

**ROTURA DE UN TERRAPLEN SOBRE RESIDUOS MINEROS
DE NATURALEZA LIMOSA**

Fernando Román
Prof. Dr. Ing. de Caminos
U.P.M.

1 INTRODUCCIÓN

La autovía Ronda de la Bahía de Santander, en la zona de su arranque con la autovía AS-10, discurre por la margen derecha de la Ría de Solía un poco antes de su afluencia a la Ría de San Salvador. En toda esa margen, como en otros muchos puntos próximos, existen antiguas balsas de decantación de lodos y residuos mineros procedentes de las explotaciones del mineral de hierro de la primera mitad del siglo XX.

El proyecto de este tramo de autovía contempla distintos tratamientos del terreno para hacer estables los terraplenes que se construyen sobre ellos, entre ellos mechas drenantes, columnas de gravas, precargas y construcción por fases, convenientemente auscultadas.

El terraplén que se va a tratar en este documento se ubica en un lateral de la rotonda Norte del enlace de Guarnizo. Para proyectar éste y los demás terraplenes del tramo se investigó con sondeos mecánicos, penetrómetros dinámicos y penetrómetros estáticos con medición de presiones intersticiales en la punta (CPTU o piezoconos). Esta última herramienta es la más adecuada para el estudio de las obras sobre suelos blandos.

La extrapolación de la información de cada punto investigado a su entorno representativo ofrecía buenos resultados permitiendo construir los rellenos de la forma adecuada. En el enlace de Guarnizo (como en muchos otros puntos) se estableció el tratamiento del cimiento y la secuencia de construcción que debidamente instrumentada permitía ir progresando en el levantamiento de los terraplenes.

En verano del 2009 cuando el terraplén había alcanzado una altura de 4,60 m y sin que la instrumentación detectara deformaciones anormales, se produjo la rotura que movilizó un segmento pseudo circular cuya cuerda tenía aproximadamente 80 metros.

Tras el debido reconocimiento visual y realizado un primer esbozo de la posible causa y geometría de la rotura se realizaron nuevas prospecciones con sondeos y ensayos.

2 RESULTADO DE LA INSPECCIÓN VISUAL

Un día después de producirse el deslizamiento, la señal más visible en su borde trasero era una ostentosa grieta de unos 80 metros de longitud (en sentido perpendicular al movimiento), con una apertura que en la primera inspección tenía anchuras del orden de 1 metro y con saltos verticales considerablemente menores, de no más de 60 cm. No se observaban basculamientos hacia el labio no movido. El pie del deslizamiento se encuentra en un maizal en el que se observaban abombamientos, ascensos del orden de 1 metro y cabalgamientos que parecían denotar un movimiento traslacional.

Las fotografías siguientes tomadas el día 11-08-09 permiten tener una idea de los signos externos del deslizamiento:



Foto 1.- Vista aérea desde el Norte unos días después de la rotura



Foto 2.- Vista desde el Este inmediatamente después de la rotura

La amplitud de la zona movida, en sentido del movimiento, comparada con la altura de tierras junto con las observaciones anteriores, indujo a pensar en un principio en un deslizamiento con una componente horizontal muy clara. Para tratarse de un deslizamiento circular se estimó que la potencia del terreno poco resistente debería ser importante, cosa que los sondeos más cercanos no habían detectado.

Con el tiempo, el deslizamiento fue evolucionando dos meses después presentaba el aspecto de la fotografía 3.



Foto 3.- Aspecto del deslizamiento dos meses después.

En la planta de la figura 1 adjunta se representan los sondeos efectuados y las zonas movidas.

