Los taludes en España en los últimos 50 años Slope Engineering in the Last 50 Years in Spain

Luis González de Vallejo1*, Eusebio Nestares2, Mercedes Ferrer3, Paolo Andreotti4

Resumen

La presente ponencia trata sobre la evolución histórica en España en los últimos 50 años de los taludes en roca con fines de infraestructuras de transporte. Siendo los taludes una de las obras más frecuentes en carreteras y ferrocarriles, su número ha sido extraordinario, sobre todo en los últimos 30 años, en los que España se ha puesto a la cabeza mundial en ferrocarriles de alta velocidad -segundo lugar-, y en general en la red de comunicaciones. La accidentada orografía y las variadas condiciones geológicas del territorio han supuesto realizar grandes excavaciones en condiciones complejas, lo que ha permitido obtener una gran experiencia en este tipo de proyectos y obras.

Esta ponencia pretende proporcionar una visión amplia sobre la evolución histórica en España, reflejada en los principales acontecimientos ocurridos en el periodo analizado, considerando los avances más sobresalientes y los hitos que han sido referencias de importancia, además de las reuniones científicas celebradas sobre el tema; se han seleccionado las aportaciones más destacadas por su vigencia a lo largo del tiempo, o por haber sido pioneras en su campo. Aunque el análisis realizado se refiere España, se han incluido algunas referencias de ámbito internacional, por constituir los avances realizados fuera de España puntos de referencia obligatorios. También se han considerado los aspectos de la mecánica de rocas más relacionados con la ingeniería de taludes, y se han incorporado las laderas inestables en macizos rocosos.

La ponencia se ha dividido en dos partes. La primera se refiere a la evolución histórica en el periodo considerado, y la segunda al análisis del estado del conocimiento sobre la ingeniería de taludes. Para la segunda parte, se ha realizado una revisión bibliográfica amplia y una encuesta a expertos sobre sus experiencias en la temática analizada. En base a los datos obtenidos se ha realizado un análisis de la casuística, que ha permitido obtener una visión general sobre la práctica en el diseño de taludes, los métodos de estabilización utilizados, los problemas de estabilidad y sus soluciones; se presentan también varios casos singulares de taludes y laderas inestables de carreteras y ferrocarriles.

Palabras clave: estabilidad de taludes, mecánica de rocas, desprendimientos, SEMR.

Abstract

The present paper deals with the historical evolution of the slope engineering practice and research in Spain during the last 50 years. Being always present in the road and railway slopes, their number has been extraordinary high, especially in the last 30 years in which Spain has been second in high-speed rail worldwide, and in general in the communications network. The rugged mountainous terrain and varied geological conditions of the territory have meant large excavations in complex conditions, which have yielded a large experience in this type of projects and works.

This paper aims to provide a broad view on slope excavation in Spain. Main contributions on this field have been selected including landmarks that have represented a reference of importance, scientific meetings, etc.

References from elsewhere has been also included mostly in the early years, constituting progress made outside of Spain binding points of reference. To understand the slope engineering development it has been necessary to consider also rock mechanics aspects of necessary application to slopes engineering.

The paper has been divided into two parts. The first relates to the historical evolution and the second to the analysis of the state of the art on slope engineering in Spain. A comprehensive literature review and a survey to ask experts about their experience have been carried out. Based on the data obtained from case studies an overview on the design and slope stabilization methods used is presented.

Keywords: *slope stability, rock mechanics, rockfalls, SEMR.*

* Autor de contacto: vallejo@ucm.es

1. INTRODUCCIÓN

Los taludes son, por excelencia, la obra "universal", necesarios para la construcción de cualquier obra o infraestructura. Tanto si se trata de excavar el terreno rebajando su cota para una cimentación o explotación de recursos como de conseguir una superficie llana para edificar o construir obras lineales, la excavación de taludes es la actividad más frecuente en ingeniería civil.

Otra de las características de los taludes es que, al igual que los túneles, el propio terreno constituye la obra de ingeniería, a diferencia de los casos en que el terreno constituye

Doctor en Geología; MSc.Ingeniería Geológica. Universidad Complutense de Madrid (UCM).

² Eusebio Nestares. Licenciado en Geología. Sociedad Española de Mecánica de Rocas (SEMR).

³ Mercedes Ferrer. Doctora en Geología. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid

⁴ Paolo Andreotti. Ingeniero Geólogo. Universidad Complutense de Madrid (UCM).

el soporte de las obras o el material con el que éstas se construyen (e. g. cimentaciones y pedraplenes, respectivamente).

Este carácter universal y extendido de la excavación de taludes tiene unas implicaciones contrapuestas que constituyen la esencia de esta actividad, y han marcado su desarrollo y estado actual. Por un lado, la frecuencia y cantidad de estas obras ha permitido avanzar en su diseño, métodos de excavación y estabilización, métodos de estudio del terreno, etc.; por otro lado, al tratarse de un medio natural como los macizos rocosos, con características, propiedades y comportamiento eminentemente complejo y cambiante, heterogéneo, y controlado por numerosos factores y condiciones que interactúan, es decir, con "vida propia", podría decirse que cada caso es distinto, y de aquí la dificultad y diferente grado de éxito en la aplicación de procedimientos, métodos y criterios más o menos estándar. Este desfase solo puede abordarse con un mayor conocimiento del medio rocoso, mejor comprensión de las leyes que gobiernan su comportamiento y mayor experiencia práctica, tal y como ya indicaba Jaeger en la primera edición de su libro Rock Mechanics and Engineering en 1972: "el problema de superar el vacío entre la investigación científica en mecánica de rocas y la ingeniería práctica se ha agudizado, ... y es vital la aplicación práctica de la mecánica de rocas". La validez actual de esta sentencia, más de 40 años después, refleja el problema principal del diseño de taludes en roca pero, sobre todo, la complejidad de los materiales rocosos frente a las obras de ingeniería, aspecto que, definitivamente, empuja al desarrollo de las investigaciones de campo y a una caracterización más exhaustiva de los materiales.

La presente ponencia trata sobre la evolución histórica en España en los últimos 50 años, 1967-2017, de los taludes excavados en rocas con fines de infraestructuras de transporte. Estando los taludes siempre presentes en las carreteras y ferrocarriles, su número ha sido extraordinario, sobre todo en los últimos 30 años en los que España se ha puesto a la cabeza mundial en ferrocarriles de alta velocidad (segundo lugar), y en general en la red de comunicaciones. La accidentada orografía y las variadas condiciones geológicas del territorio han supuesto realizar grandes excavaciones a cielo abierto en condiciones complejas, lo que ha permitido obtener una gran experiencia en este tipo de proyectos y obras.

Esta ponencia pretende proporcionar una visión amplia sobre la evolución histórica en España, reflejada en los principales acontecimientos producidos en el periodo analizado, considerando los avances más sobresalientes en el conocimiento, los hitos que han representado una referencia de importancia, las reuniones científicas celebradas, etc. Se ha seguido un orden cronológico y se han elegido las aportaciones más destacadas, bien por la permanencia o vigencia de las mismas, o por su carácter pionero.

Aunque se analiza la evolución en España, se hacen referencias al ámbito internacional, sobre todo en los primeros años, por constituir los avances realizados fuera de España puntos de referencia obligatorios. Para el desarrollo de la temática de los taludes, ha sido necesario incluir no solo las cuestiones propias de la materia, sino también los aspectos de la mecánica de rocas más relacionados, de aplicación necesaria a la ingeniería de taludes. Además, en el análisis realizado se han incluido las laderas inestables en macizos rocosos.

La ponencia se ha dividido en dos partes. La primera se refiere a la evolución histórica en el periodo considerado, y la segunda al análisis del estado del conocimiento sobre la ingeniería de taludes en España. Para la segunda parte, se ha procedido a efectuar una revisión bibliográfica amplia y a formular una consulta/encuesta a expertos sobre sus experiencias en la temática analizada. En base a los datos obtenidos se ha realizado un análisis de conjunto de la casuística, que ha permitido obtener una visión general sobre la práctica en el diseño de taludes, los métodos de estabilización utilizados y sobre los problemas de estabilidad y sus soluciones; se presentan también varios casos singulares de taludes de carreteras y ferrocarriles seleccionados a partir de la información recibida de los expertos consultados. Así mismo, se ha realizado una revisión bibliográfica complementaria de los datos de las encuestas.

2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA

2.1. Introducción

Los métodos para el diseño y construcción de taludes en roca han experimentado un considerable avance en las últimas décadas. Tanto el diseño como los análisis de estabilidad en taludes y laderas se han servido de metodologías y herramientas acordes con el estado de conocimiento y desarrollo tecnológico de la época. Sin embargo, el objetivo ha sido siempre el mismo: excavar taludes estables y adecuados a su fin con el menor volumen de excavación, es decir, con el menor coste posible. Tras 50 años de experiencia, puede decirse que aún no se ha alcanzado totalmente este objetivo. Las siguientes reflexiones de dos de los nombres más representativos en ingeniería de taludes son altamente ilustrativas, y sirven como preámbulo para adentrarse en la historia de los taludes:

"Durante siglos la construcción sobre roca ha sido sinónimo de construcción segura. A lo largo de las últimas décadas esta situación ha cambiado, y el aumento del tamaño de estructuras como las presas y las minas a cielo abierto enfrentado a los ingenieros a un conjunto totalmente nuevo de problemas. La gravedad de estos problemas y lo inadecuado de los métodos de diseño existentes han sido enfatizados por varias roturas catastróficas ocurridas en los últimos años. La solución a estos problemas no es sencilla. Los métodos de diseño ingenieril en rocas evolucionan lentamente, en gran parte por el método prueba/error ya que las leyes físicas y mecánicas que rigen el comportamiento de los macizos rocosos son poco conocidas... Conforme evolucionan los métodos de diseño, surgen nuevos problemas que no habían sido previstos, reconociéndose nuevos mecanismos de rotura o combinaciones inusuales de fuerzas... La roca es un material ingenieril extremadamente complejo, y el diseño en roca requiere la aplicación de la ciencia que sea relevante, la experiencia que esté disponible y todo el sentido común que sea posible. Sobre todo, un diseño debe ser equilibrado en cada uno de estos factores, incluso aquellos que no se pueden cuantificar deben ser considerado antes de llegar a la decisión final." (Hoek y Londe, 1974).

El desarrollo de la ingeniería de taludes en el período comprendido entre 1967 y 2017 ha sido extraordinario. En la primera década de dicho período se excavaban los taludes a partir de reglas empíricas, y pocos años más tarde ya

se diseñaban taludes en roca de centenares de metros de altura con criterios analíticos y en condiciones seguras.

En España la actividad en la ingeniería de taludes en todas sus vertientes, investigación, proyecto y construcción, ha sido igualmente extraordinaria. En los últimos 50 años se han celebrado 11 simposios sobre taludes y materias relacionadas, y más de una docena de congresos o simposios que han incluido sesiones sobre taludes (congresos de geotecnia, carreteras, ferrocarriles, minería, presas, etc.).

El período analizado se ha dividido en cuatro etapas caracterizadas por determinados hitos, avances de importancia y eventos. Dichas etapas han sido las siguientes: 1960-1975, 1975-1990, 1990-2005 y 2005-2017.

En el análisis de la evolución histórica de los taludes en roca, también se han incluido los aspectos de la mecánica de rocas de mayor transcendencia en la estabilidad de taludes. Los criterios seguidos para seleccionar los hitos más relevantes de cada etapa han incluido no solo los avances más destacados o de especial relevancia, sino también las publicaciones que en su momento fueron pioneras. Se ha seguido un orden cronológico, y aunque se ha centrado sobre España, también se ha extendido al ámbito internacional, sobre todo en la primera etapa.

2.2. Primera etapa: 1960-1975. De las reglas empíricas al equilibrio límite

Después de la II Guerra Mundial se inicia una fase de crecimiento económico mundial con gran demanda de recursos naturales, dando lugar a un importante auge de la minería, proyectándose cortas muy profundas. Junto con la minería, la ingeniería de presas y las carreteras, impulsaron el estudio de los taludes. Por otro lado, el conocimiento sobre la estabilidad de los taludes en roca en los 60 era insuficiente y con cierta frecuencia se producían roturas. Estas circunstancias propiciaron el denominado Rock Mechanics Project realizado en el Imperial College (1968-1972), cuyos objetivos fueron establecer los máximos ángulos de taludes en condiciones de estabilidad y de rentabilidad económica, además de proporcionar criterios prácticos para el diseño. En el proyecto, dirigido por E. Hoek, participaron J. Franklin y los estudiantes de postgrado N. Barton, P. Cundall, D. Ross-Brown, Y. Maini y J. Sharp. La empresa Río Tinto Española jugó un papel importante en este proyecto. Los resultados del mismo dieron lugar a una serie de publicaciones que han supuesto uno de los mayores avances en la estabilidad de los taludes en roca. Como consecuencia del proyecto se publicó el libro Rock Slope Engineering (Hoek and Bray, 1974), que marcó un hito en la ingeniería de taludes.

