

## Tabla de Contenido

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Contexto del estudio.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo General.....	2
1.1.2 Objetivos Específicos.....	2
1.2 Alcances.....	2
Capítulo 2: Revisión Crítica de Antecedentes.....	3
2.1 Descripción de la faena.....	3
2.2 Operación de Perforación y Tronadura.....	4
2.3 Geología y Geotecnia.....	5
2.3.1 Unidades Geotécnicas.....	5
2.3.2 Fallas y estructuras.....	8
2.3.3 Datos del macizo rocoso.....	9
2.4 Perforación.....	10
2.5 Voladura/Tronadura.....	10
2.5.1 Factores no controlables.....	11
2.5.2 Factores controlables.....	12
2.6 Mecanismo de ruptura.....	13
2.7 Rendimiento energético de la tronadura.....	17
2.8 Modelos de fragmentación.....	17
2.8.1 Kuz-Ram (Cunningham, 1983 & 1987).....	17
2.8.2 Modelo KCO (Kuznetsov-Cunningham- Ouchterlony).....	19
2.8.3 Kuz-Ram (Cunningham, 2005).....	20
2.9 Raíz del error cuadrático medio (RECM).....	23
2.10 Box Plot.....	23
2.11 Indicadores de rendimiento.....	24
2.11.1 KPI.....	24
2.11.2 UEBD.....	24
2.12 PortaMetrics.....	25
2.12.1 Protocolo para la toma de fotografías.....	26

Capítulo 3: Metodología y plan de trabajo .....	30
3.1 Implementación del modelo Kuz-Ram .....	30
3.1.1 Selección de curvas granulométricas .....	31
3.1.2 Definición de los parámetros y variables a considerar en las ecuaciones de Kuz-Ram .....	31
3.1.3 Estimación del parámetro A de la ecuación para <b>X50</b> .....	31
3.1.4 Selección de un valor del parámetro A representativo para cada UGT .....	33
3.1.5 Validación del parámetro A .....	33
3.2 Análisis del impacto de la variación del <i>burden</i> y espaciamiento en la granulometría .....	34
3.2.1 Variables de entrada y representación de grafica de resultados .....	34
3.2.2 Propuestas de mallas .....	34
3.3 Análisis del impacto del cambio de explosivo en la granulometría .....	35
3.3.1 Impacto de sustituir Vertex 50 por Energex y Vertex 30 .....	35
Capítulo 4: Resultados y Discusión .....	36
4.1 Implementación del modelo Kuz-Ram .....	36
4.1.1 Selección de curvas granulométricas .....	36
4.1.2 Definición de los parámetros y variables a considerar en las ecuaciones de Kuz-Ram .....	38
4.1.3 Estimación del parámetro A de la ecuación de Kuz-Ram .....	38
4.1.4 Selección de un valor de A representativo para cada UGT. ....	45
4.1.5 Validación del parámetro A .....	46
4.2 Análisis del impacto de la variación del <i>burden</i> y espaciamiento en la granulometría .....	50
4.2.1 Variables de entrada y representación grafica de resultados .....	50
4.2.2 Propuestas de mallas. ....	51
4.3 Análisis del impacto del cambio de explosivo en la granulometría .....	57
4.3.1 Impacto de sustituir Vertex 50 por Energex. ....	57
Capítulo 5: Conclusiones .....	60
Capítulo 6: Recomendaciones .....	61
Capítulo 7: Bibliografía .....	62
Capítulo 8: Anexos .....	63
8.1 Código de la macro utilizada para estimar el parámetro A .....	63

8.2 Propiedades de los explosivos utilizados en la faena .....	64
8.3 Propiedades del macizo rocoso en cada UGT. ....	65
8.4 Código empleado en el formulario de Visual Basic.....	65
8.5 Código empleado para determinar el error entre lo medido y lo observado. ....	69
8.6 Curvas granulométricas usadas la estimación del parámetro A.....	71
8.7 Curvas granulométricas usadas en la validación del parámetro A .....	81

