

Trabajos de estabilización para el mantenimiento del servicio en las grandes vías de comunicación. Desmonte en la autovía A-7, Granada

Stabilization Works for Keeping in Operation Main Transport Lines. Cut Slope in the A-7 Highway, Granada

Javier Moreno Robles^{1*}, José Luis García de la Oliva², Javier González Gallego³

Resumen

Durante décadas el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX ha venido ejercitando labores de control y corrección de patologías en las grandes vías de comunicación del territorio nacional.

En este artículo se muestra un gran deslizamiento en la autovía A-7, en la zona de la costa de Granada, que es un claro ejemplo de cómo la construcción de una gran infraestructura y su mantenimiento pueden ser muy complejos debido a las complicadas condiciones geológicas y orográficas de su trazado.

Para su análisis se realizó una extensa campaña de investigación de la estructura geológica del terreno, estudiándose también la cinemática del deslizamiento. A partir del conocimiento obtenido en esta fase se realizaron cálculos bi y tridimensionales siendo estos últimos los que, en este caso concreto, se considera que reproducen el problema de una manera más acertada y son los más oportunos, al menos para la comprensión general del problema en las fases iniciales de análisis.

Una vez analizadas las diferentes soluciones se decidió acometer la estabilización en dos fases. En la primera fase se realizó una modificación geométrica del talud cambiando el reparto de masas y creando una zona “fusible” para evitar que la salida de la rotura afecte a la calzada de la autovía.

En una segunda fase, actualmente en ejecución, se acometerán las obras que mejorarán la estabilidad mediante un drenaje adecuado de la ladera y un refuerzo en la zona “fusible” para seguir obligando a que la salida de la rotura no llegue a la calzada.

Palabras clave: deslizamiento, modelización numérica, rebajamiento del nivel freático, trabajos de estabilización, zona fusible.

Abstract

For decades, the CEDEX Geotechnical Laboratory has been carrying out tasks of control and correction of pathologies in the main highways of Spain.

This article shows a large landslide on the A-7 highway, nearby the coast of Granada, which is a clear example of how the construction of a large infrastructure and its maintenance can be very complex due to a complicated geological conditions and orography of its layout.

In order to perform this study, an extensive site investigation campaign was carried out to determine the geological structure of the ground, as well as to analyze the landslide kinematics. By using the site investigation data, two and three-dimensional calculations were performed. It's considered that the three-dimensional calculations reproduce the problem in a more accurate way in this specific case, and are more appropriate for getting a general understanding of the landslide mechanism, at least in these initial phases of the study.

Once the different solutions had been analyzed, it was decided to undertake stabilization in two phases. In the first phase, a geometric modification of the slope was carried out, modifying the distribution of masses and creating a “safety fuse” zone to prevent the bottom end of the failure surface to affect the roadway.

In a second phase, currently in progress, works will be undertaken that will improve stability through an adequate drainage of the slope and a reinforcement of the “fuse” area to continue avoiding the failure surface to reach the roadway.

Keywords: landslide, numerical modelling, dewatering, stabilization works, fuse area.

1. INTRODUCCIÓN

Bajo el concepto de movilidad sostenible se engloba un conjunto de procesos y acciones orientadas a conseguir, como objetivo final, un uso racional de los medios de transporte por parte de la sociedad.

La construcción y explotación adecuada de las grandes vías de comunicación suponen el insumo de importantes medios económicos, sociales y medioambientales que se han retraído de otros usos, por lo que es imperativo

* Autor de contacto: Javier.moreno@cedex.es

¹ Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Laboratorio de Geotecnia (LG), del CEDEX.

² Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Laboratorio de Geotecnia (LG), del CEDEX.

³ Licenciado en Ciencias Geológicas. Laboratorio de Geotecnia (LG), del CEDEX.

mantener sus condiciones de servicio en perfecto estado de manera que los medios empleados puedan ponerse al servicio a la sociedad.

Durante décadas el Laboratorio de Geotecnia del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) ha venido ejercitando labores de control y corrección de patologías en las grandes vías de comunicación del territorio nacional, siendo un claro ejemplo de éstas los trabajos realizados en la autovía A-7.

La ejecución de las obras de dicha autovía A-7 en la zona de la costa de Granada, especialmente en el tramo entre Adra y Motril, ha sido extremadamente compleja debido a la particular configuración tectónica, lito-estructural y orográfica de la zona.

Las grandes pendientes naturales de las cordilleras Béticas en esta zona, que se prolongan hasta el mar, sumadas a la heterogeneidad, estructura y características resistentes de los materiales han originado que se produzca la aparición de numerosas patologías con grandes volúmenes inestables relacionadas con el movimiento de laderas.

En este artículo se describe el proceso de estabilización seguido en el caso de un deslizamiento de ladera de grandes dimensiones (80 m de desnivel, 370 m de longitud y 225 m de distancia desde la calzada hasta las grietas de cabecera) que actualmente se encuentra en estudio.

Debido a la complejidad del problema y al elevado volumen de masa deslizada, los trabajos de corrección se han planteado en dos fases diferenciadas, estando materializándose, a la fecha de redacción del presente artículo, los trabajos de la segunda fase.

Como aspecto significativo, para permitir un mayor conocimiento del origen de la patología y de los materiales involucrados, así como de la efectividad de sus posibles soluciones, se ha realizado una extensa campaña de investigación que incluye sondeos, inclinómetros, piezómetros y puntos de control topográfico superficial.

Adicionalmente, la existencia de una gran balsa de agua, en la zona alta de la ladera, a 60 m de distancia de las grietas de cabecera ha condicionado el estudio y solución de la patología para asegurar que la misma no se vea afectada por la inestabilidad.

La singular cinemática del movimiento y la orografía de la ladera han motivado que, para el cálculo de estabilidad y sus soluciones, se haya optado por hacer una modelización numérica que incluya tanto cálculos 2D, que son más habituales y que permiten una mayor versatilidad, como 3D que son los que, en este caso concreto, se considera que reproducen el problema de una manera más acertada y son los más oportunos, al menos para la comprensión general del problema en las fases iniciales de análisis.

En los siguientes apartados se describe, con suficiente detalle, el marco geológico y el proceso seguido de instrumentación, monitorización, diseño y ejecución de soluciones de estabilización con la única intención de mostrar la metodología de trabajo que se considera más adecuada en la estabilización de grandes deslizamientos.

Por último, y de forma señalada, se introduce y desarrolla el concepto de “zona fusible” que se ha utilizado con éxito para limitar la afección del deslizamiento a la calzada de la autovía.

2. MARCO GEOLÓGICO

La zona en la que está ubicado el desmonte objeto de este artículo se caracteriza por una configuración lito-estructural especialmente compleja que ha dificultado en gran modo el desarrollo de las obras de construcción de la autovía.

La autovía A-7 en la costa de la provincia de Granada, entre las localidades de Adra y Motril, transcurre paralela a la costa y muy próxima a la misma (figura 1). En esta zona, de orografía muy complicada, las pendientes de las laderas naturales son muy acusadas (20° a 35°) por lo que en el



Figura 1. Vista del trazado de la A-7 entre Adra y Motril (Fuente: Google Earth).

trazado se materializan grandes desmontes en los taludes del lado montaña (norte).

Si algo caracteriza especialmente a esta zona, desde el punto de vista geológico, es la superposición en poco espacio de un número elevado de mantos de cabalgamiento, alternándose, en la vertical, capas con diferentes grados de metamorfismo y distintas edades.

Estos cabalgamientos se produjeron durante la orogénesis Alpina, a principios del Cenozoico, cuando el choque en dirección norte-sur de las placas de Alborán e Ibérica provocó el levantamiento de los materiales metamórficos y sedimentarios que hoy conforman las Cordilleras Béticas, dando lugar a la elevación de Sierra Nevada y la cuenca del Guadalquivir.

En la figura 2 se muestra una parte de la cartografía geológica del sur de la provincia de Granada elaborada por el IGME (Serie MAGNA 50.000, hoja 1056 Albuñol). En esta figura puede apreciarse como en esta zona, en concreto, existe un manto de cabalgamiento, en materiales triásicos, de una unidad de mármoles sobre filitas, cuarcitas y

calcoesquitos. Esta estructura se corresponde con el Manto de Murtas y pertenece al dominio Alpujárride.

Estos mármoles, a consecuencia de los movimientos que han sufrido, se encuentran muy fracturados, lo que ha facilitado la aparición de procesos de disolución, encontrándose estructuras kársticas típicas tanto en superficie como en profundidad. De esta forma, los mármoles resultan muy permeables a través de la red de fracturas percolando el agua de lluvia con gran facilidad hasta alcanzar el techo de las filitas sobre las que están apoyados.

La particular disposición de las capas en la zona en la que se desarrollan las obras se explica por la historia geológica de la formación de las cordilleras Béticas. Los cabalgamientos que fueron apilando materiales de sur a norte provocaron que tanto la esquistosidad como los planos de contacto entre diferentes materiales tengan una dirección de buzamiento general hacia el sur. En la figura 3 se puede apreciar un corte, a escala regional, en dirección NNO-SSE del entorno de la zona de estudio.

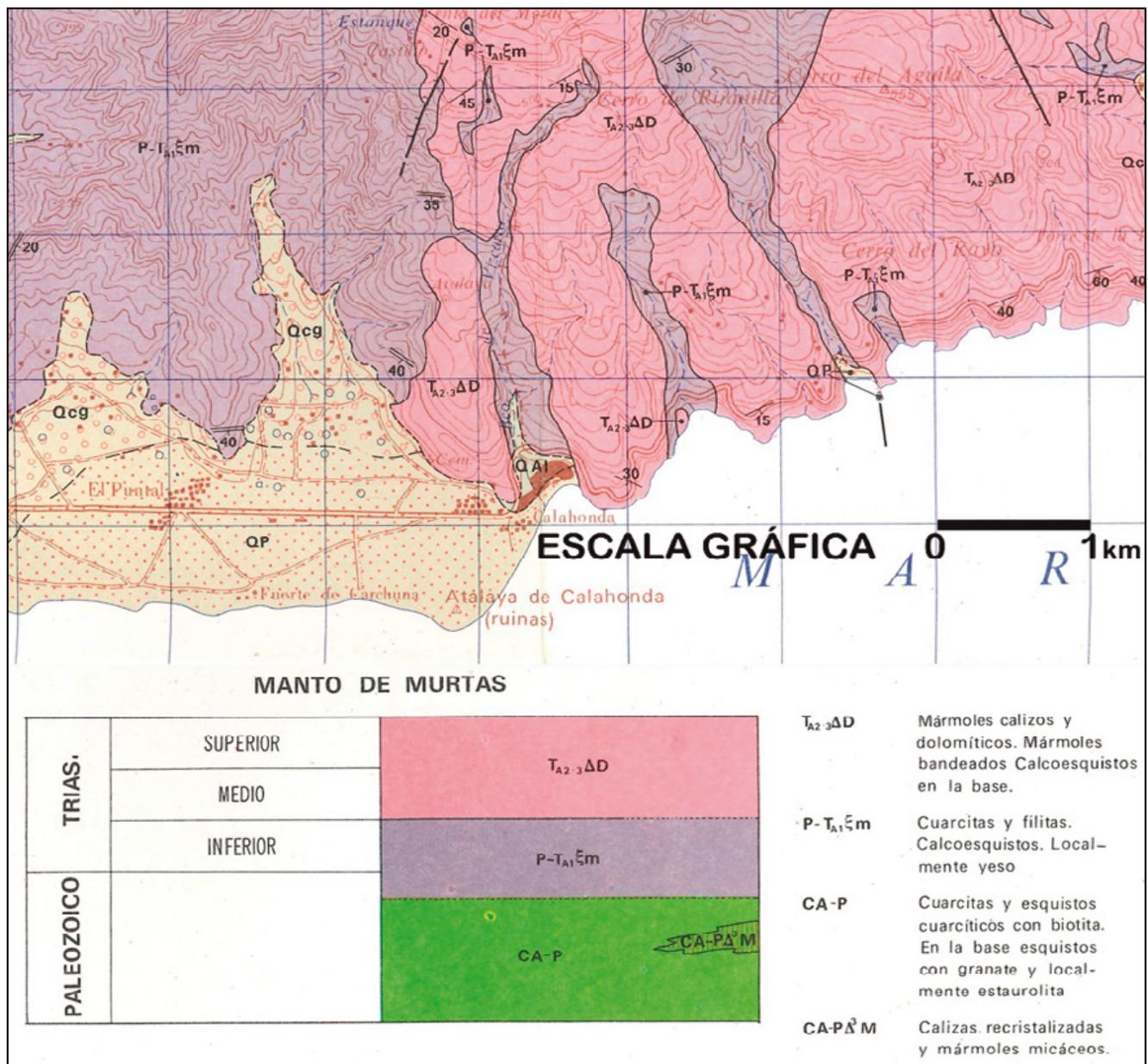


Figura 2. Mapa Geológico del entorno del Desmonte nº 2 (extraído de la hoja MAGNA 1056 - Albuñol). En línea negra se marca la ubicación del perfil II-II' de la figura 4.

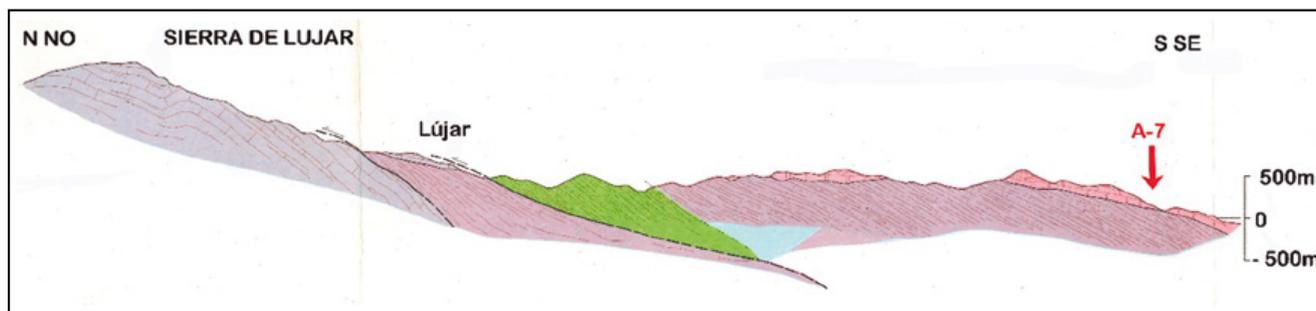


Figura 3. Corte geológico general del Sistema Bético por la zona en la que se han desarrollado las obras.

En la figura 4 se muestra un detalle del corte geológico en la zona en la que se han ejecutado las obras de construcción de la autovía. En ésta se aprecia la orientación general de la esquistosidad y planos de contacto con buzamiento hacia el mar.

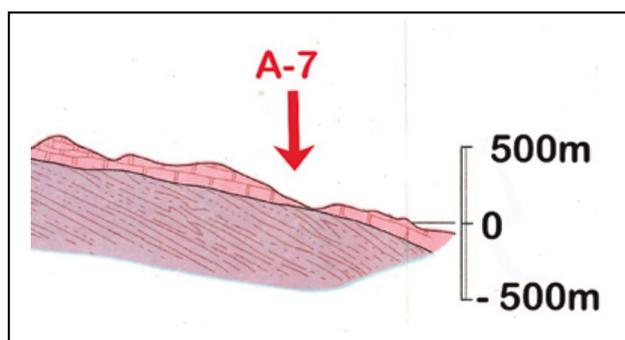


Figura 4. Detalle del corte geológico en la zona de estudio.

