

ESTABILIZACIÓN DE TALUDES MEDIANTE PILOTESⁱ

LUIS ORTUÑO ABAD¹, TOMÁS MURILLO PÉREZ²

¹ Universidad Politécnica de Madrid
Uriel y Asociados, S.A.

² Universidad Alfonso X. Madrid
Uriel y Asociados, S.A.

RESUMEN

Una de las técnicas disponibles en Ingeniería Geotécnica para la estabilización de laderas y taludes inestables consiste en el uso de pantallas, generalmente de pilotes, que atraviesen a modo de pasadores la superficie de deslizamiento. En este artículo se describe someramente un acercamiento metodológico a este tipo de actuaciones y se muestran algunos casos resueltos mediante este sistema. Los ejemplos mostrados tratan en su mayor parte de inestabilidades surgidas por la construcción de terraplenes viarios sobre laderas suaves formadas por arcillas rígidas sobreconsolidadas, en general de alta plasticidad y con un comportamiento resistente frágil.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción básica

Una de las soluciones disponibles en Ingeniería Geotécnica para la estabilización de laderas y taludes inestables consiste en el uso de pantallas, generalmente de pilotes, que atraviesen con suficiente longitud la superficie de deslizamiento. Se puede contar así con la resistencia estructural al corte de los pilotes, que se suma a la del terreno, permitiendo reducir sus deformaciones y aumentar su estabilidad.

ⁱ Conferencia dictada en CAMSIG 2010. Mendoza. Argentina

Estas contenciones por medio de pilotes se pueden emplear para la estabilización de laderas naturales, de desmontes o de terraplenes, siendo quizás el uso más estudiado en la bibliografía el tratamiento de desmontes mediante pantalla única, formada por una sola fila de pilotes.

Las pantallas de pilotes a las que mayor atención se prestará en estas líneas presentan la particularidad de haberse empleado principalmente para la estabilización de terraplenes situados sobre laderas naturales en las que se ha originado inestabilidades profundas, marcadamente traslacionales, que por sus grandes dimensiones suelen requerir contundentes fuerzas de estabilización.

Desde un punto de vista geotécnico estas laderas se encuentran a menudo formadas por arcillas terciarias, sobreconsolidadas y de alta plasticidad, habitualmente con una acusada fragilidad en resistencia. No es infrecuente, por otra parte, que presenten una capa de alteración superior de cierto espesor, o que incluyan niveles u horizontes más permeables, habitualmente areniscosos o calcareníticos, que sirvan de camino preferencial de circulación del agua freática. Ambos factores suelen influir decisivamente en la producción de inestabilidades.

Fruto de la experiencia adquirida, las pantallas de pilotes construidas para estabilizar estas laderas suelen contar con 2 filas próximas de pilotes, dispuestos al trespelillo y unidos en cabeza por una viga-encepado, a través de la cual pueden ejecutarse anclajes al terreno.

1.2 Forma de trabajo

Como se ha descrito, los pilotes que conforman una pantalla estabilizadora se ejecutan atravesando la superficie de deslizamiento, cosiendo así a modo de pasadores la superficie de rotura. Dado que se trata de elementos de elevada rigidez, el trabajo a cortante lleva asociado un importante trabajo a flexión. Cuanto más rígidos sean los elementos pasadores, mayor momento tendrán para un mismo esfuerzo cortante y un mismo perfil de terreno.

De igual forma, desde el punto de vista del terreno, cuanto más deformable sea éste, mayores serán los momentos en los pasadores, al producirse en ellos mayores deformaciones laterales por necesitar el terreno mayor deformación para contrarrestar los empujes que reciben de los propios pasadores.

En cuanto a los esfuerzos axiales, los pilotes suelen disponerse casi perpendiculares a la superficie de deslizamiento, de manera que resultan prácticamente nulos. En todo caso, de aparecer cierto esfuerzo axial, por la orientación habitual de los pilotes serían preferentemente de compresión, lo que aumentaría su resistencia a flexión. No obstante este efecto suele despreciarse, quedando así del lado de la seguridad.

2. SITUACIONES EN LAS QUE RESULTA INTERESANTE SU APLICACIÓN

Las pantallas de pasadores encuentran su principal campo de aplicación en laderas, habitualmente de poca inclinación, en las que se ha producido o puede producirse un deslizamiento más o menos profundo (entre 10 y 20 m bajo la superficie del terreno) marcadamente traslacional. Los casos más frecuentes suelen ser debidos a la construcción de terrapenes para vías de comunicación o para plataformas de urbanización. Un ejemplo de ello se muestra en la Figura 1.

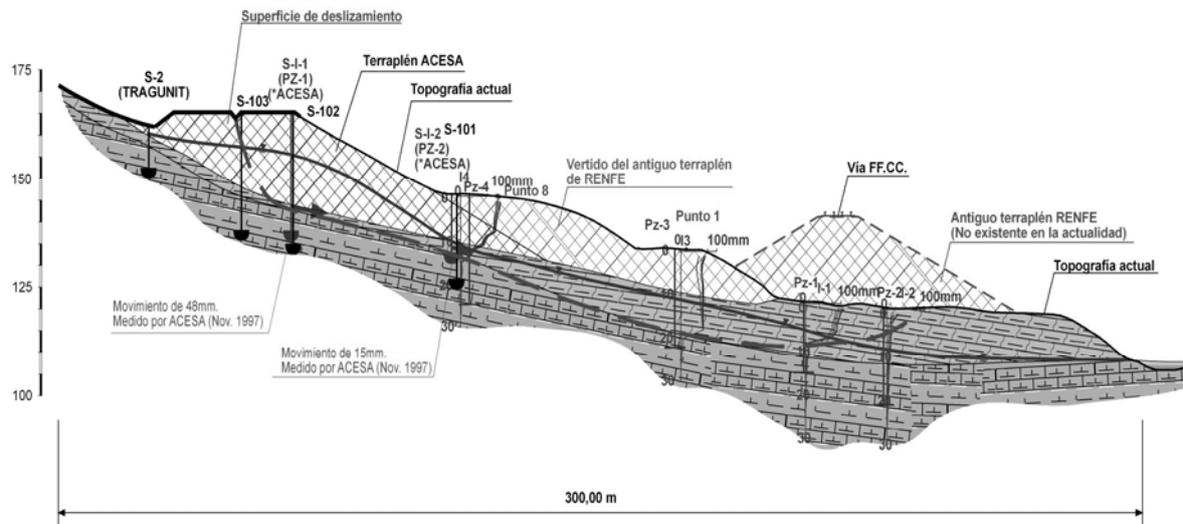


Figura 1: Ladera inestable con dos terrapenes (Sant Sadurní, Tarragona)

En estas situaciones, debido a la geometría resultante de la masa inestable, la deformabilidad del terreno, y la magnitud de la fuerza de estabilización necesaria, resulta a menudo difícil acudir a otro tipo de actuación (anclajes, movimiento de tierras, retaluzados, etc.).

Otros factores habituales en este tipo de inestabilidades son que el terreno de la ladera esté formado por arcillas terciarias sobreconsolidadas de alta plasticidad, como ya se ha indicado, y que exista un nivel piezométrico elevado, coincidente a veces con algún contacto litológico.

Con relación al terreno, las arcillas mencionadas se caracterizan frecuentemente por presentar un comportamiento marcadamente frágil, mostrando una acusada degradación de la resistencia al corte con el aumento del nivel de deformaciones tangenciales en el suelo.

Un ejemplo de este proceso de degradación con el nivel de deformaciones se muestra en la Figura 2. El límite inferior de esta reducción progresiva de resistencia depende del contenido de arcilla del suelo y de su plasticidad, pudiendo llegar en algunos terrenos hasta ángulos de rozamiento residuales de menos de 10° .

