

AUSCULTACIÓN Y ANÁLISIS NUMÉRICO DE UN TALUD EN MOVIMIENTO

Alessandra DI MARIANO (1), Xavier GOST (2), Antonio GENS (1) y Eugenia ÁLVAREZ (3)

(1) Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Escuela Técnica Superior De Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) / Centre Internacional de Mètodes Numèrics a l'Enginyeria (CIMNE)
alessandra.dimariano@upc.edu, antonio.gens@upc.edu

(2) Técnica y Proyectos, S.A.
Departamento de Geotecnia de Cataluña, Barcelona
xgost@typsa.es

(3) Generalitat de Catalunya, Barcelona
eugenia.alvarez@gencat.cat

RESUMEN

Al norte de la ciudad de Barcelona, un talud adyacente a una carretera presenta signos de inestabilidad desde hace unos años. Un extenso sistema de instrumentación topográfica y geotécnica ha permitido observar el movimiento del talud y localizar la superficie de deslizamiento en diversas secciones del mismo. Los numerosos datos de auscultación se han analizado en su conjunto con la finalidad de seguir la evolución del movimiento y entender sus causas. Para estudiar el fenómeno de inestabilidad y obtener información sobre su posible evolución, se han realizado análisis numéricos que han permitido, entre otras cosas, seleccionar medidas de estabilización eficaces para la ladera. En el presente trabajo, se describen los detalles del estudio numérico y se comparan los resultados con las observaciones in situ.

1. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos de inestabilidad en laderas y taludes son, en general, fenómenos de gran complejidad que es necesario identificar adecuadamente para seleccionar medidas de contención y estabilización apropiadas (Alonso et al., 1993, Corominas y Yagüe, 1997, Hackl et al., 2018, Argyroudis et al., 2019). Una estimación incorrecta de dichos fenómenos puede llevar a la adopción de soluciones para su estabilización ineficaces o incluso contraproducentes (Leroueil, 2001, Corominas, 2006, Alonso et al., 2010 entre otros).

Las redes viarias a menudo están sujetas a fenómenos de inestabilidad de los taludes que las rodean con consecuente afectación a sus usuarios, así como a las mismas infraestructuras de transporte. La necesidad de garantizar la funcionalidad y seguridad de dichas redes viarias hace que sean prioritarias tanto la caracterización de las zonas problemáticas como la gestión de los riesgos asociados (Mavrouli et al. 2019).

Según Eberhardt (2003), los principales objetivos de un análisis de estabilidad de taludes incluyen la determinación de las condiciones de la ladera, la evaluación de sus posibles mecanismos de rotura, el estudio de su respuesta frente a factores externos que pueden desencadenar una rotura y también la valoración y comparación de diferentes medidas de estabilización. Para llevar a cabo un análisis de estabilidad pueden utilizarse diferentes metodologías, basadas tanto en soluciones convencionales (asociadas a métodos cinemáticos o de equilibrio límite) como en soluciones analíticas y numéricas (Eberhardt, 2003, Sengani y Allopi, 2022).

El presente trabajo presenta los resultados de un análisis numérico de elementos finitos realizado para estudiar la estabilidad de un talud adyacente a una carretera al norte de la ciudad de Barcelona. La auscultación del talud ha proporcionado información detallada sobre el mecanismo de inestabilidad y la ubicación de la superficie de deslizamiento. Los resultados numéricos se comparan con las observaciones in situ.

2. DESCRIPCIÓN DEL TALUD

Una de las principales autovías autonómicas, que conecta la ciudad de Barcelona con el norte de la región catalana, atraviesa los valles de dos ríos, el Congost y el alto Ter (Fig. 1). Dicha autovía, intensamente transitada (más de 30.000 vehículos diarios), está en funcionamiento desde la década de los años 90 y, en un tramo de unos 500 m de longitud que discurre por el valle del río Congost, ha presentado desperfectos con cierta frecuencia desde el año 2004. Los estudios para determinar el origen de dichos desperfectos se iniciaron en el 2008, centrándose inicialmente sólo en la propia carretera. A partir del 2017, se realizaron obras de reparación de gran envergadura en la autovía y el Contratista pudo comprobar que los desperfectos en realidad se debían al desplazamiento de la carretera en sentido transversal, causado por el movimiento del talud adyacente (Fig. 2).