En la zona de estudio, más en detalle, se encuentran unas filitas grises con una esquistosidad que, en general, presenta buzamientos suaves hacia el SSO. Sobre estas filitas se sitúan, mediante contacto mecánico, unos mármoles principalmente dolomíticos.

Las filitas pertenecen a una unidad de cuarcitas, filitas cuarcíticas y filitas, y calcoesquistos, con presencia local de yesos, a la que se atribuye una edad permotriásica. En los sondeos realizados, esta unidad aparece con grados de alteración muy altos GM IV-V con aspecto de materiales arcillosos poco competentes.

Los mármoles se engloban en una unidad compuesta por mármoles calizos y dolomíticos y mármoles bandeados que en su base presentan calcoesquistos (no identificados en la zona de estudio).

En las fracturas y zonas de disolución existentes en los mármoles se pueden encontrar materiales arcillosos propios de relleno de dolinas y cavidades. También en la zona superior es común encontrar depósitos coluviales formados por limos y arcillas que engloban cantos de mármoles calizos y dolomíticos.

En esta zona el plano de contacto entre las filitas y los mármoles buza entre 10° y 15° hacia el SSO. Esta orientación, tanto de los planos de esquistosidad como del contacto entre las dos unidades, unida al trazado de la autovía en esta zona (NO-SE) es, desde el punto de vista de la estabilidad de los taludes, claramente desfavorable.

Además, al tratarse de mantos de cabalgamiento muchas capas están desplazadas respecto a las que las rodean

por lo que el ángulo de rozamiento de estas superficies puede ser próximo al residual.

En la figura 5 se muestra una imagen de satélite de la zona de estudio con la geología del MAGNA superpuesta. En rojo se muestra el trazado de la autovía, y en color rosa-

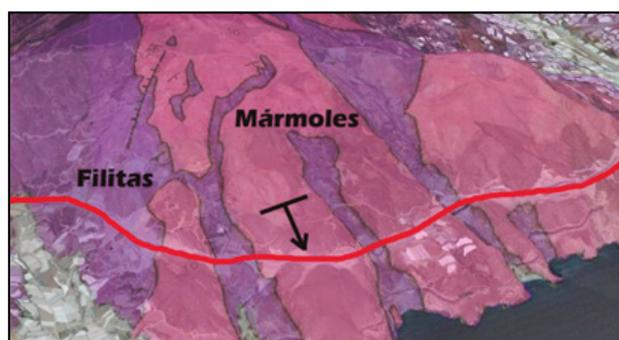


Figura 5. Imagen de satélite para ilustrar la configuración lito-estructural de la zona (Fuente: Google Earth y elaboración propia).

do los mármoles que están encima de las filitas (morado). La flecha de dicha figura indica la dirección de buzamiento general de la zona, que es predominante hacia el mar.

Como también se observa en la figura 5, la traza de la autovía discurre sub-paralela al contacto mecánico entre las dos unidades (mármoles sobre filitas) y perpendicular a la dirección general de la esquistosidad.

En resumen, la estructura se caracteriza en esta zona por un contacto entre los mármoles y las filitas con un buzamiento de unos 15° hacia el SSO y por una esquistosidad que sigue una dirección casi paralela a la del contacto litológico pero con un ángulo de buzamiento algo mayor (de hasta 40°).

3. DESCRIPCIÓN DE LA PATOLOGÍA

El talud descrito en este artículo está excavado a media ladera, presentando una geometría de trinchera muy asimétrica, con una altura (antes de la primera fase de estabilización) de 77 m en la margen del lado montaña y 15 m en el lado mar. Su longitud es de 370 m, teniendo dos zonas claramente diferenciadas.

En la primera de ella, entre los pp.kk. 0+250 y 0+420, el pie del talud está excavado en filitas mientras que los mármoles se sitúan en cabecera. La inclinación media del mismo era de 25° . En la segunda, entre los pp.kk. 0+420 y 0+620, el talud está excavado en toda su altura en mármoles dolomíticos con una pendiente en sus taludes de 60° y una berma intermedia.

Desde el punto de vista litológico en el talud aparecen básicamente dos materiales, las filitas en su parte inferior y sobre ellas, a través de un contacto mecánico, los mármoles dolomíticos. El plano de contacto, deducido con tres de los sondeos realizados, tiene una dirección de buzamiento de 207° y un buzamiento de 11° lo que hace que aparezca de forma oblicua en el talud, dejando las dos partes diferenciadas que se ha mencionado en el párrafo anterior. Los mármoles se encuentran muy fracturados y con procesos de disolución bastante desarrollados pudiendo incluso encontrar espeleotemas en algunas zonas más karstificadas.

En la figura 6 se muestra una vista aérea en la que se aprecian claramente las dos partes del talud. La línea azul representa el contacto entre las filitas y los mármoles.



Figura 6. Vista aérea del talud.

Durante la fase de ejecución del talud se produjo un pequeño deslizamiento que afectó fundamentalmente a la zona de filitas (foto 2), ejecutándose un muro de escollera en la base y unas costillas drenantes para su corrección.



Foto 1. Vista en fase de obra (23/12/2014). Se aprecia una zona inestable en las filitas inferiores.

Finalizadas las costillas drenantes, y mientras se ejecutaba el muro de escollera, se produjo otra inestabilidad en fase de obra (foto 2), de mayor entidad que la anterior, cuando el talud estaba excavado hasta cota de rasante.

Adicionalmente se empezaron a marcar grietas en la zona superior a la cabecera del talud. Estas grietas fueron extendiéndose, marcando claramente una zona inestable que afectaba a gran parte del desmante, indicándose en la

figura 6 con una línea roja la zona delimitada por las grietas exteriores.

Las grietas de la zona de cabecera más alejadas de la calzada se muestran en las fotos 3 y 4, dando una idea del volumen de terreno inestable la distancia de las mismas a la calzada de la autovía (225 m de planta y 80 m de desnivel). Además, era claramente perceptible (foto 3) el hundimiento de la zona de cabecera de la ladera.

La rigidez de los mármoles contribuyó a que estas grietas marcaran rápidamente y con nitidez la geometría del movimiento, encontrándose en las paredes de las grietas signos de disolución y circulación de agua.



Foto 2. Vista de la inestabilidad que se produjo con el talud ya excavado hasta cota de rasante (28/7/2015).



Foto 3. Detalle de las grietas de cabecera más alejadas de la calzada.



Foto 4. Grietas de cabecera en la zona inferior a la balsa de agua.

Por otra parte, en el pie del talud y en la calzada aparecieron deformaciones que parecían indicar una posible salida del movimiento. En las fotos 5 y 6 se muestran las deformaciones existentes en la calzada como consecuencia del movimiento de la ladera, apreciándose ondulaciones y levantamientos del firme así como un claro desplazamiento lateral de la mediana. Todos los datos apuntan a que estas distorsiones muestran que la salida del deslizamiento por su pie está situada en la zona media de la calzada, en los carriles centrales.



Foto 5. Vista de las deformaciones en el firme y mediana.



Foto 6. Detalle del levantamiento del firme en los carriles interiores de la calzada.

4. CORRECCIÓN DE PATOLOGÍAS. PROCEDIMIENTO INCREMENTAL

En las labores de estabilización de un deslizamiento de grandes dimensiones, como es el referido en el presente artículo, es muy frecuente plantear las tareas a realizar en fases sucesivas de investigación, instrumentación, auscultación y trabajos de estabilización, realizándose un posterior seguimiento de la efectividad de dichas actuaciones.

Esta metodología de fases sucesivas permite tanto ir conociendo con mayor detalle la geometría y disposición de materiales involucrados como aquilatar los costes de reparación frente a los que supondría un planteamiento maximalista de la solución.

Bajo esta forma de proceder se planteó una campaña inicial de reconocimiento y auscultación del desmonte referido que dio origen a determinados trabajos de estabilización, comprobando su eficacia con posteriores medidas de auscultación.

A partir de dicho seguimiento se pudo comprobar que los trabajos de estabilización realizados en la primera fase, si bien habían permitido mantener en servicio la autovía, no habían

conseguido estabilizar completamente la ladera, por lo que fue planteada una segunda fase de medidas estabilizadoras.

En los siguientes apartados se detallan cada una de estas fases de actuación.

5. PRIMERA FASE DE ACTUACIÓN

5.1. Reconocimiento y auscultación

En aras de poder conocer la cinemática del movimiento, entender el fenómeno que lo motiva y obtener los datos necesarios para poder plantear las soluciones adecuadas a la patología existente en la ladera, se realizó en primera instancia una investigación exhaustiva que, como se indicará más adelante, se ha complementado en una segunda fase.

Un aspecto fundamental en la determinación de las causas de un deslizamiento de ladera es la necesidad de conocer adecuadamente las litologías involucradas en el fenómeno de inestabilidad, así como la hidrogeología del macizo y la existencia de posibles superficies de rotura. Con dicho objetivo se planteó la ejecución de 13 sondeos con profundidades entre 15 m y 60 m. Tres de estos sondeos (S1, S2 y S3) ya se habían ejecutado, con la aparición de las primeras grietas (mayo de 2015) en la fase inicial de estudio, antes de la intervención del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.



Figura 7. Vista de la ubicación de los sondeos ejecutados.

Los sondeos S2 y SP14 se equiparon con tubería de PVC ranurada para conocer la posición y fluctuaciones del nivel freático. El resto de sondeos quedaron equipados con tubería inclinométrica para poder identificar las posibles deformaciones del terreno y las superficies de rotura. El nivel de agua en el interior de dichas tuberías se ha venido midiendo para emplearlo, con las debidas cautelas, como control de la posición del nivel freático.

En la figura 8 se muestra un perfil litológico simplificado realizado con la información de los sondeos y afloramientos existentes en la ladera. El contacto mecánico entre mármoles y filitas hace que la orientación estructural de estos materiales, aunque es similar, no sea concordante. La zona de techo de las filitas presenta grados de alteración IV y V, y en muchas ocasiones se encuentran saturadas.

Es de resaltar la posición del sondeo S11 que se ejecutó junto a un gran depósito de agua que existe ladera arriba con el objetivo de confirmar que el entorno de la balsa era estable.

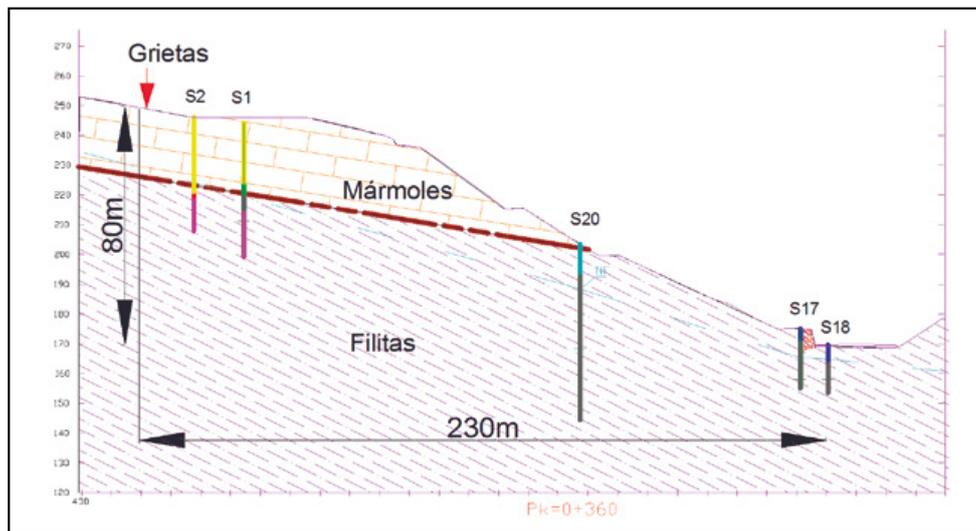


Figura 8. Perfil litológico simplificado deducido del levantamiento de los sondeos y afloramientos.

Los sondeos S15 a S19 se situaron en el arcén del lado del talud y sobre la escollera existente con el objetivo de reconocer las características geotécnicas de los materiales en esa zona de cara a posibles soluciones y para identificar la superficie de rotura en la zona del pie. En concreto, el S15 y el S17 (figura 9) estaban sobre la escollera y marcaban superficies de rotura entre 13 m y 18 m de profundidad con velocidades de hasta 400 mm/año.

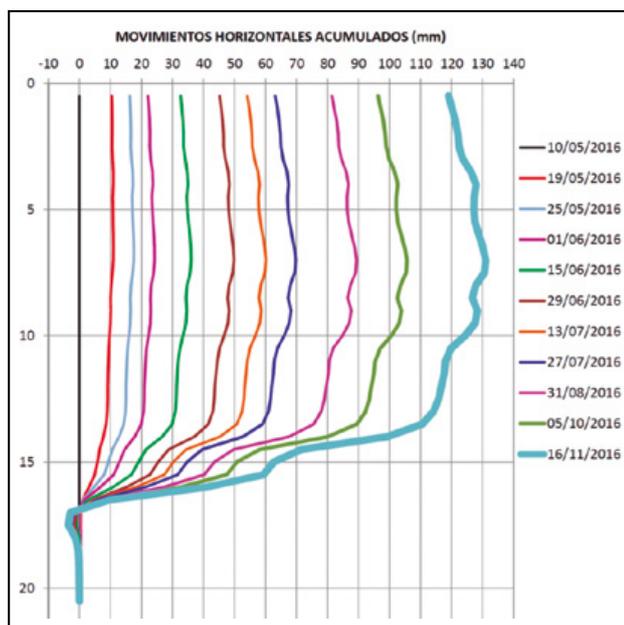


Figura 9. Detalle de lecturas de inclinometría en el S17.

Los sondeos S16 y S18 (figura 10), se realizaron en el arcén del lado interior y marcaron superficies de rotura entre 6 m y 10 m de profundidad con velocidades de hasta 350 mm/año.

Situado en la parte media del desmante, el sondeo S14 se ejecutó con 30 m de profundidad, con una diferencia de altura entre su boca y la calzada también de 30 m. En las primeras medidas de inclinometría se mostraron varias bandas de rotura a diferentes profundidades, sin embargo, el movimiento de la cabeza tomado por medios topográficos era mayor que el medido con el inclinómetro lo que indicaba que la superficie de rotura principal debía de

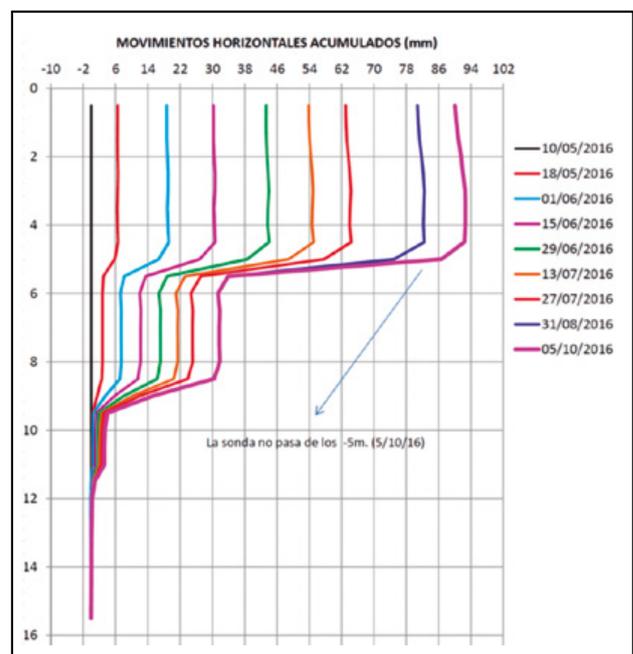


Figura 10. Detalle de lecturas de inclinometría en el S18.

estar situada a más profundidad. Para comprobar si efectivamente existía una superficie de rotura más profunda se ejecutó el S20 (figura 11) con 59 m de profundidad. En este inclinómetro se encontró la superficie de rotura principal a 35m de profundidad con una velocidad media en cabeza de 270 mm/año, lo que confirmó que el sondeo S14 se había quedado corto y que la superficie de rotura se situaba en dicho punto bajo la cota de la calzada.