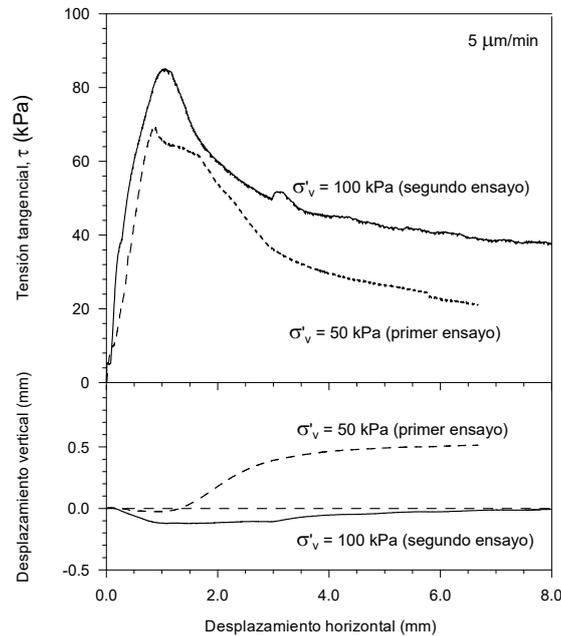


Figura 2: Comportamiento frágil. Ensayo de corte directo sobre muestra intacta. Alonso, E. et al., 2004

Otro tipo de situaciones en las que pueden ser de aplicación las pantallas de pilotes son las laderas constituidas en su parte superior por depósitos coluviales, proclives a deslizar con un mecanismo traslacional sobre el sustrato en el que se apoyan.

En todos los casos, generalmente la estabilización con pantallas de pasadores se combina con sistemas de drenaje profundo (pozos, galerías, etc.).

3. METODOLOGÍA DE DISEÑO

Una vez que se llega a la decisión de emplear una pantalla de pasadores para estabilizar una ladera, los métodos que existen para afrontar su diseño son muy diversos. Esto se debe a que se trata de un problema en el que intervienen muchos aspectos de interacción suelo-estructura, la mayoría de ellos difíciles de simplificar.

Como en otros campos de la Ingeniería Geotécnica, los métodos de cálculo disponibles han ido evolucionando a medida que se ha dispuesto de herramientas de cálculo cada vez más potentes.

Así, las primeras propuestas eran aproximaciones analíticas que nacían de otras aplicaciones geotécnicas. Posteriormente, la generalización de los programas informáticos ha llevado al empleo de programas de cálculo de estabilidad de taludes, junto con otros capaces de evaluar esfuerzos en pantallas (generalmente basados en modelos tipo Winkler, que sustituyen el terreno por muelles).

Más recientemente, los métodos numéricos mediante elementos finitos o diferencias finitas han posibilitado el diseño global de este tipo de aplicaciones, utilizando siempre también algunas simplificaciones.

Cualquiera que sea el método a emplear, salvo si se usan métodos numéricos, pueden distinguirse dos fases principales de diseño:

- La obtención de la fuerza de estabilización necesaria para lograr el factor de seguridad deseado.
- El cálculo estructural de la pantalla para que soporte dicha fuerza.

La primera fase puede plantearse de forma relativamente sencilla, al menos en comparación con la segunda, pues su complejidad es en principio la misma que la del cálculo de estabilidad convencional de un talud, que puede acometerse por medio de métodos tradicionales de equilibrio límite. La única variable que se necesita de la pantalla es su posición en la ladera, así como su longitud para evaluar la seguridad frente a roturas globales (por debajo del pie de la pantalla, por ejemplo).

La segunda comprende a su vez los siguientes pasos:

- La estimación de la distribución de la fuerza de estabilización a lo largo de los pilotes.
- La obtención de esfuerzos en la pantalla.
- El cálculo estructural de la pantalla (armaduras necesarias).

Estos pasos son iterativos, pues a lo largo de ellos, especialmente en los dos últimos, es necesario ir tanteando el diseño de la pantalla, definida por las siguientes características:

- Sección de pantalla: diámetro de los pilotes y separación.
- Longitud de la pantalla
- Introducción de sistemas de arriostramiento adicionales (anclajes en cabeza, por ejemplo).

4. ASPECTOS RELACIONADOS CON EL DISEÑO DE LA PANTALLA

Antes de entrar en el desarrollo de la metodología de cálculo empleada habitualmente por los autores de estas líneas, parece interesante tratar previamente algunos aspectos relativos a la definición geométrica y a la situación de la pantalla en la ladera, factores estos necesarios como punto de partida para los cálculos.

4.1 Emplazamiento de la pantalla en la ladera

Parece razonable pensar que, ante una determinada superficie de deslizamiento, si los pilotes se instalan demasiado altos, cercanos a la coronación de la masa de terreno potencialmente inestable, podrá existir el riesgo de no asegurar suficientemente la ladera que queda por debajo de la pantalla así formada. Por otra parte, si dicha pantalla se coloca muy próxima al pie de la superficie de deslizamiento, el mecanismo de inestabilidad podría modificarse e intentar buscar una nueva salida, por encima de la línea de pilotes.

En definitiva, la posición idónea de la pantalla dependerá de la geometría del problema y del perfil geotécnico en cada caso. No obstante, se pueden enumerar algunas reglas de buena práctica que suelen proporcionar buenos resultados:

- En desmontes o laderas naturales con pendiente constante la pantalla suele situarse a un tercio de la altura del talud, o algo por encima, sin sobrepasar normalmente la mitad de la altura.
- Cuando se trata de terraplenes a media ladera, lo habitual es disponer la pantalla próxima al pie del terraplén, pues con ello se consigue limitar las deformaciones del mismo. Además, es precisamente el terraplén el que introduce mayores esfuerzos de corte al terreno natural (y desencadena el deslizamiento), por lo que también el refuerzo a su pie parece lo más adecuado.

En cualquier caso será también necesario emplazar la pantalla atendiendo a otros condicionantes, como el acceso. Con gran relevancia y asociado a lo anterior, se debe tener en cuenta la necesidad de disponer de una plataforma de trabajo de al menos unos 12 m de anchura para el equipo de perforación de los pilotes. Esto resulta en ocasiones muy complicado cuando se trata de laderas con pendiente más o menos fuerte y cuando, especialmente, ya se han producido deslizamientos, dado que la creación de la plataforma de trabajo puede requerir la ejecución de un relleno adicional potencialmente desestabilizador.

Obviamente, tras la selección inicial del emplazamiento teniendo en cuenta los factores anteriores, los cálculos de estabilidad servirán para corroborar o no la bondad de la posición elegida, para lo cual deberán analizarse los coeficientes de seguridad de las roturas parciales que se puedan producir aguas arriba o aguas abajo de la pantalla.

4.2 Sección de la pantalla: diámetro y separación

Es evidente que la sección estructural de la pantalla, esto es, el diámetro de los pilotes y su distanciamiento, así como la armadura, será consecuencia directa de los esfuerzos que tengan que resistir.

Sobre este aspecto y las posibilidades de elección habitualmente disponibles también conviene tener algunas ideas previas.

Así, los diámetros de pilote más habituales para este tipo de aplicaciones varían entre 1 y 2 m aproximadamente. Quizás los más frecuentes en España sean los de 1,2, 1,5 y 1,8 m de diámetro, por aunar un buen equilibrio entre tamaño y facilidad de ejecución y contratación. Lógicamente, cuanto menor sea el diámetro, más pilotes y/o más armadura será necesaria.

A efectos de mostrar un orden de magnitud de la resistencia disponible en los pilotes como elementos pasadores, se muestra a continuación una tabla con los momentos y cortantes últimos calculados para diversos calibres en el caso de contar con las siguientes características tipo:

- Hormigón de 30 MPa de resistencia característica y acero de 500 MPa de límite elástico
- Armadura longitudinal: barras de 32 mm separadas 10 cm
- Armadura horizontal: cercos dobles de 20 mm cada 15 cm
- Axil nulo.

Diámetro (m)	Nº de barras longitudinales de 32 mm	Mu (kNm)	Vu (kN)
1,00	26	3400	1400
1,25	34	4500	1800
1,50	41	6600	2200
1,80	51	12400	2800

Tabla 1: Ejemplo de resistencia última de pilotes

En cuanto a la separación entre pilotes, por un lado está relacionada con los esfuerzos (por unidad de ancho) a resistir por los pilotes, y por otro lado debe elegirse de forma que se evite el flujo de terreno entre pilotes. Suele hablarse también de adoptar separaciones que optimicen el efecto arco del terreno entre ellos.

Estos últimos aspectos causan generalmente bastante confusión, pues existen numerosas propuestas, muy teóricas en general, para determinar cuándo se produce el flujo entre pilotes, o cómo se reduce el empuje del terreno sobre ellos a medida que su separación disminuye y se solapan sus bulbos o zonas de influencia.

Estas propuestas suelen asumir hipótesis quizás demasiado simplistas en cuanto al comportamiento del terreno, que suele suponerse plástico perfecto, unas veces cohesivo puro, y otras exclusivamente granular.

En cualquier caso, lo cierto es que, aparte del interés teórico que aportan estos métodos, en la práctica, cuando finalmente se opta por estabilizar laderas con pantallas de pasadores, los

esfuerzos a resistir suelen ser tan importantes que obligan a acudir a separaciones bastante pequeñas.