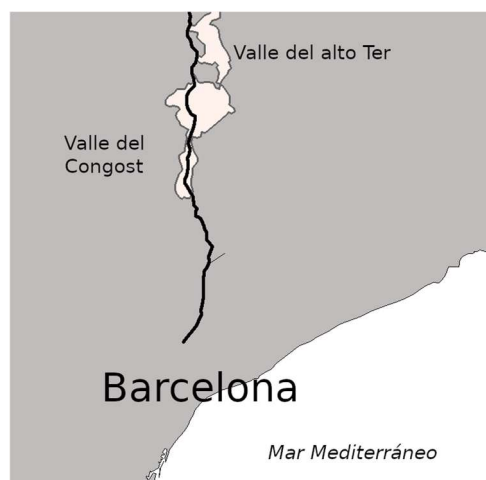


Figura 1. Plano de la autovía al norte de la ciudad de Barcelona, que atraviesa los valles del río Congost y del alto Ter.

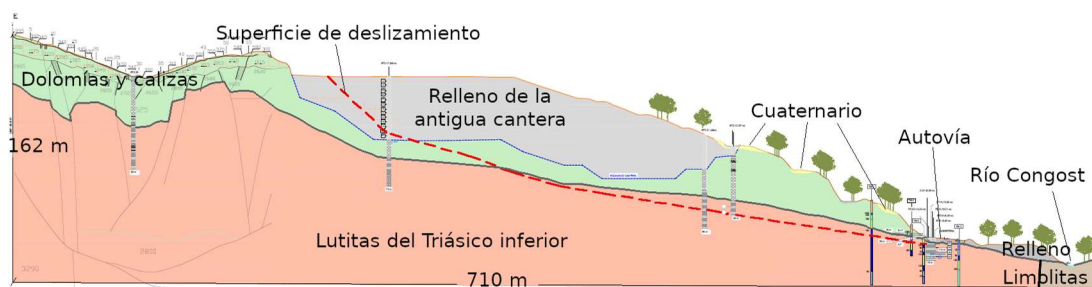


Figura 2. Perfil geológico relativo a una de las secciones transversales del talud. La Figura muestra la ubicación de la superficie de deslizamiento indicada por los inclinómetros.

Para la construcción de la autovía en 1989, se realizaron unos desmontes al pie de la ladera que modificaron la configuración de esta última. En el tramo de autovía afectado por los desperfectos y correspondiendo con la cabeza del talud, se encuentra una antigua cantera transformada en depósito de residuos controlado desde la finalización de la actividad extractiva en 2003. Los resultados de los últimos estudios geotécnicos, realizados en la zona, apuntan a que los daños observados en la carretera derivan exclusivamente del fenómeno de inestabilidad del talud. Dicho fenómeno moviliza, según los datos más recientes, un volumen total de unos 4 millones de metros cúbicos de material.

3. GEOLOGÍA DE LA ZONA

La zona objeto de estudio se encuentra en el límite norte de la Cordillera Prelitoral Catalana donde se junta con la Depresión del río Ebro. La mayor parte de los materiales de la zona corresponden a rocas sedimentarias y sedimentos de diversos tipos, lutitas, arcillitas, areniscas, rocas calcáreas, dolomías y arcillas arenosas con gravas.

Los materiales más antiguos pertenecen al Triásico. Se trata de lutitas, arcillas y areniscas silíceas del Triásico inferior subyacentes a niveles litológicos de calizas y dolomías del Triásico medio (Fig. 2). Por encima, se encuentran los materiales del Cuaternario que incluyen arcillas limosas con gravas y bloques, así como gravas arcillosas con bloques, de potencia reducida (Fig. 2). Estos sedimentos de origen coluvial recogen las aguas de infiltración de la zona y actúan como un dren superficial.