Además, se estableció una red 120 de puntos de control topográfico tanto por la ladera como en la calzada para poder identificar la cinemática y los límites del movimiento que se apreciaban en el desmante. Esta red de puntos permitió determinar con precisión el área de la ladera que estaba en movimiento, así como su cinemática.

En la figura 12 se muestra con una línea magenta el área que delimitan las grietas exteriores existentes en la ladera. Además, se han dibujado con líneas azules, los vectores de movimiento (magnificados) de cada uno de los puntos de control topográfico. Se aprecia en esta figura como toda la zona excavada con menos pendiente y en la que afloran las

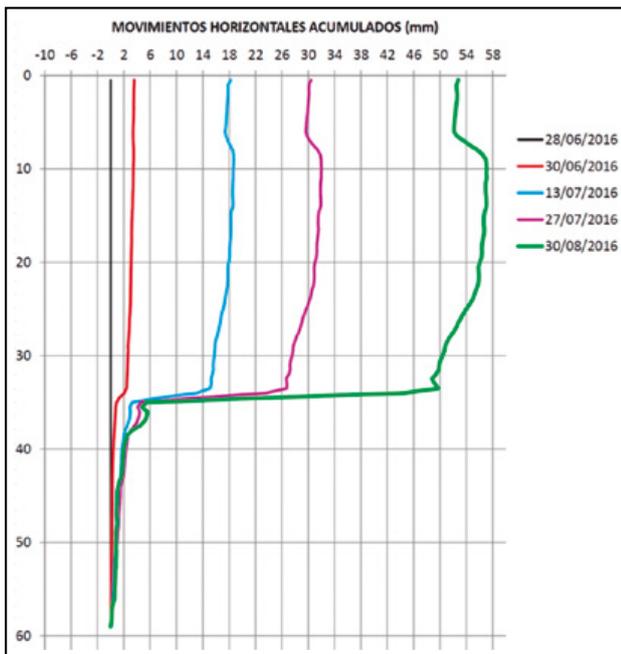


Figura 11. Detalle de lecturas de inclinometría en el S20.

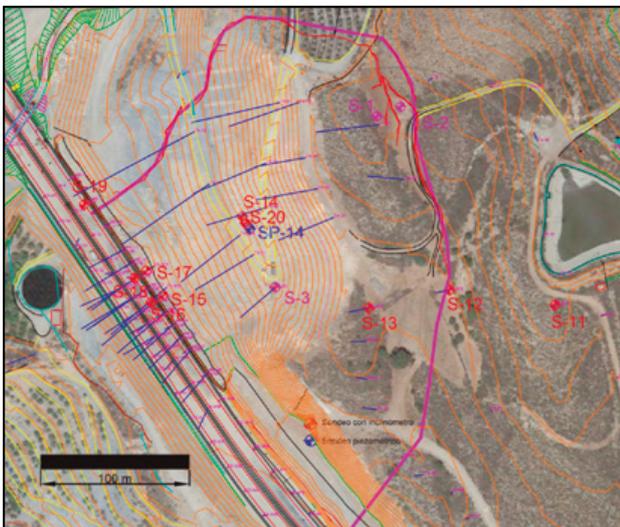


Figura 12. Vista de los vectores de movimiento en los puntos de superficie controlados por topografía.

filitas, situada en la parte inferior del talud, tiene una componente de movimiento muy marcada hacia la calzada. Sin embargo, la zona englobada por las grietas en la cual los mármoles llegan hasta el pie del desmonte (p.k. 0+420 a 0+620) se registra muy poco movimiento.

Además, puede verse un claro carácter rotacional en los vectores de la zona con más movimiento. Al tener la estructura del macizo una clara componente hacia el sur-suroeste el movimiento natural de la masa que está deslizando tendría esa dirección. Sin embargo el macizo de mármoles, en la zona en la que llegan a cota de rasante, impide ese movimiento provocando que el desplazamiento tenga esa componente rotacional con el eje de giro situado en el entorno del límite Este de la grieta exterior (zona inferior central de la figura 12) que coincide con la zona en la que los mármoles empiezan a tener continuidad bajo la calzada, actuando como contrafuerte natural.

En la figura 13 se muestra, en un perfil realizado por el p.k. 0+360, una línea verde que representa la supuesta superficie de deslizamiento deducida con la información que han proporcionado los inclinómetros (S1, S20, S17 y S18), las grietas y los vectores de los puntos de control de movimiento superficial.

Los vectores de los puntos de control topográfico, que se representan en color azul, muestran como en la zona próxima a las grietas de cabecera el movimiento es claramente de hundimiento. En la zona media de la ladera el movimiento tiene una componente traslacional más acusada y en la zona de pie y en la calzada es de levantamiento y refleja perfectamente lo que se puede percibir en la foto 6.

5.2. Planteamiento de soluciones de estabilización

Cuando se pretende plantear y/o diseñar los trabajos de estabilización para un desmonte de grandes dimensiones, tal y como se considera el analizado en este documento, habitualmente se manejan tres diferentes filosofías de solución.

La primera de ellas es la modificación de la situación del nivel freático en sentido de rebajar su cota, especialmente en la zona que se encuentra por encima de la superficie de deslizamiento considerada.

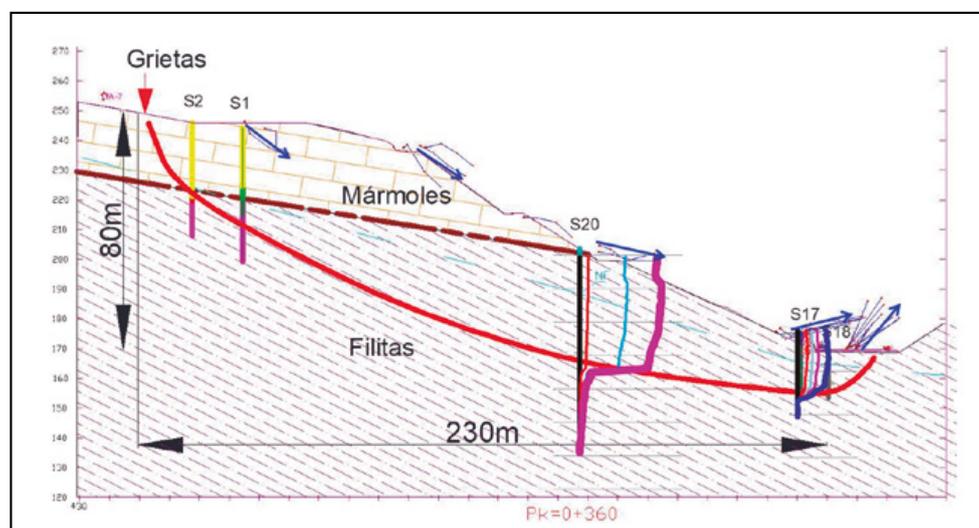


Figura 13. Perfil litológico con la superficie de deslizamiento supuesta (color verde) con los vectores de movimiento.

Habitualmente, cuando se modeliza el efecto de un rebajamiento del nivel freático en la estabilidad de una ladera, se puede observar que el efecto estabilizador es muy notable. Aunque la mayor dificultad reside en materializar efectivamente dicho rebajamiento mediante drenes, zanjas o pozos, de forma que se garantice su eficacia a lo largo del tiempo, en ocasiones es la única solución posible, tal y como se verá en el planteamiento de los trabajos de estabilización de la segunda fase de actuaciones, cuando las otras opciones son irrealizables.

La segunda opción de estabilización que habitualmente se contempla es el empleo de elementos estructurales que aporten una fuerza de estabilización. Estos elementos habitualmente son pantallas de pilotes, elementos de pantalla continua dispuestos con el lado mayor en la dirección del deslizamiento y anclajes (aislados o con muro de reparto).

En dicho diseño, las fuerzas de estabilización deben suponer un cierto porcentaje del peso de material afectado por la inestabilidad para que su influencia sea razonable. Por este motivo, cuando la masa inestable es de dimensiones considerables, disponer elementos estructurales que aporten una fuerza de estabilización suficiente puede ser inviable económicamente.

Por último, la tercera tipología de solución de estabilización consiste en realizar un movimiento de tierras, retirando material en la parte superior de la masa inestable (que supone fuerza inestabilizadora) y, en ocasiones, aportando material en la parte inferior del talud (siempre que la geometría de la superficie de deslizamiento en dicha zona sea tal que el peso del terreno añadido aporte una fuerza estabilizadora).

Esta solución presenta el problema de que habitualmente se requieren grandes movimientos de tierra (también un porcentaje razonable del volumen de material movilizado por la inestabilidad) con el consiguiente coste económico y medioambiental, y está muy condicionado por la existencia de vertederos próximos a la obra.

A partir de las tres soluciones genéricas de estabilización referidas en el apartado anterior, se analizó su posible empleo en la estabilización del desmote objeto del presente documento.

En relación a la opción de rebajamiento del nivel freático, se estimó que la litología y estructura del desmote complicaba notablemente su materialización con la geometría inicial del desmote.

Los mármoles superiores, que se encuentran muy fracturados, aportan el agua a las filitas inferiores. Así, realizar un drenaje en los mármoles sería muy poco eficaz ya que éstos drenan de forma natural por vías preferentes (grietas), trasladando el agua del macizo a la filitas.

En el caso de las filitas, de muy reducida permeabilidad, la disposición de elementos de drenaje debería ser suficientemente densa para conseguir un drenaje eficaz. Además, estos elementos de drenaje (drenes subhorizontales conectados con pozos verticales) deberían atravesar los mármoles superiores, lo que supondría una compleja ejecución y elevado coste y su integridad estaría condicionada por la dinámica de la inestabilidad.

La opción de emplear elementos estructurales de contención se desestimó cuando tras analizar los resultados de la campaña de reconocimiento se calculó que la masa potencialmente inestable superaba 1.500.000 m³.

La ejecución de anclajes se desestimó por la elevada longitud que deberían tener (claramente superior a 50 m) y por el importante número de elementos necesarios para aportar una fuerza de estabilización proporcionada con la masa de material movilizado. Por otro lado, al estar los mármoles fracturados y formando grandes bloques podrían sufrir movimientos diferenciales que podrían modificar la carga de los anclajes (descargándolos o llevándolos a rotura).

En el caso de emplear elementos estructurales tipo pantalla, estas deberían tener unas dimensiones y características que las harían económicamente inviables.

Finalmente se optó en esta fase por la opción de realizar una modificación geométrica del talud mediante movimiento de tierras.

El perfil de la excavación realizado se incluye en la figura 14.

En el pie del desmote se previó excavar una banda de unos 20 m paralela a la calzada (donde en la foto 6 se puede ver un muro de escollera). A partir de esta excavación se reperfiló la excavación con una inclinación aproximada del 2H:1V, hasta intersectar con el plano que, siendo paralelo al contacto mármoles-filitas, se encuentra a unos 7,5-10 m en la vertical por encima del contacto. Este espesor de mármol aporta un grado de confinamiento a las filitas para evitar su degradación y meteorización.

La inclinación del plano de excavación en mármoles es aproximadamente de unos 9° (similar, lógicamente, al contacto mármoles-filitas) y se extiende hasta que se intersecta con un plano de excavación 1H:1V que se sitúa unos 20 m ladera arriba de las grietas.

Con el perfil de excavación así diseñado se consiguió retirar parte de la masa inestable existente en la zona superior del desmote, lo que tiene un carácter estabilizador. Sin embargo, también se excavó material en la parte inferior del desmote lo que, por el contrario, no mejoraba su estabilidad.

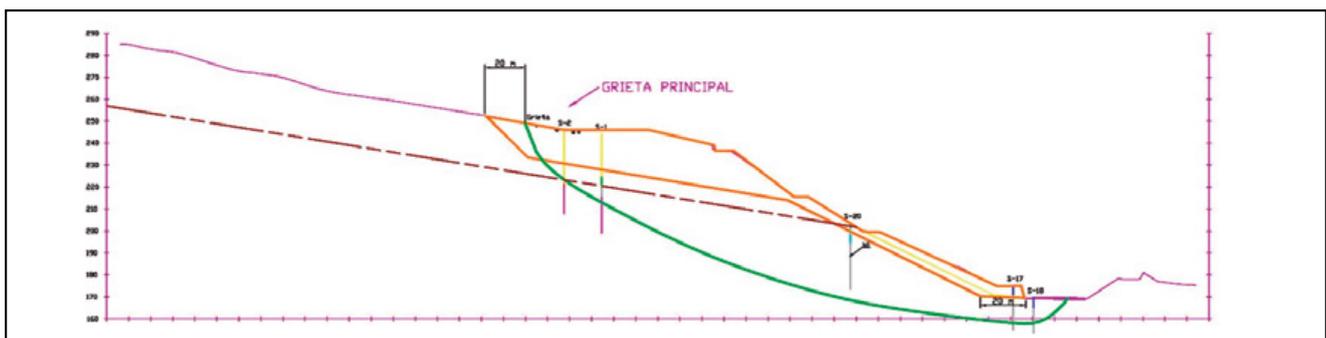


Figura 14. Esquema de solución estabilizadora mediante movimiento de tierras.

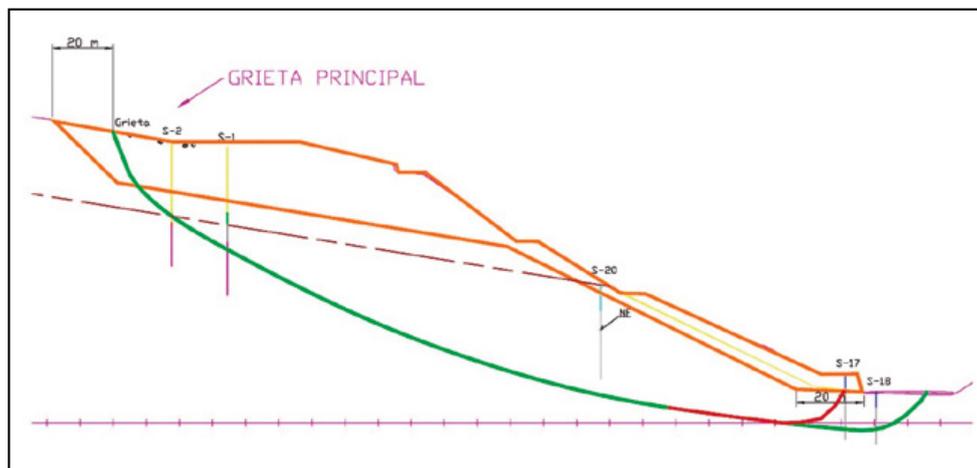


Figura 15. Esquema conceptual del efecto de la "zona fusible".

Con esta excavación en la zona de pie de la masa inestable se pretendía crear una zona de debilidad (o "zona fusible") al pie del desmorte para desplazar la salida de la inestabilidad a esa banda evitando la situación actual en la que la salida de la cinemática de rotura alcanza la calzada de la autovía. La eficacia de esta medida se comentará en apartados posteriores de este artículo.