Por otra parte hay que indicar que, como se ha señalado anteriormente, esta técnica se emplea principalmente para estabilizar deslizamientos en suelos arcillosos muy rígidos y resistentes, en los que habitualmente la rotura se concentra en una banda delgada y profunda, con resistencia degradada. No se trata en principio por tanto de situaciones de flujo entre pilotes.

De nuevo desde un punto de vista práctico, la experiencia indica que rara vez las separaciones entre pilotes son mayores a 2 veces su diámetro y, de hecho, es muy habitual disponer los pilotes en 2 filas al trespelillo, no sólo por la mejora que se consigue en el comportamiento de la pantalla, como se verá más adelante, sino porque de otra forma los pilotes podrían quedar incluso demasiado próximos a efectos de ejecución.

A modo de ejemplo, en la Figura 3 se muestran dos esquemas de distribución en planta de sendas pantallas de pilotes empleadas por los autores de este artículo en dos casos concretos.

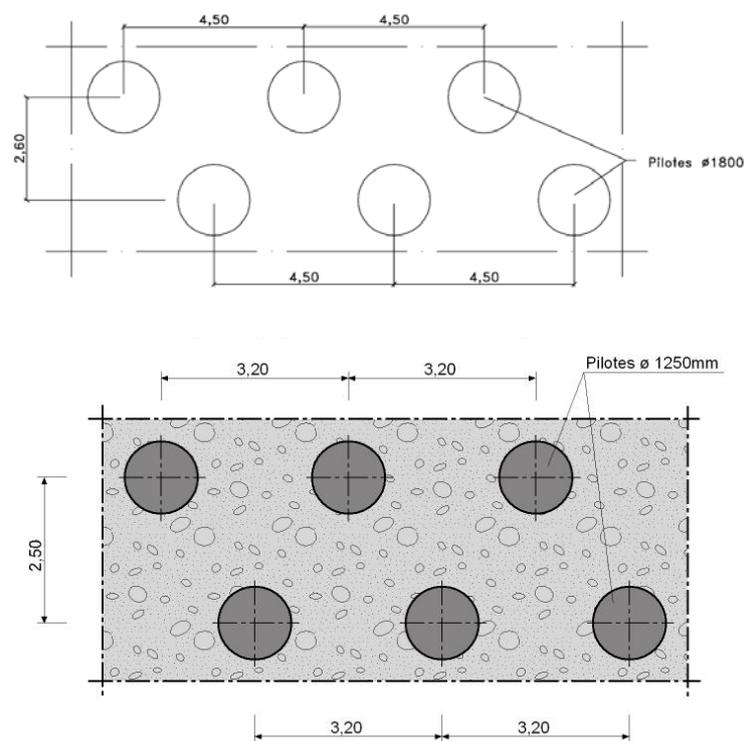


Figura 3: Esquemas en planta de distribución de pilotes.

4.3 Longitud de la pantalla

Como es evidente, la longitud de la pantalla se fija de forma que los pilotes cuenten con suficiente empotramiento bajo la superficie de deslizamiento. Como orden de magnitud y desde un punto de vista práctico, en general se adoptan empotramientos bajo dicha superficie del orden de al menos un tercio de la longitud total de la pantalla.

La experiencia adquirida a partir de lecturas obtenidas en inclinómetros instalados en los pilotes de cierto número de casos reales sugiere que esta longitud es suficiente, e incluso conservadora, observándose que, en general, todavía queda una longitud de pilote de algunos metros (2 a 3 m) cercanos a su base en donde no se registran movimientos.

4.4 Arriostramiento en cabeza

Como puede deducirse por lo dicho hasta ahora, cuando se dispone una pantalla formada por una fila de pilotes, éstos trabajan a cortante y a flexión. El cortante suele ser máximo en la sección que intercepta la superficie de deslizamiento, y los momentos en la zona de empotramiento de la pantalla.

El comportamiento estructural de la pantalla es similar al de una pantalla en voladizo, en la que la altura del voladizo es el espesor de la masa inestable. Por este motivo, introducir algún elemento que arriestre la pantalla supone una gran mejora en su comportamiento estructural, ya que reduce de forma notable sus esfuerzos.

Esto es especialmente interesante cuando los voladizos son de cierta magnitud (más de 6 a 8 m), lo que suele ser habitual en estos casos de las laderas estabilizadas con pantallas pilotes.

Los esquemas de arriostramiento más empleados se llevan a cabo mediante (Figura 4):

- La perforación de anclajes en cabeza de pantalla.
- La ejecución de los pilotes en 2 ó 3 filas, al tresbolillo, uniendo sus cabezas mediante una viga de atado (encepado).
- Una combinación de las dos anteriores

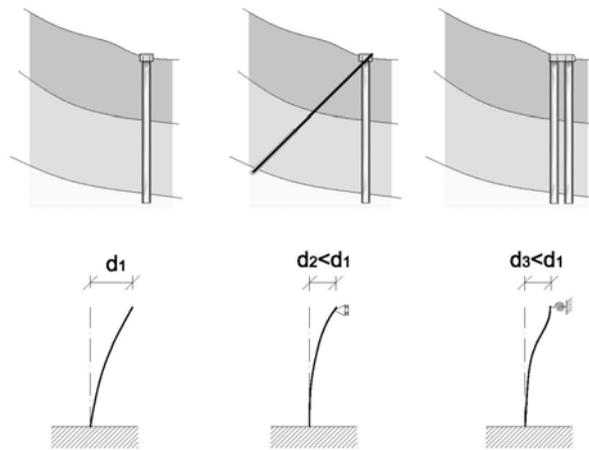


Figura 4: Formas de trabajo de una pantalla en función de su arriostramiento.

5. OBTENCIÓN DE LA FUERZA DE ESTABILIZACIÓN NECESARIA

5.1 Aspectos generales

El primer paso para la obtención de la fuerza buscada es llevar a cabo una serie de cálculos convencionales de la estabilidad del talud o la ladera.

Cuando se trata de estabilizar un deslizamiento ya producido, lo habitual es partir de cálculos retrospectivos, para los cuales es probable que se disponga de datos topográficos y de instrumentación (inclinometría) que sirvan para definir la superficie de rotura. Añadiendo a esta información las condiciones de presión intersticial en el terreno en el momento del deslizamiento, obtenidas a partir de observaciones en campo, de instrumentación (piezómetros) o de alguna hipótesis razonable, se pueden deducir los parámetros de resistencia al corte del terreno que rigieron durante la rotura, los cuales serán necesarios para el diseño de la pantalla.

En este punto se debe recalcar la importancia de contar con una investigación e instrumentación adecuadas, que permitan estimar con fiabilidad la situación de la superficie de rotura, ya que a partir de simples sondeos o ensayos in situ puede no ser posible identificarla.

De hecho, en el caso particular de los suelos arcillosos sobreconsolidados de alta plasticidad, objeto principal de estas líneas, el perfil geotécnico del talud puede resultar relativamente homogéneo, concentrándose la rotura en una banda delgada y profunda, bien difícil de identificar sin la ayuda de inclinómetros.

Obviamente estas dificultades no se dan siempre, existiendo otras situaciones en las que la detección de la superficie de deslizamiento es sustancialmente más sencilla. Este puede ser el caso ya comentado de los deslizamientos de coluviones, o de otras roturas en laderas que han desarrollado un nivel superior de alteración sobre el sustrato subyacente inalterado. En estas dos situaciones no es infrecuente que la superficie de deslizamiento se desarrolle precisamente a favor del contacto con el sustrato.