Previamente se habían publicado los primeros libros de mecánica de rocas que establecieron los principios de esta disciplina y que dedicaron algún capítulo a los taludes. Entre ellos: Talobre (1957), Coates (1966), Obert and Duvall (1967), Jaeger and Cook (1968), Stagg and Zienkiewicz (1968) y Rocha (1971). Además de estos libros se publican numerosos artículos sobre temas fundamentales en estabilidad de los taludes, como la resistencia de los macizos rocosos y las discontinuidades, los mecanismos de rotura, los métodos numéricos aplicados a taludes, los modelos físicos y los ensayos in situ y de laboratorio. Sus autores abrieron el camino a futuras investigaciones y muchos de estos trabajos pioneros aún siguen vigentes. Entre ellos, destacan los siguientes:

- Sobre la resistencia de las rocas y las discontinuidades: Patton (1966), Bray (1967), Hoek (1968), Franklin (1968), Jaeger (1969), Barton (1971, 1972 y 1973).
- Sobre el análisis de estabilidad, mecanismos de rotura, caída de rocas y diseño de taludes: Philbrick (1963), Ritchie (1963), Long et al., (1966), Londe et al. (1969), Deere et al. (1966), Goodman and Taylor (1967), Bray (1967), Jennings and Steffen (1967), Hoek and Pentz (1968), Hoek (1970), John (1968, 1970), Patton and Deere (1970), Barton (1971), Piteau (1971), y Hoek and Bray (1974).
- Sobre los métodos numéricos: elementos finitos: Zienkiewicz and Cheung (1966); elementos discretos: Cundall (1971), *Distinct Element Method* (DEM), que posteriormente dio lugar a los códigos FLAC y UDEC.
- Sobre programas informáticos para taludes: Hubbard (1964), Whitman and Bailey (1967) y Cundall (1971).
- Sobre ensayos: célula triaxial para rocas de Hoek; ensayo de carga puntual (Broch and Franklin, 1972); ensayo de corte directo (Ross-Brown and Walton, 1975); ensayo de durabilidad (Franklin y Chandra, 1972); modelos físicos de estabilidad de taludes (Barton, 1974).

También en esta época tuvo lugar la fundación de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas en 1962, y su primer congreso se celebró en Lisboa en 1968. Sin embargo, ya se habían celebrado varios congresos que trataron temas de mecánica de rocas y taludes. Probablemente el primero de ellos fue en 1924 en Londres, 1st Empire Mining Conference, y en 1933 se celebró en Estocolmo el 1er Congreso Mundial de Grandes Presas. En 1951, se celebró en Salzburgo el primer coloquio sobre mecánica de rocas, que se ha seguido celebrando cada año. El primer simposio en Estados Unidos sobre mecánica de rocas se celebró en 1956 en Golden. En 1959 se constituyó en Leipzig el International Bureau of Rock Mechanics que siguió activo hasta 1965. En los años anteriores al primer congreso de la ISRM, ya se habían celebrado al menos 97 congresos o simposios relacionados con mecánica de rocas.

A partir de 1965 aproximadamente, surge el interés en España por la mecánica de rocas, y se empiezan a celebrar coloquios, el primero en 1967 en el CEH en Madrid, con seis ponencias, entre ellas las presentadas por A. del Campo sobre el comportamiento mecánico de los macizos rocosos, P. Ramírez Oyanguren sobre células de presión en mecánica de rocas y por S. Uriel sobre rotura progresiva en rocas. También en 1968 se celebró en Madrid el International Symposium of Rock Mechanics. En esta primera etapa destacan varios autores españoles por su carácter pionero en mecánica de rocas y taludes, entre ellos: J.A. Jiménez Salas y S. Uriel (1964) sobre la resistencia de las rocas y ensayos mecánicos; S. Uriel y B. Bravo (1970) sobre la rotura frágil y plástica de las rocas; S. Uriel y R. Molina (1974), aspectos cinemáticos del deslizamiento de Vajont; E. Castillo y A.A. Serrano (1973) sobre análisis probabilista de rotura de taludes; A.A. Serrano y E. Castillo (1974) sobre estabilidad de macizos rocosos; P. Ramírez Oyanguren y J.L. Rodríguez Avial (1973) sobre estabilización de taludes en roca; y F. Muzás sobre deformaciones viscoelásticas en las rocas (1964) y sobre ensayos de deformabilidad en rocas (1966).

La investigación en mecánica de rocas en las universidades españolas posiblemente empezó a mediados de los 60, y las primeras tesis doctorales en esta disciplina fueron las de P. Ramírez Oyanguren, en la ETSI de Minas de Madrid, y la de J.M. Sanz Saracho, en la ETSI de Caminos de Madrid, ambas leídas en 1969.

Las primeras tesis doctorales sobre taludes en rocas, con anterioridad al año 2000, fueron las siguientes por orden cronológico:

- En la E.T.S.I. de Minas de Madrid, en 1973: "Investigación sobre estabilidad de taludes" de E. Chacón Oreja.
- En la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, en 1976, "Cálculo de variaciones aplicadas a la estabilidad de taludes" de J. Revilla Cortezón.
- En la Facultad de Ciencias Geológicas de la UCM en 1990, "Análisis del proceso de deformación y del mecanismo de rotura de rocas blandas en taludes mineros", de M. Ferrer Gijón.
- En la E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos de la UPC en 1993, "Estudio de la estabilidad de taludes en macizos rocosos fracturados. Influencia de los parámetros relativos a juntas", de I. Sulueña.

Los centros de investigación en mecánica de rocas, además de las universidades antes citadas, eran los siguientes: el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo "José Luis Escario" del Ministerio de Obras Públicas, el Instituto Geológico y Minero de España, el Servicio Geológico de Obras Públicas y la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras del INI.

Las técnicas que se utilizan en la actualidad para la estabilización y consolidación de taludes ya existían en esta etapa. Los bulones se empezaron a instalar en la década de los años 50 con fines mineros. Los anclajes en roca ya se citan en los años 60 para construcción de presas. La aplicación del hormigón proyectado se inicia a mediados de los años 60, y la gunita se introduce en España a partir de 1970.

2.3. Segunda etapa: 1975-1990. Del equilibrio límite a los métodos numéricos

En esta etapa se produce un desarrollo sin precedentes tanto en la mecánica de rocas como en la ingeniería de taludes a escala mundial, y muy especialmente en España, motivado por la construcción de nuevas redes de infraestructuras viarias para el ferrocarril de alta velocidad, autopistas, etc. Fruto de la experiencia adquirida en multitud de excavaciones de taludes y de la investigación en mecánica de rocas, geotecnia e ingeniería geológica, se publican un gran número de trabajos en revistas y congresos y tesis doctorales y de máster, que podrían superar el millar en los últimos 25 años.

Desde un punto de vista general, podría considerarse que esta etapa se ha caracterizado por la utilización generalizada de los métodos de análisis desarrollados en la etapa anterior, sobre todo los análisis de estabilidad basados en el equilibrio límite, y la incorporación progresiva de los métodos numéricos, especialmente los elementos finitos. A partir de los años 80 se inicia el uso de programas informáticos y a finales de

dicha década se introducen los primeros programas de simulación de caída de rocas, siendo uno de los primeros el desarrollado por J. Gili en 1982. Sin embargo, la aplicación de los métodos probabilísticos a la estabilidad de taludes, todavía no se ha extendido y queda limitada a trabajos académicos.

Resulta ilustrativo señalar algunas de las previsiones hechas en los 80 sobre las futuras líneas de investigación en taludes en roca: "El uso de los elementos finitos aún no está extendido en estabilidad de taludes, a pesar de sus indudables ventajas. Se propone para el futuro los análisis tenso-deformacionales en condiciones elastoplásticas y la modelización por métodos numéricos" (Ferrer, 1984). En la ponencia sobre avances recientes en estabilidad de taludes presentada por Lloret y otros en 1984 en las Jornadas sobre Inestabilidad de Laderas en el Pirineo, se decía: "Es previsible que se desarrollen métodos de cálculo numérico que sirvan para refinar las técnicas de cálculo en el sentido de la búsqueda de la superficie de deslizamiento pésima... En ocasiones los métodos de equilibrio límite no son capaces de explicar los comportamientos observados en la realidad. Una perfección de los métodos de elementos discretos de Cundall podría proporcionar una potente herramienta de diseño del sostenimiento de taludes rocosos". Estas previsiones se hicieron realidad en muy pocos años.

En esta etapa y, sobre todo, a partir de los 90 se produce gran aumento del número de publicaciones en congresos y revistas sobre la temática analizada, generándose un volumen de información que excede las limitaciones de esta ponencia.. Por ello se ha optado por destacar sólo los libros sobre taludes y a los der mecánica de rocas que incluyan capítulos sobre taludes. Por orden cronológico serían los siguientes:

- Mecánica de Rocas aplicada a la minería subterránea (1984), de P. Ramírez Oyanguren. Fue el primer libro de mecánica de rocas publicado en España.
- Manual de taludes (1987), coordinado por F. Ayala y J. Andreu, cuyos autores fueron M. Fé, M. Ferrer, A. Simón, I. Fernández, C. Olalla y colaboradores. Fue el primer libro dedicado a la ingeniería de taludes en España.
- Estabilidad de taludes y laderas naturales, de J. Corominas y otros autores (1989), monografía sobre el estado del conocimiento a finales de los 80, y que ha tenido una amplia difusión

En esta etapa destacan los siguientes simposios:

- Simposios Nacionales de Taludes y Laderas Inestables, celebrados desde 1984 hasta la actualidad. Constituyen un hito muy destacado en la ingeniería de taludes y laderas. Hasta 2017 se han celebrado 8 simposios. Sus promotores han sido Jordi Corominas y Eduardo Alonso, ambos de la UPC, que han realizado una labor extraordinaria a lo largo de los últimos 30 años. Estos simposios constituyen el principal foro pluridisciplinar celebrado en España sobre taludes y laderas inestables donde se han presentado los avances, experiencias e investigaciones.
- La SEMR organizó en esta etapa varios simposios y jornadas sobre taludes en roca, o sobre aspectos directamente relacionados con los taludes. En particular los simposios sobre Rocas Blandas, en 1976,

- Obras de Superficie en Mecánica de Rocas, en 1982, y Reconocimientos en Mecánica de Rocas, en 1984.
- La Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Cimentaciones ha organizado 10 simposios nacionales, entre 1974 y 2017, en los que se han incluido temas sobre taludes en roca y particularmente las medidas de estabilización.

2.4. Tercera etapa: 1991-2005. De los métodos numéricos a la modelización

En esta etapa continúa la actividad constructora en España, especialmente en infraestructuras y, posiblemente, constituye una de las épocas de mayor auge en las obras públicas. Esta actividad constructora ha proporcionado multitud de experiencias sobre taludes en las más variadas condiciones mostrándose algunos ejemplos en la segunda parte de ésta ponencia, en el Apartado 3.

Se extiende el uso de los métodos numéricos para el análisis de estabilidad de taludes, con programas como el FLAC, PLAXIS y Z-Soil, entre otros. En estos programas se implementan los modelos y leyes de comportamiento no lineal, y los criterios de rotura elasto-plásticos. También se inician los modelos discontinuos, más adecuados para los macizos rocosos anisótropos, aunque más complejos, como el UDEC. A finales de esta etapa se empiezan a desarrollar modelos tridimensionales.

Se desarrollan nuevos métodos de investigación geofísica aplicados a los problemas geotécnicos, como la tomografía eléctrica y sísmica, la sísmica de refracción ReMi y el geo-radar, entre otros. Se mejoran las técnicas de instrumentación geotécnica para la monitorización de taludes y se desarrollan nuevos sistemas para la estabilización de los taludes a partir de las tecnologías ya existentes

En el ámbito académico destaca la labor de investigación realizada en las universidades españolas en mecánica de rocas en general y sobre taludes en particular. No se dispone de datos sobre el número de tesis leídas en las universidades en esta materia, pero sólo en la UCM, y a modo de ejemplo, en el intervalo entre 1990 y 2010 se leyeron veintiséis tesis de máster o de doctorado sobre taludes y laderas inestables. En cuanto a las aportaciones españolas a la temática analizada, se destacan las siguientes por su carácter pionero o por la importancia del trabajo:

- 1991: Se instalan las primeras barreras dinámicas como nuevo sistema para la contención de caída de rocas. La primera, en el País Vasco, para 500 KJ, y en 1992 en Monserrat (Barcelona) y en Formentor (Mallorca). Esta nueva tecnología llegó a España tan solo un año después de salir el primer programa informático sobre caída de rocas, el CRSP, desarrollado en Colorado (Pfeiffer and Bowen, 1989). La primera tesis doctoral leída en España sobre esta temática fue en 1995, por R. Luis Fonseca, en la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria.
- 1993: Clasificación Geomecánica para Taludes SMR (Slope Mass Rating) de M. Romana, con precedentes desde 1985. Además de ser la primera clasificación aplicada a taludes, su utilización se ha extendido en todo el mundo, constituyendo un hito en las clasificaciones geomecánicas.

