

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo general.....	2
1.1.2	Objetivos específicos	2
1.2	Alcances.....	2
1.3	Metodología	3
1.4	Organización del documento.....	4
2	Antecedentes	5
2.1	Ambiente de desarrollo	5
2.2	Herramientas de desarrollo	5
3	Análisis bibliográfico.....	6
3.1	Introducción a la planificación minera	6
3.2	Metodología tradicional en la planificación de largo plazo para minería de cielo abierto.....	7
3.2.1	Selección del pit final y generación de pits anidados.....	8
3.2.2	Estrategia de ley de corte	10
3.2.3	Evaluación económica y selección del pit final óptimo.....	11
3.2.4	Selección de fases.....	13
3.2.5	Diseño operativo de fases	13
3.2.6	Programa de producción.....	15
3.3	Componentes geométricos de talud minero.....	16
3.3.1	Cálculo de ancho de rampa	18
3.3.2	Cálculo de ángulo global de talud minero	20
3.4	Investigación de operaciones en la planificación de largo plazo en minas de cielo abierto	21
3.5	Estado-del-arte actual en el diseño geométrico de rampas para minería de rajo abierto	23
4	Modelo matemático para el diseño geométrico de rampas óptimas a nivel de bloques en minería de cielo abierto	35
5	Caso de estudio	37
5.1	Antecedentes del caso de estudio	37
5.2	Escenario económico.....	38

5.3 Escenario geotécnico	39
6 Análisis de resultados	40
6.1 Pit final	40
6.2 Pits anidados y pit final óptimo	41
6.3 Selección de Fases	45
6.4 Primera introducción de la herramienta matemática para la generación de pit con rampa a nivel de bloques	48
6.4.1 Generación de rampas en Envolverte 1 (fase 2)	49
6.4.2 Generación de rampas en fase 1	56
6.5 Cálculo de pit final considerando nuevas restricciones geométricas	61
6.6 Segunda introducción de herramienta matemática para la generación de pit con rampa a nivel de bloques	63
6.7 Diseño de pit con rampa con software CAD para resultados de envolvente económica con la aplicación de la herramienta matemática	65
6.8 Diseño de pit con rampa con software CAD para resultados de envolvente económica sin la aplicación de la herramienta matemática	67
6.9 Comparación de metodologías para diseño geométrico de rampas	69
7 Conclusiones	73
8 Bibliografía	75
9 Anexos	78
Anexo A: Atributos de pits anidados, según destino planta o botadero	78
Anexo B: Análisis económico de la extracción de material, para determinación del pit final óptimo	79
Anexo C: Cantidad de material y ley media para fases preliminares (originales) del caso de estudio	81
Anexo D: Introducción de herramienta matemática para la generación de pit con rampa a nivel de bloques en un caso particular	82

Índice de tablas

Tabla 1: Cubicación del modelo de bloques.....	37
Tabla 2: Estadísticas básicas de la ley de cobre.....	37
Tabla 3: Escenario económico para caso de estudio.....	38
Tabla 4: Parámetros geotécnicos fijos de talud minero.....	39
Tabla 5: Tonelaje de reservas y leyes en el yacimiento.....	40
Tabla 6: Tonelaje de mineral y estéril en el yacimiento.....	40
Tabla 7: Mineral, estéril y beneficio contenido en el pit-final.....	41
Tabla 8: Tonelaje contenido en el pit final, que es enviado a planta o botadero.....	41
Tabla 9: Atributos de pits anidados.....	42
Tabla 10: Atributos de Envolverte 1.....	45
Tabla 11: Atributos de fase 1.....	47
Tabla 12: Atributos de fase 2.....	47
Tabla 13: Atributos geométrico-técnicos para experimentos con variación del bloque de partida, en Envolverte 1.....	50
Tabla 14: Atributos de extracción y beneficio para experimentos con variación del bloque de partida, en Envolverte 1.....	51
Tabla 15: Porcentajes de pérdidas con respecto a Envolverte 1, en experimentos con variación del bloque de partida.....	51
Tabla 16: Porcentajes de ganancias con respecto a Envolverte 1, en experimentos con variación del bloque de partida.....	51
Tabla 17: Atributos geométrico-técnicos para experimentos con diferente configuración de capas frontera, en Envolverte 1.....	52
Tabla 18: Atributos de extracción y beneficio para experimentos con diferente configuración de capas frontera, en Envolverte 1.....	53
Tabla 19: Porcentajes de pérdidas con respecto a Envolverte 1, en experimentos con diferente configuración de capas frontera.....	53
Tabla 20: Porcentajes de ganancias con respecto a Envolverte 1, en experimentos con diferente configuración de capas frontera.....	53
Tabla 21: Sectores de capas frontera, para experimentos en Envolverte 1.....	54
Tabla 22: Atributos geométrico-técnicos para experimentos con diferente configuración de sectores de capas frontera, en Envolverte 1.....	55
Tabla 23: Atributos de extracción y beneficio para experimentos con diferente configuración de sectores de capas frontera, en Envolverte 1.....	55

