

MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO ACTUALIZADO DE LA LADERA DEL ESTRIBO DERECHO DE LA PRESA DE YESA (NAVARRA)

JOSÉ MOYA (1), FERNANDO ROMERO-IRIBAS (2), ANA LECHÓN (2) y JOAN MARTINEZ-BOFILL (1)

(1) Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
Universidad Politécnica de Cataluña
jose.moya@upc.edu, joan.martinez-bofill@upc.edu

(2) Asistencia Técnica de la Obra de Yesa
TPF Ingeniería, Acciona, Aecom
obrayesa.fri@gmail.com, obrayesa.alb@gmail.com

RESUMEN

La ladera del estribo derecho de la presa de Yesa está afectada por un gran paleodeslizamiento que mostró movimientos significativos en invierno de 2012-2013. Desde el año 2013, cuando se presentaron la gran mayoría de informes geológicos sobre el caso, se han realizado nuevos sondeos (39) y nuevos inclinómetros (30). Presentamos aquí los primeros resultados de la actualización del modelo geológico-geotécnico de la ladera. Se ha realizado un análisis 3D de la geometría de las dos superficies de rotura mayores y nuevos perfiles geológicos que siguen la dirección de desplazamiento, variable ladera abajo. Por otra parte, se han ensayado a corte directo ocho muestras de planos de estrados en testigos de sondeo, correspondientes a superficies de rotura. Los ensayos sugieren que el ángulo de fricción residual de las superficies de rotura es de unos 19°.

1. INTRODUCCIÓN

Contexto y antecedentes

La presa del embalse de Yesa, situada en el Río Aragón, es una presa de gravedad de 78 m de altura sobre cimientos que está en servicio desde el año 1959, proporcionando un volumen máximo de embalse de 447 hm³. Para aumentar la capacidad de embalse, en el año 1983 se presentó el primer proyecto de construcción de una nueva presa, más alta y situada aguas abajo de la presa actual y apoyada en parte en la misma.

El proyecto fue aprobado finalmente en el año 2000, y su tercera modificación en el año 2011, cuando comenzó la segunda fase de la excavación del apoyo del estribo derecho. En julio de 2012 un inclinómetro mostró una tasa de desplazamiento de 33 mm/año, lo que propició la paralización de la excavación y la activación del Plan de Emergencia del embalse (Gómez, 2018). Los movimientos se aceleraron significativamente a finales del año 2012 y principios del 2013, coincidiendo con lluvias intensas ocurridas desde finales de septiembre de 2012 hasta mediados de febrero de 2013, que acumularon 733 l/m², 300 de ellos caídos en enero de 2013. El 15 de febrero de 2013 el desplazamiento llegó a alcanzar una velocidad de 26 mm/semana. El 7 de febrero de 2013 se iniciaron las obras de emergencia para estabilizar la ladera, que incluyeron la excavación de 1,5 Mm³ de la cabecera del deslizamiento (Gómez, 2018). Los trabajos de estabilización se complementaron en el

año 2019 tras los cuales el movimiento ha pasado a ser prácticamente nulo en la actualidad.

Durante la fase de emergencia del año 2013, la Confederación Hidrográfica del Ebro, encargó varios estudios independientes a expertos en deslizamientos para analizar con detalle la geomorfología y la geología de la ladera y su inestabilidad (Soriano, 2013; Gutiérrez, 2013; Prospección y Geotecnia, 2013, 2014; TYPSA, 2013, 2014; Corominas et al., 2013; Corominas y Mavrouli, 2014). Más recientemente, el Gobierno de Navarra encargó un estudio independiente sobre la estabilidad y la seguridad de la ladera (Geoconsult, 2019).

La estratigrafía de la ladera está compuesta por dos grandes unidades litológicas de edad eocena: las Margas de Pamplona (MP), situada en la base de la serie, y el Flysch de Yesa, definido por una alternancia de areniscas y margas grises, en el que se formó el paleodeslizamiento. Corominas et al. (2013) diferenciaron tres unidades en el Flysch (F1, F2 y F3) en función de la proporción relativa de areniscas y margas, siendo la Unidad F2 eminentemente margosa (Figura 1). La estructura geológica de la ladera consiste en varios anticlinales suaves, situados en la parte alta de la misma, y un pliegue sinclinal con un eje en dirección E-W e inclinación de unos 10° W, ubicado en su parte baja (Corominas et al., 2013; Figura 1).