Se publican los siguientes libros, por orden cronológico:

- 1997: Mecánica de Rocas, de A. A. Serrano, en dos tomos, el segundo en 1999.
- 1999: Manual de estabilización y revegetación de Taludes, coordinado por C. López Jimeno y escrito por varios autores.
- 1999: Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos, de M. Ferrer y L. González de Vallejo.
- 2002: Ingeniería geológica, de L. González de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño y C. Oteo. Incluye tres capítulos dedicados a la mecánica de rocas y a taludes en roca; actualizado en 2011 por L. González de Vallejo y M. Ferrer.
- 2004: Mecánica de rocas: Fundamentos de Ingeniería de Taludes, de P. Ramírez Oyanguren y L. Alejano Monge.

Entre 1991 y 2005 se celebraron cuatro simposios sobre Taludes y Laderas Inestables y en 2003 la SEMR organizó una Jornada Técnica sobre Taludes en Roca.

2.5. Cuarta etapa: 2005-2017. De la modelización al análisis del comportamiento de medios discontinuos y anisótropos

Entre los aspectos más importantes a destacar en esta etapa en relación al estado del conocimiento, están los avances en el análisis del comportamiento de los macizos rocosos en base a modelos numéricos y a la aplicación de criterios de rotura más representativos y adecuados al medio rocoso. Sigue utilizándose el criterio de Mohr-Coulomb, a pesar de sus limitaciones para macizos fracturados, y se ha extendido el de Hoek y Brown (1980 y actualizaciones posteriores de Hoek y Brown, 1988 y Hoek et al., 2002), cuyo uso se ha generalizado. Otro avance a destacar es el procedimiento propuesto por Barton (2002) y posteriormente por Barton y Pandey (2011), para la obtención de los parámetros de resistencia de los macizos rocosos fracturados a partir del procedimiento de reducción de c y ajuste de f. Pero, posiblemente, el hito que más ha caracterizado a esta etapa ha sido el uso generalizado de programas informáticos que han facilitado las posibilidades de modelización, análisis y diseño de taludes en condiciones cada vez más representativas y cercanas a las reales.

Por otro lado, en los últimos años se están desarrollando nuevas técnicas con sensores remotos para la obtención de datos en la superficie de taludes y laderas para aplicaciones geotécnicas a la caracterización de macizos rocosos. Sobre esta temática trató la Jornada Técnica de la SEMR de 2016: Últimas técnicas aplicadas a la caracterización geomecánica de macizos rocosos. Interferometría de radar, fotogrametría digital, laser escáner y uso de drones.

En esta etapa se celebraron los siguientes simposios Internacionales en los que se han incluido los taludes en roca: *International Workshop on Rock Mechanics in Volcanic Environments*, celebrado en Tenerife y organizado por la SEMR y patrocinado por la ISRM, cuyas comunicaciones se publicaron en *Volcanic Rock Mechanics* (2010,C. Olalla, L.E. Hernández-Gutiérrez, J.A. Rodríguez-Losada, A. Perucho y J. González-Gallego, Eds); *European Rock Mechanics Symposium* (EUROCK 2014), celebrado en Vigo y

organizado por la SEMR y patrocinado por la ISRM, cuyas comunicaciones han sido publicadas en *Rock Engineering and Rock Mechanics Structures in and on Rock Masses* (2014, L. Alejano, A, Perucho, C. Olalla y R. Jiménez, Eds).

También se celebraron tres simposios nacionales de Taludes y Laderas Inestables, el último en 2013, y en 2016 se celebró el X Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica, en el que se presentaron veintiuna comunicaciones sobre mecánica de rocas, varias de ellas sobre taludes.

En esta etapa destacan las siguientes publicaciones sobre caída de rocas, enumeradas en orden cronológico: *Rockfall Risk Management in High Density Urban Areas*, por R. Copons y otros (2004); Aplicación de Membranas Flexibles para la Prevención de Riesgos Naturales, de R. Luis Fonseca (2010); y *Rockfall Risk Assessment*, de J. Corominas y O. Mavrouli (2011).

En 2014 R. Jiménez Rodriguez publica el libro Ingeniería de rocas. Caracterización de macizos rocosos y aplicación a la Teoría de Rocas: un enfoque probabilístico.

En 2015, J. Arzúa, L. Alejano e I. Pérez-Rey, publican el libro Problemas de Mecánica de Rocas. Fundamentos e Ingeniería de Taludes, complemento del editado con el mismo nombre en 2004. También en 2015, Hernández-Gutiérrez y J.C. Santamarta editan el libro Ingeniería Geológica en Terrenos Volcánicos, con casos de taludes en rocas volcánicas. En 2016, L. Jordá, R. Tomás, M. Arlandi y A. Abellán, publican el Manual de Estaciones Geomecánicas. Descripción de Macizos Rocosos en Afloramientos.

Como resumen de las actividades realizadas en los últimos doce años, podría decirse que a pesar de las circunstancias desfavorables producidas por la crisis económica, se han celebrado dos simposios internacionales, cuatro nacionales, de los cuales tres han sido sobre taludes, y se han publicado siete libros o monografías sobre mecánica de rocas y taludes.

De cara al futuro cabría preguntarse cuáles serán las tendencias y hacia dónde se dirigen los avances en los próximos años. Es evidente que se dispondrá de herramientas cada vez más potentes y sofisticadas para caracterizar, modelizar y analizar los macizos rocosos ante condiciones complejas. Necesariamente estos avances, sobre todo tecnológicos, deberán ir acompañados de un mejor conocimiento de los materiales geológicos, anisótropos, heterogéneos y variables en cada emplazamiento; de lo contrario, los resultados de las modelizaciones, cada vez más sofisticadas, no serán suficientemente representativos ni fiables. En este sentido, conviene recordar las conclusiones de la 6ª Müller Lecture, presentada en 2011: "Aquellos que restringen su experiencia en mecánica de rocas a los modelos continuos basados en el índice GSI, inevitablemente se pierden muchas ideas interesantes en el gratificante campo de ingeniería de rocas, que se desarrolla principalmente en macizos rocosos fracturados, anisótropos, con agua y variables de un lugar a otro. En medios tan variables, el álgebra compleja y los múltiples decimales resultan irrelevantes", Barton (2011).

3. ANÁLISIS DE LA CASUÍSTICA

Con la intención de analizar el estado del conocimiento y la evolución de la ingeniería de taludes en España en los últimos 50 años, se ha realizado una recopilación de casos documentados sobre inestabilidades y roturas

significativas en taludes y laderas. Para ello se ha revisado la bibliografía sobre casos españoles recogida en el Apartado 6, además de otra documentación no editada o publicada proveniente de diversas fuentes. Así mismo, se preparó una encuesta sobre los diferentes aspectos involucrados en la rotura y estabilización de taludes, que se envió a expertos en el campo de análisis y diseño de taludes e investigación de deslizamientos.

3.1. Bases de datos

Se prepararon 2 bases de datos recogiendo 138 registros de taludes excavados para carreteras y ferrocarriles y 57 registros sobre laderas en todo el territorio nacional, incluyendo los datos:

- 1. Localización del talud o ladera y tipo de obra (carretera, ferrocarril, excavación urbana)
- 2. Geometría
- 3. Geología (litologías, estructura, meteorización)
- 4. Condiciones hidrogeológicas, datos geomecánicos
- 5. Métodos de excavación, tipo de rotura o inestabilidad, causas y daños
- Medidas iniciales de diseño y medidas estabilizadoras
- 7. Observaciones.

Las figuras 3.1 y 3.2 presentan información sobre la localización de los casos recopilados e incorporados a las bases de datos.

Las figuras 3.3 y 3.4 presentan datos del análisis en lo referente a algunos parámetros de los taludes y laderas inestables: altura, ángulo y resistencia de la roca. La altura de los taludes varía entre unos pocos metros y los 175 m del talud de mayor altura, en Trabadelo, en la A-6; hay 4 taludes mayores de 70 m; en las laderas, que llegan a varios cientos de metros de altura, no siempre se dispone de datos de la altura de los deslizamientos o de las zonas afectadas. En cuanto a la resistencia de la roca, se han considerado 5 clases de resistencia a compresión simple para la roca matriz que forma la ladera o talud, asignada de forma cualitativa en la mayoría de los casos por la falta de datos:

Cuadro 1. Clases de resistencia consideradas para las rocas que forman los taludes

Clase	Resistencia	RCS (MPa)
1	Muy baja	< 10
2	Baja	10 - 20
3	Media	20 - 40
4	Alta	40 - 60
5	Muy alta	> 60

De las gráficas de las figuras pueden deducirse los siguientes aspectos:

 En general, los taludes y laderas con rocas de menor resistencia se rompen con ángulos más bajos. Mientras que las roturas en laderas muestran una clara correlación entre altura y ángulo (a mayor pendiente, mayor altura de rotura), los taludes rompen para

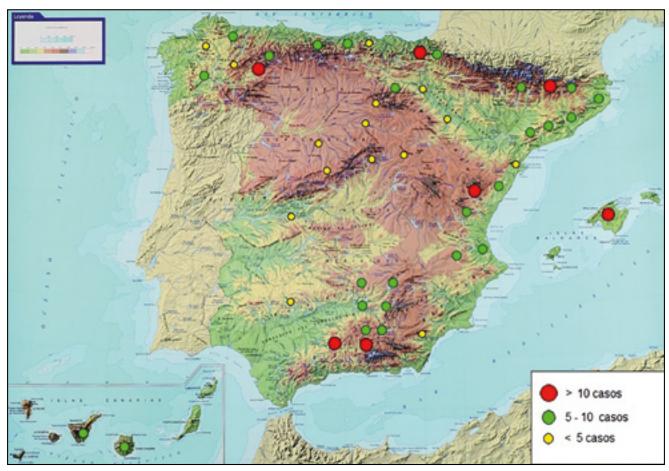


Figura 3.1. Localización de los casos analizados de taludes y laderas inestables.

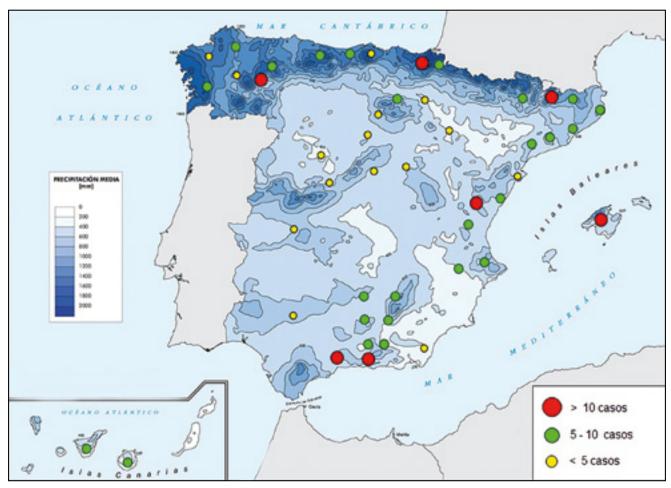


Figura 3.2. Mapa de precipitación media en España y casos analizados.

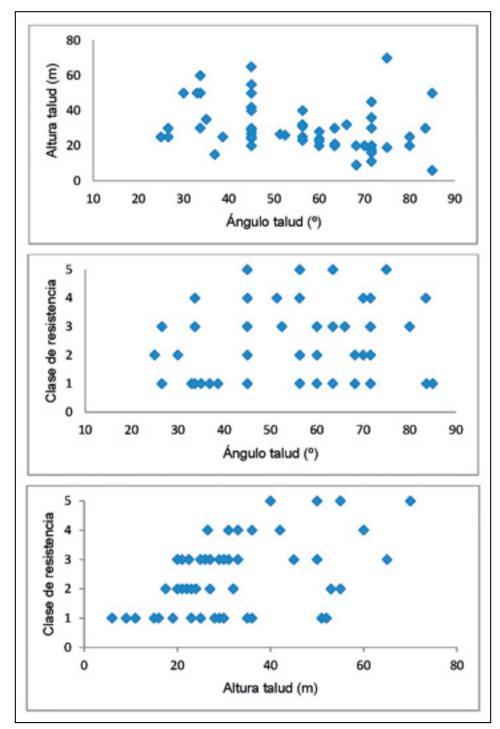


Figura 3.3. Relaciones entre altura, ángulo y clases de resistencia de la roca para taludes inestables. (Nota: en la gráfica inferior no se han incluido taludes con altura > 70 m).

cualquier altura a partir de los 30° de pendiente. Tanto en taludes como en laderas se observa la clara relación entre las alturas y las clases de resistencia: en taludes, para resistencia muy baja las roturas ocurren desde unos pocos metros de altura, y para resistencias alta y muy alta las roturas se dan en taludes a partir de 25 m; en laderas, las roturas se dan a partir de 30-40 m en rocas blandas (salvo una excepción), y a partir de los 50 en rocas resistentes.

2. En el caso de los taludes, no se han registrado roturas por debajo de los 25º en rocas de resistencia baja y media, y de los 30º en rocas de resistencia alta; solo se dan 3 casos de roturas en taludes con <30º, todos en rocas de resistencia media a baja; la ma-

yor parte de las roturas en rocas resistentes ocurren para ángulos ³45°, indicativo del predominio de roturas por caídas de bloques rocosos; a partir de este valor, las roturas afectan a rocas con cualquier valor de resistencia. La acumulación de puntos en los gráficos para unos ángulos determinados se corresponde con las pendientes más habituales en taludes de obras viales (1H:1V; 1H:1,5V; 1H:2V, etc.).

