variable al tipo de frente que se ejecuta, así, en los frentes de exploración se levanta la “circa” por cada 3 metros de avance.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO

La determinación de la calidad de la masa rocosa se ha efectuado mediante la caracterización de acuerdo a la clasificación geomecánica RMR, considerando la información de campo se pueden realizar los cálculos del diseño de los pilares en la labor de producción con circado en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.

4.1.1. Caracterización geomecánica mediante RMR de Bieniawski.

Para determinar el índice RMR de calidad de la roca se usaron los parámetros:

- La resistencia a compresión simple del material.
- El RQD.
- El espaciamiento de las discontinuidades.
- El estado de las discontinuidades.
- La presencia de agua.
- La orientación de las discontinuidades.

Interpretación de las imágenes del techo de la excavación. Se ha realizado la toma imágenes de las diferentes progresivas evaluando la zona en donde mejor se observan las discontinuidades claramente, las diferentes familias constituyen el dominio estructural del macizo rocoso, en la Figura 14 se observan 4 familias de discontinuidades y en la Figura 15 se observa la presencia de cuñas en el techo de la excavación.

Dominio estructural en la zona progresiva 402.00 m - 420.00 m. La evaluación del dominio estructural se ha realizado en una progresiva de 18 metros de longitud mediante un mapeo geomecánico de RMR, en un macizo rocoso constituido por pizarras en la labor de producción con circado.

Figura 14

Identificación de las discontinuidades en la progresiva 402,00 a 420,00 m.

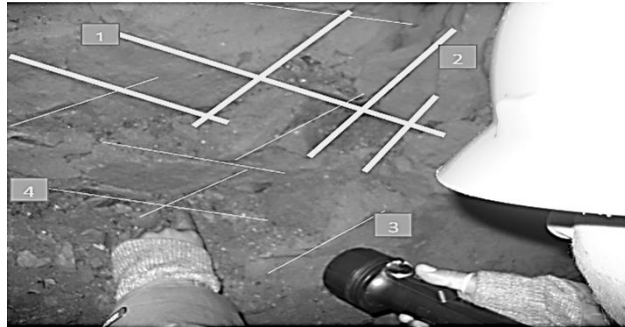
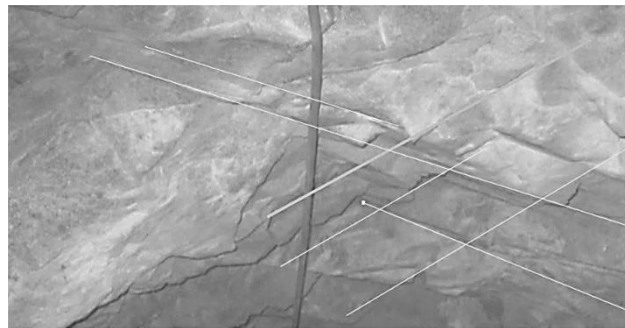


Figura 15

Presencia de cuñas en el techo.



Los resultados estadísticos se muestran en las Tablas 60 y 61 del registro de diaclasas en los Anexos, la evaluación estadística de las cuatro familias de discontinuidades, se aprecian en las Figuras 16, 17 y 18. El resumen final de la totalidad de discontinuidades estudiadas se muestra en la Tabla 11, se indica además el valor representativo que servirá de base para los cálculos posteriores.

Figura 16

Densidad de los polos.

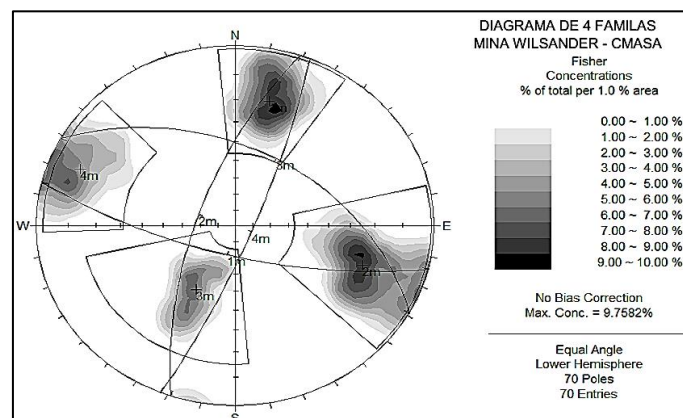


Figura 17

Orientación de 4 familias.

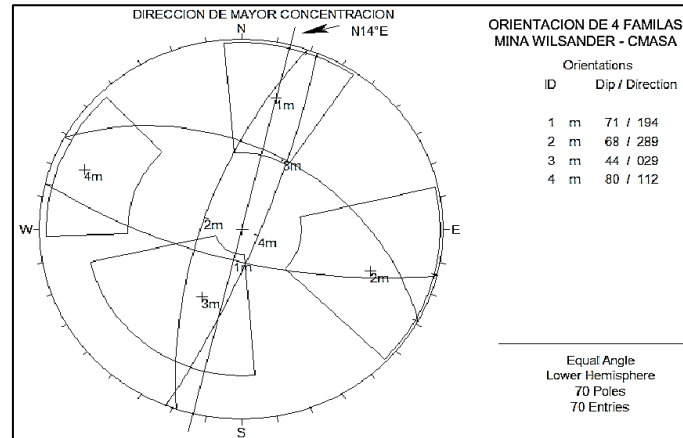
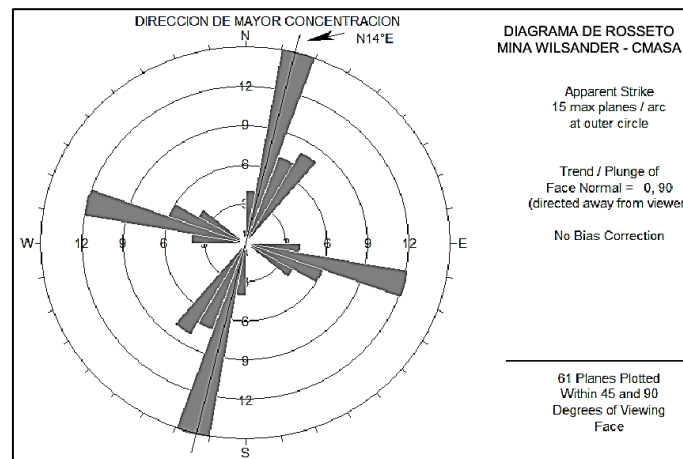


Figura 18

Diagrama de Rosseto.



4.1.2. Propiedades físicas de las muestras

Para obtener los datos necesarios de las propiedades físicas se realizó mediante la recolección de datos de fuentes primarias, secundarias y terciarias, en ese sentido se toma lo señalado por Huchamaco (2017), quien ha determinado en el laboratorio de mecánica de rocas de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano, según la Norma ASTM C 97-02 la resistencia no confinada de muestras referidos a la Mina Wilsander, los resultados están en las Figuras 19 y 39 de los Anexos. Por lo que se observa que la densidad promedio es 2.79 g/cm^3 y el valor promedio del peso específico es 27.34 KN/m^3 .

Tabla 11

Resumen del dominio estructural en la progresiva 402.00m - 420.00m.

Resumen de dominio estructural del macizo rocoso											
Familias	Litología estructural del paleozoico	Orientación (Bz/DBz)	Discontinuidades Por familia	Total de discontinuidades	Espaciado (mm)	Persistencia (m)	Apertura (mm)	Rugosidad	Relleno-espesor (mm)	Alteraciones	Agua subterránea
	Familia N° 1	71/194	18	70	4	3	2	4	2	2	1
	Familia N° 2	68/289	25		3	3	2	3	2	3	1
	Familia N° 3	44/029	16		3	3	2	3	3	3	1
	Familia N° 4	80/112	11		3	3	2	3	2	2	1
Resultados cuantitativos	Valor representativo	68/289	25	70	3	3	2	3	2	3	1
	Descripción de resultados	70 discontinuidades en progresiva 402.00m -420.00m			3 = 200-600	3= 3-10	Muy ang < 0.1	2= 3= Med . Rugosa	2= Duro < 5 mm	2= Moderada	1= Seco
	Dirección de Excavación en la zona de minado por cámaras y pilares por circado	N 28° E = Dirección de excavación en la zona de minado por cámaras y pilares por circado en la Mina Wilsander CMASA.									
Dirección según rosseto	N 14° E dirección de mayor concentración paralela a la dirección de la excavación con buzamiento de 68° NW en zona de minado por cámaras y pilares por circado en la Mina Wilsander CMASA. El avance se realiza en condiciones muy desfavorables										

4.1.3. Determinación de la RCU por el método destructivo

La resistencia compresiva uniaxial se ha tomado del trabajo de investigación realizado por Uchamaco, considerando que se han realizado en la misma labor con muestras aledañas a la zona de investigación, se aprecia en la Figura 19, que la resistencia a la compresión uniaxial en al Mina Wilsander tiene un valor máximo de 90.42 y un valor mínimo de 62.01, que de acuerdo al ábaco de Bieniawski toma un valor de 7 este valor será comparado y corroborado con los cálculos que se realizarán.

Figura 19

Resultado del laboratorio de la RCU en la FIM de la UNA.

ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE

Los ensayos se realizaron según la norma ASTM D 2938-95, obteniéndose los siguientes resultados:

ID	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Relación L/D	Carga (Kg-f)	UCS (MPa)	Tipo de Rotura
UCS - 01	3.86	7.5	11.70	1.9	7400.0	62.01	matriz
UCS - 02	3.84	7.35	11.58	1.9	8970.0	75.96	matriz
UCS - 03	3.86	7.47	11.70	1.9	10790.0	90.42	matriz
Numero de resultados						3	
Valor máximo, MAX						90.42	
Valor mínimo, MIN						62.01	
Mediana, MED						75.96	
Valor promedio, MEAN						76.13	
Desviación estándar, SDEV						14.21	
Coefficiente de variación, CV						0.06	

Nota. Tomada de Uchamaco (2017).

4.1.4. Determinación de la RCU por el método no destructivo

El ensayo permite estimar de forma aproximada la resistencia a la compresión simple, siendo aplicable fundamentalmente a la matriz rocosa, y discontinuidades. Su uso está muy extendido debido a su facilidad y rapidez de utilización, veamos la Figura 20 y los resultados de las mediciones en la Tabla 12.

Figura 20

Toma de los datos con el esclerómetro.



4.1.5. Resultados de la RCU por el método no destructivo

El total de valores tomados con el esclerómetro fue de 10, los cuales se muestran en la Tabla 12. Para realizar los cálculos se tomarán los cinco valores más altos del total de los datos tomados, y se obtendrá el valor promedio, ver Tabla 13. Para el cálculo de la RCU con el esclerómetro, primero calculamos el peso específico:

$$P_e = \text{Densidad} * \text{gravedad}$$

$$P_e = 2.79 \text{ (9.8 m/s}^2\text{)}$$

$$P_e = 27.34 \text{ KN/m}^3$$

Tabla 12

Valores obtenidos con el esclerómetro tipo L en la progresiva 402.00 m a 420.00 m.

Valores de k con esclerómetro: Sentido horizontal	
Nº	Progresiva 402.00 m a 420.00 m.
1	32
2	34
3	33
4	40
5	34
6	39
7	41
8	43
9	35
10	42

Tabla 13

Valores más altos obtenidos con el esclerómetro tipo L.

Valores de k con esclerómetro: Sentido horizontal	
Nº	Progresiva 402.00 m a 420.00 m.
1	40
2	39
3	41
4	43
5	42
PROMEDIO:41	

El valor de 27.34 KN/m^3 , es similar al que se observa en la Figura 39 de los Anexos, además se sabe que el promedio de los valores medidos I_r es 41. Luego se reemplaza en:

$$\sigma_c = 10^{[(0.00088)(P_e)(I_r)]+1.01}$$

$$\sigma_c = 10^{[(0.00088)(27.34)(41)]+1.01}$$

$$\sigma_c = 10^{1.99}$$

$$\sigma_c = 97.7 \text{ MPa}$$

Entonces la resistencia a la compresión uniaxial con el esclerómetro es 97.7 MPa .

4.1.6. Evaluación de los resultados por el método destructivo y no destructivo.

En la misma zona de estudio el valor más alto de acuerdo a Uchamaco (2017) es de $90.42 MPa$ y con un valor mínimo de $62.01 MPa$.

De acuerdo a ello el promedio es de $76.13 MPa$, mientras que el resultado obtenido de acuerdo a los cálculos realizados con los valores del esclerómetro (método no destructivo) es de $97.7 MPa$.

Por lo que de acuerdo al ábaco de valoración de Bieniawski respecto a la resistencia compresiva uniaxial ambos resultados toman un valor de 7, porque están en el intervalo de $[50,100] MPa$, para la determinación de la calidad del macizo rocoso se toma el valor obtenido por el método no destructivo que es $97.7 MPa$.

4.1.7. Determinación del índice RQD

Para este cálculo es importante mencionar que el valor de λ se calcula en función al número total de diaclasas en la Progresiva 402.00 m a 420.00 m. De acuerdo al consolidado del registro lineal en pizarra la longitud total es de 18.00 m y un total de 70 diaclasas, por lo que se tiene:

$$\lambda = \frac{70}{18}$$

$$\lambda = 3.89$$

Ahora se reemplaza en:

$$RQD = 100 e^{-0.1 * 3.89} [(0.1 * 3.89) + 1]$$

$$RQD = 94 \%$$

Entonces el valor del índice RQD es 94%, por lo que según el ábaco de Bieniawski tiene una valoración de 20.

4.1.8. Determinación del RMR básico

Para determinar el valor del índice RMR de Bieniawski se muestra en la Tabla 14 un resumen de los seis parámetros necesarios para realizar la suma:

4.1.9. Determinación del RMR corregido

La corrección va de acuerdo a la orientación de la construcción de la excavación a realizarse.

Rumbo paralelo al eje de la galería. Cuando la orientación de las discontinuidades es paralelo al eje de la labor de producción, de acuerdo a los diagramas de orientación la mayor concentración de las diaclasas tiene una orientación de N14°E. La dirección de excavación en la zona de minado por cámaras y pilares por circado es N28°E en la Mina Wilsander. La dirección de mayor concentración y la dirección del eje de la zona de minado son aproximadamente paralelos, con buzamiento entre 45°- 90°, por lo cual la calificación según el ábaco de Bieniawski es muy desfavorable, debiendo realizar un descuento de -12. Por lo que el índice RMR corregido resulta 56, ver Tabla 15.

Tabla 14

RMR básico de la Progresiva 402.00 m a 420.00 m.

RMR básico de la Progresiva 402.00 m a 420.00 m.		
Parámetro	Valor	Puntaje
Resistencia compresiva uniaxial (RCU)	97.7 MPa	7
RQD	94 %	20
Espaciado	200-600 mm	10
Persistencia	3-10	2
Apertura	Muy ang < 0.1	4
Rugosidad	Med rugosa	3
Relleno-espesor	Duro < 5mm	4
Alteración	moderado	3
Agua subterránea	Seco	15
RMR básico		68

Tabla 15

RMR corregido de la Progresiva 402.00 m a 420.00 m.

RMR corregido de la Progresiva 402.00 m a 420.00 m.		
Parámetro	Valor	Puntaje
RMR básico		68
Descuento por orientación	-12	-12
RMR corregido		56

4.1.10. Avance paralelo a las discontinuidades

El avance de minado se realiza en condiciones muy desfavorables en donde el rumbo de las discontinuidades es paralela a la dirección de la excavación, ver Figura 21 y Tabla 16.

Figura 21

Avance paralelo a las discontinuidades.

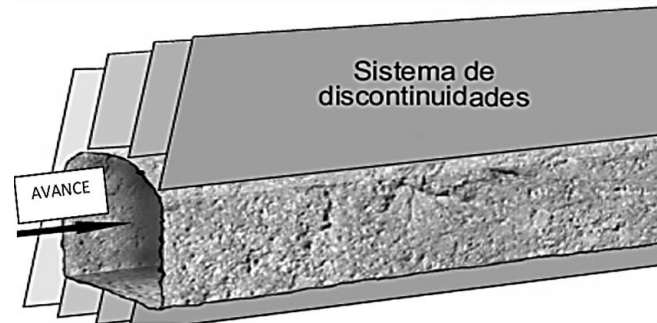


Tabla 16

Calificación del macizo rocoso en la progresiva 402.00 m a 420.00 m.

Clase	I	II	III	IV	V
RMR	81 - 100	61 - 80	41 - 60 (56)	21 - 40	> 20
Calidad	Muy bueno	Bueno	Medio	Malo	Muy malo
Tipo mantenimiento(sin soporte)	20 años para 15 m	1 año para 10 m	1 semana para 5 m	10 horas para 10.5 m	30 minutos para 1 m
Cohesión (Mpa)	> 0.4	0.3 - 0.4	0.2 - 0.3	0.1 - 0.2	> 0.1
Angulo de fricción	> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°

Nota. Tomado del ábaco de RMR de Bieniawski 1989

Tabla 17

Calidad del macizo rocoso.

Calidad del macizo rocoso	
RMR básico	68
Descuento por orientación	-12
RMR corregido	56
Clase	III
Calidad	Medio - Regular
Tiempo de auto soporte	1 Semana para 5 metros
Cohesión	0.2-0.3 MPa
Ángulo de fricción interna (Ø)	25° - 35°



4.1.11. Demostración de la primera hipótesis específica

Luego de determinar el valor del índice RMR corregido, y según el ábaco de Bieniawski, se determina que la calidad del macizo rocoso de pizarra plomo oscuro es de clase III con un valor de 56, lo cual se resume en la Tabla 17.