El volumen excavado en dicha zona (según se puede ver en el perfil de la figura 14) era bastante reducido en comparación con el excavado en la parte superior del talud, con lo que el efecto desfavorable de realizar la excavación en el pie era muy inferior al efecto estabilizador provocado por la excavación en cabeza.

Si se observa con detenimiento las figuras del documento donde se indica la superficie de rotura estimada se puede ver cómo la salida de la rotura afecta aproximadamente más de la mitad de la calzada. La profundidad a la que se pasa dicha cinemática en esa zona está determinada con suficiente garantía por los inclinómetros situados en la parte baja del desmorte.

Cuando se realizan trabajos de estabilización en un deslizamiento de grandes dimensiones, tal y como es el referido en el presente artículo, es demasiado atrevido pensar que los movimientos se van a detener de forma instantánea y total. Por el contrario, el proceso habitual es que tras los trabajos de estabilización la velocidad de los movimientos disminuya notablemente a lo largo de un periodo de tiempo que se mide en meses debido, entre otros aspectos, a que la masa deslizada no es un sólido rígido y se tiene que ir reacomodando a su nuevo estado tensional.

Por los motivos anteriores, la "zona fusible" se creó para forzar que la salida de la rotura se situara en la zona de 20 m excavada paralela a la calzada (figura 15), de forma que ésta no se viera afectada por la inestabilidad.

Adicionalmente, y en una segunda fase de actuaciones, el sobreancho de 20 m de excavación permitiría la ejecución de una solución estructural (pantalla de pilotes o elementos de pantalla dispuestos con la dimensión mayor paralelos a la dirección del deslizamiento) que forzaría en mayor medida que la salida de la rotura no afecte a la calzada. Es importante explicitar que estos elementos estructurales no tienen el cometido de estabilizar la ladera sino el de proteger la calzada evitando que la salida de la rotura pueda afectarla.

La solución genérica de excavación que se realizó es la indicada anteriormente, y se ha definido considerando una sección del terreno. Sin embargo, según se puede ver en la información disponible (ver figura 12), el desmorte a estabilizar y la cinemática observada no son fácilmente asimilables a una geometría bidimensional. Por este motivo, es importante definir correctamente los planos de excavación que delimitan el volumen a retirar.

Teniendo en cuenta aspectos tales como volumen resultante a excavar, afección posible de las voladuras al tráfico, presencia de la balsa de riego, líneas de alta tensión, etc. se definió tridimensionalmente la excavación que se realizó en la primera fase de actuación (figura 16).

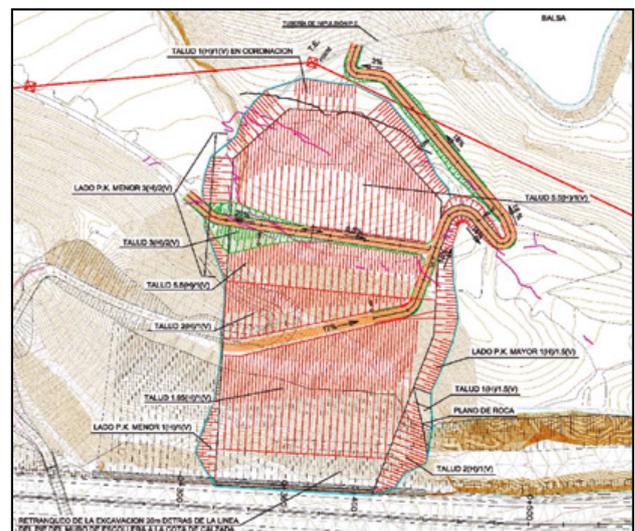


Figura 16. Planta de la primera fase de excavación.

5.3. Modelización realizada

5.3.1. Modelo bidimensional (2D)

A partir de la geometría de la sección de la figura 14 se realizó un modelo bidimensional de elementos finitos empleando el código numérico Plaxis 2D v.2018 (Delft, Países Bajos), que está especialmente diseñado para la resolución de problemas geotécnicos y geotécnico-estructurales.

La malla empleada se puede ver en la figura 17, donde se incluyó un nivel superior de mármoles (azul) que se

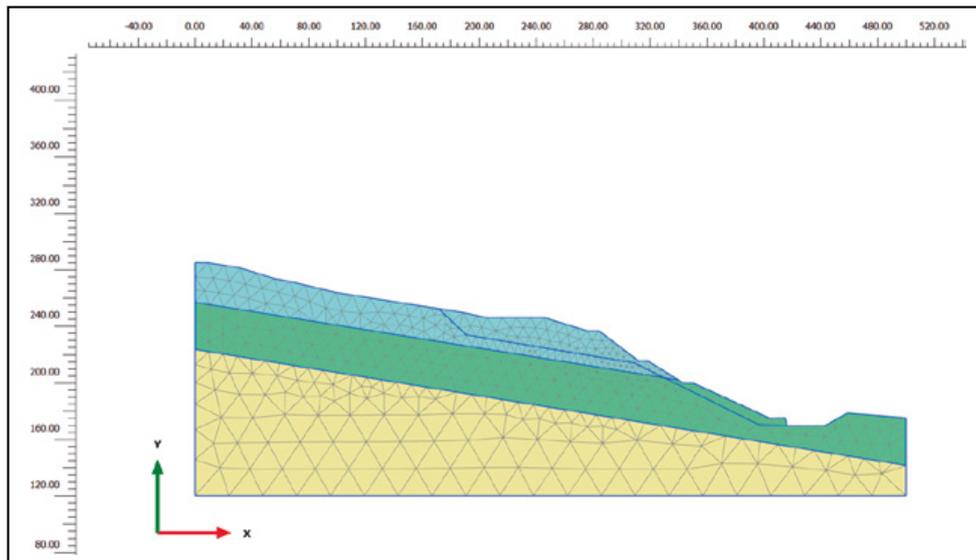


Figura 17. Malla de elementos finitos empleada en el modelo 2D (Plaxis).

sitúa sobre las filitas (verde). Bajo éstas se modelizó un material con un comportamiento resistente suficientemente competente para evitar que la rotura pudiese penetrar por el mismo.

En el caso de los mármoles se empleó una linealización tipo Mohr-Coulomb de la envolvente de rotura tipo Hoek&Brown, ajustándose en el rango de presiones normales esperables y eliminándose la resistencia a tracción

del material para poder simular el efecto de las grietas de tracción detectadas en el terreno.

En el caso de las filitas inferiores, y como estimación inicial de la resistencia del material existente en la banda de corte, se realizó en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX un ensayo de corte anular para la obtención de los parámetros resistentes residuales, obteniéndose un ángulo de rozamiento del orden de 13-15° (figura 18).

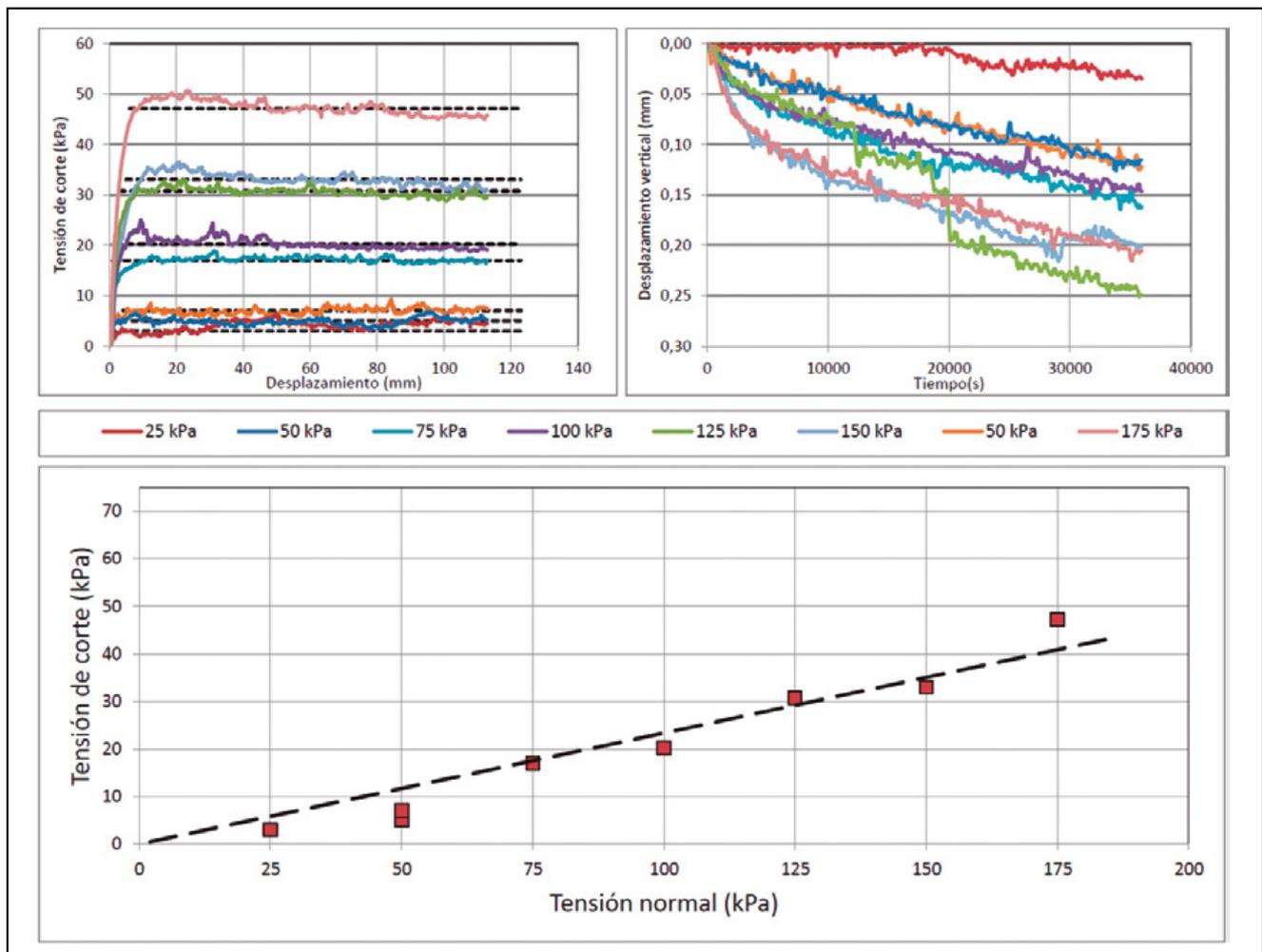


Figura 18. Resultado del ensayo de corte anular realizado en una muestra de filitas. Sondeo S-16.

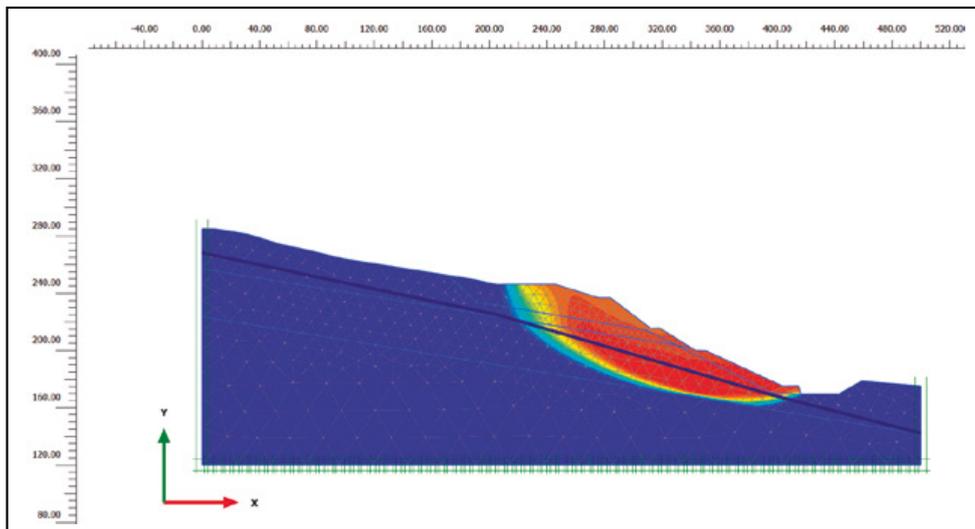


Figura 19. Cinemática de rotura obtenida con el modelo 2D. Situación previa a la excavación.

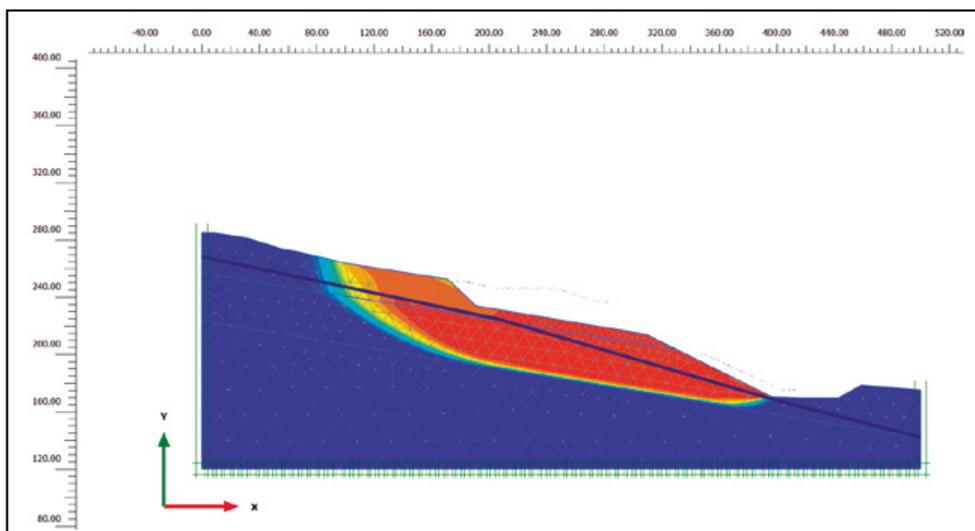


Figura 20. Cinemática de rotura obtenida con el modelo 2D. Situación excavación fase 1.

La cinemática de rotura obtenida con el modelo 2D en la situación previa a la excavación se muestra en la figura 19, pudiéndose ver cómo reproduce adecuadamente la geometría de la inestabilidad en dicho perfil (figura 13), tanto en superficie (puntos de salida y entrada de la rotura) como en profundidad (bandas de rotura de los inclinómetros).

A partir de dicho modelo, y empleando los mismos parámetros resistentes y deformacionales de los materiales y manteniendo el nivel freático con la misma geometría, se modelizó el efecto de la excavación en la estabilidad de la ladera (figura 20). El incremento del factor de seguridad obtenido debido a la excavación es del orden de $\Delta FS \approx 0,096$.

La comparación de las cinemáticas de rotura anteriores permite observar cómo la zona con un factor de seguridad más reducido en el caso de la situación previa a la excavación está más localizada, mientras que en el caso del modelo con excavación, el pie de la rotura se aleja de la calzada debido a la efectividad de la “zona fusible”.

5.3.2. Modelo tridimensional (3D)

A partir de los cálculos anteriores, y debido al marcado carácter tridimensional del desmonte y a su importancia

y dimensiones, se consideró necesario realizar un modelo 3D que incluyera la geometría real de la ladera, así como de la excavación, al menos en su primera fase. De esta manera la comprensión y conocimiento del fenómeno de inestabilidad es más profundo, pudiéndose plantear las soluciones de estabilización de forma más adecuada.

El programa empleado en la modelización fue el Midas GTS NX v.2019 (Seúl, Corea) que es un código numérico bi-tridimensional que está especialmente diseñado para la resolución de problemas geotécnicos y geotécnico-estructurales.