No se han registrado roturas en taludes por debajo de los 25 m de altura en rocas de resistencia alta; las mayores alturas corresponden a taludes de unos 80 m, en rocas de resistencia alta. En taludes de poca altura, < 20 m, se presentan roturas para ángulos > 65°. Las roturas se generalizan a partir de los 20 m

de altura y 25º de pendiente, aumentando su número cuanto mayor es el ángulo. Las roturas son más abundantes en rocas de resistencia muy baja. Los taludes rompen con menos altura y en mayor número para resistencias más bajas.

Los casos analizados corresponden a taludes excavados con cualquier altura (<10-175 m para taludes y (20- >120 m para laderas), cualquier ángulo y en cualquier tipo de rocas, indicando que las roturas se producen para cualquier rango. La figura 3.5 refleja algunas de estas correlaciones.

3. En el caso de las laderas, se han registrado 4 casos de roturas por debajo de los 30º en rocas de resistencia baja y media; para resistencia alta las roturas ocurren para ángulos ³ 40º. Únicamente se han regis-

trado 2 casos por debajo de los 40 m de altura. Las laderas muestran una clara relación entre la altura a la que rompen y la resistencia de las rocas: a menor resistencia rompen con menor altura. No hay relación clara entre el número de roturas y la resistencia de la roca, aunque se dan más casos para valores de resistencia media, y menos para resistencia muy alta. Las roturas son más frecuentes en laderas de gran altura y en rocas resistentes, indicando la ocurrencia de desprendimientos de bloques rocosos. Las inestabilidades se generalizan a partir de los 40 m de altura y 30º la mayoría. Las mayores alturas sobrepasan los 120 m, en rocas de resistencia media a alta (por motivos de representación gráfica, éstas se han agrupado alrededor de este valor en la figura 3.4).

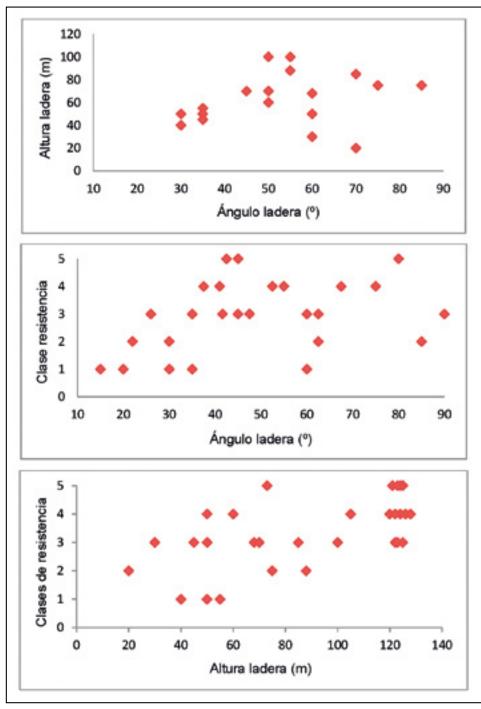


Figura 3.4. Relaciones entre altura, ángulo y clases de resistencia de la roca para laderas inestables (Nota: en la gráfica inferior se han agrupado todas las laderas con altura > 120 m).

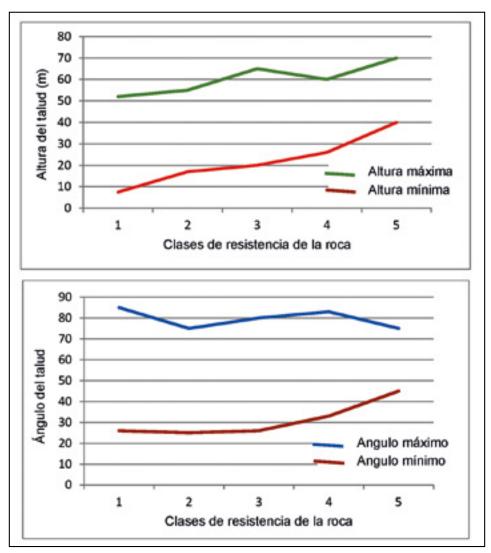


Figura 3.5. Relaciones entre la resistencia de la roca y las alturas y ángulos máximos y mínimos para los que han roto los taludes analizados. (No se han incluido los taludes > 70 m).

Con respecto a las causas de las inestabilidades, en los casos de roturas durante la construcción de los taludes, éstas podrían atribuirse a la caracterización insuficiente del macizo rocoso, a la sobrevaloración de su resistencia o a la presencia de aspectos no considerados en el diseño, como la influencia de la estructura geológica, y fracturas o fallas, aspecto fundamental en los materiales rocosos. Las roturas ocurridas posteriormente a la excavación pueden relacionarse, en su mayoría, a la presencia del agua y al comportamiento hidrogeológico de los materiales y del entorno de los taludes, lo que se traduce, en definitiva, en un conocimiento insuficiente de las propiedades y comportamiento hidrogeológico de los macizos rocosos alterados frente al agua, y la falta de medidas necesarias para evitar tanto que el agua llegue a los taludes como que se acumule en su interior. En los casos de laderas, la mayoría de las inestabilidades se deben a los efectos de precipitaciones intensas o continuadas, como en el caso de las laderas con grandes paleodeslizamientos que se reactivan, casi siempre en rocas blandas.

En las bases de datos se ha recogido la información disponible sobre medidas estabilizadoras aplicadas en taludes y laderas con inestabilidades. En el caso de taludes se han incluido tanto las actuaciones y medidas de estabilización realizadas durante la construcción, en los casos de excavaciones diseñadas con medidas estabilizadoras, como las ejecutadas después de excavado y roto el talud. Las figuras 3.6 a 3.8 recogen los datos y porcentajes sobre las medidas de estabilización aplicadas a los taludes y laderas, según la resistencia de las rocas. La figura 3.6 muestra el porcentaje de taludes en los que se ha utilizado algún tipo de medida inicial para lograr su estabilidad, a pesar de los cual en todos ellos se produjeron roturas; la figura 3.7 muestra el tipo y porcentaje de medidas aplicadas en el caso anterior; y la figura 3.8 presenta los tipos y porcentajes de medidas estabilizadoras aplicadas en todos los casos de taludes y laderas analizadas, clasificados por resistencia de la roca. Se han incluido también en las figuras otras actuaciones como medidas de protección pasivas ejecutadas para prevenir los daños en taludes y laderas (mallas, barreras, etc.). A la vista de las mismas se pueden deducir los siguientes resultados:

Se observa un aumento del porcentaje de taludes que necesitaron medidas iniciales de estabilización según disminuye la resistencia de la roca, pasando del 17% para la clase 5 (más dura) al 45% para la clase 1 (más blanda). Entre las medidas iniciales, el drenaje, construcción de bermas y retaluzado son más características en rocas más blandas. Las medidas de protección pasiva (mallas, cunetones y barreras di-

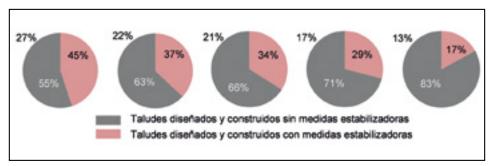


Figura 3.6. Porcentajes de taludes con y sin medidas estabilizadoras en su construcción, agrupados por clases de resistencia de la roca (1 a 5 de izda. a dcha., ver cuadro 1; se indica a su vez el porcentaje del total de casos analizados para cada clase de resistencia).

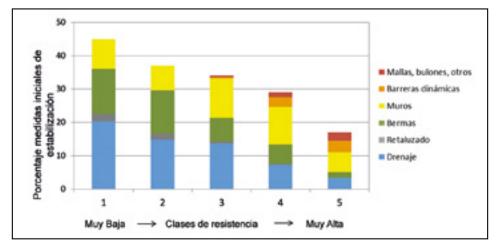


Figura 3.7. Medidas de estabilización previstas en proyecto y ejecutadas en la excavación de los taludes que requirieron diferentes tipos de medidas iniciales (ver figura 3.6), agrupadas por clases de roca.

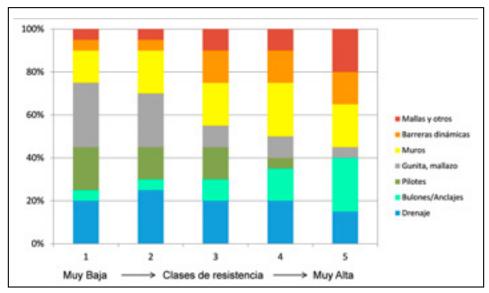


Figura 3.8. Medidas finales de estabilización aplicadas en la totalidad de taludes, tanto los que no requirieron medidas de estabilización en su diseño como en los que sí (ver figura 3.6), agrupadas por clases de roca.

námicas) son más frecuentes en taludes y laderas en rocas duras, frente a los daños por desprendimiento.

- En cuanto a las medidas estabilizadoras para la totalidad de taludes y laderas, en las rocas más blandas predominan las medidas de protección superficial, los drenajes y las medidas de contención, mientras que para los taludes en rocas más duras predominan los bulones y anclajes y mallas, y otras medidas

asociadas a taludes con desprendimientos de bloques rocosos o caída de rocas. El drenaje y los muros son las medidas más uniformemente empleadas para cualquier tipo de roca. Los pilotes solo se aplican a rocas blandas.

Los porcentajes de taludes y laderas analizados correspondientes a cada tipo de roca en función de su resistencia

Cuadro 2. Algunos casos singulares citados en la bibliografía

Lugar	Hecho destacable	Referencia	Observaciones
Autovía de Cereixal (Lugo). LU-633	Talud de 50 m	IV Simp. Nac. Taludes y Laderas Inestables	Rotura planar general de todo el talud. La rotura supuso un retraso considerable en la obra por el gran volumen de material involucrado.
Puerto de La Ragua	Patologías en dos taludes	IV Simp. Nac. Taludes y	Roturas de dos taludes de 25 m y 50 m que se corrigieron con retaluzado.
(Granada). A-92	de 25 y 50 m	Laderas Inestables	Las roturas se reactivaron y se aplicaron medidas estabilizadoras.
San Antolín (Gijón)	Talud de 110 m con 3 tipos	V Simp. Nac. Taludes y	La inestabilidad ocurrió en 3 diferentes etapas y a 3 alturas distintas, de los
Autovía. A-8	de rotura	Laderas Inestables	tipos: rotura en cuña, deslizamiento planar y vuelco.
Trabadelo (León) Autovía A-6	Talud de 175 m	VIII Simp. Nac. Taludes y Laderas Inestables	Talud de gran altura y extraordinarias dimensiones. Se registraron, en tiempos y alturas diferentes, distintas roturas. Se aplicaron medidas de estabilización. Tras la reactivación se construyó un falso túnel.
Langreo (Asturias).	Talud de 60 m con 3 tipos	IV Simp. Geotecnia Vial	Las roturas se presentaron en diferentes etapas. Rotura en cuña,
AS-1	de rotura		deslizamiento planar y desprendimientos.
Autovía Bilbao-Behobia / años 70	Numerosos taludes con problemas de estabilidad	IV Simp. Geotecnia Vial III Coloquio SEMR	Supusieron un gran avance en el estudio de las técnicas de diseño y estabilización de taludes.
Trincheras del tren y	Numerosos	VI Simp. Nac. Taludes y	Actuaciones pioneras en España de instalación de barreras dinámicas.
carretera a Montserrat	desprendimientos rocosos	Laderas Inestables	

son: 49% en rocas de resistencia baja y muy baja; 21% en rocas de resistencia media; y 30% en rocas de resistencia alta y muy alta.

De la revisión bibliográfica llevada a cabo, se han seleccionado una serie de casos de taludes y laderas inestables que destacan por algún aspecto como su elevada altura, daños producidos, tipos de roturas, medidas de estabilización, etc. Estos casos se incluyen en el cuadro 2 y pueden referirse bien a un talud particular o bien a una zona con varios casos de inestabilidad, por ejemplo a lo largo de un tramo de una autovía.

3.2. Encuesta

La encuesta se envió a más de 60 expertos, la mayoría socios de la SEMR, recibiéndose 18 respuestas. Aunque este número sea bajo, los resultados reflejan las mismas tendencias apreciadas en el análisis bibliográfico. Los casos singulares propuestos por los encuestados referentes al empleo de medidas de estabilización son coincidentes con las distribuciones obtenidas en la figura 3.8. En el cuadro 3 se resumen las principales características de los casos singulares.

4. CONSIDERACIONES FINALES

Entre las consideraciones finales que podrían hacerse en relación a la ingeniería de taludes en España, destaca la extraordinaria experiencia que se ha adquirido en este campo, que ha sido fruto de una actividad sin precedentes en la construcción de infraestructuras en un país que es el segundo más montañoso de Europa, y donde el criterio seguido en los proyectos ha priorizado, en general, las excavaciones y rellenos frente a los túneles y viaductos.

Como consecuencia de esta experiencia y de la labor investigadora desarrollada en las universidades y centros de investigación, se produce un gran impulso en mecánica de rocas que se manifiesta en el elevado número de publicaciones sobre taludes y laderas inestables realizadas en los últimos 25 años.