4.1.12. Discusiones respecto a la calidad del macizo rocoso

Gonzales (2006), indica que la introducción del efecto RMR en las fórmulas clásicas de diseño de pilares permite un mejor estudio preciso de fallas compresivas en pilares. Sobre la base del análisis realizado, se puede llegar a la conclusión de que los métodos clásicos sobrestiman la resistencia del pilar para RMR media y baja.

Este error ha sido compensado tradicionalmente por la aplicación de altos factores de seguridad, Gonzales indica que se ha realizado la investigación en un macizo rocoso de RMR 61-74 y 50-79 es decir en una calidad de roca regular y buena.

Medina V. (2017), indica en su trabajo de investigación que obtuvo un valor para el índice RMR de 77.00, el cual indica una calidad de macizo rocoso de clase IV, es decir buena calidad y su resistencia a la compresión uniaxial es 100.01 MPa, obtenido mediante el esclerómetro, el autor no muestra el uso de RMR en ninguna de sus fórmulas para el cálculo de resistencia del pilar, en los cálculos ha utilizado las fórmulas de área atribuida considerando solamente la resistencia a la compresión uniaxial.

En tanto Mori R. (2017), sostiene que la geomecánica permite desarrollar las zonas de alto riesgo y la garantía de estabilidad al recuperar los pilares, enfatiza que la geomecánica del tajo Manto sur nivel 8 en la mina Magistral, sí permite una adecuada recuperación mediante el método de pilares artificiales, obtuvo el valor mínimo para el índice RMR de 64.70 y el RMR máximo es 75.00 de acuerdo a la propuesta de Bieniawski 1989 la calidad del macizo rocoso es de clase II buena calidad.



Según García J.A. (2018), las mediciones de la RCU se realizaron con ayuda de un esclerómetro o Martillo Schmidt, consideró diez puntos de medición en cada caso distribuidos dentro de la mina.

En el presente trabajo de investigación se ha determinado la calidad del macizo rocoso mediante la clasificación geomecánica de RMR de Bieniawski, de acuerdo al mapeo geomecánico y los cálculos necesarios el valor de RMR corregido es 56, en roca pizarra de clase III de calidad regular.

4.2. DETERMINACIÓN DEL DISEÑO DE LOS PILARES

4.2.1. Condiciones de minado actual

En la Mina Wilsander la sección de la labor es de 2.45 m x 1.90 m aproximadamente considerando el espacio para el tránsito del personal y del acarreo, para las instalaciones eléctricas, de aire comprimido y manga de ventilación, de acuerdo a las condiciones actuales de las operaciones mineras, en las dimensiones de los pilares se ha reducido el ancho hasta 1.50 m, la altura del pilar es de 1.90 considerando que con el circado llegan a 2.30 m, el ancho de la cámara es de 2.50 m y 3.00 m, con el propósito de mejorar la recuperación que repercute directamente en la estabilidad de los pilares.

4.2.2. Evaluación del esfuerzo inducido

Para la evaluación del esfuerzo inducido se tomaron los datos de las condiciones actuales de minado, considerando las características de la zona de estudio la altura del pilar es de 2.20 m tomando en cuenta el minado mediante cámaras y pilares por circado. Ver Tabla 18, Tabla 19, Tabla 20, Figura 22, Figura 23, Figura 24, con ciertas variaciones en otros componentes.

4.2.3. Esfuerzo vertical

Para el cálculo del esfuerzo vertical, se conoce que la densidad de la roca pizarra es 2.79 gr/cm^3 , y se sabe que el ancho de la cámara es de 2.50 m y 3.00 m.

Con el propósito de mejorar la recuperación que repercute directamente en la estabilidad de los pilares se tomará el valor de la altura proyectada de 300.00 m.

Se ha determinado tomando en consideración la fórmula:

$$\sigma_v = \gamma * g * Z$$

$$\sigma_v = 2.78 * 9.81 * 300.00$$

$$\sigma_v = 8.181 \text{ MPa}$$

Por lo que el esfuerzo vertical es 8.181MPa. Luego veremos un análisis de la variación de las dimensiones del pilar para cámaras de 2.50 m x 2.50 m, 3.00 m x 3.00 m y 3.50 m x 3.50 m:

Tabla 18

Registro de la variación de la geometría del pilar para cámara de 2.50 m x 2.50 m.

Registro de la variación de la geometría de pilar para cámara de 2.50 m x 2.50 m.							
	Wp (m)	Lp	Wo (m)	Lo	Hp (m)	Wp*Lp	Wp/Hp
1	1.50	1.50	2.50	2.50	2.20	2.25	0.68
2	2.00	2.00	2.50	2.50	2.20	4.00	0.91
3	2.50	2.50	2.50	2.50	2.20	6.25	1.14
4	3.00	3.00	2.50	2.50	2.20	9.00	1.36
5	3.50	3.50	2.50	2.50	2.20	12.25	1.60
6	4.00	4.00	2.50	2.50	2.20	16.00	1.81
7	4.50	4.50	2.50	2.50	2.20	20.25	2.05
8	5.00	5.00	2.50	2.50	2.20	25.00	2.27

Figura 22

Registro de la variación de la geometría del pilar para cámara de 2.50 m x 2.50 m.

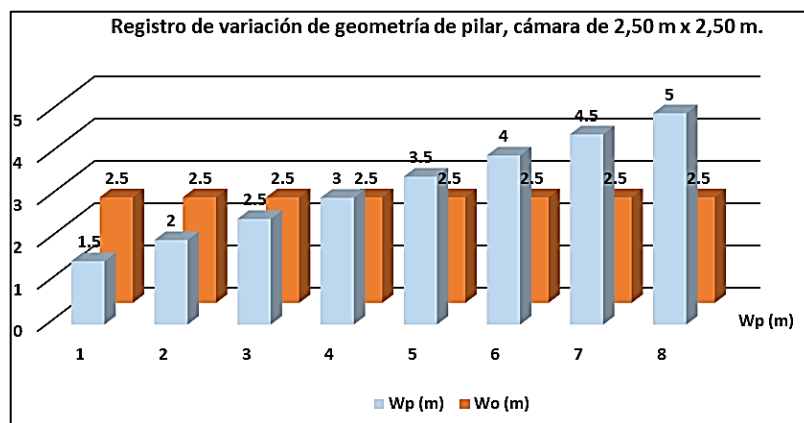


Tabla 19

Registro de la variación de la geometría del pilar para cámara de 3.00 m. x 3.00 m.

Registro de la variación de la geometría de pilar para cámara de 3.00 m. x 3.00 m.							
	Wp (m)	Lp	Wo (m)	Lo	Hp (m)	Wp*Lp	Wp/Hp
1	1.50	1.50	3.00	3.00	2.20	2.25	0.68
2	2.00	2.00	3.00	3.00	2.20	4.00	0.91
3	2.50	2.50	3.00	3.00	2.20	6.25	1.14
4	3.00	3.00	3.00	3.00	2.20	9.00	1.36
5	3.50	3.50	3.00	3.00	2.20	12.25	1.60
6	4.00	4.00	3.00	3.00	2.20	16.00	1.81
7	4.50	4.50	3.00	3.00	2.20	20.25	2.05
8	5.00	5.00	3.00	3.00	2.20	25.00	2.27

Figura 23

Registro de la variación de la geometría del pilar para cámara de 3.00 m. x 3.00 m.

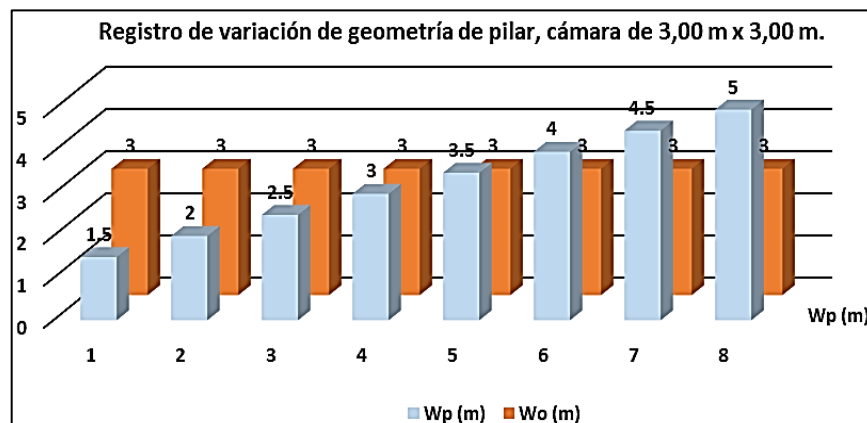


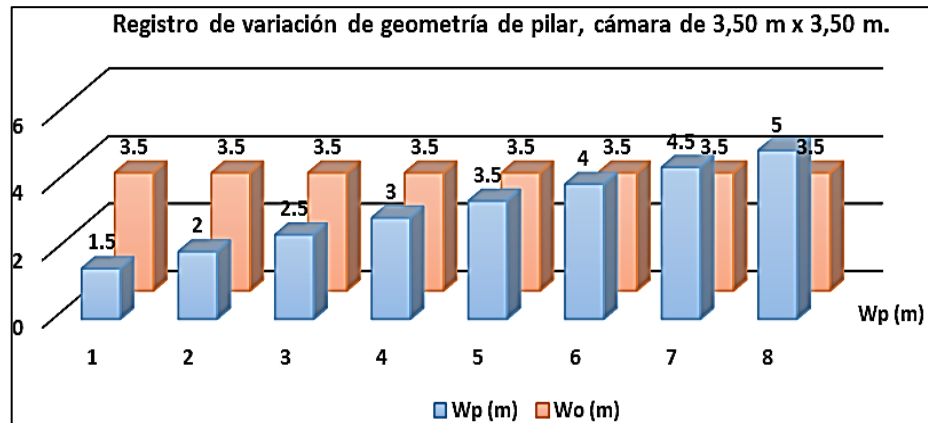
Tabla 20

Registro de la variación de la geometría del pilar para cámara de 3.50 m x 3.50 m.

Registro de la variación de la geometría de pilar para cámara de 3.50 m x 3.50 m.							
	Wp(m)	Lp	Wo (m)	Lo	Hp (m)	Wp*Lp	Wp/Hp
1	1.50	1.50	3.50	3.50	2.20	2.25	0.68
2	2.00	2.00	3.50	3.50	2.20	4.00	0.91
3	2.50	2.50	3.50	3.50	2.20	6.25	1.14
4	3.00	3.00	3.50	3.50	2.20	9.00	1.36
5	3.50	3.50	3.50	3.50	2.20	12.25	1.60
6	4.00	4.00	3.50	3.50	2.20	16.00	1.81
7	4.50	4.50	3.50	3.50	2.20	20.25	2.05
8	5.00	5.00	3.50	3.50	2.20	25.00	2.27

Figura 24

Registro de la variación de la geometría del pilar para cámara de 3.50 m x 3.50 m.



4.2.4. Cálculo del esfuerzo inducido para cámaras y pilares cuadrados

El esfuerzo inducido se determina con los datos de la geometría del pilar cuyo ancho y largo para la investigación varían desde 1.50 m hasta 5.00 m respectivamente, mientras que se consideró la dimensión de la cámara constante de 2.50 m x 2.50 m para la evaluación en el escenario 1; de 3.00 m x 3.00 m para la evaluación en el escenario 2; y de 3.50 m x 3.50 m para la evaluación en el escenario 3.

4.2.5. Diseño de los pilares con cámara de 2.50 m x 2.50 m.

En el diseño de pilares se consideró que el factor de seguridad y recuperación se determinará mediante la propuesta de Lunder y Pakalnis, para ocho casos; en donde varían las dimensiones del pilar desde 1.50 m x 1.50 m hasta 5.00 m x 5.00 m y la cámara es constante con una dimensión de 2.50 m x 2.50 m, se realizan los cálculos con el propósito de evaluar la estabilidad de las excavaciones, los cálculos se han realizado considerando los siguientes parámetros: Esfuerzo inducido, confinamiento, factor de escalamiento, resistencia del pilar (esfuerzo del pilar), factor de seguridad y recuperación. Veamos los cálculos:

Caso 1. Evaluación del pilar de 1.50 m x 1.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m.



Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(1.50 + 2.50) * (1.50 + 2.50)}{1.50 * 1.50}$$

$$\sigma_p = 58.20 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log (0.68 + 0.75)]^{\frac{1.4}{0.68}}$$

$$C_{pav} = 0.0105$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - C_{pav}}{1 + C_{pav}} \right) \right]$$

Sí: $C_{pav} = 0.0105$, entonces:

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.0105}{1 + 0.0105} \right) \right]$$

$$k = 0.207$$

Resistencia del pilar.

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 k)$$

Sí: $k = 0.207$; y $RCU = 97.7 \text{ MPa}$, entonces:

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 0.207)$$

$$S_p = 33.96 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{S_p}{\sigma_p}$$

$$F.S. = \frac{33.36 \text{ MPa}}{58.20 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 0,584$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{Wp * Lp}{(Wp + Wo) * (Lp + Lo)} \right]$$



$$Rr = 1 - \left[\frac{1.50 * 1.50}{(1.50 + 2.50) * (1.50 + 2.50)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.141]$$

$$Rr = 86\%$$

El resumen de los resultados para el caso 1, se muestran en la Tabla 21. El procesamiento de los datos y cálculos para la variación de las demás dimensiones, se realizan de manera similar que el primer caso.

Tabla 21

Características del pilar de 1.50 m x 1.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m.

Características del pilar de 1.50 m x 1.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	W _o	2.50 m
2	Ancho de pilar	W _p	1.50m
3	Largo de pilar	L _p	1.50m
4	Largo de cámara	L _o	2.50 m
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	58.2 MPa
7	Confinamiento	C _{pav}	0.0105
8	Factor de escalamiento	k	0.207
9	Resistencia del pilar	S _p	33.96 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	0.58
11	Recuperación	R _r	86 %

Caso 2. Evaluación del pilar de 2.00 m x 2.00 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m.

Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(2.00 + 2.50) * (2.00 + 2.50)}{2.00 * 2.00}$$

$$\sigma_p = 41.72 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(0.91 + 0.75)]^{\frac{1.4}{0.91}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.22]^{1.54}$$

$$C_{pav} = 0.045$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.045}{1 + 0.045} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.914)]$$

$$k = \text{Tan}[23.94]$$

$$k = 0.44$$

Resistencia del pilar.

$$k = 0.44$$

$$RCU = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 0.44)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (0.9088)$$

$$S_p = 39.07 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{39.07 \text{ MPa}}{41.72 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 0.94$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{2.00 * 2.00}{(2.00 + 2.50) * (2.00 + 2.50)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.198]$$

$$Rr = 80\%$$

El resumen de los resultados para el caso 2, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 22

Características del pilar de 2.00 m x 2.00 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m.

Características del pilar de 2.00 m x 2.00 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	W _o	2.50 m
2	Ancho de pilar	W _p	2,00 m
3	Largo de pilar	L _p	2,00 m
4	Largo de cámara	L _o	2.50 m
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	41.72 MPa
7	Confinamiento	C _{pav}	0.045
8	Factor de escalamiento	k	0.44
9	Resistencia del pilar	S _p	39.07 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	0.94
11	Recuperación	R _r	80 %

Caso 3. Evaluación del pilar de 2.50 m x 2.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m.

Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(2.50 + 2.50) * (2.50 + 2.50)}{2.50 * 2.50}$$

$$\sigma_p = 32.72 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(1.14 + 0.75)]^{\frac{1.4}{1.14}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.276]^{1.23}$$

$$C_{pav} = 0.0943$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.0943}{1 + 0.0943} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.828)]$$

$$k = \text{Tan}[34.11]$$

$$k = 0.677$$

Resistencia del pilar.

$$k = 0.677$$

$$RCU = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 0.677)$$

$$S_p = 0.44 * 97.7 \text{ MPa} * (1.032)$$

$$S_p = 44.36 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{44.36 \text{ MPa}}{32.72 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 1.36$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{2.50 * 2.50}{(2.50 + 2.50) * (2.50 + 2.50)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.25]$$

$$Rr = 0.75 * 100\%$$

$$Rr = 75\%$$

El resumen de los resultados para el caso 3, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 23

Características del pilar de 2.50 m x 2.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m.

Características del pilar de 2.50 m x 2.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	W _o	2.50 m
2	Ancho de pilar	W _p	2.50 m
3	Largo de pilar	L _p	2.50 m
4	Largo de cámara	L _o	2.50 m
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	32.72 MPa
7	Confinamiento	C _{pav}	0.0943
8	Factor de escalamiento	k	0.677
9	Resistencia del pilar	S _p	44.36 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	1.36
11	Recuperación	R _r	75 %

Caso 4. Evaluación del pilar de 3.00 m x 3.00 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m.

Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(3.00 + 2.50) * (3.00 + 2.50)}{3.00 * 3.00}$$

$$\sigma_p = 27.49 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(1.36 + 0.75)]^{\frac{1.4}{1.36}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.324]^{1.029}$$

$$C_{pav} = 0.144$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.144}{1 + 0.144} \right) \right]$$



$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.75)]$$

$$k = \text{Tan}[41.41]$$

$$k = 0.88$$

Resistencia del pilar.

$$k = 0.88$$

$$RCU = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 0.88)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (1.14)$$

$$S_p = 49.00 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{49.00 \text{ MPa}}{27.49 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 1.78 \text{ MPa}$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{3.00 * 3.00}{(3.00 + 2.50) * (3.00 + 2.50)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.298]$$

$$Rr = 70\%$$

El resumen de los resultados para el caso 4, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 24

Características del pilar de 3.00 m. x 3.00 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m.