En la modelización realizada se aprovecharon las capacidades de generación de geometrías complejas del código Midas GTS NX, entre las que destaca la posibilidad de generación de una superficie tridimensional a partir de una cartografía digitalizada. Extrusionando dicha superficie se generó un volumen que se subdividió en los diferentes materiales en función del reconocimiento geotécnico disponible (sondeos y reconocimiento visual de la superficie) (figura 21). El nivel freático se situó en función del reconocimiento geotécnico disponible.

La geometría de la excavación de la fase 1 (figura 16) se importó directamente en el modelo para generar el volumen que será incluido como excavación. A partir de estos volúmenes y realizando operaciones geométricas y

booleanas, se obtuvieron las mallas de la figura 22 (sin excavación) y figura 23 (con excavación).

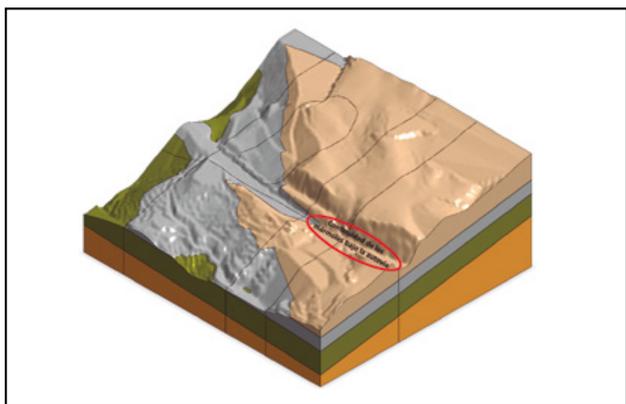


Figura 21. Volumen 3D del modelo MIDAS GTS NX. Subdivisión de materiales.

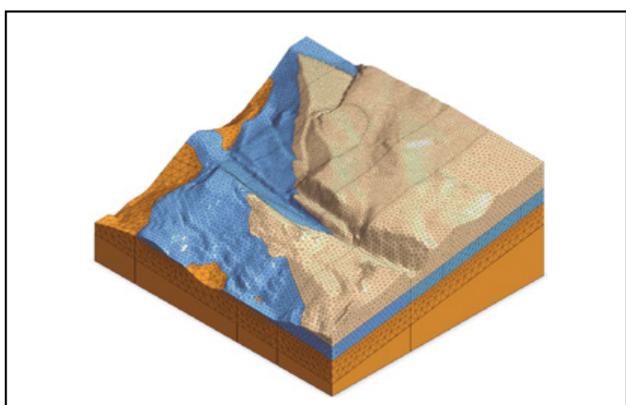


Figura 22. Mallado del modelo 3D previo a la excavación.

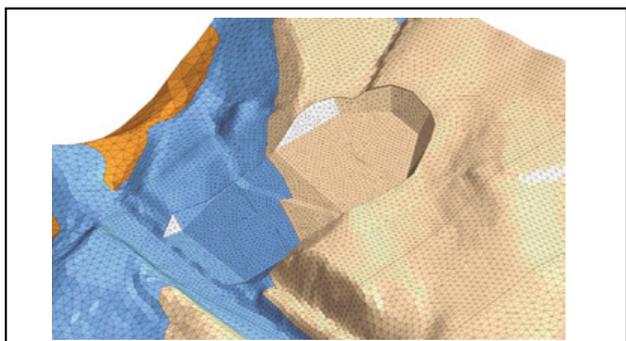


Figura 23. Mallado del modelo 3D tras la excavación fase 1.

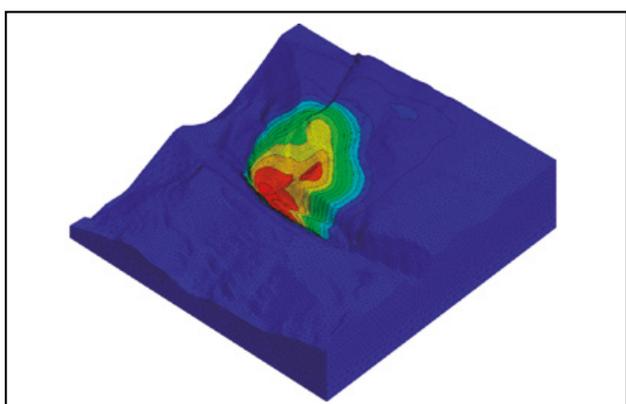


Figura 24. Vista de la cinemática de rotura del modelo 3D. Situación actual.

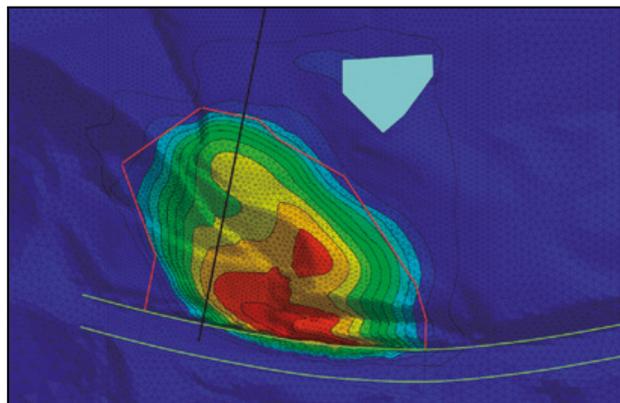


Figura 25. Planta de la cinemática de rotura del modelo 3D. Situación actual

Los parámetros resistentes y deformacionales de los materiales fueron los mismos que los empleados en el modelo 2D (Plaxis).

La cinemática de rotura obtenida en el modelo 3D en la situación previa a la excavación se incluye en la figura 24, pudiéndose observar cómo las isolíneas de movimientos presentan un marcado carácter tridimensional.

En la figura 25 se puede ver la planta de la cinemática de rotura, observándose cómo se ajustan con razonable precisión a la envolvente de grietas del terreno (líneas de color naranja).

También en la figura 25 se incluye, de forma simplificada, la situación de la balsa de riego, la calzada de la autovía y el eje del perfil 2D que se ha empleado en los cálculos 2D. Es importante destacar que la salida de la rotura afecta aproximadamente a la mitad de la calzada de la autovía.

Empleando el mismo procedimiento de cálculo, se ha obtenido la cinemática de rotura del desmonte tras la fase de excavación 1.

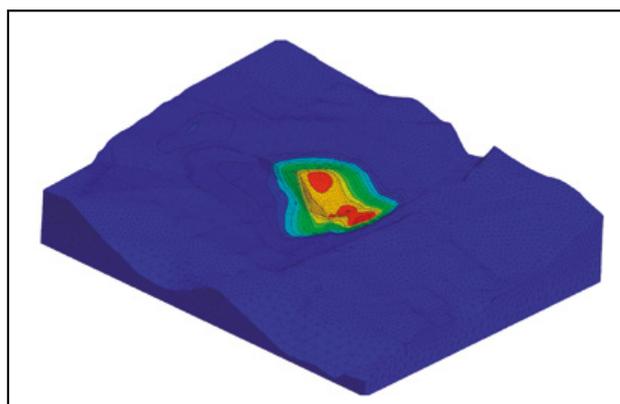


Figura 26. Vista de la cinemática de rotura del modelo 3D. Excavación fase 1.

Se puede ver en la figura 27 cómo la zona excavada presenta unos movimientos menores, no viéndose afectada la zona de la calzada más próxima a la excavación inferior debido al efecto de la “zona fusible”. Así mismo se observa la no afección de la excavación planteada a la balsa situada en la zona de coronación.

El incremento de factor de seguridad obtenido en el modelo 3D es, para la fase de excavación 1, del orden de $\Delta FS \approx 0,045$. Este incremento de seguridad de valor tan

reducido, debido a la gran magnitud de la masa inestable, ha hecho necesario realizar un seguimiento posterior mediante instrumentación (inclinómetros y control topográfico de movimientos) con el fin de comprobar la eficacia del tratamiento.

Tras el análisis de los registros de dicha instrumentación, según se verá en el apartado siguiente, se ha estimado oportuno plantear medidas complementarias de estabilización que se deberán materializar en la segunda fase de actuación.

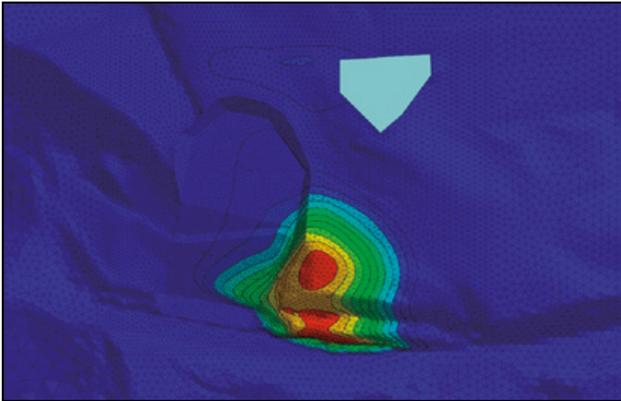


Figura 27. Planta de la cinemática de rotura del modelo 3D. Excavación fase 1.

6. SEGUNDA FASE DE ACTUACIÓN

6.1. Reconocimiento y auscultación

Tras la ejecución de los trabajos de estabilización diseñados en la primera fase se debieron instalar elementos adicionales de auscultación dado que la geometría del talud había cambiado y algunos de los que estaban instalados se habían perdido con los trabajos de movimientos de tierra.

De esta forma se realizaron dos nuevos sondeos inclinométricos el S30 y el S31 (foto 7) para completar los que estaban operativos de la fase anterior (S11, S12, S13 y S19).

El primero de ellos (S30) pretendía reemplazar en la zona media del talud al S20; y el segundo (S31) permitiría controlar los posibles movimientos en el pie del talud, en la nueva zona creada para facilitar la salida del pie del deslizamiento (zona fusible).



Foto 7. Vista del reperfilado del talud realizado en la primera fase de estabilización.

De los dos nuevos inclinómetros instalados en la ladera, el S30 (figura 28) muestra un comportamiento que es

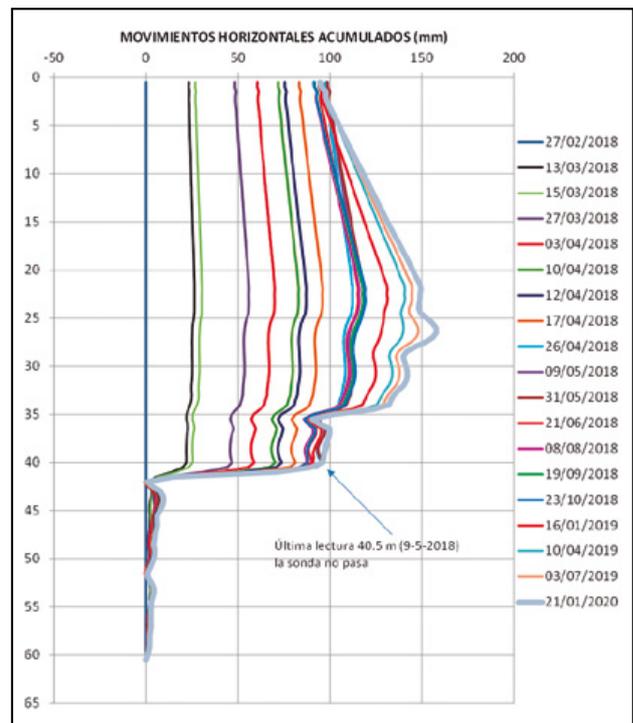


Figura 28. Inclinómetro S30.

consistente con lo que se había visto en la anterior fase en los que estaban ubicados en una zona próxima (S14 y S20). En este caso se aprecia una banda de rotura a los 42 m de profundidad con una velocidad media de unos 300 mm/año.

El S31 (figura 29) ha mostrado un comportamiento coherente con el comportamiento que se esperaba con la primera fase de estabilización. Es decir, muestra que sigue existiendo una superficie de rotura en el pie de la ladera, aunque con lo que se verá más adelante con los trabajos de control topográfico, ésta ya no afecta a la calzada sino que tiene su salida por la berma que se ha dejado como zona fusible.

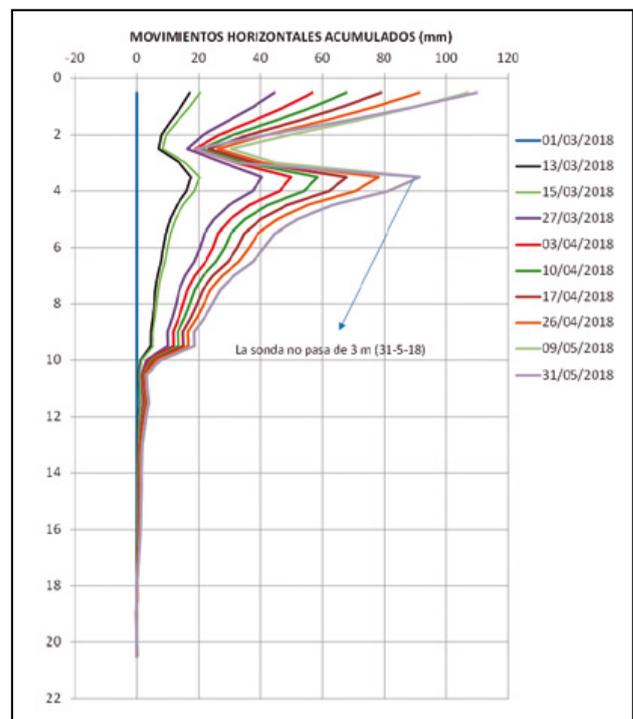


Figura 29. Inclinómetro S31.

Además de los dos inclinómetros nuevos, se ha dispuesto una amplia red de control topográfico.

Por un lado, se ha continuado con las medidas en X, Y y Z por topografía convencional de puntos repartidos por toda la ladera y por otra parte se ha realizado una nivelación en la zona entre la calzada y el muro de escollera creada para facilitar la salida del deslizamiento (foto 8).



Foto 8. Puntos de nivelación entre la calzada y el muro de escollera (zona fusible).

Estos trabajos de control topográfico han permitido comprobar que, aunque se mantiene una evolución significativa de movimientos en la ladera, se ha conseguido que el pie del deslizamiento salga por la berma creada para facilitar su salida (“zona fusible”), no afectando a la calzada en esta zona.

En la figura 30 se muestra la evolución de los movimientos verticales en un perfil transversal a la calzada realizado por el eje del deslizamiento (zona central de la escollera). En esta figura se aprecia cómo los puntos situados junto a la escollera han sufrido un levantamiento considerable 85 cm en 2 años y medio mientras que según nos acercamos a la calzada los movimientos son mucho menores llegando a ser casi nulos (1 cm) en el punto situado a 2,5 m del arcén de la autovía.

En la figura 31 se muestra el seguimiento de la nivelación en el perfil longitudinal más próximo a la escollera. Se

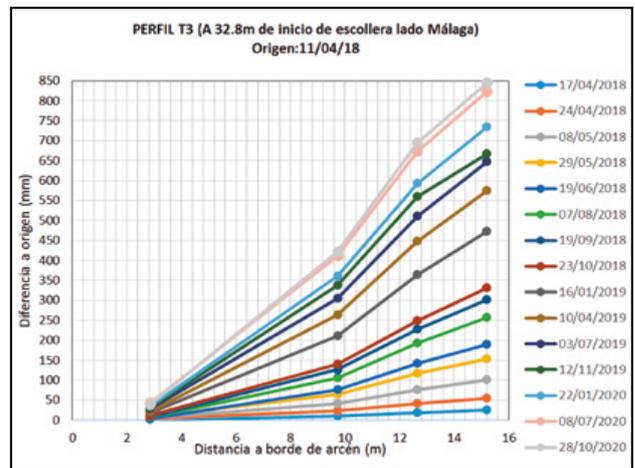


Figura 30. Detalle de la nivelación realizada en un perfil transversal por el eje del deslizamiento.

aprecia en esta figura cómo en la zona central del perfil el levantamiento es mucho más acusado que en los bordes, alcanzando en octubre de 2020 los 85 cm.

