



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Departamento de Ingeniería del Terreno,
Cartográfica y Geofísica

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

Barcelona, 12 de Febrero de 2014



Índice de contenidos

Resumen ejecutivo.....	6
1. Introducción	9
2. Objetivo	10
3. Modelo Utilizado.....	11
4. Análisis de Sensibilidad paramétrica.....	15
5. Parámetros de cálculo.....	17
5.1 Geometría	17
5.2 Parámetros resistentes del terreno	23
5.2.1 Superficie de deslizamiento	23
5.2.2 Resistencia del plano de corte	25
5.3 Condición piezométrica.....	26
5.3.1. Presiones de agua generadas por las lluvias	29
5.3.2. Cálculo de las presiones de agua generadas por la infiltración del agua del embalse hacia la ladera	31
5.3.3. Cálculo de las presiones de agua generadas por la infiltración del agua del embalse hacia la ladera en coincidencia con las lluvias	31
6. Calibración del modelo analítico mediante análisis retrospectivo	33
6.1 Referencias para el análisis retrospectivo.....	34
6.1.1 Referencias para la Superficie Principal de Rotura (SPR).....	34
6.1.2 Referencias para la Superficie Inferior de Rotura (SIR).....	37
6.2 Calibración inicial del modelo	41
6.2.1 Calibración de la Superficie Principal de Rotura	42
6.2.2 Superficie Inferior de Rotura.....	46
7. Análisis de la estabilidad de la ladera con la presa recrecida y los elementos de contención e impermeabilización	51
7.1. Superficie Principal de Rotura (SPR).....	53
7.2. Superficie Inferior de Rotura (SIR)	56
8. Análisis de la estabilidad asociada a futuros escenarios.....	59
8.1 Sismo de proyecto.....	59



8.1.1. Superficie Principal de Rotura (SPR).....	60
8.1.2. Superficie Inferior de Rotura (SIR)	63
8.2 Escenario de desembalse rápido y sin pantalla de impermeabilización	66
8.2.1. Superficie Principal de Rotura (SPR).....	68
8.2.2. Superficie Inferior de Rotura (SIR)	72
Comentarios finales.....	75
Anejo 1 – Modelo (Solución analítica)	77
Anejo 2 – Parámetros de cálculo y condiciones de contorno	80



Figura 1. Modelo de doble cuña del deslizamiento definido por la SPR.....	11
Figura 2. Modelo de doble cuña del deslizamiento definido por la SPR.....	12
Figura 3. Velocidades medias (mm/año) obtenidas durante el mes de Marzo de 2013 en las señales de puntería. El perímetro del deslizamiento corresponde al de la SPR.....	13
Figura 4. Velocidades medias (mm/año) obtenidas durante el mes de Mayo de 2013 en las señales de puntería. El perímetro del deslizamiento corresponde al de la SPR.....	14
Figura 5. Análisis de sensibilidad paramétrica del ángulo de fricción de la superficie de rotura (tan fi), el ángulo de inclinación de la superficie de rotura en la cuña activa (alpha) y pasiva (beta) y de las propiedades resistentes del material (Flysch de Yesa) que constituye el plano axial (Cr y tanφr)	15
Figura 6. Análisis de sensibilidad paramétrica del ángulo de fricción en función de la presión de agua.....	16
Figura 7. Límites identificados del deslizamiento para la SPR (rojo) y la SIR (verde).....	17
Figura 8. Localización de las señales de puntería situadas en el entorno de la urbanización de Lasaitasuna, fuera del perímetro del deslizamiento identificado (V-02, V-03, V-04, V-39, V-44, V-46). La línea roja continua corresponde al límite occidental de la SPR establecido por la asesoría técnica y en el informe UPC (2013).....	18
Figura 9. Desplazamientos medidos durante 2013 en las señales de puntería situadas en el entorno de la urbanización de Lasaitasuna, fuera del perímetro del deslizamiento identificado (puntos V-01, V-02, V-03, V-04, V-39, V-44, V-46)	18
Figura 10. Situación de los cortes geológicos longitudinales y transversales. Vectores de desplazamiento acumulado en el pie de la ladera de Octubre 2012 a 7 de Febrero de 2013 ...	20
Figura 11. Perfil UPC_0 con indicación de la SPR (línea color rojo), la SIR (línea color fucsia), la superficie topográfica del terreno previa a los trabajos de recrecimiento de la presa (línea color negro a trazos) y la superficie resultante de los trabajos de excavación y descabezamiento del deslizamiento en la ladera de Marmayor (línea negra continua).....	21
Figura 12. Perfil UPC_1 con indicación de la SPR (línea color rojo), la SIR (línea color fucsia), la superficie topográfica del terreno previa a los trabajos de recrecimiento de la presa (línea color negro a trazos) y la superficie resultante de los trabajos de excavación y descabezamiento del deslizamiento en la ladera de Marmayor (línea negra continua).....	21
Figura 13. Perfil UPC_2 con indicación de la SPR (línea color rojo), la SIR (línea color fucsia), la superficie topográfica del terreno previa a los trabajos de recrecimiento de la presa (línea color negro a trazos) y la superficie resultante de los trabajos de excavación y descabezamiento del deslizamiento en la ladera de Marmayor (línea negra continua).....	22
Figura 14. Perfil UPC_3 con indicación de la SPR (línea color rojo), la SIR (línea color fucsia), el deslizamiento del Inglés (línea color verde), la superficie topográfica del terreno previa a los trabajos de recrecimiento de la presa (línea color negro a trazos) y la superficie resultante de los trabajos de excavación y descabezamiento del deslizamiento en la ladera de Marmayor (línea negra continua)	22
Figura 15. Resultados del ensayo de corte directo realizado sobre un plano de cizalla situado a 50m de profundidad en el sondeo SCI-12, en la formación de Flysch de Yesa.....	24



Figura 16. Resultados del ensayo de corte directo realizado sobre un plano de cizalla situado a 35,8m de profundidad en el sondeo SCI-10, en la formación de Flysch de Yesa.....	25
Figura 17. Evolución de las presiones de agua en el piezómetro de cuerda vibrante instalado en el tubo inclinométrico SCI-6, a la profundidad de la SPR.....	27
Figura 18. Detalle del descenso del nivel de agua en el inclinómetro/piezómetro SCI.....	27
Figura 19. Rezumes (flechas amarillas) en el contacto entre las areniscas y arcillitas del flysch de Yesa, en los desmontes de la antigua N-240. Nótese el aspecto húmedo del suelo.....	28
Figura 20. Simulación del nivel freático de la ladera de la margen derecha a partir una cota de embalse de 485m (extraído de Arce, 2008).....	29
Figura 21. Presiones generadas en el deslizamiento por el agua de la lluvia y en ausencia de embalse (o con el embalse vacío).	30
Figura 22. Presiones generadas por el agua en el embalse. Caso particular del pie del deslizamiento parcialmente sumergido en el embalse.	31
Figura 23. Línea piezométrica generada por la combinación de la filtración desde el embalse y el agua de la lluvia. Caso particular del pie del deslizamiento parcialmente sumergido en el embalse.	32
Figura 24. Velocidades de deslizamiento observadas en distintos inclinómetros instalados en la ladera de la margen derecha de la presa de Yesa.....	36
Figura 25. Movimientos verticales medidos en distintas secciones de la coronación de la presa entre 1996 y 2012 (fuente: Asistencia Técnica).....	38
Figura 26. Situación de los bloques de presa en las proximidades del estribo derecho de la presa de Yesa (fuente: Asistencia Técnica).....	39
Figura 27. Desplazamientos (izamiento) de los puntos de control instalados en los bloques de la presa actual durante el periodo abril 2010 y Octubre 2012.....	40
Figura 28. Tasas de movimiento en la SIR, obtenidas de la interpretación de los registros inclinométricos entre Febrero de 2009 y Agosto de 2013(arriba) y su detalle a partir de Diciembre de 2012 (abajo).....	40
Figura 29. Superficie piezométrica obtenida mediante modelización hidrológica de la ladera de la margen derecha de Yesa considerando la cota máxima de embalse de la presa actual (Arce, 2008).....	47
Figura 30. Ejemplo de perfil del muro jardinera, cargas de anclajes y pesos respectivos (Eje 2 – información facilitada por la Asistencia Técnica).....	52
Figura 33. Simulación del nivel freático de la ladera de la margen derecha generado por la infiltración desde una cota de embalse de 511m, sin pantalla de impermeabilización (obtenido de Arce, 2008). Situación de los perfiles analizados (UPC_0 a UPC_3).....	67



Resumen ejecutivo

El objeto de este informe es presentar los resultados del análisis sobre las condiciones de estabilidad de la ladera de la margen derecha de la Presa de Yesa. El procedimiento que ha sido utilizado consiste en resolver de forma analítica el equilibrio de fuerzas para la geometría del deslizamiento establecida en el informe de la UPC de Julio de 2013.¹

El punto de partida es el modelo hidromecánico 2D del deslizamiento traslacional de doble cuña de la ladera, cuya estabilidad se calcula con la solución propuesta por Pinyol y Alonso (2010). El análisis se lleva a cabo para cada una de las dos superficies de rotura identificadas en la ladera: la Superficie Principal de Rotura (SPR) y la Superficie Inferior de Rotura (SIR).

La geometría del deslizamiento es la definida en el citado informe de Julio de 2013. Para realizar el análisis, la geometría del deslizamiento se simplifica y se modifica de acuerdo con las principales fases de la excavación de la ladera iniciada en Febrero de 2003. Los parámetros resistentes de las superficies de deslizamiento se han determinado inicialmente a partir de ensayos de corte directo efectuados sobre superficies obtenidas en muestras de testigos de sondeo y posteriormente, han sido ajustados mediante calibración.

Se han confeccionado cuatro perfiles en los que se han efectuado tres tipos de análisis. En primer lugar se ha procedido al análisis retrospectivo con la intención de reproducir el comportamiento de la ladera de Yesa durante las diversas fases de excavación. Para ello, se ha partido de hipótesis razonadas sobre las condiciones hidrológicas de la ladera y se ha procedido cotejar los factores de seguridad (FS) obtenidos con desplazamientos medidos mediante el sistema de auscultación existente en la presa y la ladera. El análisis retrospectivo se ha utilizado para el tarado del modelo y el ajuste de los parámetros resistentes.

Para la SPR, las principales referencias que han servido para ajustar el análisis retrospectivo son las siguientes:

- (a) Situación previa al inicio de las excavaciones en 2003
- (b) Septiembre de 2011, primeros indicios de inestabilidad
- (c) Septiembre de 2012, inestabilidad manifiesta
- (d) Crisis de Enero-Febrero de 2013, con el aumento de la velocidad de los desplazamiento de la ladera
- (e) Inicio de los trabajos de excavación y descarga de la ladera a finales de Febrero
- (f) Mayo de 2013, primera fase de descabezado del deslizamiento e inicio de la fase de estabilización

¹ J. Corominas. Modelo Geológico y Mecanismo de Inestabilidad que afecta la ladera de la margen derecha de la Presa de Yesa. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. UPC-BarcelonaTech. 17 Julio de 2013.



Para la SIR, las principales referencias que han servido para ajustar el análisis retrospectivo son las siguientes:

- (a) Situación previa al inicio de las excavaciones en 2003
- (b) Mayo de 2003, primeros indicadores de posible inestabilidad
- (c) Mayo de 2004, fase de movimientos extremadamente lentos
- (d) Septiembre de 2011, incremento de las velocidades
- (e) Crisis de Enero-Febrero de 2013
- (f) Inicio de los trabajos de excavación y descarga de la ladera a finales de Febrero
- (g) Mayo de 2013, primera fase de descabezado del deslizamiento e inicio de la fase de estabilización

En segundo lugar, una vez calibrado el modelo, se ha procedido a analizar las condiciones de estabilidad en los cuatro perfiles seleccionados teniendo en cuenta la nueva geometría de la ladera una vez descabezado el deslizamiento, los elementos de contención diseñados y en proceso de ejecución (muros jardinera anclados), la pantalla de impermeabilización y la presa recrecida, para distintas situaciones pluviométricas.

En tercer lugar, se han analizados dos escenarios. El primero contempla la ocurrencia del sismo de cálculo, para un periodo de retorno de $T=1000$ años, en coincidencia con diversas situaciones pluviométricas. El segundo la ausencia o el posible daño de la pantalla de impermeabilización.

Los resultados obtenidos para la SPR en los cuatro perfiles seleccionados muestran que el nuevo perfil topográfico resultante del descabezamiento del deslizamiento junto con los elementos contención y anclaje, proporcionan factores de seguridad comprendidos entre 1,19 y 1,39 en situaciones ordinarias ($R_u=0,025$), entre 1,16 y 1,37 ante una situación similar a la de Enero-Febrero de 2013, con un periodo de retorno de 37 años ($R_u=0,05$). La coincidencia de un sismo con un periodo de retorno de 1000 años y un episodio lluvioso similar al de Enero-Febrero de 2013, da lugar a FS superiores a la unidad en todos los casos. Hay que tener en cuenta que la probabilidad anual de ocurrencia de este escenario es de $2,7 \times 10^{-5}$. En el caso de daño en la pantalla de impermeabilización también se obtienen FS superiores a la unidad incluso en los escenarios pluviométricos más desfavorables considerados ($R_u=0,1$). Sólo en el caso que además hubiera un desembalse rápido, uno de los perfiles, el UPC_3_SIR, no tendría garantizada la estabilidad.

Los resultados obtenidos para la SIR en los cuatro perfiles seleccionados muestran que el nuevo perfil topográfico resultante del descabezamiento del deslizamiento, junto con los elementos contención y anclaje, y la presa recrecida proporcionan un factor de seguridad de entre 1,23 y 1,34 en situaciones ordinarias ($R_u=0,025$), entre 1,19 y 1,31 ante una situación similar a la de Enero-Febrero de 2013 ($R_u=0,05$). La ocurrencia de un sismo con un periodo de retorno de 1000 años coincidiendo con situaciones pluviométricas ordinarias e incluso más severas que las observadas en el episodio de Enero-Febrero de 2013 da lugar a FS superiores a



la unidad en todos los perfiles analizados. La probabilidad anual de ocurrencia de este escenario es de $2,7 \times 10^{-5}$. En el escenario de ausencia o daño en la pantalla de impermeabilización también se obtienen FS superiores a la unidad incluso en los escenarios pluviométricos más desfavorables considerados ($R_u=0,1$). Sólo en el caso que además hubiera un desembalse rápido, uno de los perfiles, el UPC_3_SIR, no tendría garantizada la estabilidad.



1. Introducción

En Octubre de 2013, la Confederación Hidrográfica del Ebro encarga al Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica de la Universitat Politècnica de Catalunya (en adelante, UPC) un informe sobre las condiciones de estabilidad de la margen derecha de la Presa de Yesa una vez hayan concluido los trabajos de contención y estabilización en curso de ejecución, la presa actual haya sido recrecida con una nueva presa de tierras y se haya ejecutado una pantalla de impermeabilización. Para ello, se han considerado también diversos escenarios.

Este informe ha sido preparado por Olga-Christina Mavrouli, Doctora Ingeniera Civil y Jordi Corominas, Doctor en Geología y Catedrático de Ingeniería del Terreno. Se ha contado asimismo con la colaboración de Núria Pinyol, Roger Ruiz y José Moya, miembros del Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica de la UPC.

En este informe se presenta el método de análisis de estabilidad que ha sido utilizado, los parámetros de entrada y los criterios para su selección, el tarado del modelo mediante el análisis de sensibilidad paramétrica y el análisis retrospectivo del proceso de inestabilidad generado en la ladera, el análisis de las condiciones de estabilidad de la ladera una vez hayan concluido las labores de contención y estabilización de la misma así como la nueva presa y el análisis de estabilidad ante la ocurrencia del sismo de cálculo ($T=1000$ años) y la ausencia o daño en la pantalla de impermeabilización.

El informe incluye la memoria explicativa y los siguientes anejos de documentación:

Anejo 1 – Modelo (Solución analítica)

Anejo 2 – Parámetros de cálculo y condiciones de contorno



2. Objetivo

El objetivo de este informe es la evaluación de las condiciones de estabilidad de la ladera de la margen derecha de la Presa de Yesa considerando la nueva geometría resultante del descabezado del deslizamiento, los elementos de contención diseñados (muros anclados), la nueva presa de tierras, y la pantalla de impermeabilización. Todo ello teniendo en cuenta escenarios hidrológicos de magnitud creciente y el sismo de cálculo.

Para ello se ha considerado necesario realizar, en primer lugar, un análisis retrospectivo con objeto de reproducir el comportamiento de la ladera desde el inicio de las excavaciones en 2003 y ajustar así los parámetros resistentes así como determinar las condiciones hidrológicas que serán utilizados para el análisis de los escenarios futuros. El análisis retrospectivo es una herramienta utilizada con frecuencia para determinar las causas de la rotura de las laderas y estimar los parámetros resistentes, las presiones de agua u otras condiciones existentes en el momento de la rotura.

El análisis de los escenarios futuros se lleva a cabo con los parámetros determinados en el análisis retrospectivo.

En la presente memoria se han tratado los puntos siguientes:

- a) Descripción del procedimiento de análisis utilizado
- b) Definición de las condiciones de contorno y selección de los parámetros resistentes de los materiales que componen la ladera derecha de la Presa de Yesa
- c) Análisis retrospectivo y calibración del modelo analítico
- d) Análisis de la estabilidad de la ladera considerando las medidas de contención y estabilización, así como el recrecimiento de la presa y la futura pantalla de impermeabilización
- e) Análisis de la estabilidad de la ladera considerando un escenario de ocurrencia del sismo de cálculo
- f) Análisis de la estabilidad de la ladera en ausencia de pantalla de impermeabilización o por daño de la misma

3. Modelo Utilizado

En el informe UPC (2013) se concluye que la ladera derecha de la Presa de Yesa está afectada por un deslizamiento traslacional, con una geometría en doble cuña (Figura 1). Se identificaron dos superficies de rotura denominadas Superficie Principal de Rotura (SPR) y Superficie Inferior de Rotura (SIR). La SPR se desarrolla a través del nivel de argilitas de la Unidad F2 de la Formación del Flysch de Yesa, acomodándose a la disposición de los estratos. La SIR se desarrolla en gran medida próxima al contacto entre la unidad inferior del Flysch de Yesa (F1) y la Unidad de Margas de Pamplona (MP).

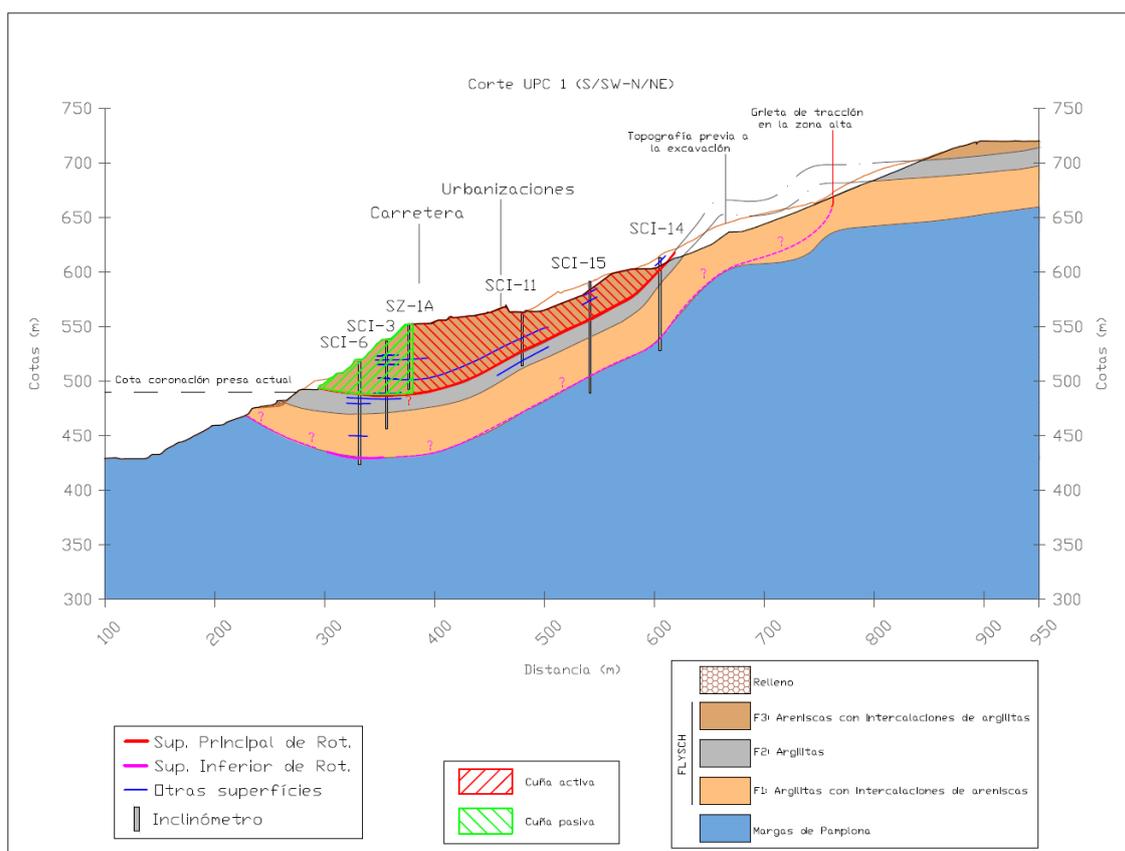


Figura 1. Modelo de doble cuña del deslizamiento definido por la SPR.

En el análisis de la estabilidad de la ladera inestable es fundamental la definición precisa de la geometría del deslizamiento. En algunos de los perfiles, la presencia de un pliegue sinclinal en la base de la ladera da lugar a una forma similar a un arco circular o de “L” abierta” en la superficie de deslizamiento. Esta geometría se puede simplificar como una doble cuña cuya parte superior actúa a modo de cuña activa (ABV de la Figura 2) y la inferior como cuña pasiva (ABC de la Figura 2).

El análisis de estabilidad que ha sido realizado, se basa en el procedimiento desarrollado por Alonso et al. (2010)². Se considera que ambas cuñas se mueven a la misma velocidad (en módulo), lo que implica que los bloques se deslizan como un sólido rígido (sin extensión ni compresión) como ocurre en un tren. La doble cuña tiene otra particularidad y es que para que exista compatibilidad de movimiento, debe generarse un **plano de corte o de charnela** (Plano AB, en la Figura 2), a lo largo del cual tiene lugar un movimiento relativo entre ambas cuñas que genera una resistencia al deslizamiento.

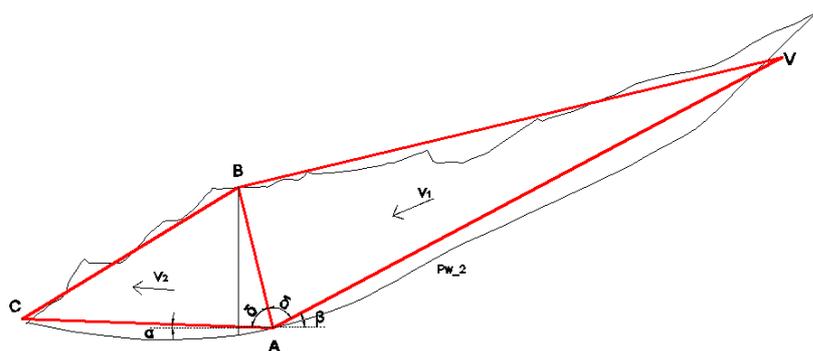


Figura 2. Modelo de doble cuña del deslizamiento definido por la SPR.

A efectos de cálculo, el plano AB se corresponde con la bisectriz del ángulo (2δ) que forman los dos planos de deslizamiento (AV y AC).

Los planos basales de las cuñas inferior (cuña pasiva) y superior (cuña activa) están inclinados con un ángulo α y β , respectivamente. De acuerdo con las observaciones recogidas en el informe UPC (2013), se considera que los planos basales se encuentran en condiciones de resistencia residual.

Las ecuaciones de equilibrio estricto del sistema se plantean en cada bloque por separado. A partir de la imposición de que el deslizamiento total avanza como un único bloque, se obtienen las ecuaciones que gobiernan el movimiento del deslizamiento. Las superficies de deslizamiento bajo cada bloque se analizan de forma independiente. La masa de cada bloque, así como la resistencia al corte, serán diferentes. Se obtienen siete ecuaciones con siete incógnitas (entre ellas el Factor de Seguridad, FS) que se resuelven mediante el programa Maple. El FS para cada perfil se calcula mediante una hoja Excel. Los detalles del análisis se incluyen en el Anejo 1 – Modelo (Solución analítica).

² Alonso, E.; Pinyol, N. y Puzrin, A.M. 2010. Geomechanics of Failures. Advanced topics. Springer, Dordrecht. 277pp.

Para verificar el criterio de que ambas cuñas se desplazan a la misma velocidad, se han calculado las velocidades mensuales promedio de las señales de puntería presentes en la ladera (ver a modo de ejemplo la Figura 3 y Figura 4). Las mediciones mensuales confirman que las velocidades de desplazamiento son del mismo orden de magnitud para el conjunto del deslizamiento, con la excepción del extremo occidental (al W de la grieta de tracción) que lo hace a menor velocidad lineal debido al confinamiento que le produce la rotación del movimiento.