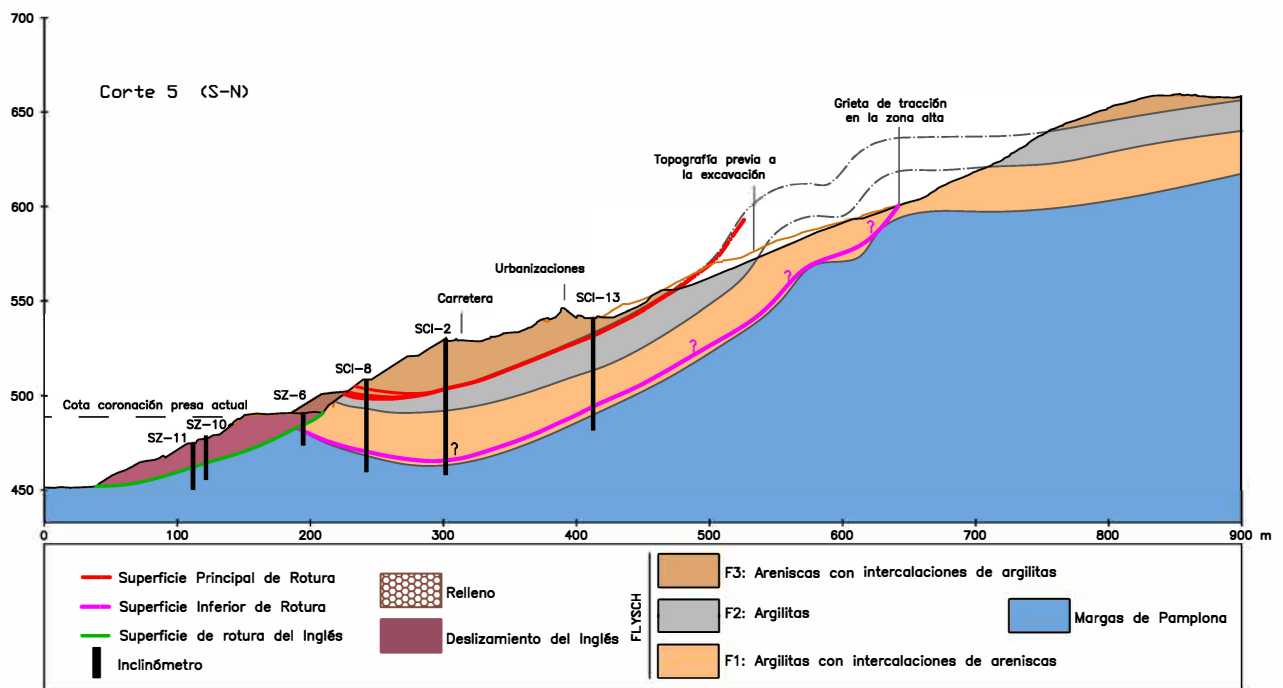


Figura 1. Perfil geológico de la ladera derecha, situado aguas arriba de la presa (Corte 5 del informe de Corominas et al., 2013). La situación del mismo se indica en la Figura 2.

Se identificó que la ladera del estribo derecho de la presa está afectada por un gran paleodeslizamiento (Gutiérrez, 2013). Varios de los informes mencionados mostraron la existencia de dos superficies de rotura mayores y superpuestas, con una geometría de doble cuña, que siguen la estructura del mencionado sinclinal. La superficie de rotura más somera fue la que se mostró más activa desde mediados de 2012; por lo que se la denominó Superficie Principal de Rotura o SPR (Corominas et al., 2013). La SPR pudo localizarse de manera relativamente precisa a partir de las lecturas de 14 inclinómetros, de los desplazamientos observados en superficie en la red de control topográfico y por las grietas y deformaciones observadas en la superficie del terreno. La SPR delimitaba un volumen deslizado de unos 4 Mm³. El pie de esta superficie de rotura aflora a cota superior que la coronación de la presa.

La existencia de una superficie de rotura más profunda y más extensa se identificó por la apertura de una grieta tracción situada en la parte alta de la ladera, fuera del contorno de la SPR, y por los indicios de desplazamiento en seis de los inclinómetros, a profundidades notablemente mayores que la SPR. Esta superficie de rotura se denominó SIR (Superficie Inferior de Rotura). El volumen delimitado por la SIR era inicialmente de unos 12,6 Mm³, aunque pudo ser estimado con notables incertidumbres. El pie de la SIR aflora en la parte baja de la ladera, por debajo de la cota de coronación de la presa donde tiene un buzamiento a contrapendiente. El movimiento según esta superficie de rotura fue probablemente responsable del izamiento de algunos milímetros del extremo derecho de la presa (Corominas et al., 2013).

Tanto la SPR como la SIR tienen un trazado fuertemente controlado por la estructura geológica y suelen estar situadas en tramos concretos de la serie estratigráfica (techo de la Unidad F2 del Flysch y base de la Unidad F1 del mismo, respectivamente, Corominas et al., 2013).

Por otra parte, al pie de la ladera derecha y aguas arribas de la presa se encuentra el deslizamiento de “El Inglés”, de tipo roto-traslacional y con un volumen de unos 0,5 Mm³. Éste es un paleodeslizamiento que sufrió una reactivación importante en el año 1960.

En la ladera se han perforado más de 120 sondeos con recuperación de testigo (63 de ellos de alta calidad). La red de auscultación de desplazamientos de la ladera se ha ido mejorando desde el año 2008 con un total 54 inclinómetros (15 de los cuales se han ido reponiendo) y 79 puntos de control topográfico (Figura 2). Por lo cual el conocimiento de la geología de la ladera y de su movimiento es notable. Desde mediados del año 2013, cuando se presentaron la mayoría de los informes sobre la ladera, se han realizado 41 nuevos sondeos con recuperación de testigo de alta calidad; en 30 de ellos se instalaron nuevos inclinómetros y en otros 6 se instalaron piezómetros enterrados (5 en la SPR y uno en la SIR). En definitiva, la nueva información disponible permite mejorar el conocimiento de la ladera.

A diferencia de la geología de la ladera, el ángulo de fricción de las discontinuidades del Flysch de Yesa, y particularmente el de las superficies de rotura, es peor conocido. Este último se ha estimado mayoritariamente mediante análisis de estabilidad retrospectivos y con un conocimiento limitado de la piezometría. La toma de muestras de una superficie de rotura y su posterior ensayo a corte directo permiten obtener datos valiosos de su ángulo de fricción. En el deslizamiento que nos ocupa, se disponía sólo de los ensayos de dos muestras de planos estriados, que dieron valores de 13.4° y de 19.6° (Corominas y Mavrouli, 2014).

Objetivos

El primer objetivo de este trabajo es actualizar el modelo geológico de la ladera respecto al presentado por Corominas et al. (2013), en el que el primer autor de esta comunicación participó directamente. En concreto, se pretende actualizar la geometría de las dos superficies de rotura mayores (SPR y SIR) a partir de la nueva información disponible. El segundo objetivo es contribuir al conocimiento del ángulo de fricción de las superficies de rotura, mediante el ensayo de muestras de dichas superficies tomadas en los sondeos más recientes.

