

# TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Motivación y problemática .....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general .....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.3.3 Objetivos operacionales.....	4
1.4 Alcances y limitaciones .....	4
1.5 Metodología a implementar .....	6
1.6 Rol de estudio en el contexto minero.....	7
1.7 Carta Gantt.....	10
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO .....	11
2.1 Caracterización de roca intacta y del macizo rocoso.....	11
2.1.1 Roca intacta .....	11
2.1.2 Macizo rocoso .....	12
2.1.3 Propiedades del macizo rocoso.....	12
2.1.4 Métodos de clasificación del macizo rocoso .....	12
2.1.5 Efecto escala.....	13
2.2 Criterio de falla .....	14
2.2.1 Criterio de falla de Mohr – Coulomb .....	14
2.2.2 Ángulo de fricción ( $\phi$ ).....	15
2.2.3 Cohesión ( $C$ ).....	15
2.3 Estabilidad de taludes en el macizo rocoso .....	16
2.3.1 Modos de falla .....	16
2.3.1.1 Mecanismos de falla con total control estructural .....	16
2.3.1.2 Mecanismos de falla sin control estructural.....	19
2.3.2 Factor de seguridad.....	20
2.3.3 Cálculo de estabilidad de taludes.....	21
2.3.3.1 Métodos exactos .....	22
2.4 Vibraciones .....	23

2.4.1	Parámetros de las ondas.....	23
2.4.2	Parámetros de vibración .....	25
2.4.3	Atenuación de ondas en el macizo rocoso.....	26
2.4.4	Tipo de ondas sísmicas .....	27
2.4.4.1	Onda de compresión (P) .....	27
2.4.4.2	Onda transversal (S).....	28
2.4.4.3	Onda rayleigh (R) .....	28
2.5	Modelos de campo lejano .....	29
2.5.1	Modelo de Devine .....	30
2.6	Modelos de campo cercano.....	30
2.6.1	Modelo de Holmberg & Persson .....	30
2.7	Criterios de daño para roca intacta.....	33
2.8	Criterios de daño para macizo rocoso.....	34
2.9	Modelos de PPV escalados a macizo rocoso .....	36
2.9.1	Consideraciones del Modelo de Vergara (2014) .....	36
2.9.1.1	Escalamiento de la resistencia a la tracción .....	36
2.9.1.2	Escalamiento del módulo de deformación .....	39
2.9.1.3	Modelo de escalamiento propuesto por Vergara (2014).....	39
2.9.1.4	Análisis de sensibilidad .....	39
2.9.2	Consideraciones del Modelo de Pardo (2016).....	40
2.9.2.1	Escalamiento de la resistencia a la tracción .....	40
2.9.2.2	Escalamiento del módulo de deformación .....	41
2.9.2.3	Escalamiento del módulo de deformación.....	41
2.10	Mecanismo de fragmentación por tronadura.....	41
2.11	Distribución de energía en la tronadura .....	44
2.12	Propiedades de los explosivos.....	45
2.13	Evaluación de vibraciones mediante geófonos .....	48
2.14	Daño sobre el macizo rocoso .....	50
2.15	Parámetros que afectan en la generación de vibraciones .....	50
2.16	Daño inducido por la tronadura.....	51
2.17	Daño inducido por la tronadura a escala banco - berma .....	52

2.18	Variables críticas del diseño de tronadura.....	54
2.19	Parámetros controlables en la generación de vibraciones.....	57
2.20	Secuencia de tronadura de contorno.....	57
2.21	Técnicas de monitoreo de vibraciones y mediciones en terreno.....	57
2.22	Daño campo lejano.....	58
2.23	Daño campo cercano.....	59
2.24	Limitaciones y ventajas del estudio de vibraciones.....	60
2.25	Análisis técnico-económico asociado a tronadura.....	61
2.26	Experiencias internas y externas relacionadas con el estudio.....	63
CAPÍTULO 3: ANTECEDENTES DE LA FAENA.....		64
3.1	Características generales y ubicación.....	64
3.2	Recursos geológicos y reservas mineras.....	65
3.3	Descripción del proceso productivo.....	65
3.4	Flota de equipos mina.....	66
3.5	Geología del yacimiento.....	67
3.6	Unidades Geotécnicas en Mina Los Pelambres.....	69
3.7	Modelo geológico y estructural de la mina.....	70
3.8	Propiedades resistentes de la roca intacta.....	72
3.9	Propiedades resistentes del macizo rocoso.....	73
3.10	Propiedades resistentes de las estructuras.....	75
3.11	Parámetros de diseño para perforación y tronadura.....	77
3.12	Estándar de perforación y tronadura.....	79
3.13	Proceso de perforación y tronadura.....	80
3.14	Evaluación de daño y calidad geotécnica post tronadura.....	82
3.15	Características de los explosivos utilizados.....	84
3.16	Estándar de tiempos de retardo.....	84
CAPÍTULO 4: MARCO METODOLÓGICO.....		86
4.1	Metodología de trabajo.....	89
4.2	Plan de trabajo para análisis estructural.....	90
4.3	Plan de trabajo pre tronadura.....	91
4.4	Plan de trabajo post tronadura.....	93