Durante la fase de explotación de la antigua cantera, se produjo la descarga de la coronación de la ladera con la consecuente reducción, o en algunas zonas eliminación, de los niveles litológicos de calizas y dolomías. Las lutitas subyacentes quedaron per tanto más expuestas a los agentes atmosféricos y es probable que esto haya favorecido su alteración. En el período de explotación de la cantera además se rebajó el nivel freático de la ladera para realizar la extracción de las dolomías y calizas en seco.

Para la restauración ambiental de la ladera, se decidió convertir la cantera en depósito controlado de residuos. Se impermeabilizó por tanto su fondo, generándose así un vaso de recogida de aguas superficiales en la parte alta del talud que modificó las condiciones hidráulicas del entorno. Naturalmente, la fase de restauración produce una carga en la cabeza del talud.

4. MOVIMIENTO OBSERVADO

El entorno de la autovía, incluidos el talud adyacente y el depósito de residuos en su coronación, están extensamente instrumentados. El sistema de auscultación incluye medidas topográficas y geotécnicas para controlar la evolución del movimiento tanto en superficie como en profundidad, permitiendo además la identificación de la superficie de deslizamiento del talud. También incluye piezómetros, abiertos y de cuerda vibrante, para observar las variaciones del nivel freático y la evolución de las presiones del agua intersticial en la superficie de rotura.

Los datos disponibles indican que la velocidad del movimiento del talud varía en el tiempo, siendo sensible a cambios en las condiciones hidráulicas del entorno, debidos, por ejemplo, a diferentes eventos de lluvia o a variaciones del nivel freático (Figuras 3 y 4). Desde la instalación de la instrumentación en junio del 2017, el movimiento observado ha ido creciendo progresivamente hasta finales del 2018, con alguna aceleración puntual asociada principalmente a precipitaciones de cierta intensidad (Fig. 4). A partir de finales de diciembre del 2018 se procede a la descarga

de los residuos en la cabeza del talud y el movimiento del talud empieza lentamente a ralentizarse, excepto en ocasión de una fuerte borrasca que se produce en enero del 2020 (Fig. 4).

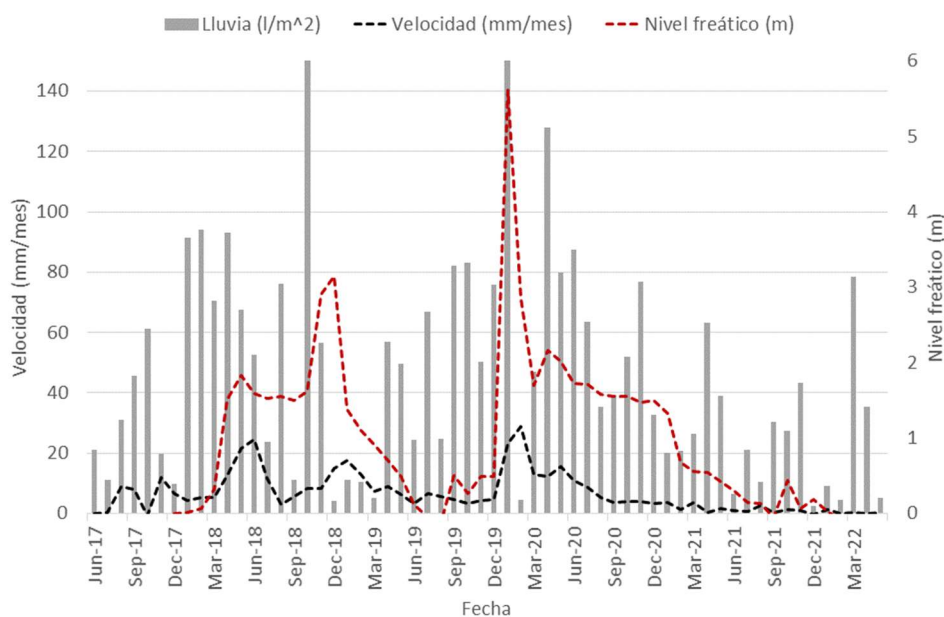


Figura 3. Evolución de la velocidad del movimiento del talud en milímetros al mes y del nivel freático. En gris se muestra el histograma de los eventos de lluvia en litros al metro cuadrado. Periodo de observación junio 2017-mayo 2022.