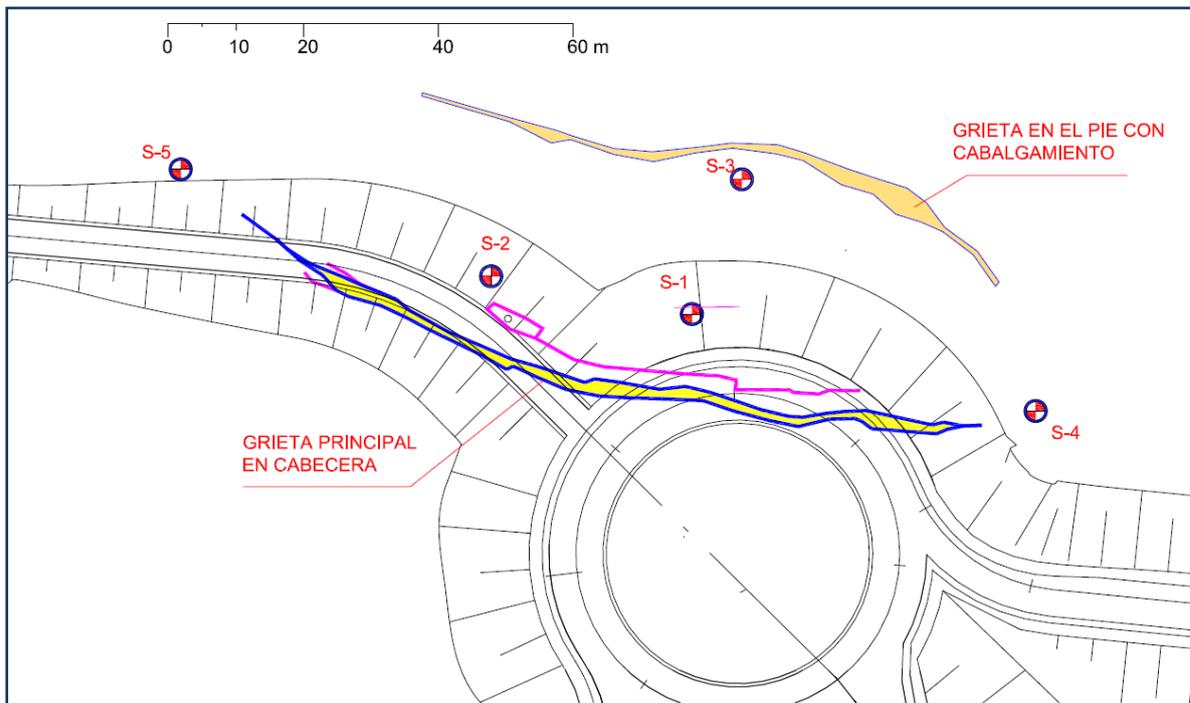


Figura 1.- Planta de grietas y sondeos.

3 CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO

3.1 PERFILES REPRESENTATIVOS

Un perfil transversal geométrico representativo es el de la figura 2 y el geológico es el de la figura 3.

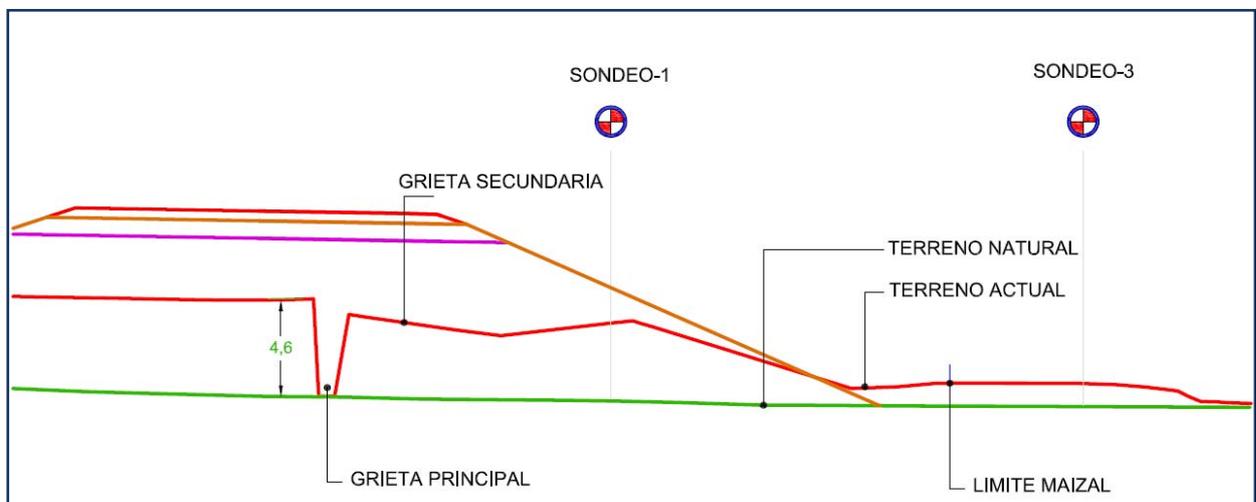


Figura 2.- Perfil transversal representativo de la sección final y de la del momento de la rotura.

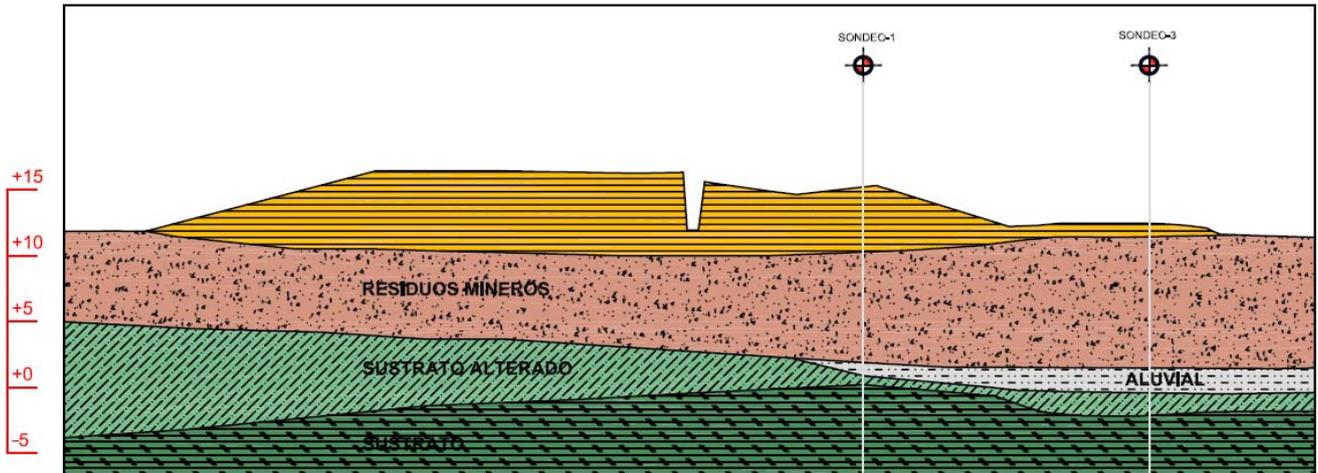


Figura 3.- Perfil geológico del terreno deslizado

3.2 PROPIEDADES INTRÍNSECAS Y DE ESTADO

En la figura 4 se expresa gráficamente el porcentaje de finos a las distintas cotas y se indica con un recuadro en color las cotas a las que aparecen los residuos mineros.