Estos objetivos se enmarcan en los estudios de mejora de la caracterización de la ladera que se están llevando a cabo a petición de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

2. ACTUALIZACIÓN DEL MODELO GEOLÓGICO

Localización de superficies de rotura en inclinómetros y testigos de sondeos

Se han analizado los registros de los 30 “nuevos” inclinómetros, posteriores al informe mencionado, y revisado los de otros 24 ya utilizados en el año 2013. Su posición se muestra en la Figura 2.

La reconstrucción de superficies de rotura de grandes deslizamientos no suele ser una tarea trivial, ya que suelen presentarse situaciones que no tienen una interpretación simple y única. En la ladera que nos ocupa se han presentado las tres situaciones posibles: a) inclinómetros que muestran desplazamiento a una sola profundidad (en un solo plano de deslizamiento) o a dos profundidades muy distintas (fáciles de distinguir entre sí); b) inclinómetros que muestran desplazamientos a varias profundidades próximas entre sí o en un rango de profundidades (varios planos de deslizamiento cercanos o en una zona de cizalla); c) inclinómetros sin desplazamiento, situados fuera del deslizamiento o dentro del mismo pero ya inactivos.

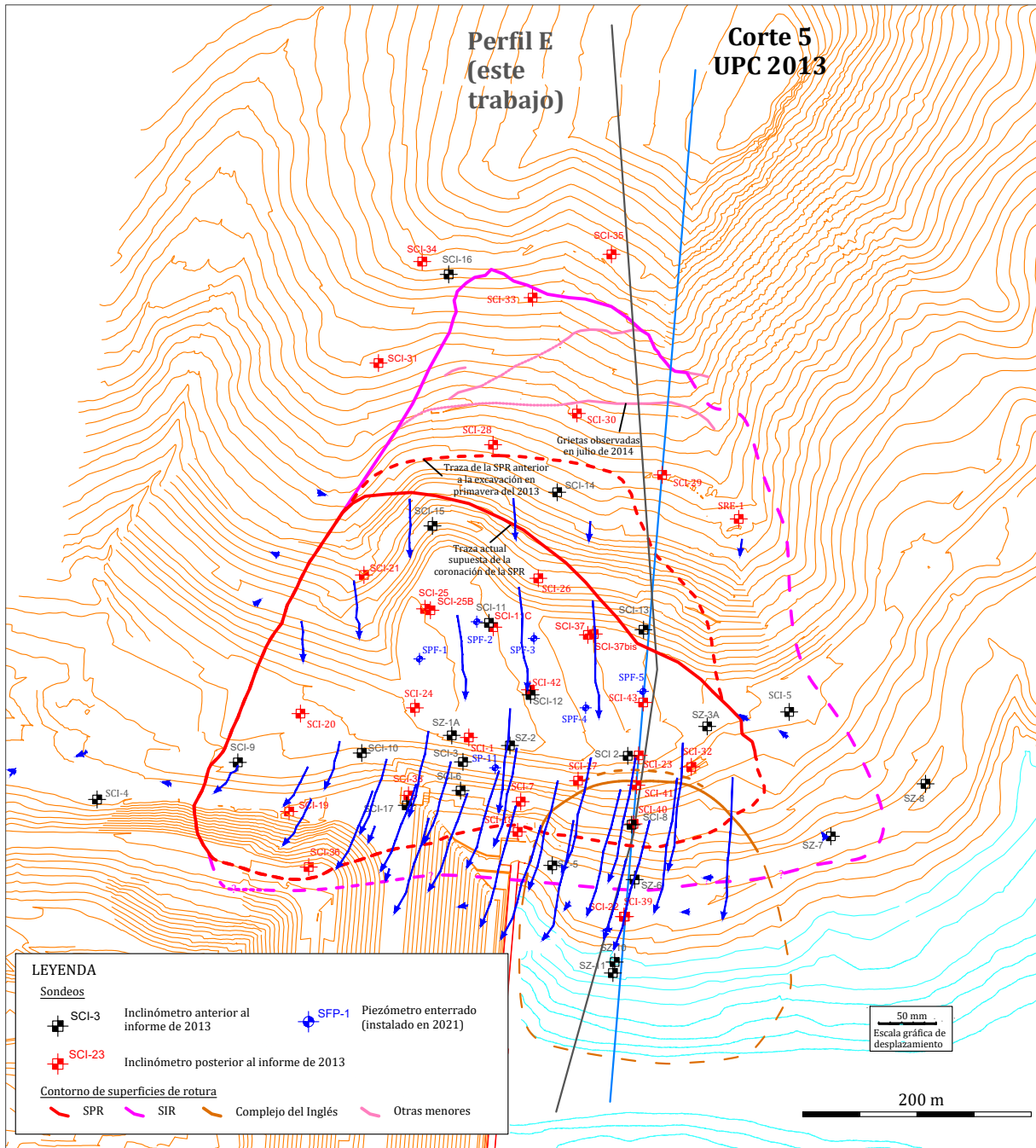


Figura 2. Planta de localización de las superficies de rotura mayores presentes en la ladera derecha de la presa. Se indica también la situación de los inclinómetros y de los piezómetros enterrados instalados en la ladera. Las flechas azules muestran los vectores de desplazamiento horizontal de los puntos de control topográfico medidos entre el 31 de enero y el 4 de marzo de 2013.