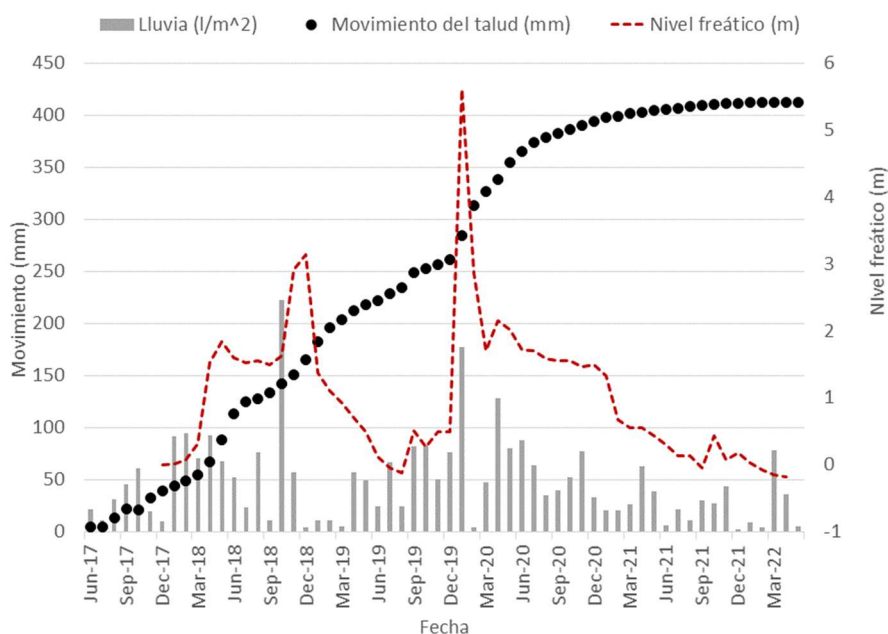


Figura 4. Evolución del movimiento del talud y del nivel freático. En gris se muestra el histograma de los eventos de lluvia en litros al metro cuadrado. Periodo de observación junio 2017-mayo 2022.

5. ANÁLISIS NUMÉRICO DEL FENÓMENO

Desde el inicio de la auscultación, la evolución del fenómeno de inestabilidad representa un riesgo no solo para la seguridad de la autovía sino también para sus usuarios. Por tanto, a partir del 2017 y con la finalidad de esclarecer las causas del fenómeno, la Administración local decide llevar a cabo un estudio geotécnico detallado de la zona y un análisis de estabilidad de la ladera.

Para reproducir la historia de los eventos ocurridos en el entorno del talud y analizar la contribución relativa de cada uno de ellos a la evolución del fenómeno de inestabilidad, el

Contratista realiza unos análisis numéricos para predecir la ubicación de la posible superficie de rotura. El análisis se lleva a cabo mediante el código comercial de elementos finitos Phase2V9 de Rocscience. En el momento del análisis no se conocen las condiciones de la ladera previas al inicio del fenómeno de inestabilidad y tampoco se dispone de muchos datos de movimientos; el modelo por tanto no se puede calibrar y los resultados obtenidos deben considerarse solo en términos relativos y no pueden utilizarse para prever movimientos.

La Figura 5 muestra el modelo de elementos finitos y sus dimensiones. Para el análisis se utiliza un modelo de deformación plana simplificado, en el que la geometría del problema se aproxima a una sección transversal uniforme. En el modelo se consideran exclusivamente dos materiales, las calizas del Triásico medio y las lutitas del Triásico inferior (Fig. 5). El comportamiento de estos niveles litológicos se modeliza mediante el criterio de Hoek-Brown generalizado (ecuaciones 1-4), para tener en cuenta los diferentes grados de alteración de los materiales. El modelo, tal como está implementado, permite reproducir de forma aproximada la disminución de la resistencia de un material una vez se haya producido su plastificación, teniendo en cuenta tanto los parámetros de resistencia de pico como los residuales.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