El análisis de la casuística en España sobre taludes excavados en roca para infraestructuras viarias, refleja, de forma general, una serie de aspectos que permiten hacer algunas consideraciones de interés. En primer lugar, es evidente que en España se han excavado muchos kilómetros de taludes en las últimas décadas y en las más diversas condiciones,

tanto geométricas como geológicas y climáticas, estando representadas todas las tipologías de rocas. Los casos analizados corresponden en su totalidad a taludes que durante o posteriormente a la ejecución de las obras han presentado inestabilidades de consideración. Del total de los 220 casos analizados, el 68% fueron diseñados sin necesidad de medidas de sostenimiento, mientras que en el 32% restante sí se previeron tales medidas, y aun así, todos ellos sufrieron roturas. Aunque estas cifras solo representan los casos publicados, precisamente por su problemática, podrían servir como punto de reflexión para considerar las causas que motivaron las roturas y el por qué no fueron previstas, además de otros aspectos que podrían estar relacionados, como la adecuación de los presupuestos y la incidencia del tipo de contratación.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los expertos consultados su aportación al presente trabajo respondiendo a la encuesta enviada. También agradecen a quienes han contribuido facilitando información sobre datos necesarios para redactar esta ponencia. En particular a Pedro Ramírez Oyanguren, Jordi Corominas, Enrique Castillo, Carlos Oteo, Roberto Luis Fonseca, Javier González-Gallego, Nick Barton y Eduardo Pradera.

Cuadro 3. Resumen de los casos singulares propuestos por los expertos consultados

Localización	Altura	Litología	Inestabilidad	Soluciones	Singularidades	Experto/Referencia
LAV Madrid-Sevilla, PP.KK. 303+724 al 304+248 Sierra Morena. 1988	Talud 35 m	Flysh carbonífero: pizarras, areniscas	Cabeceo de estratos con abombamiento de la cara del talud y aparicion de grietas	Retaluzado final a 1,75H/1V.	Estructura anticlinal muy plegada oblícua a la línea de FFCC. Rotura por cabeceo de estratos.	E. Nestares Gutierrez, A., Uriel, S., Pradera, E. (1992). Un deslizamiento por cabeceo de estratos. Tramo Adamuz-Villanueva de la línea ferroviaria de AVE Madrid-Sevilla. III Simp. Nac. sobre Taludes y Laderas Inestables. La Coruña.
LAV Madrid-Sevilla, PPKK. 312+238 al 313+488 Sierra Morena. 1988	Talud 30 m	Compleja: calcarenita, conglomerados y brecha pizarrosa con bloques de caliza	Rotura compleja. Al alcanzar la excavación 20 m de profundidad comenzaron los deslizamientos. Tras retaluzar a 1.5H/1V, al alcanzar los 30 m, a falta de 12 m para llegar a rasante, hubo nuevos deslizamientos.	Retaluzado final a 2H/1V, con berma intermedia.	Sucesivas roturas	E. Nestares Gutierrez, A., Uriel, S., Pradera, E. (1992). Un caso especial de rotura en un talud rocoso en el tramo Adamuz-Villanueva de la línea ferroviaria de AVE Madrid-Sevilla. Ill Simp. Nac. sobre Taludes y Laderas Inestables. La Coruña.
Carretera Granada-Motril 1995 a 2003	Desmontes 25- 35 m	Pizarras y lutitas	n.a.	Cambio de trazado.	Hubo que cambiar el trazado de la autovía al otro lado del río Guadalfeo.	C.Oteo
Valle del Guadalquivir, CN-222 y 223, A-92. 1996-1998 2001-2003	n.a.	Arcillas miocenas. Margas azules. Formacion Mitagalán.	Muchas roturas en desmontes por lluvias intensas.	n.a.	n.a.	C.Oteo
Accesos a Galicia 1990-2005	Desmontes 50- 70 m	Esquistos	n.a.	n.a.	n.a.	C.Oteo
Pajares, Porciles, Asturias 2005-2016. Autovías y carreteras nacionales	n.a.	Arcillas y margas. Areniscas y pizarras.	Inestabilidades en	n.a.	n.a.	C.Oteo
Intersección de la AS-341 con la N-632. Ribadesella, Asturias. 2006	Talud de unos 200 m de longitud y unos 40 de altura	Margas	Deslizamientos circulares	La secuencia de excavación, planteada para hacer por bancadas no se siguió, y hubo que acometer la solución para todo el frente a la vez.	La acusada alterabilidad de las margas causó una rapidísima caída progresiva de las capas más superficiales, impidiendo llevar a cabo la instalación del sistema flexible con mallas de alto límite elástico reforzadas.	L.M. Laguna
Carretera TF-711, Vallehermoso-Arure. La Gomera, Canarias.	Varios taludes de diferentes alturas	Rocas volcánicas	Gran variedad de tipologías: deslizamiento planar, deslizamiento circular, desprendimientos.	Ejecución y seguimiento de la obra, logrando con pocos elementos diferentes, distintas soluciones y configuraciones para diferentes necesidades de capacidad resistente.	Rocas volcánicas, con gran heterogeneidad litológica y parámetros geotécnicos, ocasionando una gran variedad de problemáticas.	L.M. Laguna L.M. 2011. High capacity flexible systems used for slope stabilization affer damages in rainstorm periods. Para for End for any Islands). 2 nd World in La Gomera (Canary Islands). 2 nd World Landslide Forum (WLF2)
Talud dcho sa-lida N del túnel de Fabares, A-64, tramo Lieres - Villaviciosa, Asturias. 2003	Unos 600 m de longitud y 3-4 bancos de unos 30 m de altura cada uno	Margas	Deslizamientos circulares	n.a.	La velocidad de alteración de las margas dificultaba enormemente la ejecución de I a solución.	L. M. Laguna
						Continúa en página siguiente.

	o de as y	ımo	ı de pp.	iásico !mas	ise try natics ban	. 1992. 7 zona 5 ia-La 9 del 3deras	<i>ción</i> <i>del</i> Simp.
Experto/Referencia	J. Estaire Sopeña, L. et al. 2001. <i>Medidas de</i> estabilización de un desmonte rocoso de gran altura. V Simp. Nac. sobre Laderas y Taludes Inestables. Madrid.	E. Velasco, P. Barón, J.M. Hurtado Celada B. y Galera, J.M., 2000. Estabilización de una ladera en el tramo Vic-Fontfreda del Eix Transversal. Ingeopress 80, 30-36.	R.M. Mateos Ferrer et al. 1997. <i>Analisis de los</i> <i>desprendimientos rocosos en la Cala de</i> <i>Banyalbufar. Bol. Geol. y Minero, 108, pp.</i> 39-51.	RM. Mateos Mateos et al. 2008. Deslizamientos en los materiales del Triásico inferior de Ferreries (Menorca). Geo-Temas	R.M. Mateos of al. 2016. The combined use of PSInSAR and UAV photogrammetry techniques for the analysis of the kinematics of a coastal landslide affecting an urban area (SE Spain). Landslides.	J.M. Gutiérrez Manjon Pérez Revenga y Gutiérrez Manjon, J.M. 1992. Inestabilidad de la Ladera situada en la zona del antiguo túnel nº 20 del FFCC Palencia-La Coruña en las inmediaciones de Torre del Bierzo (León). III Simp. Nac. Taludes y Laderas Inestables. La Coruña.	J.M. Gutiérrez Manjon García-Arango et al. 2004, Estabilización <i>del desmonte de Torre en la Autovía del</i> <i>Cantábrico (Tramo Caravía-Llovio)</i> . IV Simp. Nac. de Geotecnia Vial. Santander
Singularidades	n.a.	Análisis tenso-deformacionales paramétricos para seleccionar la solución de estabilización más idónea.	Estabilización de un talud costero casi vertical	Plano de deslizamiento en el contacto entre dos tipos de materiales rocosos con diferente comportamiento hidrogeológico. El movimiento genera una grieta vertical en el terreno con aperturas de hasta 15 m en cabecera.	Urbanización de Iujo construida sobre un deslizamiento costero. Monitorización con DInSAR y UAV.	Singular, por el volumen de la inestabilidad y encontrarse la obra en servicio.	Singular, por el volumen de la inestabilidad y por la combinación de actuaciones realizadas para su corrección.
Soluciones	n.a.	Tras la comparación técnica y económica de varias soluciones, como el retaluzado de las argilitas en la parte alta de la ladera, se optó por la eliminación total de las argilitas.	Bulones, muros de contención, pilares y mallas de triple torsión	Cambio de localización de la balsa de la EDAR	Muros de contención micropilotados, medidas de drenaje. Evacuación de 50 viviendas	Solución de estabilización básicamente, mediante movimiento de tierras y drenaje.	Ligero desplazamiento del trazado. Excavación parcial en la zona alta del desmonte. Perforación de drenes californianos. Muro anclado al pie del talud.
Inestabilidad	Deslizamiento planar y vuelco de estratos combinado con inestabilidad de cuñas	Afección a la ladera circundante, provocando una inestabilidad cuantificada en unos 700.000 m3	Desprendimientos de rocas	Deslizamiento planar que involucra un volumen de roca de unos 50.000 m3	Deslizamiento planar	Reactivación de un antiguo deslizamiento de 4 mill. de m3 (400 m de extensión a lo largo de la vía de ferrocarril y 500 m según la pendiente de la ladera).	Cuando se llevaba excavado un 70% del desmonte, de 55 m de altura, se detectó una grieta, a 60 m por detrás de la coronación del talud, paralela a la Autovia a lo largo de unos 300 m. La inestabilidad afectaba a un volumen de 1,5 mill. m3.
Litología	Granito fracturado	Margas, argilitas y areniscas	Alternancia de calcarenitas y margas	Niveles de areniscas permeables fracturadas y de lutitas de muy baja permeabilidad.	Filitas del Alpujárride y mármoles en cabecera	Pizarras carboníferas con areniscas. Estructura con buzamiento hacia la ladera.	Calizas (formaciones Griotte y de Montaña), areniscas y lutitas, tectonizadas.
Altura	Talud de unos 65 m de altura y unos 350 m de longitud	Desmonte de 45 m de altura en una ladera	Talud costero vertical de 60 m de altura	Ladera de 35º de pendiente	Ladera costera de hasta 55º de pendiente		Altura 55 m
Localización	Autovía de las Rías Bajas, tramo Barbantes-Melón	Tramo Vic-Fontfreda del Eix Transversal. 1996	Cala de Banyalbufar, Mallorca	Ferreríes, Menorca	Ladera en Cerro Gordo Almuñécar, Granada	Ladera FFCC Palencia-La Coruña, Torre del Bierzo, León	Desmonte de Torre. Autovía del Cantábrico, tramo Caravia-Llovio.

Continúa en página siguiente.

Localización	Altura	Litología	Inestabilidad	Soluciones	Singularidades	Experto/Referencia
Acantilado costero, Vízcaya	Acantilado de varios centenares de metros de longitud, con viviendas en coronación.	Flysch	Inestabilidades de tipo planar, cuña y vuelco	Costosas obras de reparación en las zonas donde se sitúan las viviendas.	n.a.	V. Ormaetxea V. Ormaetxea Ormaetxea, V. 1998. Andilisis de estabilidad en taludes costeros de tipo flyschoide. Conf. Int. Littoral'98. Barcelona. Ormaetxea, V. 2001. Metodología de caracterización de macizos flyschoides en taludes y laderas. V Simp. Nac. sobre Taludes y Laderas Inestables. Madrid.
Talud urbano, Ondarroa 2016		Flysch	Caidas aparentemente superficiales pero que eran el inicio de un gran movimiento que implicaba la inestabilidad de la mitad del monte. Movimiento de tipo toppling flexural.	En la actualidad está estabilizando. Lo más impactante es que ha desaparecido la mitad del monte.	Gran impacto mediático, se ha tenido que desalojar a casi 200 familias.	V. Ormaetxea

n.a.: información no aportada

6. BIBLIOGRAFÍA

Arzúa, J., Alejano, L., y Pérez-Rey, I. (2015). *Problemas de mecánica de rocas. Fundamentos e Ingeniería de taludes*. Madrid: Bubok Publishing.

Barton, N. (1971). A relationship between joint roughness and joint shear strength. *Proc. Inter. Symp. Rock Fracture. Nancy, France.* Paper 1-8.

Barton, N. (1972). A model study of rock-joint deformation. *Int. Jl. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* Vol. 9, N° 5: pp. 579-602.

Barton, N. (1973). Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, Elsevier. Vol. 7, pp. 287-332.

Barton, N. (1974). Rock slope performance as revealed by a physical joint model. *Proc. of 3*rd *Int. Congress ISRM. Advances in rock mechanics, Denver, Vol. IIB:* pp. 765-773.

Barton, N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *Int. Journal of Rock Mech. and Min. Sc.* Vol 39/2: pp. 185-216.

Barton, N. (2011). From empiricism, through theory, to problem solving in rock engineering. *ISRM Cong.*, *Beijing.* 6th Müller Lecture. *Proc.* Taylor and Francis, Vol. 1.

Barton, N., y Pandey, S. K. (2011). Numerical modeling of two stopping methods in two Indian mines using degradation of c and mobilization of f based on Q parameters. *Int. Jl. Rock Mech. & Min. Sci.* Vol. 48. N° 7: pp. 1012–1095.

