

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido	v
Introducción	1
1. Antecedentes Generales	2
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específico	3
1.3. Alcances y limitaciones	4
1.4. Metodología	5
2. Antecedentes del caso de estudio y aplicaciones futuras	6
2.1. Caso de estudio	6
2.1.1. Descripción del caso	6
2.1.2. Clima	7
2.1.3. Geología	7
2.2. Caso de aplicación, División El Teniente, sector productivo Recursos Norte .	8
2.2.1. Ubicación y acceso	8
2.2.2. Clima	9
2.2.3. Sectores productivos	9
2.2.4. Geología	9
3. Métodos de Construcción de Obras Subterráneas	15
3.1. Introducción	15
3.2. Métodos con Perforación y Tronadura	16
3.2.1. Perforación y Tronadura Convencional.	18
3.3. Métodos sin Perforación y Tronadura.	20
3.3.1. TBM Gripper.	22
3.3.2. TBM de Escudo Simple.	25
3.3.3. TBM de Escudo Doble.	26
3.3.4. TBM tipo EPM.	27
4. Clasificación geomecánica y dependencia de variables	30
4.1. Clasificación Geomecánica	30
4.1.1. Clasificación Geomecánica de Bieniawski (RMR)	31
4.1.2. Clasificación Q de Barton	32

4.1.3.	Índice de Resistencia Geológica (GSI)	33
4.1.4.	Índice de Excavabilidad (RME)	35
4.2.	Variables Aleatorias	41
4.2.1.	Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)	42
4.2.2.	Rock Quality Designation (RQD)	42
4.2.3.	Espaciamiento de las discontinuidades	43
4.2.4.	Persistencia de las discontinuidades	44
4.2.5.	Apertura de las discontinuidades	44
4.2.6.	Rugosidad de las discontinuidades	45
4.2.7.	Relleno presente en las discontinuidades	46
4.2.8.	Grado de alteración de las discontinuidades	47
4.2.9.	Número de familias de discontinuidades	49
4.2.10.	Orientación de las discontinuidades	50
4.2.11.	Condición de agua en el sector	51
4.2.12.	Índice de perforabilidad	51
4.2.13.	Tiempo de autoestabilidad	52
4.3.	Dependencia entre Variables	52
5.	Modelo de Esfuerzos in-situ	55
5.1.	Formulación de modelos de esfuerzos in-situ	56
5.1.1.	Parámetros de Resistencia del Macizo Rocoso	56
5.1.2.	Parámetros de Deformación	56
5.1.3.	Influencia de los métodos de construcción de túneles sobre las caracte- rísticas de la deformación durante la excavación de macizos rocosos a altas profundidades	57
6.	Métodos de estimación	59
6.1.	Planteamiento del problema general	59
6.2.	Kriging lineal con valores esperados conocidos: Kriging Simple	61
6.3.	Kriging lineal con valor esperado estacionario pero desconocido: Kriging Or- dinario	61
7.	Metodología y Resultados	63
7.1.	Formulación del problema	63
7.2.	Metodología propuesta	64
7.2.1.	Metodología: Parte I	64
7.2.2.	Metodología: Parte II	66
7.3.	Aplicación de la metodología	66
7.3.1.	Generación de casos de estudios	66
7.3.2.	Estimación de Variables	68
7.3.3.	Evaluación técnica	71
7.3.4.	Requerimientos básicos para el modelo de esfuerzos	73
8.	Análisis de resultados	78
8.1.	Levantamiento de información y generación de casos	78
8.2.	Estimación de variables	79
8.3.	Evaluación Técnica	80

8.4. Análisis de variables	81
Conclusión	81
Bibliografía	85
9. Anexo	88
9.1. Anexo A: Estimación de la veolidad de avance asociada a los tipos de TBM utilizando Q_{TBM}	88
9.1.1. Estimación de ARA_{Real}	90
9.2. Anexo B:El índice de resistencia geológica (GSI), formas de cálculo y sus va- riaciones	94
9.3. Anexo C:Detalle de Resultados	98

