

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo General	3
1.1.2. Objetivos Específicos	3
1.2. Metodología	3
2. Técnicas de Modelamiento Numérico	5
2.1. Introducción	5
2.2. Análisis cinemático y equilibrio límite de laderas de roca	6
2.3. Análisis numérico de laderas de roca	7
2.4. Aplicaciones avanzadas de técnicas numéricas en deformaciones y roturas complejas de laderas de roca	9
3. Modelamiento en 3DEC	11
3.1. Introducción	11
3.2. Método de elementos distintos	11
3.3. 3DEC	13
3.3.1. Descripción General	13
3.3.2. Mecánica del uso de 3DEC	16
3.3.3. Generación de Modelos	17
3.3.4. Modelamiento Geométrico	18
4. Implementación del Modelo	21
4.1. Análisis de validación	21
4.2. Cerro Catedral	23
4.2.1. Antecedentes del área de estudio	23
4.2.1.1. Generalidades	23
4.2.1.2. Marco Geomorfológico	24
4.2.1.3. Marco Geológico	26
4.2.1.4. Marco Tectónico	30
4.2.1.5. Actividad Sísmica	31
4.2.1.6. Características del talud	32
4.2.2. Desarrollo del modelo	35
4.2.2.1. Geometría	35
4.2.2.2. Discontinuidades Abiertas y Puentes de Roca	39
4.2.2.3. Sets de discontinuidades menores	41

4.2.2.4. Parámetros del Modelo y Condiciones de Borde	42
4.2.3. Resultados	44
4.2.3.1. Modelamiento Geométrico	44
4.2.3.2. Análisis estático	48
5. Metodología Propuesta	52
6. Discusiones	56
7. Conclusiones y Recomendaciones	59
7.1. Conclusiones	59
7.2. Recomendaciones	60
Bibliografía	61
Apéndices	65
A. Reconstrucción de la geometría original	66
B. Modelamiento geométrico en base a bloques	78
C. Modelamiento geométrico en base a superficies	82
D. Códigos escritos en 3DEC	85
D.0.1. Cerro Catedral	85

Índice de tablas

2.1. Métodos de análisis convencionales (Modificado de Stead et al., 2006).	7
2.2. Métodos numéricos de análisis (Modificado de Stead et al., 2006).	8
2.3. Métodos numéricos híbridos/avanzados de análisis (Modificado de Stead et al., 2006).	10
3.1. Atributos de las cuatro clases de Métodos de Elementos Discretos y del Método de Equilibrio Límite (Modificado de Fairhurst, 2014).	13
4.1. Propiedades geotécnicas de las muestras obtenidas (García, 2016).	33
4.2. Propiedades resistentes de la roca (García, 2016).	33
4.3. Propiedades geotécnicas de las discontinuidades (García, 2016).	33
4.4. Orientación de las discontinuidades principales y menores del talud.	34
4.5. Características de las discontinuidades menores del talud.	41
4.6. Parametros utilizados para el material y las discontinuidades.	43