Bray, J. W. (1967). A study of jointed and fractured rock. *Rock Mechanics and Engineering Geology*. Vol. 5, pp. 119-136 y 197-216.

Broch, E., y Franklin, J. A. (1972). The point-load strength test. *Int. Jl. Rock Mechanics and Min. Sci.* Vol. 9, pp. 669-697.

Castillo, E., y Serrano, A. A. (1973). Análisis probabilístico de la estabilidad de taludes rocosos. *Bol. Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo José Luis Escario*, 100:9-20.

Coates, D. F. (1966). Rock Mechanics Principles. *Mines Tech. Survey*. Canada.

Copons, R., Vilaplana, J. M., Corominas, J., Altimir, J., y Amigó, J. (2004). Rockfall risk management in high-density urban areas. The Andorran experience. En T. Glade, M. Anderson and M. J. Crozier (eds.), *Landslide hazard and risk*. Chichester: John Wiley & Sons, pp. 675-698.

Corominas, J. (ed.) (1989). Estabilidad de taludes y laderas naturales. Monografía nº 3. Zaragoza: Soc. Española de Geomorfología.

Corominas, J., y Mavrouli, O. (2011). Rockfall Quantitative Risk Assessment, Chapter 8. En Lambert, S., y F. Nicot (eds.): *Rockfall Engineering*. ISTE Ltd & John Wiley & Sons, Inc., pp. 255-301.

Cundall, P. A. (1971). A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock system. *Proceed. Symp. ISRM, Nancy*, Vol II., art. 8.

Deere, D. U., Hendron, A. J., Patton, F. D., y Cording, E. J. (1966). Design of surface and near surface construction in rock. *Proc.* 8th *Symp. on Rock Mech, Minneapolis*, pp. 237-302.

Fé, M., Ferrer, M., Simón, A., Fernández, I., Olalla, C., y otros. (1987). *Manual de taludes*. Ayala y Andreu (coords.). Madrid: IGME.

Ferrer, M. (1984). *Mecanismos de rotura en taludes mineros y análisis de estabilidad*. Tesis de Licenciatura. Madrid: UCM.

Ferrer, M., y González de Vallejo, L. (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. Madrid: IGME.

Franklin, J. A. (1968). A strength criterion for rock. *Imperial College Rock Mechanics Research Report Nº* 6. London: Imperial College of Science and Technology.

Franklin, J. A., y Chandra, A. (1972). The slake durability test. *Int. Jour. Rock Mech. and Mining Sci.* Vol. 9, pp. 325-341.

Gili, J. A. (1982). ROCKSLOP: Un programa de estabilidad de cuñas adaptado al análisis retrospectivo de casos reales. Publicación Nº 12. Barcelona: E.T.S. Ingenieros de Caminos.

González de Vallejo, L. y Ferrer, M. (2011). *Geological Engineering*. CRC Press.

González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). Cap. 3: Mecánica de rocas. Cap. 4: Descripción de macizos rocosos. Cap. 9: Taludes. En *Ingeniería Geológica*. Prentice Hall-Pearson.

Goodman, R. E., y Taylor, R. L. (1967). Methods of analysis for rock slopes and abutments, a review of recent developments. Failure and breakage of rock (ed. C. Fairhurst). *Proc.* 8th *Symp. Rock Mech. AIME, New York*, pp. 303-320.

Hernández-Gutiérrez, L. E., y Santamarta, J. C. (eds.) (2015). Ingeniería Geológica en Terrenos Volcánicos. Métodos, técnicas y experiencias en islas volcánicas. ICOG.

Hoek, E. (1968). Brittle failure of rock. En *Rock Mechanics in Engineering Practice*. Stagg & Zienkiewicz (eds.). London: J. Wiley, pp. 99-124.

Hoek, E. (1970). Estimating the stability of excavated slopes in opencast mines. London: *Trans. Inst. Mining and Metallurgy*. Vol. 79, pp. A109-132.

Hoek, E., y Bray, J. W. (1974). *Rock Slope Engineering*. London: Inst. Mining and Metall.

Hoek, E., y Brown, E. T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *Jl. Geotechnical Engineering Div.* ASCE. Vol. 106, N° GT9, pp. 1013-1035.

Hoek, E., y Brown, E. T. (1988). The Hoek-Brown failure criterion. A 1988 update. Rock engineering for underground excavations. *Proc.* 15th *Canadian Rock Mech. Symp.* Curran (ed.), University of Toronto.

Hoek, E., y Pentz, D. L. (1968). Review of the role of rock mechanics research in the design of opencast mines. *Proc. 9th Commonwealth Min. and Met. Congress, London.*

Hoek, E., y Londe, P. (1974). The Design of Rock Slopes and Foundations. *General report for Third Congress of the International Society for Rock Mechanics, Denver.*

Hoek, E., Carranza-Torres, C., y Corkum, B. (2002). Hoek-Brown criterion - 2002 edition. *Proc. NARMS-TAC Conference*, *Toronto*, pp. 267–273.

Hubbard, S. J. (1964). Computer application in open pit slope stability research. *Colorado School of Mines Ql.* Vol. 59, № 4, pp. 746-756.

Jaeger, C. (1972). *Rock Mechanics and Engineering*. Cambridge University Press.

Jaeger, J. C. (1969). The behaviour of closely jointed rock. *Proc.* 11^{th} *Symp. on Rock Mechanics, Berkeley.*

Jaeger, J. C., y Cook, N. G. (1968). Fundamentals of Rock Mechanics. Methuen.

Jennings, J. E., y Steffan, O. K. H. (1967). The analysis of the stability of slopes of deep open cast mines. *The Civil Engineer of South Africa*. Vol. 9, N° 3, pp. 41-54.

Jiménez Rodríguez, R. (2014). Ingeniería de Rocas. Caracterización de macizos rocosos y aplicación de la Teoría de Rocas. Un enfoque probabilístico. Madrid: Ibergarceta.

Jiménez Salas, J. A., y Uriel, S. (1964). Some recent rock mechanism testing in Spain. *Trans. Int. Congress of Large Dams*, *Edinburgh*. Vol.1, pp. 995-1021.

John, K. W. (1968). Graphical stability analysis of slopes in jointed rock. *Jl. of Soil Mech. Foundation Div.* ASCE. Vol. 94, N° SM2, pp. 497-526.

John, K. W. (1970). Three Dimensional stability analyses of slopes in jointed Rock. *Proc. Symp. Theoretical Background to the Plannings of Open Pit Mines, Johannesburg*, pp. 209-214

Jordá, L., Tomás, R., Arlandi, M., y Abellán, A. (2016). Manual de estaciones geomecánicas. Descripción de macizos rocosos en afloramientos. López Jimeno (ed.).

Lloret, A., Gili, J., Gens, A., y Alonso, E. (1984). Avances recientes en el análisis de estabilidad de taludes. *Jornadas Inestabilidad de laderas en el Pirineo. PG II, Barcelona*, pp. 1-64. E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos. UPC.

Londe, P., Vigier, G., y Vormeringer, R. (1969). Stability of rock slopes, a three dimensional study. *Jl. of Soil Mech. Foundation Div.* ASCE. Vol. 95, N° SM1, pp. 235-262.

Long, A. E., Merrill, R. H., y Wisecarver, D. W. (1966). Stability of high road bank slopes in rock. Some design concepts and tools. *Highway Research Record*. No 1.135, pp. 10-26.

López Jimeno, C. (coord.) VV AA (1999). *Manual de estabili- zación y revegetación de taludes*. Entorno Gráfico.

Luis Fonseca, R. (2010). Aplicación de membranas flexibles para la prevención de riesgos naturales. Madrid: Geobrugg Ibérica.

Muzás, F. (1964). Deformaciones viscoelásticas en las rocas. Publicación Nº 24 del CEH. Madrid: MOPU.

Muzás, F., et al. (1966). Some indications for the interpretation of deformability test in rock masses. *1st .Int. Congress of ISRM, Lisbon.*

Obert, L., y Duvall, W. I. (1967). Rock mechanics and design of structures in rock. J. Wiley & Sons Inc.

Patton, F. D. (1966). Multiple modes of shear failure in rock. *Proc. 1*st *Congress of ISRM, Lisbon*. Vol. 1, p. 509.

Patton, F. D., y Deere, D. U. (1970). Geological factors controlling slope stability in open pit mines. *Proc. 1st Conf. Stability Open Pit Mining, Vancouver*.

Pfeiffer, T. J., y Bowen, T. D. (1989). Computer simulation of rockfalls. *Environmental & Engineering Geoscience*. Assoc. of Eng. Geologists. Vol. 26, $N^{\rm o}$ 1.

Philbrick, S. S. (1963). Design of rock slopes. *Highway Research Record*. No 17, pp. 1-12.

Piteau, D. R. (1971). Geological factors significant to the stability of slopes cut in rock. *Proc. Symposium on Planning Open Pit Mines, Johannesburg*. Amsterdam: Balkema, pp. 33-53.

Ramírez Oyanguren, P. (1984). Mecánica de rocas aplicada a la minería subterránea. Madrid: IGME.

Ramírez Oyanguren, P., y Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes*. Madrid: E.T.S.I. de Minas (UPM).

Ramírez Oyanguren, P., y Rodríguez Avial, J. (1973). Estabilización de un gran desmonte por bulonaje. *Boletín del Servicio Geológico de Obras Públicas*. Noviembre.

Ritchie, A. M. (1963). Evaluation of rockfall and its control. *Highway Research Record*. No 17, pp. 13-28.

Rocha, M. (1971). Mecânica das Rochas. Lisboa: LNEC.

Romana, M. (1993). A geomechanics classification for slopes: Slope Mass Rating. En *Comprehesive Rock Engineering* (ed. J. Hudson). Vol. 3, pp. 575-600. Oxford: Pergamon.

Romana, M. (2013). Taludes de gran altura. Enfoque actual. *VIII Simp. Nac. Taludes y Laderas Inestables*. Alonso, Corominas y Hurlimann (eds.), pp. 123-150.

Ross-Brown, D. M., y Walton, G. (1975). A portable shear box for testing rock joints. *Rock Mechanics*. Vol. 7, N° 3, pp. 129-153.

Serrano, A. A. (1997 y 1999). *Mecánica de rocas*. Vols. 1 y 2. Madrid: E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM).

Serrano, A. A., y Castillo, E. (1974). A new concept about the stability of rock masses. 3rd *Int. Conf. on Rock Mechanics*, 10 A820-821, Denver.

Stagg, K. G., y Zienkiewicz, O. C. (1968). *Rock Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons.

Talobre, J. A. (1957). *La Mechanique des Roches*. Paris: Dunod. Uriel, S., y Bravo, B. (1970). Brittle and plastic failure of rocks. *Proc. 2nd. Inter. Congress of the ISRM, Belgrado*.

Uriel, S., y Molina, R. (1974). Cinematics aspects of Vaiont slide. 3rd. Inter. Congress of the ISRM, Denver.

Whitman, R. V., y Bailey, W. A. (1967). Use of computers for slope stability analysis. *Jl. Soil Mechanics and Foundations Division*. ASCE. Vol. 93, pp. 475-498.

Zienkiewicz, O. C., y Cheung, Y. K. (1966). Application of the finite element method to problems of rock mechanics. *Proc. 1*st. *Inter. Congress of the ISRM, Lisbon*. Vol. 2, pp. 661-666.

7. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA PARA LA BASE DE DATOS

Simposios Nacionales sobre Taludes y Laderas Inestables. Simposios Nacionales de la Sociedad Española de Mecánica de Rocas. Simposio sobre Estructuras de Contención del Terreno. 1996. Simposio sobre las Infraestructuras del Transporte. 2000. Simposios sobre Geotecnia Vial.

Jornadas sobre Obras de Interés Geotécnico.

Jornadas técnicas de Ingeniería Geológica.

Jornadas técnicas sobre Taludes y Laderas Inestables.

Coloquios sobre Ingeniería Geológica.

Curso sobre Geotecnia de Obras Lineales.

CAMINOS DE INNOVACIÓN EN INGENIERÍA CIVIL

Fernando Pardo de Santayana Carrillo (Dr. Ing. de Caminos), Cristina de Santiago Buey (Dra. Ciencias Geológicas), Maria de Groot Viana (Ing. de Caminos) Laboratorio de Geotecnia (LG/CEDEX)

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE PILOTES GEOTÉRMICOS: EL PROYECTO PITERM

En el ámbito del Subprograma INNPACTO del Plan Nacional de I+D, convocatoria 2011, del programa nacional de cooperación público-privada del Ministerio de Ciencia e Innovación, el consorcio formado por CEDEX, la Universidad Politécnica de Valencia y las empresas Rodio-Kronsa y Energesis, ha llevado a cabo un proyecto de investigación y desarrollo experimental (Proyecto PITERM) para el diseño, instalación, instrumentación y análisis del comportamiento de un pilote geotérmico experimental. El objetivo fundamental de este proyecto ha sido estudiar el efecto combinado de las acciones mecánicas, geotécnicas y térmicas en el comportamiento de un pilote prefabricado hincado, activado térmicamente y debidamente instrumentado.