## Contenido Ilustraciones

Ilustración 1 Ubicación de MLP. Fuente: MLP.....	4
Ilustración 2. Unidades geológicas, vista en planta. Fuente: MLP .....	7
Ilustración 3. Unidades geológicas, vista en perfil. Fuente: MLP. ....	7
Ilustración 4. Dominios geológicos MLP. ....	8
Ilustración 5. Equipo Pit Viper 351 usado en MLP. Fuente: www.epiroc.com.....	10
Ilustración 6. Esquema de tronadura por banco. Fuente: Enaex. ....	11
Ilustración 7. Esfuerzos de tensión y tracción y agrietamiento radial (López-Jimeno, 1994).....	14
Ilustración 8. Fracturación por liberación de carga (López-Jimeno, 1994). ....	15
Ilustración 9. Rotura por flexión (López-Jimeno, 1994).....	16
Ilustración 10. Mecanismo de rotura (López-Jimeno, 1994). ....	16
Ilustración 11. Equipo portátil utilizado. Fuente: www.motionmetrics.com.....	26
Ilustración 12. Una cámara central captura la imagen y otras dos se encargan de estimar la profundidad y tamaño de las partículas. ....	27
Ilustración 13. La zona de interés es la marcada en amarillo, bajo la zona de taco. Fuente: Enaex.....	27
Ilustración 14. Manualmente se deben corregir los bordes en caso que existan sombras.....	28
Ilustración 15. La curva granulométrica obtenida se puede exportar en formato xls para un posterior análisis. ....	29
Ilustración 16. Ubicación de los perfiles medidos en el banco 3440 de la fase 10.....	37
Ilustración 17. Ubicación de los perfiles medidos en el banco 2870 de la fase 7.....	37
Ilustración 18. Curva de referencia de la Tabla 11 y curva generada por K-R, con $A=0.1$ , para el set de tamaños desde el P40 al P90. ....	40
Ilustración 19. Curva de referencia de la Tabla 11 y curva generada por K-R, con $A=0.3$ , para el set de tamaños desde P40 al P90.....	41
Ilustración 20. Curva de referencia de la Tabla 11 y curva generada por K-R, con $A=0.2$ , para el set de tamaños desde P40 al P90.....	42
Ilustración 21. Distribución de los valores obtenido para el parámetro A por UGT. ....	44

Ilustración 22. Medición de la Tabla 18 y curva generada por K-R, con $A=1.37$ , para el set de tamaños. ....	47
Ilustración 23. Distribución de la RECM para las mediciones no usadas en el cálculo del parámetro A. ....	48
Ilustración 24. Distribución de la RECM para las mediciones no usadas, al considerar solo las fracciones asociadas al P80. ....	49
Ilustración 25. Formulario de entrada para evaluar tronadura. ....	50