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS .....	94
5.1 Conciliación geotécnica a nivel banco – berma.....	94
5.2 Revisión de mecanismos de inestabilidad en Fase F10N .....	118
5.3 Propuesta de diseño a nivel banco - berma.....	123
5.4 Vibraciones inducidas por tronadura en campo cercano .....	128
5.5 Modelo de daño .....	131
5.6 Zonas de daño .....	134
5.7 Ábacos de diseño – Caso Base.....	136
5.8 Ábacos de diseño – Propuestas de tronadura para UGT06.....	140
5.9 Ábacos de diseño – Propuestas de Tronadura para UGT03 .....	155
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	167
CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA .....	173
CAPÍTULO 8: ANEXOS .....	175

## Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1: Metodología de Trabajo (Elaboración Propia).</i> .....	7
<i>Ilustración 2: Ejemplificación de roca intacta, Calificación del Macizo Rocosó (Vallejos, 2018).</i> .....	11
<i>Ilustración 3: Ejemplificación efecto escala, Hutchinson &amp; Diederichs (1996).</i> .....	14
<i>Ilustración 4: Proyección estereográfica de falla plana, Estabilidad de Taludes en Roca (Vallejos, 2018).</i> .....	17
<i>Ilustración 5: Geométrica de falla en cuña, Estabilidad de Taludes en Roca (Vallejos, 2018).</i> ..	17
<i>Ilustración 6: Proyección estereográfica de falla por cuña, Estabilidad de Taludes en Roca (Vallejos, 2018).</i> .....	18
<i>Ilustración 7: Proyección estereográfica de falla por volcamiento, Estabilidad de Taludes en Roca (Vallejos, 2018).</i> .....	19
<i>Ilustración 8: Proyección estereográfica de falla circular, Estabilidad de Taludes en Roca (Vallejos, 2018).</i> .....	20
<i>Ilustración 9: Factor de seguridad de taludes en condición estable e inestable, Estabilidad de Taludes en Roca (Vallejos, 2018).</i> .....	21
<i>Ilustración 10: Esquema de métodos para cálculo de estabilidad de taludes, Morales (2009).</i> ..	22
<i>Ilustración 11: Esquema de métodos para cálculo de estabilidad de taludes, Vibraciones y Onda Aérea (Cubillos, 2018).</i> .....	24
<i>Ilustración 12: Dirección de propagación onda P, Ondas sísmicas (Braile, 2020).</i> .....	27
<i>Ilustración 13: Dirección de propagación de onda S, Ondas sísmicas (Braile, 2020).</i> .....	28
<i>Ilustración 14: Dirección de propagación onda R, Ondas sísmicas (Braile, 2020).</i> .....	28

