

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Objetivo general.....	1
1.2.	Objetivos específicos	2
1.3.	Alcances.....	2
1.4.	Contenidos de la memoria	2
2.	Antecedentes bibliográficos	4
2.1.	Parámetros de caracterización geotécnica del macizo rocoso	4
2.1.1.	Discontinuidades	4
2.1.2.	Roca intacta	6
2.1.3.	Esfuerzos	7
2.2.	Métodos de clasificación de macizo rocoso	7
2.2.1.	Rock Quality Designation (RQD)	8
2.2.2.	Rock Tunneling Quality Index (Q).....	9
2.3.	Método sublevel stoping.....	10
2.3.1.	Diseño.....	11
2.4.	Dilución	19
2.4.1.	Equivalent Linear Overbreak/Slough (ELOS)	20
2.4.2.	Guía de estimación de ELOS de Clark (1998)	21
2.4.3.	Guía de estimación de ELOS actualizada	22
2.5.	Métodos de modelamiento numérico.....	24
2.5.1.	Método de diferencias finitas (FDM).....	24
2.6.	Variabilidad geotécnica en mecánica de rocas	25
2.6.1.	Parámetros estadísticos.....	26
2.6.2.	Distribución de probabilidad	27
2.6.3.	Variabilidad geotécnica	28
2.6.4.	Variabilidad en métodos empíricos	29
2.6.5.	Variabilidad en métodos numéricos	31
2.6.6.	Otros métodos de variabilidad.....	32
2.6.7.	Comentarios finales	33
3.	Metodología.....	35
3.1.	Variables de estudio.....	36
3.2.	Variabilidad en mecánica de rocas	36

3.2.1.	Parámetros variables.....	37
3.2.2.	Parámetros constantes.....	46
3.3.	Caso sintético.....	46
3.4.	Análisis de sensibilidad.....	48
3.4.1.	Consideraciones.....	48
3.4.2.	Resultados para comparación.....	49
3.5.	Impacto en diseño.....	50
3.5.1.	Método empírico.....	50
3.5.2.	Modelamiento numérico.....	51
3.6.	Evaluación.....	55
4.	Resultados y análisis.....	56
4.1.	Análisis de sensibilidad.....	56
4.1.1.	Distribuciones de probabilidad.....	56
4.1.2.	Número de estabilidad.....	57
4.1.3.	ELOS.....	61
4.1.4.	Conclusiones.....	65
4.2.	Impacto de variabilidad en diseño.....	66
4.2.1.	Distribuciones de probabilidad.....	66
4.2.2.	Gráficos de estabilidad empíricos.....	69
4.2.3.	Criterio de sobre-excavación.....	71
4.2.4.	Conclusiones.....	72
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	73
5.1.	Conclusiones.....	73
5.1.1.	Variabilidad de los parámetros geotécnicos.....	73
5.1.2.	Análisis de sensibilidad.....	73
5.1.3.	Impacto de variabilidad.....	74
5.1.4.	Guía para incluir variabilidad en el diseño.....	74
5.2.	Recomendaciones.....	75
6.	Bibliografía.....	77
7.	Anexos.....	82
7.1.	Anexo A: Guías de estimación de parámetros geotécnicos.....	82
7.2.	Anexo B: Resultados análisis de sensibilidad.....	84
7.3.	Anexo C: Resultados impacto de la variabilidad.....	87