Algunos ejemplos de este tipo de mecanismo, todos ellos ocurridos en la provincia de Málaga con motivo de los temporales de lluvias del invierno 1995-1996 se muestran en la Figura 5

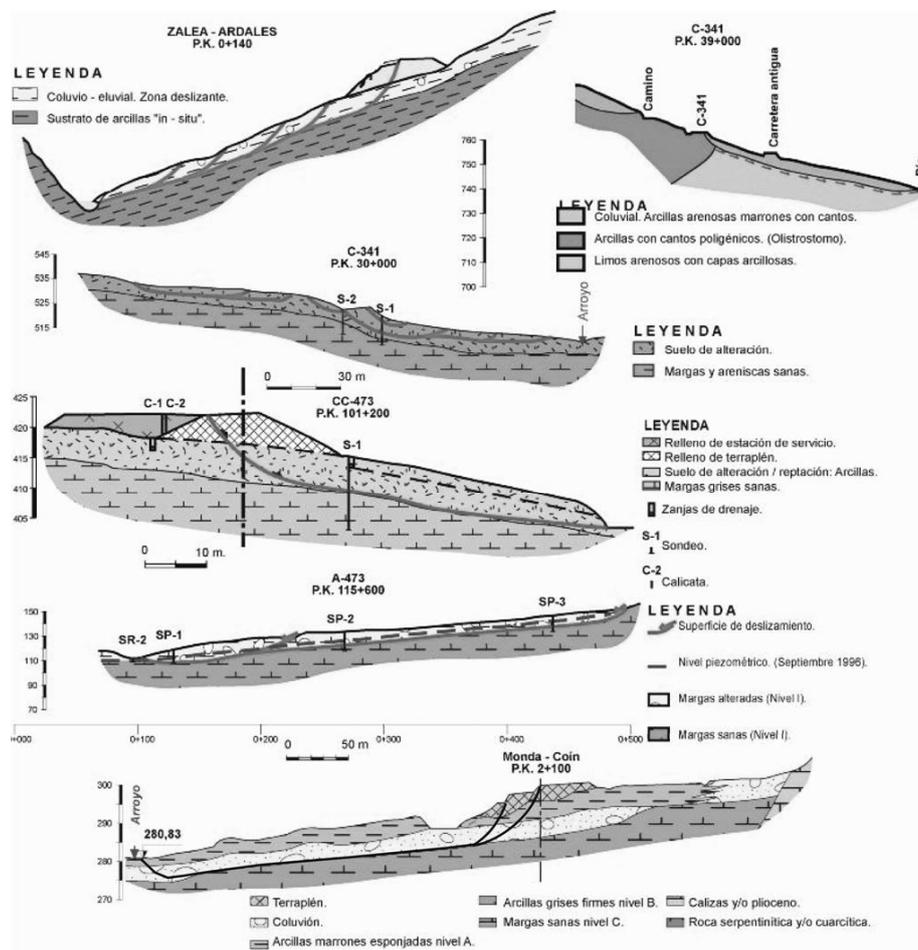


Figura 5: Deslizamientos traslacionales a favor de discontinuidades litológicas en laderas malagueñas constituidas por arcillas sobreconsolidadas de alta plasticidad. González, B. et al. 1998.

Como muestra la figura anterior, en el caso de que la rotura haya sido producida por la construcción de un terraplén, resulta muy habitual que el deslizamiento sea de tipo compuesto, comenzando a través del cuerpo del éste con un mecanismo rotacional hasta que,

ya en terreno natural, la rotura encuentra una discontinuidad litológica o un nivel especialmente débil que le hace proseguir de forma traslacional.

El desarrollo de la porción traslacional del movimiento puede ser muy extensa, no siendo infrecuente que la masa deslizada no encuentre “salida” hasta alcanzar el pie de la ladera, situado a veces a más de cien metros de la grieta de coronación abierta en el terraplén que desencadenó el movimiento.

Cuando el deslizamiento no se produce a favor de un contacto litológico, sino a través de la propia masa de arcilla más o menos homogénea, a menudo la superficie de rotura se desarrolla a bastante profundidad, preferentemente a lo largo de planos de sedimentación o estratificación de material.

A efectos de cálculo resulta necesario modelizar la franja de rotura con un material de resistencia degradada, pudiendo comprobar frecuentemente que los parámetros de resistencia al corte que explican el deslizamiento se encuentran a medio camino entre la resistencia de pico y la residual, próximos a esta última.

Una vez obtenidos dichos parámetros mediante el análisis retrospectivo, se lleva a cabo una segunda serie de cálculos, en los que ahora se introduce una fuerza ficticia horizontal en la sección del talud en la que se prevé situar los pilotes. La magnitud de la fuerza se va modificando en tanteos sucesivos hasta alcanzar el factor de seguridad deseado.

Una primera incertidumbre en este cálculo se presenta a la hora de elegir la cota o profundidad a la que se debe situar la fuerza, pues en función de ella cambia el equilibrio de momentos. Una posibilidad es situarla en la superficie de rotura, y otra en el centro de gravedad de los empujes de la masa deslizante sobre los pilotes (por ejemplo, si se suponen empujes triangulares, se situaría a un tercio de la altura de la masa deslizante, sobre la superficie de rotura).

Afortunadamente, para el caso de roturas principalmente traslacionales, e incluso en menor medida para las que son más circulares, la variación de la cota de aplicación de la fuerza tiene poco peso en el factor de seguridad obtenido.

Algunos programas permiten introducir un elemento vertical, definido por una resistencia pasiva a cortante. En este caso la fuerza de contención se aplica a cota de la superficie de deslizamiento.

5.2 Factor de seguridad.

En el caso de roturas de tipo traslacional se comprueba fácilmente que el incremento del factor de seguridad es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza estabilizadora introducida.

Huder y Duerst (1981) analizaron este hecho, y dedujeron la siguiente expresión para el caso de roturas traslacionales:

$$Fuerza = \Delta FS \cdot W \cdot \text{sen} \alpha \quad (1)$$

FS: incremento del factor de seguridad

W: peso de la masa deslizante

α : pendiente de la ladera

Esta sencilla expresión cobra una indudable importancia, ya que implica, por ejemplo, que para elevar el factor de seguridad desde 1,00 (rotura producida) hasta 1,20 se requiere el doble de fuerza que para elevarlo de 1,00 a 1,10. De forma asociada, el coste de la estabilización también tiende al menos a duplicarse. Es por ello por lo que en el diseño de este tipo de contenciones se presta especial atención a la selección y justificación del coeficiente de seguridad que sea estrictamente necesario.

En este sentido, cuando se trata de obras de nueva construcción, las Normas y Recomendaciones habituales suelen establecer factores de seguridad del orden de 1,50, 1,35 y 1,10 para situaciones permanentes, transitorias y accidentales respectivamente. No obstante cuando se trata de actuaciones para corregir una inestabilidad ya producida, está generalmente admitido, y resulta razonable, aceptar coeficientes de seguridad menores. Esto se fundamenta en el hecho de que, al partir de una rotura ya producida, en principio existen menos incertidumbres en la selección de los parámetros de resistencia al corte del terreno, de la forma de la superficie de rotura, etc.

Sobre lo que no hay unanimidad, sin embargo, es sobre el valor del factor de seguridad a alcanzar en estos casos. Como valores orientativos, puede apuntarse que:

- En general no se suele superar el valor 1,25.
- Valores razonables estarían en el rango de 1,10 a 1,20.

En bastantes casos, además de los pilotes, las medidas de estabilización pueden incluir la implantación de un sistema de drenaje profundo. Lo más habitual en este tipo de situaciones es acudir a pozos interconectados, ejecutados a veces con la misma maquinaria de pilotes, desde cuyo interior se perforan drenes subhorizontales.

En este sentido y como ya se ha indicado, no es infrecuente que las laderas de arcillas terciarias sobreconsolidadas objeto de este artículo presenten niveles intercalados permeables de areniscas o calizas, que favorecen la penetración de agua y la acumulación de presiones intersticiales. En consecuencia, los drenes pueden resultar especialmente eficaces si consiguen “pinchar” estas capas permeables, a veces cargadas de agua. Por el contrario, su

eficacia puede ser más que dudosa cuando se trata de drenar suelos arcillosos homogéneos o no se alcanzan esas capas permeables, siempre difíciles de detectar.

A pesar de las dudas que puedan plantearse, desde un punto de vista práctico hay que tener muy en cuenta que una reducción de la presión intersticial bajo una superficie de rotura, aunque no sea grande, suele llevar asociado un aumento muy sustancial del factor de seguridad al deslizamiento. En estas circunstancias, el relativamente discreto coste de ejecución de pozos y drenes hace que sea una solución prácticamente sistemática en algunas zonas de España (por ejemplo en Andalucía).

Habida cuenta de las observaciones anteriores, si se instala finalmente algún sistema de drenaje mediante pozo, a efectos de cálculo resulta razonable (y recomendable) considerar al menos 2 escenarios. Uno permanente, en el que se supone que el sistema de drenaje es efectivo y se ha reducido el nivel piezométrico en la medida esperada, y otro, si no permanente, al menos transitorio, en el que se considere que el sistema de drenaje no funciona, ya sea porque dejó de hacerlo en un momento determinado (colmatación de los drenes, fallo de las bombas, defectos de ejecución, etc.), o simplemente porque, a pesar de estar bien ejecutado, no fue efectivo.