<i>Ilustración 15: Esquema de Holmberg y Persson, Campo Cercano, Bravo (2018).</i> .....	32
<i>Ilustración 16: Guías para la estimación del factor de alteración D, Hoek E. (2012), Calificación del Macizo Rocosó (Vallejos, 2018).</i> .....	38
<i>Ilustración 17: Etapas de los mecanismos de fragmentación por tronadura, Manual de Perforación y Tronaduras de Rocas (López Jimeno, 1994).</i> .....	43
<i>Ilustración 18: Etapas de los mecanismos de fragmentación por tronadura, Manual de Perforación y Tronaduras de Rocas (López Jimeno, 1994).</i> .....	44
<i>Ilustración 19: Configuración triaxial de geófonos (Protocolo de instalación de Geófonos ENAEX, 2019).</i> .....	49
<i>Ilustración 20: Esquema de daño producto de tronadura (Elaboración propia, 2019).</i> .....	50
<i>Ilustración 21: Factores que tienen efecto sobre las vibraciones (Konya, 1990).</i> .....	51
<i>Ilustración 22: Mecanismos de daño a escala de banco-berma (Fuente Propia).</i> .....	53
<i>Ilustración 23: Generación de un gradiente de presión (Fuente Propia).</i> .....	55
<i>Ilustración 24: Variables críticas que afectan el daño por tronadura (Fuente Propia).</i> .....	56
<i>Ilustración 25: Metodología de Cross Hole (Bravo, 2018).</i> .....	58
<i>Ilustración 26: Tabla resumen sobre influencia de mecanismos de atenuación de energía.</i> .....	59
<i>Ilustración 27: Ubicación del complejo minero, Minera Los Pelambres (Bonzi, 2016).</i> .....	65
<i>Ilustración 28: Proceso productivo de Minera Los Pelambres (Bonzi, 2016).</i> .....	65
<i>Ilustración 29: Mapa geológico del sector de la Mina Los Pelambres (Bonzi, 2016).</i> .....	68
<i>Ilustración 30: Mina Los Pelambres, Taller de Explosivos AMSA (Madrid, 2019).</i> .....	68
<i>Ilustración 31: Definición de las Unidades Geotécnicas (Modelo Estructural MLP, 2018).</i> .....	69
<i>Ilustración 32: Unidades Geotécnicas Mina Los Pelambres (Modelo Estructural MLP, 2018).</i> ..	70
<i>Ilustración 33: Modelo geológico y estructural de MLP, (Análisis Banco Berma, 2018).</i> .....	71
<i>Ilustración 34: Ajuste residual de las propiedades de las estructuras (Propiedades Resistentes de Roca Intacta y de Macizo Rocosó, 2017).</i> .....	76
<i>Ilustración 35: Parámetros geométricos en la construcción de taludes (Manual de Diseño de Perforación y Tronadura ENAEX, 2019).</i> .....	77
<i>Ilustración 36: Zonas de diseño en rajo Los Pelambres (Budget MLP, 2019).</i> .....	78
<i>Ilustración 37: Esquema general de perforación en Mina Los Pelambres (Manual de Diseño de Perforación y Tronadura ENAEX, 2019).</i> .....	79
<i>Ilustración 38: Flujograma del proceso de perforación y tronadura, rajo Los Pelambres (Manual de Diseño de Perforación y Tronadura ENAEX, 2019).</i> .....	81
<i>Ilustración 39: Definición del factor de diseño (Elaboración propia, 2019).</i> .....	83
<i>Ilustración 40: Proyección de las UGT en el banco 3380 de F10N (Fuente Propia).</i> .....	86
<i>Ilustración 41: Esquema de diseño y carguío de precorte (Manual de Diseño de Perforación y Tronadura ENAEX, 2019).</i> .....	87
<i>Ilustración 42: Perfil de cargas de las UGT03 y UGT12 Pelambres (Manual de Diseño de Perforación y Tronadura ENAEX, 2019).</i> .....	87
<i>Ilustración 43: Parámetros del diseño de tronadura en UGT03 y UGT12 (Manual de Diseño de Perforación y Tronadura ENAEX, 2019).</i> .....	88
<i>Ilustración 44: Perfil de cargas de la UGT06 (Manual de Diseño de Perforación y Tronadura ENAEX, 2019).</i> .....	88