Características del pilar de 3.00 m x 3.00 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	W _o	2.50 m
2	Ancho de pilar	W _p	3.00 m.
3	Largo de pilar	L _p	3.00 m.
4	Largo de cámara	L _o	2.50 m
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	27.49 MPa
7	Confinamiento	C _{pav}	0.144
8	Factor de escalamiento	k	0.88
9	Resistencia del pilar	S _p	49 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	1.78
11	Recuperación	R _r	70 %



Caso 5. Evaluación del pilar de 3.50 m x 3.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m.

Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(3.50 + 2.50) * (3.50 + 2.50)}{3.50 * 3.50}$$

$$\sigma_p = 24.05 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(1.60 + 0.75)]^{\frac{1.4}{1.60}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.37]^{0.875}$$

$$C_{pav} = 0.193$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.193}{1 + 0.193} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.676)]$$

$$k = \text{Tan}[47.47]$$

$$k = 1.10$$

Resistencia del pilar.

$$k = 1.10$$

$$RCU = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 1.10)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (1.2052)$$

$$S_p = 53.82 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{53.82 \text{ MPa}}{24.05 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 2.24$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{3.50 * 3.50}{(3.50 + 2.50) * (3.50 + 2.50)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.34]$$

$$Rr = 66\%$$

El resumen de los resultados para el caso 5, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 25

Características del pilar de 3.50 m x 3.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m.

Características del pilar de 3.50 m x 3.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	Wo	2.50 m
2	Ancho de pilar	Wp	3.50 m
3	Largo de pilar	Lp	3.50 m
4	Largo de cámara	Lo	2.50 m
5	Esfuerzo vertical	σ_v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ_p	24.05 MPa
7	Confinamiento	C_{pav}	0.193
8	Factor de escalamiento	k	1.1
9	Resistencia del pilar	S_p	53.82 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	2.24
11	Recuperación	R_r	66 %

Caso 6. Evaluación del pilar de 4.00 m x 4.00 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m.

Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(4.00 + 2.50) * (4.00 + 2.50)}{4.00 * 4.00}$$

$$\sigma_p = 21.60 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(1.81 + 0.75)]^{\frac{1.4}{1.81}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.41]^{0.77}$$

$$C_{pav} = 0.23$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.23}{1 + 0.23} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.626)]$$



$$k = \text{Tan}[51.204]$$

$$k = 1.205$$

Resistencia del pilar.

$$k = 1.205$$

$$RCU = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 1.205)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (1.33)$$

$$S_p = 57.17 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{57.17 \text{ MPa}}{21.60 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 2.65$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{4.00 * 4.00}{(4.00 + 2.50) * (4.00 + 2.50)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.38]$$

$$Rr = 62\%$$

El resumen de los resultados para el caso 6, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 26

Características del pilar de 4.00 m x 4.00 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m.

Características del pilar de 4.00 m x 4.00 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	W _o	2.50 m
2	Ancho de pilar	W _p	4.00 m
3	Largo de pilar	L _p	4.00 m
4	Largo de cámara	L _o	2.50 m
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	21.6 MPa
7	Confinamiento	C _{pav}	0.23
8	Factor de escalamiento	k	1.205
9	Resistencia del pilar	S _p	57.17 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	2.65
11	Recuperación	R _r	62 %



Caso 7. Evaluación del pilar de 4.50 m x 4.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m.

Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(4.50 + 2.50) * (4.50 + 2.50)}{4.50 * 4.50}$$

$$\sigma_p = 19.80 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(2.05 + 0.75)]^{\frac{1.4}{2.05}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.45]^{0.68}$$

$$C_{pav} = 0.27$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.27}{1 + 0.27} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.575)]$$

$$k = \text{Tan}[54.90]$$

$$k = 1.42$$

Resistencia del pilar.

$$k = 1.42$$

$$RCU = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 1.42)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (1.42)$$

$$S_p = 61.04 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{61.04 \text{ MPa}}{19.80 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 3.08$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{4.50 * 4.50}{(4.50 + 2.50) * (4.50 + 2.50)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.41]$$

$$Rr = 59\%$$

El resumen de los resultados para el caso 7, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 27

Características del pilar de 4.50 m x 4.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m.

Características del pilar de 4.50 m x 4.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	Wo	2.50 m
2	Ancho de pilar	Wp	4.50 m
3	Largo de pilar	Lp	4.50 m
4	Largo de cámara	Lo	2.50 m
5	Esfuerzo vertical	σ_v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ_p	19.8 MPa
7	Confinamiento	C_{pav}	0.27
8	Factor de escalamiento	k	1.402
9	Resistencia del pilar	S_p	61.04 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	3.08
11	Recuperación	R_r	59%

Caso 8. Evaluación del pilar de 5.00 m x 5.00 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m.

Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(5.00 + 2.50) * (5.00 + 2.50)}{5.00 * 5.00}$$

$$\sigma_p = 18.41 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(2.27 + 0.75)]^{\frac{1.4}{2.27}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.48]^{0.62}$$

$$C_{pav} = 0.2898$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.2898}{1 + 0.2898} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.55)]$$

$$k = \text{Tan}[56.63]$$

$$k = 1.52$$

Resistencia del pilar.

$$k = 1.52$$

$$RCU = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 1.52)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (1.47)$$

$$S_p = 63.2 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{63.20 \text{ MPa}}{18.41 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 3.43$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{5.00 * 5.00}{(5.00 + 2.50) * (5.00 + 2.50)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.44]$$

$$Rr = 56\%$$

El resumen de los resultados para el caso 8, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 28

Características del pilar de 5.00 m x 5.00 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m.

Características del pilar de 5.00 m x 5.00 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	W _o	2.50 m
2	Ancho de pilar	W _p	5.00m
3	Largo de pilar	L _p	5.00m
4	Largo de cámara	L _o	2.50 m
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	18.41 MPa
7	Confinamiento	C _{pav}	0.2898
8	Factor de escalamiento	k	1.52
9	Resistencia del pilar	S _p	63.2 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	3.43
11	Recuperación	R _r	56%

4.2.6. Diseño de los pilares con cámara de 3.00 m x 3.00 m.

Se realiza la evaluación y los cálculos con variación de geometría del pilar de 1.50 m x 1.50 m hasta 5.00 m x 5.00 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m, veamos el procesamiento de los datos para cada caso de acuerdo al procedimiento antes realizado:

Caso 1. Evaluación del pilar de 1.50 m x 1.50 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.

Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(1.50 + 3.00) * (1.50 + 3.00)}{1.50 * 1.50}$$

$$\sigma_p = 73.63 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(0.68 + 0.75)]^{\frac{1.4}{0.68}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.16]^{2.06}$$

$$C_{pav} = 0.0105$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\arccos \left(\frac{1 - C_{pav}}{1 + C_{pav}} \right) \right]$$

$$C_{pav} = 0.0105$$

$$k = \text{Tan} \left[\arccos \left(\frac{1 - 0.0105}{1 + 0.0105} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\arccos(0.9792)]$$

$$k = \text{Tan}[11.71]$$

$$k = 0.207$$

Resistencia del pilar.

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 k)$$

$$k = 0.207$$

$$RCU = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 0.207)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (0.79)$$

$$S_p = 33.96 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{33.96 \text{ MPa}}{73.63 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 0.46$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{Wp * Lp}{(Wp + Wo) * (Lp + Lo)} \right]$$

$$Rr = 1 - \left[\frac{1.50 * 1.50}{(1.50 + 3.00) * (1.50 + 3.00)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.11]$$

$$Rr = 89\%$$

El resumen de los resultados para el caso 1, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 29

Características del pilar de 1.50 m x 1.50 m y cámara de 3.00 m. x 3.00 m.

Características del pilar de 1.50 m x 1.50 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor (m)
1	Ancho de cámara	Wo	3.00
2	Ancho de pilar	Wp	1.50
3	Largo de pilar	Lp	1.50
4	Largo de cámara	Lo	3.00
5	Esfuerzo vertical	σ_v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ_p	73.63 MPa
7	Confinamiento	C_{pav}	0.0105
8	Factor de escalamiento	k	0.207
9	Resistencia del pilar	S_p	33.96 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	0.46
11	Recuperación	R_r	89 %

Caso 2. Evaluación del pilar de 2.00 m x 2.00 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.

Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(2.00 + 3.00) * (2.00 + 3.00)}{2.00 * 2.00}$$



$$\sigma_p = 51.13 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(0.91 + 0.75)]^{\frac{1.4}{0.91}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.22]^{1.54}$$

$$C_{pav} = 0.045$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.045}{1 + 0.045} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.914)]$$

$$k = \text{Tan}[23.94]$$

$$k = 0.44$$

Resistencia del pilar.

$$k = 0.44$$

$$RCU = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 0.44)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (0.9088)$$

$$S_p = 39.07 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{39.07 \text{ MPa}}{51.13 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 0.76$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{2.00 * 2.00}{(2.00 + 3.00) * (2.00 + 3.00)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.16]$$

$$Rr = 84\%$$

El resumen de los resultados para el caso 2, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 30

Características del pilar de 2.00 m x 2.00 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.

Características del pilar de 2.00 m x 2.00 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.			
ID	Nombre	Símbolo	Valor (m)
1	Ancho de cámara	W _o	3.00
2	Ancho de pilar	W _p	2.00
3	Largo de pilar	L _p	2.00
4	Largo de cámara	L _o	3.00
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	51.13
7	Confinamiento	C _{pav}	0.045
8	Factor de escalamiento	k	0.44
9	Resistencia del pilar	S _p	39.07 MPa
	Factor de seguridad	F.S.	0.76
10	Recuperación	R _r	84 %

Caso 3. Evaluación del pilar de 2.50 m x 2.50 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.

Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(2.50 + 3.00) * (2.50 + 3.00)}{2.50 * 2.50}$$

$$\sigma_p = 38.6 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(1.14 + 0.75)]^{\frac{1.4}{1.14}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.276]^{1.203}$$

$$C_{pav} = 0.0943$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.0943}{1 + 0.0943} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.828)]$$

$$k = \text{Tan}[34.11]$$

$$k = 0.677$$

Resistencia del pilar.

$$k = 0.677$$

$$RCU = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 0.677)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (1.032)$$

$$S_p = 44.36 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{44.36 \text{ MPa}}{38.60 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 1.15$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{2.50 * 2.50}{(2.50 + 3.00) * (2.50 + 3.00)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.21]$$

$$Rr = 79\%$$

El resumen de los resultados para el caso 3, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 31

Características del pilar de 2.50 m x 2.50 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.

Características del pilar de 2.50 m x 2.50 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.			
ID	Nombre	Símbolo	Valor (m)
1	Ancho de cámara	W _o	3.00
2	Ancho de pilar	W _p	2.50
3	Largo de pilar	L _p	2.50
4	Largo de cámara	L _o	3.00
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	38.6 MPa
7	Confinamiento	C _{pav}	0.0943
8	Factor de escalamiento	k	0.677
9	Resistencia del pilar	S _p	44.36 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	1.15
11	Recuperación	R _r	79 %

Caso 4. Evaluación del pilar de 3.00 m x 3.00 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.

Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(3.00 + 3.00) * (3.00 + 3.00)}{3.00 * 3.00}$$

$$\sigma_p = 32.72 \text{ MPa}$$



Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(1.36 + 0.75)]^{\frac{1.4}{1.36}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.324]^{1.029}$$

$$C_{pav} = 0.144$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.144}{1 + 0.144} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.75)]$$

$$k = \text{Tan}[41.41]$$

$$k = 0.88$$

Resistencia del pilar.

$$k = 0.88$$

$$RCU = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 0.88)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (1.14)$$

$$S_p = 49.00 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{49.00 \text{ MPa}}{32.72 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 1.50$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{3.00 * 3.00}{(3.00 + 3.00) * (3.00 + 3.00)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.25]$$

$$Rr = 75\%$$

El resumen de los resultados para el caso 4, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 32

Características del pilar de 3.00 m. x 3.00 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.

Características del pilar de 3.00 m x 3.00 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.			
ID	Nombre	Símbolo	Valor (m)
1	Ancho de cámara	W _o	3.00
2	Ancho de pilar	W _p	3.00
3	Largo de pilar	L _p	3.00
4	Largo de cámara	L _o	3.00
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	32.72 MPa
7	Confinamiento	C _{pav}	0.144
8	Factor de escalamiento	k	0.88
9	Resistencia del pilar	S _p	49 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	1.50
11	Recuperación	R _r	75 %

Caso 5. Evaluación del pilar de 3.50 m x 3.50 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.

Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(3.50 + 3.00) * (3.50 + 3.00)}{3.50 * 3.50}$$

$$\sigma_p = 28.22 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(1.60 + 0.75)]^{\frac{1.4}{1.60}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.37]^{0.875}$$

$$C_{pav} = 0.193$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.193}{1 + 0.193} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.676)]$$

$$k = \text{Tan}[47.47]$$

$$k = 1.10$$

Resistencia del pilar.

$$k = 1.10$$

$$RCU = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 1.1)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (1.2052)$$

$$S_p = 53.82 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{53.82 \text{ MPa}}{28.22 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 1.91$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{3.50 * 3.50}{(3.50 + 3.00) * (3.50 + 3.00)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.29]$$

$$Rr = 71\%$$

El resumen de los resultados para el caso 5, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 33

Características del pilar de 3.50 m x 3.50 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.

Características del pilar de 3.50 m x 3.50 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.			
ID	Nombre	Símbolo	Valor (m)
1	Ancho de cámara	W _o	3.00
2	Ancho de pilar	W _p	3.50
3	Largo de pilar	L _p	3.50
4	Largo de cámara	L _o	3.00
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	28.22 MPa
7	Confinamiento	C _{pav}	0.193
8	Factor de escalamiento	k	1.10
9	Resistencia del pilar	S _p	53.82 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	1.91
11	Recuperación	R _r	70 %

Caso 6. Evaluación del pilar de 4.00 m x 4.00 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.

Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(4.00 + 3.00) * (4.00 + 3.00)}{4.00 * 4.00}$$

$$\sigma_p = 25.00 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(1.81 + 0.75)]^{\frac{1.4}{1.81}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.41]^{0.77}$$

$$C_{pav} = 0.23$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.23}{1 + 0.23} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.626)]$$

$$k = \text{Tan}[51.204]$$

$$k = 1.205$$

Resistencia del pilar.

$$k = 1.205$$

$$RCU = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 1.205)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (1.33)$$

$$S_p = 57.17 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{57.17 \text{ MPa}}{25.00 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 2.29$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{4.00 * 4.00}{(4.00 + 3.00) * (4.00 + 3.00)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.33]$$

$$Rr = 67\%$$

El resumen de los resultados para el caso 6, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 34*Características del pilar de 4.00 m x 4.00 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.*

Características del pilar de 4.00 m x 4.00 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	W _o	3.00 m.
2	Ancho de pilar	W _p	4.00 m
3	Largo de pilar	L _p	4.00 m
4	Largo de cámara	L _o	3.00 m.
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	25 MPa
7	Confinamiento	C _{pav}	0.23
8	Factor de escalamiento	k	1.205
9	Resistencia del pilar	S _p	57.17 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	2.29
11	Recuperación	R _r	67%

Caso 7. Evaluación del pilar de 4.50 m x 4.50 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.**Esfuerzo inducido.**

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(4.50 + 3.00) * (4.50 + 3.00)}{4.50 * 4.50}$$

$$\sigma_p = 22.74 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(2.05 + 0.75)]^{\frac{1.4}{2.05}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.45]^{0.68}$$

$$C_{pav} = 0.27$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.27}{1 + 0.27} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.575)]$$

$$k = \text{Tan}[54.90]$$

$$k = 1.42$$

Resistencia del pilar.

$$k = 1.42$$

$$\text{RCU} = 97.70 \text{ MPa}$$



$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 1.42)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (1.42)$$

$$S_p = 61.04 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{61.04 \text{ MPa}}{22.74 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 2.68$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{4.50 * 4.50}{(4.50 + 3.00) * (4.50 + 3.00)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.36]$$

$$Rr = 64\%$$

El resumen de los resultados para el caso 8, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 35

Características del pilar de 4.50 m x 4.50 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.

Características del pilar de 4.50 m x 4.50 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	W _o	3.00 m.
2	Ancho de pilar	W _p	4.50 m
3	Largo de pilar	L _p	4.50 m
4	Largo de cámara	L _o	3.00 m.
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	22.74 MPa
7	Confinamiento	C _{pav}	0.27
8	Factor de escalamiento	k	1.402
9	Resistencia del pilar	S _p	61.04 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	2.68
11	Recuperación	R _r	64 %

Caso 8. Evaluación del pilar de 5.00 m x 5.00 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.

Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(5.00 + 3.00) * (5.00 + 3.00)}{5.00 * 5.00}$$

$$\sigma_p = 20.94 \text{ MPa}$$



Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log (2.27 + 0.75)]^{\frac{1.4}{2.27}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.48]^{0.62}$$

$$C_{pav} = 0.2898$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.2898}{1 + 0.2898} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.55)]$$

$$k = \text{Tan}[56.63]$$

$$k = 1.52$$

Resistencia del pilar.

$$k = 1.52$$

$$RCU = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 1.52)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (1.47)$$

$$S_p = 63.2 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{63.20 \text{ MPa}}{20.94 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 3.02$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{5.00 * 5.00}{(5.00 + 3.00) * (5.00 + 3.00)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.39]$$

$$Rr = 61\%$$

El resumen de los resultados para el caso 8, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 36*Características del pilar de 5.00 m x 5.00 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.*

Características del pilar de 5.00 m x 5.00 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m.			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	W _o	3.00 m.
2	Ancho de pilar	W _p	5.00m
3	Largo de pilar	L _p	5.00m
4	Largo de cámara	L _o	3.00 m.
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	20.94 MPa
7	Confinamiento	C _{pav}	0.2898
8	Factor de escalamiento	k	1.52
9	Resistencia del pilar	S _p	63.2 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	3.02
11	Recuperación	R _r	61 %

4.2.7. Diseño de los pilares con cámara de 3.50 m x 3.50 m

Se considera una cámara cuadrada de 3.50 m x 3.50 m, estas dimensiones se han estimado considerando que en algunas zonas se han presentado estas secciones debido al circado no adecuado son esporádicos, sin embargo constituyen zonas no adecuadas conforme a las normas de seguridad minera con soporte natural, por lo que necesariamente requiere de soporte geomecánico, considerando la propuesta de Lunder y Pakalnis. Se realiza el cálculo para 8 casos con la variación de la geometría del pilar desde 1.50 m x 1.50 m hasta de 5.00 m x 5.00 m.