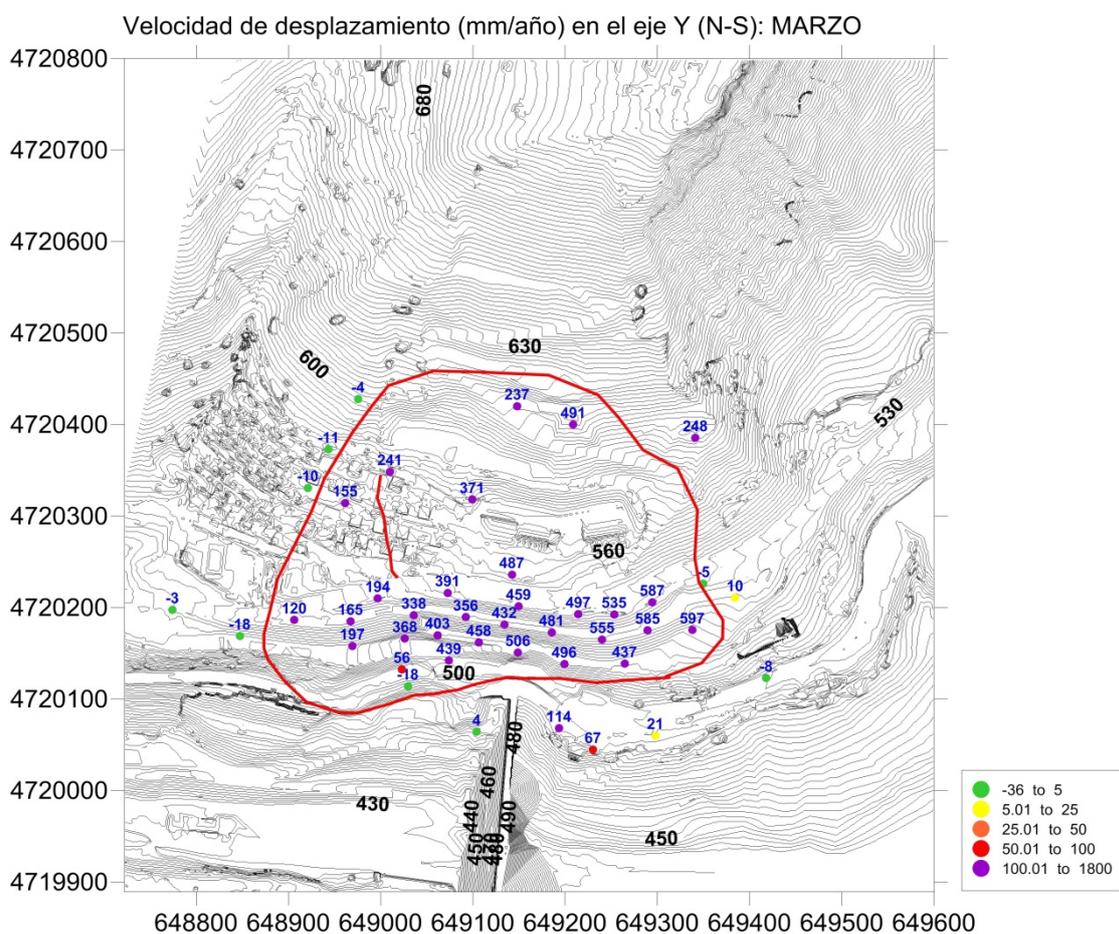


Figura 3. Velocidades medias (mm/año) obtenidas durante el mes de Marzo de 2013 en las señales de puntería. El perímetro del deslizamiento corresponde al de la SPR

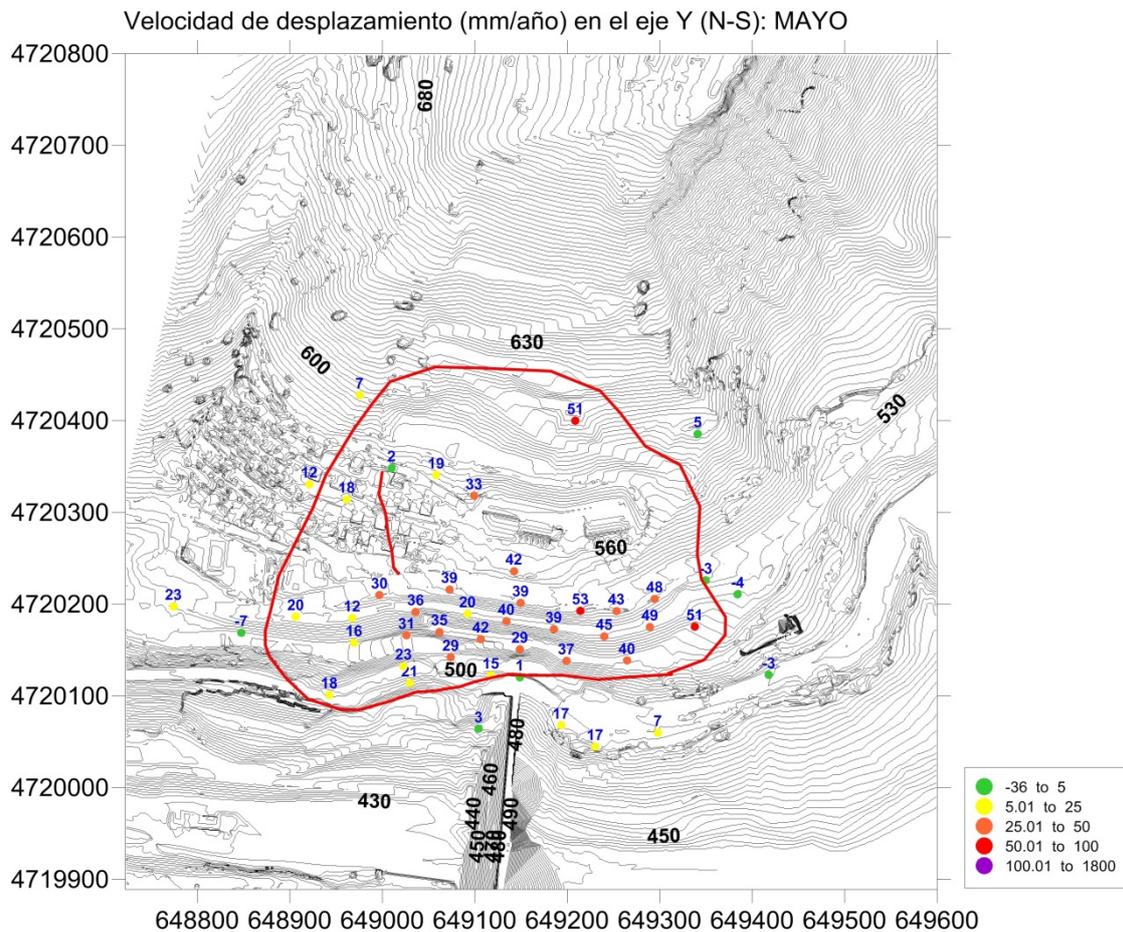


Figura 4. Velocidades medias (mm/año) obtenidas durante el mes de Mayo de 2013 en las señales de puntería. El perímetro del deslizamiento corresponde al de la SPR.

Es importante notar que el error de medida es del orden de algunos milímetros. Por este motivo, cuando los desplazamientos observados entre una campaña de medidas y la siguiente son pequeños (por debajo de los 5mm), las velocidades obtenidas pueden ser inconsistentes (valores negativos). Valores por debajo de 5mm/año o negativos se interpretan como ausencia de movimiento.

Las velocidades medias se expresan en mm/año y se han obtenido multiplicando por 12 la velocidad media mensual.

4. Análisis de Sensibilidad paramétrica

Antes de proceder con el análisis retrospectivo, se ha realizado un análisis de sensibilidad paramétrica.

Se ha evaluado el efecto de la variabilidad en la geometría de las cuñas, en particular el ángulo de la superficie de rotura, el ángulo de fricción y las características resistentes del plano de corte o charnela. La Figura 5 muestra de manera sintética los resultados.

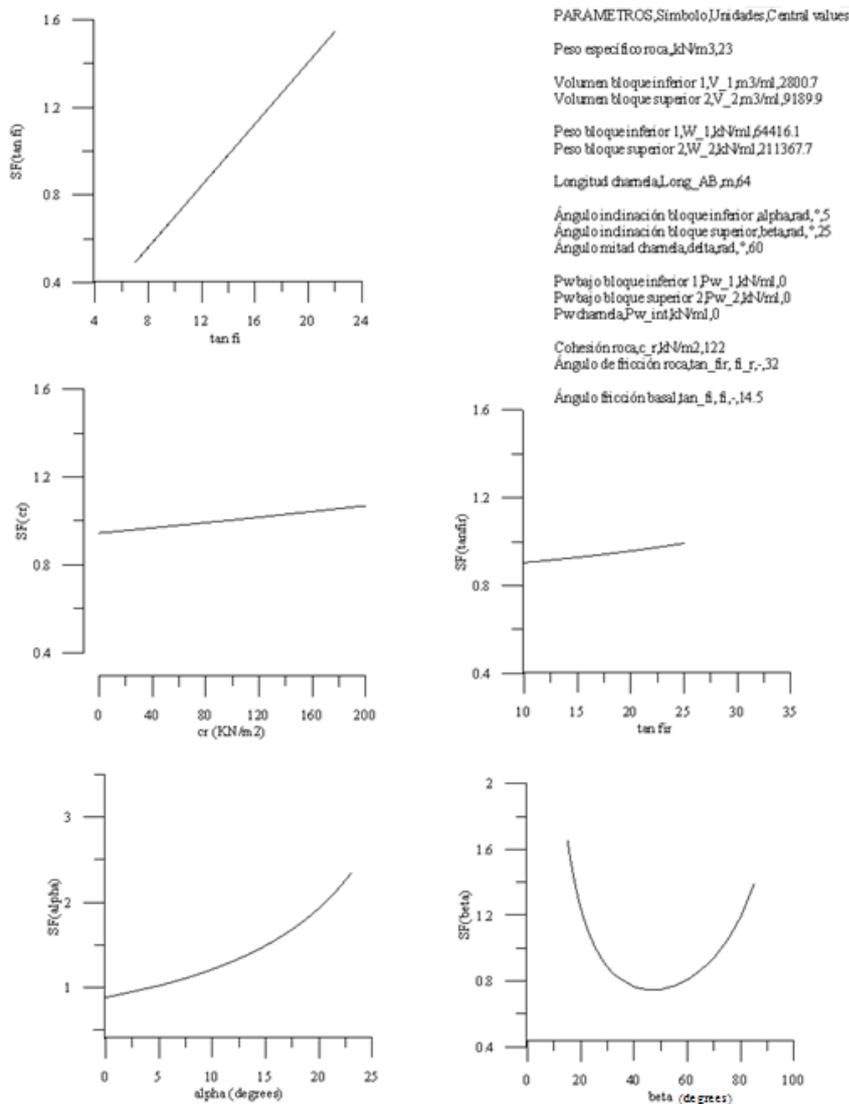


Figura 5. Análisis de sensibilidad paramétrica del ángulo de fricción de la superficie de rotura ($\tan \phi$), el ángulo de inclinación de la superficie de rotura en la cuña activa (α) y pasiva (β) y de las propiedades resistentes del material (Flysch de Yesa) que constituye el plano de corte (c_r y $\tan \phi_r$)

Se constata que el factor de seguridad (FS) es muy sensible a las variaciones del ángulo de fricción de la superficie de rotura. Variaciones de unos pocos grados hace oscilar algunas décimas el FS. Asimismo, la inclinación de la superficie de rotura influye notablemente en el FS resultante. Como en el caso anterior, unos pocos grados de variación de la inclinación de la cuña activa o de la cuña pasiva puede comportar la modificación en algunas décimas del FS.

La red de inclinómetros perforados en la ladera ha permitido definir la geometría de la superficie de rotura, especialmente la SPR, con una razonable precisión. Por este motivo los parámetros geométricos de la doble cuña se utilizarán como criterio de restricción en el análisis retrospectivo.

En la Figura 5 se muestra también que el FS es menos sensible a la resistencia del terreno en el plano de corte (AB). En este sentido, la caracterización de la formación de Flysch de Yesa no resulta tan crítica como el resto de parámetros.

Finalmente, la Figura 6 muestra la variación del FS en función de la presión de agua en los distintos planos que delimitan las cuñas.

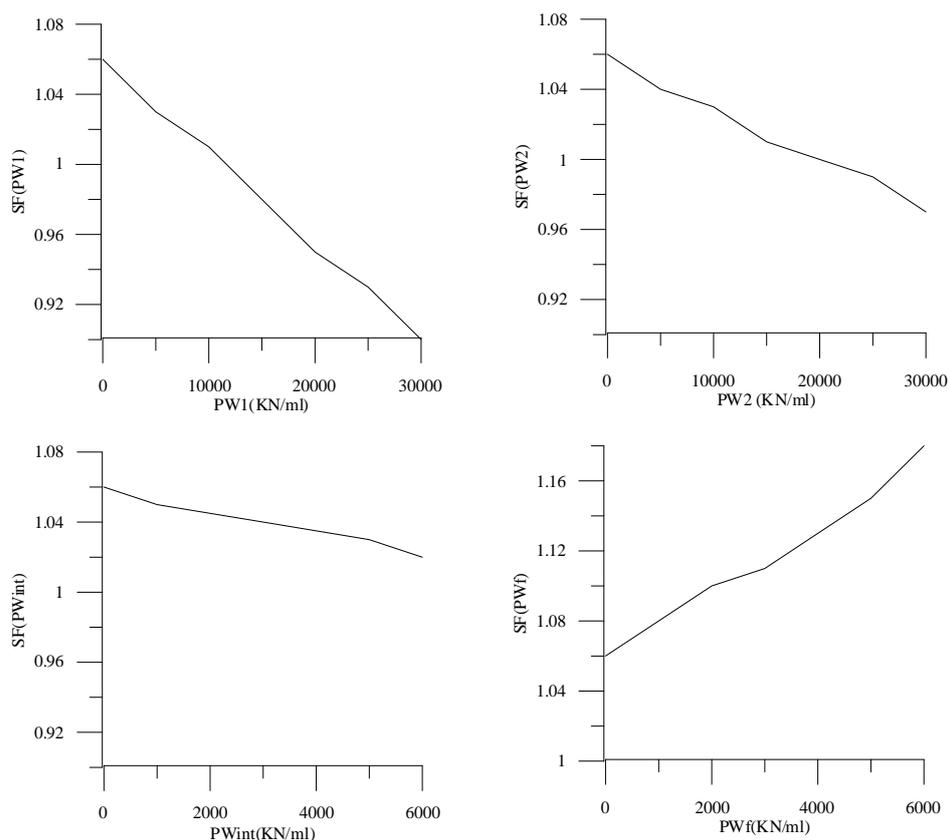


Figura 6. Análisis de sensibilidad paramétrica del FS en función de la presión de agua PW1 y PW2 en los planos de deslizamiento de la cuña pasiva y activa, respectivamente, (PWinf), la presión de agua en el plano de corte aplicada a ambas cuñas y (PWf) la presión de agua aplicada a la parte sumergida de la cuña pasiva (donde se aplica).

5. Parámetros de cálculo

En este capítulo se detallan los parámetros utilizados en el análisis de estabilidad y los criterios utilizados en su selección.

5.1 Geometría

a) Límites del deslizamiento

Los límites de deslizamiento y las superficies de rotura (SPR y SIR) se presentan en la Figura 7. Coinciden fundamentalmente con los propuestos en el informe UPC (2103).

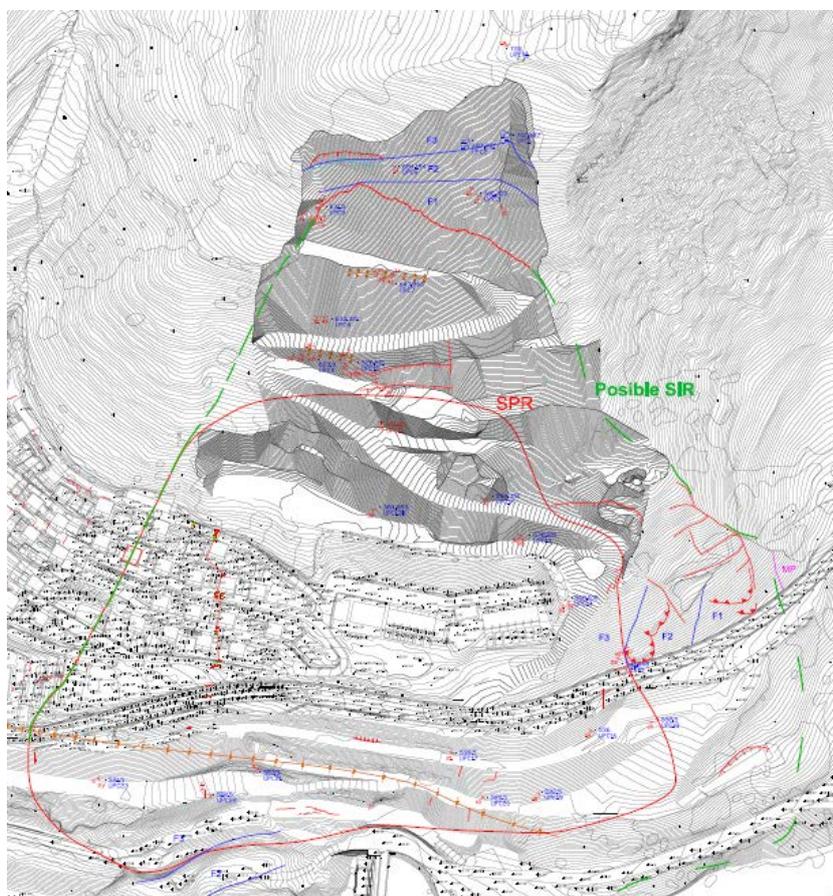


Figura 7. Límites identificados del deslizamiento para la SPR (rojo) y la SIR (verde)

Se ha verificado asimismo que no se detecten movimientos en la ladera más allá de los límites propuestos para el deslizamiento. En la Figura 8, se muestra la situación de diversas señales de puntería fuera de los límites del deslizamiento y en la Figura 9, su evolución durante 2013.

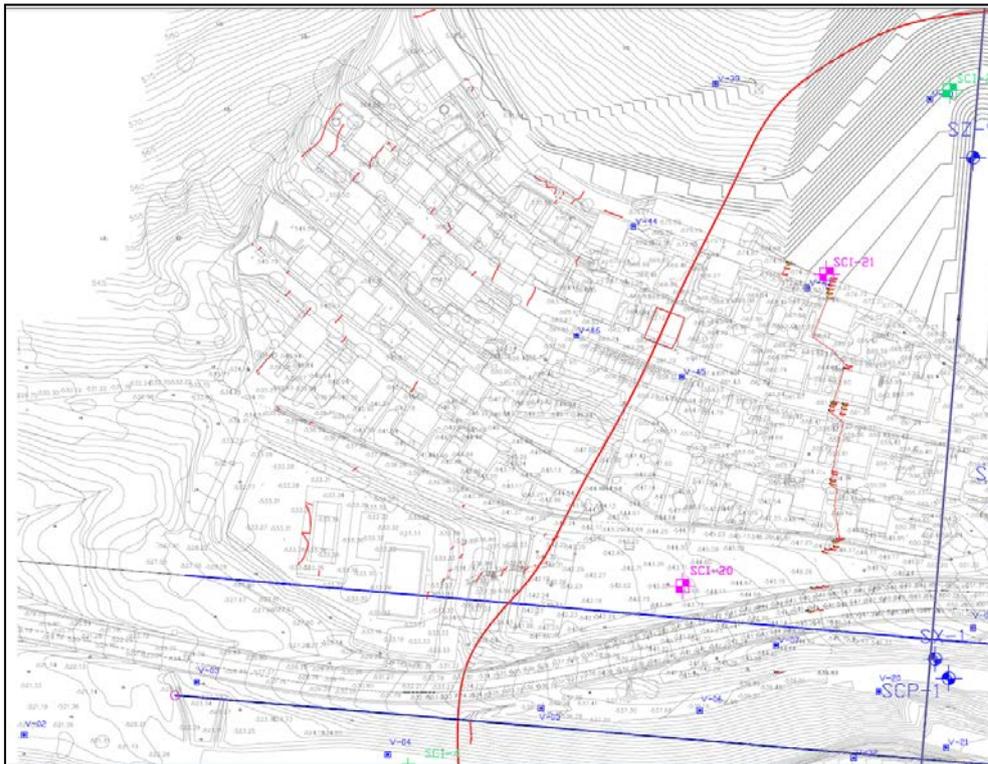


Figura 8. Localización de las señales de puntería situadas en el entorno de la urbanización de Lasaitasuna, fuera del perímetro del deslizamiento identificado (V-02, V-03, V-04, V-39, V-44, V-46). La línea roja continua corresponde al límite occidental de la SPR establecido por la asesoría técnica y en el informe UPC (2013).

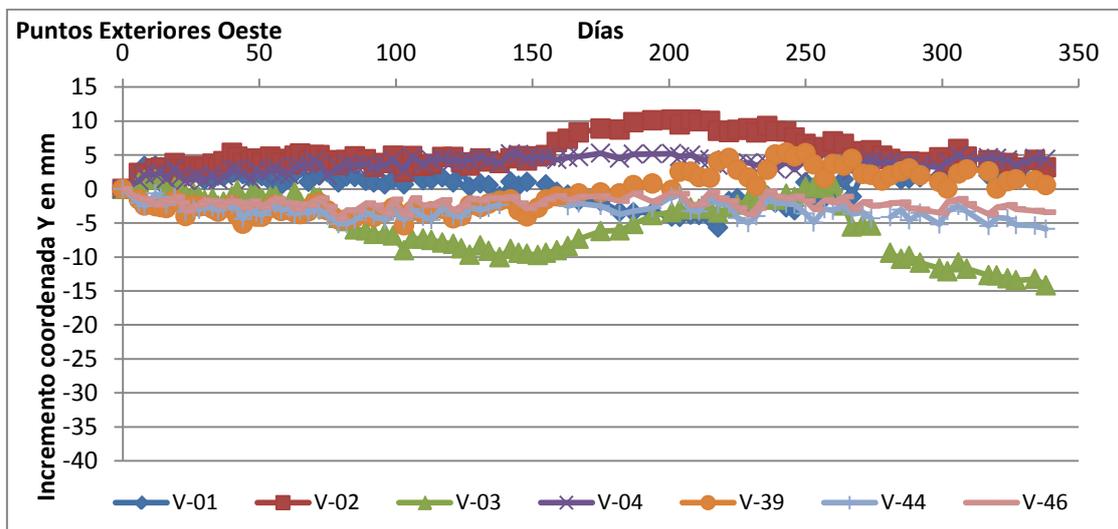


Figura 9. Desplazamientos medidos durante 2013 en las señales de puntería situadas en el entorno de la urbanización de Lasaitasuna, fuera del perímetro del deslizamiento identificado (puntos V-01, V-02, V-03, V-04, V-39, V-44, V-46)



Las mediciones en las señales fuera del perímetro del deslizamiento se encuentran dentro del rango de error del instrumento y no muestran una evolución que sugiera desplazamiento alguno. Por lo tanto, no existe evidencia que haga pensar en la necesidad de modificar los límites del deslizamiento. Únicamente la señal V-03, situada al lado de la antigua nacional, muestra un comportamiento algo errático aunque todavía no se puede afirmar que se esté moviendo ya que su variabilidad es mayor.

b) Perfiles de cálculo

Se han utilizado cuatro perfiles longitudinales (UPC-0 a UPC-3). Los perfiles han sido seleccionados por ser los coincidentes con la dirección de movimiento del deslizamiento. La Figura 10 muestra la situación de los perfiles y las siguientes la situación de las superficies de deslizamiento (SPR y SIR) en cada uno de ellos.