En la ecuación (1), que rige el modelo constitutivo, el parámetro m_b representa un valor reducido de la constante del material m_i que se obtiene a través de la ecuación (2). Los parámetros s y a son constantes del material expresadas por las ecuaciones (3) y (4). Para rocas intactas resulta $s=1$. Las tensiones σ_1' y σ_3' representan los esfuerzos principales efectivos mayor y menor en el momento de la rotura, mientras que σ_{ci} es la resistencia a compresión uniaxial del material intacto. Por último, GSI representa el Índice de Resistencia Geológica (Hoek et al., 1992, Hoek, 1994, Hoek et al., 1995, Hoek et al., 1998, Marinós y Hoek 2000, Hoek y Marinós 2000, Marinós y Hoek 2001) y D es un factor que depende del grado de alteración del material. Su valor está comprendido en el rango 0-1, siendo $D=0$ en el caso de macizos intactos y $D=1$ en materiales fuertemente alterados (Hoek et al., 2002).

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (2)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/1} - e^{-20/}) \quad (3)$$

Los parámetros geomecánicos utilizados en los análisis están resumidos en la Tabla 1. Se trata de parámetros estimados a partir de las propiedades de las formaciones litológicas intactas. En los cálculos, el estado tensional inicial de los materiales se calcula en base a su peso propio (Gravity Field Stress). En cuanto a las condiciones hidráulicas de la ladera, a pesar de no disponer de información histórica relativa al nivel freático, se ha estimado que este ha sufrido una bajada de 8 m por la explotación de la cantera. Los análisis se han realizado en condiciones drenadas.

Para el cálculo se consideran las siguientes 7 fases, que reflejan la cronología histórica de los acontecimientos de manera aproximada:

- Fase 1: Cálculo del estado tensional inicial
- Fase 2: Ejecución de los desmontes para la construcción de la autovía
- Fase 3: Bajada del nivel freático
- Fase 4: Excavación de la cantera (fase de explotación)
- Fase 5: Degradación de la parte más superficial de las lutitas (20 m de potencia, tal como se observa de los sondeos realizados)
- Fase 6: Subida del nivel freático
- Fase 7: Relleno de la antigua cantera (fase de restitución)

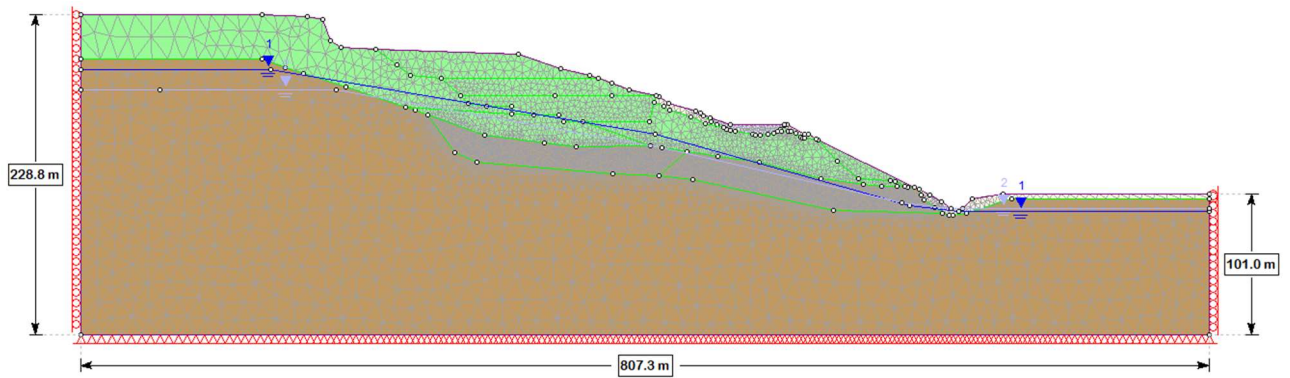


Figura 5. Sección del modelo de elementos finitos.

Parámetro	Unidad	Calizas		Lutitas		Lutitas degradadas	
		Pico	Residual	Pico	Residual	Pico	Residual
σ_{ci}	MPa	75	75	17	17	17	17
GSI	-	60	30	50	20	35	20
m_i	-	10	10	8	8	8	8
D	-	0	0	0	0.9	0.8	0.9
m_b	-	2.397	0.821	1.341	0.044	0.167	0.044
s	-	0.0117	0.0004	0.0039	3.06×10^{-6}	0.0001	3.06×10^{-6}
a	-	0.503	0.522	0.506	0.544	0.516	0.544
E_i	MPa	12740	12740	1920	1920	1920	1920
ν	-	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22

Tabla 1. Parámetros geomecánicos utilizados en el análisis del fenómeno de inestabilidad. El parámetro E_i representa el valor inicial del módulo de Young y ν el coeficiente de Poisson.