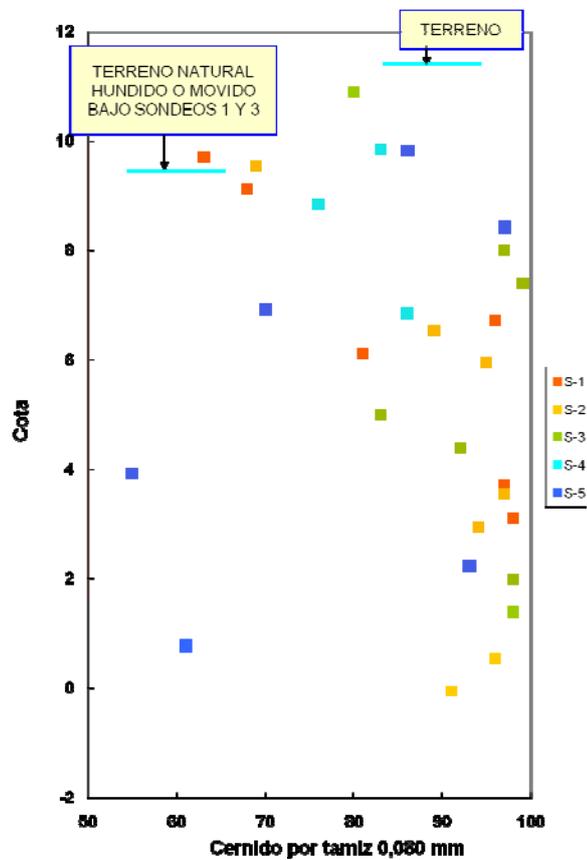


Figura 4.- Porcentaje cernido por el tamiz 80 micras a distintas cotas.

Puede concluirse que ninguna de las muestras ensayadas ha dado finos en menor proporción que 55% y que en su mayor parte es mayor del 80%. Es decir los residuos mineros ensayados son de naturaleza “fina”.

Su plasticidad se ha representado en la figura 5

Puede verse cómo se agrupan muy pegados a la línea **A** lo que nos dice que son suelos de una plasticidad intermedia entre las arcillas limosas y los limos arcillosos.

Se presentan con contenidos de agua importantes de forma que están cerca y, en algún caso por encima, del Límite Líquido, como puede verse en la figura 6 donde se han representado la humedad entre los Límites Plástico y Líquido así como la variación del Índice de Fluidéz con la cota. La zona coloreada es la correspondiente a los residuos mineros.

Puede verse que entre las cotas +10 y +4 el Índice de Fluidéz es siempre mayor que la unidad, lo que quiere decir que el suelo está en un estado de humedad mayor que la del Límite Líquido.

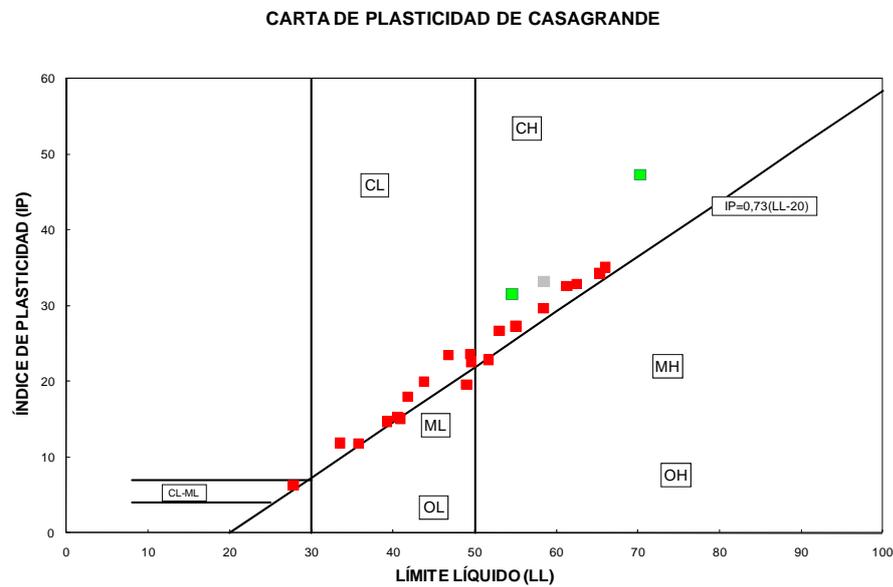


Figura 5.- Carta de plasticidad de Casagrande. En rojo los residuos mineros. En gris el aluvial y en verde el sustrato triásico alterado.