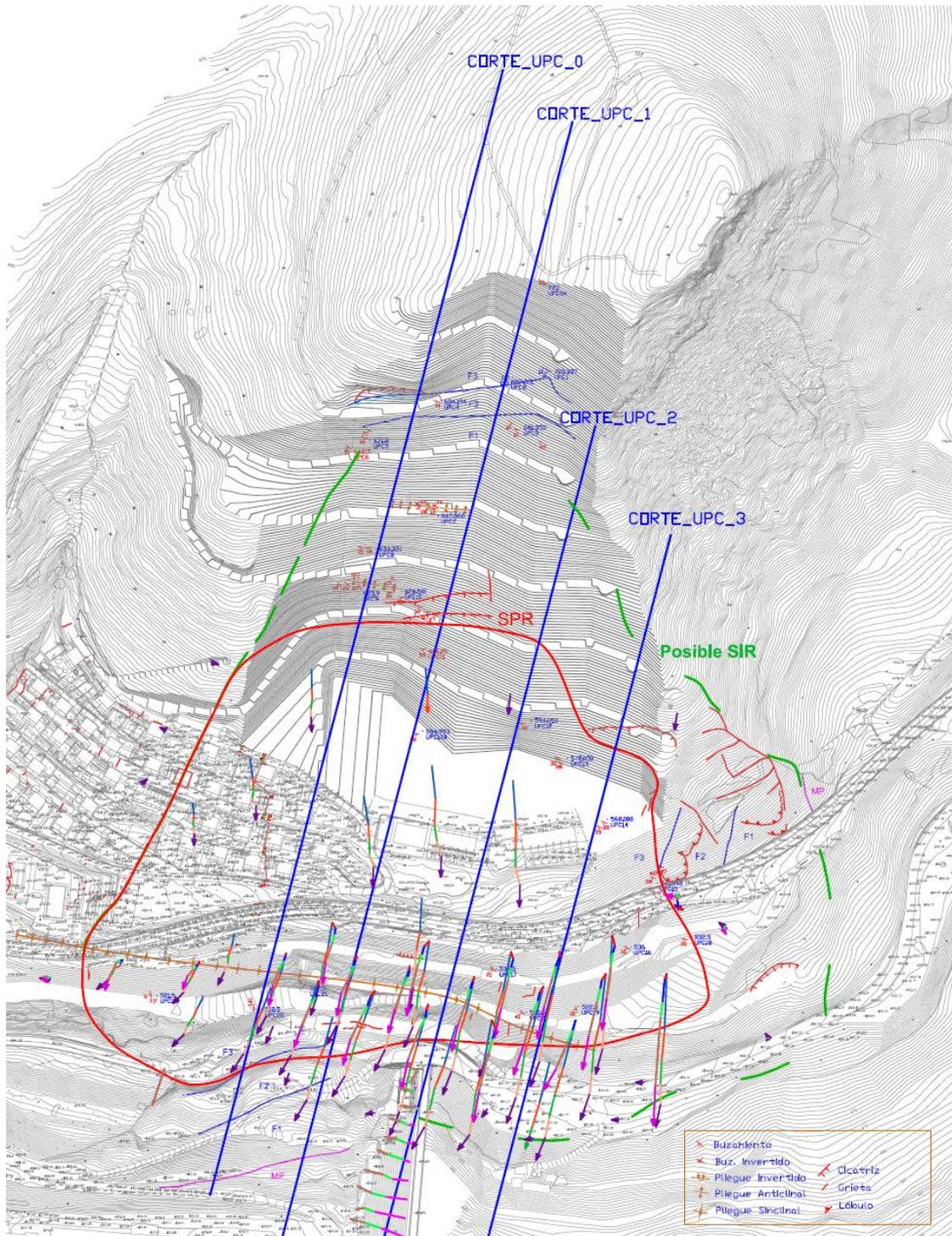


Figura 10. Situación de los cortes geológicos longitudinales y transversales. Vectores de desplazamiento acumulado en el pie de la ladera de Octubre 2012 a 7 de Febrero de 2013

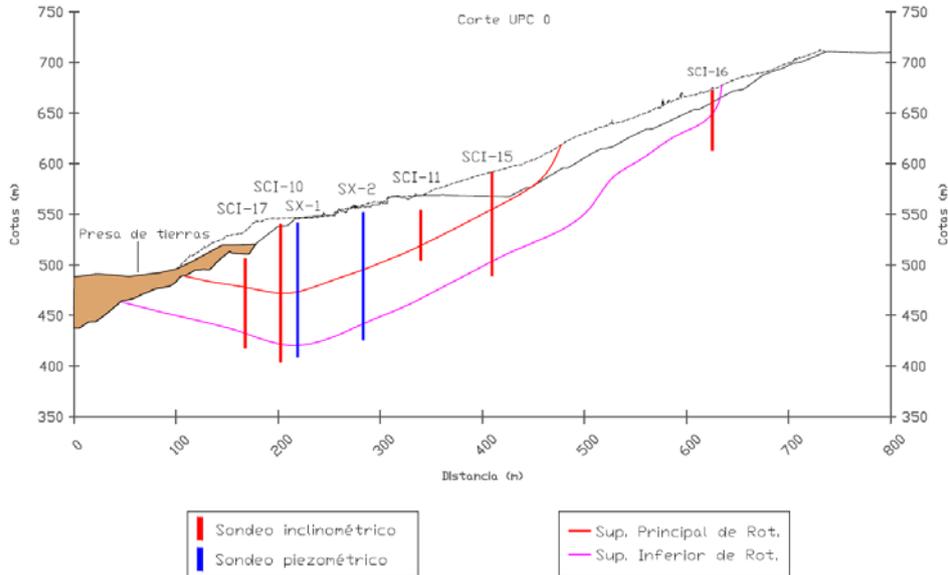


Figura 11. Perfil UPC_0 con indicación de la SPR (línea color rojo), la SIR (línea color fucsia), la superficie topográfica del terreno previa a los trabajos de recrecimiento de la presa (línea color negro a trazos) y la superficie resultante de los trabajos de excavación y descabezamiento del deslizamiento en la ladera de Marmayor (línea negra continua).

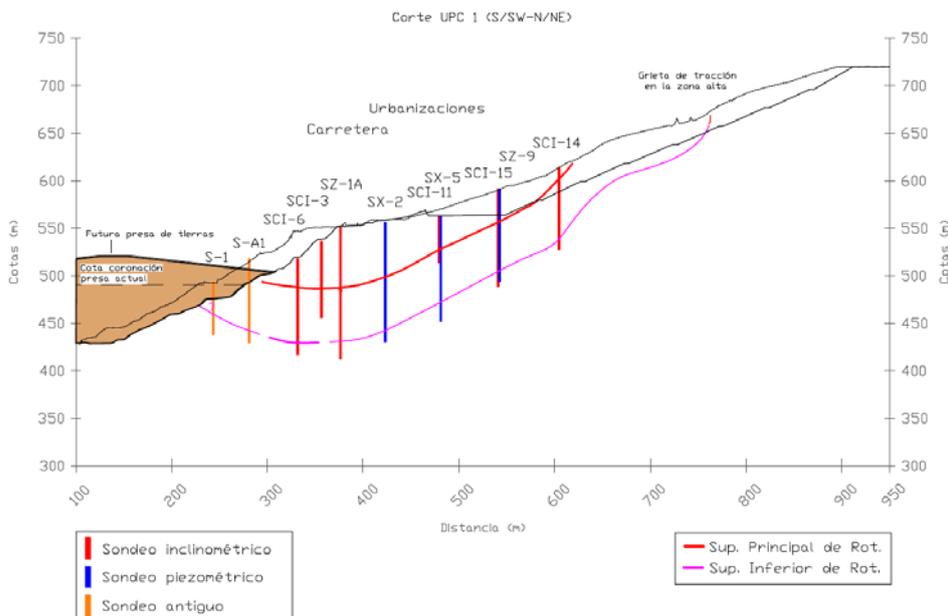


Figura 12. Perfil UPC_1 con indicación de la SPR (línea color rojo), la SIR (línea color fucsia), la superficie topográfica del terreno previa a los trabajos de recrecimiento de la presa (línea color negro a trazos) y la superficie resultante de los trabajos de excavación y descabezamiento del deslizamiento en la ladera de Marmayor (línea negra continua).

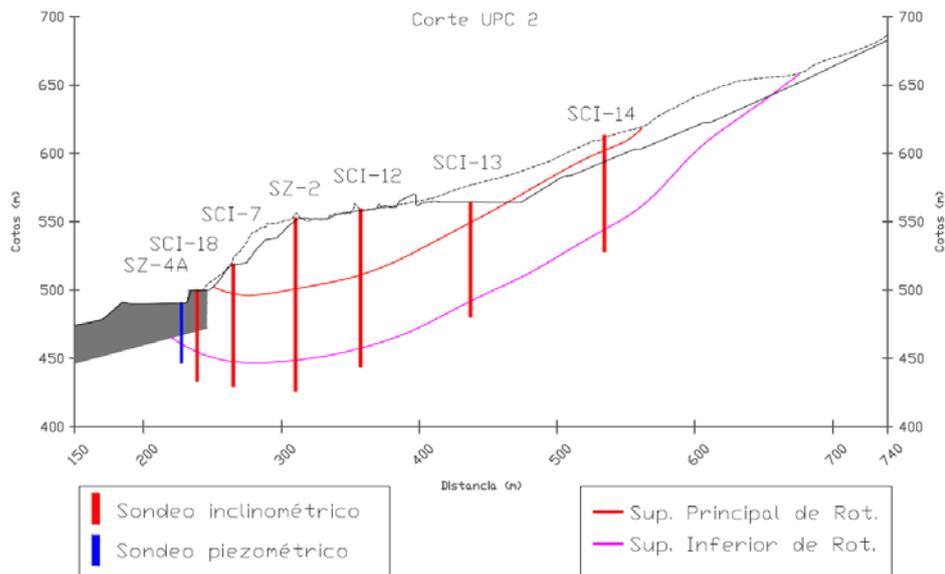


Figura 13. Perfil UPC_2 con indicación de la SPR (línea color rojo), la SIR (línea color fucsia), la superficie topográfica del terreno previa a los trabajos de recrecimiento de la presa (línea color negro a trazos) y la superficie resultante de los trabajos de excavación y descabezamiento del deslizamiento en la ladera de Marmayor (línea negra continua).

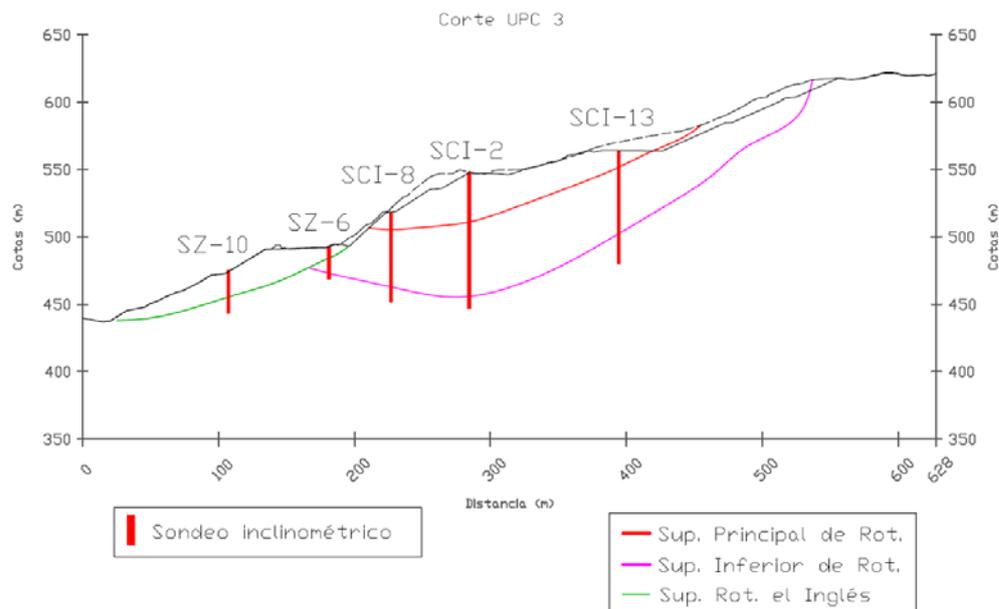


Figura 14. Perfil UPC_3 con indicación de la SPR (línea color rojo), la SIR (línea color fucsia), el deslizamiento del Inglés (línea color verde), la superficie topográfica del terreno previa a los trabajos de recrecimiento de la presa (línea color negro a trazos) y la superficie resultante de los trabajos de excavación y descabezamiento del deslizamiento en la ladera de Marmayor (línea negra continua)



5.2 Parámetros resistentes del terreno

La ladera de la margen derecha de la presa de Yesa está compuesta por diversas unidades de la Formación del Flysch de Yesa y por las Margas de Pamplona. En el informe de la UPC de Julio de 2013 se determinó que las superficies de deslizamiento se desarrollan en niveles de argilita del flysch, aprovechando superficies de cizalla preexistentes.

Se han determinado, por un lado, la resistencia de las superficies de deslizamiento y por otro, la del plano de corte de la doble cuña.

5.2.1 Superficie de deslizamiento

En el informe UPC (2013) se concluye que las superficies de rotura del deslizamiento se acomodan a la estructura geológica de la ladera. No cortan los estratos y se desarrollan a través de los niveles arcillosos del Flysch de Yesa. Como ya se comentó, los testigos de los sondeos inclinométricos contienen numerosas superficies de cizalla generadas previamente durante el plegamiento de la formación. Algunas de ellas han sido reutilizadas como superficie de deslizamiento. Por este motivo, cabe esperar que estos planos movilicen resistencias residuales. Esta observación es consistente con lo descrito en otros informes³ en los que se constata que los resultados de ensayos realizados sobre muestras inalteradas o remoldeadas, no responden a la realidad del comportamiento observado en estos materiales.

Se han realizado ensayos de corte en dos muestras de superficies cizalladas obtenidas en testigos de sondeos (SCI-10 y SCI-12). Estos ensayos se han realizado teniendo en cuenta el rango de tensiones normales al que están sometidas las superficies de deslizamiento en la ladera de Yesa.

En la Tabla 1 se presentan los parámetros resistentes obtenidos de los resultados de las muestras ensayadas. Se muestran dos valores: el ángulo de fricción obtenido a partir de la interpolación lineal de los puntos de ensayo y el ángulo de fricción secante obtenido a partir de la relación entre la tensión de corte y la tensión normal de la carga de servicio.

Dado que, como se acaba de comentar, las superficies de deslizamiento aprovechan en gran medida superficies de cizalla generadas durante el plegamiento de la formación del Flysch de Yesa, se considera que el ángulo de fricción secante puede reflejar mejor la realidad.

³ TYPASA. Estudio de la estabilidad de la ladera de la margen derecha de la Presa de Yesa. Junio 2013

Muestra	Ángulo fricción secante (º)	Interpolación lineal	
		Cohesión (kPa)	Ángulo fricción (º)
Muestra-1	13,4	80	12,9
Muestra-2	19,6	21	19,9

Tabla 1. Parámetros resistentes de los ensayos de corte en superficies de cizalla presentes en los testigos de sondeo (ver también Figura 15 y Figura 16)

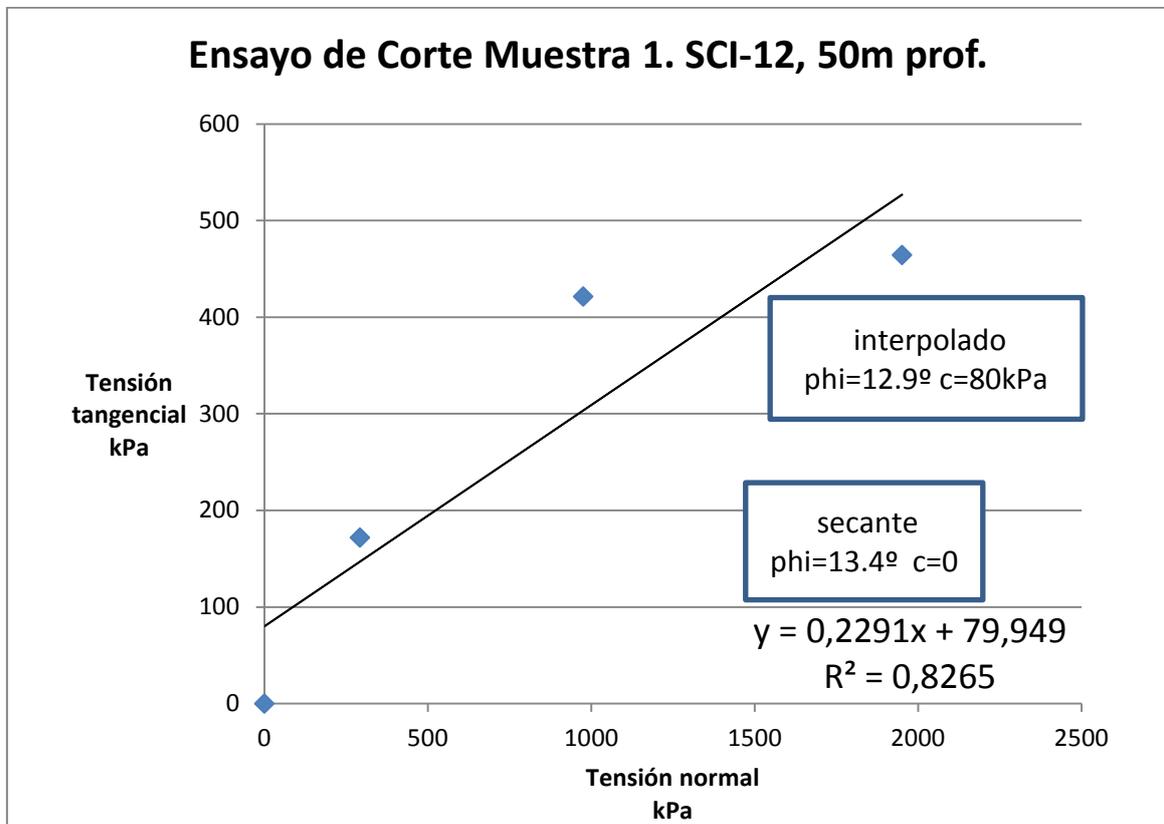


Figura 15. Resultados del ensayo de corte directo realizado sobre un plano de cizalla situado a 50m de profundidad en el sondeo SCI-12, en la formación de Flysch de Yesa.

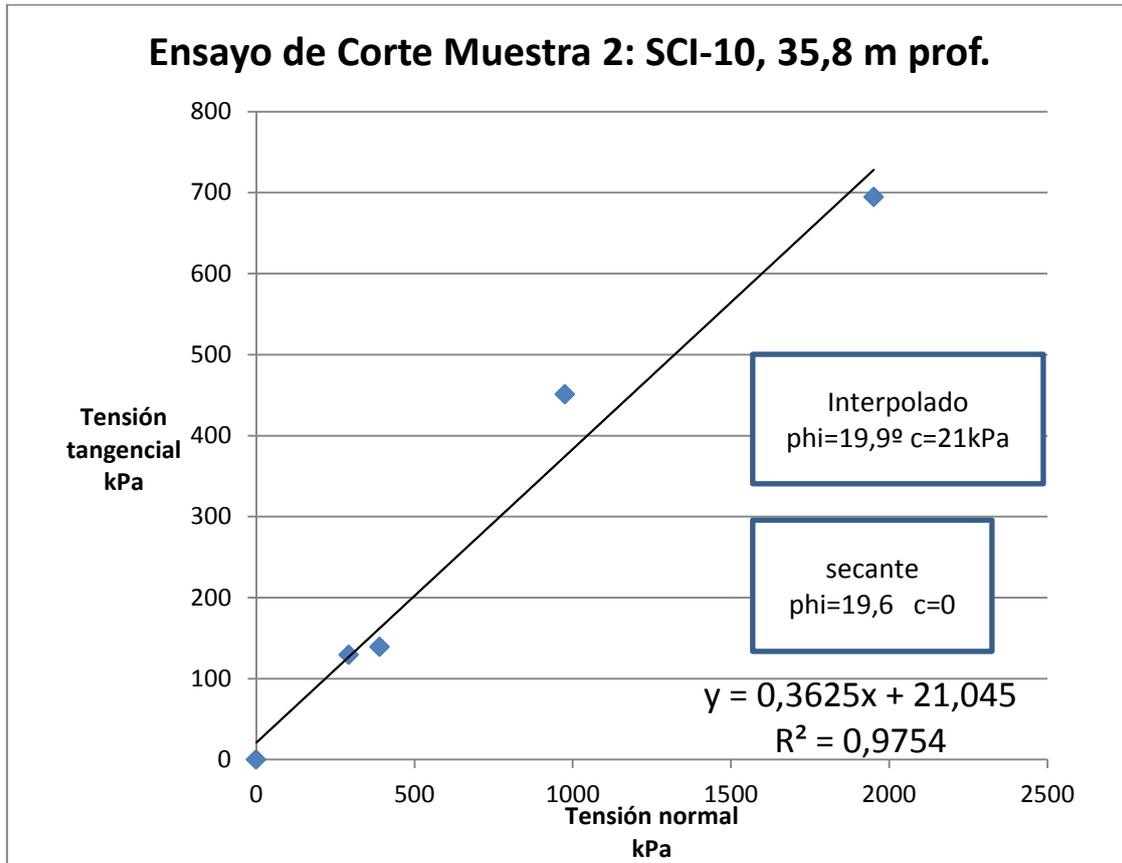


Figura 16. Resultados del ensayo de corte directo realizado sobre un plano de cizalla situado a 35,8m de profundidad en el sondeo SCI-10, en la formación de Flysch de Yesa.

Uno de los planos de cizalla ensayados, pertenece a la superficie de deslizamiento (muestra 1, sondeo SCI-12). Los valores obtenidos del ángulo residual de fricción (entre 13 y 20°), se utilizarán como dato de referencia en los análisis retrospectivos y serán verificados mediante el calibrado de la solución analítica

5.2.2 Resistencia del plano de corte

A diferencia de las superficies de deslizamiento, el plano de corte de la doble cuña tiene que desarrollarse rompiendo la estructura geológica del Flysch de Yesa. Por este motivo debe calcularse la resistencia del macizo. Los parámetros resistentes se han obtenido siguiendo el procedimiento de Hoek y Marinos (2001)⁴ para las formaciones tipo flysch, utilizando el criterio de rotura para macizos rocosos de Hoek y Brown.

⁴ Marinos and Hoek (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as Flysch. Bull. Eng. Geol. Env. 60, 85-92



σ_{cri}	GSI	mi	D	C (kPa)	ϕ (°)	F.S.
7	40	6	0,7	90	21,4	0,98
8	40	7	0,7	100	23,5	1,00
10	40	10	0,7	122	28,7	1,05

Tabla 2. Parámetros de cálculo de la resistencia del flysch de Yesa

La Tabla 2 muestra como la variabilidad de los parámetros del macizo rocoso (σ_{cri} , mi o ϕ) tiene una incidencia limitada en el FS resultante en el análisis de estabilidad. Los parámetros finalmente seleccionados son C= 100 kPa y $\phi= 23,5^\circ$ para la cuñas que se forman por la SPR. Con los mismos parámetros de la envolvente de rotura no lineal Hoek-Brown y para mayor un nivel de tensión medio a la mitad de la profundidad del plano de corte para la SIR estos valores son C= 152 kPa y $\phi= 18.9^\circ$.

5.3 Condición piezométrica

Los datos utilizados para definir las condiciones hidrogeológicas de la ladera han sido obtenidos del informe de Arce (2008)⁵ y de los piezómetros instalados en 2013.

Las dos formaciones presentes en la ladera de la margen derecha muestran propiedades hidráulicas distintas. Las margas de Pamplona (MP) son materiales muy poco permeables. La formación del Flysch de Yesa ha sido objeto de un ensayo de bombeo de dos días de duración y de un análisis específico. El comportamiento del flysch es anisótropo, con una transmisividad de 20m²/día en sentido S-N y de 11m²/día en el sentido E-W. Los valores del coeficiente de almacenamiento son bajos (entre 2x10⁻² a 8,8x10⁻⁴), lo que sugiere que se trata de un medio permeable por fracturación. Los ensayos Lugeon realizados en su momento indican la presencia de una zona fracturada y de mayor permeabilidad en la base de la formación flysch de unos 10m de espesor.

Los piezómetros instalados antes de la crisis de Enero-Febrero de 2013 se encontraban ranurados en toda su longitud, no siendo posible determinar la existencia de niveles piezométricos colgados asociados a los niveles areniscas de la facies flysch y apenas muestran respuesta a los episodios lluviosos (p.e. piezómetro SX-1).

La Asistencia Técnica de la obra instaló en julio de 2013 diversos piezómetros de cuerda vibrante en inclinómetros abandonados después de su rotura. Los piezómetros se instalaron y se aislaron a la profundidad en la que se detectó el punto de rotura, coincidiendo con la situación de la SPR. Se trata de los inclinómetros/piezómetros SCI-2, SCI-6 y SC-13. Después de la ejecución de los piezómetros en Octubre 2013, sólo el SCI-6 mostró cierta presión de agua descendente que parecía estabilizarse alrededor de un equivalente de columna de agua de 7m

⁵ Arce, M. (2008) Estudio hidrogeológico del entorno de la Presa de Yesa (Navarra). Zeta Amaleta. 58pp

(Figura 17) pero que finalmente acabó descendiendo hasta no generar presión alguna (Figura 18). Las lluvias de otoño de 2013, no han dado lugar a respuesta en ninguno de los piezómetros

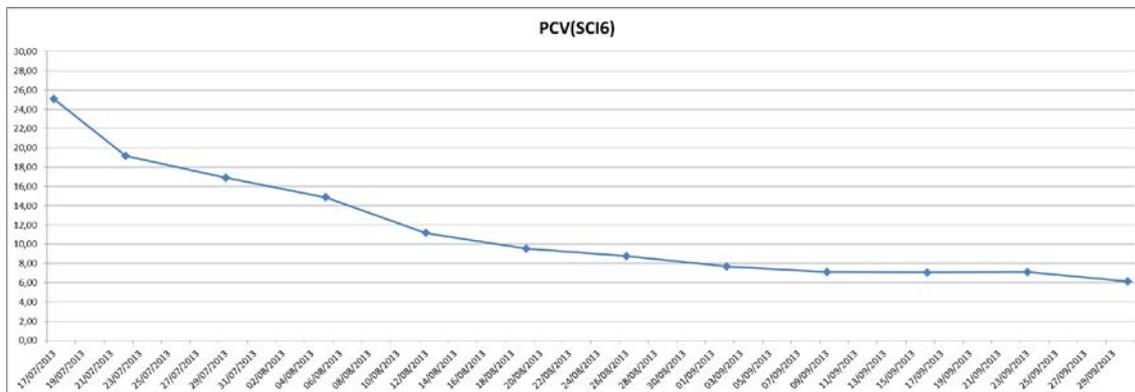


Figura 17. Evolución de las presiones de agua en el piezómetro de cuerda vibrante instalado en el tubo inclinométrico SCI-6, a la profundidad de la SPR.