Índice de Tablas

2.1.	Unidades litológicas división el Teniente.	11
2.2.	Clasificación de estructuras utilizado en división El Teniente.	12
2.3.	Detalle dominios estructurales, sector productivo RENO.	14
3.1.	Clasificación Macizo Rocosó RMR Bieniawski (1989)	18
3.2.	Tipos de TBM y su utilización.	21
4.1.	Asignación de puntajes RMR Bieniawski (1989)	32
4.2.	Sistema de clasificación RME	36
4.3.	Resumen de uso de variables	41
4.4.	Valores del coeficiente J_r para el sistema Q	45
4.5.	Valores del coeficiente J_r para cálculo de J_C	46
4.6.	Valores del coeficiente J_r para cálculo de J_C	46
4.7.	Valores del coeficiente J_a para el sistema Q	48
4.8.	Clasificación del factor conjunto J_a para el calculo de J_C	49
4.9.	Valores del coeficiente J_n para el sistema Q	50
4.10.	Matriz de relación entre variables geomecánicas.	53
7.1.	Estadísticas de las diferentes mallas	68
7.2.	Análisis exploratorio de datos por variable.	68
7.3.	Cuantificación y valorización de los sondajes.	71
7.4.	Rendimientos esperados, según calidad de roca y método de construcción . .	73
7.5.	Resumen estadística descriptiva, variables independientes.	73
7.6.	Resumen estadística descriptiva, variables independientes, según tipo de roca.	74
7.7.	Error asociado al cálculo y relación entre variables	77
8.1.	Clasificación de Variables según importancia, Clasificación RMR	82
8.2.	Clasificación de Variables según importancia, clasificación Q	82
8.3.	Clasificación de Variables según importancia, índice GSI	82
8.4.	Clasificación de Variables según importancia, índice RME	82
9.1.	Criterio de evaluación de coeficientes F_{E1} , F_{E2} y F_{E3}	91
9.2.	Estadísticas variable UCS, según tipo de Roca	98
9.3.	Estadísticas variable discontinuidades	100

Índice de Ilustraciones

2.1. Visualización del modelo de bloques considerando los tipos de roca predominante	7
2.2. Ubicación División El Teniente. Y del sector productivo de Recursos Norte	8
2.3. Sectores y proyectos de la división El Teniente PND 2016.	9
2.4. Unidades litológicas que componen mina el Teniente.	10
2.5. Unidades litológicas que componen el sector productivo RENO.	12
2.6. Ubicación sistemas estructurales, sector productivo RENO.	13
3.1. Rendimientos de avance en minería entre 1850 y 2010.	16
3.2. Desarrollo Perforación 1905 – 2005, metros perforados por hora.	17
3.3. Diagrama Método convencional de Perforación y Tronadura.	18
3.4. Esquema remoción de marina desde la frente.	19
3.5. Rendimientos por clase de soporte.	20
3.6. TBM abiertas utilizadas en los túneles de Lotschberg(Suiza y San Pedro (España)).	22
3.7. TBM Tipo Gripper o Abierta, vista en perspectiva de la cabeza de la TBM. A la derecha, en color rojo, se destacan los grippers.	23
3.8. Sistemas de recolección de marinas en TBM Abiertas	24
3.9. Fortificación mecanizada para TBM tipo Gripper.	24
3.10. TBM de Escudo Simple.	25
3.11. TBM de Escudo Doble.	26
3.12. Maqueta de un escudo tipo EPB de frente cerrado.	28
3.13. Elementos de una TBM tipo EPB.	29
4.1. Volumen de bloque delimitado por set de discontinuidades	34
4.2. Gráficos para la valoración de σ_{ci} y del número de discontinuidades en el frente.	37
4.3. Gráficos para la valoración del DRI y Afluencia de Agua.	37
4.4. Gráfico para la valoración del Tiempo de Autoestabilidad.	37
4.5. Valoración del grado de homogeneidad del frente.	38
4.6. Ejemplo de cálculo del RQD, Deere y Deere (1988).	43
4.7. Diagrama de ondulaciones para cálculo de J_C .	46
4.8. Cálculo de DRI en función de UCS y tipo de roca.	51
4.9. Cálculo del tiempo de autoestabilidad en función de RMR	52
5.1. Diagrama del estado de estrés alrededor del macizo.	57
5.2. Diagrama de estado inicial e iniciación de fallamiento bajo compresión biaxial.	57
7.1. Esquema del desarrollo de la metodología Parte I	65