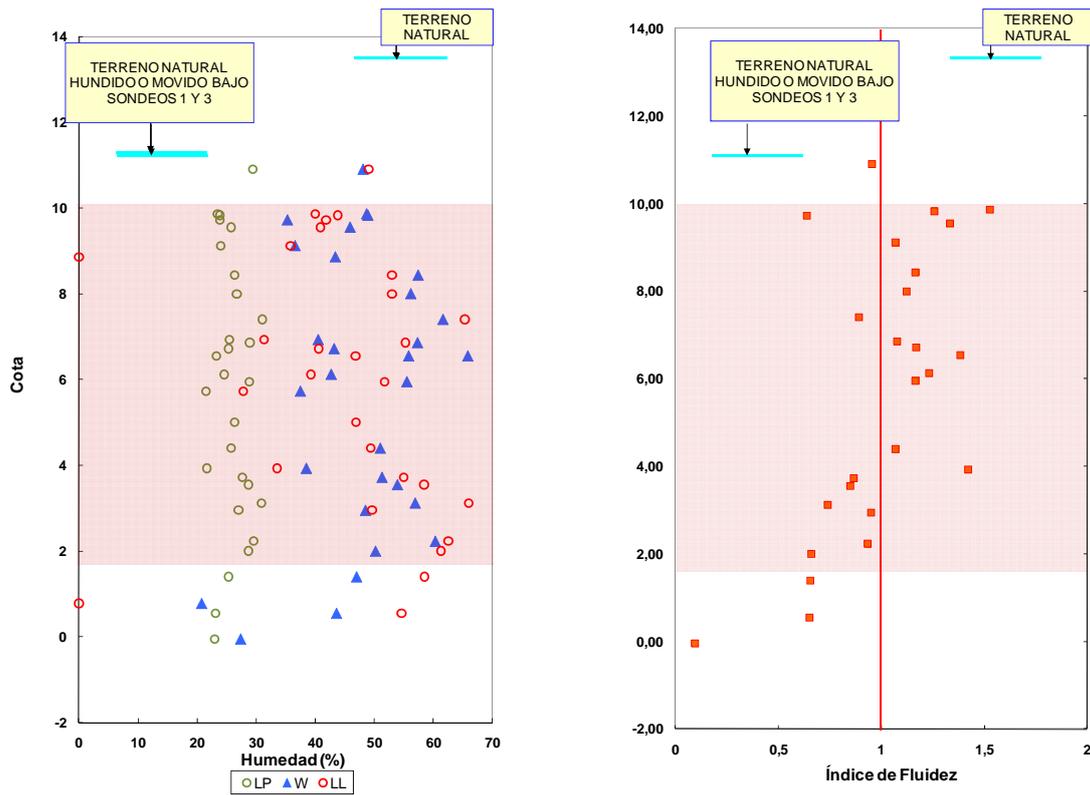


Figura 6.- Variación de la Humedad y los Límites de Plasticidad con la cota. Variación del Índice de Fluidez.

3.3 RESISTENCIA

Hay que destacar que las resistencias han sido mínimas. Los golpes de hinca del tomamuestras y del SPT son frecuentemente nulos, descendiendo tan solo por la acción del peso del varillaje en muchas ocasiones.

En las figuras 7, 8 y 9 se indican las resistencias al corte medidas con los aparatos de bolsillo y con el vane en el interior del sondeo.

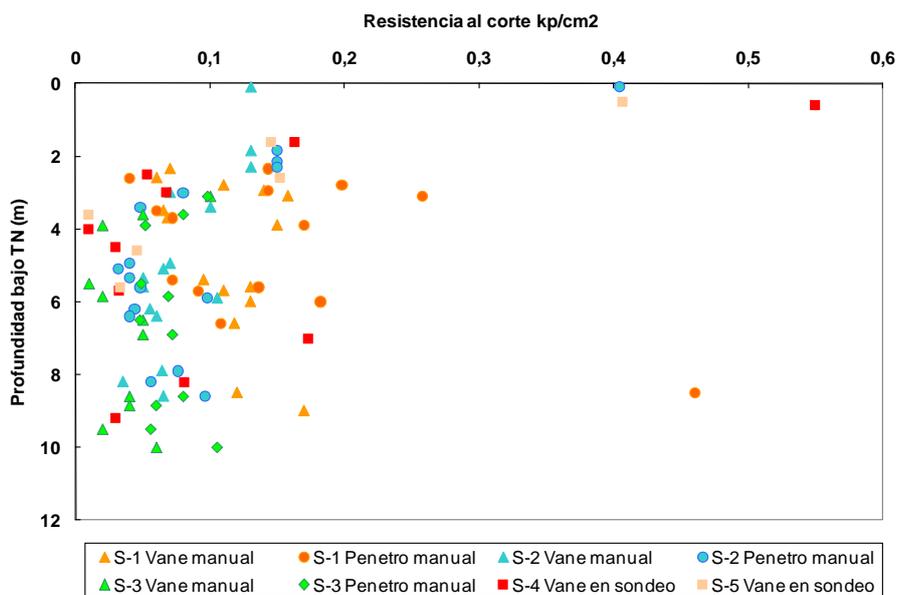


Figura 7.- Resistencia al corte medida in situ. Todas las medidas.