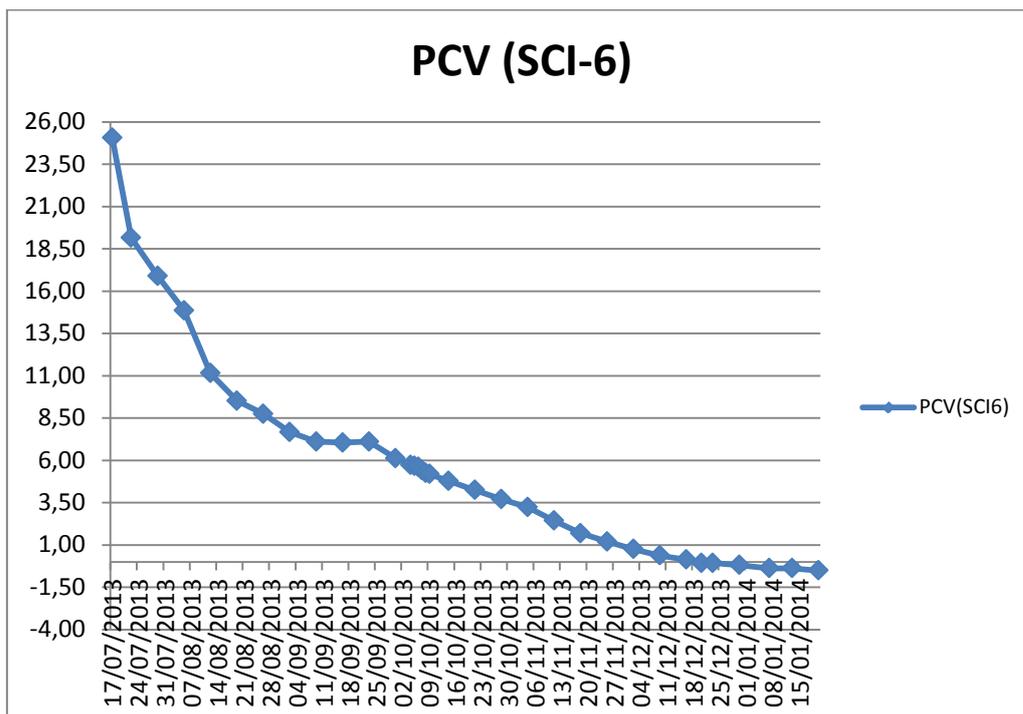


Figura 18. Detalle del descenso del nivel de agua en el inclinómetro/piezómetro SCI.

A pesar de la falta de respuesta en los piezómetros, existen algunos indicios que sugieren la existencia de flujo de agua subterránea en algunos niveles de areniscas de la formación flysch cerca del contacto con las arcillitas.

El primero de ellos es la aparición de rezumes en la base de algunos de los niveles de arenisca, visibles en varios afloramientos (Figura 19)



Figura 19. Rezumes (flechas amarillas) en el contacto entre las areniscas y arcillitas del flysch de Yesa, en los desmontes de la antigua N-240. Nótese el aspecto húmedo del suelo

El segundo indicio es la aceleración de los desplazamientos en la ladera durante la crisis de Enero-Febrero de 2013 coincidiendo un episodio extraordinario de lluvias abundantes, sin que se hubieran ejecutado nuevas excavaciones en la ladera.

Por estos motivos, se han contemplado diversas hipótesis de presiones de agua en respuesta a los episodios lluviosos tanto para la SPR como para la SIR. Estas hipótesis se verificarán mediante el análisis retrospectivo (ver capítulo 6).

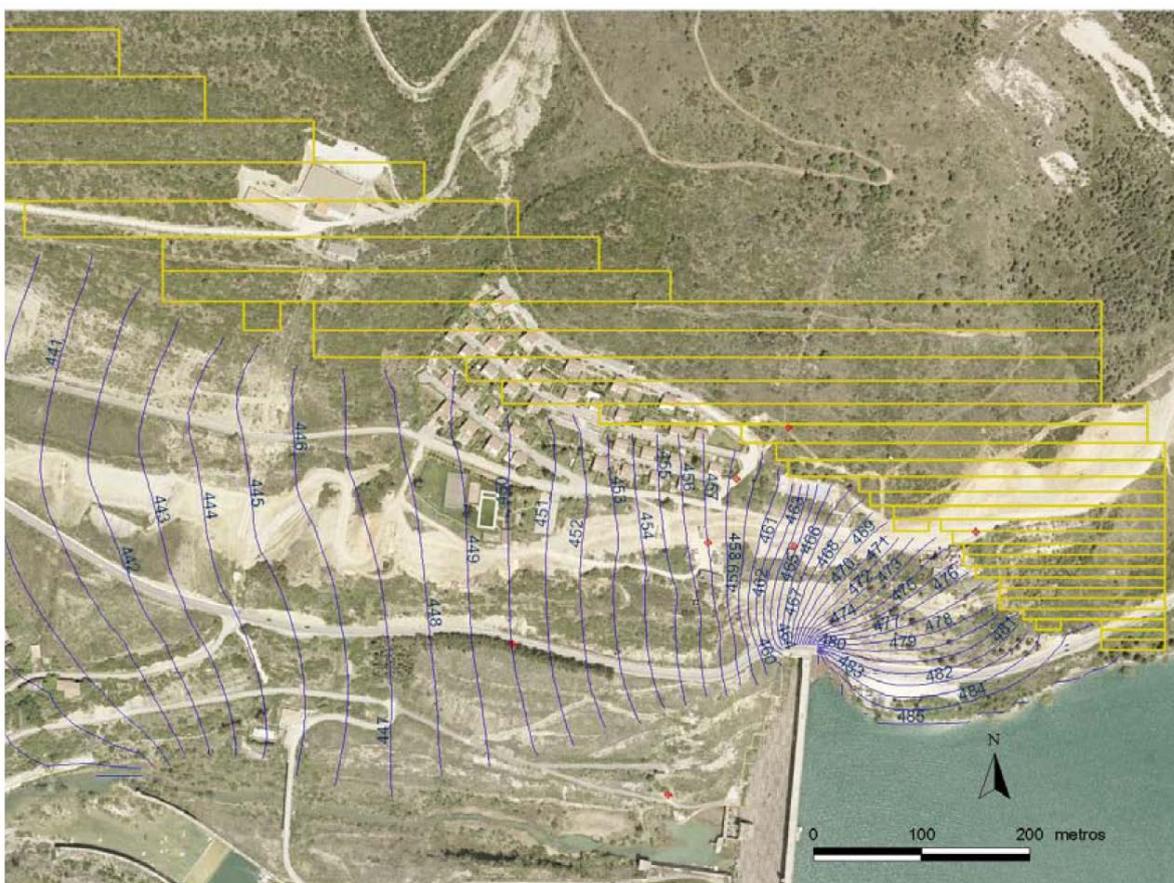
Se han evaluado asimismo diversos escenarios en los que se tiene en cuenta las posibles filtraciones desde el embalse.

Los escenarios son los siguientes:

- (1) Presiones de agua en la ladera generadas exclusivamente por la infiltración del agua de lluvia en ausencia de filtraciones provenientes del embalse .
- (2) Presiones de agua en la ladera generadas por un flujo de agua proveniente del embalse en ausencia de lluvias. En cada sección de análisis se utiliza el nivel piezométrico obtenido en

la modelación hidrogeológica de Arce (2008)⁶. El nivel piezométrico disminuye desde el Este al Oeste según el gradiente indicado en la Figura 20.

- (3) Presiones de agua en la ladera generadas por un flujo de agua proveniente del embalse en coincidencia con episodios lluviosos y la correspondiente recarga desde aguas arriba de la ladera. En cada sección de análisis se utiliza el nivel piezométrico obtenido en la modelación hidrogeológica de Arce (2008) con un incremento de cota por el flujo de agua generada por las lluvias.



$$Ru = (\gamma_w \times h_{wA}) / (\gamma_r \times h_{sA})$$

Donde:

γ_w : peso específico agua

h_{wA} : altura de la columna de agua en el punto A

γ_r : peso específico suelo

h_{sA} : altura de la columna de suelo/terreno en el punto A

Las presiones correspondientes se han representado en la Figura 21.

Esta situación no tiene presente las posibles filtraciones desde el embalse.

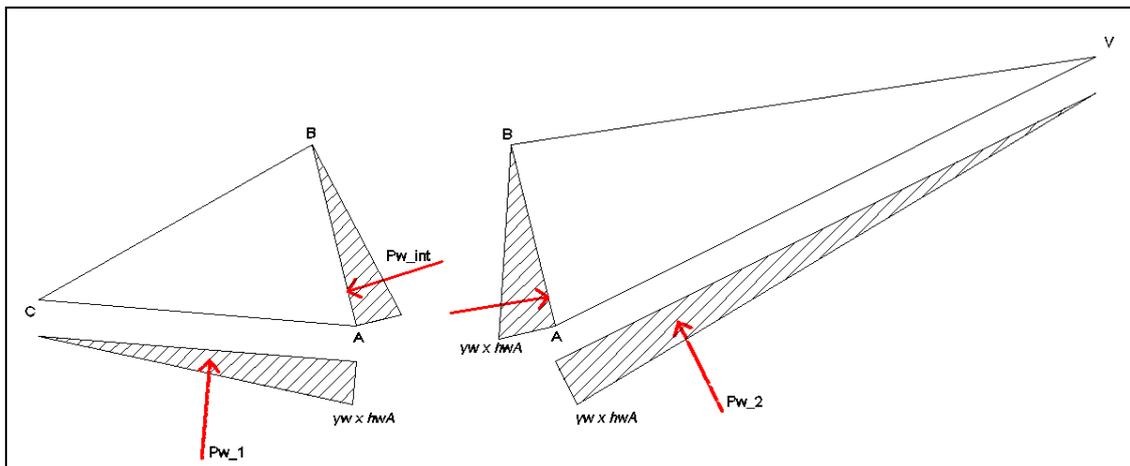


Figura 21. Presiones generadas en el deslizamiento por el agua de la lluvia y en ausencia de embalse (o con el embalse vacío).

Ru	SPR	SIR
	Altura columna de agua en	Altura columna de agua en
0	0	0
0.025	3	6,9
0.05	7,25	13,8
0.10	14,5	27,6
0.15	21,0	41,4

Tabla 3. Ejemplo de valores de Ru utilizados y su equivalencia en altura de columna de agua en el punto A (ver Figura 2) para la SPR y SIR

5.3.2. Cálculo de las presiones de agua generadas por la infiltración del agua del embalse hacia la ladera

El proyecto contempla de construcción de una pantalla impermeable desde la cota de máximo embalse hasta penetrar 10m en la formación de margas de Pamplona. No obstante, la filtración desde el embalse se ha tenido en cuenta para el análisis retrospectivo de la SIR y también para evaluar cuál sería el efecto en la ladera de una potencial infiltración del agua del embalse una vez recrecida la presa.

Las presiones se calculan asumiendo un nivel de agua horizontal en el perfil considerado de la ladera y que corresponde al nivel piezométrico medio generado en cada perfil por el flujo subterráneo proveniente del embalse.

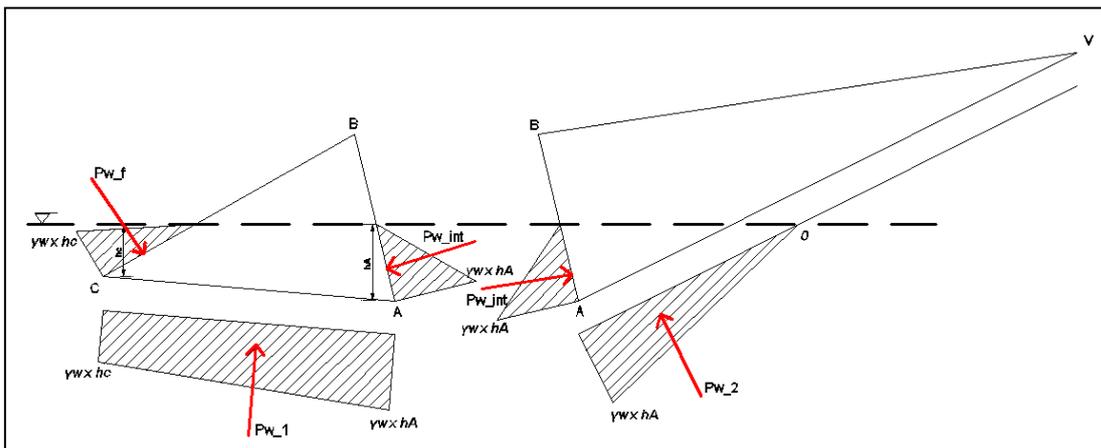


Figura 22. Presiones generadas por el agua en el embalse. Caso particular del pie del deslizamiento parcialmente sumergido en el embalse.

La Figura 22 presenta el procedimiento para calcular las presiones generadas por la filtración del agua del embalse que genere un nivel coincidente con el nivel del embalse y considerando la sumersión parcial del pie del deslizamiento. Para otros perfiles, se utiliza el nivel piezométrico obtenido en la simulación de Arce (2008) y en este caso, $Pw_f = 0$, es decir, no se considera el efecto compensador del peso del agua del embalse sobre la superficie topográfica de la ladera).

5.3.3. Cálculo de las presiones de agua generadas por la infiltración del agua del embalse hacia la ladera en coincidencia con las lluvias

En este caso la línea piezométrica es compuesta (tiene dos pendientes). Se obtiene combinando la superficie piezométrica generada por el flujo proveniente del embalse con la

generada por la lluvia. Las pendientes se calculan de modo gráfico. (Figura 23). En el punto I, la presión de agua correspondiente a un determinado valor de R_u (o situación pluviométrica) se añade a la correspondiente isopieza generada por la infiltración desde el embalse. Desde este punto I, la aportación de R_u disminuye de manera lineal hasta confluir con la superficie piezométrica generada por el flujo de agua proveniente del embalse (Figura 23). El cálculo del R_u en el punto I se realiza de la misma manera que en 5.3.1.

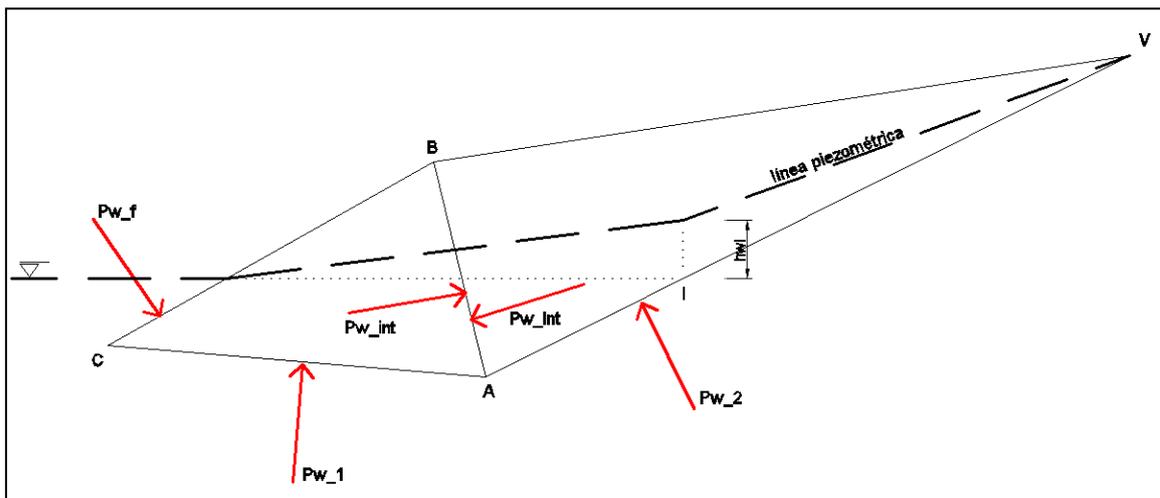


Figura 23. Línea piezométrica generada por la combinación de la filtración desde el embalse y el agua de la lluvia. Caso particular del pie del deslizamiento parcialmente sumergido en el embalse.

Puede considerarse además, la situación de desembalse rápido. Este caso es el mismo que el de embalse lleno pero haciendo $Pw_f = 0$, es decir, sin el efecto compensador del agua del embalse sobre la superficie topográfica de la ladera.



6. Calibración del modelo analítico mediante análisis retrospectivo

Los parámetros disponibles para el análisis tienen distinto grado de incertidumbre. Se considera que los parámetros geométricos y sus derivados, como son la disposición de los estratos en la ladera derecha de Yesa, los límites en planta del deslizamiento, la situación y disposición de la SPR y SIR, los perfiles de análisis, los volúmenes movilizados y las cuñas resultantes (cuña activa y pasiva), están razonablemente bien determinados. En la calibración del modelo se ha tolerado una mínima variabilidad para los ángulos α , β y δ de las cuñas.

Los parámetros resistentes del terreno y de las superficies de deslizamiento han sido fijados mediante distintos procedimientos. La resistencia de la formación del flysch de Yesa se ha obtenido siguiendo procedimientos ampliamente aceptados por la comunidad científico-técnica (Hoek y Brown, 1980; Marinos y Hoek, 2001). El análisis de sensibilidad paramétrica muestra además que su variabilidad tiene una influencia limitada en el FS (ver apartado 5.2.2).

Las evidencias disponibles sugieren que las superficies de deslizamiento se encuentran en condiciones de resistencia residual. La consideración de resistencia residual y cohesión nula es consistente con la historia geológica de la ladera, su plegamiento y la presencia de superficies cizalladas, frecuentemente estriadas en los testigos de sondeo. Los parámetros resistentes se han determinado inicialmente mediante ensayos de corte directo en laboratorio. El ángulo residual de fricción obtenido en los ensayos oscila entre los 13° y 20°. La diferencia entre los valores obtenidos y el hecho de que sólo se hayan podido ensayar dos muestras, justifica que se considere este rango de valores en las primeras simulaciones del análisis retrospectivo.

Finalmente, las presiones de agua están sujetas a un elevado grado de incertidumbre. Como se ha indicado, a pesar de la falta de evidencias en las lecturas de los piezómetros, existen diversos indicadores que sugieren la existencia de presiones en la superficie de deslizamiento. En cualquier caso, estas presiones no deberían ser de gran magnitud (ver apartado 5.3).

Con objeto de minimizar las incertidumbres y calibrar el modelo analítico se ha procedido a realizar un análisis retrospectivo de la evolución de la ladera. La calibración del modelo analítico busca reproducir de manera razonable las distintas situaciones observadas en la ladera durante el proceso de excavación de la presa (situaciones de referencia), tomando como variables los parámetros que incluyen mayor incertidumbre: el ángulo residual de fricción de las superficies de deslizamiento (SPR y SIR) y las presiones de agua. Si bien el número de combinaciones de estas variables (Φ_r y R_u) es muy elevado, sólo han sido tenidas en cuenta las combinaciones compatibles con las inclinaciones (α y β) de los planos basales de las cuñas pasiva y activa respectivamente, observadas en los perfiles. Los ángulos de fricción obtenidos deben cumplir estas condiciones en todos los perfiles analizados.



6.1 Referencias para el análisis retrospectivo

Se han definido varias situaciones que se utilizarán como referencia para la calibración del modelo. Las situaciones han sido establecidas a partir de la información facilitada por la asistencia técnica. Para ello, se ha procedido a la interpretación de las distintas observaciones a la luz del conocimiento actual sobre la estructura geológica de la ladera y de las características del deslizamiento que afecta la ladera derecha. Las situaciones de referencia para la SPR (Tabla 4. Situaciones de referencia en relación al comportamiento de la SPR de la ladera derecha de la presa de Yesa) y la SIR (Tabla 5), son las siguientes:

6.1.1 Referencias para la Superficie Principal de Rotura (SPR)

Las situaciones de referencia para calibrar el análisis de estabilidad para la SPR se resumen en la siguiente tabla.

	Referencia	Comentario
Periodo 1965-2003	No se detectan movimientos. Levantamiento casi inapreciable de los bloques de la presa	Ocurrencia de varios episodios de gran acumulación de lluvia
Febrero-Junio 2003		Excavación nueva CN-240
Octubre 2003-Abril 2004		Excavación por encima cota 490m
Agosto-Noviembre 2004		Excavación por debajo cota 490m
Octubre 2004-Junio 2006	Se detectan movimientos locales que se estabilizan con hormigón proyectado y bulonado. Posteriormente anclajes entre eje presas	Obras ampliación de la presa. 2005-06 Excavación urbanización Mirador de Yesa
Enero 2011-Julio 2012		Obras complementarias. Nuevas excavaciones (bermas)
Septiembre 2011	Primeros indicios de movimientos en la ladera (SPR)	Retaluzado de la margen derecha para regularizar e impermeabilizar el talud. Verano seco.
Julio 2012		Inicio lecturas en inclinómetros nuevos (serie SCI)
25 de Septiembre de 2012	Velocidades del orden de 10 mm/mes.	En el periodo 1 julio 2011 a 30 de junio de 2012 se recogen 347mm de lluvia. El día 27 se instalan 25 hitos en la ladera de Marmayor
27 de Septiembre		Inicio medidas en hitos para



de 2012		control topográfico
Octubre de 2012	Aparecen grietas en la cuneta de hormigón de la CN-240, inmediatamente por encima de las excavaciones	
15 de Febrero de 2013	máximas velocidades de desplazamiento: 30-40 mm/sem (5 mm/día aprox.)	Episodio de lluvias abundantes Enero-Febrero de 2013. Inicio obras de emergencia
Mayo 2013	desplazamientos reducidos significativamente (≈ 1 mm/semana)	Se han retirado 500,000 m ³ de la ladera de Marmayor

Tabla 4. Situaciones de referencia en relación al comportamiento de la SPR de la ladera derecha de la presa de Yesa

Primera referencia

Desde las labores de contención y estabilización del deslizamiento del Inglés (año 1964) hasta el inicio de las obras de ampliación de la presa, no se detectan indicios de inestabilidad ni en la carretera ni en la ladera. Durante este periodo tienen lugar varios episodios de lluvias abundantes, entre ellos, el del invierno de 1978-79 y los de otoño de 1980 con lluvia acumulada en 90 días, superior a la registrada en la del invierno 2012-2013.

La ausencia de movimientos en la ladera debe interpretarse que ésta disponía de un $FS > 1$ en condiciones hidrológicas similares a las del invierno 2013-2014 e incluso más severas.

No puede descartarse de manera absoluta que no se hubieran producido deformaciones en la ladera en el periodo comprendido entre 1965 y 2003. Sin embargo, no se ha encontrado ninguna evidencia que avale esta posibilidad.

Segunda referencia

En Septiembre de 2011 se detectan indicios de inestabilidad en la ladera (inclinómetro SZ3-A) (Figura 24). Se da la particularidad que Septiembre de 2011 forma parte de uno de los veranos más secos del registro de lluvias, con 30mm acumulados en 90 días.

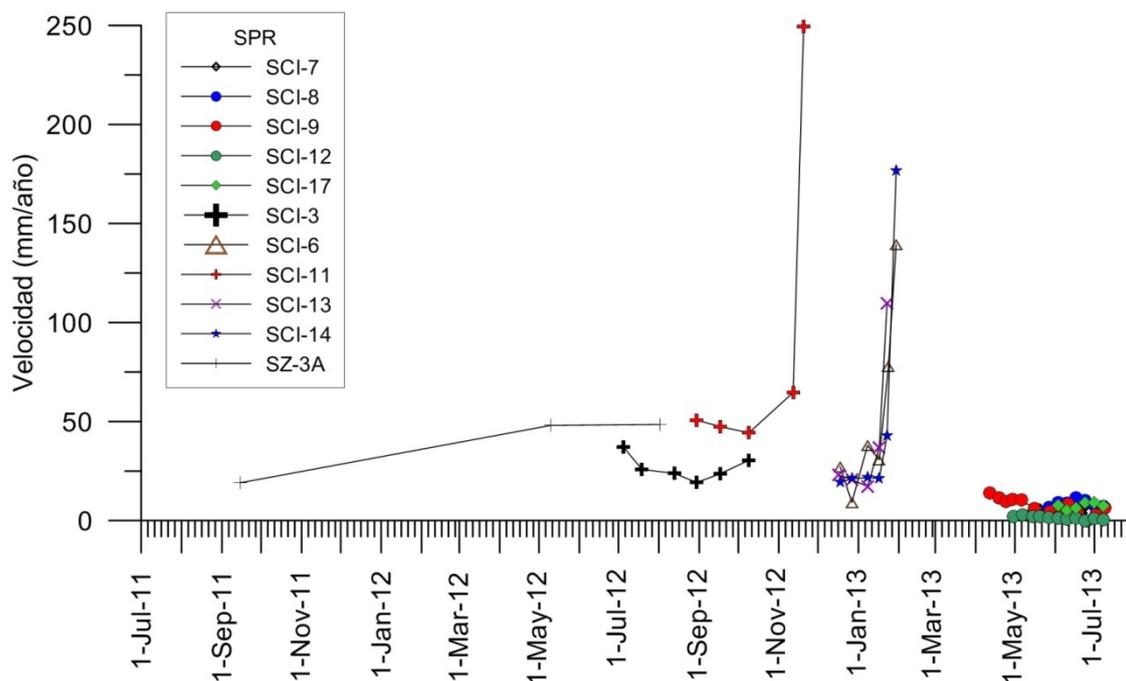


Figura 24. Velocidades de deslizamiento observadas en distintos inclinómetros instalados en la ladera de la margen derecha de la presa de Yesa.

La existencia de movimientos sugiere que la SPR se encontraba en una situación de estabilidad precaria, con un $FS \approx 1$. La falta de precipitaciones en verano de 2011 permite plantear la ausencia de presiones agua en la ladera ($ru=0$).

Tercera referencia

Después de un año anormalmente seco (1 julio 2011 a 30 de junio de 2012 se recogen 347mm de lluvia), a partir de Septiembre se detecta un aumento de la velocidad (hasta 10mm/mes)

Cuarta referencia

La notable aceleración de los movimientos tiene lugar en Enero-Febrero de 2013, coincidiendo con un episodio de lluvias anormalmente húmedo ($T=37$ años).

El fuerte aumento de las velocidades en el invierno 2012-2013 sin modificación del perfil de ladera y en ausencia de otras cargas, sugiere que las presiones de agua, anormalmente elevadas, han sido las responsables de fuerte aumento de las velocidades en el deslizamiento. En estas condiciones cabe esperar $FS < 1$ y $Ru > 0$. El comportamiento de la ladera entre 1965 y 2003 indica que presiones de agua similares no dieron lugar a la desestabilización de la misma durante el citado periodo.



Quinta referencia

En Mayo de 2013, se observa una deceleración notable de los movimientos (desde los 1000mm/año hasta el entorno de 40mm/año), en condiciones de vuelta a la normalidad pluviométrica y después de haber retirado unos 500,000m³ de material de la ladera.

Se considera que la modificación de la geometría de la ladera (descabezamiento parcial de la parte superior del deslizamiento) y una situación pluviométrica normalizada ($r_u \neq 0$) se puede asociar a un $FS \approx 1$.