Caso 1. Evaluación del pilar de 1.50 m x 1.50 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m.

Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(1.50 + 3.50) * (1.50 + 3.50)}{1.50 * 1.50}$$

$$\sigma_p = 90.89 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(0.68 + 0.75)]^{\frac{1.4}{0.68}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.16]^{2.06}$$

$$C_{pav} = 0.0105$$



Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[a \cos \left(\frac{1 - C_{pav}}{1 + C_{pav}} \right) \right]$$

$$C_{pav} = 0.0105$$

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.0105}{1 + 0.0105} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.9792)]$$

$$k = \text{Tan}[11.71]$$

$$k = 0.207$$

Resistencia del pilar.

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 k)$$

$$k = 0.207$$

$$RCU = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 0.207)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (0.79)$$

$$S_p = 33.96 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{33.96 \text{ MPa}}{90.89 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 0.37$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{1.50 * 1.50}{(1.50 + 3.50) * (1.50 + 3.50)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.09]$$

$$Rr = 91\%$$

El resumen de los resultados para el caso 1, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 37*Características del pilar de 1.50 m x 1.50 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m.*

Características del pilar de 1.50 m x 1.50 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	W _o	3.50 m
2	Ancho de pilar	W _p	1.50m
3	Largo de pilar	L _p	1.50m
4	Largo de cámara	L _o	3.50 m
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	90.89 MPa
7	Confinamiento	C _{pav}	0.0105
8	Factor de escalamiento	k	0.207
9	Resistencia del pilar	S _p	33.96 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	0.37
11	Recuperación	R _r	91 %

Caso 2. Evaluación del pilar de 2.00 m x 2.00 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m.**Esfuerzo inducido.**

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(2.00 + 3.50) * (2.00 + 3.50)}{2.00 * 2.00}$$

$$\sigma_p = 61.85 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(0.91 + 0.75)]^{\frac{1.4}{0.91}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.22]^{1.54}$$

$$C_{pav} = 0.045$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.045}{1 + 0.045} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.914)]$$

$$k = \text{Tan}[23.94]$$

$$k = 0.44$$

Resistencia del pilar.

$$k = 0.44$$

$$\text{RCU} = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 0.44)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (0.9088)$$

$$S_p = 39.07 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{39.07 \text{ MPa}}{61.85 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 0.63$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{2.00 * 2.00}{(2.00 + 3.50) * (2.00 + 3.50)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.13]$$

$$Rr = 87\%$$

El resumen de los resultados para el caso 2, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 38

Características del pilar de 2.00 m x 2.00 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m.

Características del pilar de 2.00 m x 2.00 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	W _o	3.50 m
2	Ancho de pilar	W _p	2.00 m
3	Largo de pilar	L _p	2.00 m
4	Largo de cámara	L _o	3.50 m
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	61.85 MPa
7	Confinamiento	C _{pav}	0.045
8	Factor de escalamiento	k	0.44
9	Resistencia del pilar	S _p	30.07 MPa
	Factor de seguridad	F.S.	0.63
10	Recuperación	R _r	87 %

Caso 3. Evaluación del pilar de 2.50 m x 2.50 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m.

Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(2.50 + 3.50) * (2.50 + 3.50)}{2.50 * 2.50}$$

$$\sigma_p = 47.12 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(1.14 + 0.75)]^{\frac{1.4}{1.14}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.276]^{1.203}$$

$$C_{pav} = 0.0943$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.0943}{1 + 0.0943} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.828)]$$

$$k = \text{Tan}[34.11]$$

$$k = 0.677$$

Resistencia del pilar.

$$k = 0.677$$

$$RCU = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 0.677)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (1.032)$$

$$S_p = 44.36 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{43.36 \text{ MPa}}{47.12 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 0.92$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{2.50 * 2.50}{(2.50 + 3.50) * (2.50 + 3.50)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.17]$$

$$Rr = 83\%$$

El resumen de los resultados para el caso 3, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 39*Características del pilar de 2.50 m x 2.50 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m.*

Características del pilar de 2.50 m x 2.50 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	W _o	3.50 m
2	Ancho de pilar	W _p	2.50 m
3	Largo de pilar	L _p	2.50 m
4	Largo de cámara	L _o	3.50 m
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	47.12 MPa
7	Confinamiento	C _{pav}	0.0943
8	Factor de escalamiento	k	0.677
9	Resistencia del pilar	S _p	44.36 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	0.92
11	Recuperación	R _r	83 %

Caso 4. Evaluación del pilar de 3.00 m x 3.00 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m.**Esfuerzo inducido.**

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(3.00 + 3.50) * (3.00 + 3.50)}{3.00 * 3.00}$$

$$\sigma_p = 38.37 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(1.36 + 0.75)]^{\frac{1.4}{1.36}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.324]^{1.029}$$

$$C_{pav} = 0.144$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.144}{1 + 0.144} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.75)]$$

$$k = \text{Tan}[41.41]$$

$$k = 0.88$$

Resistencia del pilar.

$$k = 0.88$$

$$\text{RCU} = 97.70 \text{ MPa}$$



$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 0.88)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (1.14)$$

$$S_p = 49.00 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{49.00 \text{ MPa}}{38.37 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 1.208$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{3.00 * 3.00}{(3.00 + 3.50) * (3.00 + 3.50)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.21]$$

$$Rr = 79\%$$

El resumen de los resultados para el caso 4, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 40

Características del pilar de 3.00 m. x 3.00 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m.

Características del pilar de 3.00 m x 3.00 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	Wo	3.50 m
2	Ancho de pilar	Wp	3.00 m.
3	Largo de pilar	Lp	3.00 m.
4	Largo de cámara	Lo	3.50 m
5	Esfuerzo vertical	σ_v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ_p	38.37 MPa
7	Confinamiento	C_{pav}	0.144
8	Factor de escalamiento	k	0.88
9	Resistencia del pilar	S_p	49 MPa
	Factor de seguridad	F.S.	1.208
10	Recuperación	R_r	79 %

Caso 5. Evaluación del pilar de 3.50 m x 3.50 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m.

Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(3.50 + 3.50) * (3.50 + 3.50)}{3.50 * 3.50}$$

$$\sigma_p = 32.72 \text{ MPa}$$



Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(1.60 + 0.75)]^{\frac{1.4}{1.60}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.37]^{0.875}$$

$$C_{pav} = 0.193$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.193}{1 + 0.193} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.676)]$$

$$k = \text{Tan}[47.47]$$

$$k = 1.10$$

Resistencia del pilar.

$$k = 1.10$$

$$RCU = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 1.10)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (1.2052)$$

$$S_p = 53.82 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{53.82 \text{ MPa}}{32.72 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 1.64$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{3.50 * 3.50}{(3.50 + 3.50) * (3.50 + 3.50)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.25]$$

$$Rr = 75\%$$

El resumen de los resultados para el caso 5, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 41*Características del pilar de 3.50 m x 3.50 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m.*

Características del pilar de 3.50 m x 3.50 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m.			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	W _o	3.50 m
2	Ancho de pilar	W _p	3.50 m
3	Largo de pilar	L _p	3.50 m
4	Largo de cámara	L _o	3.50 m
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	32.72 MPa
7	Confinamiento	C _{pav}	0.193
8	Factor de escalamiento	k	1.10
9	Resistencia del pilar	S _p	53.82 MPa
	Factor de seguridad	F.S.	1.64
10	Recuperación	R _r	75 %

Caso 6. Evaluación del pilar de 4.00 m x 4.00 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m.**Esfuerzo inducido.**

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(4.00 + 3.50) * (4.00 + 3.50)}{4.00 * 4.00}$$

$$\sigma_p = 28.80 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(1.81 + 0.75)]^{\frac{1.4}{1.81}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.41]^{0.77}$$

$$C_{pav} = 0.23$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.23}{1 + 0.23} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.626)]$$

$$k = \text{Tan}[51.204]$$

$$k = 1.205$$

Resistencia del pilar.

$$k = 1.205$$

$$\text{RCU} = 97.70 \text{ MPa}$$



$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 1.205)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (1.33)$$

$$S_p = 57.17 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{57.17 \text{ MPa}}{28.80 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 1.99$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{4.00 * 4.00}{(4.00 + 3.50) * (4.00 + 3.50)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.28]$$

$$Rr = 72\%$$

El resumen de los resultados para el caso 6, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 42

Características del pilar de 4.00 m x 4.00 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m.

Características del pilar de 4.00 m x 4.00 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	W _o	3.50 m
2	Ancho de pilar	W _p	4.00 m
3	Largo de pilar	L _p	4.00 m
4	Largo de cámara	L _o	3.50 m
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	28.8 MPa
7	Confinamiento	C _{pav}	0.23
8	Factor de escalamiento	k	1.205
9	Resistencia del pilar	S _p	57.17 MPa
	Factor de seguridad	F.S.	1.99
10	Recuperación	R _r	72 %

Caso 7. Evaluación del pilar de 4.50 m x 4.50 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m.

Esfuerzo inducido.

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(4.50 + 3.50) * (4.50 + 3.50)}{4.50 * 4.50}$$

$$\sigma_p = 25.85 \text{ MPa}$$



Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log (2.05 + 0.75)]^{\frac{1.4}{2.05}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.45]^{0.68}$$

$$C_{pav} = 0.27$$

Factor de escalamiento.

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.27}{1 + 0.27} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.575)]$$

$$k = \text{Tan}[54.90]$$

$$k = 1.42$$

Resistencia del pilar.

$$k = 1.42$$

$$RCU = 97.70 \text{ MPa}$$

$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 1.42)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (1.42)$$

$$S_p = 61.04 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{61.04 \text{ MPa}}{25.85 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 2.36$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{4.50 * 4.50}{(4.50 + 3.50) * (4.50 + 3.50)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.32]$$

$$Rr = 68\%$$

El resumen de los resultados para el caso 7, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 43*Características del pilar de 4.50 m x 4.50 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m.*

Características del pilar de 4.50 m x 4.50 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m.			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	W _o	3.50 m
2	Ancho de pilar	W _p	4.50 m
3	Largo de pilar	L _p	4.50 m
4	Largo de cámara	L _o	3.50 m
5	Esfuerzo vertical	σ _v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ _p	25.85 MPa
7	Confinamiento	C _{pav}	0.27
8	Factor de escalamiento	k	1.402
9	Resistencia del pilar	S _p	61.04 MPa
	Factor de seguridad	F.S.	2.36
10	Recuperación	R _r	68 %

Caso 8. Evaluación del pilar de 5.00 m x 5.00 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m.**Esfuerzo inducido.**

$$\sigma_p = 8.181 \text{ MPa} * \frac{(5.00 + 3.50) * (5.00 + 3.50)}{5.00 * 5.00}$$

$$\sigma_p = 23.64 \text{ MPa}$$

Confinamiento.

$$C_{pav} = 0.46 * [\log(2.27 + 0.75)]^{\frac{1.4}{2.27}}$$

$$C_{pav} = 0.46 * [0.48]^{0.62}$$

$$C_{pav} = 0.2898$$

Factor de escalamiento (k).

$$k = \text{Tan} \left[\text{acos} \left(\frac{1 - 0.2898}{1 + 0.2898} \right) \right]$$

$$k = \text{Tan}[\text{acos}(0.55)]$$

$$k = \text{Tan}[56.63]$$

$$k = 1.52$$

Resistencia del pilar.

$$k = 1.52$$

$$\text{RCU} = 97.70 \text{ MPa}$$



$$S_p = 0.44 * RCU * (0.68 + 0.52 * 1.52)$$

$$S_p = 0.44 * 97.70 \text{ MPa} * (1.47)$$

$$S_p = 63.20 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad.

$$F.S. = \frac{63.20 \text{ MPa}}{23.64 \text{ MPa}}$$

$$F.S. = 2.67$$

Recuperación.

$$Rr = 1 - \left[\frac{5.00 * 5.00}{(5.00 + 3.50) * (5.00 + 3.50)} \right]$$

$$Rr = 1 - [0.35]$$

$$Rr = 65\%$$

El resumen de los resultados para el caso 8, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 44

Características del pilar de 5.00 m x 5.00 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m.

Características del pilar de 5.00 m x 5.00 m y cámara de 3.50 m x 3.50 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Ancho de cámara	Wo	3.50 m
2	Ancho de pilar	Wp	5.00m
3	Largo de pilar	Lp	5.00m
4	Largo de cámara	Lo	3.50 m
5	Esfuerzo vertical	σ_v	8.181 MPa
6	Esfuerzo inducido	σ_p	23.64 MPa
7	Confinamiento	C_{pav}	0.2898
8	Factor de escalamiento	k	1.52
9	Resistencia del pilar	S_p	63.20 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	2.67
11	Recuperación	R_r	65 %

4.2.8. Resumen del diseño de los pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 2.50 m x 2.50 m.

A continuación se muestra un resumen de los cálculos realizados por método de Lunder y Pakalnis, con la variación de la dimensiones de los pilares con cámara de 2.50 m x 2.50 m, veamos:

Tabla 45

Diseño de los pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 2.50 m x 2.50 m.

Diseño de pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 2.50 m x 2.50 m													
	Wp	Wo	Lp	Lo	Hp	Wp*Lp	Wp/Hp	σ_p	Cpav	k	Sp	FS	Recuperación
Id	m	m	m	m	m	m ²	Adim	MPa	Adim	Adim	MPa	Adim	%
1	1.50	2.50	1.50	2.50	2.20	2.25	0.68	58.20	0.0105	0.207	33.96	0.58	86
2	2.00	2.50	2.00	2.50	2.20	4.00	0.91	41.72	0.045	0.44	39.07	0.94	80
3	2.50	2.50	2.50	2.50	2.20	6.25	1.14	32.72	0.0943	0.677	43.36	1.32	75
4	3.00	2.50	3.00	2.50	2.20	9.00	1.36	27.49	0.144	0.88	49.00	1.78	70
5	3.50	2.50	3.50	2.50	2.20	12.25	1.60	24.05	0.193	1.10	53.82	2.24	66
6	4.00	2.50	4.00	2.50	2.20	16	1.81	21.60	0.23	1.205	57.17	2.65	62
7	4.50	2.50	4.50	2.50	2.20	20.25	2.05	19.80	0.27	1.42	61.04	3.08	59
8	5.00	2.50	5.00	2.50	2.20	25	2.27	18.41	0.2898	1.52	63.2	3.43	56

Figura 25

Diseño de los pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 2.50 m x 2.50 m.

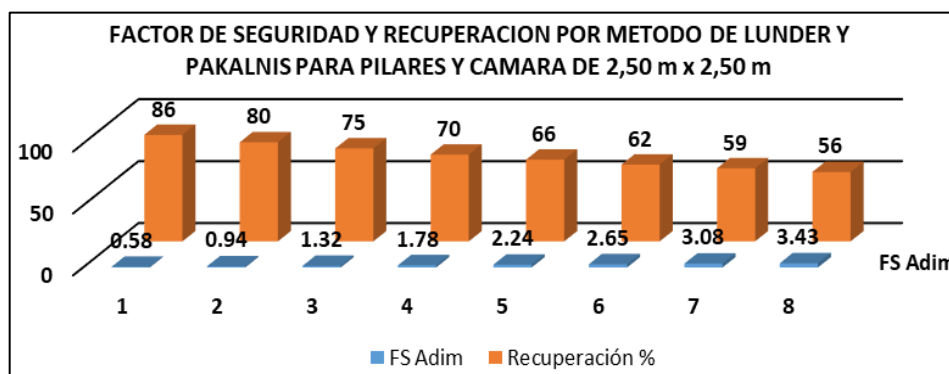


Tabla 46

Diseño de los pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 3.00 m x 3.00 m.

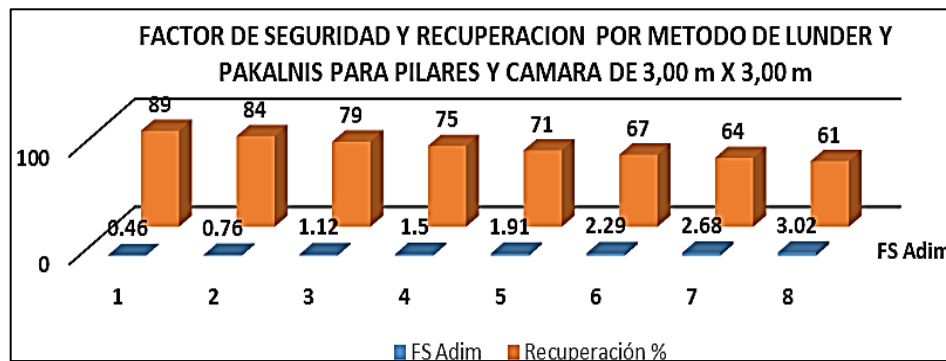
Diseño de pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 3.00 m. x 3.00 m.													
	Wp	Wo	Lp	Lo	Hp	Wp*Lp	W/Hp	σ_p	Cpav	k	Sp	FS	Recuperación
	m	m	m	m	m	m ²	Adim	MPa	Adim	Adim	MPa	Adim	%
1	1.50	3.00	1.50	3.00	2.20	2.25	0.68	73.63	0.0105	0.207	33.96	0.46	89
2	2.00	3.00	2.00	3.00	2.20	4.00	0.91	51.13	0.045	0.44	39.07	0.76	84
3	2.50	3.00	2.50	3.00	2.20	6.25	1.14	38.6	0.0943	0.677	43.36	1.12	79
4	3.00	3.00	3.00	3.00	2.20	9.00	1.36	32.72	0.144	0.88	49.00	1.5	75
5	3.50	3.00	3.50	3.00	2.20	12.25	1.60	28.22	0.193	1.1	53.82	1.91	71
6	4.00	3.00	4.00	3.00	2.20	16	1.81	25	0.23	1.205	57.17	2.29	67
7	4.50	3.00	4.50	3.00	2.20	20.25	2.05	22.74	0.27	1.42	61.04	2.68	64
8	5.00	3.00	5.00	3.00	2.20	25	2.27	20.94	0.2898	1.52	63.2	3.02	61

4.2.9. Resumen del diseño de los pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 3.00 m x 3.00 m.

En la Tabla 46 y la Figura 26 se muestra un resumen de los cálculos realizados por método de Lunder y Pakalnis, con la variación de las dimensiones de los pilares con cámara de 3.00 m x 3.00 m.