Esto último puede ocurrir ya que, aun habiendo realizado un concienzudo estudio hidrogeológico con todo lo que eso conlleva (permeabilidades, discontinuidades geológicas, funcionamiento hidrológico local y general, capacidad hidráulica de los elementos de drenaje, etc.), siempre existe cierta incertidumbre en el diseño, y sobre todo, en la capacidad de mantener rebajadas en la medida necesaria las presiones intersticiales en épocas puntuales de intensas precipitaciones.

En definitiva, para concluir con esta discusión, en lo que respecta a los factores de seguridad a considerar se puede señalar que:

- La introducción en cálculo de sistemas de drenaje “efectivos” aumentan tanto el coeficiente de seguridad, que la hipótesis accidental o transitoria de fallo del sistema suele ser la más restrictiva.
- Si el éxito de la solución diseñada depende principalmente de la eficacia del sistema de drenaje, lo que no es habitual, parece justificado adoptar un factor de seguridad más reducido para el caso de que dicho sistema falle. Algunos autores recomiendan valores entre 1,05 y 1,10. Esto podría ser suficiente, pero siempre que sea posible parece sensato que, ya que se actúa, el factor de seguridad se incremente al menos hasta 1,10.

6. CÁLCULO DE LA PANTALLA

Una vez estimada la magnitud de la fuerza horizontal de estabilización necesaria, el siguiente paso para diseñar la pantalla de pilotes es adoptar una distribución de dicha fuerza, a modo de ley de empujes unitarios sobre el alzado de los pilotes. A partir de dichos empujes unitarios

se pueden obtener los esfuerzos en la pantalla, y con ellos, la armadura necesaria en los pilotes. Todo ello constituye un proceso iterativo, que se describe a continuación.

6.1 Distribución de empujes sobre la pantalla

De forma intuitiva es fácil comprender que los pilotes instalados en una ladera inestable irán recibiendo empujes hasta que ésta deje de moverse, momento en el cual serán máximos (podrá haber un cierto movimiento adicional diferido por fluencia del terreno y de los propios pilotes). Como se ha indicado, la fuerza de estabilización calculada se debe traducir en una ley de empujes equivalentes distribuidos a lo largo de la longitud de pilote situada por encima de la superficie de rotura. Por debajo de dicha superficie se movilizarán empujes contrarios para buscar el equilibrio.

Visto de esta forma, la resultante de los empujes realmente actuantes difícilmente coincidirá con la fuerza de estabilización necesaria que, como se recordará, se calculó para alcanzar un determinado coeficiente de seguridad, lo que supone una situación alejada del equilibrio estricto.

Hecha esta observación, lo cierto es que para el diseño estructural de la pantalla de pilotes resulta necesario adoptar una forma para la distribución de empujes (una “ley” de empujes), de manera que su resultante se iguale con la fuerza de estabilización ya calculada.

Como se ha señalado anteriormente, existen en la bibliografía bastantes métodos de cálculo, más o menos sofisticados, a los que se puede acudir para analizar la forma de esta ley de empujes. Uno de los más difundidos, intuitivos y sencillos es el incluido en el manual NAVFAC, según el cual la ley de empuje máximo sobre los pilotes es función exclusiva del terreno en que se insertan y se define por la siguiente expresión:

$$\sigma_L = \sigma'_v \cdot K_q + c' \cdot K_c \quad (2)$$

donde:

σ_L : tensión horizontal sobre el pasador a la profundidad L;

σ'_v : tensión vertical efectiva a la profundidad L;

c' : cohesión efectiva del terreno.

K_q y K_c : coeficientes de empuje, dependientes de la profundidad, del ancho del pilote y del ángulo de rozamiento interno del terreno.

De forma ilustrativa, la Figura 6, extraída del manual, recoge gráficamente las definiciones anteriores e incluye dos ábacos para la obtención de los coeficientes de empuje. Como puede comprobarse fácilmente a partir del uso de los ábacos (o de la observación de la propia figura), la forma ligeramente parabólica supuesta para la distribución de empujes sobre los

pilotes difiere muy poco de una ley triangular (lineal). De hecho, si se dibujan unas cuantas leyes de empujes para diversas situaciones y terrenos se puede comprobar que la adopción de una ley lineal (triangular) es perfectamente aceptable a los efectos de este procedimiento, y no difiere sensiblemente de la distribución teórica.

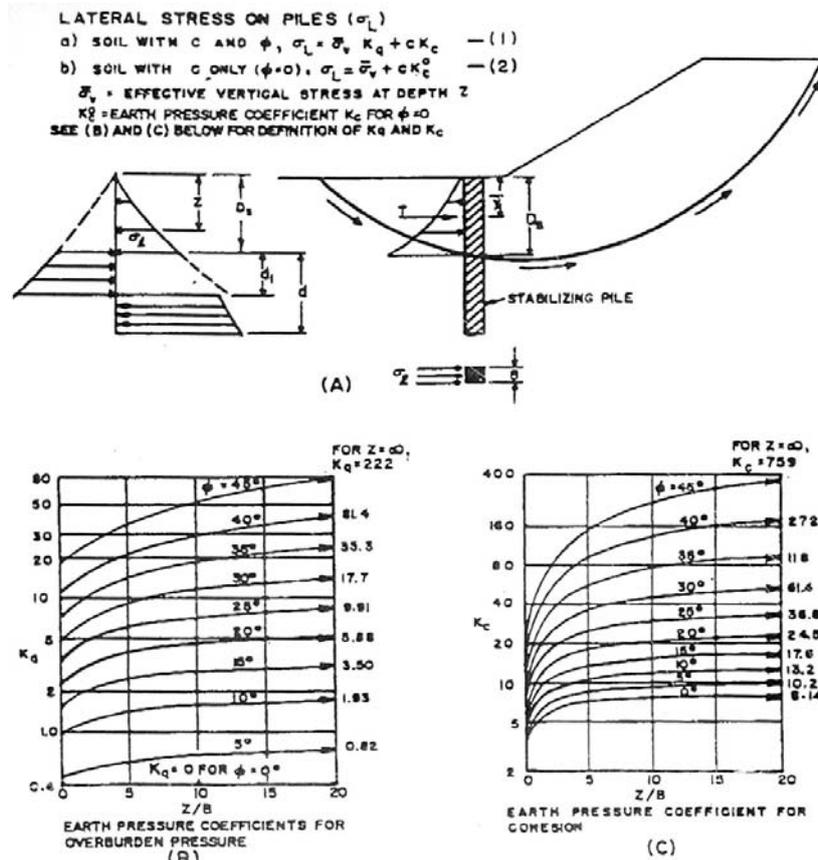


Figura 6: Empujes laterales sobre pasadores según NAVFAC

Algo similar ocurre si se llevan a cabo directamente cálculos numéricos del talud en estudio y sus pilotes de estabilización (en los que se puede incluir de alguna forma la degradación progresiva de resistencia en la banda de rotura). Evidentemente este procedimiento suele llevar asociado también un cierto grado de simplificación al tener que partir de entrada de un modelo específico para el terreno. En la Figura 7 se muestra la geometría de un caso real estudiado mediante elementos finitos con un modelo elasto-plástico sencillo, y en Figura 8 se representa la distribución de tensiones horizontales obtenida sobre los pilotes. Como puede apreciarse, también en este caso las leyes de empujes resultan marcadamente lineales (triangulares).

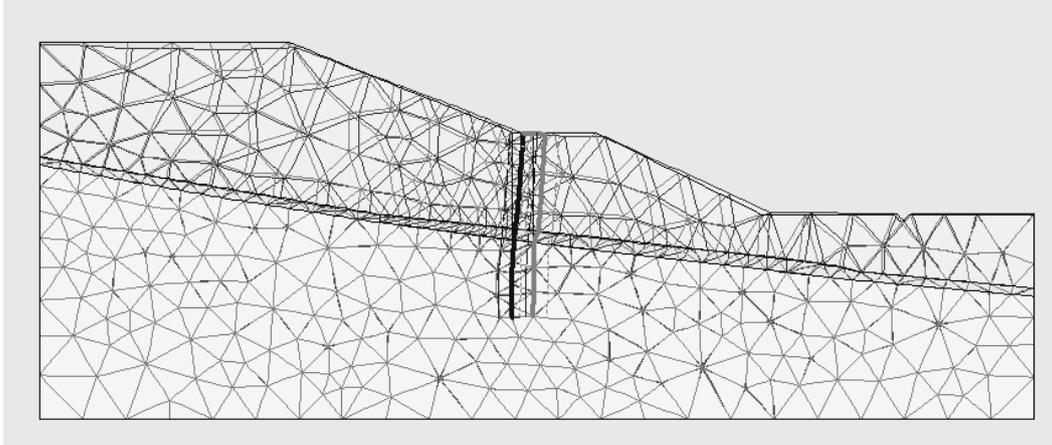


Figura 7: Modelo de elementos finitos para doble pantalla de pilotes. Autopista AP-7. Viladesens. Gerona.