<i>Ilustración 45: Parámetros del diseño de tronadura en UGT06 (Manual de Diseño de Perforación y Tronadura ENAEX, 2019).</i>	89
<i>Ilustración 46: Plan de trabajo para evaluar condición geomecánica-estructural de F10N (Elaboración Propia, 2020).</i>	90
<i>Ilustración 47: Plan de trabajo de condición de tronadura en F10N (Elaboración Propia, 2020).</i>	92
<i>Ilustración 48: Plan de trabajo de condición post-tronadura en F10N (Elaboración Propia, 2020).</i>	93
<i>Ilustración 49: Condición estructural actual de F10N, Mina Los Pelambres (Fuente Propia).</i>	94
<i>Ilustración 50: Análisis estereográfico de la UGT03, Mina Los Pelambres (Modelo Estructural MLP, 2018).</i>	95
<i>Ilustración 51: Análisis estereográfico de la UGT06, Mina Los Pelambres (Modelo Estructural MLP, 2018).</i>	96
<i>Ilustración 52: Análisis estereográfico de la UGT012, Mina Los Pelambres (Modelo Estructural MLP, 2018).</i>	97
<i>Ilustración 53: Condición geotécnica crítica del banco 3425, Fase F10N (Fuente Propia).</i>	98
<i>Ilustración 54: Condición geotécnica crítica del banco 3410, Fase F10N (Fuente Propia).</i>	99
<i>Ilustración 55: Condición geotécnica crítica del banco 3395, Fase F10N (Fuente Propia).</i>	100
<i>Ilustración 56: Condición geotécnica crítica del banco 3380, Fase F10N (Fuente Propia).</i>	101
<i>Ilustración 57: Proyección estereográfica de estructuras críticas de F10N (Elaboración propia).</i>	102
<i>Ilustración 58: Histograma de los mapeos de las estructuras críticas declaradas (Fuente Propia).</i>	103
<i>Ilustración 59: Proyección estereográfica de todos los mapeos de F10N (Elaboración propia).</i>	104
<i>Ilustración 60: Histograma de los mapeos de estructuras declaradas en F10N (Fuente Propia).</i>	106
<i>Ilustración 61: Proyección estereográfica del Banco 3425, Fase F10N (Fuente Propia).</i>	107
<i>Ilustración 62: Análisis para definir falla plana en 3425 (Fuente Propia).</i>	108
<i>Ilustración 63: Análisis para definir falla en cuña 3425 (Fuente Propia).</i>	108
<i>Ilustración 64: Proyección estereográfica del Banco 3410, Fase F10N (Fuente Propia).</i>	110
<i>Ilustración 65: Análisis para definir falla plana en 3410 (Fuente Propia).</i>	111
<i>Ilustración 66: Análisis para definir falla en cuña 3410 (Fuente Propia).</i>	111
<i>Ilustración 67: Proyección estereográfica del Banco 3395, Fase F10N (Fuente Propia).</i>	112
<i>Ilustración 68: Análisis para definir falla plana en 3395 (Fuente Propia).</i>	113
<i>Ilustración 69: Análisis para definir falla en cuña 3395 (Fuente Propia).</i>	114
<i>Ilustración 70: Proyección estereográfica del Banco 3380, Fase F10N (Fuente Propia).</i>	115
<i>Ilustración 71: Análisis para definir falla plana en 3380 (Fuente Propia).</i>	116
<i>Ilustración 72: Análisis para definir falla en cuña 3380 (Fuente Propia).</i>	117
<i>Ilustración 73: Comparación entre la topografía actual de Fase F10N y el diseño mina (Fuente Propia).</i>	118
<i>Ilustración 74: Discos estructurales a nivel de banco en Fase F10N (Fuente Propia).</i>	119