## Contenido Tablas

Tabla 1. Explosivos usados actualmente. *VOD medida en diámetro de 311 [mm] .....	5
Tabla 2. Características del macizo rocoso por UGT. Obs: N, Max, Min y Medio, corresponden al número de datos utilizados, al percentil 90, percentil 10 y a la media de la distribución de datos, respectivamente. Fuente: MLP.....	9
Tabla 3. Distribución de la energía de la tronadura. Fuente: Ouchterlony (2004). ....	17
Tabla 4. Índice de tronabilidad (Lilly, 1986).....	19
Tabla 5. Índice de tronabilidad actualizado (Cunningham, 2005).....	22
Tabla 6. Ecuaciones utilizadas para ajustar el Modelo de Kuz-Ram. ....	30
Tabla 7. Fracción Pasante para el tamaño P dado, según Modelo K-R (2005). ....	32
Tabla 8. Diferencia entre la fracción pasante conocida y la estimada por la Ecuación (iii), para un tamaño dado. ....	32
Tabla 9. Mediciones de tamaño consideradas para ajustar el modelo. ....	38
Tabla 10. Diferencia entre las fracciones pasantes conocidas y pronosticadas para un set de tamaños dado. ....	39
Tabla 11. Tamaños medidos y fracciones pasantes asociadas, para una tronadura en la UGT 3. ....	39
Tabla 12. Fracción pasante conocida y pronosticada con $A=0.1$ .....	41
Tabla 13. Fracción pasante conocida y pronosticada con $A=0.3$ . ....	42
Tabla 14. Fracción pasante conocida y pronosticada con $A=0.2$ . ....	43
Tabla 15. Promedio del parámetro A encontrado en cada UGT.....	45
Tabla 16. Promedio del parámetro A encontrado en cada UGT, sin considerar outliers. ....	45
Tabla 17. Parámetros de diseño de la medición usada para validar el parámetro A. ....	46
Tabla 18. Fracción pasante conocida y pronosticada para el set de tamaños del P40 al P90. ....	47
Tabla 19. Error promedio para mediciones no usadas en el cálculo del parámetro A....	48
Tabla 20. Error promedio por UGT solo considerando las fracciones asociadas al P80, para las mediciones no usadas. ....	49
Tabla 21. Mallas propuestas para la UGT 1.....	52
Tabla 22. Propuesta de malla para la UGT 3.....	53
Tabla 23. Propuesta de malla para la UGT 6.....	54
Tabla 24. Propuesta de malla para la UGT 9.....	55
Tabla 25. Propuesta de malla para la UGT 12. ....	56

Tabla 26. Evaluación del cambio de explosivo en la UGT 1. ....	57
Tabla 27. Evaluación del cambio de explosivo en la UGT 3. ....	58
Tabla 28. Evaluación del cambio de explosivo en la UGT 6. ....	58
Tabla 29. Evaluación del cambio de explosivo en la UGT 9. ....	59
Tabla 30. Evaluación del cambio de explosivo en la UGT 12. ....	59
Tabla 31. Código de la macro usada para estimar el parámetro A.....	63
Tabla 32. Propiedades de los explosivos usados en las tronaduras consideradas. *VOD medida en diámetro de 311 [mm] .....	64
Tabla 33. Propiedades de la roca en cada UGT. ....	65
Tabla 34. Código empleado en el botón aceptar del formulario con las funciones necesarias.....	65
Tabla 35. Código empleado para estimar el error en la diferencia de tamaño entre el modelo y lo observado.....	69
Tabla 36. Curvas granulométricas usadas en la estimación del parámetro A. ....	71
Tabla 37. Mediciones usadas en la validación del parámetro A.....	81

## Contenido Ecuaciones

Ecuación 1. Kuznetsov (1973).....	17
Ecuación 2. Rosin- Rammler .....	18
Ecuación 3. Fracción pasante en función del tamaño de malla.....	18
Ecuación 4. Índice de uniformidad.....	18
Ecuación 5. Factor de roca (Lilly, 1986).....	18
Ecuación 6. Función de Swebrec.....	20
Ecuación 7. Factor de roca modificado.....	20
Ecuación 8. Factor de ondulación.....	20
Ecuación 9. Tamaño medio corregido.....	20
Ecuación 10. Factor de roca modificado.....	20
Ecuación 11. Índice de uniformidad actualizado. ....	21
Ecuación 12. Radio de dispersión del detonador.....	21
Ecuación 13. Factor de corrección del índice de uniformidad.....	21
Ecuación 14. Tiempo entre pozos. ....	21
Ecuación 15. Factor de corrección por el tiempo para el tamaño medio. ....	22
Ecuación 16. Factor de corrección por el tiempo para el tamaño medio. ....	22
Ecuación 17. Raíz del error cuadrático medio. ....	23
Ecuación 18. Rango inter-cuartil. ....	23
Ecuación 19. Valores extremos.....	23
Ecuación 20. Utilización en Efectiva en Base a la Disponibilidad. ....	24
Ecuación 21. Tiempo disponible. ....	25
Ecuación 22. Tiempo operativo.....	25
Ecuación 23. Tiempo efectivo.....	25