La geotermia, energía almacenada en forma de calor bajo la superficie del terreno, se configura como una fuente de energía renovable, limpia y respetuosa con el medio ambiente y que ya representa una alternativa de uso extendido en otros países de Europa. El aprovechamiento de la geotermia superficial (somera o de baja entalpía) se fundamenta en el hecho de que la temperatura del terreno se mantiene constante a lo largo del año a partir de unos 10 metros de profundidad, sin verse afectada por los ciclos invierno-verano o día-noche; así, es más eficaz, desde el punto de vista energético, refrigerar o calentar el interior de los edificios intercambiando calor, mediante el uso de bombas de calor geotérmicas, con el terreno (que puede estar, por ejemplo, a 15° de temperatura) que con el aire atmosférico, que se encuentra siempre a una temperatura pésima (muy caliente en verano o muy fría en invierno). De especial interés para la Ingeniería son las instalaciones de aprovechamiento térmico asociadas a elementos estructurales como muros-pantalla, losas o, como el caso del proyecto PITERM, pilotes termo-activos. Aprovechando la elevada capacidad de transferencia térmica del hormigón, este tipo de instalaciones están todavía relativamente poco extendidas, ya que faltan códigos de uso y diseño que permitan su generalización en el mundo de la construcción. En este sentido, la condición más crucial que debe garantizarse es el cumplimiento simultáneo de dos condiciones: la función estructural y un rendimiento tecno-eficiente como elemento de intercambio de calor con el terreno. En el caso de los pilotes, debe verificarse que ni el comportamiento estructural del pilote ni su capacidad portante (resistencia por fuste y por punta; resistencia del terreno) se ven significativamente afectados por los ciclos de calentamiento o enfriamiento a los que se ve sometido.

El pilote experimental termo-activo del proyecto PITERM, de hormigón armado, fue hincado en el campus



Figura 1. Detalle de la cabeza del pilote experimental.

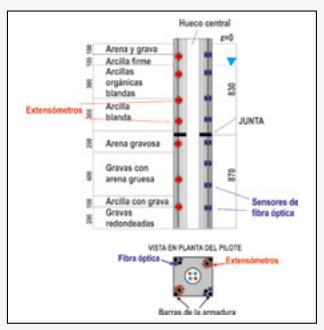


Figura 2. Esquema de instrumentación del pilote.

de la Universidad Politécnica de Valencia, en terrenos cuaternarios de origen deltaico con relieves esencialmente planos. Fue construido en la factoría de pilotes de GRK de San Sebastián de los Reyes (Madrid). Se trata de un pilote prefabricado hueco de sección cuadrada HCK-350, con las siguientes características: 350 mm de lado; longitud total de 17,4 m, con 2 tramos de 8,70 m de longitud unidos mediante junta, con azuche (ciego), junta y junta-zuncho (pasante); hueco interior conformado mediante vaina de acero de diámetro 120 mm y 2 mm de espesor, destinado a la introducción de los tubos geotérmicos.

A partir de la determinación de la capacidad portante del pilote frente a carga verticales mediante los



Figura 3. Detalle de las conexiones de instrumentación en el interior del pilote.



Figura 4. Hinca del primer tramo del pilote.

procedimientos incluidos en DB SE-C del Código Técnico de la Edificación del Ministerio de Vivienda, fue considerada adecuada una carga vertical de servicio de 100 t, que fue la aplicada sobre el pilote experimental durante la realización de los ciclos térmicos.

La instrumentación interna del pilote consistió, básicamente, en un total de: 16 sensores de fibra óptica, fijados a barras diametralmente opuestas de la armadura cada 2 metros embebidos en el hormigón, equipados con termistor; y 14 extensómetros de cuerda vibrante, repartidos en los dos tramos de 8,7 metros de longitud del pilote, con un tamaño de 25,4 cm, provistos de una segunda red de fibra de Bragg que permite la compensación por temperatura y distingue medidas de deformación y temperatura.

La hinca se ejecutó el día 27 de junio de 2012, llevándose a cabo pruebas dinámica de carga para determinar la resistencia a compresión última del pilote, resultando en una resistencia por punta de 1800 kN y de 711 kN por fuste.

Se utilizaron en los ensayos dos sistemas de aplicación de cargas, mecánicas y térmicas. Para la aplicación de las cargas



Figura 5. Hinca del segundo tramo del pilote.

mecánicas se empleó un gato hidráulico y bastidor metálico anclado al terreno con tres anclajes de 25 m de longitud inclinados 5°. Entre el bastidor y el gato se instaló una célula de carga calibrada con el fin de medir la carga real en cabeza de pilote en todo momento. Las cargas térmicas fueron proporcionadas por una instalación de climatización compuesta por una bomba de calor reversible capaz de producir agua caliente y fría. Este fluido, a través de una bomba de circulación y un sistema hidráulico, circulaba por el interior del pilote termo-activo intercambiando calor con el terreno circundante, del mismo modo que se realiza en una instalación de climatización geotérmica de circuito cerrado en sondeos.

Una vez hincado el pilote, los tubos de intercambio de calor fueron introducidos en el orificio central del pilote, el cual fue seguidamente rellenado con un mortero de alta conductividad térmica. Finalmente, se instalaron sensores externos (transductores diferenciales LVDT y flexímetros de medición manual) en cabeza de pilote para la medición de movimientos durante las pruebas.

Se realizaron dos pruebas de carga estática sobre el pilote, aplicando ciclos de carga en cabeza hasta un



Figura 6. Detalle del sistema de aplicación de la carga mecánica en cabeza de pilote y salida de tubos geotérmicos.

máximo de 100 t, para determinar el comportamiento mecánico del pilote antes de las pruebas térmicas, y en concreto la carga transmitida al terreno por fuste y por punta y los movimientos del mismo en cabeza y punta bajo la carga mecánica de servicio. Posteriormente se realizaron dos ensayos de aplicación de cargas térmicas, bajo carga mecánica de 100 t en cabeza simulando la transmitida por el hipotético edificio. En el primer ensayo térmico se aplicó una carga térmica considerable, equivalente a la que se realiza en los ensayos de caracterización térmica de los sondeos geotérmicos. En el segundo ensayo se realizó una simulación del pilote para un edificio de oficinas trabajando en modo refrigeración (esto es, calentando el pilote para transmitir calor al terreno) durante un período de 14 días, con ciclos diarios de refrigeración durante el día y parada durante la noche.

Con los ensayos se pretendió analizar en qué medida la aplicación de cargas térmicas al pilote induce cambios en el funcionamiento del mismo como elemento de cimentación, ya que la tendencia a dilatar o a enfriar del elemento estructural se ve constreñida por el terreno, tanto por fuste como por punta. Esto hace que se altere la carga que el pilote transmite al terreno, y además se produce un incremento de la carga axil en el pilote con

el calentamiento del mismo. Se producen, por lo tanto, variaciones en los coeficientes de seguridad del pilote, tanto en relación con su funcionamiento estructural, como en lo referente a la resistencia del terreno. La introducción de la carga térmica produce movimientos adicionales en la cabeza y en la punta del pilote, los cuales fueron también medidos durante los ensayos.

En los ensayos realizados se verificó que, efectivamente, la aplicación de cargas térmicas alteró el modo por el cual el pilote soportaba las cargas mecánicas. Cuando el pilote es calentado o enfriado, aparecen cambios en el valor y en el signo de las tensiones tangenciales entre el fuste del pilote y el terreno circundante, al oponerse éste a la dilatación o contracción libre del pilote. En consecuencia, la distribución de las cargas axiles a lo largo del pilote cambia. La manera por la cual tienen lugar estos cambios depende fuertemente, por un lado, del perfil del terreno, y por otro, de la forma de trabajo del pilote y distribución entre carga por fuste y carga por punta. En el estudio realizado, cuando el pilote fue calentado, se verificó un aumento significativo del esfuerzo axil, así como de la carga por punta, lo que causó una reducción de los coeficientes de seguridad de resistencia estructural y por punta. Estas variaciones fueron notables en el primero de los ensayos, con una fuerte aplicación de calor, pero mucho más moderadas en el segundo ensayo, en el cual las cargas térmicas simulaban la explotación real para un edificio de oficinas.

Los resultados de este estudio han permitido entender y caracterizar el comportamiento mecánico de los pilotes y su respuesta ante diferentes solicitaciones térmicas en condiciones similares a las que tendrían en un edificio real. En este sentido, pretende ser una contribución al conocimiento del comportamiento termomecánico de los pilotes, de cara a formular guías o normativas de diseño, y así poder extender y popularizar el uso de estos elementos en aras a aumentar nuestra capacidad de captar energía renovable del subsuelo de nuestras ciudades.

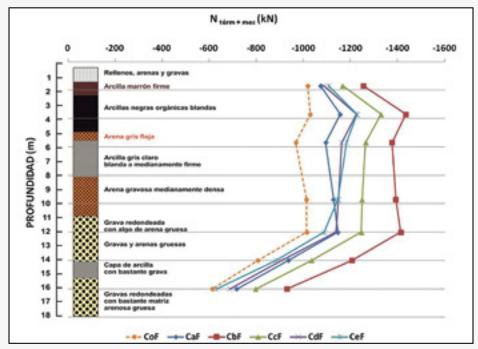


Figura 7. Esfuerzo axil a lo largo del pilote bajo cajo cargas mecánicas (CoF), y bajo cargas mecánicas y diferentes escalones de cargas térmicas (CaF - CeF).

III Foro Global de Ingeniería y Obra Pública

Por tercer año consecutivo, Santander (España) acogió el Foro Global de Ingeniería y Obra Pública, durante los días 27 y 28 de junio. Esta cita está organizada, como todos los años, por la Fundación Caminos en colaboración con la UIMP (Universidad Internacional Menéndez Pelayo).

Para esta tercera edición del Foro se contó con figuras destacadas del sector de la ingeniería y la construcción, así como de otros sectores relacionados con este ámbito de actividad y que se encuentran cada vez más presentes en la modernización de nuestro entorno.

Con la celebración de este Foro se quiso conseguir que esta iniciativa, ya consolidada, alcance los objetivos más ambiciosos y, en consecuencia, mantenga un debate abierto y profundo sobre el alcance y proyección de aquellos sectores estratégicos en los que intervienen de manera decisiva los ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Solo así será posible impulsar el modelo económico y social más avanzado, especialmente ante los retos que tiene planteados nuestro país y el entorno europeo.

Se trata de poner de manifiesto la importancia decisiva que para la consecución de ciudades habitables e infraestructuras inteligentes tiene la actividad que, en tantos ámbitos decisivos, desarrollan los ingenieros de Caminos. Un punto de partida a partir del cual analizar el trabajo que realizan estos profesionales y las empresas españolas de ingeniería y obra pública en un asunto de tanto calado social como es el medioambiental.

Éste es el objetivo último perseguido en la Fundación Caminos al organizar este Foro de Santander, por el que ya han pasado, en los dos últimos años, las primeras autoridades de los ministerios implicados, los líderes empresariales y los expertos de las distintas áreas en las que participan con éxito creciente los ingenieros de Caminos.

En esta ocasión, el Foro se estructuró en seis grandes bloques de debate: la importancia de la Obra Pública, como clave para la modernización; la globalización y sus paradigmas frente a la ola de proteccionismos; las nuevas tecnologías y la agenda digital; agua, medio ambiente y lucha contra el cambio climático; estrategia multilateral en inversión en ingeniería; y apuesta por las ciudades inteligentes.

El Foro incluyó, igual que en las anteriores ediciones, la organización de una exposición dedicada a las obras internacionales, destinada a las principales realizaciones de las empresas españolas que operan en los cinco continentes y que, por su potencial tecnológico, representan la ocasión idónea para transmitir los mensajes de liderazgo e innovación que promulga la Fundación.

Estamos viendo cómo los ingenieros de Caminos, Canales y Puertos trabajan con éxito sobresaliente en áreas estratégicas fundamentales para el desarrollo de la economía en un modelo de impulso de la competitividad; pero, al mismo tiempo, ya hace tiempo y cada vez aún en mayor medida, están llamados a jugar un papel protagonista de gran alcance y significado en el desarrollo de sectores innovadores, en los que prima el uso de nuevas tecnologías, lo que, en conjunto, representa una gran proyección de futuro para nuestra profesión en un nuevo escenario abierto ante los retos que están planteados.



Cartel del III Foro Global de Ingeniería y Obra Pública celebrado en la UIMP de Santander los pasados días 27 y 28 de junio. Al fondo, el Palacio de la Magdalena.



De izda. a dcha., José Javier Díez Roncero, Juan A. Santamera, Ángel Luis Sánchez, María Luisa Poncela, Manuel Manrique, Gonzalo Rojo, Charles Delaneau, César Nombela, Julio Gómez-Pomar y José Polimón.

El II Premio Internacional de Obra Pública Agustín de Betancourt ha sido concedido al tercer juego de esclusas del Canal de Panamá, de la empresa Sacyr

El Crossrail Contract 305 y la Carretera 80 (Cuenca de la Quebrada de la Iguaná, Colombia) han recibido, además, sendas menciones en esta edición

La FUNDACIÓN CAMINOS y el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos entregaron el II Premio Internacional de Obra Pública Agustín de Betancourt, en reconocimiento al trabajo que realizan los ingenieros de Caminos y las empresas de ingeniería y las constructoras españolas en el mercado internacional, lo que constituye un emblema para la Marca España y un modelo de competencia y modernidad en todo el mundo.