La fase de cálculo 2 reproduce la ejecución de los desmontes al pie del talud y en el modelo se observa la formación de unos puntos plásticos de rotura a nivel de la carretera, localizados en la zona más superficial del nivel de las lutitas (Fig. 6). La bajada del nivel freático debida a las operaciones de bombeo y la excavación de los materiales en la cantera, durante la fase de su explotación, no inducen en el modelo una propagación de los puntos plásticos de rotura (Fig. 7). En efecto, se trata en ambos casos de actuaciones que contribuyen a la estabilidad de ladera ya que disminuyen las fuerzas desestabilizadoras. La degradación de los primeros 20 m de lutitas, observada a partir de las observaciones de campo, contribuye a la propagación del fenómeno de rotura hacia la coronación del talud (Fig. 8), en la fase de cálculo 5. La modelización numérica de un fenómeno tan complejo como la degradación natural de los materiales, que suele ocurrir en el tiempo, es difícil y se ha modelizado aquí de forma aproximada con un material con características mecánicas reducidas respecto al resto de la roca intacta. Finalmente, la aportación de residuos en cabeza y la subida del nivel freático, debida a la interrupción del bombeo en el recinto de la antigua cantera, generan en el modelo la propagación de los puntos plásticos del pie a la coronación del talud y se genera un mecanismo de deslizamiento (Fig. 9). La Figura 9 muestra los resultados de la última fase del análisis, en término de puntos plásticos de rotura por solicitaciones de corte (en rojo). En la misma figura, la línea discontinua negra representa la superficie de deslizamiento observada mediante las lecturas inclinométricas, meses después de la predicción numérica. La comparación entre los puntos plásticos del modelo y la forma de la superficie observada in situ muestra, en general, un buen acuerdo.

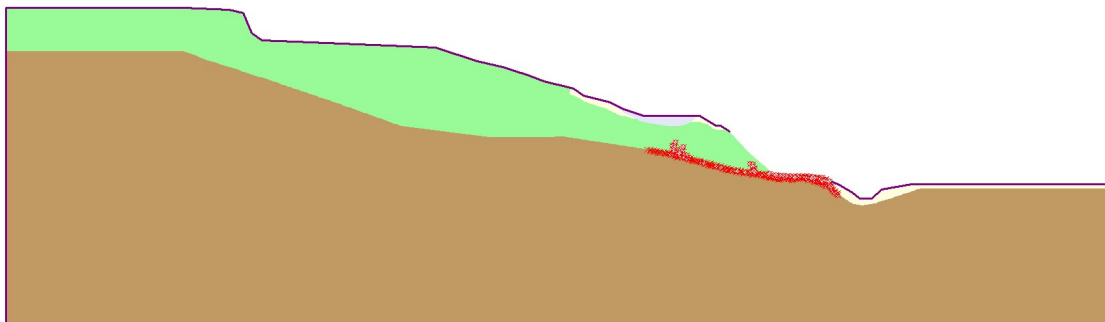


Figura 6. Resultados relativos a la Fase de cálculo 2. En rojo se indican los puntos plásticos de rotura del material.