Figura 26

Diseño de los pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 3.00 m x 3.00 m.



4.2.10. Resumen del diseño de los pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 3.50 m x 3.50 m.

A continuación se muestra un resumen de los cálculos realizados por método de Lunder y Pakalnis, con la variación de las dimensiones de los pilares con cámara de 3.50 m x 3.50 m, veamos:

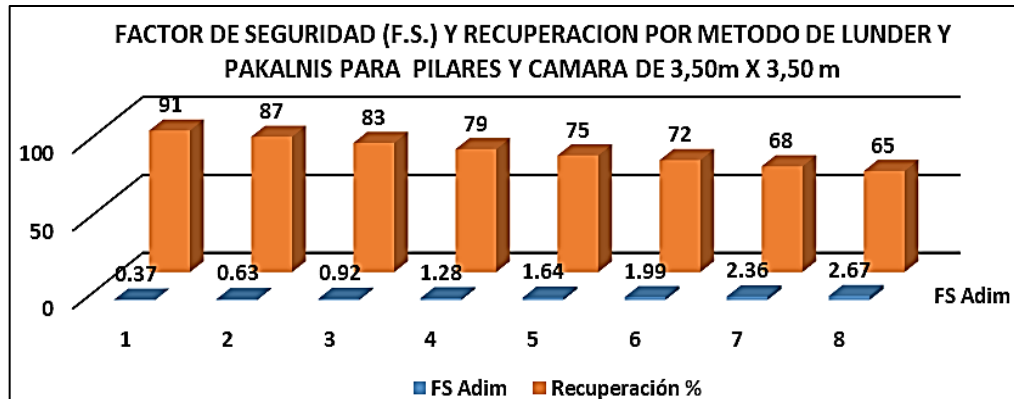
Tabla 47

Diseño de los pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 3.50 m x 3.50 m.

Diseño de pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 3.50 m x 3.50 m													
Wp	Wo	Lp	Lo	Hp	Wp*Lp	W/H	σ_p	Cpav	k	Sp	FS	Recuperación %	
m	m	m	m	m	m ²	Adim	MPa	Adim	Adim	MPa	Adim	%	
1	1.50	3.50	1.50	3.50	2.25	0.68	90.89	0.0105	0.207	33.96	0.37	91	
2	2.00	3.50	2.00	3.50	4.00	0.91	61.85	0.045	0.44	39.07	0.63	87	
3	2.50	3.50	2.50	3.50	6.25	1.14	47.12	0.0943	0.677	43.36	0.92	83	
4	3.00	3.50	3.00	3.50	9.00	1.36	38.37	0.144	0.88	49.00	1.208	79	
5	3.50	3.50	3.50	3.50	12.25	1.60	32.72	0.193	1.1	53.82	1.64	75	
6	4.00	3.50	4.00	3.50	16	1.81	28.8	0.23	1.205	57.17	1.99	72	
7	4.50	3.50	4.50	3.50	20.25	2.05	25.85	0.27	1.42	61.04	2.36	68	
8	5.00	3.50	5.00	3.50	25	2.27	23.64	0.2898	1.52	63.2	2.67	65	

Figura 27

Diseño de los pilares por el método de Lunder y Pakalnis con cámara de 3.50 m x 3.50 m.



4.2.11. Diseño de los pilares considerando el índice RMR de Bieniawski

En el presente trabajo de investigación el índice RMR calculado para la demostración de la primera hipótesis es 68. Los cálculos se han realizado considerando los siguientes parámetros: Esfuerzo inducido, confinamiento, factor de escalamiento, resistencia del pilar (esfuerzo del pilar), factor de seguridad y recuperación.

Es importante señalar que para cada uno de los parámetros los cálculos son similares a los realizados según la propuesta por Lunder y Pakalnis, por lo que se han tomado esos valores a excepción del parámetro que hace referencia a la resistencia del pilar. Recordemos que de acuerdo a la propuesta de Gonzales se calcula la resistencia del pilar en donde el ancho varía desde 1.50 m hasta 5.00 m y la altura es constante de 2.20 m conforme a las condiciones actuales en la labor de producción de la Mina Wilsander. Veamos los cálculos para una cámara de 2.50 m x 2.50 m:

Caso 1. Evaluación de la resistencia del pilar de 1.50 m x 2.20 m

$$Sp = RCU * \left[e^{\frac{RMR-100}{20}} \right] \frac{W^{0.5}}{H^{0.75}}$$

$$Sp = 97.70 MPa * \left[e^{\frac{68-100}{20}} \right] \frac{1.50^{0.5}}{2.20^{0.75}}$$

$$Sp = 97.70 MPa * \left[e^{\frac{-32}{20}} \right] \frac{1.20}{1.81}$$



$$Sp = 97.70 \text{ MPa} * [e^{-1.6}]0.67$$

$$Sp = 13.09 \text{ MPa}$$

El resumen de los resultados para el caso 1, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 48

Características del ancho del pilar de 1.50 m x 2.20 m.

Características del ancho del pilar de 1.50 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Rock mass rating 1989	RMR 89	68
2	Resistencia compresiva uniaxial	RCU	97.70 MPa
3	Ancho del pilar	Wp	1.50m
4	Altura del pilar	Hp	2.20 m
6	Esfuerzo inducido	σ_p	58.20 MPa
9	Resistencia del pilar	S_p	13.09 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	0.22
11	Recuperación	R_r	86 %

Caso 2. Evaluación de la resistencia del pilar de 2.00 m x 2.20 m

$$Sp = RCU * \left[e^{\frac{68-100}{20}} \right] \frac{2.00^{0.5}}{2.20^{0.75}}$$

$$Sp = 97.70 \text{ MPa} * \left[e^{\frac{-32}{20}} \right] \frac{1.4142}{1.81}$$

$$Sp = 97.70 \text{ MPa} * [e^{-1.6}]0.78$$

$$Sp = 15.24 \text{ MPa}$$

El resumen de los resultados para el caso 2, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 49

Características del ancho del pilar de 2.00 m x 2.20 m.

Características del ancho del pilar de 2.00 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Rock mass rating 1989	RMR 89	68
2	Resistencia compresiva uniaxial	RCU	97.70 MPa
3	Ancho del pilar	Wp	2.00 m
4	Altura del pilar	Hp	2.20 m
6	Esfuerzo inducido	σ_p	41.72 MPa
9	Resistencia del pilar	S_p	15.24 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	0.37
11	Recuperación	R_r	80 %

Caso 3. Evaluación de la resistencia del pilar de 2.50 m x 2.20 m

$$Sp = RCU * \left[e^{\frac{68-100}{20}} \right] \frac{2.50^{0.5}}{2.20^{0.75}}$$

$$Sp = 97.70 \text{ MPa} * \left[e^{\frac{-32}{20}} \right] \frac{1.58}{1.81}$$

$$Sp = 17.00 \text{ MPa}$$

El resumen de los resultados para el caso 3, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 50

Características del ancho del pilar de 2.50 m x 2.20 m.

Características del ancho del pilar de 2.50 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Rock mass rating 1989	RMR 89	68
2	Resistencia compresiva uniaxial	RCU	97.70 MPa
3	Ancho del pilar	Wp	2.50 m
4	Altura del pilar	Hp	2.20 m
6	Esfuerzo inducido	σ_p	32.72 MPa
9	Resistencia del pilar	S_p	17.00 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	0.52
11	Recuperación	R_r	75 %

Caso 4. Evaluación de la resistencia del pilar de 3.00 m x 2.20 m

$$Sp = RCU * \left[e^{\frac{68-100}{20}} \right] \frac{3.00^{0.5}}{2.20^{0.75}}$$

$$Sp = 97.70 \text{ MPa} * \left[e^{\frac{-32}{20}} \right] \frac{1.73}{1.81}$$

$$Sp = 18.76 \text{ MPa}$$

El resumen de los resultados para el caso 4, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 51

Características del ancho del pilar de 3.00 m x 2.20 m.

Características del ancho del pilar de 3.00 m.			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Rock mass rating 1989	RMR 89	68
2	Resistencia compresiva uniaxial	RCU	97.70 MPa
3	Ancho del pilar	Wp	3.00 m
4	Altura del pilar	Hp	2.20 m
6	Esfuerzo inducido	σ_p	27.49 MPa
9	Resistencia del pilar	S_p	18.76 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	0.68
11	Recuperación	R_r	70 %

Caso 5. Evaluación de la resistencia del pilar de 3.50 m x 2.20 m

$$Sp = 97.70 \text{ MPa} * \left[e^{\frac{68-100}{20}} \right] \frac{3.50^{0.5}}{2.20^{0.75}}$$

$$Sp = 97.70 \text{ MPa} * \left[e^{\frac{-32}{20}} \right] \frac{1.87}{1.81}$$

$$Sp = 20.18 \text{ MPa}$$

El resumen de los resultados para el caso 5, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 52

Características del ancho del pilar de 3.50 m x 2.20 m.

Características del ancho del pilar de 3.50 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Rock mass rating 1989	RMR 89	68
2	Resistencia compresiva uniaxial	RCU	97.70 MPa
3	Ancho del pilar	Wp	3.50 m
4	Altura del pilar	Hp	2.20 m
6	Esfuerzo inducido	σ_p	24.05 MPa
9	Resistencia del pilar	S_p	20.18 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	0.84
11	Recuperación	R_r	66 %

Caso 6. Evaluación de la resistencia del pilar de 4.00 m x 2.20 m

$$Sp = 97.70 \text{ MPa} * \left[e^{\frac{68-100}{20}} \right] \frac{4.00^{0.5}}{2.20^{0.75}}$$

$$Sp = 97.70 \text{ MPa} * \left[e^{\frac{-32}{20}} \right] \frac{2.00}{1.81}$$

$$Sp = 21.60 \text{ MPa}$$

El resumen de los resultados para el caso 6, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 53

Características del ancho del pilar de 4.00 m x 2.20 m

Características del ancho del pilar de 4.00 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Rock mass rating 1989	RMR 89	68
2	Resistencia compresiva uniaxial	RCU	97.70 MPa
3	Ancho del pilar	Wp	4.00 m
4	Altura del pilar	Hp	2.20 m
6	Esfuerzo inducido	σ_p	21.60 MPa
9	Resistencia del pilar	S_p	21.60 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	1.00
11	Recuperación	R_r	62 %

Caso 7. Evaluación de la resistencia del pilar de 4.50 m x 2.20 m

$$Sp = 97.70 \text{ MPa} * \left[e^{\frac{68-100}{20}} \right] \frac{4.50^{0.5}}{2.20^{0.75}}$$

$$Sp = 97.70 \text{ MPa} * \left[e^{\frac{-32}{20}} \right] \frac{2.12}{1.81}$$

$$Sp = 22.88 \text{ MPa}$$

El resumen de los resultados para el caso 7, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 54

Características del ancho del pilar de 4.50 m x 2.20 m.

Características del ancho del pilar de 4.50 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Rock mass rating 1989	RMR 89	68
2	Resistencia compresiva uniaxial	RCU	97.70 MPa
3	Ancho del pilar	Wp	4.50 m
4	Altura del pilar	Hp	2.20 m
6	Esfuerzo inducido	σ_p	19.80 MPa
9	Resistencia del pilar	S_p	22.88 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	1.20
11	Recuperación	R_r	59 %

Caso 8. Evaluación de la resistencia del pilar de 5.00 m x 2.20 m

$$Sp = 97.70 \text{ MPa} * \left[e^{\frac{68-100}{20}} \right] \frac{5.00^{0.5}}{2.20^{0.75}}$$

$$Sp = 97.70 \text{ MPa} * \left[e^{\frac{-32}{20}} \right] \frac{2.24}{1.81}$$

$$Sp = 97.70 \text{ MPa} * [e^{-1.6}] 1.20 4$$

$$Sp = 24.23 \text{ MPa}$$

El resumen de los resultados para el caso 8, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 55

Características del ancho del pilar de 5.00 m x 2.20 m

Características del ancho del pilar de 5.00 m			
ID	Nombre	Símbolo	Valor
1	Rock mass rating 1989	RMR 89	68
2	Resistencia compresiva uniaxial	RCU	97.7 MPa
3	Ancho del pilar	Wp	5.00 m
4	Altura del pilar	Hp	2.20 m
6	Esfuerzo inducido	σ_p	18.41 MPa
9	Resistencia del pilar	S_p	24.23 MPa
10	Factor de seguridad	F.S.	1.32
11	Recuperación	R_r	56%

4.2.12. Resumen de la evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales para cámara de 2.50 m x 2.50 m.

El resumen de la evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales, para una cámara de 2.50 m x 2.50 m., se muestran en la Tabla 56, y las Figuras 28 y 29.

Figura 28

Evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales con cámara de 2.50 m x 2.50 m.

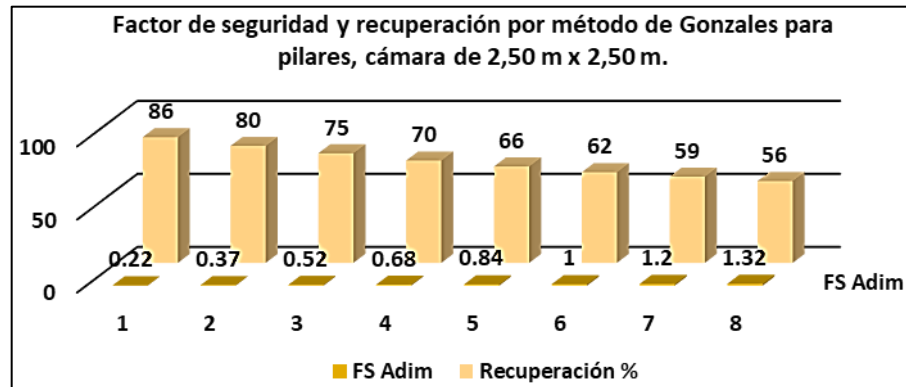
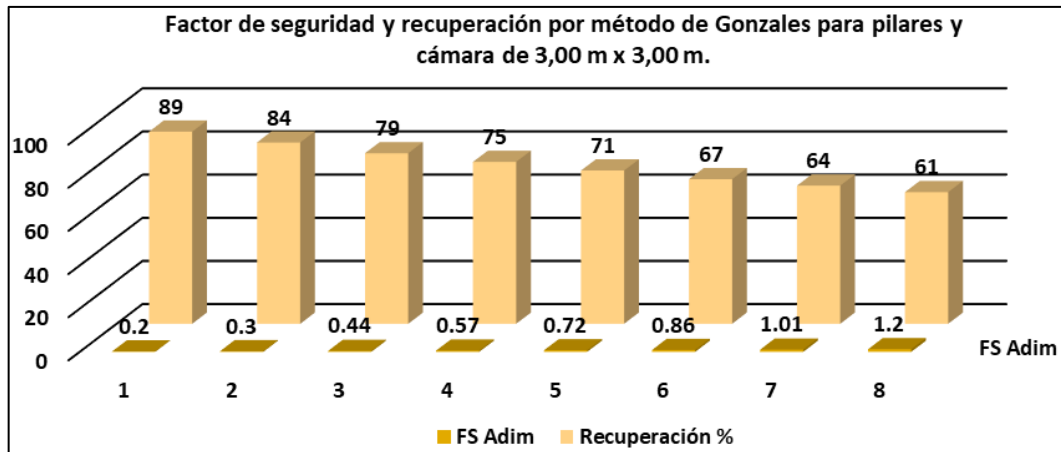


Figura 29

Evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales con cámara de 3.00 m. x 3.00 m.



4.2.13. Resumen de la evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales para cámara de 3.00 m x 3.00 m.

El resumen de la evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales, para una cámara de 3.00 m. x 3.00 m., se muestra en la Figura 29 y la Tabla 57.

Tabla 56

Evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales con cámara de 2.50 m x 2.50 m.

Evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales con cámara de 2.50 m x 2.50 m.													
Wp	Wo	Lp	Lo	Hp	Wp*L P	Wp/H P	σ_p	Cpav	k	Sp	FS	Recup eració n	
m	m	m	m	m	m ²	Adim	MPa	Adim	Adim	MPa	Adi m	%	
1	1.50	2.50	1.50	2.50	2.25	0.68	58.2	0.0105	0.207	13.09	0.22	86	
2	2.00	2.50	2.00	2.50	4.00	0.91	41.72	0.045	0.44	15.24	0.37	80	
3	2.50	2.50	2.50	2.50	6.25	1.14	32.72	0.0943	0.677	17.00	0.52	75	
4	3.00	2.50	3.00	2.50	9.00	1.36	27.49	0.144	0.88	18.76	0.68	70	
5	3.50	2.50	3.50	2.50	12.25	1.60	24.05	0.193	1.1	20.18	0.84	66	
6	4.00	2.50	4.00	2.50	16	1.81	21.60	0.23	1.205	21.6	1.00	62	
7	4.50	2.50	4.50	2.50	20.25	2.05	19.80	0.27	1.42	22.88	1.20	59	
8	5.00	2.50	5.00	2.50	25	2.27	18.41	0.2898	1.52	24.23	1.32	56	

Tabla 57

Evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales con cámara de 3.00 m x 3.00 m.

Evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales con cámara de 3.00 m. x 3.00 m.													
Wp	Wo	Lp	Lo	Hp	Wp* Lp	W/H	σ_p	Cpav	k	Sp	FS	Rec upe raci ón	
m	m	m	m	m	M ²	Adim	MPa	Adim	Adim	MPa	Adim	%	
1	1.50	3.00	1.50	3.00	2.25	0.68	73.63	0.0105	0.207	13.09	0.2	89	
2	2.00	3.00	2.00	3.00	4.00	0.91	51.13	0.045	0.44	15.24	0.3	84	
3	2.50	3.00	2.50	3.00	6.25	1.14	38.6	0.0943	0.677	17.00	0.44	79	
4	3.00	3.00	3.00	3.00	9.00	1.36	32.72	0.144	0.88	18.76	0.57	75	
5	3.50	3.00	3.50	3.00	12.25	1.60	28.22	0.193	1.1	20.18	0.72	71	
6	4.00	3.00	4.00	3.00	16	1.81	25	0.23	1.205	21.6	0.86	67	
7	4.50	3.00	4.50	3.00	20.25	2.05	22.74	0.27	1.42	22.88	1.01	64	
8	5.00	3.00	5.00	3.00	25	2.27	20.94	0.2898	1.52	24.23	1.20	61	

4.2.14. Resumen de la evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales para cámara de 3.50 m x 3.50 m.

El resumen de la evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales, para una cámara de 3.50 m x 3.50 m, se muestra a continuación:

Figura 30

Evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales con cámara de 3.50 m x 3.50 m.

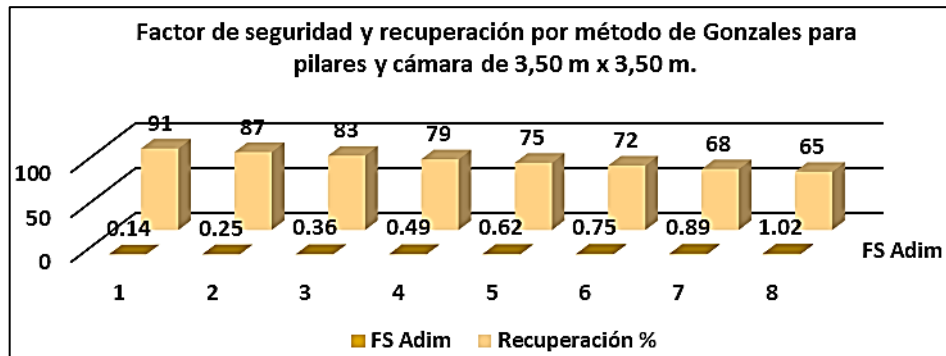


Tabla 58

Evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales con cámara de 3.50 m x 3.50 m.

Evaluación de la resistencia del pilar por el método de Gonzales con cámara de 3.50 m x 3.50 m.													
	Wp	Wo	Lp	Lo	Hp	Wp* Lp	W/H	σ_p	Cpav	k	Sp	FS	Recup eració n
	m	m	m	m	m	M ²	Adim	MPa	Adim	Adim	MPa	Adi m	%
1	1.50	3.50	1.50	3.50	2.20	2.25	0.68	90.89	0.0105	0.207	13.09	0.14	91
2	2.00	3.50	2.00	3.50	2.20	4.00	0.91	61.85	0.045	0.44	15.24	0.25	87
3	2.50	3.50	2.50	3.50	2.20	6.25	1.14	47.12	0.0943	0.677	17.00	0.36	83
4	3.00	3.50	3.00	3.50	2.20	9.00	1.36	38.37	0.144	0.88	18.76	0.49	79
5	3.50	3.50	3.50	3.50	2.20	12.25	1.60	32.72	0.193	1.1	20.18	0.62	75
6	4.00	3.50	4.00	3.50	2.20	16	1.81	28.8	0.23	1.205	21.6	0.75	72
7	4.50	3.50	4.50	3.50	2.20	20.25	2.05	25.85	0.27	1.42	22.88	0.89	68
8	5.00	3.50	5.00	3.50	2.20	25	2.27	23.64	0.2898	1.52	24.23	1.02	65

4.2.15. Discusiones respecto al diseño de pilares

Gonzales, realizó la clasificación de los pilares en función de su factor de seguridad: Para $FS > 1.20$ son pilares estables, para $0.90 < FS < 1.20$ son pilares estables con daño incipiente y para $FS < 0.90$ son pilares con falla manifiesta. La investigación que realizó Medina, en la Corporación Minera Ananea S.A. donde la explotación de recursos minerales auríferos se realiza por el método convencional de cámaras y pilares, y la sección de la galería de extracción de minerales es aproximadamente de 2.50 m x 2.00 m, las dimensiones de las cámaras de 6 metros y pilares de 1 metro.



Logró diseñar cámaras y pilares óptimos de 4.50 m de ancho de la cámara y 2 m de ancho del pilar, teniendo como resultado el factor de seguridad de 2.4 que está muy por encima del valor mínimo aceptable de 1.5, menciona un índice RMR de 77 y un RQD de 98%, sin embargo aplica el esfuerzo vertical como un esfuerzo inducido, no existe demostración sobre los cálculos de esfuerzo inducido y el esfuerzo a la resistencia del pilar en diferentes dimensiones de pilares, al respecto Gonzales en su propuesta incluye el RMR.

En el presente trabajo de investigación se han tomado las propuestas de Lunder y Pakalnis, y la propuesta de Gonzales; éste último determinó la calidad del macizo rocoso en función de los seis parámetros geomecánicos fundamentales. Se realizó la toma de datos mediante la caracterización geomecánica del macizo rocoso en progresivas específicas, obteniendo que la dirección de la mayor concentración de discontinuidades en la orientación es de N 14° E, la resistencia a la compresión uniaxial de roca intacta obtenida por método no destructivo es 97.70 Mpa, el RQD calculado es de 94%, el índice RMR básico tiene un valor de 68 mientras que el RMR ajustado es de 56, por lo que se concluye que la calidad de roca es regular o media en la escala propuesta por Bieniawski.

Para diseñar pilares por el método empírico la mayoría de investigadores no hacen uso de la calidad del macizo rocoso y sólo consideran la geometría del pilar y la compresión uniaxial de la roca, en el presente trabajo considerando la propuesta de Lunder y Pakalnis, se han calculado los esfuerzos inducidos y los esfuerzos resistentes de los pilares, obteniendo que las características de pilar sugerido son: Pilar cuadrado de 2.50 m x 2.50 m y cámara cuadrada de 2.50 m x 2.50 m, con lo cual el factor de seguridad es de 1.37 cercano a 1.40 que es el más apropiado, sin embargo la recuperación es del 75% por lo que se puede considerar que este método es algo conservador y de fácil aplicación.



Sin embargo es necesario mencionar que en este método no se ha aplicado la calidad del macizo rocoso. Atendiendo a la aplicación de la propuesta de Gonzáles se realizaron los cálculos para determinar el diseño del pilar tomando en cuenta la calidad regular de la roca pizarra considerando un índice RMR de 56, un pilar cuadrado de 4.00 m x 4.00 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m resultando así el factor de seguridad de 1.00 y una recuperación de 62%, por lo que necesariamente se tiene que aplicar el sostenimiento en las dimensiones de pilar evaluadas dado que no se logra alcanzar un factor de 1.20, lo que indica que el pilar alcanzaría la estabilidad.

Un resultado más apropiado priorizando la seguridad se da en el caso que las dimensiones de un pilar cuadrado sean de 4.50 m x 4.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m alcanzando un factor de seguridad de 1.20 con una recuperación de 59%, con estos resultados se logra alcanzar un óptimo valor del factor de seguridad, sin embargo en ambos casos se presume falla incipiente del pilar.



V. CONCLUSIONES

En la Mina Wilsander, el macizo rocoso está constituido por pizarra de cuatro familias de discontinuidades, dónde la resistencia a la compresión uniaxial obtenida por el método no destructivo es de 97.7 Mpa, el RQD de 94%, el índice RMR básico es 68, el RMR ajustado es 56, por lo que se concluye que la calidad de la roca es regular.

De acuerdo al método de Lunder y Pakalnis aplicado en la investigación, para un pilar cuadrado de 2.50 m x 2.50 m y cámara cuadrada de 2.50 m x 2.50 m se obtiene un factor de seguridad de 1.37 valor que es cercano a 1.40, mientras que la recuperación es del 75%; en otro escenario para un pilar de 2.50 m x 2.50 m y cámara de 3.00 m x 3.00 m. el factor de seguridad es de 1.12 este valor se aleja más de 1.40, por lo que el primer caso resulta el más apropiado.

De acuerdo a la propuesta de Gonzales aplicado en la investigación para roca pizarra regular con un índice RMR corregido de 56, se calculó que para un pilar de 4.00 m x 4.00 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m se obtiene un factor de seguridad de 1.00 con una recuperación del 62%, mientras que para un pilar de 4.50 m x 4.50 m y cámara de 2.50 m x 2.50 m el factor de seguridad resultante es 1.20 y un porcentaje de recuperación de 59; de ambos escenarios este último es el más apropiado considerando que el factor de seguridad llega al 1.20 que indica que el pilar alcanzaría la estabilidad.



VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda evaluar con mayor precisión la calidad del macizo rocosa mediante mapeo geomecánico de Q de Barton, puesto que en la actualidad la vigencia de métodos empíricos en la determinación de la resistencia de pilares sin la caracterización del macizo rocoso no son tan aplicados en nuestro país, no obstante constituyen métodos sumamente importantes en una excavación subterránea.

Se sugiere el diseño de pilares por el método geomecánico de Yrrarázabal, evaluando todos los parámetros geomecánicos de manera que se pueda comparar los resultados obtenidos en este trabajo y determinar su aplicación en una operación minera que aplique en sus el método de cámaras y pilares.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, L. (2017). *Curso de Fortificación de labores mineras de la Universidad De Atacama*. Santiago de Chile: Facultad de ingeniería, Departamento de Minas.
- Arias, F. (2006). *El proyecto de investigación: Introducción a la metodología*. Venezuela: Sexta edición, Editorial Episteme.
- Bernal, T., C. A. (2010). *Metodología de la Investigación administración, economía, humanidades y ciencias sociales*. Bogotá, Colombia: Tercera Edición, Pearson Educación.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. Canada: Jhon Wiley & Sons. Inc.
- Bongiorno, N. (2012). *Clasificaciones geomecánica de los macizos rocosos según: Bieniawski. Barton. Hoek y Brown. Romana*. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Recuperado de: <https://www.academia.edu/>.
- Castro, A., Bustos, Y., & España, X. (2010). *Dimensionamiento experimental de pilares en la minería subterránea de oro en Colombia expuesto en XIII Congreso Colombiano de Geotecnia*. Colombia: VII Seminario Colombiano de Geotecnia.
- Castro, M. (2003). *El proyecto de investigación y su esquema de elaboración*. Caracas: Editorial Uyapar.
- Córdova, D. (2005). *Curso de capacitación para supervisores en Mina Yauliyacu “Aplicación de la geomecánica en el minado subterráneo”*. Perú: D.C. Ingenieros S.R. Ltda.
- García, J. A. (2006). *Diseño de rebajes para el método de explotación Post-Pillar caso de estudio “Proyecto San Rafael”*. México [Tesis de Pre Grado, Universidad Nacional Autónoma de México] : Facultad de Ingeniería.



- Gonzales de Vallejo, L. I. (2004). *Ingeniería Geológica*. . Madrid - España: Editorial Pearson Educación S.A. .
- González, C., Álvarez, M., Menéndez, A., & al., e. (2006). *Un análisis comparativo de los métodos de diseño de pilares y su aplicación a las minas de mármol*. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s00603-005-0078-z>.
- Gortari, E. (1979). *El método de las ciencias. Nociones preliminares*. México: Editorial Grijalbo.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. México: Sexta edición, McGraw-Hill.
- Hoek, E., Kasier, P. K., & Bawden, W. F. (1995). *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. . United States: AA Balkema Publishers. Recuperado de: <http://worldcat.org/isbn/9054101873>.
- Levin, R. I., & Rubin, D. S. (2004). *Estadística para administración y economía*. Mexico: Perason Educación, Séptima Edición.
- Mamani, F. (2017). *Mapeo geomecánico Guía académica de la Facultad de Ingeniería de Minas*. Perú: Universidad Nacional del Altiplano Puno.
- Medina, V. (2017). *Diseño de cámaras y pilares basado en las características geomecánicas del macizo rocoso en la Corporación Minera Ananea S.A. – 2016*. Puno - Perú [Tesis de Pre Grado, Universidad Nacional del Altiplano]: Repositorio Institucional - Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería de Minas.
- Mori, R. (2017). *Recuperación de pilares mediante el método de pilares artificiales en el tajo Manto Sur, Nivel 8, Mina Magistral, SMRL*. Huaraz-Perú [Tesis de Pre Grado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]: Facultad de



Ingeniería de Minas Geología y Metalurgia, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.

Muñoz R., C. (2011). *Cómo elaborar y asesorar una investigación de tesis*. Naucalpan de Juárez, Edo. de México: 2da Edición, Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

Ortiz, O., & Canchari, G. (2013). *Análisis de variables en el diseño de pilares para sostenimiento minero subterráneo Revista del Instituto de Investigación (RIIGEO)*. Lima Perú: FIGMMG-UNMSM.

Osinergmin. (2007). *Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas*. Lima-Perú: MEM.

Puentes A., V. S. (2008). *Revisión de metodologías para el diseño geomecánico de pilares en minería subterránea Simposio de Habilitación Profesional*. Chile: Universidad Católica de la Santísima Concepción, Departamento de Ingeniería Civil.

Quispe, A. (2012). *Plan de minado subterráneo aplicado en la Corporación Minera Ananea S.A*. Lima – Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica.

Rojas, S. (2009). *Curso de Túneles de la Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería*. Mérida-Venezuela: Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de vías- Geotecnia.

Uchamaco, R. (2017). *Mejoramiento de plan de minado para la optimización de producción en la contrata minera wilsander de la Corporación Minera Ananea S. A*. Puno-Perú: Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería de Minas.



Vergara, R. (2013). *Análisis de la Resistencia y la Estabilidad de Pilares de la Mina Diablo Regimiento, Yacimiento el Teniente* . Santiago-Chile, Tesis de magíster: Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Yrarrazaval, M. (2013). *Nueva fórmula de resistencia para el diseño empírico de pilares de roca*. Santiago de Chile [Tesis de Pre Grado, Universidad de Chile] : Departamento de ingeniería de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

ANEXOS

Anexo 1. Tablas

Tabla 59

Matriz de consistencia

TÍTULO	PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
Diseño de pilares mediante la caracterización geomecánica de la masa rocosa en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.	<p>Problema general: ¿Cómo se pueden diseñar los pilares en la labor de producción con circado mediante la caracterización geomecánica de la masa rocosa en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.?</p>	<p>Objetivo general: Diseñar los pilares mediante la caracterización geomecánica de la masa rocosa en la labor de producción con circado en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A. CMASA.</p>	<p>Hipótesis general: Mediante la caracterización geomecánica de la masa rocosa se logran diseñar los pilares en la labor de producción con circado, en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.</p>	<p>1. Variable independiente: Calidad del macizo rocoso en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.</p> <p>2. Variable dependiente: Diseño de los pilares en la labor de producción con circado en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.</p>	<p>Tipo de investigación: Descriptiva aplicativo Diseño de la investigación: Explicativo con 3 fases: 1.- Recolección 2.- Evaluación 3.- Discusión</p> <p>Población: 70 Sistemas de discontinuidades en la Mina Wilsander</p> <p>Muestra: Parte de la población Muestra=Población</p> <p>Técnicas Registro lineal</p> <p>Instrumentos: Ficha de registro lineal</p>
	<p>Problemas específicos ¿Cómo se puede caracterizar la masa rocosa para determinar su calidad en la labor de producción con circado en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.?</p> <p>¿Cómo se pueden diseñar los pilares en la labor de producción con circado de acuerdo a la caracterización de la masa rocosa en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.?</p>	<p>Objetivos específicos Determinar la calidad de la masa rocosa mediante la caracterización geomecánica en la labor de producción con circado en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.</p> <p>Diseñar los pilares en la labor de producción con circado de acuerdo a la caracterización de la masa rocosa en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.</p>	<p>Hipótesis específicas Mediante la caracterización geomecánica se logra determinar la calidad de la masa rocosa en la labor de producción con circado, en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.</p> <p>Con la caracterización de masa rocosa se logran diseñar los pilares en la labor de producción con circado en la Mina Wilsander de la Corporación Minera Ananea S.A.</p>		

Tabla 60

Registro de las discontinuidades.