Índice de ilustraciones

2.1. Diagrama de flujo ilustrando los tres niveles de sofisticación del análisis de deslizamientos y los modos de ruptura traslacional/rotacional donde se aplican	6
3.1. Procedimiento de solución general para análisis estáticos en geomecánica . .	17
3.2. Topografía en 3DEC basada en a) planos definidos por el usuario, b) bloques basados en el DEM y c) malla creada en CAD a partir del DEM. Las figuras en celeste corresponden a las metodologías utilizadas en esta memoria	20
4.1. Modelo de bloques empleado en la validación de los modelos posteriores. Los puntos de color rojo indican las zonas donde se aplican las condiciones de borde	21
4.2. Modelo de bloques considerando un $\phi=35^\circ$	22
4.3. Modelo de bloques considerando un $\phi=50^\circ$	23
4.4. Zona de estudio, indicando, además, su ubicación geográfica, forma de acceso y la superficie de la remoción asociada	24
4.5. Principales unidades geomorfológicas entre los 32°S y 35°S	25
4.6. Mapa Geológico Regional de la zona. Escala 1:750.000	27
4.7. Datos estructurales de los sets de discontinuidades menores	34
4.8. Perfiles transversales trazados sobre el DEM	35
4.9. Ladera de Cerro Catedral con las secciones principales mencionadas en este trabajo	36
4.10. Nube de puntos (izquierda) y la malla de triangulaciones corregida (derecha) del talud (Figura 4.9). Vista en perspectiva	37
4.11. Algoritmo utilizado para generar los prismas de remoción	38
4.12. Superficie de discontinuidad abierta entre la base y la remoción. El punto rojo corresponde al nodo de control utilizado en el análisis estático. La imagen inferior izquierda corresponde a la vista en perspectiva equivalente del talud	39
4.13. Superficie de discontinuidad abierta entre la base y la remoción considerando el puente de roca. La imagen inferior izquierda corresponde a la vista en perspectiva equivalente del talud, destacando, en rojo, la zona que abarca el puente de roca	40
4.14. Esquema 2D de un modelo de discontinuidades abiertas (izquierda) y con puente de roca (derecha)	40
4.15. Zonas consideradas como puente de roca (cuadriláteros de color rojo)	41
4.16. Distribución de los sets de discontinuidades secundarios en la zona de estudio (planos azules)	42

4.17. Ajuste realizado para obtener los parámetros de Mohr–Coulomb en base al modelo de Barton–Bandis	43
4.18. Unidad básica de construcción de los modelos: prisma rectangular regular (izquierda) y prisma triangular irregular (derecha)	44
4.19. Modelo de bloques de la base del área de estudio	45
4.20. Modelo de bloques de la base y el material reconstruído	45
4.21. Modelo de superficie de la base del área de estudio	46
4.22. Modelo de superficie de la base y el material reconstruído	46
4.23. Modelo de superficie de la base y el material reconstruído considerando un puente de roca en la segunda rampa	47
4.24. Desplazamiento neto en el tiempo del nodo de control considerando las discontinuidades abiertas (verde) y el puente de roca (azul)	48
4.25. Perfil transversal considerando las discontinuidades abiertas	49
4.26. Desplazamiento neto en el tiempo del nodo de control considerando distintos valores de ϕ en las discontinuidades principales	50
4.27. Perfil transversal considerando un puente de roca en la segunda rampa	51
5.1. Pasos recomendados para la elaboración de modelos geológico-geotécnicos empleando herramientas de modelamiento numérico de elementos distintos	55
A.1. Perfil 1	66
A.2. Perfil 2	67
A.3. Perfil 3	67
A.4. Perfil 4	68
A.5. Perfil 5	68
A.6. Perfil 6	69
A.7. Perfil 7	69
A.8. Perfil 8	70
A.9. Perfil 9	70
A.10. Perfil 10	71
A.11. Perfil 11	71
A.12. Perfil 12	72
A.13. Perfil 13	72
A.14. Perfil 14	73
A.15. Perfil 15	73
A.16. Perfil 16	74
A.17. Perfil 17	74
A.18. Superficie interpolada a partir de los perfiles 1 a 17	75
A.19. Esquema del procesamiento realizado y los programas utilizados para la reconstrucción del talud a partir del DEM pre y post-deslizamiento. Los programas indicados en * solo deben ser utilizados en caso de que el espaciamiento de ambas grillas no sea el mismo	76
A.20. Imagen satelital obtenida tras el deslizamiento ocurrido en Punta Cola	76
A.21. Modelo de bloques de la base del área de estudio	77
A.22. Modelo de bloques de la base y el material reconstruído en Punta Cola	77
B.1. Formato original del archivo “DEM.txt”(izquierda) y el formato obtenido tras su modificación (derecha)	79

B.2. Explicación de cómo manipular el texto obtenido en ArcGIS en Excel para generar las líneas de comando “poly brick”de 3DEC	81
--	----