Tras analizar las 8 candidaturas y valorar muy positivamente la importancia de las obras presentadas y después de detalladas deliberaciones y votaciones, el Jurado acordó por unanimidad conceder el Premio Internacional de Obra Pública Agustín de Betancourt en su segunda edición, a la obra: Diseño y construcción del tercer juego de esclusas del Canal de Panamá, misión emblemática y un reto sin precedentes en la historia moderna de las obras públicas, que permite ampliar la capacidad de navegación del Canal hasta 600 millones de toneladas anuales y el paso de buques de mayor dimensión, los Post-Panamax, contribuyendo al desarrollo económico y social de la zona y al tráfico marítimo mundial. Destaca un complejo juego de esclusas de tres niveles con tres tinas de reutilización de agua por nivel, una en el lado Pacífico y otra en el Atlántico, realizado a lo largo de los casi siete años de construcción. Liderada por Sacyr, en la que también han intervenido Salini Impregilo de Italia, Jan de Nul de Bélgica y Cusa de Panamá.

Manuel Manrique, presidente de Sacyr pronunció un discurso de agradecimiento, tras recoger el galardón, en el que puso de manifiesto que "el proyecto que recibe este premio es resultado del esfuerzo colectivo de un país, Panamá, de unas empresas comprometidas con su trabajo y su cliente y de miles de personas de más de 40 nacionalidades que han plasmado en este país lo mejor de su conocimiento y de su trabajo".

También señaló que "nuestra reputación son las obras y las obras bien hechas como esta" y concluyó diciendo que "el ejemplo que han dado nuestros ingenieros sirva para inspirar a las nuevas generaciones y pido a las administraciones que se impliquen a fondo en la defensa de las empresas españolas en el exterior, porque estarán defendiendo el mejor patrimonio que tenemos: los profesionales españoles".

Asimismo, se ha hizo entrega de la Mención de Honor, recogida por Charles Delaneau y Gonzalo Rojo, al Crossrail Contract C305. Eastern Running Tunnels, en Londres (Reino Unido), que atraviesa la capital británica desde Reading (al oeste) hasta Abbey Wood y Shenfield (al este) con un total de 118 km de línea y 42 kilómetros de túneles de vía simple (21 kilómetros por sentido de circulación). Es un proyecto complejo que se ha desarrollado en un medioambiente mayoritariamente urbano siendo un ejemplo de cómo enfocar la construcción de nuevas obras públicas en zonas urbanas a las que dotar de nuevos sistemas de comunicación sin generar molestias y costes al entorno, utilizando una tecnología de tuneladoras en la que las empresas españolas son líderes a nivel mundial. Realizado por DRAGADOS, S.A. (90%), John Sisk & Son Limited (10%).

La CARRERA 80, en la Cuenca de la Quebrada de La Iguaná (Colombia) también recibió una mención en esta edición del premio. La construcción de la doble calzada de 4,1km, supone una salida de la ciudad de Medellín hacia el occidente Antioqueño. Se trata de un proyecto de obra pública que sirve como instrumento de transformación de todo el sector de la ciudad ubicado en la cuenca de la Quebrada de la Iguaná (que discurre paralela a todo el corredor de la obra) pues es una zona marginal, caracterizada por la exclusión y la inequidad social, en un país inmerso en un complejo proyecto de paz. La obra ha sido ejecutada por FERROVIAL AGROMAN (60%), en UTE con Constructora Colpatria. Este galardón ha sido recogido por Ángel Luis Sanchez Gil, director de construcción de Ferrovial Agromán.

La entrega del Premio, cuyo Comité de Honor está presidido por S. M. Felipe VI, se celebró el 27 de junio, enmarcada en el desarrollo del III Foro Global de Ingeniería y Obra Pública, que tuvo lugar en Santander. Estuvieron presentes el secretario de Estado de Infraestructuras, Transportes y Vivienda, Julio Gómez-Pomar, la secretaria de Estado de Comercio, María Luisa Poncela, el presidente del Colegio, Juan A. Santamera, y el vicepresidente del Colegio, José Polimón.

Juan A. Santamera, presidente del Colegio, destacó la importancia de este galardón "precisamente por la dimensión internacional que ha tomado nuestra profesión y por la importancia que tiene en todo el mundo el papel de nuestras empresas". Quiso subrayar el importante papel de los ingenieros de Caminos en la modernización y vertebración de España. Y concluyó su intervención reconociendo el trabajo que realizan "todos los compañeros que trabajan fuera de España".

El CEDEX Galardonado por la Asociación de Empresas de Tecnología del Suelo y del Subsuelo

El pasado día 14 de junio, en el acto celebrado en el Casino de Madrid con ocasión del 40 aniversario de la fundación de la Asociación de Empresas de la Tecnología del Suelo y del Subsuelo (AETESS), el CEDEX ha sido galardonado por su colaboración con la mencionada Asociación. Esta cooperación se ha centrado fundamentalmente al ámbito de la formación, de la transferencia tecnológica, y en la redacción de quías y recomendaciones especializadas.

AETESS integra a importantes empresas en el diseño y construcción de cimentaciones especiales, mejora de suelos y tratamiento de terrenos. Se fundó en 1977 con el objetivo de articular un mercado emergente de empresas dedicadas a trabajos del suelo. Desde entonces ha mantenido como objetivo principal su preocupación por la calidad, seguridad y profesionalidad en las actuaciones en las que intervienen sus empresas asociadas; en la actualidad: GEOCISA, KELLER, MENARD, RODIO-KRONSA, SITE y TERRATES.

Lectura de tesis doctorales de funcionarias adscritas al Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (LCEM/ CEDEX)

La presentación de las tesis doctorales de las funcionarias del CEDEX, adscritas al Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, Rosario Solera Martínez y Beatriz Mateo Sanz se celebró el pasado día 6 de julio en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM).

Rosario Solera Martínez. Título de tesis: "Efectos de la cubierta en la durabilidad de las geomembranas poliméricas empleadas en la impermeabilización de embalses".

Beatriz Mateo Sanz. Título de tesis: "Comportamiento de las geomembranas sintéticas poliméricas utilizadas en la impermeabilización del embalse de Buen Paso".

Jubilación del Director del CEDEX

Queridos amigos y compañeros:

El próximo día 7 de octubre se producirá mi jubilación, superados sobradamente ya los 65 años y después de ocho años en los que he tenido el honor de dirigir este Organismo.

Cuando me destinaron al CEDEX no podía suponer los fuertes lazos de afectividad que iba a adquirir con esta Casa. Quizás, mirando ya por el retrovisor, tres sean las causas por las que me he impregnado de este sentimiento.

La primera, seguramente, es el tipo de servicio que prestamos a la Sociedad, como responsables tecnológicos de una buena parte de las decisiones técnicas que se toman en los dos Ministerios: el de Fomento al que estamos adscrito y el de Medio Ambiente del que dependemos, también, funcionalmente. Son servicios que están vinculados, directamente o indirectamente, con mi profesión y, sobre todo, con mi vocación, de la que nace aquella.

La segunda razón es la sensación profunda - he estado en una posición privilegiada que me ha permitido comprobarlo directamente- de que la Sociedad demanda de forma apremiante los servicios que presta el CEDEX, reconociendo que cualquier decisión de nuestros jefes tienen que integrar distintos elementos, jurídicos, económicos, de oportunidad, pero que siempre requieren el elemento técnico como condición necesaria para garantizar la bondad de las mismas y ahí, en muchos de ellas, ha estado el CEDEX, minimizando incertidumbres y dando soluciones innovadoras.

La última, se refiere naturalmente a la calidad humana y profesional del personal funcionario y laboral del CEDEX, de muchos de los cuales he aprendido mucho y me he vanagloriado y me vanaglorio de su condición de amigo. Se atribuye una frase a Miguel Ángel Buonarroti, genial pintor y escultor, que se caracterizaba por su mal carácter en opinión de muchos, que decía que todos los días en su ambiente florentino y romano del Renacimiento se topaba con un envidioso, con un mediocre, con un egoísta y con un soberbio. Yo, personalmente, salvando la distancia abismal con el divino Buonarroti, he tenido la suerte de encontrarme todos los días en mi trabajo a muchos generosos, grandes profesionales, humildes, desprendidos y con valores, para los que la vocación de servicio público constituye un elemento esencial de su identidad.

Por último, quisiera compartir con vosotros otras dos reflexiones. La primera se refiere al futuro del CEDEX. Yo estoy absolutamente convencido de que, mientras que hayan obras públicas que construir, mantener o explotar y mientras que el medio ambiente sea un valor a preservar, se requerirán personas como los que conforman hoy la plantilla del CEDEX, que, junto con el personal de apoyo exigible, suministren los conocimientos necesarios, basados o no en el ensayo y la experimentación, para encontrar las soluciones técnicas innovadores necesarias.

La otra reflexión se refiere a los errores que haya podido cometer en estos años. Quiero que sepáis que ninguno fue producto de animadversión hacia nadie y quiero aprovechar la oportunidad de esta carta en "CEDEX Informa" para pedir perdón a las personas que se pudieron haber visto negativamente afectadas por las decisiones que tuve que adoptar.

Aunque desde otra posición, sigo estando a vuestra disposición, si no ya como compañero a secas, sí como amigo y compañero jubilado.

Un abrazo

Mariano Navas Gutiérrez

INSTALACIONES SINGULARES DEL CEDEX

Ensayos dinámicos de carácter geotécnico

Alfonso XII n°3 y 5 28014 Madrid





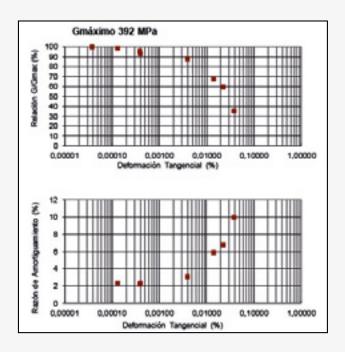
INSTALACIONES

El Laboratorio de Geotecnia del CEDEX cuenta con los siguientes equipos para la determinación de las características dinámicas de suelos:

- Ensayo de columna resonante.
- Ensayo torsional cíclico.
- Ensayo de "bender-elements".
- Ensayo de corte simple cíclico.
- Ensayo triaxial cíclico.

Estos equipos permiten determinar las siguientes características dinámicas de los suelos:

- Velocidad de propagación de las ondas.
- Variación del módulo de corte con la deformación
- Amortiguamiento histerético.
- · Variación de rigidez con ciclos de carga repetidos
- Resistencia a la licuefacción.



APLICACIONES

INGENIERÍA MARÍTIMA Y PORTUARIA

Análisis del efecto de la carga de oleaje en el suelo.

INGENIERÍA SÍSMICA

Análisis sobre el efecto de la carga sísmica en el suelo.

· INGENIERÍA FERROVIARIA

Análisis del efecto de la carga dinámica de los trenes en las capas de vía y en los terraplenes.

INGENIERÍA DEL TRANSPORTE

Análisis del efecto de la carga de tráfico en las capas del firme y en los terraplenes.





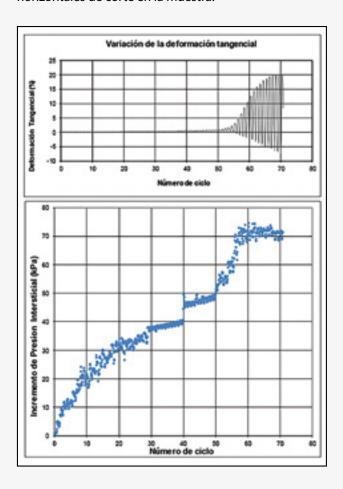
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Corte simple cíclico

El equipo dispone de dos actuadores servohidráulicos que permiten controlar tanto las tensiones como las deformaciones horizontales y verticales impuestas a la probeta.

DATOS DE PROBETA:
Tipo de probeta: nemelideada
Cernidad seca: 1,03 girun3
Plumedad: 0,9 %
Control veri volumen constande
Control veri volumen constande
Control veri volumen constande
Control lension targencial 10 kPa
Noricontal: Incuencia 1 Hig

Las probetas ensayadas son cilíndricas, de 66 mm de diámetro y 25 mm de altura, confinadas lateralmente por membranas reforzadas con una espiral de acero. Esta membrana lateral evita la aparición de deformaciones radiales y permite el desarrollo de deformaciones horizontales de corte en la muestra.





CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Equipo de Triaxial Dinámico

Equipo triaxial para ensayo dinámico en suelos con probetas de 5 y 10 cm de diámetro. Se pueden saturar y consolidar las probetas.

Presión de confinamiento hasta 1MPa Frecuencias de ensayo hasta 10 Hz.

Equipo para ensayos de materiales granulares de diámetros 15,2 y 22.8 cm. Confinamiento 200 kPa.

Prensas hidráulicas servocontroladas de 16 kN y 100 kN. Célula de carga y LVDT interiores para medida de la fuerza y la deformación axial.

Dispone de Bender Elements para medida de velocidad de ondas S y ondas P.