Teniendo en cuenta las distintas fases de excavación y la evolución de la ladera, se tomará como referencia inicial para la calibración del modelo el mes de Septiembre de 2011. En este momento después de un verano anormalmente seco ($R_u = 0$), se detectan los primeros indicios de inestabilidad en el inclinómetro SZ3-A a una profundidad que corresponde a la SPR ($FS \approx 1$).

6.1.2 Referencias para la Superficie Inferior de Rotura (SIR)

Las situaciones de referencia para calibrar el análisis de estabilidad para la SPR se resumen en la siguiente tabla.

	Referencia	Comentario
Periodo 1965-2003	No se detectan movimientos evidentes. Levantamiento de los bloques de la presa inapreciable	Ocurrencia de varios episodios lluviosos de gran acumulación
Febrero-Junio 2003		Excavación nueva CN-240
Octubre 2003 – Abril 2004		Excavación por encima cota 490m
Mayo de 2004	Primeros indicios de elevación de los bloques contiguos a la ladera derecha (SIR)	
Agosto-Noviembre 2004		Excavación por debajo cota 490m
Octubre 2004-Junio 2006	Levantamiento de los bloques contiguos a la ladera derecha. Velocidad constante	Obras ampliación de la presa. Se detectan movimientos locales. Tratamiento de estabilización y refuerzo. Excavación de la urbanización Mirador de Yesa
2003-2010	Elevación de bloques contiguos a la ladera derecha de hasta un máximo de 0.7 mm/año	
Enero 2011-Julio 2012	Aumento transitorio de la velocidad de ascenso de los	Obras complementarias. Nuevas excavaciones

	bloque. En 2011 alcanza los 3,5 mm/año	
--	--	--

Tabla 5. Elementos de referencia en relación al comportamiento de la SIR de la ladera derecha de la presa de Yesa

Primera referencia

Desde la finalización de las labores de contención y estabilización del deslizamiento del Inglés (año 1964) hasta el inicio de las obras de ampliación de la presa, no se detectan indicios claros de inestabilidad ni en la carretera ni en la ladera. Durante este periodo tienen lugar varios episodios de lluvias abundantes, entre ellos, el del invierno de 1978-79 y los de otoño de 1980 con una lluvia acumulada en 90 días, superior a la registrada en la del invierno 2012-2013.

No puede descartarse de manera que no se hubieran producido deformaciones en la ladera en el periodo comprendido entre 1965 y 2003. La zona del deslizamiento del Inglés, que interfiere con la SIR (Perfil UPC_3), ha experimentado movimientos de unos pocos milímetros al año, especialmente en épocas de desembalse⁷. Por este motivo, cabe la posibilidad que durante todo este periodo la ladera dispusiera de un margen de seguridad estricto.

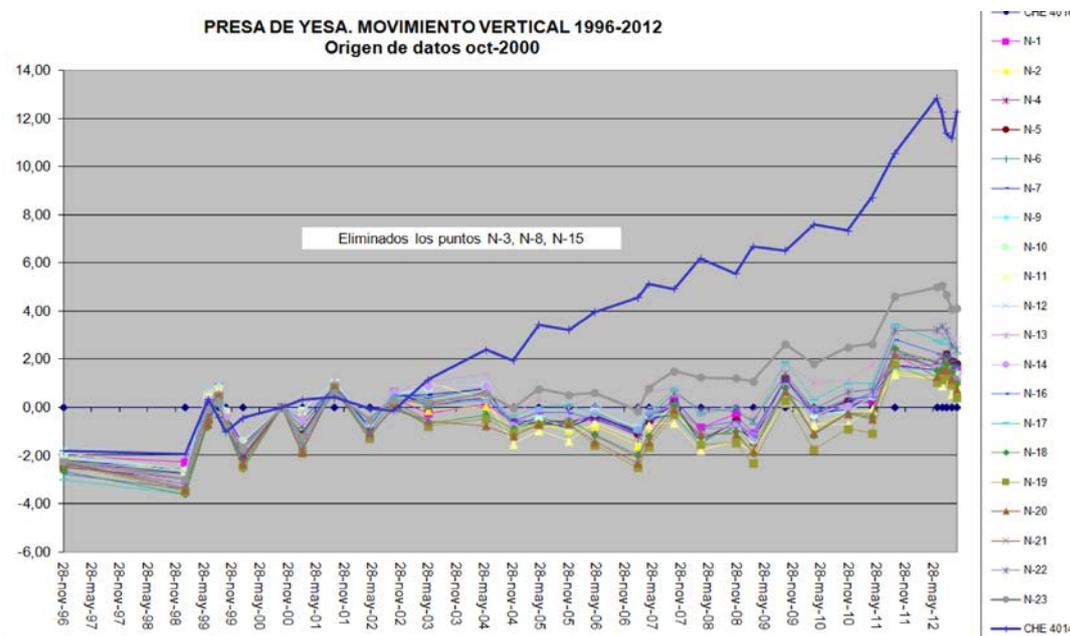


Figura 25. Movimientos verticales medidos en distintas secciones de la coronación de la presa entre 1996 y 2012 (fuente: Asistencia Técnica)

⁷ Evaluación de las condiciones de estabilidad de la ladera derecha en la cerrada del embalse de Yesa. Prospección y Geotecnia. Junio 2013

Segunda referencia

Entre Mayo de 2003 y Mayo de 2010 se detectan movimientos de izamiento de los bloques del estribo derecho, con una velocidad promedio máxima de 0,6- 0,7mm/año en el hito CHE-4014 (Figura 25). Estos movimientos sugieren que la SIR se encontraba en una situación de equilibrio muy estricto y el FS debería situarse en el entorno de la unidad.

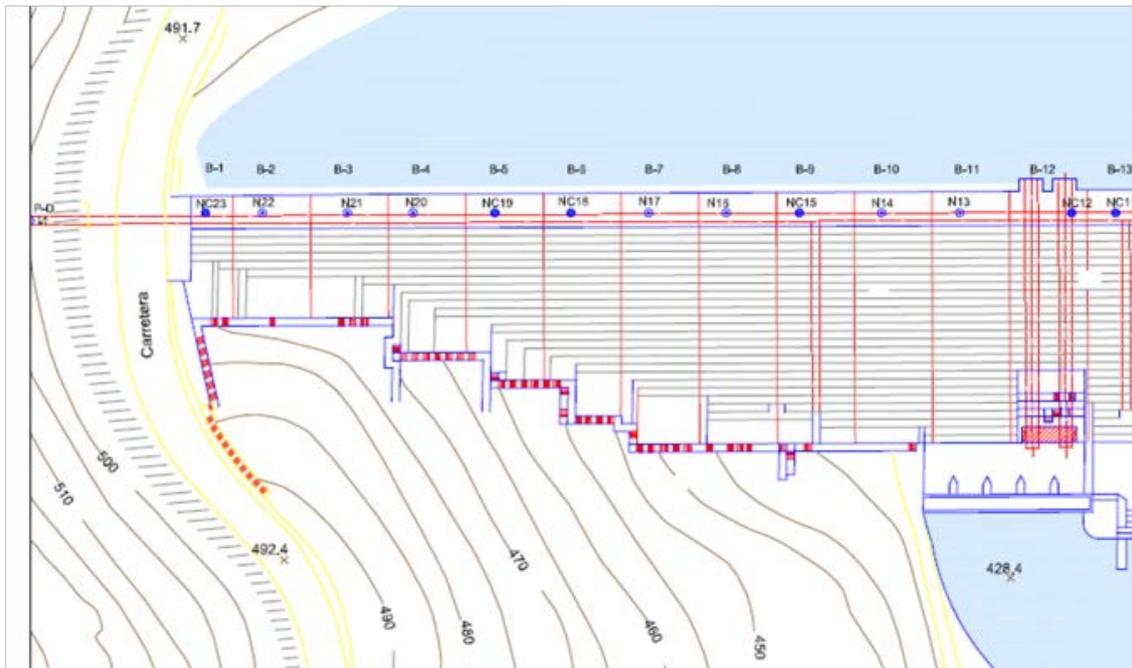


Figura 26. Situación de los bloques de presa en las proximidades del estribo derecho de la presa de Yesa (fuente: Asistencia Técnica)

Tercera referencia

Aumento transitorio de la velocidad de ascenso de los bloques de la presa de hasta 3,5mm/año en 2011 (Figura 25 y Figura 27).

Cuarta referencia

Aceleración de los movimientos en invierno 2012-13 (Noviembre-Febrero), probablemente como consecuencia de las lluvias acumuladas (Figura 28).

Quinta referencia

Reducción brusca de los desplazamientos a partir de Mayo de 2013. Los inclinómetros que atraviesan la SIR (SCI-8, SCI-9, SCI-12, SCI-17) no detectan desplazamientos (Figura 28).

A partir de Julio se produce una reactivación asociada con el desembalse y la retirada del terraplén. Posible interferencia de los movimientos del deslizamiento del Inglés.

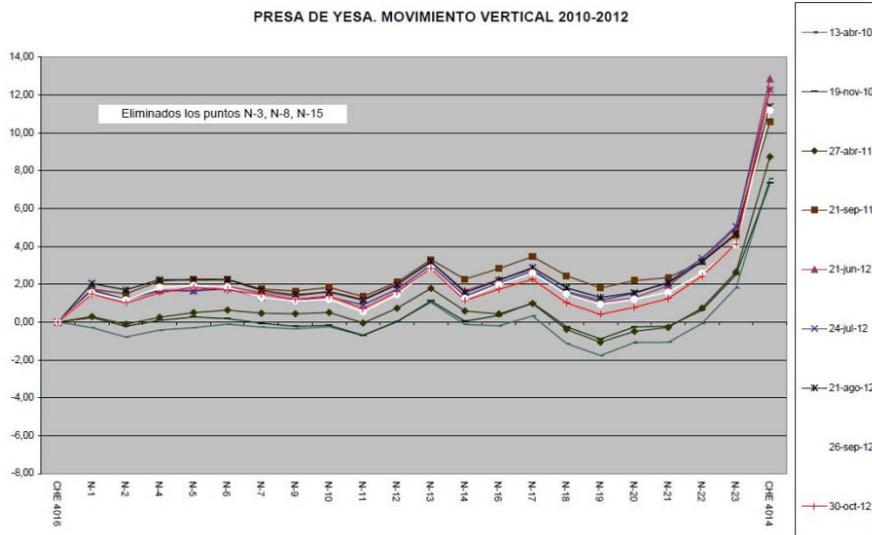


Figura 27. Desplazamientos (izamiento) de los puntos de control instalados en los bloques de la presa actual durante el periodo abril 2010 y Octubre 2012

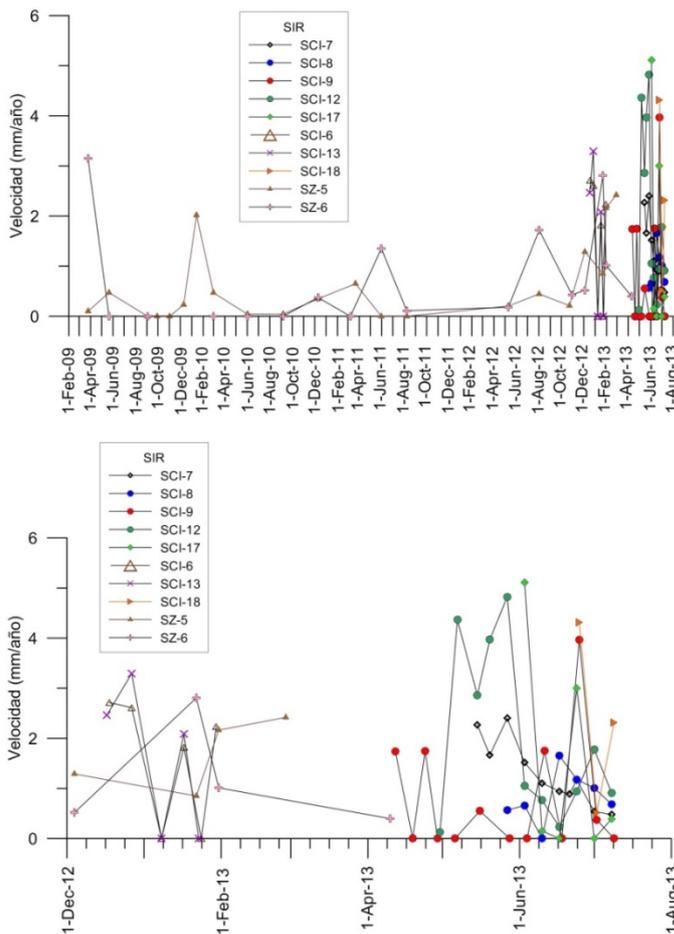


Figura 28. Tasas de movimiento en la SIR, obtenidas de la interpretación de los registros inclinométricos entre Febrero de 2009 y Agosto de 2013(arriba) y su detalle a partir de Diciembre de 2012 (abajo)



6.2 Calibración inicial del modelo

El modelo ha sido calibrado para cada uno de los perfiles seleccionados (UPC-0 a UPC-3). Estos perfiles muestran las geometrías de la cuña activa y de la cuña pasiva indicadas en la Tabla 6.

	UPC_0		UPC_1		UPC_2		UPC_3	
	α (°)	β (°)						
SPR	7	26	0	28	2	25	1	19
SIR	11	26	11	27	11	30	8	31

Tabla 6. Valores de los ángulos de inclinación de las cuñas medidos en los perfiles UPC

Como ya ha sido expuesto, el criterio seguido en la calibración ha consistido en minimizar las posibles incertidumbres para que los parámetros los resistentes del terreno y las presiones de agua queden acotados dentro de unos rangos compatibles con las observaciones. La calibración inicial en el caso de la la SPR toma como punto de referencia la situación de Septiembre de 2011, momento en el que se detectan los primeros síntomas de inestabilidad ($FS \approx 1$). En esta fecha la excavación para el recrecimiento de la presa ha sido ejecutada en su práctica totalidad (ver la geometría de los perfiles analizados en el

Anejo 2 – Parámetros de cálculo y condiciones de contorno) mientras que la ladera se considera en ausencia de presiones de agua ($Ru=0$) después de un verano anormalmente seco.

Se resuelve la situación de equilibrio límite con el objetivo de obtener el ángulo de fricción residual ($C=0$ kN/m²) de la superficie de deslizamiento. La solución permite obtener diversos ángulos de fricción en función de las inclinaciones (α y β) de los planos basales de las cuñas activa y pasiva medidos en los perfiles.

En perfiles analizados se ha realizado un análisis de sensibilidad paramétrica. A modo de ejemplo, la Tabla 7 muestra diversas combinaciones de ángulo residual de fricción y de parejas de valores de inclinación de los planos basales de las cuñas pasiva y activa (α y β , respectivamente) del perfil UPC_1 que cumplen la condición de estabilidad estricta ($FS \approx 1$) para la SPR, con el perfil topográfico correspondiente a la excavación para el recrecimiento de la presa en Septiembre de 2011 y con la condición de talud seco ($Ru=0$).

Ángulo fricción residual (°)	Ángulo α inclinación de cuña pasiva (°)	Ángulo β inclinación de cuña pasiva (°)
17	0	29
16,5	0	28
16	0	27
14	4	27
13,5	5	27
13	5	25

Tabla 7. Ejemplo de combinaciones de ángulos que proporcionan un $FS=1$ en las condiciones de Septiembre de 2011 ($Ru=0$) en el perfil UPC_1



Asimismo, se ha evaluado la influencia de la cohesión. Los distintos análisis muestran que no ésta no es necesaria para justificar la inestabilidad de la ladera y que, en cualquier caso, debería ser muy baja (<5kPa) (ver ejemplo en Tabla 8), lo que es consistente con las observaciones obtenidas en los testigos de sondeo (ver informe UPC, 2013).

Parámetros geométricos	
$\alpha=5^\circ$, $b=27^\circ$	
c (KN/m²)	Φ (°)
0	13.50
5	13.10
10	12.70
25	11.7
50	10
100	6.40

Tabla 8. Ejemplos de parejas de combinaciones de cohesión y ángulo de fricción que dan como resultado un FS=1 en las condiciones de Septiembre de 2011 ($R_u=0$) en el perfil UPC_1.

6.2.1 Calibración de la Superficie Principal de Rotura

La ladera es sensiblemente estable antes del inicio de las excavaciones en 2003 ($FS>1$). En Septiembre de 2011 se detectan, por primera vez, deformaciones en el inclinómetro (SZ3-A). Como se ha indicado, la ausencia de precipitaciones permite plantear que la desestabilización tiene lugar en ausencia de presiones de agua ($R_u=0$) y un $FS\approx 1$. En Febrero de 2013 se produce la crisis ($FS<1$) que conlleva el desalojo de la urbanización coincidiendo con un episodio de lluvias extraordinario ($R_u>0$). Una vez ejecutada la primera fase de la excavación, las velocidades en la ladera se reducen sensiblemente volviendo a una situación de estabilidad precaria ($FS\approx 1$) en una situación pluviométrica normalizada ($R_u\neq 0$).

La superficie piezométrica resultante de la infiltración proveniente del embalse actual (cota de agua 485m) se sitúa por debajo de la SPR y no interviene en el análisis, excepto para el perfil UPC_1.



A continuación se presenta un resumen de los resultados del análisis retrospectivo para cada uno de los perfiles analizados (UPC_0 a UPC_3). Los resultados que han sido finalmente seleccionados son los que muestran una mejor correspondencia con la geometría observada de la cuña (ángulos α y β), con el ángulo de fricción (dentro del rango de los ensayos de laboratorio) y la evolución observada del proceso de inestabilidad en la ladera.

Perfil UPC_0_SPR

Perfil UPC_0 SPR							
Embalse vacío							
$\alpha=7^\circ$, $\beta=26^\circ$, $\phi=16,5^\circ$							
Ru	Pre-2003	1ª fase 2005	Septiembre 2011	Septiembre 2012	Febrero 2013	Marzo 2013	Mayo 2013
0.000	1.36	1.03	1.03	1.00	1.00	1.01	1.02
0.025	1.33	1.00	1.00	0.97	0.97	0.98	1.00
0.050	1.30	0.98	0.98	0.95	0.95	0.96	0.97
0.100	1.24	0.92	0.92	0.90	0.90	0.90	0.92
0.150	1.19	0.87	0.87	0.85	0.85	0.85	0.86

Tabla 9. Resultados del perfil UPC_0 para la SPR. Las parejas de valores del FS y Ru resaltados en verde son los que mejor permiten explicar las situaciones de Referencia descritas en el apartado 6.1.1.

Perfil UPC-1_SPR

Perfil UPC_1 SPR							
Embalse vacío							
$\alpha=0^\circ$, $\beta=28^\circ$, $\phi=16,5^\circ$							
Ru	Pre-2003	1ª fase 2005	Septiembre 2011	Septiembre 2012	Febrero 2013	Marzo 2013	Mayo 2013
0.000	1.19	1.07	1.00	0.99	0.99	1.00	1.01
0.025	1.17	1.05	0.98	0.97	0.97	0.98	0.99
0.050	1.15	1.02	0.93	0.95	0.95	0.96	0.97
0.100	1.10	0.98	0.92	0.91	0.91	0.92	0.93
0.150	1.05	0.93	0.87	0.87	0.86	0.88	0.89

Tabla 10. Resultados del perfil UPC_1 para la SPR. Las parejas de valores del FS y Ru resaltados en verde son los que mejor permiten explicar las situaciones de Referencia descritas en el apartado 6.1.1.



Perfil UPC_2 SPR

Perfil UPC_2 SPR							
Embalse vacío							
$\alpha=2^\circ$, $\beta=25^\circ$, $\phi=16,5^\circ$							
Ru	Pre-2003	1ª fase 2005	Septiembre 2011	Septiembre 2012	Febrero 2013	Marzo 2013	Mayo 2013
0.000	1.07	1.08	1.00	1.00	1.00	1.00	1.02
0.025	1.05	1.06		0.98	0.98	0.98	0.99
0.050	1.02	1.03		0.95	0.95	0.95	0.96
0.100	0.97	0.97		0.90	0.90	0.90	0.90
0.150	0.92	0.92		0.84	0.84	0.84	0.84

Tabla 11. Resultados del perfil UPC_2 para la SPR. Las parejas de valores del FS y Ru resaltados en verde son los que mejor permiten explicar las situaciones de Referencia descritas en el apartado 6.1.1.

Perfil UPC_3 SPR

Perfil UPC_3 SPR							
Embalse vacío							
$\alpha=1^\circ$, $\beta=19^\circ$, $\phi=16,5^\circ$							
Ru	Pre-2003	1ª fase 2005	Septiembre 2011	Septiembre 2012	Febrero 2013	Marzo 2013	Mayo 2013
0.000	1.04	1.05	1.04	1.00	1.00	1.00	1.02
0.025	1.02	1.02	1.02	0.99	0.99	0.99	1.00
0.050	0.99	1.00	1.00	0.97	0.97	0.97	0.98
0.100	0.95	0.95	0.98	0.93	0.93	0.93	0.95
0.150	0.90	0.90	0.95	0.89	0.89	0.89	0.91

Tabla 12. Resultados del perfil UPC_3 para la SPR. Las parejas de valores del FS y Ru resaltados en verde son los que mejor permiten explicar las situaciones de Referencia descritas en el apartado 6.1.1.

El perfil UPC_3 no tiene en cuenta la excavación del desmonte de la CN-240 que se ejecutó durante la primera fase de excavación. La excavación no se refleja en el perfil de Septiembre de 2011 a pesar que se sitúa muy próximo al mismo.



Los resultados de la tabla 10 a 13 explican de manera razonable el comportamiento de la SPR antes y después del inicio de los trabajos de excavación para el recrecimiento de la presa. Se observa que los perfiles situados más al Oeste (UPC_0 y UPC_1) disfrutaban de un margen de estabilidad suficiente antes del inicio de las excavaciones en 2003. También la situación de crisis con velocidades lentas de Enero-Febrero de 2013 y el inicio de la fase de estabilización confirmada en Mayo de 2103.

El valor del ángulo de fricción ($16,5^\circ$) se sitúa en el rango medio de los obtenidos en los ensayos de corte. Para obtener un ángulo de fricción más bajo se requiere una geometría de la doble cuña que no se corresponde con la observada en los perfiles disponibles.

Finalmente, no se requieren presiones elevadas de agua para generar la desestabilización. Un Ru de 0,05 es el valor que mejor se ajusta a la situación de Enero-Febrero de 2013. Un Ru mayor (p.e. 0.10) hubiera generado una situación de inestabilidad en los Perfiles UPC_2 y UPC-3 en el pasado y no hay evidencias de ello.

Un Ru de 0,05 representa una altura de agua equivalente a 7,25m en el punto A (Figura 2). Se trata de un resultado consistente con las observaciones de los piezómetros, que no han detectado hasta ahora, presiones de agua elevadas en los sondeos. Cuando se instaló el piezómetro en el SCI-6, situado en las inmediaciones del eje sinclinal, la columna de agua se estabilizó transitoriamente 7m por encima de la superficie de rotura aunque unas semanas después desapareció (Figura 18).

En cualquier caso, el episodio de Enero-Febrero de 2013 es una situación que ha sido superada en el pasado y que probablemente lo será en el futuro. Por este motivo, en el análisis de la SPR en los capítulos siguientes se evaluará también la situación con un Ru de 0,1.



6.2.2 Superficie Inferior de Rotura

La ladera se considera en equilibrio precario antes del inicio de las excavaciones en 2003. Aunque no se dispone de registros instrumentales, la parte baja de la ladera (donde aflora la SIR) ha mostrado episódicamente indicios de inestabilidad antes de 2003. Estos indicios son difíciles de valorar en la medida que aguas arriba de la presa coexisten el deslizamiento del Inglés y la SIR. En 2003 se detectan movimientos de izamiento en los bloques de la presa más próximos a la ladera, que se prolongan durante siete años en condiciones pluviométricas que pueden considerarse ordinarias. Dado que se trata de un movimiento ascendente, el deslizamiento debería atribuirse a la SIR. En estas circunstancias se considera un $FS \approx 1$ para SIR en condiciones de $R_u \neq 0$.

En análisis de la SIR se ha considerado la existencia de filtraciones de agua desde el embalse asumiendo que una vez se alcanza el nivel máximo de llenado (cota 485m) se genera un flujo de acuerdo con la modelación obtenida por Arce (2008) y que se reproduce en la Figura 29.

En cada perfil UPC analizado se ha calculado la altura piezométrica asociada al flujo de agua subterránea proveniente de la ladera, a partir de la asignación de única altura promedio al mismo.

En el perfil UPC_2 se introdujo en el análisis el efecto de la presa actual como fuerza aplicada en la dirección vertical sobre la cuña pasiva. El peso se obtiene de manera gráfica como se presenta en la Figura 13 y es igual a:

Peso de la presa actual: Área en el perfil UPC_2 x Peso de hormigón = $1283 \times 24 \text{ KN/ml} = 30720 \text{ KN/ml}$

A continuación se presenta un resumen de los resultados el análisis retrospectivo para cada uno de los perfiles analizados (UPC_0 a UPC_3). Los resultados que han sido finalmente seleccionados son los que muestran una mejor correspondencia entre la geometría observada de la cuña (ángulos α y β), con el ángulo de fricción (dentro del rango de los ensayos de laboratorio) y la evolución observada del proceso de inestabilidad en la ladera.