Índice de Figuras

Figura 2.1. Diagrama ilustrativo de las propiedades de las discontinuidades (Wyllie, 1999).	5
Figura 2.2. Gráfico esfuerzo axial-deformación típico (Brady & Brown, 2004).	6
Figura 2.3. Esquema de desarrollo de sublevel stoping (Hamrin, 2001).....	11
Figura 2.4. Gráfico de estabilidad de Mathews, modificado por Stewart y Forsyth (1995). 12	
Figura 2.5. Factores A, B y C en número de estabilidad de Mathews et al. (1981).	14
Figura 2.6. Gráfico de Mathews modificado por Stewart y Forsyth (1995).	15
Figura 2.7. Gráfico de estabilidad de Mathews modificado por Potvin (1988).	16
Figura 2.8. Factores A, B y C para número de estabilidad modificado (Potvin, 1988).	17
Figura 2.9. Gráfico de Mathews extendido (Mawdesley et al., 2001).	18
Figura 2.10. Sección transversal de ELOS (Capes, 2009).....	20
Figura 2.11. Guía de estimación de dilución de Clark (1998).....	22
Figura 2.12. Guía de estimación actualizada (Castro, 2015).....	23
Figura 2.13. Pasos para la cuantificación de incertidumbre en propiedades del macizo rocoso (modificado de Halder y Mahadevan, 2000).	26
Figura 2.14. Diagrama esquemático de metodología aplicada por Sari (2010).	29
Figura 2.15. Variabilidad incorporada al gráfico de estabilidad de Mathews (Diederichs y Kaiser, 1996).	30
Figura 2.16. Contornos de isoprobabilidad en gráfico de estabilidad de Mathews (Diederichs y Kaiser, 1996).	30
Figura 2.17. Mapa de RMR en elevación 3560 m para: a) 1 realización, b) promedio de 100 realizaciones, c) desviación estándar de 100 realizaciones (Pinheiro et al., 2015).	32
Figura 2.18. Mapa de RMR en elevación 3560 m para: d) 1 realización, e) promedio de 100 realizaciones, f) desviación estándar de 100 realizaciones (Pinheiro et al., 2015).....	33
Figura 3.1. Metodología variabilidad geotécnica y análisis de sensibilidad.	35

Figura 3.2. Metodología impacto de variabilidad en diseño.	36
Figura 3.3. Función de Distribución de Probabilidad de RQD (Elsayed, 1991).	38
Figura 3.4. Relación JRC y Jr (Read y Stacey, 2009).	39
Figura 3.5. Gráfico de correlación entre JRC y Jr.	39
Figura 3.6. Valores de JRC para perfil A (Beer, 2002).	40
Figura 3.7. Valores de JRC para perfil B (Beer, 2002).	40
Figura 3.8. Simulación de JRC para perfil A.	41
Figura 3.9. Simulación de JRC para perfil B.	41
Figura 3.10. Distribución para Jr según perfil A.	42
Figura 3.11. Distribución para Jr según perfil B.	42
Figura 3.12. Distribución de Jr a partir de una distribución triangular (Perfil A).	43
Figura 3.13. Distribución de Jr a partir de una distribución triangular (Perfil B).	43
Figura 3.14. Factor de orientación B (Mathews et al., 1981).	44
Figura 3.15. Ejemplo de sets estructurales.	44
Figura 3.16. Esquema de caserón en estudio.	47
Figura 3.17. Vista isométrica – Caja de trabajo modelo de caserón sintético.	52
Figura 3.18. Corte transversal – Caja de trabajo y caserón sintético.	52
Figura 3.19. Corte transversal – Modelo de caserón sintético.	53
Figura 4.1. Distribución para RQD.	56
Figura 4.2. Distribución para Jr.	57
Figura 4.3. Distribución para Factor B.	57
Figura 4.4. Gráficos de sensibilidad para N respecto a RQD, Jr y Factor B.	58
Figura 4.5. Boxplots de número de estabilidad respecto a RQD, Jr y Factor B.	59
Figura 4.6. Gráfico araña para número de estabilidad.	60
Figura 4.7. Gráficos de distribución acumulada de N respecto a RQD, Jr y Factor B.	61