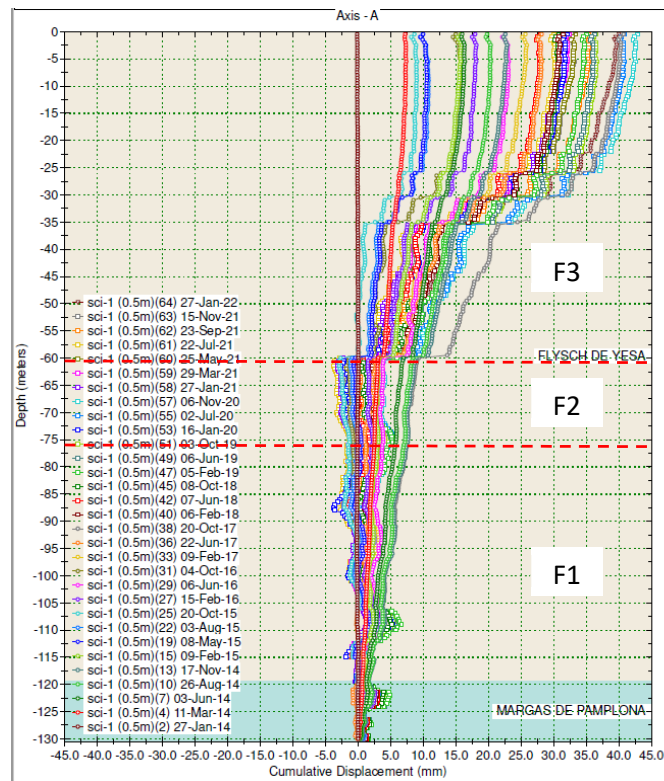


Figura 3. Registro del inclinómetro SCI-1 con planos de deslizamiento situados a varias profundidades.

La Figura 3 muestra un ejemplo de inclinómetro con varios planos de deslizamiento cercanos entre sí y que dificulta la correlación directa con otros inclinómetros. Se detectan planos con desplazamiento a 22, 26, 30, 35 y 60 m de profundidad; todos situados en el Flysch, pero ninguno de ellos con un desplazamiento claramente destacado, que sugiera que se trata de una superficie de rotura mayor (SPR). Por la posición estratigráfica del plano situado a 60 m de profundidad, próxima al techo de la unidad F2 del Flysch, puede interpretarse que corresponde a la SPR.

Por otra parte, en los inclinómetros más recientes no pueden identificarse ni la SPR ni la SIR, ya estabilizadas. Estas circunstancias han dado pie a varias interpretaciones sobre geometría de las superficies de rotura mayores y muestra la necesidad de usar criterios complementarios para su localización en los sondeos y su correlación.

Siguiendo el método utilizado en Corominas et al. (2013), la localización de las superficies de rotura se ha realizado también mediante testificación de estructuras de deformación por cizalla en los sondeos (EDC). Esta tarea es especialmente importante en los inclinómetros sin desplazamiento situados dentro del deslizamiento. Las EDC se tratan tanto de estructuras localizadas en planos (planos con estrías, planos pulidos) como distribuidas en bandas de cizalla (brechas de cizalla, zonas brechoides, zonas con fisuración intensa). Son estructuras relativamente frecuentes en la ladera, ya que la formación de los pliegues que hay en ella implicó un deslizamiento entre capas. Dada la abundancia de dichas estructuras, la testificación se ha priorizado en el entorno de planos de deslizamiento mostrados por los inclinómetros y, en sondeos sin registro de desplazamientos, entorno a la profundidad prevista para la SPR y la SIR en los perfiles geológicos disponibles. En especial, se buscaban planos pulidos y/o con estrías continuas (que atravesasen todo el testigo) en láminas de arcilla y que estuvieran bien preservados (Figura 4). Estos planos finamente estriados son típicamente indicadores de deslizamiento reciente en materiales arcillosos y tienen un valor evidente para ser ensayados a corte directo.

Se han testificado las EDC de un total de 43 sondeos, 31 de ellos posteriores al informe del año 2013, y con especial detalle en los 14 sondeos más recientes, para la búsqueda de muestras.



Figura 4. Planos arcillosos finamente estriados y pulidos en los testigos de sondeos. Izquierda: sondeo SCI-41, a profundidad de 26,7 m. Derecha: sondeo SCI-26, a profundidad de 49,5 m.

Reconstrucción de la geometría de la SPR y de la SIR

Muchos de los sondeos presentan varios planos de deslizamiento (dos, tres o más) en los inclinómetros y/o EDC en los testigos; lo que indica la existencia de superficies de rotura menores, generalmente más superficiales, ya detectada en el informe de 2013. Este hecho da lugar, de entrada, a múltiples interpretaciones sobre la geometría de la SPR y de la SIR.

Consecuentemente, la interpretación de la geometría de estas superficies de rotura se ha tenido que realizar iterativamente. En primer lugar, se prepararon varios perfiles geológicos esquemáticos, correlacionando los planos de deslizamiento en inclinómetros y EDC en testigos de sondeo y teniendo en cuenta que la SPR suele localizarse próxima al techo de la Unidad F2 del Flysch y la SIR en el entorno del techo de las Margas de Pamplona. Este método ha permitido identificar la mayoría de superficies de rotura menores. Después se elaboraron varias series de mapas de cotas (isohipsas) de la SPR y de la SIR. Este tipo de mapas visualizan mejor la geometría de superficies de rotura, que es tridimensional en el caso de la ladera derecha de presa de Yesa.

Para cada sondeo con localización incierta de una superficie de rotura, se fueron probando varias versiones del mapa de isohipsas y se descartaron las que suponían una curvatura excesiva de la superficie, que se consideraron no admisibles o menos viables cinemáticamente.