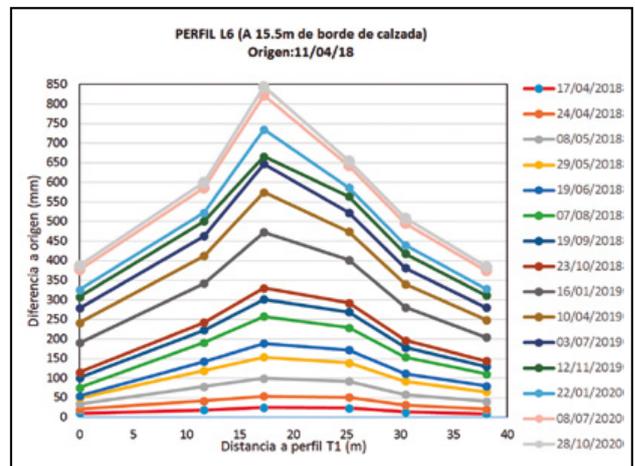


Figura 31. Detalle de la nivelación en el perfil longitudinal más próximo a la escollera.

En la figura 32 se muestra la evolución en el tiempo de los puntos de control situados junto a la escollera. El ligero descenso en la velocidad de deformación que se observaba

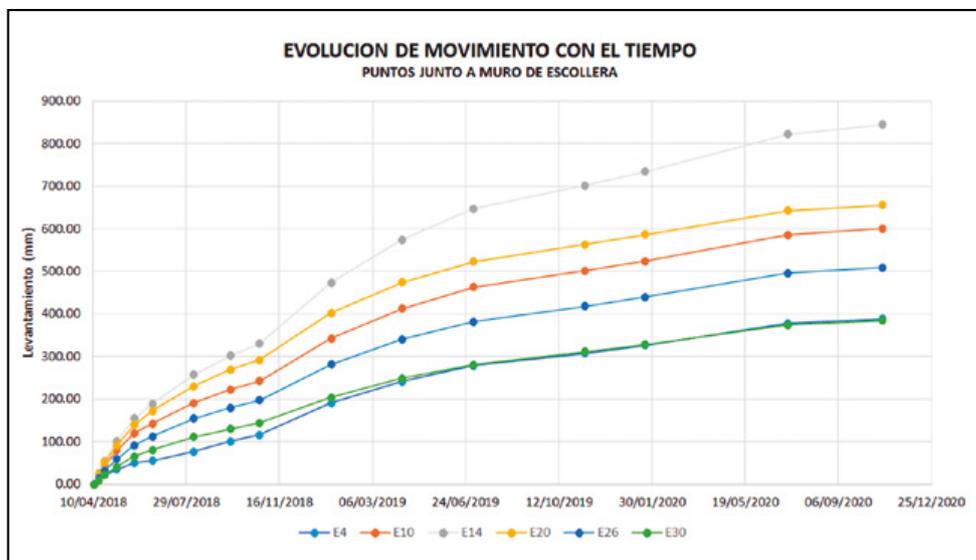


Figura 32. Evolución del movimiento en los puntos situados junto a la escollera.

en noviembre de 2018 se aceleró en la primavera del 2019 para posteriormente volver a disminuir ligeramente la velocidad.

En las siguientes figuras se muestran los movimientos diferenciales a origen (mm) y la velocidad media (mm/mes) de los puntos controlados en la zona fusible, indicándose su distribución en planta.

Es importante advertir que se han comenzado a marcar deformaciones en la calzada en la zona más próxima al talud rocoso formado por mármoles (marcado con una línea discontinua en la figura 33), lo que puede indicar que la componente rotacional del giro ya está introduciendo movimientos de ascenso en el entorno del contacto mármol - filitas.

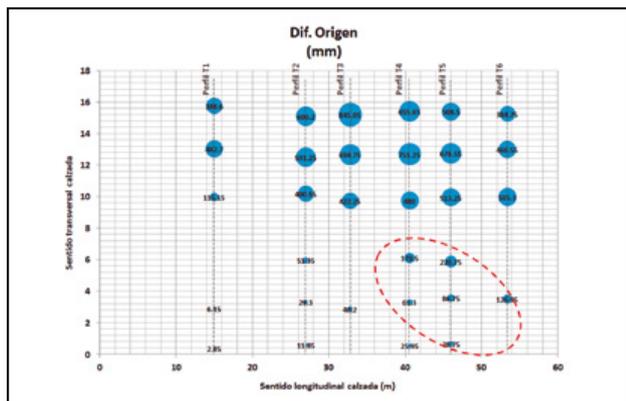


Figura 33. Movimientos verticales relativos a origen de los puntos de la zona fusible (mm).

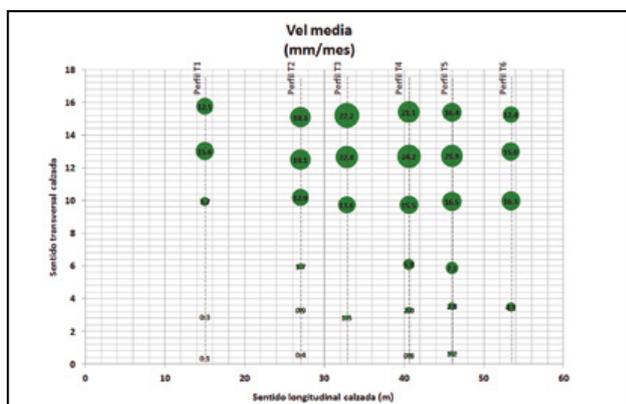


Figura 34. Velocidad media a origen de los puntos de la zona fusible (mm/mes).

En la foto 9 se muestra una imagen del aspecto de la berma de separación de la calzada, que como se ha



Foto 9. Vista de la berma de separación de la calzada (salida actual del deslizamiento).

mencionado en el párrafo anterior, supone la actual salida del deslizamiento por el pie del talud.

Adicionalmente en la figura 35 se muestra la trayectoria de los puntos de control topográfico instalados por la ladera. Se aprecia claramente cómo las trayectorias seguidas son muy similares, en cuanto a su dirección, a las que existían en la fase anterior (figura 12). También se confirma que los puntos situados fuera de la zona afectada en la parte alta de la ladera no sufren movimientos significativos.

En la figura 36 se muestra la evolución de movimientos de un punto situado en la zona central de la escollera y en la figura 37 la de un punto situado en la zona central de la ladera. Se aprecia una ligera disminución en la velo-



Figura 35. Vectores de trayectoria de movimiento de los puntos de control topográfico.

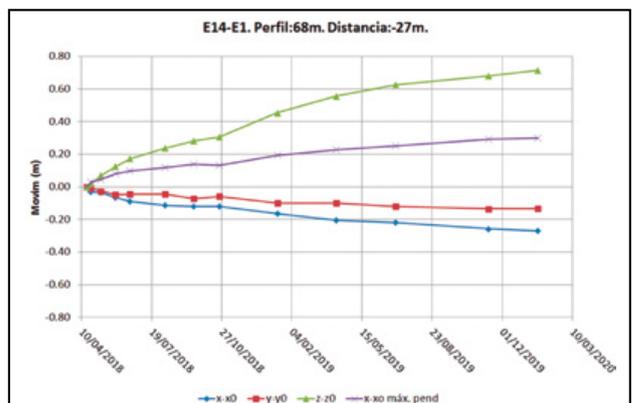


Figura 36. Movimientos en uno de los puntos situados en la zona central de la escollera.

cidad de movimientos. No obstante, todavía existe una importante velocidad de deformación, de unos 400-500 mm/año en los puntos en los que se aprecia mayor movimiento.

Otro dato importante es recorriendo el terreno por encima de la cabeza del talud no se han encontrado nuevas grietas en relación a las que había en la fase previa al reperfilado realizado y que el inclinómetro situado junto a la balsa de agua (S-11) no ha reflejado movimientos que indiquen que la inestabilidad pueda afectar a la misma (figura 38). Los puntos de control topográfico existentes en zonas aguas arriba a la cabecera del talud tampoco indican que hubiera movimientos significativos en esas zonas.

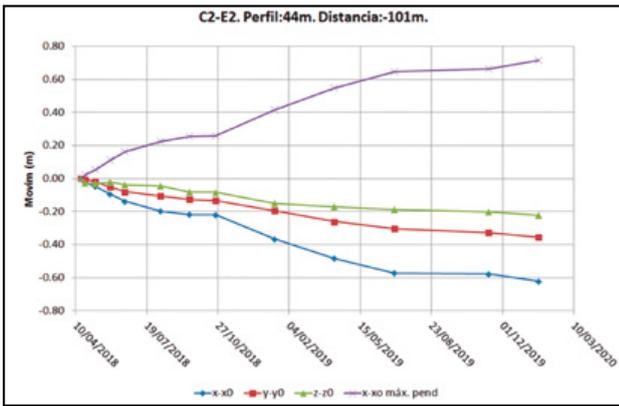


Figura 37. Movimientos en uno de los puntos situados en la zona central de la ladera.



Foto 10. Vista de los puntos principales de afluencia de agua en la ladera.

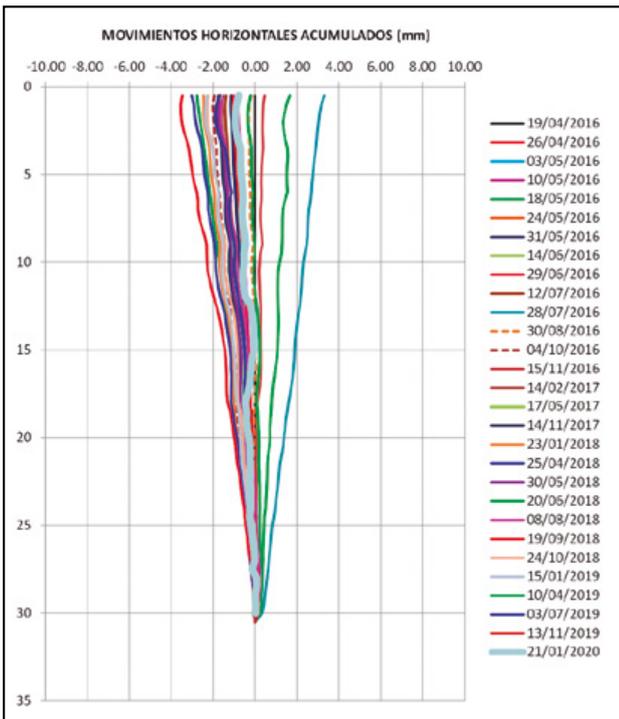


Figura 38. Inclínometro S11.

Cabe destacar la surgencia de agua por el talud, que ha mantenido un flujo estable incluso en la época más seca del año. La salida del agua se produce fundamentalmente por ambos laterales de la superficie de deslizamiento en el pie de la escollera y también es muy destacable la afluencia de agua por el techo de las filitas en la zona central del talud que ha provocado el deterioro en las propiedades resistentes del material, en esta zona, formando un deslizamiento de tipo local. En la foto 10 se muestra la ubicación de estos puntos de salida de agua.

En la figura 39 se muestra la evolución de los niveles freáticos medida en los tubos inclinométricos y los piezómetros, desde el inicio de las campañas de investigación.

6.2. Planteamiento de soluciones de estabilización

Aunque la evolución de los movimientos actuales no afecta prácticamente, de momento, a la calzada de la autovía por tener su salida en la franja “fusible” dispuesta, éstos tienen una magnitud importante, con velocidades del orden de 400-500 mm/año y afectan a un volumen de material de gran entidad.

Por otra parte, según se indicaba anteriormente, se han comenzado a marcar deformaciones en los bordes de la

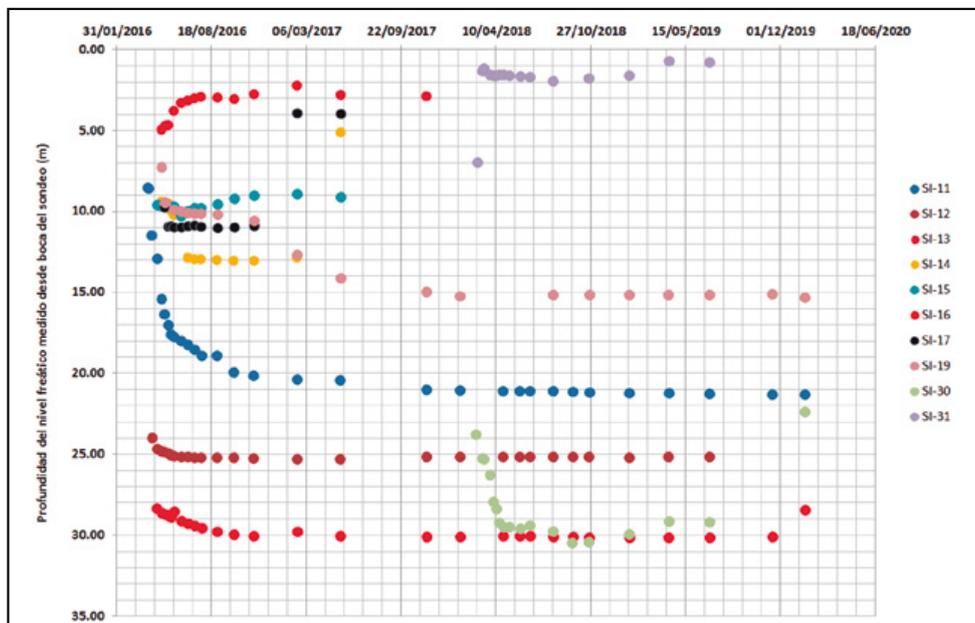


Figura 39. Evolución de niveles freáticos en los sondeos.

calzada en la zona más próxima al talud rocoso formado por mármoles, lo que puede indicar que la componente rotacional del giro ya está introduciendo movimientos de ascenso en el entorno del contacto mármol - filitas.

Todo esto hizo necesario plantear una segunda fase de estabilización. Así, teniendo muy presentes las opciones comentadas en el apartado 5.2 de este artículo, se optó por la combinación de las siguientes medidas estabilizadoras:

- Movimiento de tierras.
- Medidas de drenaje (pozos profundos y drenaje superficial).
- Refuerzo del pie del desmonte junto a la calzada mediante elementos estructurales (módulos de pantalla o pilotes).

6.2.1. Movimiento de tierras. Modelización realizada

Se ha hecho un primer estudio intentando realizar la estabilización empleando principalmente el movimiento de tierras. En la figura 40 se representa esta posible actuación (alternativa "a").

Esta solución consistía en la excavación de material en el tramo medio - alto de la zona afectada por la primera fase, básicamente retirada de mármoles, y ejecución de un pequeño relleno en el pie destinado a evitar la formación de las inestabilidades más superficiales.