<i>Ilustración 75: Inestabilidades identificadas en terreno, Fase F10N (Fuente Propia).</i> .....	119
<i>Ilustración 76: Proyección estereográfica de estructuras identificadas mediante scanner (Fuente Propia).</i> .....	120
<i>Ilustración 77: Análisis cinemático de estabilidad respecto a la información del scanner (Fuente Propia).</i> .....	122
<i>Ilustración 78: Análisis cinemático respecto a la información del scanner (Fuente Propia).</i> ...	122
<i>Ilustración 79: Proyección estereográfica para el desarrollo del estudio a escala de banco (Fuente Propia).</i> .....	124
<i>Ilustración 80: Análisis cinemático de falla plana con un ángulo cara de banco de 70° (Fuente Propia).</i> .....	125
<i>Ilustración 81: Análisis cinemático de falla plana con un ángulo cara de banco de 75°.</i> .....	125
<i>Ilustración 82: Análisis cinemático de falla plana con un ángulo cara de banco de 80°.</i> .....	125
<i>Ilustración 83: Análisis cinemático de falla cuña con un ángulo cara de banco de 70° (Fuente Propia).</i> .....	126
<i>Ilustración 84: Análisis cinemático de falla cuña con un ángulo cara de banco de 75° (Fuente Propia).</i> .....	126
<i>Ilustración 85: Análisis cinemático de falla cuña con un ángulo cara de banco de 80°.</i> .....	127
<i>Ilustración 86: Tabla resumen del análisis de equilibrio límite de Fase F10N (Fuente Propia).</i> .....	128
<i>Ilustración 87: Perfil de carga explosiva, propuesta N°1 (Fuente Propia).</i> .....	147
<i>Ilustración 88: Simulación Paradigme, propuesta N°1.</i> .....	148
<i>Ilustración 89: Perfil de carga explosiva, propuesta N°2 (Fuente Propia).</i> .....	148
<i>Ilustración 90: Simulación Paradigme, propuesta N°2.</i> .....	149
<i>Ilustración 91: Perfil de carga explosiva, propuesta N°3 (Fuente Propia).</i> .....	149
<i>Ilustración 92: Simulación Paradigme, propuesta N°3.</i> .....	150
<i>Ilustración 93: Perfil de carga explosiva, propuesta N°4 (Fuente Propia).</i> .....	150
<i>Ilustración 94: Simulación Paradigme, propuesta N°4.</i> .....	151
<i>Ilustración 95: Perfil de carga explosiva, propuesta N°5 (Fuente Propia).</i> .....	151
<i>Ilustración 96: Simulación Paradigme, propuesta N°5.</i> .....	152
<i>Ilustración 97: Sector de la tronadura en F10N, banco 3365 (Fuente Propia).</i> .....	155
<i>Ilustración 98: Perfil de carga de la tronadura aplicada en F10N, banco 3365 (Fuente Propia).</i> .....	156
<i>Ilustración 99: Auscultación de pozo, tramo superior del pozo (Fuente Propia).</i> .....	162
<i>Ilustración 100: Auscultación de pozo, tramo inferior del pozo (Fuente Propia).</i> .....	162
<i>Ilustración 101: Sector conciliado post tronadura en fase F10N (Fuente Propia).</i> .....	166
<i>Ilustración 102: Fórmulas de escalamiento a macizo rocoso del módulo de deformación.</i> .....	176
<i>Ilustración 103: Tipos de sistemas de iniciación (Bravo, 2018).</i> .....	177
<i>Ilustración 104: Esquema de la prueba de filtro de precorte.</i> .....	178
<i>Ilustración 105: Banco 3365 de fase F10N, posterior a la tronadura implementada.</i> .....	179
<i>Ilustración 106: Cumplimiento del ancho de berma por perfil.</i> .....	181
<i>Ilustración 107: Tabla resumen del cumplimiento del ancho de berma por banco.</i> .....	182
<i>Ilustración 108: Plan de trabajo Mina Los Pelambres (Fuente Propia).</i> .....	183