Tabla 24: Atributos del prediseño de pit con rampa con modelo matemático en Envolverte 1.....	56
Tabla 25: Atributos geométrico-técnicos para experimentos con variación del bloque de partida, en fase 1.....	57
Tabla 26: Atributos de extracción y beneficio para experimentos con variación del bloque de partida, en fase 1.....	58
Tabla 27: Porcentajes de pérdidas con respecto a fase 1, en experimentos con variación del bloque de partida.....	58
Tabla 28: Porcentajes de ganancias con respecto a fase 1, en experimentos con variación del bloque de partida.....	58
Tabla 29: Sectores de capas frontera, para experimentos en fase 1.....	59
Tabla 30: Atributos geométrico-técnicos para experimentos con diferente configuración de sectores de capas frontera, en fase 1.....	59
Tabla 31: Atributos de extracción y beneficio para experimentos con diferente configuración de sectores de capas frontera, en fase 1.....	60
Tabla 32: Cálculo de ángulos globales de talud.....	62
Tabla 33: Atributos de Envolverte 2.....	62
Tabla 34: Sectores de capas frontera, para experimentos en Envolverte 2.....	63
Tabla 35: Atributos geométrico-técnicos para experimentos con diferente configuración de sectores de capas frontera, en Envolverte 2.....	64
Tabla 36: Atributos de extracción y beneficio para experimentos con diferente configuración de sectores de capas frontera, en Envolverte 2.....	64
Tabla 37: Atributos del prediseño de pit con rampa utilizando modelo matemático, en Envolverte 2.....	65
Tabla 38: Atributos del diseño de pit con rampa con software CAD en Envolverte 2....	67
Tabla 39: Atributos del diseño de pit con rampa con software CAD en Envolverte 1....	69
Tabla 40: Comparación de resultados por etapas para el caso de estudio.....	70
Tabla 41: Porcentaje de ganancias (positivo) o perdidas (negativo) al integrar el diseño de rampa a la envolverte v/s la envolverte original, para el caso de estudio.....	70
Tabla 42: Porcentaje de ganancias del diseño de Envolverte 2 con rampa con respeto al diseño de Envolverte 1 con rampa, para el caso de estudio.....	71
Tabla 43: Comparación cualitativa entre metodologías para el diseño geométrico de rampas de transporte.....	71
Tabla 44: Cubicación de material enviado a botadero, para pits anidados.....	78
Tabla 45: Cubicación de material enviado a planta, para pits anidados.....	78
Tabla 46: Atributos económicos para el escenario worst case.....	79

Tabla 47: Atributos económicos para el escenario best case	80
Tabla 48: Atributos económicos para el escenario óptimo fase-banco	81
Tabla 49: Atributos de tonelaje, ley y beneficio para fase 1 preliminar.....	81
Tabla 50: Atributos de tonelaje, ley y beneficio para fase 2 preliminar.....	82
Tabla 51: Atributos de extracción y beneficio para experimentos con diferente configuración de capas frontera, en fase 1 preliminar.....	83
Tabla 52: Atributos de extracción y beneficio para experimentos con diferente configuración de capas frontera, en fase 1 preliminar.....	84
Tabla 53: Porcentajes de pérdidas con respecto a fase 1 preliminar, en experimentos con diferente configuración de capas frontera	84
Tabla 54: Porcentajes de ganancias con respecto a fase 1 preliminar, en experimentos con diferente configuración de capas frontera	84
Tabla 55: Atributos geométrico-técnicos para experimentos con variación del bloque de partida, en fase 1 preliminar	85
Tabla 56: Atributos de extracción y beneficio para experimentos con variación del bloque de partida, en fase 1 preliminar	85
Tabla 57: Porcentajes de pérdidas con respecto a fase 1 preliminar, en experimentos con variación del bloque de partida.....	86
Tabla 58: Porcentajes de ganancias con respecto a fase 1 preliminar, en experimentos con variación del bloque de partida.....	86
Tabla 59: Atributos geométrico-técnicos para experimentos con variación del sentido de giro de rampa, en fase 1 preliminar	87
Tabla 60: Atributos de extracción y beneficio para experimentos con variación del sentido de giro de rampa, en fase 1 preliminar	88
Tabla 61: Porcentajes de pérdidas con respecto a fase 1 preliminar, en experimentos con variación del sentido de giro de rampa.....	88
Tabla 62: Porcentajes de ganancias con respecto a fase 1 preliminar, en experimentos con variación del sentido de giro de rampa.....	88