7.2. Vista en planta del despliegue de los sondajes.	67
7.3. Vista isometrica del despliegue de los sondajes.	67
7.4. Histograma de datos según el tamaño de malla, variable UCS	68
7.5. Gráfico de error en la estadística según caso de estudio	69
7.6. Gráfico de error del valor promedio y desviación estandar según caso de estudio	69
7.7. Tonelaje representado en gráficos de tortas según clase de roca y malla de sondaje	70
7.8. Tonelaje medido según clase de roca y malla de sondaje	70
7.9. Despliegue grafico de la clasificacion de rocas para el caso base y un caso estimado	70
7.10. Despliegue isometrico, para mallas de 50[m] x 50[m] y 100[m]x 100[m]	71
7.11. Gráfico de error en la estimación de la clase de roca y número de sondajes .	71
7.12. Vista planta e isometrica, Calificación RMR, Malla 50[m]x50[m]	72
7.13. Vista planta e isometrica, Índice RME, Malla 50[m]x50[m]	72
7.14. Valores para σ_1 y σ_3	72
7.15. Vista en planta RMR, Cota 575.	75
7.16. Vista en planta UCS, Cota 575.	75
7.17. Vista en planta Alteración, Cota 575.	75
7.18. Vista en planta apertura de discontinuidades, Cota 575.	76
7.19. Gráfico comparativo de RMR estimado/medido y RMR calculado, con una única variable.	76
7.20. Gráfico comparativo de RMR estimado/medido y RMR calculado, con más de una variable.	77
9.1. Relación conceptual entre Q, PR y AR	89
9.2. Cuatro amplias clases de condiciones de túneles	89
9.3. Relación sugerida entre PR, AR y Q_{TBM}	90
9.4. Variación del factor F_A con la longitud del túnel excavado.	92
9.5. Variación del Factor F_D con el diámetro del túnel.	92
9.6. Gráfico general de las estimaciones de GSI a partir de las observaciones geológicas	94
9.7. Estimaciones del índice de fuerza geológica para masas heterogéneas	95
9.8. Proyección sugerida de información de observaciones en afloramientos a pro- fundidad.	96
9.9. Valoración de GSI considerando efecto de la condición de agua.	97
9.10. Histograma UCS, según caso de estudio (Roca 1)	98
9.11. Histograma UCS, según caso de estudio (Roca 2)	99
9.12. Histograma UCS, según caso de estudio (Roca 3)	99
9.13. Histograma UCS, según caso de estudio (Roca 4)	99
9.14. Histograma Apertura, según caso de estudio (Roca 1)	100
9.15. Histograma Apertura, según caso de estudio (Roca 2)	101
9.16. Histograma Apertura, según caso de estudio (Roca 3)	101
9.17. Histograma Apertura, según caso de estudio (Roca 4)	101
9.18. Histograma Separación, según caso de estudio (Roca 1)	102
9.19. Histograma Separación, según caso de estudio (Roca 2)	102
9.20. Histograma Separación, según caso de estudio (Roca 3)	102
9.21. Histograma Separación, según caso de estudio (Roca 4)	103
9.22. Histograma Persistencia, según caso de estudio (Roca 1)	103

9.23. Histograma Persistencia, según caso de estudio (Roca 2)	103
9.24. Histograma Persistencia, según caso de estudio (Roca 3)	104
9.25. Histograma Persistencia, según caso de estudio (Roca 4)	104
9.26. Histograma Alteración.	104