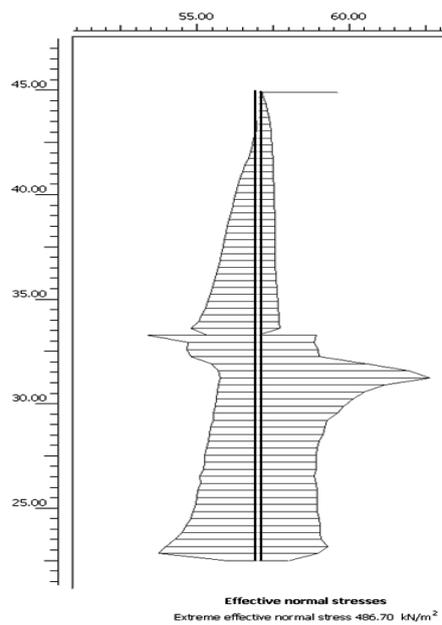


Figura 8: Distribución de tensiones horizontales en la pantalla del modelo de elementos finitos de la figura anterior (lado izquierdo es ladera arriba).

En contraste, en la literatura (véanse las referencias al final del artículo) se pueden encontrar otros procedimientos que asumen leyes de empuje diferentes a las anteriores, incluso rectangulares (constantes con la profundidad). No obstante, a la vista de las consideraciones realizadas y para los tipos de inestabilidades de ladera descritas en este artículo, parece más lógico asumir leyes de empujes lineales, bien triangulares, bien trapeziales, a igualar con la resultante de la fuerza de estabilización horizontal antes calculada.

6.2 Obtención de esfuerzos en la pantalla.

La obtención de momentos y cortantes en la pantalla puede llevarse a cabo mediante cualquier método convencional disponible para el cálculo de pilotes sometidos a empujes horizontales.

De entre los métodos disponibles, quizás uno de los más extendidos en España es el basado en el modelo de Winkler, conocido también como “del coeficiente de balasto”. Muchos programas comerciales de cálculo de pantallas y pilotes cargados lateralmente se basan en este tipo de modelo, muy difundido a pesar de sus varias limitaciones, ya que permite sustituir el terreno por simples muelles, facilitando mucho el diseño estructural. Un ejemplo de lo anterior son las conocidas curvas p-y. En la bibliografía recogida al final de este documento se recogen algunas referencias de interés en cuanto a las bases del modelo, la selección de los coeficientes de balasto, los procedimientos de cálculo, etc.

Obviamente, como alternativa se puede acudir directamente al empleo de elementos finitos o diferencias finitas que modelen todo el talud, incluidos los pilotes, tal y como se ha mostrado antes. En este caso la mayor o menor fiabilidad del procedimiento dependerá de las ecuaciones constitutivas que se seleccionen para el terreno, para las interfaces suelo-pilote, etc

6.3 Condiciones de contorno. Esquema de empujes

Un esquema simplificado y conservador para el conjunto de hipótesis de condiciones de contorno y de distribución de empujes sobre los pilotes, empleado con frecuencia en España, es el mostrado en la Figura 9, basada en la propuesta de Estaire, J. & Sopeña, L., 2001. Resulta interesante su descripción, ya que, como se verá, partiendo de la base de este marco de referencia y variando algunas de sus hipótesis básicas, pueden establecerse escenarios distintos que se adapten a diversas situaciones reales.

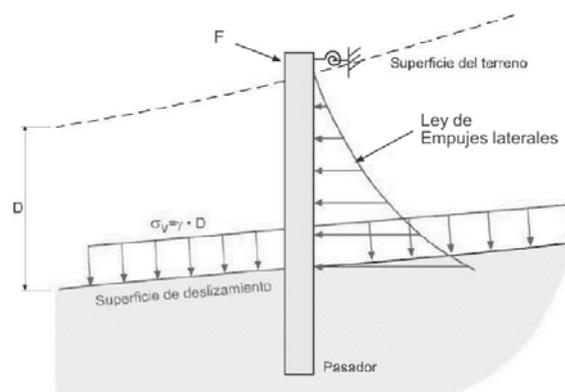


Figura 9: Esquema de cargas y condiciones de contorno para el cálculo de la pantalla. Basada en Estaire, J. & Sopeña, L., 2001.

La figura muestra un pilote-pasador que atraviesa un deslizamiento de espesor D . La masa deslizante se representa sin sombreado, situándose entre la superficie de la ladera, mostrada como una línea discontinua próxima a la cabeza del pilote, y la superficie de deslizamiento, dibujada como una línea continua que es atravesada por el pilote.

No se representan fuerzas de reacción sobre el pilote que procedan del terreno y se encuentren por encima de la superficie de deslizamiento, lo que implica que el modelo específico mostrado incorpora la hipótesis conservadora de que el terreno en movimiento situado “ladera abajo” de la pantalla de pilotes puede llegar a “despegarse” de éstos. Si no se piensa que pueda llegarse a este extremo, se puede obviamente incluir una reacción o respuesta del terreno por encima de la superficie de rotura, que entonces aportaría parte de la fuerza estabilizadora necesaria. De lo que se trata, en definitiva, no es de introducir los empujes reales, sino el incremento de empuje que recibe la pantalla por el hecho de interceptar la superficie de deslizamiento.

Continuando con la descripción del modelo de la figura, por debajo de la superficie de deslizamiento se supone que la pantalla está empotrada en el terreno, considerando el peso de tierras deslizadas como una carga exterior a ambos lados de la misma, lo que mejora la capacidad de empotramiento del lado del intradós (si se emplean curvas p - y equivale a seguir contando la profundidad desde la superficie del terreno).

Por último, el modelo de la figura muestra la posibilidad de introducir acciones y coacciones en la cabeza de los pilotes. Estas medidas complementarias resultan tan eficaces en el comportamiento de las pantallas de estabilización que se estima conveniente dedicarles un epígrafe independiente.

6.4 Mejora conseguida arriostrando la pantalla en cabeza

Como se ha señalado, la introducción de elementos que fijen o coaccionen la pantalla suelen suponer una gran mejora en su comportamiento, dado que permiten reducir sus esfuerzos. Las dos formas más habituales de conseguirlo son la introducción de anclajes en coronación y la ejecución de los pilotes en 2 ó 3 filas, atándolos en cabeza mediante una viga-encepado para formar, ya no una simple pantalla, sino un pórtico.

Con la ejecución de anclajes al terreno la pantalla pasa de trabajar en voladizo a estar apoyada en cabeza, lo que disminuye sustancialmente sus desplazamientos horizontales y sus momentos. El cortante se reduce aproximadamente en la magnitud de la fuerza de los anclajes.

Los anclajes se introducen de forma muy sencilla en los programas de cálculo habituales (de pantallas o pórticos apoyados en muelles elasto-plásticos, o de elementos finitos).

Con la segunda opción, la de ejecutar los pilotes en varias filas, habitualmente al tresbolillo, la pantalla se convierte en un pórtico cuyos pilares son los pilotes, y cuyo dintel es la viga-encepado de unión entre ellos. Aunque se trate de un pórtico más o menos flexible, la viga proporciona una coacción al giro en la cabeza de los pilotes, así como una reducción del movimiento horizontal. En consecuencia, los momentos máximos a lo largo de los pilotes se reducen, pudiendo aparecer no obstante momentos considerables de signo contrario en los primeros metros de pilote, junto a la viga.

Para el cálculo de los esfuerzos sobre los pilotes, una primera aproximación muy simplista es despreciar la mejora que se produce por el “efecto pórtico”, pues de esta forma el cálculo es conservador, y pueden seguir empleándose métodos de cálculo para pantallas convencionales sometidas a cargas laterales. En este caso se debe ser conservador en la tramificación del armado de la pantalla, siendo preferible que se adopte una única sección de armado o, a lo sumo, que se reduzca la armadura en longitudes muy pequeñas en los extremos de los pilotes.