N° Diaclasa	Buz.	Dir. Buz.	Espacio (mm)	Persistencia (m)	Apertura (mm)	Rugosidad.	Relleno espesor. (mm)	Meteorización	Agua subterránea
1	80	188	1	3	2	1	2	1	1
2	82	282	1	3	2	2	2	2	1
3	28	23	2	3	2	3	3	3	1
4	88	121	3	4	2	2	2	4	1
5	80	192	3	3	2	3	3	5	1
6	85	285	4	2	1	4	4	4	2
7	33	5	3	1	2	3	3	3	1
8	86	116	4	2	2	4	4	2	2
9	84	193	5	3	3	5	5	3	1
10	86	289	4	2	2	4	4	4	2
11	27	24	3	3	3	3	3	3	2
12	85	108	4	4	4	4	2	2	2
13	78	189	5	3	3	5	1	2	2
14	85	296	4	2	2	5	1	2	1
15	34	27	3	2	3	4	1	2	1
16	86	99	3	3	3	3	1	3	1
17	86	194	3	4	3	4	2	2	2
18	83	302	4	3	3	3	3	3	1
19	36	45	5	2	4	2	2	2	2
20	83	101	4	2	5	3	2	2	1
21	75	198	3	3	5	4	3	2	2
22	77	300	3	4	4	3	2	2	2
23	40	32	4	3	3	4	3	3	2
24	77	104	3	2	2	3	2	2	1
25	71	195	4	2	3	4	2	3	2
26	71	301	5	3	2	4	2	4	1
27	43	36	4	4	3	4	2	3	2
28	78	109	3	5	2	4	3	4	2
29	64	183	2	4	2	4	4	5	1
30	62	299	2	4	2	3	3	4	2
31	38	48	2	5	2	3	4	3	1
32	83	112	3	3	3	3	5	2	2
33	67	190	4	2	2	3	4	1	2
34	57	289	3	3	3	3	3	2	2
35	45	36	4	2	4	2	4	3	2

Tabla 61

Registro de las discontinuidades (continúa).

N° Diaclasa	Buz.	Dir. Buz.	Espacio (mm)	Persistencia.(m)	Apertura. (mm)	Rugosidad.	Relleno espesor. (mm)	Meteorización	Agua subterránea
36	77	126	4	3	3	3	5	4	1
37	78	206	4	2	2	2	4	5	2
38	59	279	5	1	3	1	3	4	1
39	51	34	4	2	2	2	3	3	1
40	74	123	3	3	1	3	2	4	1
41	71	204	4	4	2	2	2	5	1
42	61	271	3	3	1	3	2	4	1
43	48	26	2	4	2	4	2	3	1
44	67	116	3	3	2	3	3	2	2
45	64	199	1	3	2	4	4	3	1
46	54	267	3	2	3	5	3	4	2
47	49	18	3	3	2	4	2	5	1
48	62	198	4	4	3	3	3	4	2
49	44	278	3	3	4	2	2	3	1
50	55	23	4	4	3	1	3	2	2
51	55	197	3	5	2	1	3	2	2
52	51	285	4	4	3	2	4	3	1
53	61	30	3	3	2	3	5	4	2
54	65	198	4	4	1	2	4	3	1
55	60	283	4	3	2	1	3	2	1
56	60	32	4	2	1	2	2	1	1
57	73	200	3	1	2	3	1	2	1
58	63	278	3	2	2	4	2	3	1
59	63	25	3	3	2	3	1	2	1
60	61	190	4	2	1	2	2	2	1
61	66	285	5	3	2	3	2	3	1
62	67	183	4	2	3	4	2	2	1
63	69	280	3	3	4	5	2	2	1
64	72	286	3	2	5	4	2	2	1
65	73	287	4	3	2	3	3	2	2
66	73	291	5	3	3	3	2	3	3
67	69	297	4	3	2	4	3	3	3
68	65	289	3	4	3	3	2	3	3
69	65	302	2	3	1	3	3	3	3
70	70	303	3	3	2	3	2	3	2

Anexo 2. Figuras

Figura 31

Ubicación de la UEA Ana María

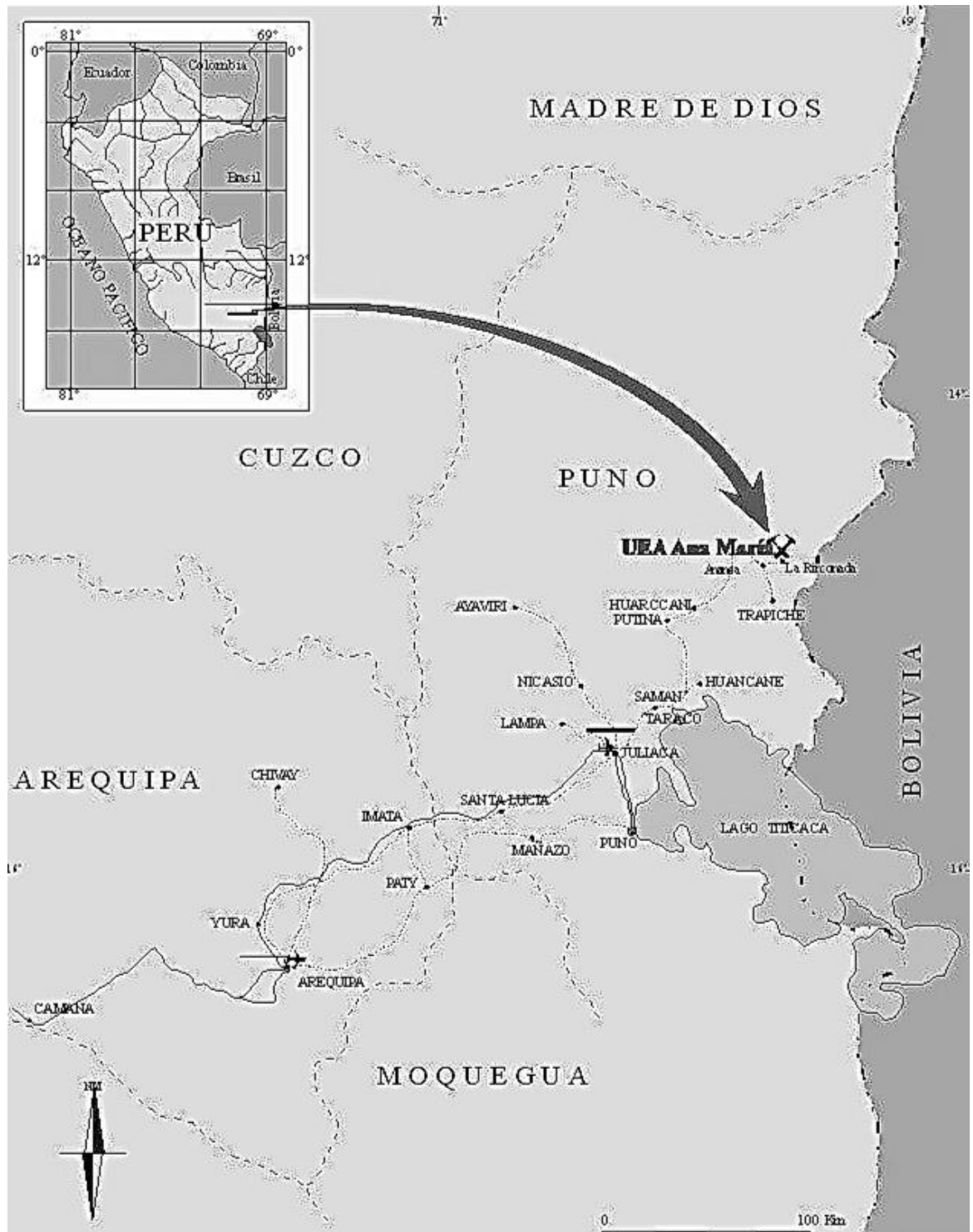


Figura 32

Histograma del espaciado de las 4 familias.

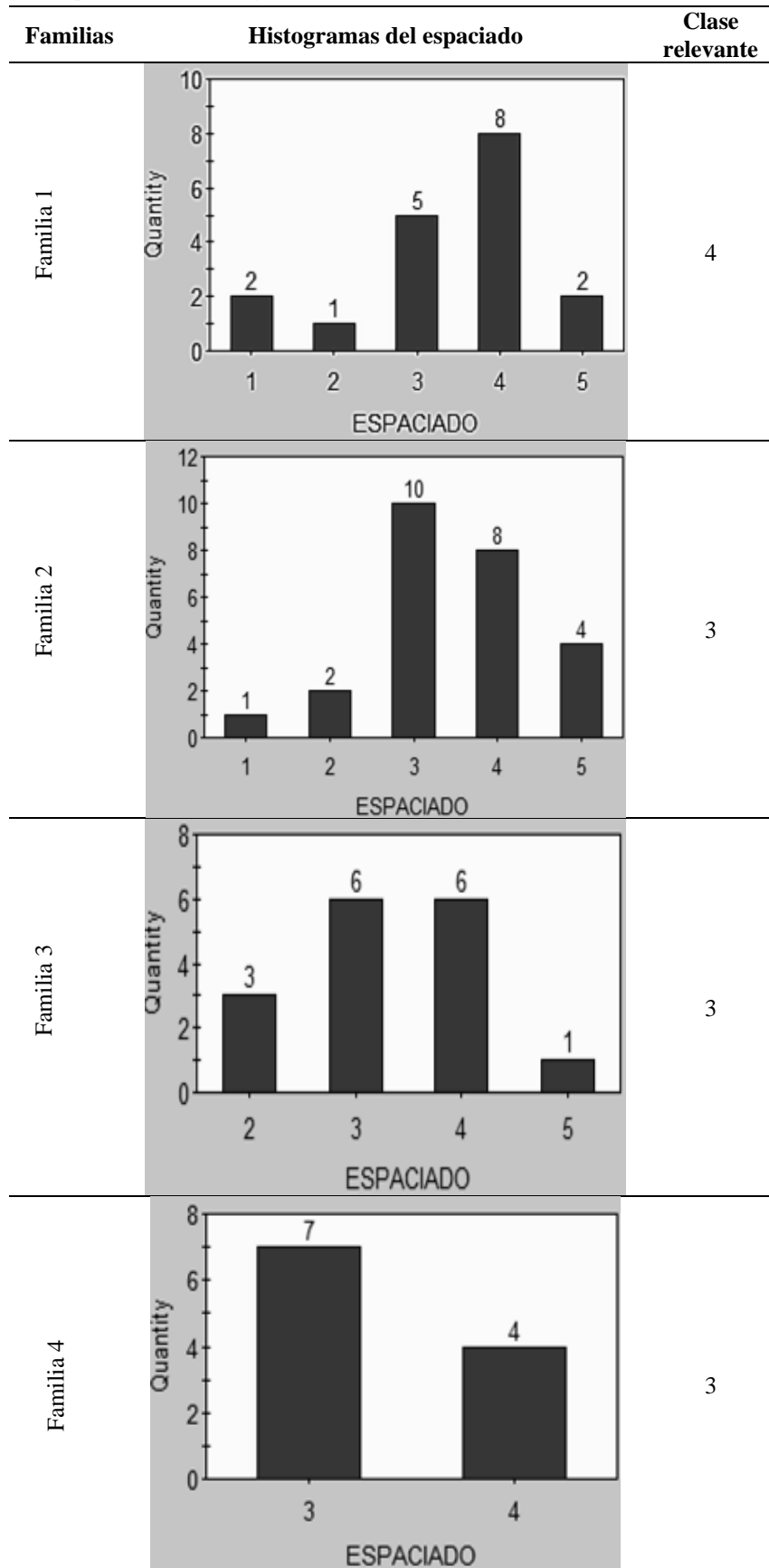


Figura 33

Histograma de la persistencia de las 4 familias.

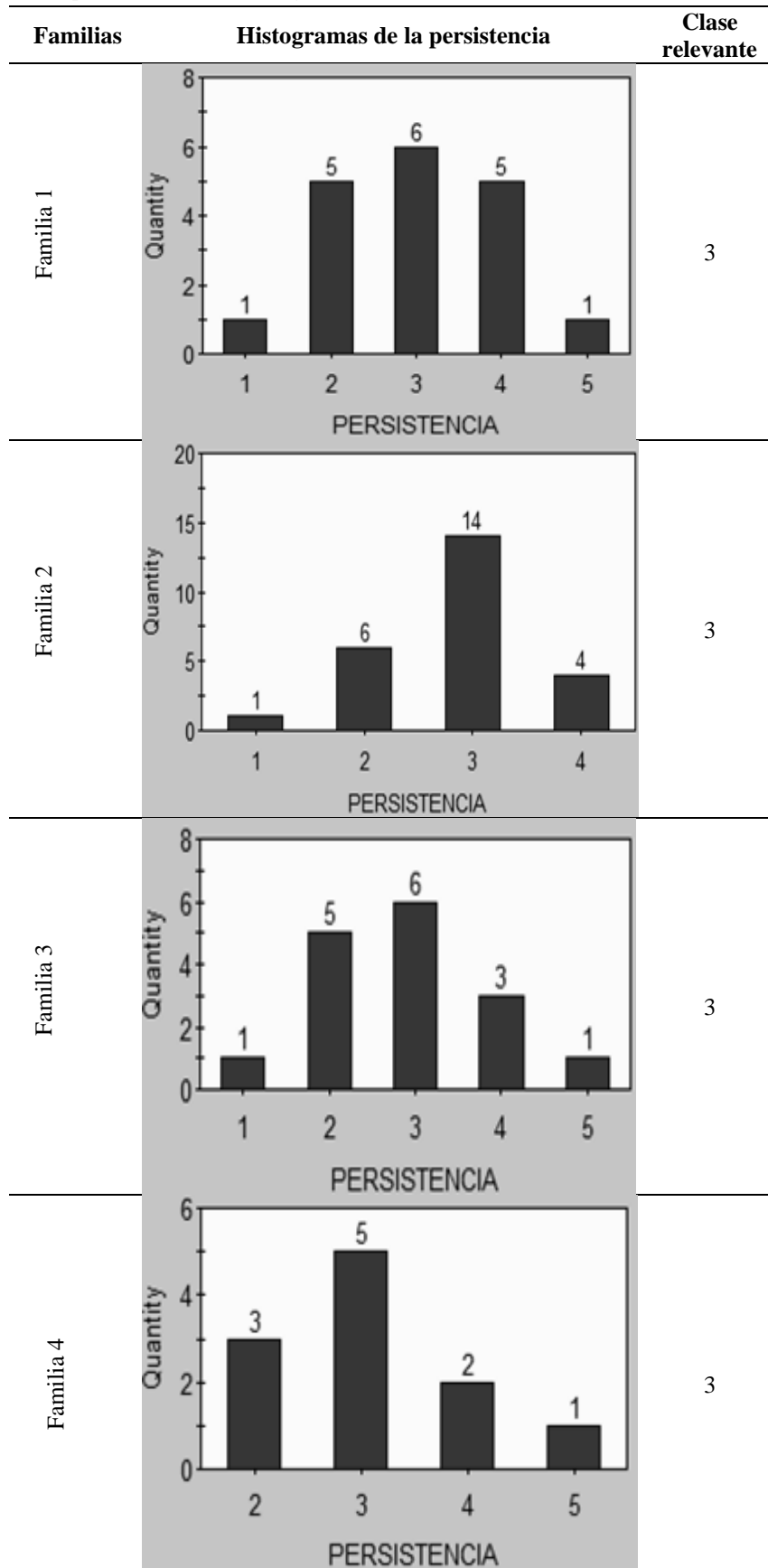


Figura 34

Histograma de la apertura de las 4 familias.

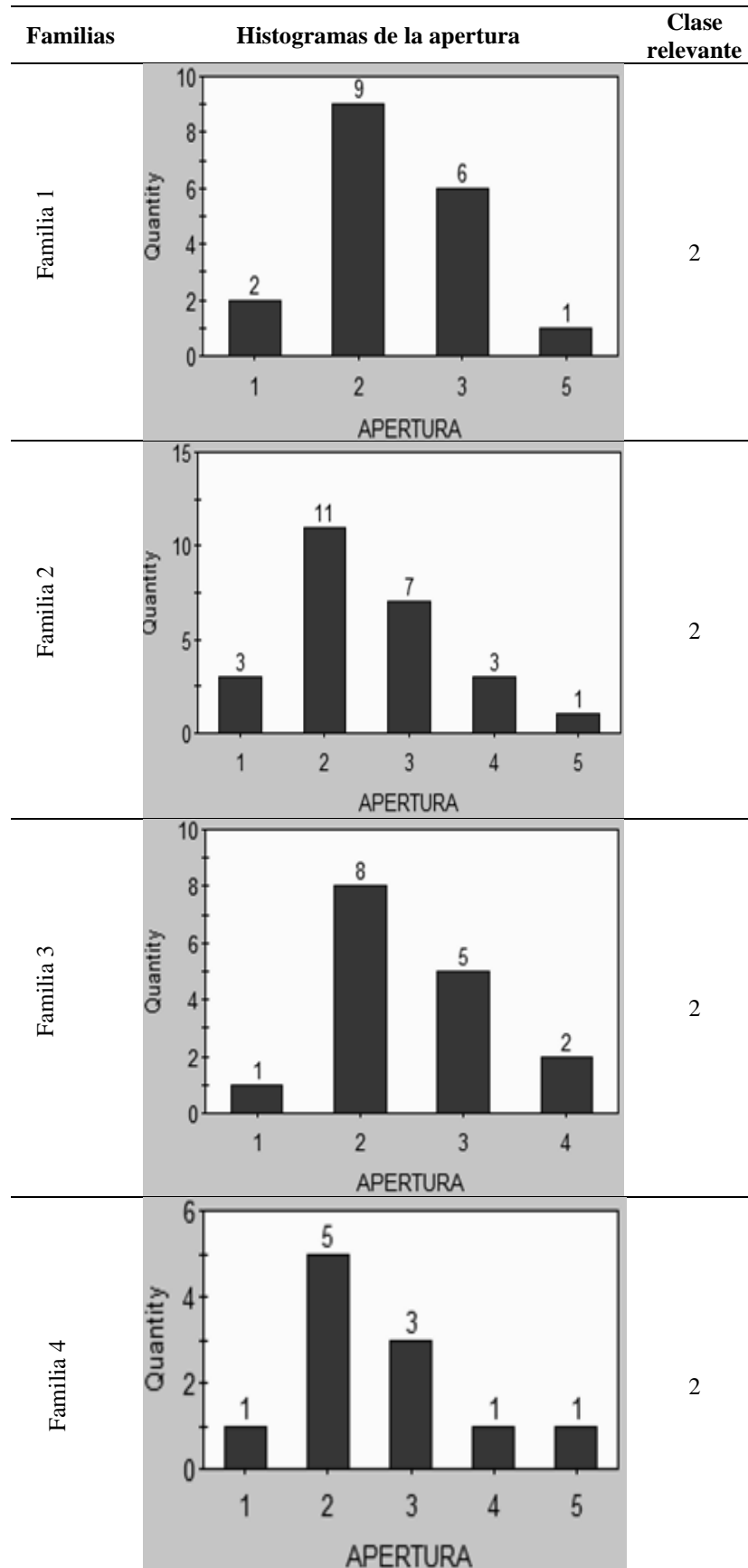


Figura 35

Histograma de la rugosidad de las 4 familias.