## Índice de tablas

<i>Tabla 1: Métodos de clasificación de macizo rocoso, Casanegra (2008).</i> .....	13
<i>Tabla 2: Modelo de daño de McKenzie.</i> .....	34
<i>Tabla 3: Criterio de daño escalado a macizo rocoso (Vergara, 2016).</i> .....	35
<i>Tabla 4: Tabla resumen de limitaciones y ventajas del estudio de vibraciones.</i> .....	60
<i>Tabla 5: Equipos mina año 2019 para Mina Los Pelambres</i> .....	67
<i>Tabla 6: Resumen de los sets estructurales de MLP (Análisis Banco Berma, 2018).</i> .....	72
<i>Tabla 7: Propiedades geomecánicas de la roca intacta (Análisis Banco Berma, 2018).</i> .....	73
<i>Tabla 8: Valores de RMR, RQD y GSI por Unidades Geotécnicas.</i> .....	74
<i>Tabla 9: Resumen de las propiedades de las estructuras por tipo de relleno (Propiedades Resistentes de Roca Intacta y de Macizo Rcoso, 2017).</i> .....	75
<i>Tabla 10: Parámetros base de análisis de estabilidad (Propiedades Resistentes de Roca Intacta y de Macizo Rcoso, 2017).</i> .....	76
<i>Tabla 11: Bases de diseño proyectadas para el año 2020 (Budget MLP, 2019).</i> .....	77
<i>Tabla 12: Cartilla de evaluación del factor de condición.</i> .....	83
<i>Tabla 13: Características de los explosivos (Guía del Explosivista Enaex 2019).</i> .....	84
<i>Tabla 14: Tabla resumen de tiempos de retardo por UGT (Manual de Diseño de Perforación y Tronadura ENAEX, 2019).</i> .....	85
<i>Tabla 15: Sets estructurales de UGT03.</i> .....	95
<i>Tabla 16: Sets estructurales de UGT06.</i> .....	96
<i>Tabla 17: Sets estructurales de UGT12.</i> .....	96
<i>Tabla 18: Mecanismos de inestabilidad del banco 3425.</i> .....	98
<i>Tabla 19: Mecanismos de inestabilidad del banco 3410.</i> .....	99
<i>Tabla 20: Mecanismos de inestabilidad del banco 3395.</i> .....	101
<i>Tabla 21: Mecanismos de inestabilidad del banco 3380.</i> .....	102
<i>Tabla 22: Set estructurales identificados a partir de la proyección estereográfica crítica.</i> .....	103
<i>Tabla 23: Set estructurales identificados a partir de la proyección estereográfica total.</i> .....	105
<i>Tabla 24: Sets estructurales del banco 3425.</i> .....	107
<i>Tabla 25: Análisis de estabilidad del banco 3425.</i> .....	109
<i>Tabla 26: Sets estructurales del banco 3410.</i> .....	110
<i>Tabla 27: Análisis de estabilidad del banco 3410.</i> .....	112
<i>Tabla 28: Set estructurales del banco 3395.</i> .....	113
<i>Tabla 29: Análisis de estabilidad del banco 3395.</i> .....	114
<i>Tabla 30: Set estructurales del banco 3380.</i> .....	116
<i>Tabla 31: Análisis de estabilidad del banco 3380.</i> .....	117
<i>Tabla 32: Sets estructurales definidos a partir del mapeo geológico sobre el scanner.</i> .....	120
<i>Tabla 33: Factor de seguridad de las inestabilidades críticas identificadas.</i> .....	123

<i>Tabla 34: Set estructurales a utilizar para el análisis banco-berma.</i>	124
<i>Tabla 35: Parámetros de ajuste H&amp;P para UGT03.</i>	129
<i>Tabla 36: Parámetros de ajuste H&amp;P para UGT06.</i>	130
<i>Tabla 37: Parámetros geomecánicos y PPVc para UGT03.</i>	131
<i>Tabla 38: Parámetros geomecánicos y PPVc para UGT06.</i>	132
<i>Tabla 39: Parámetros geomecánicos y PPVc para UGT12.</i>	132
<i>Tabla 40: Parámetros geomecánicos y PPVcmr para UGT03.</i>	133
<i>Tabla 41: Parámetros geomecánicos y PPVcmr para UGT06.</i>	133
<i>Tabla 42: Parámetros geomecánicos y PPVcmr para UGT12.</i>	133
<i>Tabla 43: Criterio de daño de McKenzie para UGT03.</i>	134
<i>Tabla 44: Criterio de daño de McKenzie para UGT06.</i>	134
<i>Tabla 45: Criterio de daño de McKenzie para UGT12.</i>	135
<i>Tabla 46: Criterio de daño de Vergara para UGT03.</i>	135
<i>Tabla 47: Criterio de daño de Vergara para UGT06.</i>	136
<i>Tabla 48: Criterio de daño de Vergara para UGT12.</i>	136
<i>Tabla 49: Nivel de vibraciones para UGT03 (Fuente Propia).</i>	137
<i>Tabla 50: Nivel de vibraciones para UGT06.</i>	138
<i>Tabla 51: Nivel de vibraciones para UGT12.</i>	139
<i>Tabla 52: Parámetros de tronadura para la propuesta N°1.</i>	141
<i>Tabla 53: Parámetros de tronadura para la propuesta N°2.</i>	142
<i>Tabla 54: Parámetros de tronadura para la propuesta N°3.</i>	143
<i>Tabla 55: Parámetros de tronadura para la propuesta N°4 (Fuente Propia).</i>	144
<i>Tabla 56: Parámetros de tronadura para la propuesta N°5.</i>	146
<i>Tabla 57: Resumen de simulaciones de vibración mediante Paradigme.</i>	152
<i>Tabla 58: Niveles de vibraciones por propuesta.</i>	153
<i>Tabla 59: Comparación de los niveles de vibraciones respecto caso base.</i>	154
<i>Tabla 60: Parámetros de tronadura para la propuesta N°5.</i>	156
<i>Tabla 61: Niveles de vibraciones de la propuesta y caso base.</i>	157
<i>Tabla 62: Comparación de los niveles de vibraciones respecto caso base.</i>	158
<i>Tabla 63: Costo de propuesta y caso base.</i>	164
<i>Tabla 64: Gasto de propuesta y caso base.</i>	164
<i>Tabla 65: Parámetros geotécnicos conciliados Post Tronadura.</i>	166
<i>Tabla 66: Resumen pruebas en terreno.</i>	175
<i>Tabla 67: Modelo de Bauer y Calder.</i>	175
<i>Tabla 68: Modelo de Hoek y Bray.</i>	175
<i>Tabla 69: Modelo de Oriad.</i>	176