Es favorable el hecho de que la armadura en los pilotes es siempre simétrica, a diferencia de lo que ocurre en una pantalla continua de sección rectangular, por lo que el signo de los esfuerzos es irrelevante, y no habría problema en que aparecieran momentos de signo contrario junto a la viga riostra.

Algunos programas de cálculo de pantallas permiten no obstante tener en cuenta el efecto de la viga, mediante la introducción de conexiones elásticas, lo que puede ser en general una aproximación suficientemente buena teniendo en cuenta que los esfuerzos axiales son poco importantes. Así, la viga puede implementarse con una rigidez al giro en cabeza ($\text{Momento} = K \times \text{giro}$), siendo $k = EI/L$ (EI la rigidez a flexión de la viga y L su luz, o lo que es igual, la separación entre pilotes).

Para ilustrar mejor lo expuesto, a continuación se muestran los resultados de algunos cálculos correspondientes a un caso real (Autopista AP-7, Viladesens, Gerona). La pantalla estaba formada por 2 filas de pilotes de 1800 mm de diámetro y 21 m de longitud. La distribución en planta de los pilotes se recoge en la Figura 3.

Este pórtico o pantalla de pilotes se empleó para estabilizar una rotura eminentemente traslacional a 13 m de profundidad. En la Figura 10, Figura 11 y Figura 12 se muestran los desplazamientos, momentos y cortantes calculados para los siguientes escenarios:

1. Cálculo sin anclajes: Los pilotes se suponen situados en una única fila. La pantalla en voladizo.
2. Cálculo con anclajes: Los pilotes se suponen situados en una única fila. Se reduce la deformación en cabeza mediante la introducción de anclajes al terreno que aportan 200 kN/ml en horizontal.

3. Cálculo con viga: Se introduce la viga a efectos de cálculo como la coacción al giro antes descrita.
4. Cálculo con anclajes y con viga.

Los cálculos se llevaron a cabo con el programa RIDO_v4, de amplia difusión en España, basado en el modelo de Winkler, con muelles elasto-plásticos

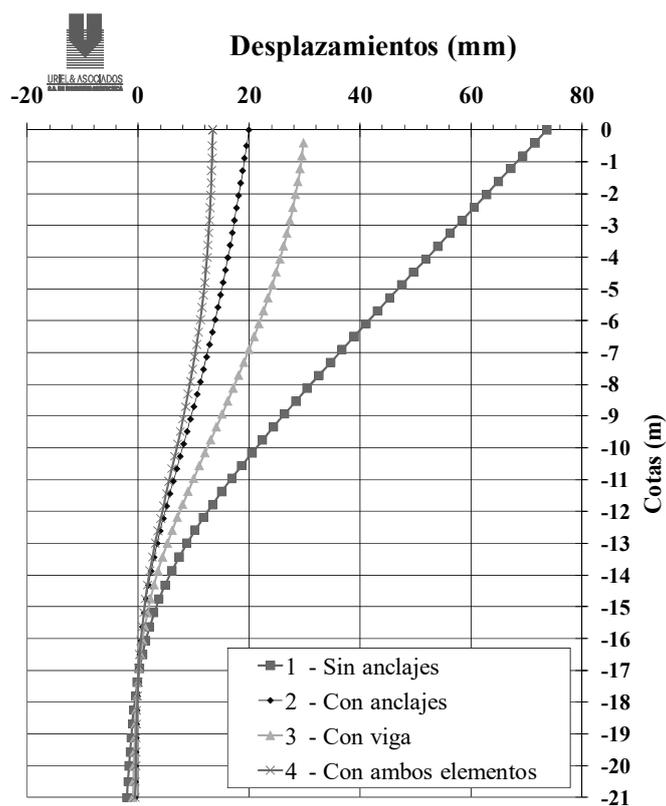


Figura 10: Comparación de desplazamientos para distintos arriostramientos de la pantalla

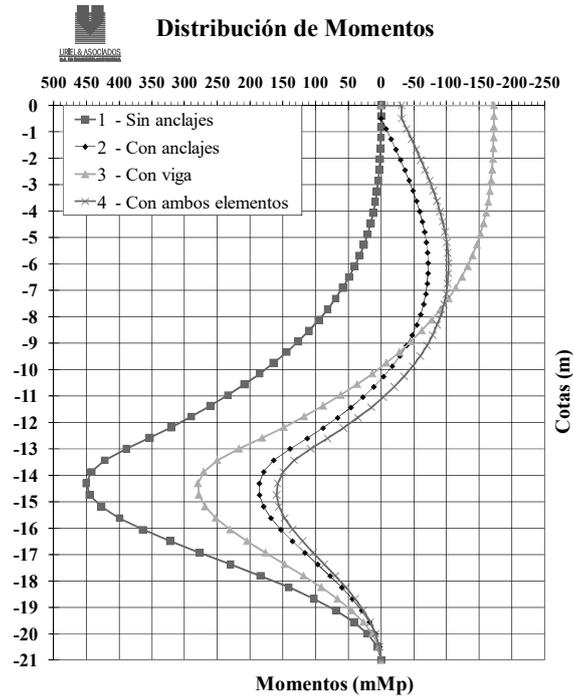


Figura 11: Comparación de momentos para distintos arriostramientos de la pantalla

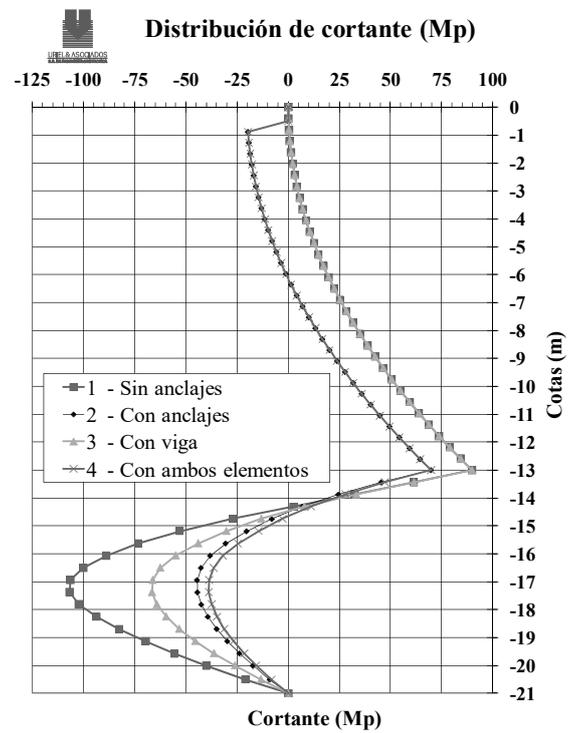


Figura 12: Comparación de cortantes para distintos arriostramientos de la pantalla

Se observa que:

- Los desplazamientos de la pantalla se reducen a menos de la mitad con cualquiera de los sistemas de arriostramiento. Los anclajes son más efectivos, dependiendo la mejora conseguida de su carga de trabajo.
- Los momentos máximos se reducen sustancialmente (del 40 al 70 % en el caso estudiado). De nuevo, la ejecución de anclajes supone una mejora mayor, si bien el resultado final dependerá de la carga de anclaje y de la rigidez de la viga-encepado.
- Los cortantes se reducen considerablemente en la zona de empotramiento de la pantalla, bajo la superficie de rotura, dado que la pantalla necesita movilizar menos empuje pasivo en el terreno.

En definitiva, con independencia de la fiabilidad de algunos aspectos de la metodología de cálculo o del programa empleado, parece claro que arriostrar en cabeza la pantalla mejora muy sustancialmente su comportamiento. De hecho, la experiencia adquirida sugiere que, salvo en el caso de superficies de rotura poco profundas, en general suele ser técnica y económicamente favorable arriostrar la pantalla de una u otra forma.

6.5 Armado de los pilotes

Llegados a este punto, a partir del método de cálculo empleado y de las leyes de esfuerzos obtenidas se puede dimensionar la armadura necesaria. A este respecto conviene tener en cuenta algunas consideraciones con respecto al factor de seguridad a emplear en el diseño y a la tramificación del armado del pilote.

6.5.1 Factor de seguridad

Habitualmente, según las distintas normas de cálculo de hormigón armado, el cálculo de las armaduras se lleva a cabo a partir de esfuerzos obtenidos por mayoración de cargas, aplicando también coeficientes de minoración de las resistencias de los materiales (hormigón y acero).