Figura 4.8. Gráficos de sensibilidad para ELOS respecto a RQD, Jr y Factor B.	62
Figura 4.9. Boxplots de ELOS respecto a RQD, Jr y Factor B.	63
Figura 4.10. Gráfico araña para ELOS.	64
Figura 4.11. Gráficos de distribución acumulada de EOS respecto a RQD, Jr y Factor B. .	65
Figura 4.12. Distribución de probabilidad para número de estabilidad.	66
Figura 4.13. Distribución de probabilidad para ELOS.	67
Figura 4.14. Distribución acumulada para número de estabilidad.	68
Figura 4.15. Distribución acumulada para ELOS.	68
Figura 4.16. Gráfico de estabilidad de Mathews con distribución de N.	69
Figura 4.17. Guía de estimación de dilución (ELOS) con distribución para N.	70
Figura 4.18. Distribución de probabilidad para esfuerzo de sobre excavación σ_3'	71
Figura 4.19. Distribución acumulada para esfuerzos de sobre excavación σ_3'	72
Figura 5.1. Guía para incluir variabilidad en el diseño de caserones.	75
Figura 7.1. Guía de estimación de parámetro J_n modificada de Hutchinson y Diederichs (1996).	82
Figura 7.2. Guía de estimación para parámetro J_r modificada de Hutchinson y Diederichs (1996).	82
Figura 7.3. Guía de estimación para parámetro J_a modificada de Hutchinson y Diederichs (1996).	83

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Clasificación macizo rocoso según RQD.	8
Tabla 2.2. Clasificación de macizo rocoso según Q.	10
Tabla 2.3. Formulación guía de estimación actualizada.	23
Tabla 3.1. Transformación de J_r simulado en distribución triangular a J_r real.	43

Tabla 3.2. Geometría de caserón en estudio.....	47
Tabla 3.3. Dip y dip-direction de pared colgante y set estructural crítico.....	47
Tabla 3.4. Valores de parámetros de caso de estudio.....	48
Tabla 3.5. Parámetros elásticos de roca.....	53
Tabla 4.1. Índice de sensibilidad para número de estabilidad.....	60
Tabla 4.2. Índice de sensibilidad para ELOS.	64
Tabla 7.1. Estadísticos resumen para N con RQD variable.....	84
Tabla 7.2. Estadísticos resumen para N con Jr variable.	84
Tabla 7.3. Estadísticos resumen para N con Factor B variable.	84
Tabla 7.4. Estadísticos resumen para ELOS con RQD variable.	85
Tabla 7.5 Estadísticos resumen para ELOS con Jr variable.	85
Tabla 7.6. Estadísticos resumen para ELOS con Factor B variable.	86
Tabla 7.7. Percentiles de N y ELOS para RQD, Jr y Factor B variables.	86
Tabla 7.8. Estadísticos resumen para N con todo variable.....	87
Tabla 7.9. Estadísticos resumen para ELOS con todo variable.....	87

Índice de Ecuaciones

Ecuación 2.1. Fórmula de cálculo de RQD (Deere et al., 1967).	8
Ecuación 2.2. Fórmula de cálculo de RQD (Palmstrom, 1982).	8
Ecuación 2.3. Fórmula para cálculo de Q (Barton et al., 1974).	9
Ecuación 2.4. Fórmula de radio hidráulico.....	12
Ecuación 2.5. Número de estabilidad de Mathews et al. (1981).	13
Ecuación 2.6. Fórmula para Q de Barton modificado.	13
Ecuación 2.7. Número de estabilidad modificado por Potvin (1988).	16

Ecuación 2.8. Frontera estable-falla en gráfico de Mawdesley (2002).	18
Ecuación 2.9. Frontera falla-falla mayor en gráfico de Mawdesley (2002).	18
Ecuación 2.10. Fórmula dilución por medio de ELOS (Clark y Pakalnis, 1997).	21
Ecuación 2.11. Dilución en base porcentual (Clark y Pakalnis, 1997).	21
Ecuación 2.12. Media de una variable.....	26
Ecuación 2.13. Varianza de una variable.	27
Ecuación 2.14. Desviación estándar de una variable.....	27
Ecuación 2.15. Coeficiente de variabilidad de una variable.....	27
Ecuación 3.1. Trend y plunge de un polo a partir de dip y dip-direction de un plano.	45
Ecuación 3.2. Cosenos directores respecto a coordenadas globales.....	45
Ecuación 3.3. Producto punto entre pared del caserón y el plano de discontinuidad.....	45
Ecuación 3.4. Ángulo real entre planos.....	46
Ecuación 3.5. Fórmula para calcular ELOS de forma empírica.	49
Ecuación 3.6. Índice de sensibilidad representativo.....	50
Ecuación 3.7. Cálculo de esfuerzos in situ para modelo.	54