

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción	1
1.1.	Motivación	1
2.	Objetivos	2
2.1.	Objetivo general	2
2.2.	Objetivos específicos.....	3
3.	Alcances	3
4.	Marco teórico	5
4.1.	Proceso geotécnico	5
4.2.	Clasificación del macizo rocoso.....	6
4.2.1.	RMR (Bieniawski 1989)	8
4.2.2.	GSI	8
4.2.3.	Índice de tronabilidad de Lilly	9
4.2.4.	Índice de tronabilidad del macizo (ITM)	11
4.3.	Distribución de tamaño de bloque in-situ	13
4.4.	Parámetros de diseño rajo abierto	15
4.5.	Mecanismos de fragmentación del macizo rocoso por tronadura	17
4.6.	Explosivos	19
4.6.1.	Anfo	19
4.6.2.	Hidrogel	20
4.6.3.	Emulsión	20
4.6.4.	Características de la roca y selección de explosivo	21
4.7.	Mecanismo de pre-corte	21
4.8.	Factor de carga	22
4.9.	Tronadura controlada	24
4.10.	Diseño de tronadura controlada.....	24
4.10.1.	Tronadura de producción: método de Konya y Walter (1985)	26
4.10.2.	Tronadura amortiguada: método de cráter (Frank Chiappetta 1992).....	27
4.11.	Diseño de tronadura de pre-corte.....	29
4.12.	Modelo de predicción de fragmentación	30
4.12.1.	Kuz - Ram (1983).....	30
4.13.	Vibraciones	32
4.14.	Conceptualización de daño por tronadura	33
5.	Antecedentes	37

5.1.	Casos de estudio: Análisis retrospectivo.....	37
5.1.1.	Información base de tronadura.....	37
5.1.2.	Presentación de tronaduras	52
5.1.3.	Comparación de factores de carga.....	54
5.1.4.	Resultados de tronaduras	58
5.2.	Diagnóstico de la industria.....	62
6.	Metodología de trabajo	64
7.	Propuesta de metodología de diseño y planificación de tronadura controlada.....	65
7.1.	Clasificación del macizo rocoso para tronadura	66
7.2.	Zonificación de mina según unidades de tronadura	67
7.3.	Diseño estándar de malla de perforación por unidad de tronadura.....	68
7.4.	Planificación de tronadura controlada.....	69
7.5.	Ejecución de labores de perforación y tronadura	71
7.6.	Análisis.....	75
8.	Conclusiones y recomendaciones	78
9.	Bibliografía	80
10.	Anexos	81
10.1.	Proceso geotécnico	81
10.2.	RMR (Bieniawski, 1989).....	82
10.3.	GSI (Hoek & Marinos, 2000).....	84
10.4.	Índice de Lilly (Bi, 1992)	85

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	RMR (Bieniawski 1973).....	8
Ecuación 2	Cálculo de Bi de Lilly	10
Ecuación 3	Cálculo de ITM	12
Ecuación 4	Reacción de descomposición para los componentes del ANFO.....	19
Ecuación 5	Reacción de descomposición para los componentes del ALANFO	19
Ecuación 6	Factor de carga para pre-corte.....	23
Ecuación 7	Burden mediante fórmula de Konya	26
Ecuación 8	Cálculo de espaciamiento.....	27
Ecuación 9	Cálculo de taco.....	27
Ecuación 10	Cálculo de pasadura	27
Ecuación 11	Distancia para cálculo de Burden Buffer (teórica).....	27
Ecuación 12	Distancia para cálculo de Burden Buffer (real)	28
Ecuación 13	Igualdad $d(\text{diseño}) = d(\text{real})$	28
Ecuación 14	Burden líneas buffer.....	28
Ecuación 15	Distancia buffer a pre-corte.....	29