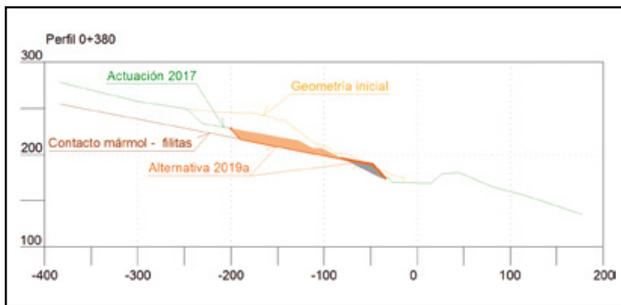


Figura 40. Actuación "a" de estabilización basada en movimiento de tierras

No se planteaba un mayor relleno en el pie, que podría tener un efecto favorable frente a la estabilidad global, porque daría lugar a la inutilización de la "zona fusible" con lo que la posible evolución de la inestabilidad volvería a afectar de lleno a la calzada de la autovía.

Para valorar la efectividad del efecto de esta excavación en la estabilidad global de la ladera se realizó un modelo numérico bidimensional con el programa Plaxis2D v.2018 a partir del perfil 0+380 que se considera razonablemente representativo de la inestabilidad en su zona central y actualmente movilizada.

En dicho modelo se reprodujo, partiendo de la geometría inicial (figura 41), el efecto del movimiento de tierras realizado en 2017 (figura 43), así como la excavación indicada en los párrafos anteriores (figura 45).

En el caso de la excavación propuesta inicialmente en esta segunda fase (alternativa 2019a) la diferencia del factor de seguridad con respecto a la excavación de 2017 es inferior a una centésima.

Las cinemáticas de las roturas obtenidas en las tres situaciones anteriores se pueden ver en la figura 42 (situación

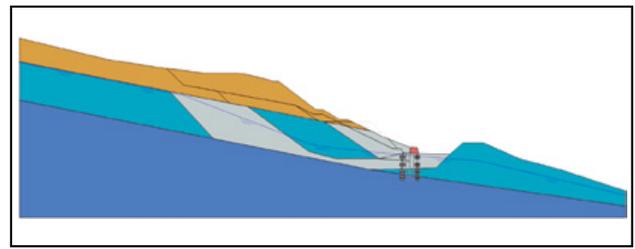


Figura 41. Geometría del modelo en situación inicial.

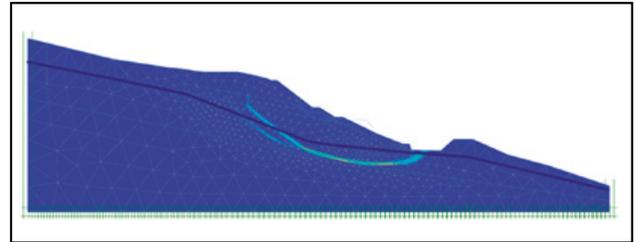


Figura 42. Cinemática de rotura del modelo en situación inicial.

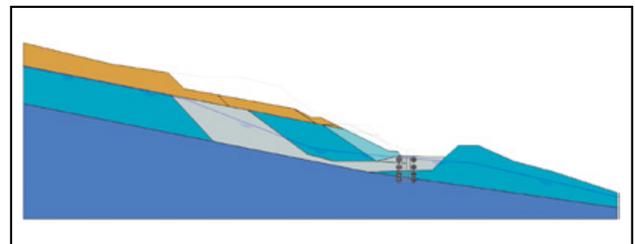


Figura 43. Geometría del modelo tras la excavación de 2017.

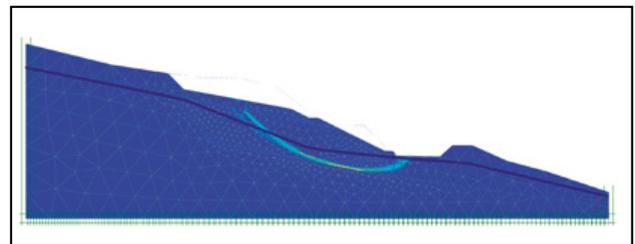


Figura 44. Cinemática de rotura del modelo tras la excavación de 2017.

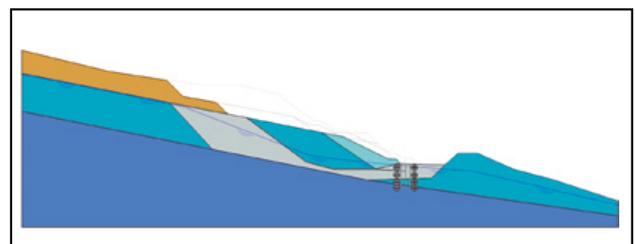


Figura 45. Geometría del modelo tras la excavación máxima de 2019.

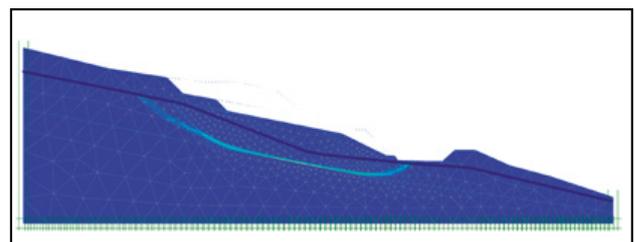


Figura 46. Cinemática de rotura del modelo tras la excavación máxima de 2019.

inicial), figura 44 (excavación 2017) y figura 46 (alternativa 2019a).

Por lo tanto, según el estudio realizado, este movimiento de tierras no supondría una mejora en el coeficiente de seguridad de la ladera y la superficie pésima de rotura tendería a alargarse ladera arriba, y aunque presenta el interés de que, al retirar los mármoles superiores en una gran superficie, permite efectuar posibles pozos de drenaje con mayor facilidad, genera un importante volumen de material destinado a vertedero. Adicionalmente puede presentar la incertidumbre relacionada con su afección a la estabilidad de los mármoles lado Almería. Por todos estos motivos esta alternativa fue descartada.

6.2.2. Reperfilado y red de pozos. Modelización realizada

Adicionalmente se estudió una segunda alternativa con un movimiento de tierras de mucha menor entidad, según se puede ver en las siguientes figuras, combinado con un rebajamiento del nivel freático que ahora era más factible que inicialmente por la excavación parcial de los mármoles efectuada en la fase 1.

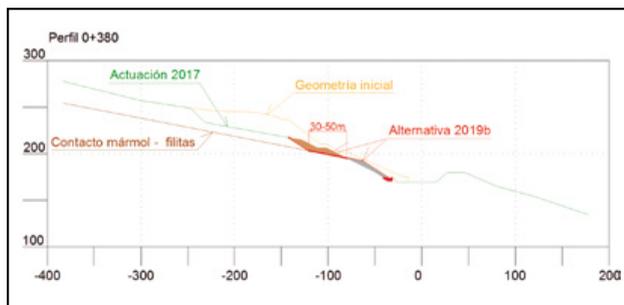


Figura 47. Movimiento de tierras previsto en actuación "b".

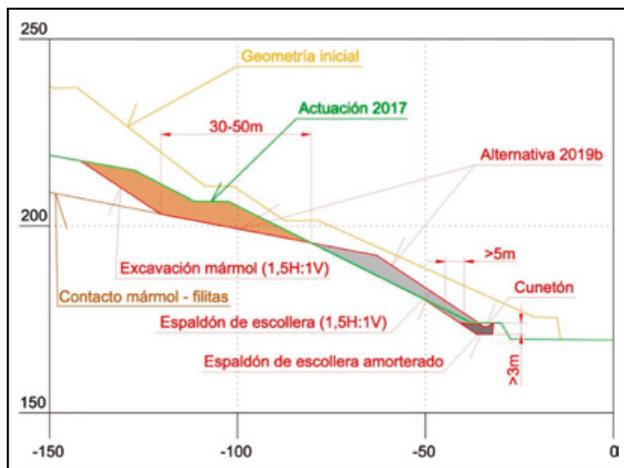


Figura 48. Movimiento de tierras previsto en actuación "b". Detalle.

Se planteó una excavación en los mármoles con el fin principal de preparar una plataforma que permitiera la ejecución de pozos de drenaje en la zona intermedia del desmonte, de manera que no requiriera la perforación de los mármoles, que era un inconveniente muy notable según se ha expuesto en los apartados anteriores. Adicionalmente, y de forma secundaria, esta excavación proporcionaría el material para realizar un relleno granular (escolerado o pedraplén) de protección en el pie del desmonte principal y de protección del desmonte Este (desmonte lado Almería).

Esta excavación se planteó en una banda de 30 a 50 m para poder compensar el movimiento de tierras.

En el pie del desmonte se planteó la ejecución de un relleno granular (escolerado o pedraplén) con el material procedente del desmonte en mármoles citado. Este relleno debería tener una pendiente exterior 1,5H:1V y un espesor de al menos 5 m.

Adicionalmente al movimiento de tierras referido, y con carácter fundamental, se plantea la ejecución de pozos de drenaje y una pantalla de pilotes o módulos de pantalla. En la figura 54 se esquematiza la situación prevista para estos elementos.

Se estudió la siguiente distribución de pozos de drenaje:

- 18 pozos situados en el pie del desmonte, de 25 m de profundidad en filitas, comunicados entre sí (pozos "a" en figura 54).
- 10 pozos situados a media altura del desmonte, en la zona en la que se prevé excavar los mármoles. Estos pozos tendrían 55 m de profundidad en filitas y estarían equipados con bomba («b» en figura 54).
- 23 pozos en la zona superior del desmonte, de 55 m de profundidad. Los 10 m superiores aproximadamente atravesarían los mármoles fracturados y el resto se situarían en filitas ("c" en figura 54). Al igual que los pozos b, estos también estarían equipados con bombas.

Los pozos "a" y "b" se podrían realizar de 1,5 m de diámetro. Sin embargo, la presencia de los mármoles superiores dificulta la ejecución de los pozos identificados como "c". En principio se podrían realizar a rotopercusión, con un diámetro de perforación de unos 500 mm, equipados con tubería de 400 mm.

Para poder analizar el efecto tanto de esta excavación reducida (alternativa 2019b) como del drenaje propuesto se completó el modelo numérico bidimensional anteriormente indicado con las fases que simulan tanto la excavación, como el rebajamiento del nivel freático debido a los pozos.

Así, se ha simulado incrementalmente, en diferentes fases, la excavación de la alternativa 2019b (figura 49), el rebajamiento del nivel freático debido a los pozos superiores (figura 50), el rebajamiento debido a los pozos de la calzada tanto a corto plazo y radio de afección reducido (figura 51) como a largo plazo con radio de afección más extendido (figura 52) y, finalmente, un comportamiento global de todos los pozos (figura 53).

En el caso de la excavación de la alternativa 2019b, la variación del coeficiente de seguridad con respecto a la situación actual (excavación 2017) es prácticamente inapreciable ($\Delta FS \approx 0,01$).

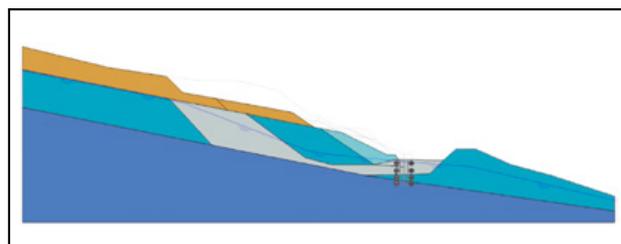


Figura 49. Geometría del modelo tras la excavación de 2019. Alternativa 2019b.

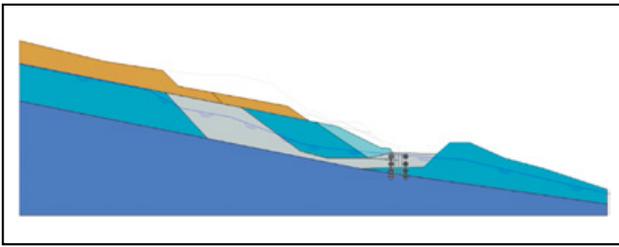


Figura 50. Geometría del modelo tras la excavación de 2019 y rebajamiento pozos superiores.

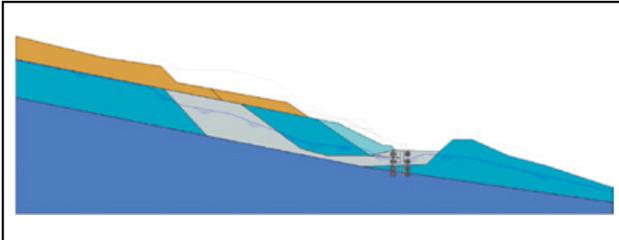


Figura 51. Geometría del modelo tras la excavación de 2019 y rebajamiento inicial y calzada corto plazo.

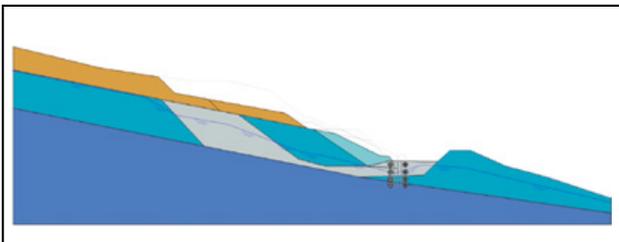


Figura 52. Geometría del modelo tras la excavación de 2019 y rebajamiento inicial y calzada largo plazo.

Cuando se simula el rebajamiento con pozos en la zona superior del desmonte, la mejora del factor de seguridad con respecto a la situación actual (excavación 2017) es incluso más reducida ($\Delta FS \approx 0,004$), pero la cinemática de rotura está más limitada en extensión. En cualquier caso, los valores de mejora del factor de seguridad tan reducidos están dentro de la precisión alcanzable con el método de cálculo empleado.

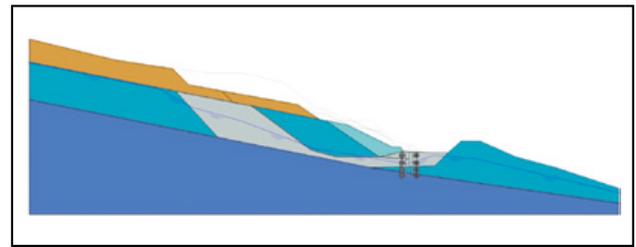


Figura 53. Geometría del modelo tras la excavación de 2019 y rebajamiento largo plazo.

El efecto del rebajamiento de los pozos en la zona próxima a la calzada (pozos a de la figura 54) se ha considerado a corto y largo plazo, en función de la distancia de afección. Comparando esta situación con la actual (excavación 2017) se observa una mejora del factor de seguridad de $\Delta FS \approx 0,043$ a corto plazo y $\Delta FS \approx 0,065$ a largo plazo.

En el caso de considerar que se ha ejecutado el drenaje propuesto, a largo plazo se obtiene un $\Delta FS \approx 0,14$.

Si se observa con detalle la cinemática de rotura considerando el rebajamiento final a largo plazo (con la excavación de la alternativa 2019b realizada) (figura 59) se observa que la rotura sale por la zona fusible, llegando ligeramente a tocar el borde exterior de la calzada.

Para forzar la salida de la rotura y alejarla de la calzada de la autovía protegiendo la misma se ha incluido en el modelo el efecto de unos módulos de pantalla cuyo cometido no tiene carácter de estabilización de la ladera.

En las dos figuras siguientes se incluye la geometría del modelo, así como la cinemática de rotura obtenida, pudiéndose observar el detalle de la figura 61 cómo los elementos estructurales consiguen el efecto buscado.

Los elementos estructurales diseñados están formados por módulos de pantalla de 4,5 m de longitud y 1 m de anchura (figura 62), dispuestos perpendicularmente al eje de la calzada, con una separación entre ejes de 4 m, y una longitud de 25 m de profundidad.