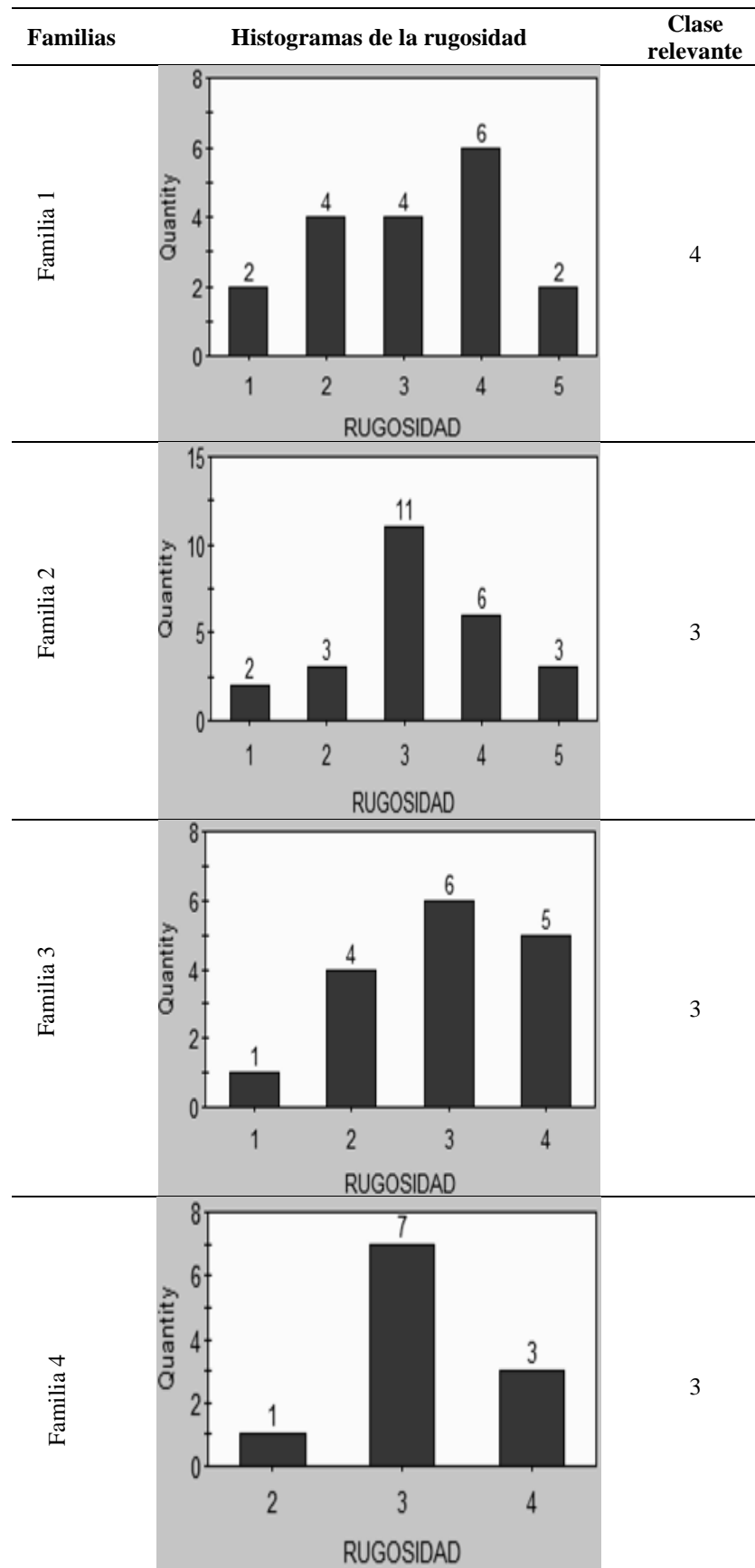


Figura 36

Histograma del relleno espesor de las 4 familias.

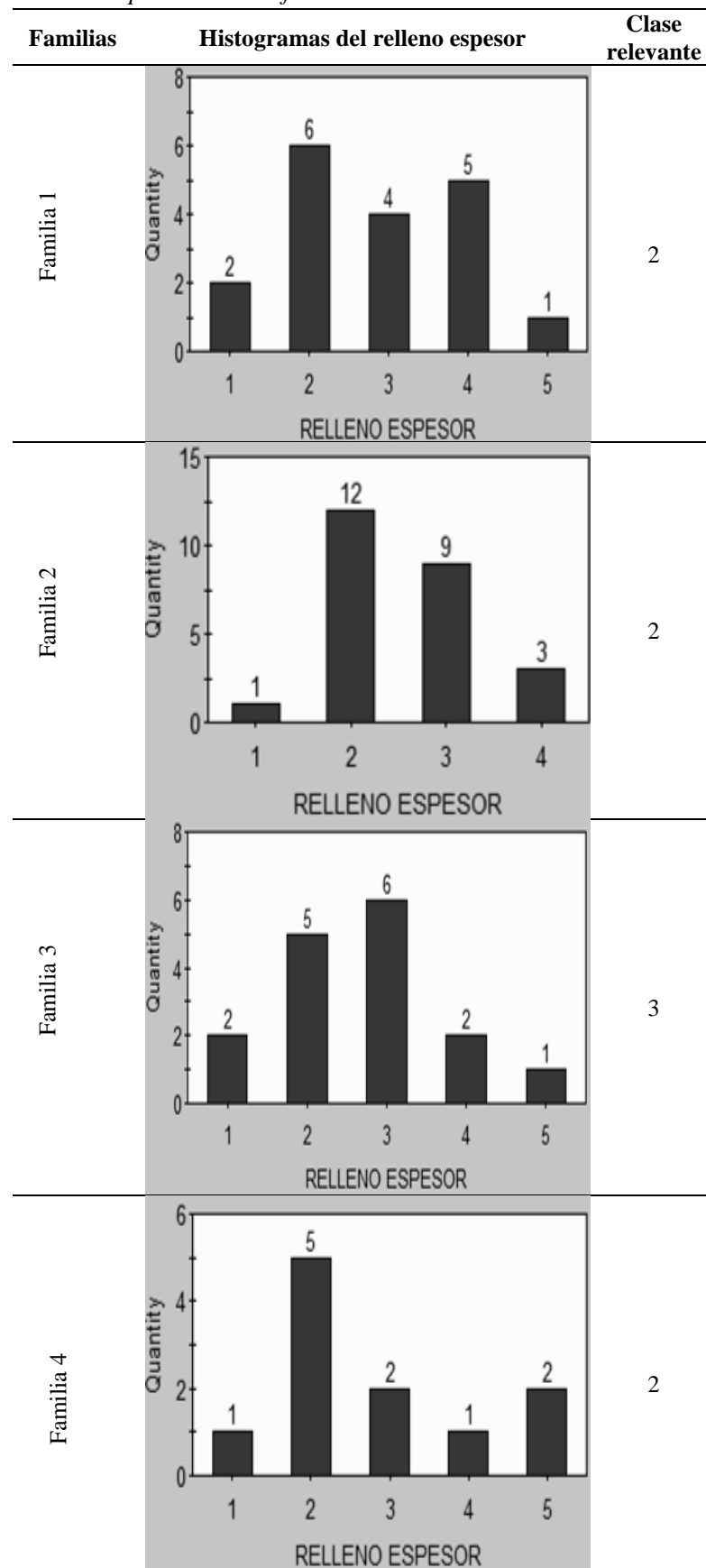


Figura 37

Histograma de las alteraciones de las 4 familias.

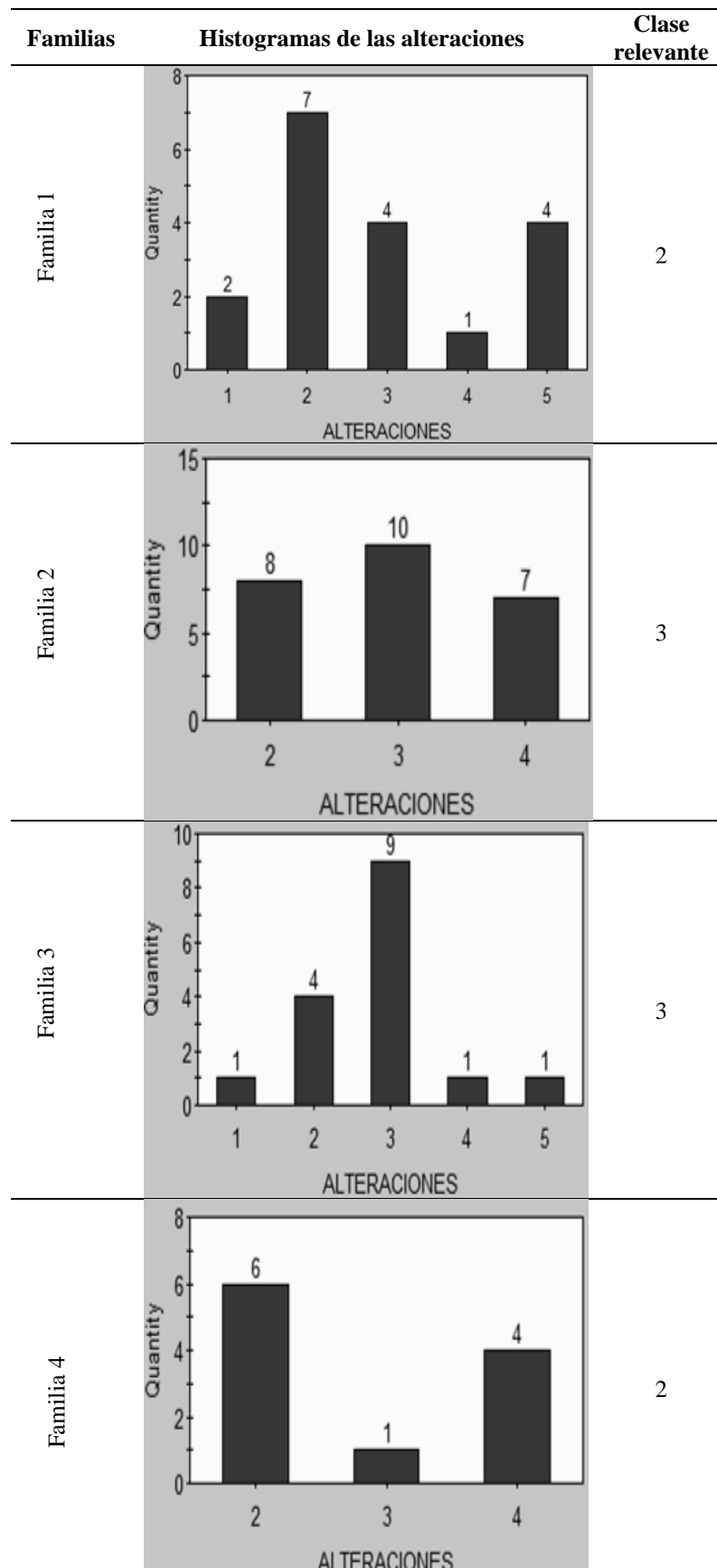


Figura 38

Histograma de la presencia de agua subterránea de las 4 familias.

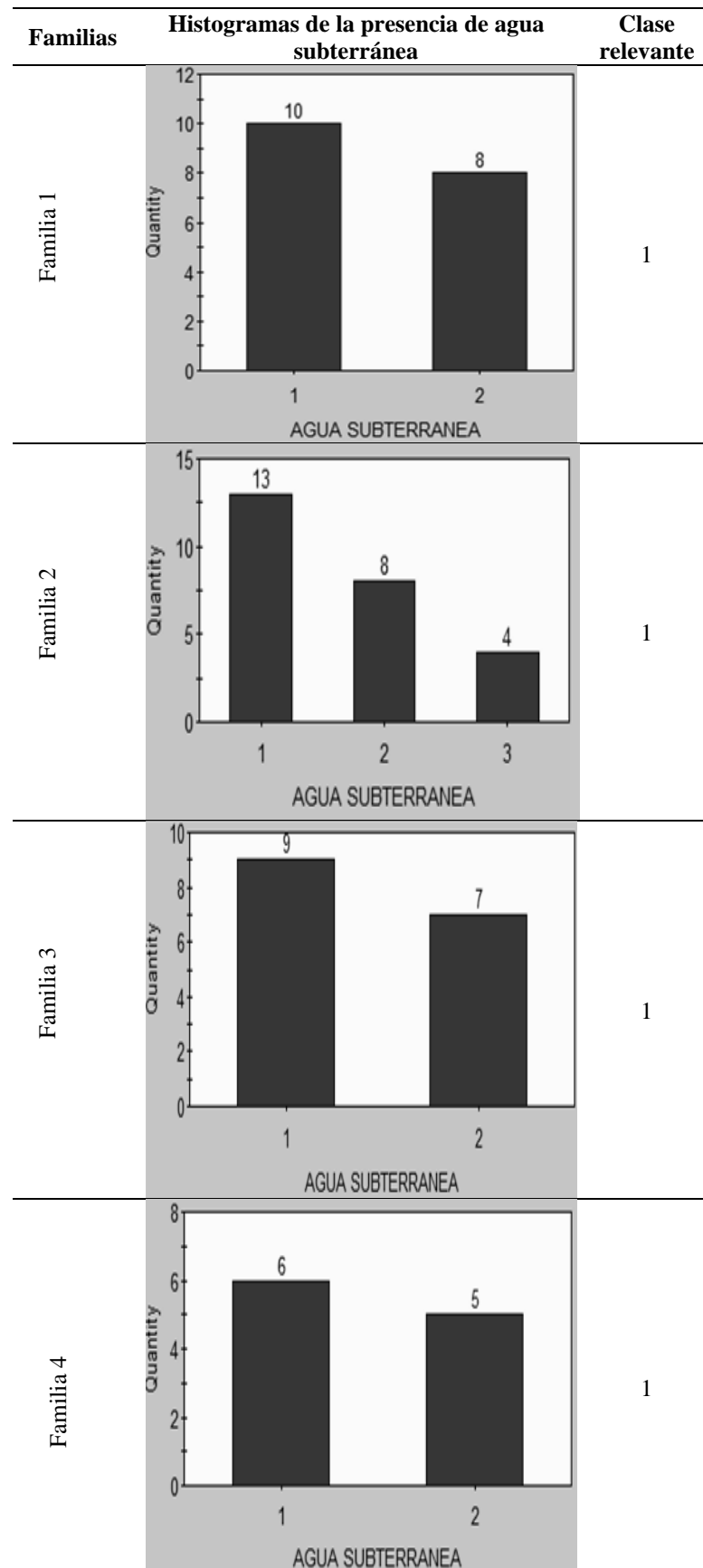


Figura 39

Propiedades físicas de la muestra de roca en la Mina Wilsander.

<u>ENSAYOS DE PROPIEDADES FÍSICAS</u>											
Los ensayos se realizaron según la norma ASTM C 97-02, obteniéndose los siguientes resultados:											
Tara	Peso húmedo	Peso seco	Peso seco + parafina	Peso parafina	Peso sumergido	Densidad parafina	Volumen parafina	Volumen muestra	Densidad seca	Porosidad aparente	Peso específico aparente
	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g/cm ³)	(cm ³)	(cm ³)	(g/cm ³)	(%)	(KN/m ³)
M-01	251.25	251.10	262.67	11.57	160.41	0.87	13.30	88.96	2.82	0.13	27.68
M-02	228.37	228.24	236.95	8.71	144.79	0.87	10.01	82.15	2.78	0.11	27.24
M-03	255.94	255.80	264.48	8.68	162.96	0.87	9.98	91.54	2.79	0.13	27.40
M-04	226.55	226.40	233.80	7.40	143.17	0.87	8.51	82.12	2.76	0.12	27.03
M-05	233.34	233.26	241.13	7.87	147.96	0.87	9.05	84.12	2.77	0.07	27.19
Numero de resultados									4	4	4
Valor máximo, MAX									2.82	0.13	27.68
Valor mínimo, MIN									2.76	0.11	27.03
Mediana, MED									2.79	0.13	27.32
Valor promedio, MEAN									2.79	0.12	27.34
Desviación estándar, SDEV									0.03	0.01	0.27
Coficiente de variación, CV									0.32%	-1.24	0.32

Nota. Tomada de Huchamaco (2017).