Ecuación 16 Presión en tiro de pre-corte	29
Ecuación 17 Factor de desacople	30
Ecuación 18 Espaciamiento de tiros de pre-corte	30
Ecuación 19 Fórmula de Kuznetsov	30
Ecuación 20 Factor de roca Kuz – Ram.....	31
Ecuación 21 Ecuación de Rosin – Ramler.....	31
Ecuación 22 Cálculo de Xc.....	31
Ecuación 23 Índice de uniformidad para un explosivo.....	31
Ecuación 24 Índice de uniformidad para dos explosivos.....	32
Ecuación 25 Ley para cálculo de PPV	33
Ecuación 26 PPV modelo Holmberg & Persson.....	33
Ecuación 27 Curva ajustada para factor de carga	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Agrietamiento de berma en un banco	2
Figura 2 Desarrollo y alcances de la tesis (diagrama)	4
Figura 3 Relación entre Bi de Lilly y Factor de carga (gráfico)	11
Figura 4 Esquema de estimación del ITM (diagrama).....	12
Figura 5 Factor de carga vs ITM tronaduras de contorno (gráfico).....	12
Figura 6 Factor de carga vs ITM tronaduras de producción (gráfico)	13
Figura 7 Distribución de bloques in-situ y curva distribución tronadura (gráfico)	14
Figura 8 Etapas para la generación de curvas de distribución de tamaño de bloque in-situ.....	14
Figura 9 Parámetros de diseño a escala banco.....	15
Figura 10 Parámetros de diseño a escala inter-rampa.....	16
Figura 11 Parámetros de diseño a escala global	16
Figura 12 Detonación de explosivo	17
Figura 13 Fragmentación por compresión alrededor del tiro.....	17
Figura 14 Pulso de tensión y propagación de fracturas	18
Figura 15 Expansión de fracturas por inserción de gas a alta presión	18
Figura 16 Orientación de estructuras respecto a pre-corte.....	22
Figura 17 Volumen considerado para el cálculo de factor de carga	23
Figura 18 Variables de diseño de tronadura	25
Figura 19 Conceptualización de daño por tronadura (diagrama).....	34
Figura 20 Escala banco y daño directo	35
Figura 21 Escala global e inter-rampa y daño indirecto	36
Figura 22 Unidades geotécnicas Mina A	37
Figura 23 Dominios estructurales Mina A.....	38
Figura 24 Proceso de perforación y tronadura Mina A (diagrama)	41
Figura 25 Proceso de QA/QC para el diseño de perforación Mina A (diagrama).....	42
Figura 26 Proceso de QA/QC para el diseño de tronadura Mina A (diagrama)	43
Figura 27 Unidades geotécnicas Mina B	45
Figura 28 Dominios estructurales Mina B	46
Figura 29 Flujograma de diseño de perforación Mina B (diagrama).....	48
Figura 30 Flujograma de operación de tronadura Mina B (diagrama)	48
Figura 31 Unidades geotécnicas Mina C	50
Figura 32 Dominios estructurales Mina C	50

Figura 33 Distribución de tronaduras (diagrama).....	52
Figura 34 Factor de carga: aplicado vs. Lilly (gráfico)	54
Figura 35 Factor de carga aplicado vs. Bi Lilly (gráfico).....	55
Figura 36 Curva ajustada Bi Lilly vs. Factor de carga aplicado (gráfico).....	56
Figura 37 Factor de carga vs. ITM (gráfico).....	57
Figura 38 Tronaduras con resultado (diagrama).....	58
Figura 39 Daño por sobre-quebre	63
Figura 40 Levantamiento de piso por pre-corte.....	63
Figura 41 Pasos de metodología y horizontes de planificación.....	65
Figura 42 QA/QC Perforación (diagrama)	72
Figura 43 QA/QC carguío de explosivos (diagrama)	73
Figura 44 Ejecución de tronadura (diagrama)	75
Figura 45 Metodología de tronadura controlada (diagrama).....	78
Figura 46 Proceso geotécnico en rajo abierto.....	81
Figura 47 RMR: Puntaje asociado a roca intacta (UCS)	82
Figura 48 RMR: Puntaje asociado al índice RQD.....	82
Figura 49 RMR: Puntaje asociado al espaciamiento de estructuras (S)	82
Figura 50 RMR: Puntaje asociado a la condición de discontinuidades (JC).....	83
Figura 51 RMR: Puntaje asociado a la condición de agua (WC)	83
Figura 52 Clasificación GSI.....	84
Figura 53 B x S vs Bi banco de 5 metros (1992) (gráfico).....	85
Figura 54 FC vs Bi banco de 5 metros (1992) (gráfico).....	85
Figura 55 B x S vs Bi banco de 8 metros (1992) (gráfico).....	86
Figura 56 FC vs Bi banco de 8 metros (1992) (gráfico).....	86
Figura 57 B x S vs Bi banco de 10 metros (1992) (gráfico).....	87
Figura 58 FC vs Bi banco de 10 metros (1992) (gráfico).....	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparación de índices de clasificación del macizo rocoso.....	6
Tabla 2 Comparación de índices de tronabilidad del macizo rocoso.....	7
Tabla 3 Distribución de puntajes para Bi de Lilly	10
Tabla 4 Factores internos y factores externos en tronadura.....	24
Tabla 5 Variables de diseño de tronadura.....	25
Tabla 6 Métodos de diseño de tronadura y consideraciones del macizo rocoso	26
Tabla 7 Constante de competencia de la roca.....	28
Tabla 8 Valores de RMR y GSI por unidades geotécnicas Mina A	39
Tabla 9 Valores de densidad y UCS por unidades geotécnicas Mina A.....	40
Tabla 10 Diseño general de perforación y tronadura de Mina A.....	44
Tabla 11 Valores de RMR y GSI por unidades geotécnicas Mina B.....	47
Tabla 12 Valores de densidad y UCS por unidades geotécnicas Mina B.....	47
Tabla 13 Diseño general de perforación y tronadura de Mina B.....	49
Tabla 14 Valores de RMR y GSI por unidades geotécnicas Mina C.....	51
Tabla 15 Valores de densidad y UCS por unidades geotécnicas Mina C.....	51
Tabla 16 Diseño general de perforación y tronadura de Mina C.....	52
Tabla 17 Distribución porcentual de tronaduras.....	53
Tabla 18 Factor de condición y diseño de Mina A.....	59

Tabla 19 Resultados tronaduras Mina C	61
Tabla 20 Calificación de rangos Mina C	62
Tabla 21 Razones para la elección de métodos	69
Tabla 22 Aspectos claves para tronadura controlada-comparación.....	77