El mapa de isohipsas de la SPR se muestra en la Figura 5. Como puede verse, la dirección de desplazamiento en la cuña activa del deslizamiento (medida en los hitos topográficos) no sigue la dirección de buzamiento de la SPR (indicada en cada punto por la línea perpendicular a las isohipsas) si no que es marcadamente oblicua (unos 30°); mientras que sí tiende seguirla en la cuña pasiva.

Las isohipsas no marcan bien la geometría de la SPR en la charnela del sinclinal situado en la parte baja de la ladera, ni tampoco en el margen W del deslizamiento, que está delimitado por una zona de cizalla lateral de elevado buzamiento. En estas dos zonas existe en realidad un cambio rápido de orientación de la SPR. En zonas singulares como éstas, la mera interpolación matemática no permite posicionar la superficie de rotura correctamente. Es necesario refinar los mapas de isohipsas en estas zonas utilizando datos de perfiles geológicos, en los que la posición de las superficies de rotura se interpreta teniendo en cuenta la estructura geológica.

la ladera, como pudo medirse en los puntos de control topográfico durante la fase de movimiento rápido ocurrida desde finales del año 2012 y principios del año 2013 (ver Figura 2). De esta forma, puede suponerse que la deformación es plana a lo largo del perfil, por lo cual es formalmente más adecuado para el análisis de estabilidad.

Este perfil es la actualización del Corte 5 del informe de Corominas et al (2013), situado en una posición similar en la ladera (Figuras 1 y 2). La SPR y la SIR se han podido trazar mejor en el nuevo perfil gracias que se disponía de seis sondeos nuevos y a la revisión de uno antiguo (S-20). Uno de los nuevos sondeos ha sido particularmente importante para definir mejor la posición del eje del sinclinal (SCI-41); es decir, del límite entre la cuña activa y la cuña pasiva del deslizamiento.

Las principales novedades del nuevo perfil son los buzamientos aparentes ligeramente menores de la SPR y de la SIR (entre 1° y 8°) y los cambios en la longitud de la cuñas activa y pasiva, que son significativos en el caso de la SIR. Respecto al Corte 5 de la Figura 2, la cuña activa de esta superficie de rotura ha aumentado en un 16% y la cuña pasiva se ha reducido en un 20%.

Para ilustrar el efecto de estos cambios en el análisis de la estabilidad, se ha calculado el factor de seguridad de la SIR en los dos perfiles, considerando la topografía previa a la excavación de la cabecera del deslizamiento en el año 2013. El factor de seguridad de la SIR en el nuevo perfil es entre un 5 y un 8% menor que en el Corte 5, dependiendo del ángulo de fricción utilizado para la superficie de rotura (16 o 20°) y de R_u (0 o 0,1).