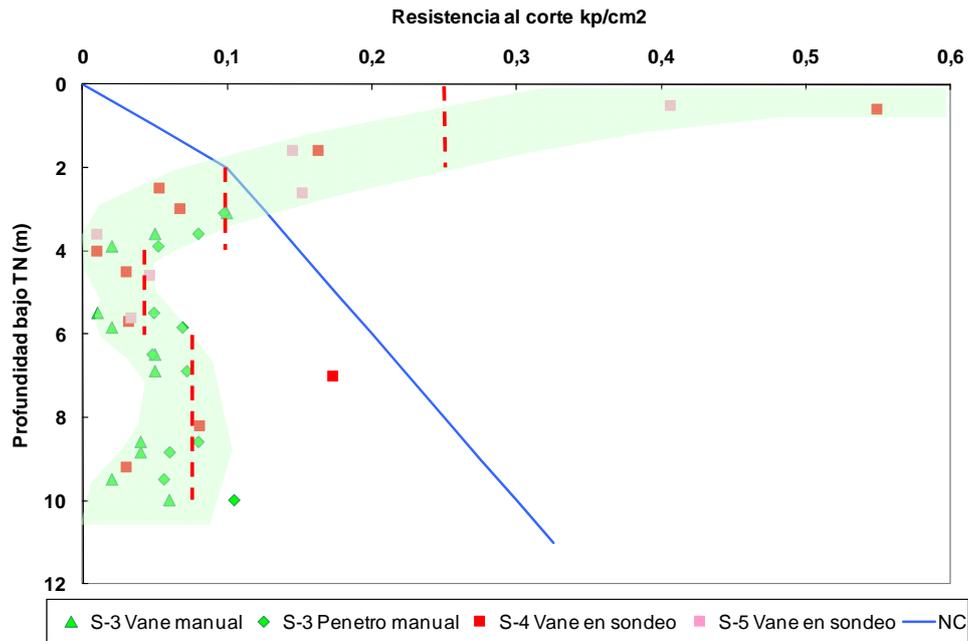


Figura 8.- Resistencia al corte medida in situ fuera del terraplén y línea correspondiente a un suelo normalmente consolidado (NC).

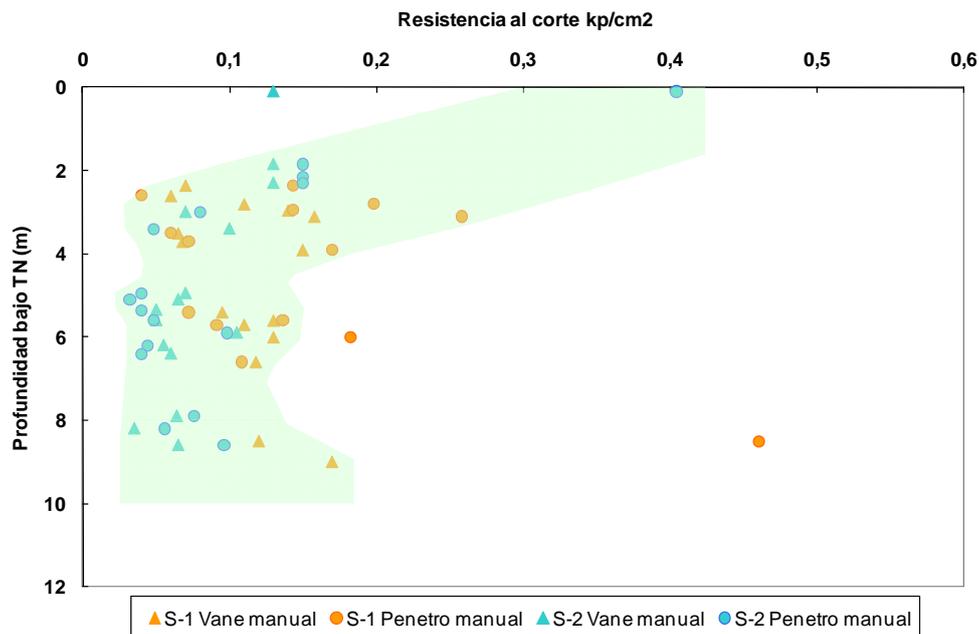


Figura 9.- Resistencia al corte medida in situ. Bajo el terraplén.

En la figura 8 se ha representado además, la resistencia que ofrecería un suelo normalmente consolidado (con $S_u=0,25 \sigma'$) y también se representa una discretización en tramos con los valores que podrían ser representativos de la resistencia. Debe decirse que las resistencias medidas comparadas con las de un suelo normalmente consolidado indican un estado no muy usual para un suelo depositado hace más de 60-70 años.

Si se compara la figura 8 con la 9, puede intuirse que bajo el terraplén se había producido una ganancia de resistencia del orden de $0,04 \text{ kp/cm}^2$ debido a la consolidación del terreno en los

escasos días que estuvo sometido a la carga antes de romperse. Esta ganancia supone que la presión efectiva aumentó en un valor próximo a $0,16 \text{ kp/cm}^2$. Si se tiene en cuenta la subida progresiva de tierras en los meses anteriores a la rotura, podía concluirse, que se había producido una consolidación del orden del 40%.