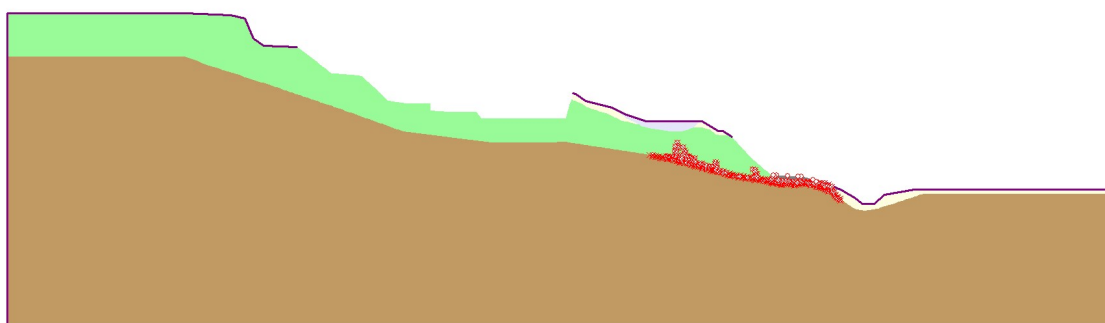


Figura 7. Resultados relativos a la Fase de cálculo 4. En rojo se indican los puntos plásticos de rotura del material.

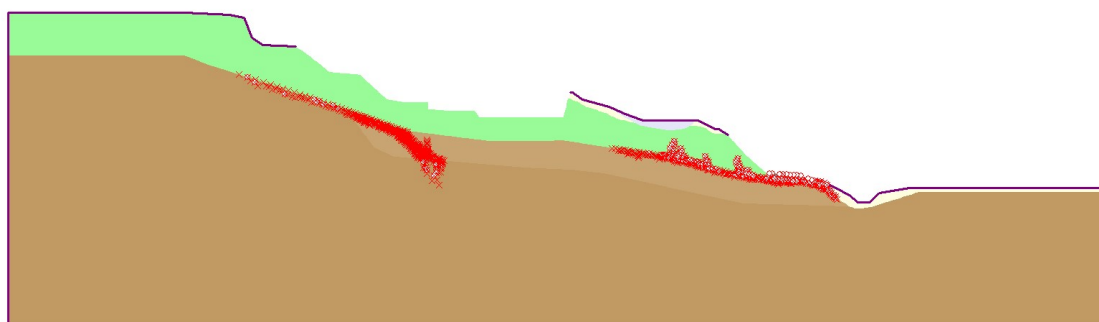


Figura 8. Resultados relativos a la Fase de cálculo 5. En rojo se indican los puntos plásticos de rotura del material.

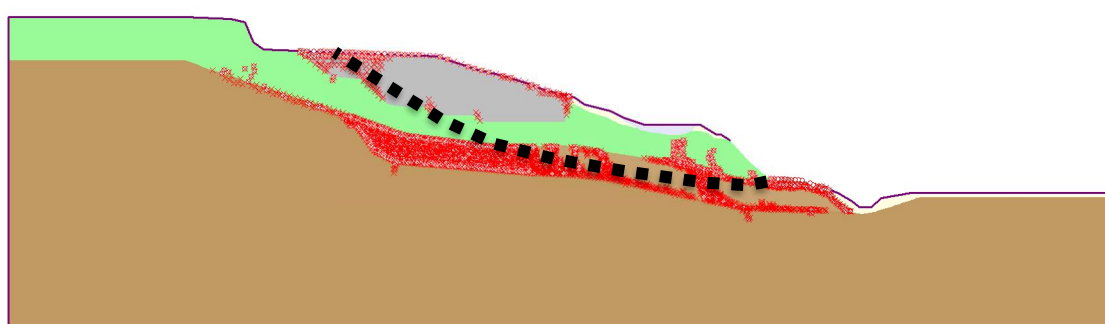


Figura 9. Resultados relativos a la última fase de cálculo (Fase 7). En rojo se indican los puntos plásticos de rotura del material. La línea discontinua negra representa, de forma aproximada, la superficie de deslizamiento observada in situ.

12. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Un talud que rodea una autovía autonómica de la red viaria catalana, en España, presenta signos de inestabilidad desde hace años. Desde un punto de vista geológico, el entorno está en el límite norte de la Cordillera Prelitoral Catalana e incluye rocas sedimentarias y sedimentos de diversos tipos.

El extenso sistema de instrumentación desplegado en la zona ha proporcionado información sobre la localización de la superficie de rotura del talud y la evolución de sus movimientos. Los datos disponibles han identificado una masa inestable de grandes dimensiones que moviliza un volumen de terreno de unos 4.000.000 de metros cúbico, con profundidades máximas de unos 40 m.