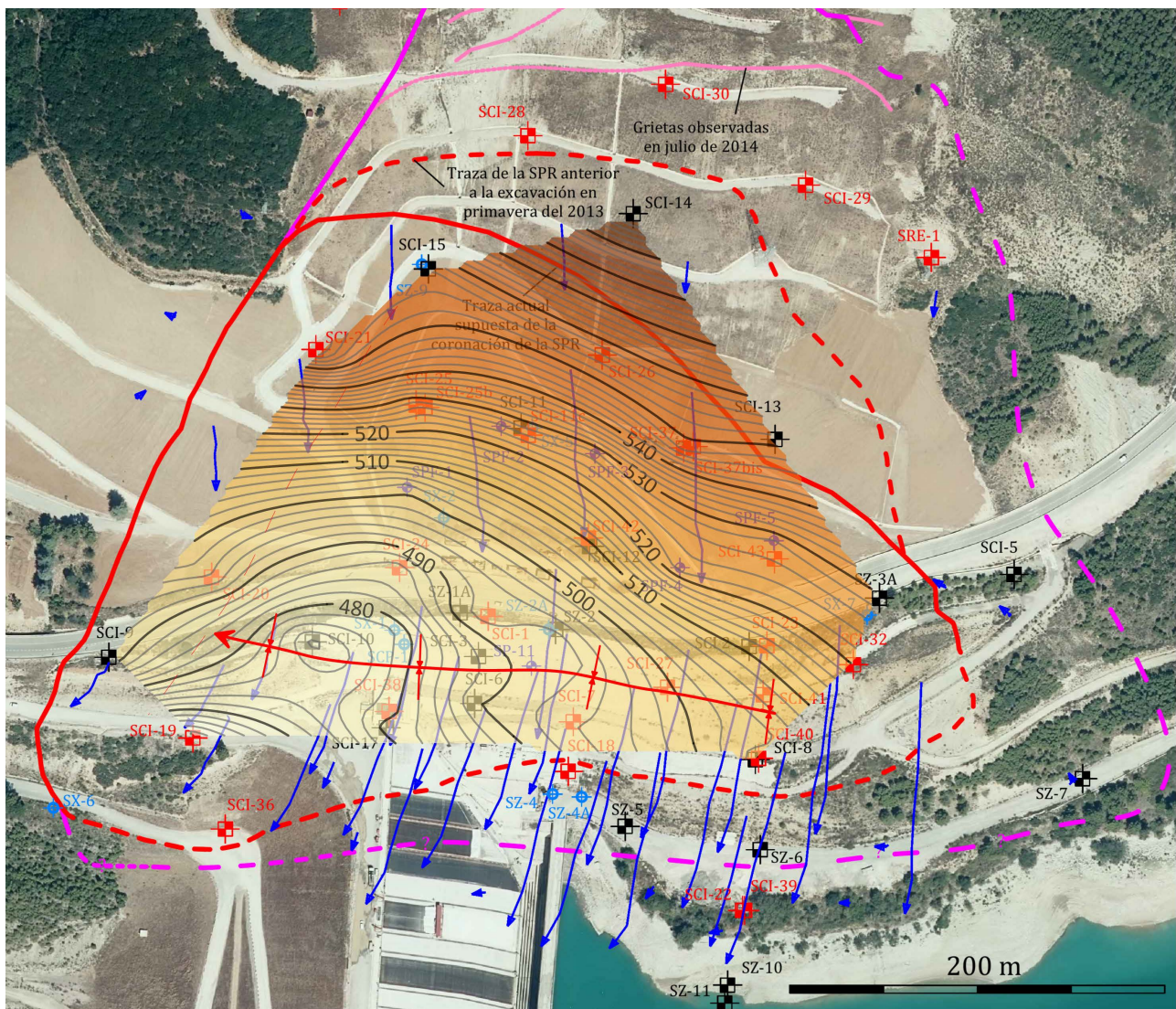


Figura 5. Mapa de isohipsas de la SPR. La línea roja más gruesa marca el contorno de la SPR. En el mapa se muestra la posición del eje del sinclinal, que no está suficientemente bien caracterizado por las isohipsas.

3. ÁNGULO DE FRICCIÓN DE LAS SUPERFICIES DE ROTURA

Consideraciones previas sobre el muestreo de superficies de rotura

La toma de muestras de una superficie de deslizamiento y su posterior ensayo a corte directo constituye una técnica muy valiosa para obtener el ángulo de fricción residual de dicha superficie. El muestreo de testigos de una superficie de rotura implica: su localización previa en el sondeo (con inclinometría o interpolación entre inclinómetros o en un perfil geológico); la testificación de las EDC y la identificación del plano de rotura en los testigos (plano estriado de aspecto reciente y con un buzamiento compatible con el de la superficie de rotura) y, finalmente, la toma de la muestra si el plano estriado está bien conservado y es adecuado para su ensayo.

Hay que destacar, aunque sea evidente, que el éxito de estas dos últimas tareas depende en gran medida de que la calidad del testigo recuperado sea alta, algo difícil de conseguir en terrenos donde alternan capas duras y capas blandas, como ocurre en un flysch. Aún en el caso de que los testigos sean de muy buena calidad y se haya podido identificar el plano de rotura, es muy frecuente que dicho plano se halle roto o descamado (Figura 7).



Figura 7. Planos arcillosos estriados no aptos para su ensayo a corte directo. Izquierda: sondeo SCI-41, a profundidad de 37,0 m. Derecha: sondeo SCI-41: a profundidad de 29,4 m.

Muestreo realizado y ensayo de superficies de rotura

Para la búsqueda de muestras de superficies de rotura se seleccionaron los 14 sondeos más recientes, en los que es más probable encontrar planos arcillosos estriados bien preservados. Nueve de los sondeos tienen inclinómetro instalado (SCI-26 a SCI-30, SCI-32 y SCI-40 a SCI-43; Figura 2). Los 5 restantes (sondeos SPF-1 a SPF-5; Figura 1) se perforaron hasta la profundidad de la SPR tanto para su muestreo como para la instalación de un piezómetro sellado en la misma.

En dichos sondeos se identificaron 43 planos estriados. La gran mayoría de ellos no se muestrearon por no ser adecuados para su ensayo en laboratorio. Finalmente se pudieron tomar muestras de 13 planos. Dada la dificultad de conseguir buenas muestras de las superficies de rotura mayores, varias de las muestras tomadas son de superficies de rotura menores. Si las estrías de estos planos de rotura están bien desarrolladas y son continuas en el testigo, lo que indica un gran desplazamiento, es razonable suponer que su resistencia al corte sea muy similar a la de las superficies de rotura mayores.

Los ensayos de corte directo se realizaron con la muestra saturada, siguiendo la dirección de las estrías y a una velocidad de corte constante de 0.05 mm/min, llegando hasta las condiciones de resistencia residual. Las primeras muestras fueron ensayadas en condiciones de tensión normal convencionales (menores a 200 kPa). Las últimas muestras se ensayaron en el rango de tensiones normales

correspondiente a la profundidad de la muestra. Varias muestras no pudieron ser finalmente ensayadas, ya que no soportaron tensiones normales altas de estos últimos ensayos (se extruyeron o se fragmentaron); se trata de muestras de planos de rotura formados en margas brechificadas.

Finalmente han sido ocho los planos ensayados. Los resultados se presentan en la Tabla 1. La tabla incluye también los resultados de los dos ensayos de superficies de rotura del informe UPC del año 2014 (Corominas y Mavrouli, 2014).