Se reitera que la pantalla de pilotes o de módulos de pantalla se ha planteado con objeto de proteger la calzada de la autovía de las posibles deformaciones debido al hecho de

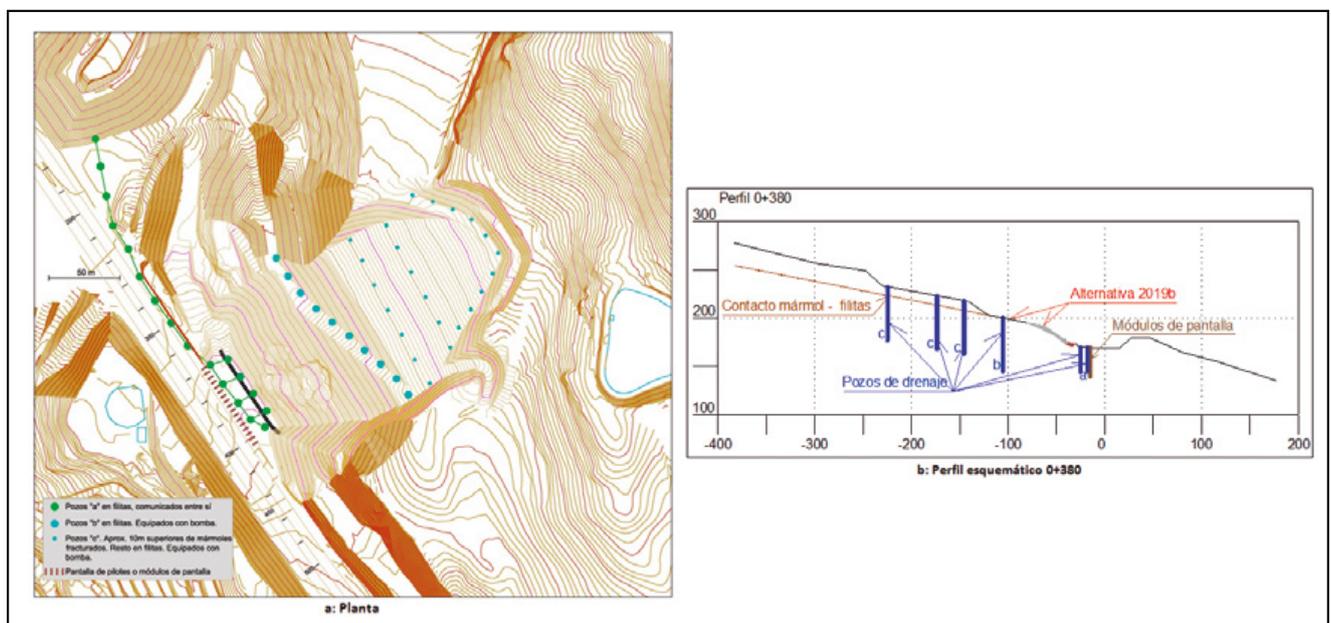


Figura 54. Esquema de situación de pantalla y pozos de drenaje.

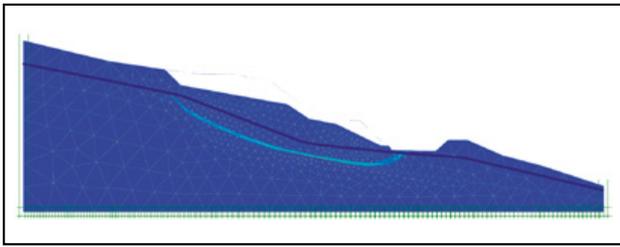


Figura 55. Cinemática de rotura del modelo tras la excavación de 2019 (alternativa 2019b).

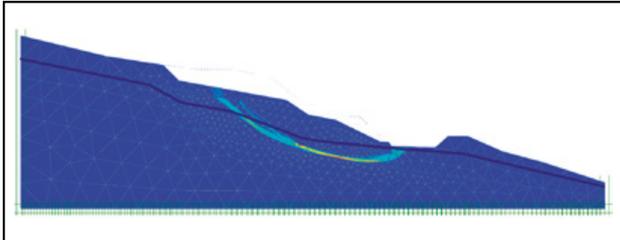


Figura 56. Cinemática de rotura del modelo tras la excavación de 2019 y rebajamiento inicial.

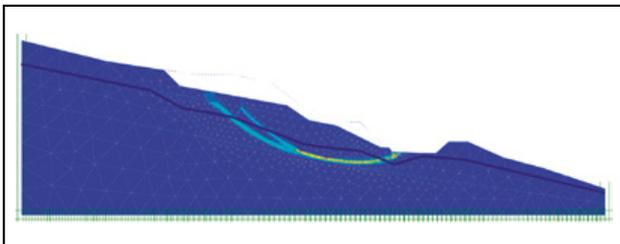


Figura 57. Cinemática de rotura del modelo tras la excavación de 2019 y rebajamiento inicial y calzada corto plazo.

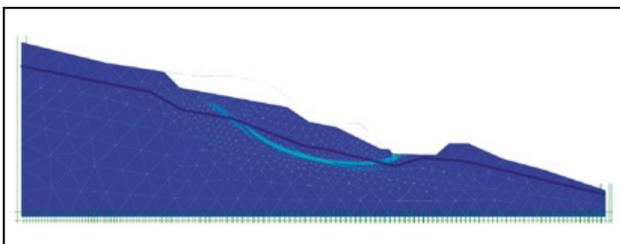


Figura 58. Cinemática de rotura del modelo tras la excavación de 2019 y rebajamiento inicial y calzada largo plazo.

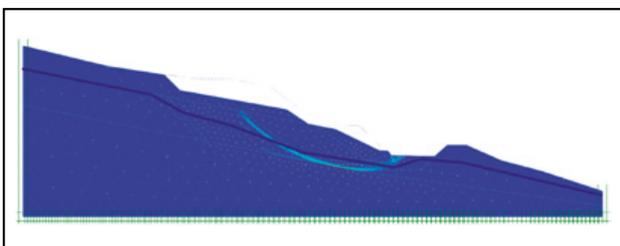


Figura 59. Cinemática de rotura del modelo tras la excavación de 2019 y rebajamiento largo plazo.

que está situada en el pie del deslizamiento objeto de estudio. No está destinada a mejorar la estabilidad de la ladera sino a proteger la calzada de la autovía forzando las deformaciones asociadas a la presencia del desmonte por la “zona fusible”.

En cada módulo de pantalla se podrían dejarán unos tubos pasantes (cilindros sin hormigonar) para poder ejecutar, si así se requiere en el futuro, anclajes que complementen las

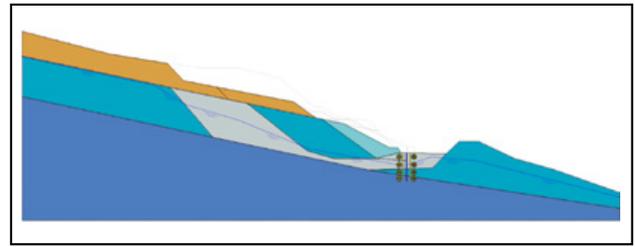


Figura 60. Geometría del modelo tras la excavación de 2019 y rebajamiento largo plazo con pantalla.

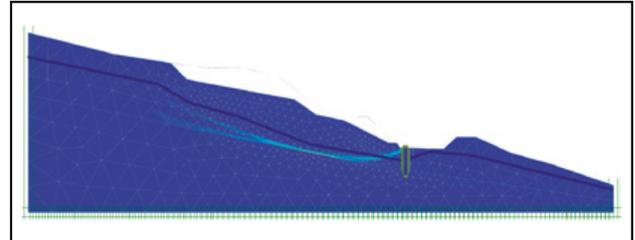


Figura 61. Cinemática de rotura del modelo tras la excavación de 2019 y rebajamiento largo plazo con pantalla.

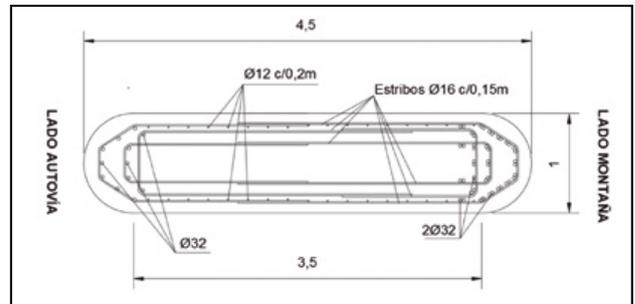


Figura 62. Esquema de la geometría y armado de los módulos de pantalla diseñados.

medidas propuestas. La inclinación de dichos pasadores será de 25° con la horizontal y el diámetro de 125 mm. Adicionalmente los módulos de pantalla se deberían equipar con tuberías inclinométricas para evaluar su comportamiento futuro.

El orden de ejecución de estas obras es importante debido, tanto a las condiciones de seguridad de los trabajos como a la permanencia en el tiempo de las medidas planteadas. En la situación actual se están produciendo deformaciones del orden de 50-60 cm/año, en gran parte localizadas en bandas de cortante. Esto hace que los pozos de drenaje puedan tener una vida útil corta si no se consigue limitar de forma importante dicha velocidad de deformación una vez ejecutados parte de éstos. Sin embargo, en cualquier caso, aunque se corten los pozos como el nivel freático está por encima de la superficie de deslizamiento, la efectividad de los mismos se reduciría pero no se anularía.

Por todo lo anterior se propuso el siguiente proceso de ejecución:

1. Movimiento de tierras (reperfilado) y ejecución de los módulos de pantalla.
2. Ejecución de los pozos “a” (figura 54).
3. Comunicación por gravedad de los pozos “a” a partir de la línea de pozos más próxima a la calzada (con la estabilidad mejorada por la presencia de los módulos de pantalla). Previamente a los trabajos desde el interior de los pozos se debería comprobar, mediante el control topográfico de movimientos y la instrumentación mediante

inclinómetros dispuesta en los módulos de pantalla, que el entorno de los pozos presenta unas condiciones de seguridad adecuadas para el trabajo desde el interior de la línea de pozos más próxima a la calzada.

4. Ejecución del 50 % de los pozos de la alineación superior "c". Estos pozos están situados próximos a la cabecera de la zona inestable y previsiblemente sufrirán deformaciones inferiores a las del resto de los pozos "c". Se debería realizar el 50 % de estos pozos (pozos alternos) y equiparlos mediante bombas para comenzar el drenaje desde ellos según se finalizan con el fin de iniciar el efecto de la estabilización por drenaje y limitar las deformaciones de la ladera.
5. Ejecución del 50 % de los pozos de las dos alineaciones "c" restantes y de la alineación "b" (figura 46). Se podría realizar el 50 % de estos pozos (pozos alternos) y equiparlos mediante bombas para comenzar el drenaje desde ellos según se finalizan.
6. Seguimiento de la instrumentación durante al menos 6 meses para evaluar el efecto estabilizador de los trabajos realizados. A la vista de los resultados de estas medidas se podría decidir la fecha de ejecución de los pozos restantes y, en su caso, se modificaría su diseño siguiendo así el principio de la actuación incremental.

A la fecha de publicación de este artículo se está comenzando a materializar dichas medidas de estabilización.

7. CONCLUSIONES

La construcción y explotación adecuada de las grandes vías de comunicación se puede encuadrar dentro de un concepto genérico de movilidad sostenible ya que permite que los importantes medios empleados puedan ponerse al servicio a la sociedad.

Durante décadas el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) ha venido ejerciendo labores de control y corrección de patologías en las grandes vías de comunicación del territorio nacional, siendo un claro ejemplo de éstas los trabajos realizados en la autovía A-7 que ha sido una autovía de construcción muy compleja debido a la particular configuración tectónica, lito-estructural y orográfica de la zona.

En este artículo se ha descrito el proceso de estabilización seguido en el caso de un deslizamiento de ladera de grandes dimensiones (1.500.000 m³) que actualmente se encuentra en estudio, en el que se ha planteado su corrección en dos fases diferenciadas, estando materializándose, a la fecha de redacción del presente artículo, los trabajos de la segunda fase.

Esta metodología de fases sucesivas permite tanto ir conociendo con mayor detalle la geometría y disposición de materiales involucrados como aquilatar los costes de reparación frente a los que supondría un planteamiento maximalista de la solución.

Se ha ejecutado una extensa campaña de investigación que incluye sondeos, inclinómetros, piezómetros y puntos de control topográfico superficial para permitir un mayor conocimiento del origen de la patología y de los materiales involucrados.

La singular cinemática del movimiento y la orografía de la ladera han motivado que, para el cálculo de estabilidad y sus soluciones, se optara por hacer una modelización numérica que incluye tanto cálculos 2D, que son más habituales y que permiten

una mayor versatilidad, como 3D que son los que, en este caso concreto, se consideró que reproducían el problema de una manera más acertada y son los más oportunos, al menos para la comprensión general del problema en las fases iniciales de análisis.

Como resultado del estudio de la fase primera en el pie del desmonte se excavó una banda de unos 20 m paralela a la calzada. Con esta excavación en la zona de pie de la masa inestable se pretendía crear una zona de debilidad (o "zona fusible") al pie del desmonte para desplazar la salida de la inestabilidad a esa banda evitando que la salida de la cinemática de rotura alcanzase la calzada de la autovía.

El movimiento de tierras se completó con la excavación con una inclinación aproximada del 2H:1V, hasta intersectar con el plano que, siendo paralelo al contacto mármoles-filitas, se encuentra a unos 7,5-10 m en la vertical por encima del contacto. La inclinación del plano de excavación en mármoles es aproximadamente de unos 9° (similar, lógicamente, al contacto mármoles-filitas) y se extiende hasta que se intersecta con un plano de excavación 1H:1V que se sitúa unos 20 m ladera arriba de las grietas.

Es importante indicar que cuando se realizan trabajos de estabilización en un deslizamiento de grandes dimensiones, tal y como es el referido en el presente documento, es demasiado atrevido pensar que los movimientos se van a detener de forma instantánea y total. Por el contrario, el proceso habitual es que tras los trabajos de estabilización la velocidad de los movimientos disminuya notablemente a lo largo de un periodo de tiempo que se mide en meses debido, entre otros aspectos, a que la masa deslizada no es un sólido rígido y se tiene que ir acomodando a su nuevo estado tensional.

Con las medidas de movimientos de los elementos dispuestos a tal fin se pudo comprobar que, aunque se mantiene una evolución significativa de movimientos en la ladera, se ha conseguido que el pie del deslizamiento salga por la berma creada para facilitar su salida ("zona fusible"), no afectando a la calzada en esta zona.

Se han planteado, como trabajos de estabilización en la segunda fase, una combinación de reperfilado y reducido movimiento de tierras, ejecución de una red de pozos y elementos de contención en la "zona fusible".

El empleo de la solución estabilizadora de los pozos, que en la primera fase fue descartada por su problemática, se presenta en la segunda fase como factible debido a las excavaciones realizadas (fase primera) y planteadas (fase segunda) que eliminan o reducen de forma significativa el espesor de los mármoles a atravesar.

Por otra parte, los elementos estructurales que se han planteado con objeto de proteger la calzada de la autovía de las posibles deformaciones debido al hecho de que está situada en el pie del deslizamiento objeto de estudio, no están destinados a mejorar la estabilidad de la ladera.

Finalmente es necesario explicitar el éxito del uso de dicha "zona fusible" para limitar la afección del deslizamiento a la calzada de la autovía.

8. AGRADECIMIENTOS

Se desea agradecer su dedicación a las personas que han colaborado en los trabajos a los que se refiere este documento, tanto de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana como de la empresa constructora que realizó los trabajos de estabilización de la primera fase.