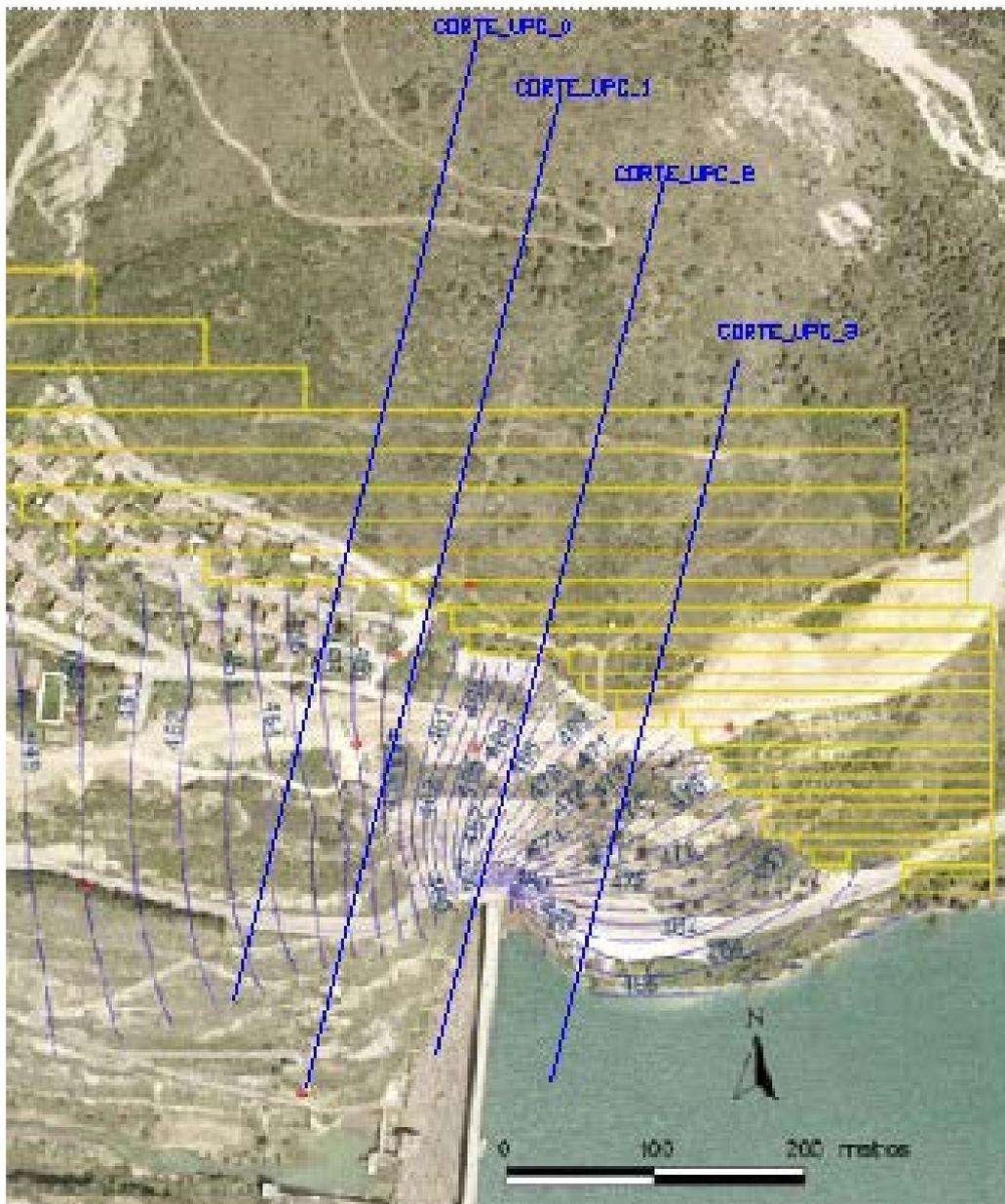


Figura 29. Superficie piezométrica obtenida mediante modelización hidrológica de la ladera de la margen derecha de Yesa considerando la cota máxima de embalse de la presa actual (Arce, 2008)



Perfil UPC 0 SIR

Altura piezométrica en el perfil generada por la situación de flujo desde el embalse: $hw = 456m$

Perfil UPC_0 SIR							
Embalse lleno							
$\alpha=11^\circ, \beta=26^\circ, \phi=16^\circ$							
Ru	Pre-2003	1ª fase 2005	Septiembre 2011	Septiembre 2012	Febrero 2013	Marzo 2013	Mayo 2013
0.000	1.14	1.02	1.02	1.01	1.01	1.02	1.04
0.025	1.12	1.00		0.99	0.99	1.01	1.02
0.050	1.10	0.98		0.97	0.97	0.99	1.00
0.100	1.06	0.94		0.93	0.93	0.95	0.93
0.150	1.01	0.90		0.89	0.89	0.90	0.91

Tabla 13. Resultados del perfil UPC_0 para la SIR. Las parejas de valores del FS y Ru resaltados en verde son los que mejor permiten explicar las situaciones de Referencia descritas en el apartado 6.1.2.

Perfil UPC 1 SIR

Altura piezométrica en el perfil generada por la situación de flujo desde el embalse $hw = 459m$

Perfil UPC_1 SIR							
Embalse lleno							
$\alpha=11^\circ, \beta=27^\circ, \phi=16^\circ$							
Ru	Pre-2003	1ª fase 2005	Septiembre 2011	Septiembre 2012	Febrero 2013	Marzo 2013	Mayo 2013
0.000	1.19	1.03	1.00	0.99	0.99	1.01	1.02
0.025	1.17	1.00		0.98	0.98	0.99	1.00
0.050	1.15	0.99		0.96	0.96	0.98	0.98
0.100	1.11	0.95		0.92	0.92	0.94	0.95
0.150	1.06	0.91		0.87	0.87	0.90	0.90

Tabla 14. Resultados del perfil UPC_1 para la SIR. Las parejas de valores del FS y Ru resaltados en verde son los que mejor permiten explicar las situaciones de Referencia descritas en el apartado 6.1.2.



Perfil UPC_2 SIR

Altura piezométrica en el perfil generada por la situación de flujo desde el embalse hw= 467m

Perfil UPC_2 SIR							
Embalse lleno							
$\alpha=11^\circ, \beta=30^\circ, \phi=16^\circ$							
Ru	Pre-2003	1ª fase 2005	Septiembre 2011	Septiembre 2012	Febrero 2013	Marzo 2013	Mayo 2013
0.000	1.01	1.01	0.98	0.98	0.98	1.00	1.02
0.025	0.99	1.00	0.97	0.97	0.97	0.99	1.00
0.050	0.97	0.98	0.95	0.95	0.95	0.97	0.98
0.100	0.94	0.94	0.91	0.91	0.91	0.93	0.94
0.150	0.90	0.90	0.87	0.87	0.87	0.89	0.90

Tabla 15. Resultados del perfil UPC_2 para la SIR. Las parejas de valores del FS y Ru resaltados en verde son los que mejor permiten explicar las situaciones de Referencia descritas en el apartado 6.1.2.

Perfil UPC_3 SIR

Altura piezométrica en el perfil generada por la situación de flujo desde el embalse hw= 485m

Perfil UPC_2 SIR							
Embalse lleno							
$\alpha=8^\circ, \beta=31^\circ, \phi=16^\circ$							
Ru	Pre-2003	1ª fase 2005	Septiembre 2011	Septiembre 2012	Febrero 2013	Marzo 2013	Mayo 2013
0.000	1.03	1.03	1.03	1.01	1.01	1.02	1.04
0.025	1.01	1.01	1.01	0.99	0.99	1.00	1.02
0.050	0.99	0.99	0.99	0.97	0.97	0.98	1.00
0.100	0.95	0.95	0.95	0.93	0.93	0.94	0.98
0.150	0.91	0.91	0.91	0.88	0.88	0.89	0.90

Tabla 16. Resultados del perfil UPC_3 para la SIR. Las parejas de valores del FS y Ru resaltados en verde son los que mejor permiten explicar las situaciones de Referencia descritas en el apartado 6.1.2.



Los resultados del análisis de los cuatro perfiles UPC para la SIR permiten explicar razonablemente la situación inicial de la ladera cuyos perfiles más orientales (UPC_2 y UPC_3) podrían encontrarse en una situación de equilibrio estricto ante episodios lluviosos anómalos. Asimismo refleja la situación de estabilidad precaria de la SIR durante la primera fase de excavación (2003-2005). También la mejora de la estabilidad en las primeras fases de descabezado del deslizamiento (Marzo 2013) y la fase de estabilización confirmada en Mayo de 2013.

Al igual que en la SPR, el valor del ángulo de fricción (16°) obtenido en la SIR se sitúa en el rango medio de los obtenidos en los ensayos de corte. La selección de un ángulo de fricción más bajo requeriría de unos ángulos de inclinación de las superficies de deslizamiento en la doble cuña que tendrían un menor ajuste con los observados en los perfiles disponibles.

En caso de la SIR se contempla un flujo permanente proveniente del embalse debido a que una parte de la formación del Flysch de Yesa queda sumergida en situaciones de nivel de embalse alto. También como ocurre en la SPR, no se requieren presiones de agua (R_u) elevadas para justificar la desestabilización de la ladera. Un R_u de 0,05 e incluso inferior es el valor que mejor se ajusta a las situaciones de inestabilidad observadas. Este valor representa una altura de agua equivalente unos 13,8m en el punto A (Figura 2). Se trata de un resultado consistente con las observaciones de los piezómetros, que no han detectado hasta el momento presente, presiones de agua elevadas en los sondeos. De todos modos, el episodio de Enero-Febrero de 2013 es una situación que ha sido superada en el pasado y que probablemente lo será en el futuro. Por este motivo, en el análisis de la SPR en los capítulos siguientes se evaluará también la situación con un R_u de 0,1.



7. Análisis de la estabilidad de la ladera con la presa recrecida y los elementos de contención e impermeabilización

En este capítulo se analizan las condiciones de estabilidad de la ladera de Marmayor una vez haya sido recrecida la presa y finalizadas todas las labores de descabezado del deslizamiento, la construcción de los elementos de contención y de la pantalla de impermeabilización. Ésta última está prevista que atraviese la formación Flysch de Yesa y penetre 10m en la formación impermeable de las Margas de Pamplona y se extienda por la margen derecha de la presa, aguas arriba desde el estribo derecho hasta el afloramiento de la formación del flysch por encima de la cota 511m, cota máxima del embalse recrecido.

Los escenarios evaluados son los siguientes:

- a) Perfil definitivo de la ladera después del descabezamiento del deslizamiento (1,5 millones de metros cúbicos)
- b) Igual que el caso anterior, añadiendo el efecto de los muros jardinera anclados y la presencia de la pantalla impermeable.
- c) Igual que el caso anterior, considerando el peso de la presa recrecida

En cada escenario se ha evaluado la estabilidad para cada uno de los perfiles (UPC_0 a UPC_3) teniendo en cuenta sus especificidades en lo que se refiere al perfil de excavación, el peso correspondiente de la presa de tierras, la altura de muro y fuerza de anclajes y la presencia de la pantalla impermeable.

Los perfiles analizados se incluyen en el

Anejo 2 – Parámetros de cálculo y condiciones de contorno. El cálculo de las fuerzas correspondientes a la presa de tierras y de los muros jardinera con sus correspondientes anclajes se ha realizado con la información suministrada por la Asistencia Técnica de la obra.

Las características de los muros jardinera se indican en el

Anejo 2 – Parámetros de cálculo y condiciones de contorno y se presenta un ejemplo en la Figura 30.

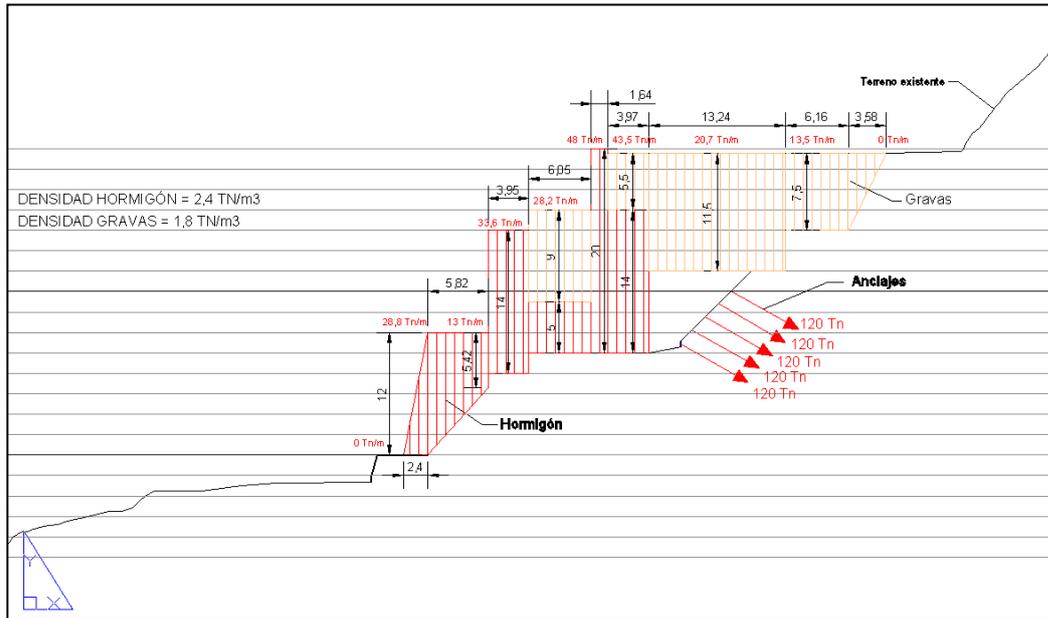


Figura 30. Ejemplo de perfil del muro jardinera, cargas de anclajes y pesos respectivos (Eje 2 – información facilitada por la Asistencia Técnica)



7.1. Superficie Principal de Rotura (SPR)

Perfil UPC_0_SPR

Parámetros de cálculo: No existe muro jardinera anclado

Peso correspondiente a la presa recrecida: 17614kN/ml (área x 22kN/ml)

Perfil UPC-0 SPR			
Parámetros $\alpha=7^\circ$, $b=26^\circ$ $c'=0$ kN/m ² , $\phi'=16,5^\circ$			
Refuerzo ladera + pantalla impermeable			
Ru	Geometría definitiva ladera	+Presa de tierras	+Muro jardinera anclado
0.000	1.11	1.22	N/A
0.025	1.08	1.19	N/A
0.050	1.05	1.16	N/A
0.100	0.99	1.11	N/A

Tabla 17. FS obtenidos en el perfil UPC_0 para la SPR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización e impermeabilización ante diversas situaciones hidrológicas (Ru).



Perfil UPC_1

Parámetros de cálculo: Muro jardinera: 10634 kN7ml

Fuerza horizontal de los anclajes: 5020kN Fuerza vertical de los anclajes: 2898kN

Peso correspondiente a la presa recrecida: 1235kN/ml

Perfil UPC-1 SPR			
Parámetros $\alpha=0^\circ$, $b=28^\circ$ $c'=0$ kN/m ² , $\phi'=16,5^\circ$			
Refuerzo ladera + pantalla impermeable			
Ru	Geometría definitiva ladera	+ Muro jardinera anclado	+ Presa de tierras
0.000	1.16	1.38	1.38
0.025	1.14	1.35	1.35
0.050	1.12	1.32	1.33
0.100	1.08	1.28	1.29

Tabla 18. FS obtenidos en el perfil UPC_1 para la SPR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización e impermeabilización ante diversas situaciones hidrológicas (Ru).

Perfil UPC_2 SPR

Muro jardinera: 4704 kN/ml

Fuerza horizontal de los anclajes: 5020kN Fuerza vertical de los anclajes: 2898kN

Peso correspondiente a la presa recrecida: no afecta al perfil

Perfil UPC-2 SPR			
Parámetros $\alpha=2^\circ$, $b=25^\circ$ $c'=0$ kN/m ² , $\phi'=16,5^\circ$			
Refuerzo ladera + pantalla impermeable			
Ru	Geometría definitiva ladera	+Presa de tierras	+Muro jardinera anclado
0.000	1.12	N/A	1.39
0.025	1.10	N/A	1.36
0.050	1.07	N/A	1.32
0.100	1.02	N/A	1.26

Tabla 19. FS obtenidos en el perfil UPC_2 para la SPR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización e impermeabilización ante diversas situaciones hidrológicas (Ru).



Perfil UPC 3 SPR

Muro jardinera: 4620 kN/ml

Fuerza horizontal de los anclajes: 5020kN Fuerza vertical de los anclajes: 2898kN

Peso correspondiente a la presa recrecida: no afecta al perfil

Perfil UPC-3 SPR			
Parámetros $\alpha=1^\circ$, $b=19^\circ$ $c'=0$ kN/m ² , $\phi'=16,5^\circ$			
Refuerzo ladera + pantalla impermeable			
Ru	Geometría definitiva ladera	+Presa de tierras	+Muro jardinera anclado
0.000	1.02	N/A	1.41
0.025	1.00	N/A	1.39
0.050	0.99	N/A	1.37
0.100	0.95	N/A	1.33

Tabla 20. FS obtenidos en el perfil UPC_3 para la SPR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización e impermeabilización ante diversas situaciones hidrológicas (Ru)

Todos los perfiles analizados proporcionan un FS superior a 1,1 en todos los escenarios de flujo subterráneo (lluvias) considerados.



7.2. Superficie Inferior de Rotura (SIR)

Los parámetros utilizados en cada perfil son distintos a los de la SPR excepto en lo que se refiere al peso de los muros jardinera. Los anclajes de los muros jardinera atraviesan completamente la SPR pero no la SIR por lo que no han sido considerados como elemento de estabilización. El peso de la presa es distinto así como las presiones de agua generadas por las lluvias.

En cada escenario se ha evaluado la estabilidad para cada uno de los perfiles (UPC_0 a UPC_3) teniendo en cuenta sus especificidades en lo que se refiere al nuevo perfil obtenido.

Perfil UPC_0 SIR

No existe muro jardinera anclado

Peso correspondiente a la presa recrecida: 39842kN/ml (areax22kN/m³)

Perfil UPC_0 SIR $\alpha=11^\circ$, $\beta=26^\circ$, $\phi=16^\circ$ Refuerzo ladera + pantalla impermeable		
Ru	Geometría definitiva ladera	+Presa de tierras
0.000	1.19	1.32
0.025	1.15	1.28
0.050	1.12	1.24
0.100	1.05	1.16

Tabla 21. FS obtenidos en el perfil UPC_0 para la SIR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización e impermeabilización ante diversas situaciones hidrológicas (Ru)



Perfil UPC_1 SIR

Peso correspondiente a la presa recrecida: 33930 kN/ml (areax22kN/m³)

Peso del muro jardinera: 10634 kN/ml

Perfil UPC_1 SIR $\alpha=11^\circ$, $\beta=27^\circ$, $\phi=16^\circ$ Refuerzo ladera + pantalla impermeable			
Ru	Geometría definitiva ladera	+Muro jardinera	+Presa de tierras
0.000	1.20	1.24	1.38
0.025	1.16	1.20	1.34
0.050	1.13	1.17	1.31
0.100	1.07	1.11	1.24

Tabla 22. FS obtenidos en el perfil UPC_1 para la SIR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización e impermeabilización ante diversas situaciones hidrológicas (Ru)

Perfil UPC_2 SIR

Peso de la presa actual: 30720 kN/ml

Peso del Muro jardinera: 15912 kN/ml

Perfil UPC_2 SIR $\alpha=11^\circ$, $\beta=30^\circ$, $\phi=16^\circ$ Refuerzo ladera + pantalla impermeable			
Ru	Geometría definitiva ladera	+ Presa actual	+ Muro jardinera
0.000	1.17	1.30	1.35
0.025	1.13	1.27	1.31
0.050	1.10	1.23	1.28
0.100	1.04	1.16	1.21

Tabla 23. FS obtenidos en el perfil UPC_2 para la SIR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización e impermeabilización ante diversas situaciones hidrológicas (Ru) y acción sísmica



Perfil UPC_3 SIR

Peso del descabezado del deslizamiento del Inglés: 5980 kN/ml

Peso del Muro jardinera (cota 516m): 15912 kN/ml

Perfil UPC_3 SIR			
$\alpha=8^\circ$, $\beta=31^\circ$, $\phi=16^\circ$			
Refuerzo ladera + pantalla impermeable			
Ru	Descabezamiento del Inglés	+ Geometría definitiva (*)	+ Muro jardinera
0.000	1.17	1.20	1.29
0.025	1.14	1.17	1.25
0.050	1.11	1.14	1.22
0.100	1.05	1.08	1.15

Tabla 24. FS obtenidos en el perfil UPC_0 para la SIR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización e impermeabilización ante diversas situaciones hidrológicas (Ru)

(*) sin descabezar el deslizamiento del Inglés

Se ha considerado el posible efecto de una teórica solución de estabilización del deslizamiento del Inglés, presente en este perfil, que consistiera en su descabezamiento. La geometría definitiva consiste en el perfil resultante de los trabajos de excavación de la ladera realizados en el periodo febrero-noviembre de 2013.

Todos los perfiles analizados proporcionan un FS superior a 1,15 en todos los escenarios considerados de flujo subterráneo generado por la infiltración del agua de lluvia.



8. Análisis de la estabilidad asociada a futuros escenarios

En este capítulo se analizan las condiciones de estabilidad de la ladera de Marmayor una vez recrecida la presa y finalizadas todas las labores de estabilización y contención pero considerando nuevos escenarios.

8.1 Sismo de proyecto

El análisis del efecto sobre la estabilidad de la ladera debido al sismo de proyecto se realiza con los parámetros facilitados en el informe de TYPESA (2013)⁸. La aceleración sísmica de cálculo a_c , definida por la NCSE-02 es:

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b = 0,072g$$

Donde:

S es un coeficiente de amplificación del terreno igual a 1,04 (según la Tabla C2.1, pág. 16 de la NCSE-02, considerando $\rho \cdot a_b \leq 0.1$ y $C=1,3$ para terreno tipo II > Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros. Velocidad de propagación de las ondas elásticas longitudinales $v_p > 1.000$ m/s, transversales o de cizalla $v_s > 400$ m/s. NSPT > 40).

ρ es un coeficiente en función de la importancia de la construcción (en el caso de una presa: 1,3)

a_b es la aceleración básica del sismo (0,04g para la zona de Yesa)

Este escenario corresponde a un periodo de retorno de $T=1000$ años.

El análisis realizado se basa en el procedimiento propuesto en el Eurocódigo EC8 (Disposiciones para el Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 5 Cimentaciones, estructuras de contención de tierras y aspectos geotécnicos). El Eurocódigo establece que en caso de considerar el efecto del sismo mediante fuerzas pseudoestáticas, las fuerzas de inercia sísmicas horizontal (F_H) y vertical (F_V) para el caso de taludes son respectivamente:

$$F_H = 0,5 \cdot \frac{a_c}{g} \cdot W$$

$$F_V = \pm 0,5 F_H$$

Siendo W , el peso

La dirección de F_H es hacia la dirección del movimiento del deslizamiento y de F_V es opuesta al peso.

⁸ Estudio de la estabilidad de la ladera de la margen derecha de la Presa de Yesa. TYPESA. Junio de 2013. 473pp.



8.1.1. Superficie Principal de Rotura (SPR)

Perfil UPC_0_SPR

Perfil UPC-0 SPR		
Parámetros $\alpha=7^\circ$, $b=26^\circ$ $c'=0$ kN/m ² , $\phi'=16,5^\circ$		
Refuerzo ladera + pantalla impermeable		
Ru	Geometría definitiva+ elementos de contención	+ Sismo T=1000 años
0.000	1.22	1.07
0.025	1.19	1.05
0.050	1.16	1.02
0.100	1.11	0.96

Tabla 25. FS obtenidos en el perfil UPC_0 para la SPR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización e impermeabilización ante diversas situaciones hidrológicas (Ru) y acción sísmica.

Perfil UPC_1

Perfil UPC-1 SPR		
Parámetros $\alpha=0^\circ$, $b=28^\circ$ $c'=0$ kN/m ² , $\phi'=16,5^\circ$		
Refuerzo ladera + pantalla impermeable		
Ru	Geometría definitiva+ muro jardinera + presa de tierras	+ Sismo T=1000 años
0.000	1.38	1.20
0.025	1.35	1.18
0.050	1.32	1.16
0.100	1.23	1.12

Tabla 26. FS obtenidos en el perfil UPC_1 para la SPR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización e impermeabilización ante diversas situaciones hidrológicas (Ru) y acción sísmica.



Perfil UPC 2 SPR

Perfil UPC-2 SPR		
Parámetros $\alpha=2^\circ$, $b=25^\circ$ $c'=0$ kN/m ² , $\phi'=16,5^\circ$		
Refuerzo ladera + pantalla impermeable		
Ru	Geometría definitiva+ muro jardinera + presa de tierras	+ Sismo T=1000 años
0.000	1.39	1.21
0.025	1.36	1.19
0.050	1.32	1.16
0.100	1.26	1.10

Tabla 27. FS obtenidos en el perfil UPC_2 para la SPR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización e impermeabilización ante diversas situaciones hidrológicas (Ru) y acción sísmica

Perfil UPC 3 SPR

Perfil UPC-3 SPR		
Parámetros $\alpha=1^\circ$, $b=19^\circ$ $c'=0$ kN/m ² , $\phi'=16,5^\circ$		
Refuerzo ladera + pantalla impermeable		
Ru	Geometría definitiva+ muro jardinera	+ Sismo T=1000 años
0.000	1.41	1.23
0.025	1.39	1.21
0.050	1.37	1.20
0.100	1.33	1.16

Tabla 28. FS obtenidos en el perfil UPC_3 para la SPR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización e impermeabilización ante diversas situaciones hidrológicas (Ru) y acción sísmica

Se observa que el sismo produce una reducción significativa del FS. En todos los escenarios hidrológicos considerados, el FS disponible en el conjunto de la ladera es suficiente para mantener las condiciones de estabilidad ($FS > 1,1$). Sin embargo, en el perfil UPC_0, se produciría una situación crítica ($FS < 1$) si el sismo coincidiera con un episodio pluviométrico de



magnitud mayor al ocurrido en Enero-Febrero de 2013 ($R_u=0,05$). Estas lluvias corresponden a un periodo de retorno de $T=37$ años.