Muestra	Sondeo	Profundidad (m)	Estructura de cizalla observada	Superficie de rotura	σ_n (kPa)	τ (kPa)	Resistencia al corte del plano		Resistencia al corte del grupo (Mohr - Coulomb)							
							ϕ (°)	c (kPa)	Por grupos según σ_n y ϕ		Por grupos según σ_n		Todos los planos			
									ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)		
Tensiones normales máximas de ensayo < 200 kPa																
Planos con resistencia al corte menor																
M-1	SCI-26	49.5	Plano muy pulido (tipo espejo) y estriado con dos generaciones de estrías	Secundaria entre SPR y SIR	39.2 68.6 147.1	10.2 16.4 38.1	14.3	0.0								
M-4	SCI-41	26.65	Plano con estrías finas y muy continuas	SPR rama superior	39.2 88.3 176.5	16.9 23.1 51.3	14.5	4.2	15.0	3.9						
M-7	SCI-42	46.25	Planos con estrías finas y negras	SPR basal	39.2 68.6 147.1	16.0 32.2 49.6	16.3	7.7			20.2	1.3				
Planos con resistencia al corte mayor																
M-3	SCI-30	13.8	Plano pulido y estriado en pátina de óxidos de hierro	Rama de la SIR	39.2 78.5 166.7	18.1 34.5 64.3	19.7	5.0			25.7	0.0				
M-5	SCI-41	38.4	Plano estriado con óxidos de hierro	Secundaria entre SPR y SIR	39.2 88.3 166.7	17.5 49.8 94.6	29.3	0.0								
Tensiones normales máximas de ensayo >200 kPa																
M-8	SPF-3	12.2	Plano arcilloso estriado y pulido (un labio algo partido)	Secundaria sobre SPR	127.5 225.6 490.3	38.1 97.5 225.9	24.2	0.0								
M-11	SPF-3	9.1	Plano arcilloso estriado	Secundaria sobre SPR	78.5 166.7 323.6	34.2 64.3 111.8	17.5	13.7								
M-16	SCI-43	61.95	Plano estriado pulido y brillante en OxFe	Secundaria sobre SIR	813.9 1235.6 1941.7	312.8 460.6 620.7	15.0	107.8	18.8	33.6	18.8	33.6				
UPC14-1	SCI-12	50.5	Plano con lámina de óxidos de hierro pulida y con estrías finas	SPR	292.7 975.5 1951.0	171.7 421.4 464.3	20.1	64.7								
UPC14-2	SCI-10	38.5	Plano arcilloso estriado	Secundaria sobre SPR	292.7 975.5 1951.0	129.1 450.7 694.6	18.5	65.6								
													19.6	11.8		

Tabla 1. Resultados de los ensayos de corte directo de muestras de superficies de rotura de la ladera derecha de la presa de Yesa.

Para tensiones normales convencionales, se distinguen dos grupos de planos en función de su ángulo de fricción y del tipo de material que forma el plano estriado. Los planos arcillosos (como uno de los mostrados en la Figura 4) han dado un ángulo de fricción entre 14 y 16,5° mientras que los planos con óxidos de hierro en su superficie proporcionaron valores entre 20 y 30°, todos ellos con cohesiones aparentes pequeñas (Tabla 1). Los valores medios de cada grupo se han obtenido por regresión en el gráfico de tensión normal – tensión de corte (Figura 8a).

Para tensiones normales altas se observa una dispersión de valores del ángulo de fricción (entre los 15 y los 24°) y generalmente una cohesión aparente significativa, aunque también muy variable (entre 0 y 108 kPa) (Tabla 1), independientemente del material que forma el plano (arcilla o óxidos de hierro). La gráfica de tensión normal – tensión de corte de todos los planos permite ver un patrón más claro, con los puntos relativamente bien alineados según una recta (Figura 8b). Los valores medios de cohesión y de ángulo de fricción de este grupo son de unos 33 kPa y unos 19°.