## Índice de ecuaciones

<i>Ecuación 1: Criterio de falla de Mohr – Coulomb (Coulomb, 1776).</i> .....	15
<i>Ecuación 2: Desplazamiento de una onda sísmica.</i> .....	24
<i>Ecuación 3: Frecuencia de la onda sísmica.</i> .....	24
<i>Ecuación 4: Longitud de onda sísmica.</i> .....	25
<i>Ecuación 5: Desplazamiento de una onda sísmica.</i> .....	25
<i>Ecuación 6: Velocidad de una onda sísmica.</i> .....	25
<i>Ecuación 7: Aceleración de una onda sísmica.</i> .....	26
<i>Ecuación 8: Factor de atenuación geométrica.</i> .....	26
<i>Ecuación 9: Factor de atenuación inelástico.</i> .....	27
<i>Ecuación 10: Modelo de vibraciones de campo lejano, Duvalí (1971).</i> .....	29
<i>Ecuación 11: Modelo de Devine, Campo Lejano (Devine, 1966).</i> .....	30
<i>Ecuación 12: Peso de la carga, Holmberg y Persson.</i> .....	31
<i>Ecuación 13: Modelo de velocidad propuesto por Holmberg y Persson.</i> .....	31
<i>Ecuación 14: PPV resultado, Holmberg y Persson.</i> .....	31
<i>Ecuación 15: Relación de deformación de McKenzie.</i> .....	33
<i>Ecuación 16: Relación PPV crítica, criterio de daño.</i> .....	33
<i>Ecuación 17: PPV crm escalado a macizo rocoso, criterio de daño.</i> .....	35
<i>Ecuación 18: Criterio de falla de Hoek &amp; Brown.</i> .....	36
<i>Ecuación 19: Constante del material a.</i> .....	37
<i>Ecuación 20: Resistencia a la tracción escalada a macizo rocoso.</i> .....	37
<i>Ecuación 21: Constante del material s.</i> .....	37
<i>Ecuación 22: Valor reducido de la constante del material m.</i> .....	37
<i>Ecuación 23: Módulo de Young, Hoek &amp; Diederichs (2006).</i> .....	39
<i>Ecuación 24: Modelo de PPV<sub>cmr</sub>, Vergara (2014).</i> .....	39
<i>Ecuación 25: Esfuerzo de tracción escalado a macizo rocoso (Sheorey, 1997).</i> .....	40
<i>Ecuación 26: Módulo de Young, Galera (2005).</i> .....	41
<i>Ecuación 27: Modelo de PPV<sub>cmr</sub>, Pardo (2016).</i> .....	41
<i>Ecuación 28: Costo final de perforación y tronadura</i> .....	46
<i>Ecuación 29: Factor de Carga Total.</i> .....	61
<i>Ecuación 30: Costo de perforación por metro.</i> .....	62
<i>Ecuación 31: Costo de perforación por tonelada.</i> .....	62
<i>Ecuación 32: Costo de explosivos</i> .....	63
<i>Ecuación 33: Costo final de perforación y tronadura</i> .....	63
<i>Ecuación 34: Factor de diseño aplicado en Mina Los Pelambres</i> .....	82