Al tratarse de fenómenos independientes entre sí, la probabilidad anual que el sismo de periodo de retorno $T=1000$ años, coincida con un episodio lluvioso de esta magnitud es:

$$P(S | L) = P(S) * P(L) = 10^{-3} * 2,7 \cdot 10^{-2} = 2,7 \cdot 10^{-5}$$

Siendo:

$P(S | L)$ la probabilidad anual que el sismo de $T=1000$ años se produzca al mismo tiempo que un episodio de lluvias con un $T=37$ años

$P(S)$: probabilidad anual del sismo de $T=1000$ años

$P(L)$: probabilidad anual de un episodio lluvioso de $T=37$ años



8.1.2. Superficie Inferior de Rotura (SIR)

Perfil UPC_0_SIR

Perfil UPC_0 SIR		
$\alpha=11^\circ$, $\beta=26^\circ$, $\phi=16^\circ$		
Refuerzo ladera + pantalla impermeable		
Ru	Geometría definitiva+ presa de tierras	+ Sismo T=1000 años
0.000	1.32	1.14
0.025	1.28	1.11
0.050	1.24	1.08
0.100	1.16	1.01

Tabla 29. FS obtenidos en el perfil UPC_0 para la SIR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización e impermeabilización ante diversas situaciones hidrológicas (Ru) y acción sísmica

Perfil UPC_1_SIR

Perfil UPC_1 SIR		
$\alpha=11^\circ$, $\beta=27^\circ$, $\phi=16^\circ$		
Refuerzo ladera + pantalla impermeable		
Ru	Geometría definitiva+ muro jardinera + presa de tierras	+ Sismo T=1000 años
0.000	1.38	1.19
0.025	1.34	1.16
0.050	1.31	1.13
0.100	1.24	1.06

Tabla 30. FS obtenidos en el perfil UPC_1 para la SIR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización e impermeabilización ante diversas situaciones hidrológicas (Ru) y acción sísmica



Perfil UPC 2 SIR

Peso de la presa actual: 30720 kN/ml

Peso del muro jardinera: 15912 kN/ml

Perfil UPC 2 SIR		
$\alpha=11^\circ$, $\beta=30^\circ$, $\phi=16^\circ$		
Refuerzo ladera + pantalla impermeable		
Ru	Geometría definitiva+ muro jardinera + presa de tierras	+ Sismo T=1000 años
0.000	1.35	1.17
0.025	1.31	1.14
0.050	1.28	1.11
0.100	1.21	1.05

Tabla 31. FS obtenidos en el perfil UPC_2 para la SIR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización e impermeabilización ante diversas situaciones hidrológicas (Ru) y acción sísmica

Perfil UPC 3 SIR

Peso del descabezado del deslizamiento del Inglés: 5980 kN/ml

Peso del Muro jardinera: 15912 kN/ml

Perfil UPC 3 SIR		
$\alpha=11^\circ$, $\beta=30^\circ$, $\phi=16^\circ$		
Refuerzo ladera + pantalla impermeable		
Ru	Geometría definitiva+ muro jardinera	+ Sismo T=1000 años
0.000	1.29	1.12
0.025	1.25	1.09
0.050	1.22	1.07
0.100	1.15	1.01

Tabla 32. FS obtenidos en el perfil UPC_0 para la SIR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización e impermeabilización ante diversas situaciones hidrológicas (Ru) y acción sísmica



Al igual que ocurre en el caso de la SPR, el sismo produce una reducción significativa del FS en la SIR. A pesar de ello, en todos los escenarios hidrológicos considerados, el FS disponible en el conjunto de la ladera es suficiente para mantener las condiciones de estabilidad ($FS > 1,0$).



8.2 Escenario de desembalse rápido y sin pantalla de impermeabilización

Para mostrar la importancia de la pantalla de impermeabilización, en este apartado se evalúa la estabilidad de la ladera de la margen derecha de la presa una vez finalizadas las labores de estabilización y contención considerando un escenario que contempla un daño en la pantalla de impermeabilización que la inutilice, un tiempo prolongado de máximo nivel de embalse que genere una situación piezométrica estacionaria en la ladera y, en su caso, el desembalse rápido sin permitir el drenaje de la ladera (se elimina el efecto favorable la presión de la lámina de agua Pw_f sobre la superficie topográfica)⁹.

Es un escenario conservador que por un lado, considera que el daño en la pantalla se extenderá desde el estribo derecho de la presa unos cientos de metros aguas arriba hasta el afloramiento del Flysch de Yesa por encima de la cota 511m. Por otro lado, se asume que el nivel de máximo de embalse se mantiene un tiempo prolongado con el fin de generar un flujo estacionario en la ladera y posteriormente, el desembalse rápido.

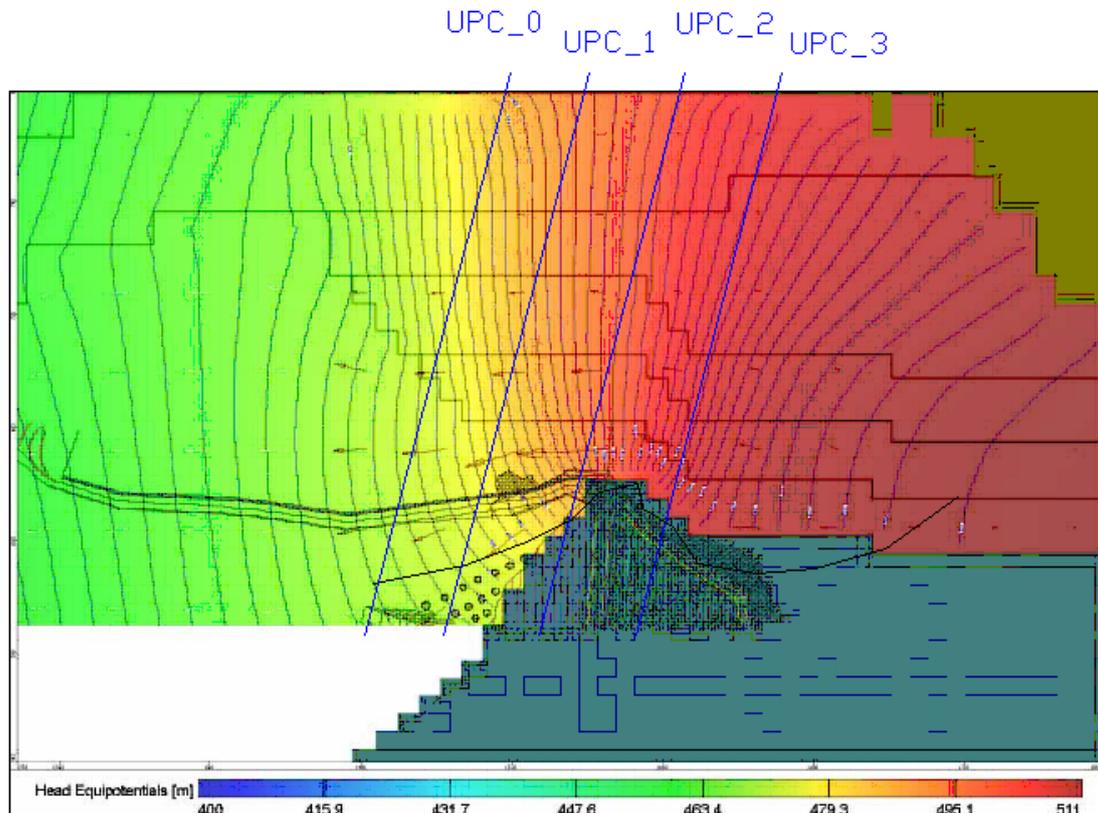
Los escenarios que se presentan son los siguientes:

- (a) Perfil definitivo de la ladera una vez descabezado el deslizamiento (1,5 millones de metros cúbicos), añadiendo la acción de los muros jardinera anclados y el peso de la presa recrecida
- (b) Igual que el caso anterior, considerando que se establece un flujo estacionario desde la cota máxima de embalse (cota 511m) y el desembalse rápido.

En todos los escenarios se consideran también las distintas situaciones pluviométricas en la ladera expresadas por el correspondiente R_u

Se toma como referencia la modelización del flujo realizada por Arce (2008) y que se sintetiza en la Figura 31.

⁹ Consultar Figura 23



sin pantalla de impermeabilización

Figura 31. Simulación del nivel freático de la ladera de la margen derecha generado por la infiltración desde una cota de embalse de 511m, sin pantalla de impermeabilización (obtenido de Arce, 2008). Situación de los perfiles analizados (UPC_0 a UPC_3)

Los resultados se presentan para cada una de las superficies de rotura.



8.2.1. Superficie Principal de Rotura (SPR)

Perfil UPC_0

Parámetros de cálculo:

No existe muro jardinera anclado

Peso correspondiente a la presa recrecida: 17614kN/ml (área x 22kN/ml)

Altura piezométrica generada en el perfil por las filtraciones del embalse lleno: $h_w = 480\text{m}$

Perfil UPC_0 SPR			
Parámetros $\alpha=7^\circ$, $b=26^\circ$ $c'=0\text{ kN/m}^2$, $\phi'=16,5^\circ$			
Filtración desde el embalse –régimen estacionario			
$h_w=480\text{m}$			
Desembalse rápido			
Ru	Geometría definitiva ladera	+ Presa de tierras	+Muro jardinera anclado
0.000	1.10	1.22	N/A
0.025	1.08	1.19	N/A
0.050	1.06	1.16	N/A
0.100	1.02	1.10	N/A

Tabla 33. FS obtenidos en el perfil UPC_0 para la SPR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización. Ausencia de impermeabilización y diversas situaciones pluviométricas (Ru).



Perfil UPC_1_SPR

Parámetros de cálculo:

Muro jardinera: 10634 kN7ml

Fuerza horizontal de los anclajes: 5020kN

Fuerza vertical de los anclajes: 2898kN

Peso correspondiente a la presa recrecida: 1235kN/ml

Altura piezométrica generada en el perfil por las filtraciones del embalse lleno: $h_w = 485\text{m}$

Perfil UPC-1 SPR			
Parámetros $\alpha=0^\circ$, $b=28^\circ$ $c'=0$ kN/m ² , $\phi'=16,5^\circ$			
Filtración desde el embalse –régimen estacionario			
$h_w=485\text{m}$			
Desembalse rápido			
Ru	Geometría definitiva ladera	+ Muro jardinera anclado	+ Presa de tierras
0.000	1.17	1.38	1.38
0.025	1.14	1.35	1.35
0.050	1.12	1.32	1.33
0.100	1.08	1.28	1.29

Tabla 34. FS obtenidos en el perfil UPC_1 para la SPR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización. Ausencia de impermeabilización y diversas situaciones pluviométricas (Ru).



Perfil UPC_2_SPR

Muro jardinera: 4704 kN/ml

Fuerza horizontal de los anclajes: 5020kN

Fuerza vertical de los anclajes: 2898kN

Peso correspondiente a la presa recrecida: no afecta al perfil

Altura piezométrica generada en el perfil por las filtraciones del embalse lleno: $h_w = 500\text{m}$

Perfil UPC-2 SPR			
Parámetros $\alpha=2^\circ$, $b=25^\circ$ $c'=0$ kN/m ² , $\phi'=16,5^\circ$			
Filtración desde el embalse –régimen estacionario			
$h_w = 500\text{m}$			
Desembalse rápido			
Ru	Geometría definitiva ladera	+ Presa de tierras	+Muro jardinera anclado
0.000	1.12	N/A	1.38
0.025	1.09	N/A	1.35
0.050	1.06	N/A	1.31
0.100	1.01	N/A	1.25

Tabla 35. FS obtenidos en el perfil UPC_2 para la SPR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización. Ausencia de impermeabilización y diversas situaciones pluviométricas (Ru).



Perfil UPC_3_SPR

Muro jardinera: 4620 kN/ml

Fuerza horizontal de los anclajes: 5020kN

Fuerza vertical de los anclajes: 2898kN

Peso correspondiente a la presa recrecida: no afecta al perfil

Altura piezométrica generada en el perfil por las filtraciones del embalse lleno: $h_w = 511\text{m}$

Perfil UPC-3_SPR			
Parámetros $\alpha=1^\circ$, $b=19^\circ$ $c'=0$ kN/m ² , $\phi'=16,5^\circ$			
Filtración desde el embalse + pantalla impermeable $h_w= 511$			
Desembalse rápido			
Ru	Geometría definitiva ladera $P_w_f \neq 0$	Muro jardinera anclado $P_w_f \neq 0$	Muro jardinera anclado $P_w_f = 0$
0.000	0.99	1.39	1.38
0.025	0.97	1.36	1.35
0.050	0.95	1.33	1.32
0.100	0.91	1.28	1.27

Tabla 36. FS obtenidos en el perfil UPC_3 para la SPR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización. Ausencia de impermeabilización y diversas situaciones pluviométricas (Ru), de nivel máximo de embalse ($P_f \neq 0$) y desembalse rápido ($P_f = 0$)

Este perfil se sitúa aguas arriba de la presa y en situación de nivel máximo de embalse, tiene el pie sumergido. Se han simulado dos situaciones del muro jardinera, la primera con la cota máxima de embalse, flujo estacionario en la ladera y el peso del agua sobre la superficie del terreno ($P_f \neq 0$) y la segunda en la misma situación pero con un desembalse rápido ($P_f = 0$).



8.2.2. Superficie Inferior de Rotura (SIR)

Los parámetros utilizados en cada perfil han cambiado respecto a los de la SPR, con la excepción de los muros jardinera cuyo peso es el mismo. Los anclajes de los muros jardinera atraviesan la SPR pero no la SIR por lo que no han sido considerados como elemento de estabilización. El peso de la presa es variable según el perfil así como las presiones de agua generadas por las lluvias y la presencia del embalse.

Perfil UPC_0 SIR

Este perfil no dispone de muro jardinera anclado

Peso correspondiente a la presa recrecida: 39842kN/ml (areax22kN/m³)

Altura piezométrica generada en el perfil por las filtraciones del embalse lleno: hw= 480m

Perfil UPC_0 SIR $\alpha=11^\circ$, $\beta=26^\circ$, $\phi=16^\circ$ Filtración desde el embalse—régimen estacionario hw= 480 Desembalse rápido		
Ru	Geometría definitiva+ ladera	Presa de tierras
0.000	1.04	1.16
0.025	1.02	1.14
0.050	0.99	1.11
0.100	0.95	1.07

Tabla 37. FS obtenidos en el perfil UPC_0 para la SIR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización. Ausencia de impermeabilización y diversas situaciones pluviométricas (Ru).



Perfil UPC_1 SIR

Peso del muro jardinera: 10634 kN/ml

Peso de la presa recrecida que aplica: 33930 kN/ml (Area x 22 KN/m3)

Perfil UPC_1 SIR			
$\alpha=11^\circ$, $\beta=27^\circ$, $\phi=16^\circ$			
Filtración desde el embalse –régimen estacionario			
Altura piezométrica generada hw=485			
Desembalse rápido			
Ru	Geometría definitiva ladera	+Muro jardinera	+Presa de tierras
0.000	0.99	1.03	1.16
0.025	0.97	1.01	1.14
0.050	0.95	0.99	1.12
0.100	0.91	0.95	1.07

Tabla 38. FS obtenidos en el perfil UPC_1 para la SIR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización. Ausencia de impermeabilización y diversas situaciones pluviométricas (Ru).

Perfil UPC_2 SIR

Peso del muro jardinera: 15912 kN/ml

Peso de la presa actual: 30720 kN/ml (Area x 22 KN/m3)

Perfil UPC_2 SIR			
$\alpha=11^\circ$, $\beta=30^\circ$, $\phi=16^\circ$			
Filtración desde el embalse –régimen estacionario			
Altura piezométrica generada hw=500m			
Desembalse rápido			
Ru	Geometría definitiva ladera	+ Presa actual	+ Muro jardinera
0.000	0.94	1.06	1.11
0.025	0.93	1.05	1.10
0.050	0.91	1.04	1.08
0.100	0.88	1.01	1.05

Tabla 39. FS obtenidos en el perfil UPC_2 para la SIR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización. Ausencia de impermeabilización y diversas situaciones pluviométricas (Ru).



Perfil UPC_3 SIR

Peso del descabezado del deslizamiento del Inglés: 5980 kN/ml

Peso del Muro jardinera (cota 516m): 15912 kN/ml

Altura piezométrica generada en el perfil por las filtraciones del embalse lleno: $h_w = 511\text{m}$

Perfil UPC_3 SIR				
$\alpha=8^\circ$, $\beta=31^\circ$, $\phi=16^\circ$				
Filtración desde el embalse –régimen estacionario $h_w=511\text{m}$				
Desembalse rápido				
Ru	Descabezamiento del Inglés	+ Geometría definitiva	+ Muro jardinera $P_w_f \neq 0$	+ Muro jardinera $P_w_f = 0$
0.000	0.96	0.99	1.08	0.98
0.025	0.95	0.98	1.06	0.96
0.050	0.94	0.97	1.05	0.95
0.100	0.91	0.94	1.02	0.92

Tabla 40. FS obtenidos en el perfil UPC_3 para la SIR una vez concluidos los trabajos de contención, estabilización. Ausencia de impermeabilización y diversas situaciones pluviométricas (Ru), de nivel máximo de embalse ($P_f \neq 0$) y desembalse rápido ($P_f = 0$)

En todos los perfiles analizados el establecimiento de un flujo subterráneo en la ladera a partir de una situación de cota embalse máximo genera $FS > 1$ incluso en los escenarios pluviométricos más desfavorables considerados ($R_u = 0,1$).

El escenario de desembalse rápido ante la hipótesis de daño en la pantalla de impermeabilización sólo muestra una situación de inestabilidad en uno de los perfiles, el UPC_3_SIR, que es el único que está sumergido parcialmente por el embalse. En este caso, el conjunto de la ladera dispone de un FS superior a 1. Asumir que con este FS el perfil UPC_3 pueda experimentar desplazamientos, significa admitir que cada sección puede moverse libremente dentro del deslizamiento. Sin embargo, no se han encontrado evidencias o indicadores de que esto ocurra.



Comentarios finales

La solución analítica presentada ha proporcionado resultados coherentes entre los diferentes perfiles analizados.

El ángulo de fricción residual obtenido mediante el análisis retrospectivo, 16° a $16,5^\circ$ es similar en todos los perfiles y consistente con los resultados de los ensayos de corte directo en laboratorio. Asimismo, las inclinaciones (ángulos α y β) de los planos basales de la doble cuña que justifican el ángulo de fricción obtenido, se corresponden razonablemente con los ángulos medidos directamente en los perfiles.

Los FS calculados indican que, una vez concluidos los trabajos de contención y estabilización junto con la construcción de la presa de tierras, la ladera es estable en todos los escenarios hidrológicos considerados. Los resultados obtenidos para la SPR en los cuatro perfiles seleccionados muestran que el nuevo perfil topográfico resultante del descabezamiento del deslizamiento junto con los elementos contención y anclaje, proporcionan factores de seguridad comprendidos entre 1,19 y 1,39 en situaciones ordinarias ($R_u=0,025$), entre 1,16 y 1,37 ante una situación similar a la de Enero-Febrero de 2013, con un periodo de retorno de 37 años ($R_u=0,05$). La coincidencia de un sismo con un periodo de retorno de 1000 años y un episodio lluvioso similar al de Enero-Febrero de 2013, da lugar a FS superiores a la unidad en todos los casos. Hay que tener en cuenta que la probabilidad anual de ocurrencia de este escenario es de $2,7 \times 10^{-5}$. En el caso de daño en la pantalla de impermeabilización también se obtienen FS superiores a la unidad incluso en los escenarios pluviométricos más desfavorables considerados ($R_u=0,1$). Sólo en el caso que además hubiera un desembalse rápido, uno de los perfiles, el UPC_3_SIR, no tendría garantizada la estabilidad.

Los resultados obtenidos para la SIR en los cuatro perfiles seleccionados muestran que el nuevo perfil topográfico resultante del descabezamiento del deslizamiento, junto con los elementos contención y anclaje, y la presa recrecida proporcionan un factor de seguridad de entre 1,23 y 1,34 en situaciones ordinarias ($R_u=0,025$), entre 1,19 y 1,31 ante una situación similar a la de Enero-Febrero de 2013 ($R_u=0,05$). La ocurrencia de un sismo con un periodo de retorno de 1000 años coincidiendo con situaciones pluviométricas ordinarias e incluso más severas que las observadas en el episodio de Enero-Febrero de 2013 da lugar a FS superiores a la unidad en todos los perfiles analizados. La probabilidad anual de ocurrencia de este escenario es de $2,7 \times 10^{-5}$. En el escenario de ausencia o daño en la pantalla de impermeabilización también se obtienen FS superiores a la unidad incluso en los escenarios pluviométricos más desfavorables considerados ($R_u=0,1$). Sólo en el caso que además hubiera un desembalse rápido, uno de los perfiles, el UPC_3_SIR, no tendría garantizada la estabilidad.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Departamento de Ingeniería del Terreno,
Cartografía y Geofísica

Barcelona 12 de Febrero de 2014

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a vertical line.

Olga-Christina Mavrouli

Dra. Ingeniero Civil

A handwritten signature in blue ink, featuring a vertical line on the left and a stylized, cursive 'J' followed by 'C' and 'M'.

Jordi Corominas

Catedrático de Ingeniería del Terreno

Anejo 1 – Modelo (Solución analítica)

Los perfiles que se analizaran se forman por 2 cuñas triangulares, una pasiva (la inferior) y una activa (la superior), como se ve en la Figura A-1-1.

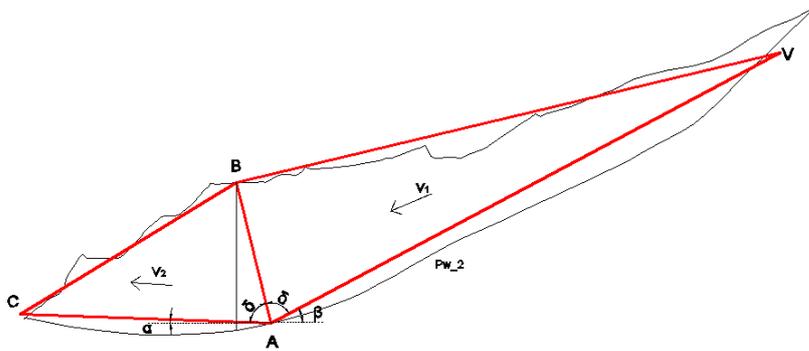


Figura A-1-1. Cálculo equilibrio estricto. Sección formada por dos cuñas (cuña 1: pasiva y cuña 2: activa).

Hipótesis: Ambas cuñas se mueven a la misma velocidad (en módulo). Lo que implica que los bloques deslizan como un sólido rígido (sin extensión ni compresión), como el movimiento de un tren. La cuña superior desliza a lo largo del plano VA a velocidad v_1 y la cuña inferior a lo largo del plano VB a velocidad v_2 . Por ello se forma un plano de corte o charnela (plano AB) a lo largo del cual tiene lugar un movimiento relativo entre las cuñas. El plano de corte se orienta según la bisectriz entre los dos planos de deslizamiento (AV y AB). Dicha bisectriz forma un ángulo δ respecto los planos citados (Figura A-1-2).

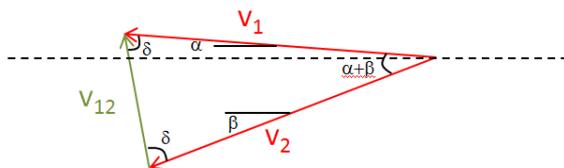


Figura A-1-2. Velocidad de las cuñas que se usan para la definición del plano de corte (charnela).

El ángulo δ que forma la bisectriz con los planos AV y AB se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{\pi - \alpha - \beta}{2}$$

Cálculo equilibrio estricto

Las fuerzas actuantes en cada cuña son las siguientes (figura A-1-3)

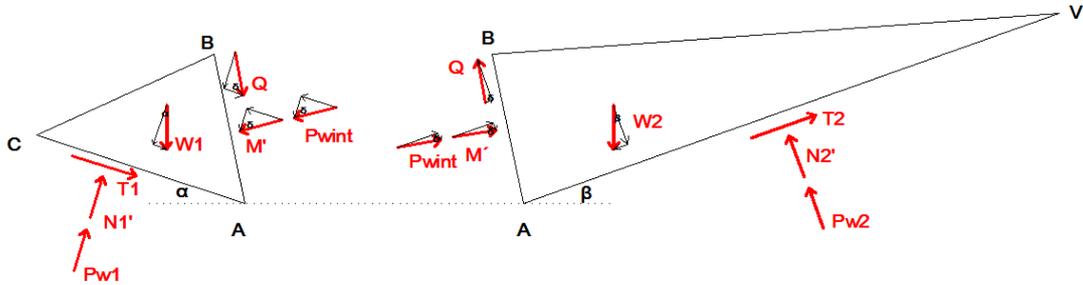


Figura A-1-3. Distribución de fuerzas en la cuña inferior pasiva (izquierda) y superior activa (derecha)

Cuña inferior pasiva

$$\sum F_p = -Q \cos(\delta) + M' \sin \delta + P_{wint} * \sin \delta - T_1 - W_1 \sin \alpha = 0$$

$$\sum F_T = -W_1 \cos(\alpha) + N_1' + P_{w1} + Q \sin(\delta) + M' \cos \delta + P_{wint} * \cos \delta = 0$$

Cuña superior activa

$$\sum F_p = W_2 \sin \beta - T_2 - Q \cos \delta - P_{wint} \sin \delta = 0$$

$$\sum F_T = W_2 \cos \alpha - N_2' - P_{w2} - Q \sin \delta + M' \cos \delta + P_{wint} \cos \delta = 0$$

siendo

$\sum F_p$: Suma de fuerzas en la dirección paralela al movimiento

$\sum F_T$: Suma de fuerzas en la dirección perpendicular (trasversal) al movimiento



Criterio de rotura:

$$T_1 = N'_1 \tan \varphi' / FS$$

$$T_2 = N'_2 \tan \varphi' / FS$$

$$Q = c'_r AB + M' \tan \varphi'_r$$

Donde FS es el factor de seguridad asociado a la resistencia del plano basal y se define como:

$$FS = \frac{\textit{Resistencia disponible}}{\textit{Resistencia necesaria para el equilibrio estricto}}$$

Resultan pues un total de 7 ecuaciones con 7 incógnitas. Se resuelven mediante el programa Maple.