En la fase inicial del período de auscultación, se han realizado análisis numéricos de elementos finitos para hacer predicciones sobre la forma y la evolución de la superficie de deslizamiento del talud. Los análisis de elementos finitos resultan adecuados para el estudio de taludes de roca intacta o roca fuertemente alterada con comportamiento tipo suelo. El código utilizado para los cálculos incluye modelos constitutivos apropiados para reproducir de forma aproximada el comportamiento de macizos meteorizados como los del presente caso de estudio.

Las previsiones numéricas sobre la ubicación de la superficie de deslizamiento han sido confirmadas por las observaciones in situ. Este trabajo confirma que, cuando son aplicados correctamente, los métodos numéricos representan una herramienta útil para proporcionar información clave sobre posibles problemas de estabilidad y mecanismos de rotura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a Infraestructuras de la Generalitat de Catalunya, S.A.U. por el apoyo dado a la elaboración del presente trabajo.

Se agradece también la ayuda CEX2018-000797-S relativa a los centros de excelencia “Severo Ochoa” (2019-2023) financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

REFERENCIAS

- Alonso, E.E., Gens, A. and Lloret, A., 1993. The landslide of Cortes de Pallas, Spain. *Géotechnique* 43, No. 4, 507-521.
- Alonso, E.E., Pinyol, N.M. and Puzrin, A.M., 2010. Geomechanics of failures. Advanced Topics. Springer Science + Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3538-7>.
- Argyroudis, S.A., Mitoulis, S.A., Winter, M.G. and Kaynia, A.M., 2019. Fragility of transport assets exposed to multiple hazards: state-of-the-art review toward infrastructural resilience. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106567>.
- Corominas, J., 2006. El clima y sus consecuencias sobre la actividad de los movimientos de ladera en España. *Rev. C & G.*, 20 (3-4), 89-113.
- Corominas, J. y García Yagüe, A., 1997. Terminología de los movimientos de ladera. *IV Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables*. Alonso, E.; Corominas, J.; Chacón, J.; Oteo, C. y Pérez, J. (eds.). Granada. Vol. III, 1051-1072.
- Eberhardt, E., 2003. *Rock Slope Stability Analysis-Utilization of Advanced Numerical Techniques*. University British Columbia.
- Hackl, J., Lam, J.C., Heitzler, M., Adey, B.T. and Hurni, L., 2018. Estimating network related risks: A methodology and an application in the transport sector. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 18(8): 2273–2293. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2273-2018>.
- Hoek, E., 1994. Strength of rock and masses. *ISRM News Journal*, 2 (2), 4–16.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-Tac*, 267-273.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F., 1995. *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam, Balkema.
- Hoek, E. and Marinos, P., 2000. Predicting Tunnel Squeezing. *Tunnels and Tunnelling International*. Part 1 – November 2000, Part 2 –December, 2000.
- Hoek, E., Marinos, P. and Benissi, M., 1998. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. *Bull. Eng. Geol. Env.* 57 (2), 151–160.
- Hoek, E., Wood D. and Shah, S., 1992. A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses. Proc. Rock Characterization, *Symp. Int. Soc. Rock Mech Eurock’ 92*, (ed. J.A. Hudson), 209–214. London, Brit.

- Leroueil, S., 2001. Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms. *Géotechnique* 51, No. 3, 197-243.
- Marinos, P. and Hoek, E., 2000. GSI — A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *Proc. GeoEng 2000 Conference*, Melbourne.
- Marinos, P. and Hoek, E., 2001. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bulletin of the International Association of Engineering Geologists*.
- Mavrouili, O., Corominas, J., Ibarbia, I., Alonso, N., Jugo, I., Ruiz, J., Luzuriaga, S., and Vavarro, J.A., 2019. Integrated risk assessment due to slope instabilities in the roadway network of Gipuzkoa, Basque Country. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, 399–419, 2019 <https://doi.org/10.5194/nhess-19-399-2019>.
- Sengani, F. and Allopi, D., 2022. Numerical study on the evolution process of slope failure triggered by extreme rainfall along a road-cut in mountainous terrain. *Scientific Reports* 12: 6810, 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10655-5>