Como hemos dicho, las resistencias al corte sin drenaje eran muy bajas. En un principio se pensó que se debían al carácter arenoso que podría tener en algunos tramos pero si se observa la figura 4, todas las muestras corresponden a suelos finos.

Los ensayos de compresión triaxial y los cortes directos daban, en efectivas, cohesión nula y un ángulo de rozamiento del orden de 38° lo que confirmaba el carácter limoso de estos suelos aunque, a corto plazo, no eran capaces de un inmediato drenaje y se comportaban con resistencias al corte correspondientes a un estado de ϕ cero.

4 ANÁLISIS RETROSPECTIVO DE LA ROTURA

Por la forma de la rotura, se estimó que la “blandura” del cimiento se podía traducir en una deformación de la base del terraplén y que las capas inferiores de dicho terraplén tuvieran menos resistencia al corte que las superiores. Aunque es habitual suponerlo al revés, cuando se admite un agrietamiento de las capas superiores, aquí pareció razonable hacerlo al contrario.

Los cálculos se hicieron a corto plazo en condiciones no drenadas manejando las características siguientes:

| Terreno | Densidad ap. (t/m^3) | Cohesión (t/m^2) | Ángulo rozamiento ($^\circ$) |
|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Terraplén superior | 2,0 | 2 | 35 |
| Terraplén inferior | 2,0 | 0 | 30 |
| Limos encostrados (1) | 2,0 | 3 | 0 |
| Limos (2 y 4) | 2,0 | 1 | 0 |
| Limos3 | 2,0 | 0,4 | 0 |
| Limos consolidados bajo terraplén | 2,0 | 1,2 | 0 |
| Aluvial | 2,0 | 5 | 0 |
| Sustrato alterado | 2,1 | 10 | 0 |
| Sustrato | 2,1 | 20 | 0 |

Cuadro nº 2.- Características manejadas en los cálculos.

El nivel freático se dispuso en los cálculos a 2,50 m de profundidad si bien no tenía demasiada influencia al trabajar a corto plazo.

Se efectuaron una serie de cálculos de los cuales incluimos los dos correspondientes al momento de la rotura y al estado inmediato con una altura menor:

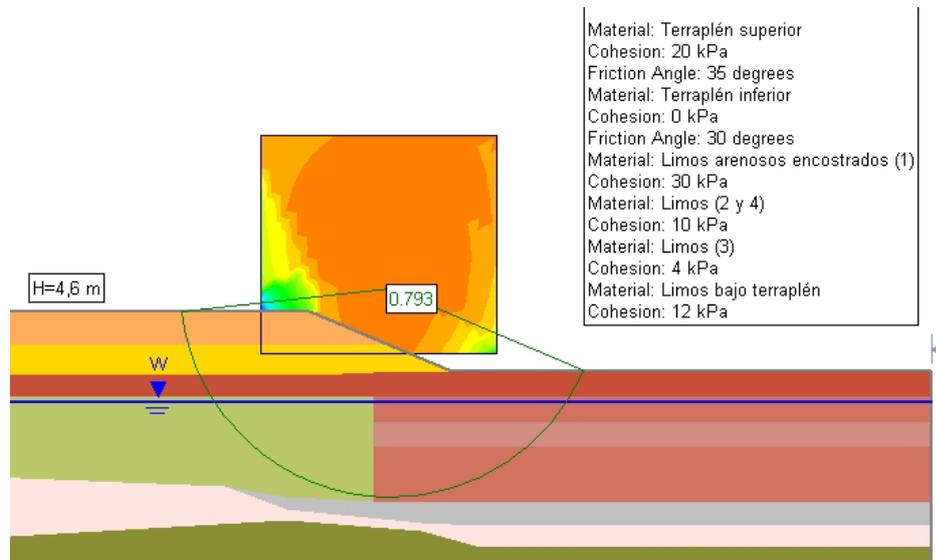


Figura 10.- Coeficiente de seguridad en rotura.

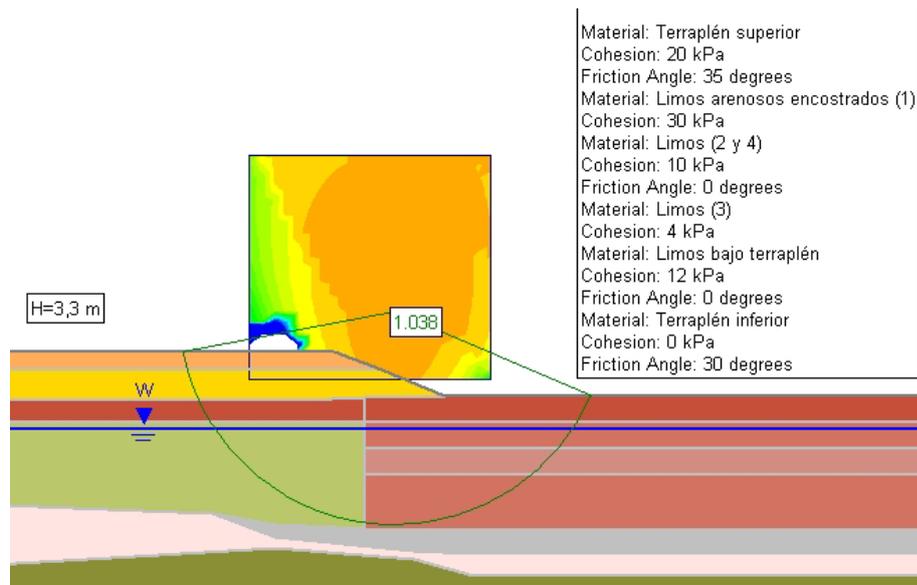


Figura 11.- Coeficiente de seguridad para la altura anterior a la rotura

Debe reconocerse que las características manejadas eran en algún caso ligeramente mejores que las medias que se deducían de los vanes in situ, pero este incremento era obligado para explicar la rotura.