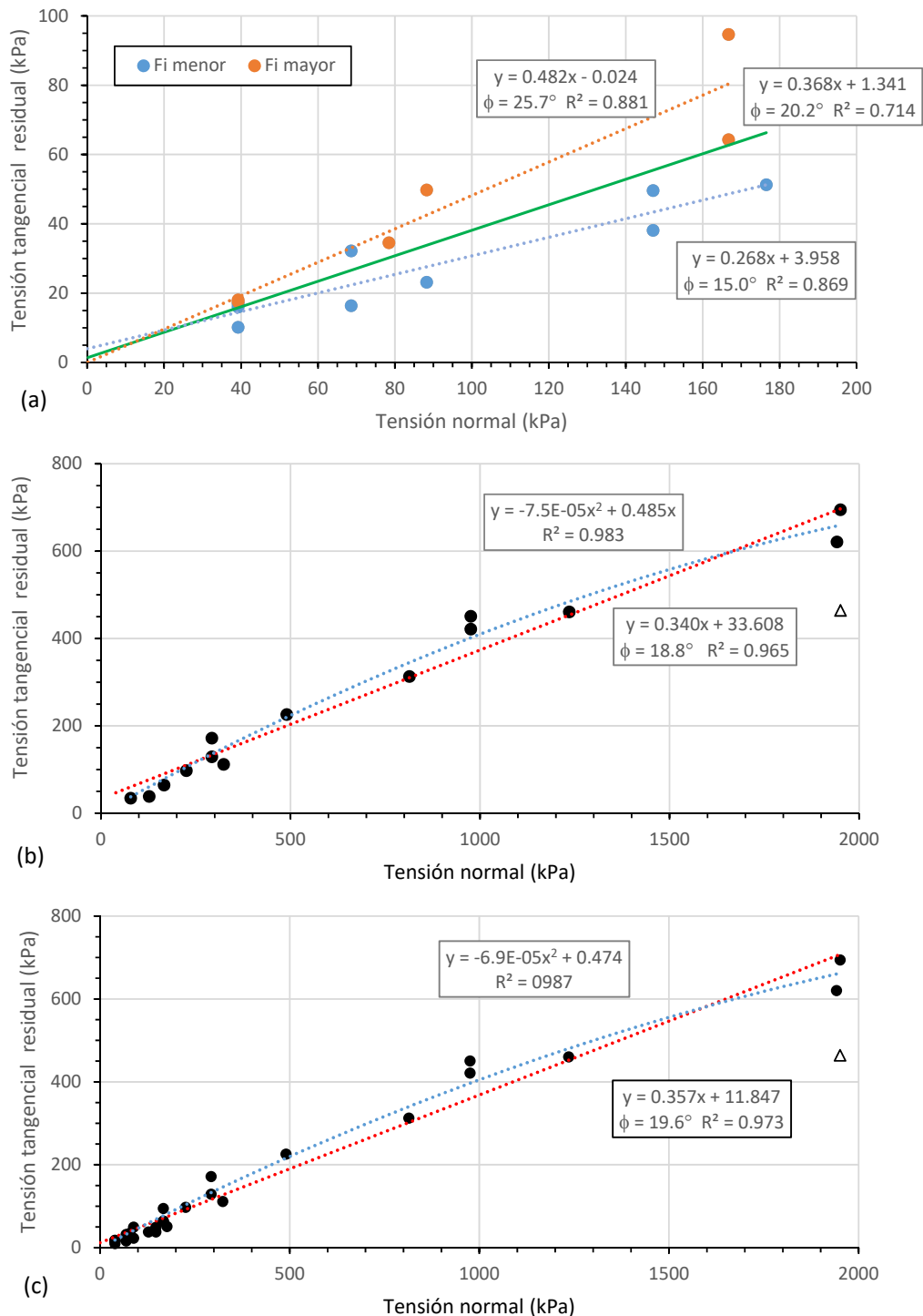


Figura 7. Envolventes de rotura de las muestras ensayadas. (a) Envolventes de los planos ensayados a tensiones normales convencionales, la línea verde corresponde a la envolvente media de todos los planos; (b) envolvente de los planos ensayados a tensiones normales representativas de la profundidad de la muestra; (c) envolvente de todos los planos ensayados. El triángulo de las gráficas (b) y (c) es de un valor considerado anómalo de la muestra UPC14-1.

El ángulo de fricción obtenido por regresión lineal para el conjunto de todos los planos ensayados es de $19,6^\circ$ y la cohesión aparente de unos 12 kPa (Figura 7c). Teniendo en cuenta el rango de tensiones a las que se encuentran la SPR y de la SIR, los resultados anteriores sugieren que el ángulo de fricción residual de las dos superficies de rotura está en torno a los 19° . Estos valores son algo mayores a los obtenidos anteriormente en varios informes sobre la ladera mediante análisis de estabilidad retrospectivos.

Se ha estimado un valor mínimo del ángulo de fricción residual de estas superficies de rotura con un análisis de estabilidad retrospectivo del nuevo perfil, con el método de equilibrio límite, utilizando la topografía de la ladera en el año 2012, anterior a los trabajos de estabilización de emergencia, y considerando presiones de agua nula. Los valores obtenidos son unos 15° para la SPR y de unos 16° para la SIR, coherentes con los resultados de los ensayos.

4. CONCLUSIONES

- La testificación de estructuras de deformación por cizalla ha sido gran valor para la localización de superficies de rotura de la ladera en aquellos sondeos cuyo inclinómetro no muestra desplazamiento, o no es claro, y ha facilitado la correlación de dichas superficies entre sondeos.
- Con frecuencia se han presentado situaciones en las que cabían varias interpretaciones posibles de la geometría de las superficies de rotura mayores (SPR y SIR). La construcción series de mapas de isohipsas de las dos superficies ha permitido identificar los casos cinemáticamente menos viables y reducir considerablemente la incertidumbre en la interpretación.
- En deslizamientos en los que la dirección de desplazamiento cambia a lo largo de la ladera es más adecuado trazar perfiles geológicos no rectilíneos, que sigan siempre dicha dirección. La nueva información disponible ha permitido actualizar el perfil geológico de la zona situada aguas arriba de la presa. En este nuevo perfil, la longitud de la cuña pasiva de la SIR es un 20% menor y la de la cuña activa es un 16 % mayor respecto al perfil trazado en el año 2013 para esta zona. Se ha estimado que la reducción correspondiente del factor de seguridad puede llegar a un 8%, dependiendo del valor de los parámetros utilizados en el análisis.
- Los ensayos de corte directo de diez de planos de rotura muestreados en los testigos sugieren que el valor del ángulo de fricción residual de las superficies de rotura mayores es de unos 19°.

REFERENCIAS

- Corominas, J., Moya, J., Ruiz-Carulla, R. (2013). Modelo geológico e identificación del mecanismo de inestabilidad que afecta de la ladera de la margen derecha de la Presa de Yesa. Departamento de Ingeniería del Terreno. Universitat Politècnica de Catalunya. 138 pp. + anejos.
- Corominas, J. y Mavrouli, O. (2014). Análisis de las condiciones de estabilidad de la ladera de la margen derecha de la Presa de Yesa. Departamento de Ingeniería del Terreno. Universitat Politècnica de Catalunya. 90 pp.
- Geoconsult (2019). Estudio de estabilidad y evaluación de la seguridad de la ladera derecha del Embalse de Yesa. 336 pp.
- Gómez, R. (2018). La Presa de Yesa. XVI Jornada Técnica Anual: casos singulares en la mecánica de rocas. Sociedad Española de Mecánica de Rocas (SEMR). Madrid, 25 de abril de 2018. 20 pp.
- Gutiérrez, F. (2013). Análisis geomorfológico de la ladera derecha de la Presa de Yesa (Río Aragón, Pirineos). Universidad de Zaragoza, 27 pp.
- Prospección y Geotecnia (2013). Evaluación de las condiciones de estabilidad de la ladera derecha en la cerrada del Embalse de Yesa. 120 pp + anejos.
- Prospección y Geotecnia (2014). Condiciones de estabilidad de la ladera derecha del Embalse de Yesa tras las actuaciones llevadas a cabo para su estabilización. 107 pp.
- Soriano, A. (2013). Recrecimiento de la Presa de Yesa. Sobre la seguridad del embalse. Ingeniería del Suelo, 280 pp.
- TYPSA (2013). Estudio de estabilidad de la margen derecha de la Presa de Yesa. 190 pp + anejos.
- TYPSA (2014). Adenda al estudio de estabilidad de la margen derecha de la Presa de Yesa. 240 pp.