La solución del FS del sistema viene dada por la expresión:

$$FS = x \tan \varphi'$$

Donde x es la solución de la ecuación cuadrática

$$ax^2 + bx + c = 0 \Rightarrow x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Las expresiones de los coeficientes a, b y c se obtienen mediante el programa Maple y el FS se calcula mediante el programa Excel.



Anejo 2 – Parámetros de cálculo y condiciones de contorno

Hipótesis básicas

Se asume que el plano basal se encuentra en condiciones de resistencia residual.

Se supone un único material para las dos cuñas (Flysch de Yesa).

La ubicación del plano de corte es independiente en cada uno de los perfiles analizados.

Incógnitas que entran en los cálculos:

- Peso específico roca
- Volumen de las cuñas real (calculado a partir de la topografía real).
- Presión de agua bajo bloque inferior 1, Pw_1
- Presión de agua bajo bloque superior 2, Pw_2
- Presión de agua en el plano de corte (charnela), Pw_3
- Cohesión de roca (en la zona de la charnela)
- Ángulo de fricción de roca (en la zona de la charnela)
- Ángulo fricción basal para la superficie SPR o SIR

PARÁMETROS	Símbolo	Unidades
Peso específico roca	γ_r	kN/m ³
Volumen bloque inferior 1	V_1	m ³ /ml
Volumen bloque superior 2	V_2	m ³ /ml
Peso muro jardinera	W_{1j}	kN/ml
Peso presa	W_{1p}	kN/ml
Peso bloque inferior 1	W_1	kN/ml
Peso bloque superior 2	W_2	kN/ml
Longitud charnela	Long_AB	m
Ángulo inclinación bloque inferior	alpha	rad, °
Ángulo inclinación bloque superior	beta	rad, °
Ángulo mitad charnela	delta	rad, °



Ángulo superficie bloque inferior	omega	rad, °
Pw bajo bloque inferior 1	Pw_1	kN/ml
Pw bajo bloque superior 2	Pw_2	kN/ml
Pw charnela	Pw_int	kN/ml
Pw submergido bloque inferior 1	Pw_f	kN/ml
Cohesión roca	c_r	kN/m2
Ángulo de fricción roca	tan_fir, fi_r	-
Ángulo fricción basal	tan_fi, fi	-
Fuerza horizontal de los anclajes	Pah	KN
Fuerza vertical de los anclajes	Pav	KN

Tabla A-2-1. Parámetros de entrada

Resistencia a lo largo de la charnela:

Los parámetros resistentes se han obtenido a partir de los parámetros resistentes de la envolvente de rotura no lineal Hoek y Brown (1980)¹⁰ (σ_{cri} , GSI, mi, D) propuestos por Marinós y Hoek (2001)¹¹, para aproximar la envolvente lineal Mohr-Coulomb (ϕ_r u c_r) a un nivel de tensión medio correspondiente a la mitad de la profundidad del plano de corte

Los parámetros finalmente seleccionados son

C= 100 kPa y $\phi= 23,5^\circ$ para la cuñas que se forman por la SPR.

C= 152 kPa y $\phi= 18.9^\circ$ para la cuñas que se forman por la SPR.

Perfiles analizados

Los perfiles analizados y los volúmenes correspondientes a las dos cuñas según la etapa analizada se presentan en la Tabla A-2-2.

Los valores finales de los ángulos de los planos basales de las dos cuñas, determinados por análisis paramétrico, se muestran en la Tabla A-2-3 para cada perfil.

¹⁰ Hoek, E. y Brown, E.T. (1980). Underground excavations in rock. London. The Institute of Mining and Metallurgy

¹¹ Marinós and Hoek (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as Flysch. Bull. Eng. Geol. Env. 60, 85-92

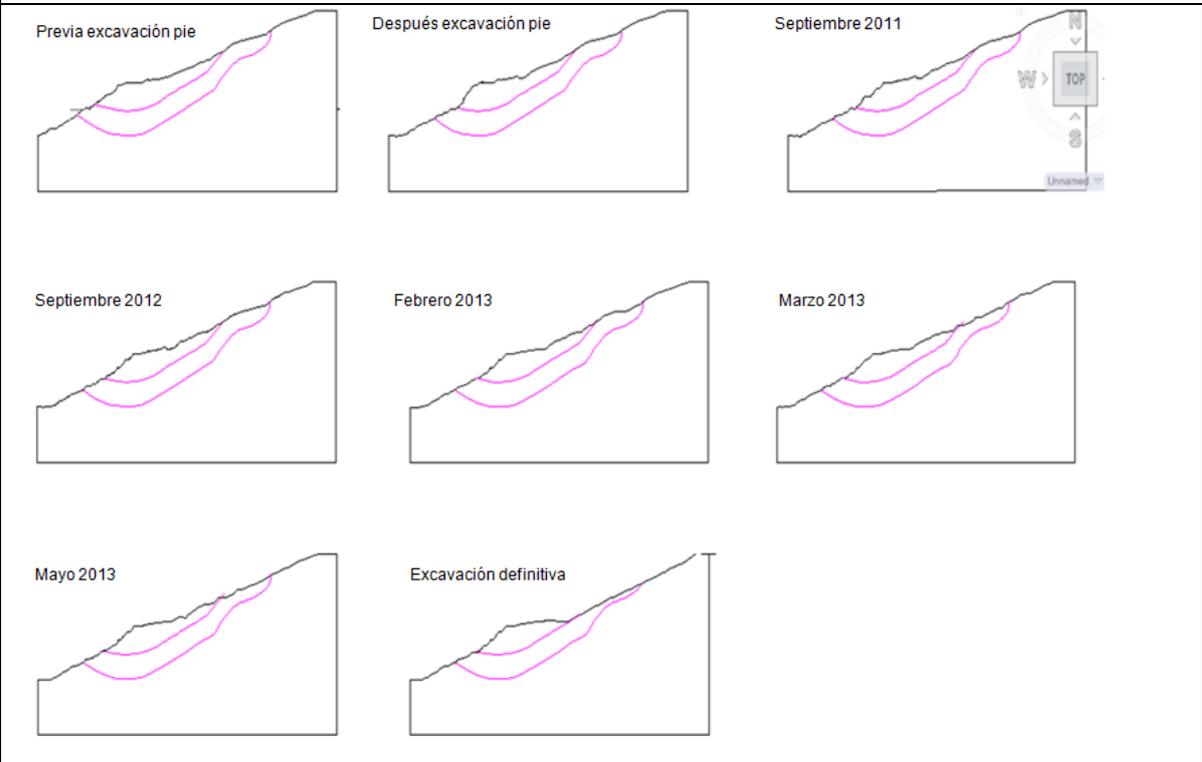


Tabla A-2-2. Geometría y volúmenes de las dos cuñas correspondientes a los perfiles analizados

Perfil UPC-0				
	SPR		SIR	
	V1 (cuña inferior)	V2 (cuña superior)	V1 (cuña inferior)	V2 (cuña superior)
volumen	(m3/ml)			
Antes de las excavaciones -1ª etapa (2003)	6036	13353	11477	35126
Después de las excavaciones-1ª etapa (2005)	3389	13353	9367	35126
sep-11	3389	13353	9367	35126
sep-12	3163	13353	9169	35150
feb-13	3163	13117	9153	34793
mar-13	3163	13122	9149	34247
may-13	3163	12637	9149	33400
<u>Excavación definitiva</u>	<u>3163</u>	<u>10733</u>	<u>9149</u>	<u>29309</u>



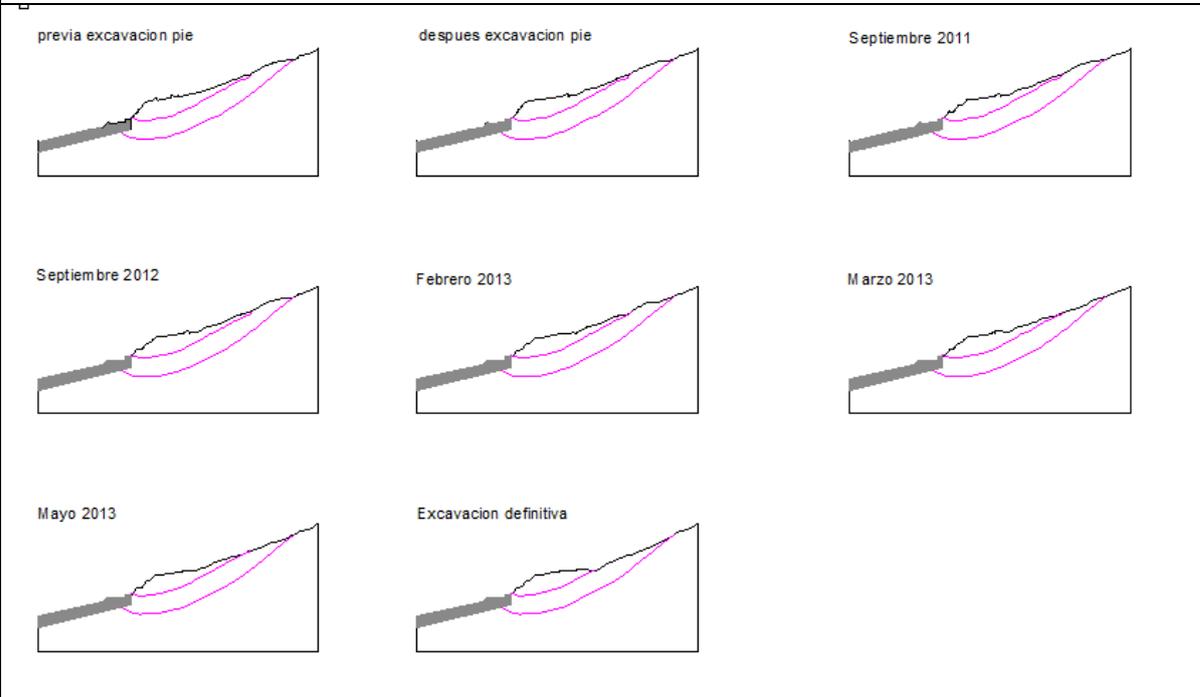
Perfil UPC-1



	SPR		SIR	
	V1 (cuña inferior)	V2 (cuña superior)	V1 (cuña inferior)	V2 (cuña superior)
volumen	(m3/ml)			
Antes de las excavaciones -1ª etapa (2003)	5997	9037	10584	28056
Después de las excavaciones-1ª etapa (2005)	4603	8837	8192	27922
sep-11	3926	8811	7687	27787
sep-12	3823	8811	7625	27787
feb-13	3838	8728	7625	27568
mar-13	3838	8631	7625	26816
may-13	3838	8317	7625	26531
Excavación definitiva	3838	6237	7571	23080



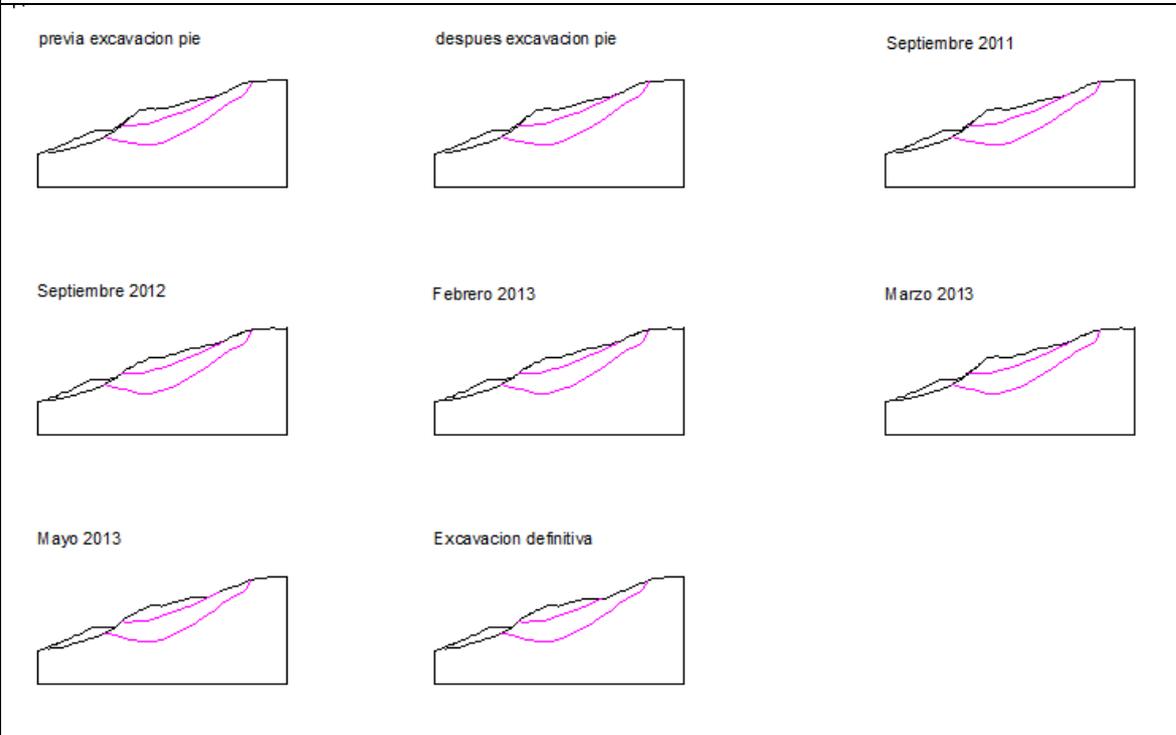
Perfil UPC-2



	SPR		SIR	
	V1 (cuña inferior)	V2 (cuña superior)	V1 (cuña inferior)	V2 (cuña superior)
volumen	(m3/ml)			
Antes de las excavaciones -1ª etapa (2003)	2387	6889	7842	24054
Después de las excavaciones-1ª etapa (2005)	2387	6735	7842	23822
sep-11	1917	6731	7336	23822
sep-12	1917	6731	7336	23822
feb-13	1889	6598	7336	23504
mar-13	1888	6624	7336	22816
may-13	1888	6409	7336	22510
Excavación definitiva	1888	5044	7336	19487



Perfil UPC-3



	SPR		SIR	
	V1 (cuña inferior)	V2 (cuña superior)	V1 (cuña inferior)	V2 (cuña superior)
volumen	(m3/ml)			
Antes de las excavaciones -1ª etapa (2003)	623	4793	6274	14609
Después de las excavaciones-1ª etapa (2005)	623	4719	6274	14609
sep-11	623	4719	6274	14609
sep-12	472	4411	5976	14520
feb-13	472	4411	5976	14520
mar-13	472	4393	5976	14520
may-13	472	4100	5976	13807
Excavación definitiva	472	4073	5976	13245



Tabla A-2-3. Ángulos de las dos cuñas medidos directamente en los perfiles

	Ángulo inclinación bloque inferior, α	Ángulo inclinación bloque superior, β
UPC-0-SPR	2-10	25-30
UPC-1-SPR	0-10	24-28
UPC-2-SPR	0-6	22-26
UPC-3-SPR	0-3	19-22
UPC-0-SIR	6-13	25-33
UPC-1-SIR	10-22	26-32
UPC-2-SIR	6-13	27-31
UPC-3-SIR	2-12	30-33

Debido a geometría irregular de las cuñas, se pueden plantear más de una pareja de ángulos de inclinación de las cuñas en cada perfil. Por este motivo, se presenta un rango de valores posibles.



- Acciones adicionales

Las acciones adicionales que se aplican a cada perfil según el tipo de análisis se presentan en la Tabla A-2-2. En seguida se detalla su cálculo.

Tabla A-2-4 Acciones adicionales

Perfil	Peso presa actual	Muro jardinera anclado		Peso presa recrecida	Altura piezométrica por infiltraciones del embalse lleno (511 m) (m)
	(KN/ml)	Peso muro (KN/ml)	Anclajes (KN)	(KN/ml)	
UPC-0-SPR	N/A	N/A	N/A	17614	480
UPC-1-SPR	N/A	10634	Horiz: 5020 Vert: 2898	1235	485
UPC-2-SPR	N/A	4704	Horiz: 5020 Vert: 2898	N/A	500
UPC-3-SPR	N/A	4620	Horiz: 5020 Vert: 2898	N/A	511
UPC-0-SIR	N/A	N/A	N/A	39842	480
UPC-1-SIR	N/A	10634	N/A	33930	485
UPC-2-SIR	30720	15912	N/A	N/A	500
UPC-3-SIR*	N/A	15912	N/A	N/A	511

* Especialmente en el caso del UPC-3 SIR se analiza además el caso del descabezado del deslizamiento del Inglés (análisis con o sin un volumen 5980 kN/ml aplicado en la dirección del peso)

- Presa actual

El peso de la presa actual se calcula a partir del corte correspondiente que es el UPC-2 como:

$$W_{pa} = \text{Área} \times \text{densidad de material de la presa actual} = 1280 \times 24 \text{ KN/ml} = 30720$$

- Muro jardinera anclado

El peso del muro jardinera se calcula a partir de los cortes los datos de las Figuras A-2-1 y A-2-2 (perfiles ejes 2 y 3 de los análisis de TYPESA). Para el perfil UPC-1 el muro jardinera es este de la Figura A-2-1. Para el perfil UPC-2 el muro jardinera es este de la Figura A-2-2 y para el perfil UPC-3 el muro jardinera es el mismo con la diferencia que llega a la cota 516 m.

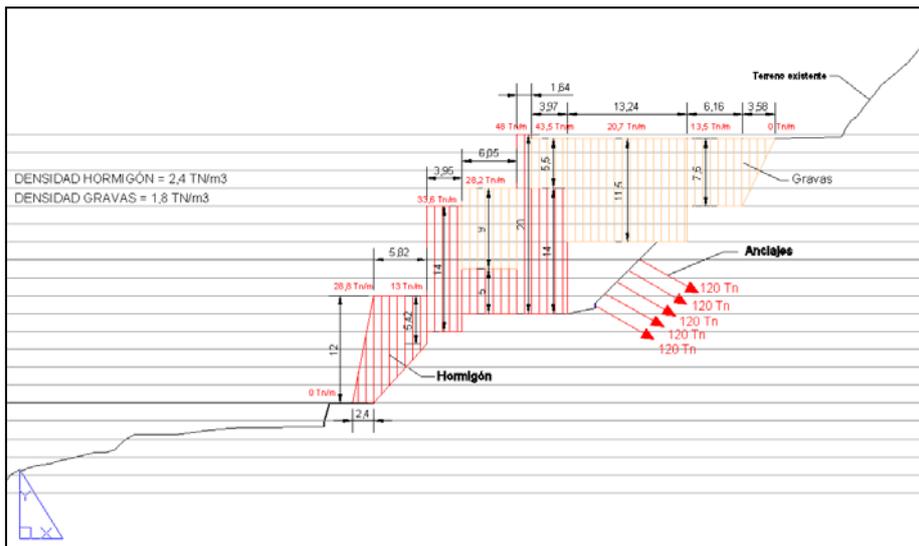


Figura A-2-1. Perfil del muro jardinera y pesos respectivos (Eje 2 – información obtenida por TYPESA)

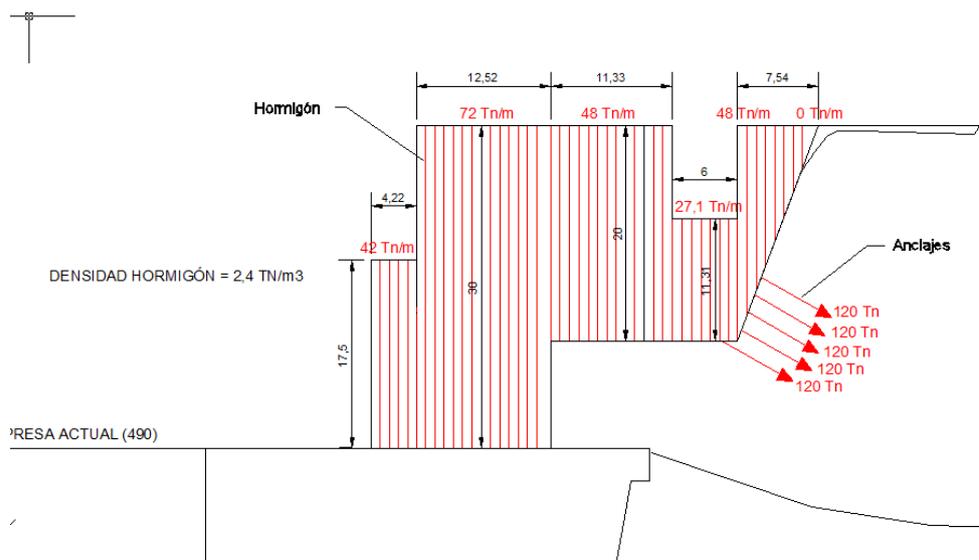


Figura A-2-2. Perfil del muro jardinera y pesos respectivos (Eje 2 – información obtenida por TYPESA)



En todos los perfiles el peso se calcula como:

$$W_j = \text{Área} \times \text{densidad de material del muro}$$

Específicamente:

$$\text{Para UPC-1-SPR y UPC-1-SIR: } W_j = 235 \times 24 + 277,44 \times 18 = 10634 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Para UPC-2-SPR: } W_j = 196 \times 24 = 4704 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Para UPC-3-SPR: } W_j = 192.5 \times 24 = 4620 \text{ KN/ml}$$

$$\text{Para UPC-2-SIR y UPC-3-SIR: } W_j = 663 \times 24 = 15910 \text{ KN/ml}$$

En el corte donde se aplican los anclajes, la fuerzas correspondientes se calculan mediante:

$$\text{Ángulo de anclaje respecto a la horizontal: } \cos \psi = \cos 30^\circ$$

$$\text{Ángulo del corte respecto al plano de la presa: } \tan \theta = \cos 10^\circ$$

$$\text{Fuerza horizontal anclaje: } F_{ah} = 5886 \times \cos 30^\circ \times \cos 10^\circ = 5020 \text{ KN}$$

$$\text{Fuerza vertical anclaje: } F_{av} = 5886 \times \sin 30^\circ \times \cos 10^\circ = 2898 \text{ KN}$$

- Presa recrecida

El peso de la presa recrecida se calcula como en el caso de la presa actual, en función de la superficie de la presa que aparece en los cortes correspondientes, como por ejemplo muestra la Figura A-2-3.

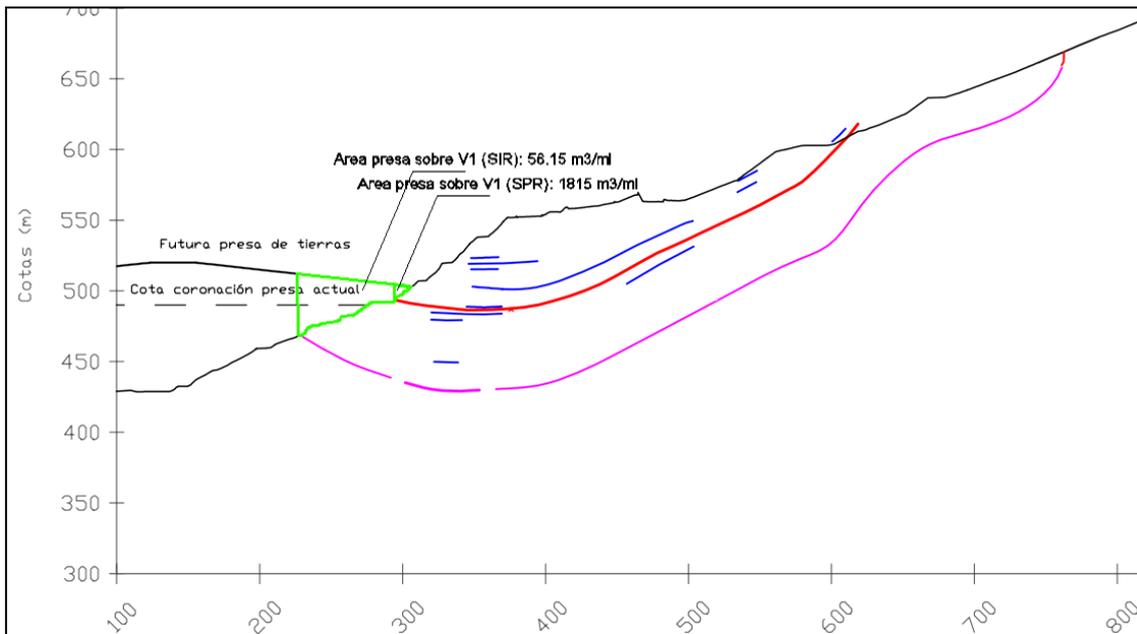


Figura A-2-3. Superficie de la presa actual (en verde) cuyo peso se aplica a la cuña inferior (pasiva)

Peso de la presa:

$P_p = \text{Área} \times \text{densidad de material para la presa recrecida}$

UPC-0-SPR: $800,63 \times 22 = 17614 \text{ KN/ml}$

UPC-0-SIR: $1811 \times 22 = 39842 \text{ KN/ml}$

UPC-1-SPR: $56.15 \times 22 = 1235 \text{ KN/ml}$

UPC-1-SIR: $1815 \times 22 = 39930 \text{ KN/ml}$