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Esquema de la metodología del trabajo.....	4
Ilustración 2: Metodología tradicional de planificación de largo plazo hasta el plan de producción.....	7
Ilustración 3: Vista en perfil de envolvente económica.....	9
Ilustración 4: Secuencia de extracción worst case.....	11
Ilustración 5: Secuencia de extracción best case.....	11
Ilustración 6: Integración de rampa en el diseño operativo de un pit.....	14
Ilustración 7: Componentes geométricos del talud minero.....	17
Ilustración 8: Rampa con doble pista.....	19
Ilustración 9: Componentes geométricos del talud minero a nivel de bloques.....	20
Ilustración 10: Cuatro bancos con pata y cresta, para ejemplificar modelamiento de rampa.....	26
Ilustración 11: Localización de puntos para el tránsito de rampa, dentro de la pared del pit.....	27
Ilustración 12: Posicionamiento de ancho de rampa para el acceso a cada banco, dentro de la pared del pit.....	28
Ilustración 13: Pre-diseño de crestas de pit con rampa, dentro de la pared del pit.....	29
Ilustración 14: Diseño de crestas de pit con rampa, dentro de la pared del pit.....	29
Ilustración 15: Diseño de pit con rampa bajo el estado-del-arte actual, dentro de la pared del pit.....	30
Ilustración 16: Localización de punto de entrada, dirección de rampa y puntos para el tránsito de rampa, fuera de la pared del pit.....	31
Ilustración 17: Posicionamiento de ancho de rampa para el acceso a cada banco, fuera de la pared del pit.....	32
Ilustración 18: Pre-diseño de crestas de pit con rampa, fuera de la pared del pit.....	32
Ilustración 19: Diseño de crestas de pit con rampa, fuera de la pared del pit.....	33
Ilustración 20: Diseño de pit con rampa bajo el estado-del-arte actual, fuera de la pared del pit.....	34
Ilustración 21: Envolvente económica (pit final).....	41
Ilustración 22: Pits anidados.....	42
Ilustración 23: Fases preliminares.....	46
Ilustración 24: Fase 1 preliminar.....	46
Ilustración 25: Fase 1 definitiva.....	46

Ilustración 26: Fase 2 definitiva	47
Ilustración 27: Fases definitivas	48
Ilustración 28: Vista en planta de variable frontera para Envolverte 1, en cota superior	50
Ilustración 29: Vista en perfil y planta de rampa para experimento 1 (Envolverte 1)	52
Ilustración 30: Vista en perfil y planta de rampa para experimento 20 (Envolverte 1) ...	56
Ilustración 31: Vista en planta de variable frontera para fase 1, en cota superior	57
Ilustración 32: Vista en perfil y planta de rampa para experimento 6 (fase 1)	59
Ilustración 33: Vista en perfil y planta de rampa para experimento 12 (fase 1)	61
Ilustración 34: Roseta de azimut, para el cálculo del ángulo global de talud	61
Ilustración 35: Envolverte económica 2 (pit final)	62
Ilustración 36: Vista en perfil y planta de rampa para experimento 8 (Envolverte 2)	65
Ilustración 37: Diseño de layer de pit con rampa en Envolverte 2, en base a los resultados del modelo matemático	66
Ilustración 38: Superficie triangulada del diseño de pit con rampa, para Envolverte 2..	66
Ilustración 39: Volumen triangulado que encierra el diseño de pit con rampa, para Envolverte 2.....	67
Ilustración 40: Diseño de layer de pit con rampa en Envolverte 1	68
Ilustración 41: Volumen triangulado que encierra el diseño de pit con rampa, para Envolverte 1.....	68
Ilustración 42: Superficie triangulada del diseño de pit con rampa, para Envolverte 1 ..	69
Ilustración 43: Vista en planta de variable frontera para fase 1 preliminar, en cota superior	83
Ilustración 44: Vista en perfil y planta de rampa para experimento 3 (fase 1 preliminar)	85
Ilustración 45: Vista en perfil y planta de rampa para experimento 6 (fase 1 preliminar)	87
Ilustración 46: Vista en perfil y planta de rampa para experimento 13 (fase 1 preliminar)	89