Para la altura de 3,30 m el talud resultaba en el límite de la estabilidad, bastando con levantar unos decímetros de tierra para que la inestabilidad se manifieste.

Se tantearon superficies poligonales de rotura pasando por la capa de limos (3) de menor resistencia, buscando una rotura con movimiento traslacional como parecía indicar la grieta de cabecera, pero los resultados fueron similares a los de una rotura circular.

Se estaba, pues, ante un suelo extremadamente poco resistente en el que no era suficiente la ganancia de resistencia por la consolidación para garantizar la estabilidad.

La delimitación de la zona de la rotura pudo explicarse por varias causas pero la más influyente era la coincidencia de la grieta de cabecera con la alineación del linde que separa dos recintos de balsas antiguas. En la figura 12 se ha marcado una hipótesis sobre las diferentes balsas de residuos. De hecho, en los sondeos en el tronco de la autovía, el espesor de residuos es menor como se aprecia en la figura 13.

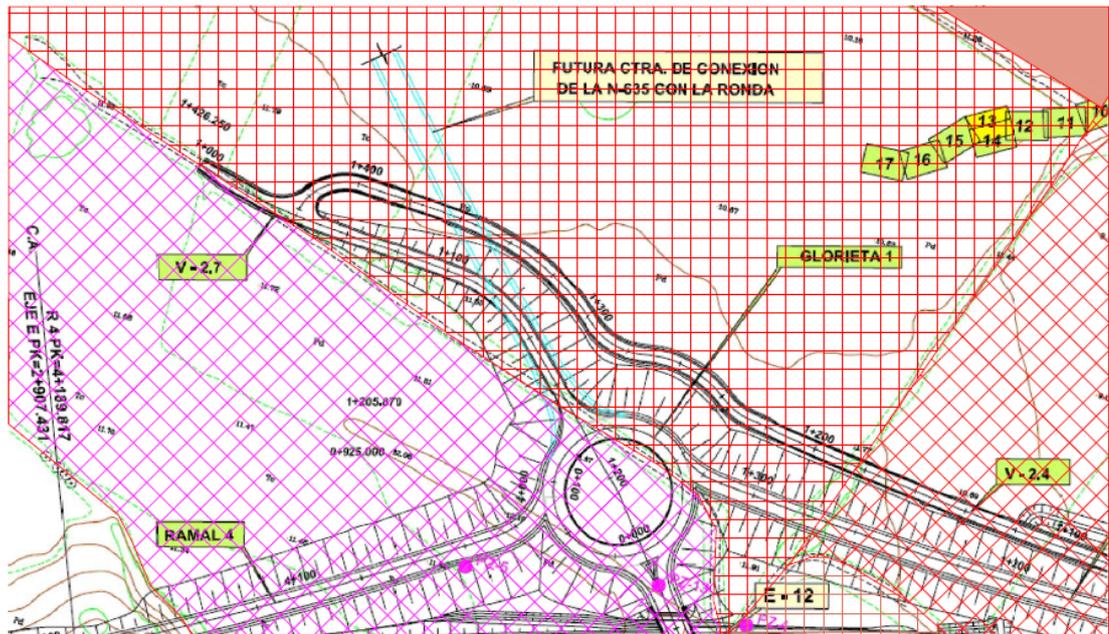


Figura 12.- Delimitación de parcelas que podrían (¿?) corresponder con diferentes balsas de residuos.



Figura 13.- Variación del espesor de los residuos mineros entre el tronco de la autovía y la rotonda donde se produce el deslizamiento.

La existencia de una zona más hundida entre grieta trasera y el borde de talud puede explicarse con la figura 14 sin más comentario que el de su propia observación:

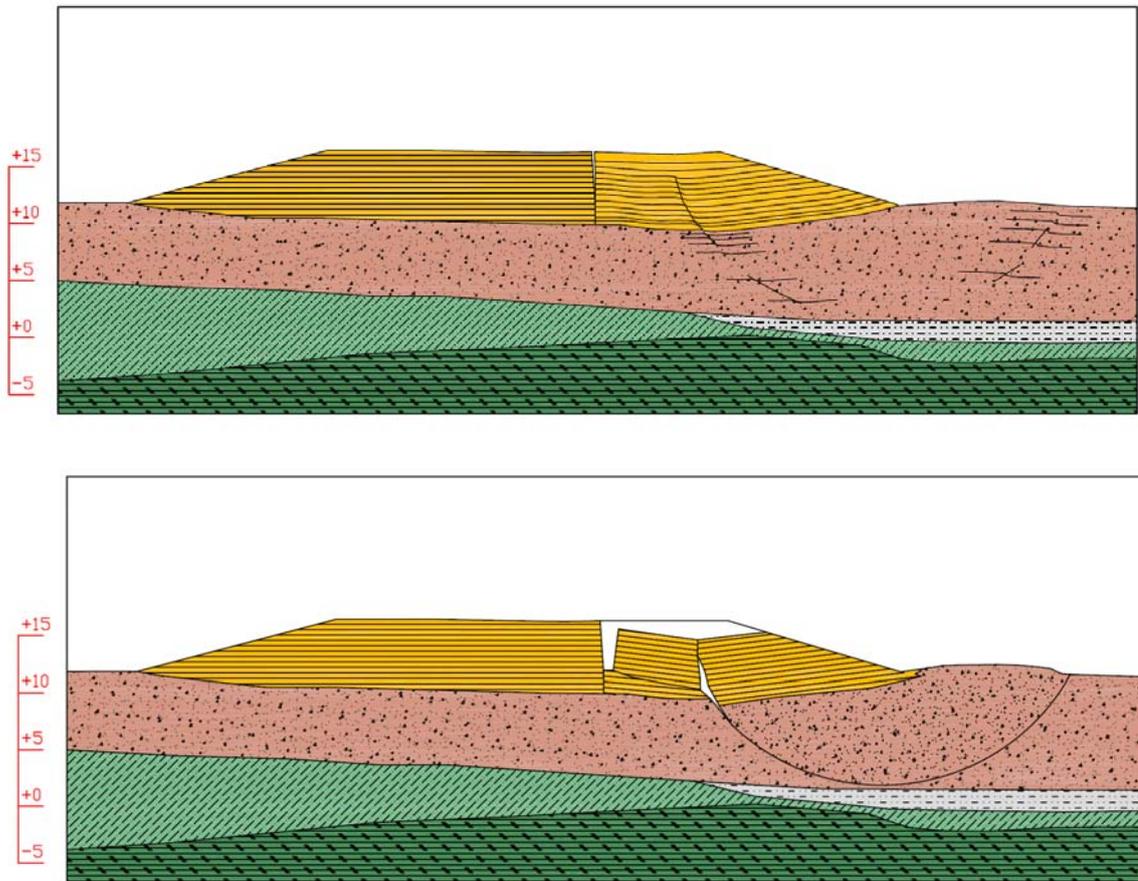


Figura 14.- Explicación gráfica del mecanismo de rotura y de los signos visibles en la hipótesis de un deslizamiento circular.

5 SOLUCIONES

Las soluciones planteadas son fáciles de imaginar:

- Retirada del material deslizado incluso parte del terreno de cimentación, repetición del tratamiento de consolidación de los residuos y reconstrucción del terraplén a un ritmo más lento.
- La misma solución anterior pero con la disposición de bermas o suavizado del talud, con nuevas expropiaciones independizando el plazo de construcción de la estabilidad.
- Retirada del terraplén deslizado; refuerzo del cimiento con columnas de grava y reconstrucción de la sección inicial sin problemas de plazos de espera.

A fecha de redacción de este texto, dados los actuales plazos de la obra, la solución considerada es la primera.

6 CONCLUSIONES

Se quieren resaltar los siguientes aspectos:

- Existen niveles de limos procedentes de los residuos mineros, que tras más de 60 o 70 años, no han consolidado bajo el peso de los propios niveles superiores por lo que su resistencia al corte es muy baja.
- Este tipo de rellenos antrópicos puede ofrecer variaciones notables en sus características. Así pues, la resistencia al corte de los residuos mineros en la esquina de esta balsa ha sido notablemente inferior a las de otros residuos investigados en otros puntos del enlace de Guarnizo, y a las de otras balsas de este tramo de autovía y de otras obras cercanas.
- Hay grietas y morfologías en deslizamientos que pueden engañar y ocultar la verdadera tipología. En nuestro caso, un deslizamiento traslacional se ha podido explicar con uno circular.
- Es crucial en estos suelos blandos la auscultación durante la construcción de los terraplenes para anticipar deformaciones e inestabilidades no previstas y tomar las medidas oportunas.
- En cualquier caso, debe decirse que una vez ocurrida rotura como ésta y tras su minuciosa investigación puede ser fácil – y no siempre – explicar los mecanismos que la han producido y las causas geotécnicas. Hacerlo en proyecto hubiera obligado a una investigación geotécnica de un detalle probablemente fuera del alcance previsto.
- En una obra como ésta en la que se ha analizado, auscultado y constatado la estabilidad de muchos otros rellenos sobre residuos mineros, el deslizamiento ocurrido es un daño mínimo. Si lo hemos contado en las líneas anteriores es porque las conclusiones geotécnicas pueden contribuir a la experiencia en casos como éste.

7 AGRADECIMIENTOS

Se quiere agradecer la autorización para la publicación de la información contenida en este texto a la demarcación de Carreteras del Estado en Cantabria, a la UTE Ronda Bahía formada por las empresas Ascan y Dragados y a la Fundación Agustín de Betancourt.