Sin embargo, en la práctica geotécnica no se suelen mayorar las cargas, sino los esfuerzos obtenidos. Así por ejemplo, es habitual calcular pantallas a partir de los empujes del terreno, considerados sin mayorar (o sin minorar, si resultan favorables como el pasivo), y aplicar después un coeficiente de seguridad a los momentos y cortantes obtenidos, para compararlos con los momentos y cortantes que las secciones de pantalla resisten.

En el caso de las pantallas de pilotes para la estabilización de laderas, los esfuerzos se obtienen a partir de una fuerza de estabilización previamente calculada para alcanzar un

determinado coeficiente de seguridad al deslizamiento ($F_{\text{estabilidad}}$). Es decir, se parte de un cálculo en el que ya se ha adoptado un cierto factor de seguridad.

Como ya se ha visto, este coeficiente $F_{\text{estabilidad}}$ es proporcional a la fuerza de estabilización (al menos para los casos objeto de este artículo, de deslizamientos fundamentalmente traslacionales) y, como consecuencia, equivale en realidad a un coeficiente de mayoración de acciones.

Habida cuenta del razonamiento anterior, para el armado de la pantalla se suele admitir el empleo de un factor de mayoración de esfuerzos reducido (F^*_F), dado por la siguiente expresión:

$$F^*_F = F_F / F_{\text{estabilidad}}$$

donde (F_F) sería el coeficiente de mayoración de la Instrucción o Norma de hormigón correspondiente.

6.5.2 Tramificación de la armadura

El enfoque más conservador consistiría en disponer a lo largo de toda la longitud del pilote una única sección de armadura, capaz de resistir los esfuerzos (cortante y momento flector) de la sección más desfavorable. Este planteamiento podría conducir a un sobre coste importante habida cuenta de las cuantiosas armaduras que suelen ser necesarias.

Por el lado contrario tampoco parece lo más conveniente ajustar las armaduras exactamente a las leyes de esfuerzos obtenidos, pues son abundantes las incertidumbres asociadas a cualquier método de cálculo. Lógicamente, las incertidumbres serán mayores cuanto más simplista haya sido el método seguido para obtener los esfuerzos o la misma fuerza de estabilización. Si se emplean métodos basados en muelles, los esfuerzos cortantes parecen tener más fiabilidad que los momentos, con lo que habría de ser más conservador con los segundos.

Una propuesta razonable es la de emplear dos secciones tipo de armado: una para los esfuerzos máximos, y otra más liviana aplicable en las zonas con menores esfuerzos (en general situadas en los extremos de los pilotes). Orientativamente, la armadura a cortante más liviana podría disponerse en el extremo superior, hasta la mitad de la masa deslizada, y en el extremo inferior en una cuarta parte de la longitud de empotramiento. Para los momentos se podría adoptar la misma tramificación, o bien extenderla al tramo central de pilote.

Si se emplean elementos finitos o diferencias finitas, los esfuerzos resultantes suelen ser bastante menores que los que proporcionan los métodos de muelles.

7. CASOS PRÁCTICOS

Tras la descripción de algunos principios básicos para el diseño de las pantallas de pasadores, se muestran a continuación un par de casos prácticos, seleccionados para ilustrar buena parte de los aspectos tratados. La Figura 13 muestra el emplazamiento de estos y otros ejemplos similares, bastantes de cuyos datos principales se recogen en la Tabla 2

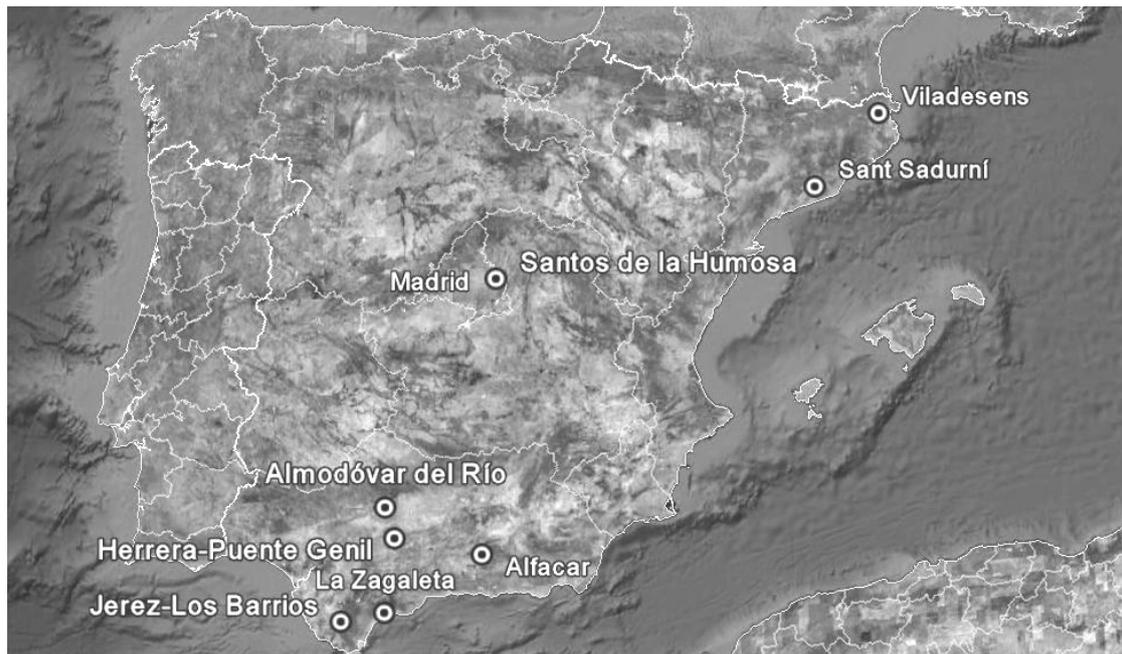


Figura 13: Situación de pantallas de pilotes

7.1 Terraplén de Santos de la Humosa

7.1.1 Descripción

El deslizamiento de Santos de la Humosa tuvo lugar en la carretera de acceso a dicha localidad, en un tramo que discurre en terraplén a media ladera sobre unos depósitos coluviales y un substrato de arcillas miocenas sobreconsolidadas.

Los primeros signos de inestabilidad se manifestaron en forma de una marcada grieta longitudinal, de unos 100 m de longitud, en el carril exterior del terraplén (Figura 14). La grieta se curvaba hacia el arcén en los extremos del terraplén, marcando de forma clara los límites de la inestabilidad.

Caso	Viladesens	Sant Sadurní	Jeréz – Los Barrios	Almodovar del Río	Herrera-Puente Genil	Santos de la Humosa
Tipo de ladera	Terraplén	Terraplén	Terraplén	Terraplén	Desmonte	Terraplén
Tipo de infraestructura	Autopista	Autopista	Autovía	Ferrocarril alta velocidad	Ferrocarril alta velocidad	Carretera local
Profundidad de la superficie de deslizamiento (m)	13	14	6	5=> Tr. natural 10=>Terraplén	17	6
Profundidad nivel freático (m)	7	10	0-4	0=> Tr Natural 1=>Terraplén	-4 a 0 (Filtración)	-
Volumen estabilizado (m ³)	161.175	349.500	25.987	70.192	306.714	15.000
Ángulo rozamiento residual (°)	9,5	14,5	18,0	16,0	10,0	21,5
Ángulo superficie deslizamiento (°)	10,0	12,5	28,0	4,4	10,6	Muy variable
Desarrollo de la pantalla (m)	200	120	105	167	194	110
Volumen estabilizado (m ³ /ml)	806	2912	248	420	1581	150
Factor de seguridad sin medidas de drenaje	1,15	1,15	1,17	-	1,26	1.35
Factor de seguridad con medidas de drenaje	-	1,25	1,34	1,502	-	-
Fuerza de estabilización (kN/m)	900	1500	500	900	1600	300
Diámetro de los pilotes (m)	1,80	1,25	1,00	1,80	1,50	0,85
Longitud de los pilotes (m)	21	21	14	18	27	11
Nº de filas	2	2	2	3	2	1
Pilotes/ml	0,44	0,63	0,71	1,00	0,52	0,87
Momento sin mayorar (kN.m/m)	1860	2590	583	3670	2060	760
Carga de tesado de anclaje (kN/m)	200	456	277	-	490	-

Tabla 2: Datos de algunas pantallas diseñadas por los autores

La investigación geotécnica realizada, que incluyó la instalación de dos de inclinómetros, permitió interpretar el perfil geotécnico mostrado en la figura. La superficie de rotura se localizó con precisión hacia la base del coluvial, formado por arcillas con algunas gravas,

cerca de su contacto con el substrato mioceno de la zona.

Su salida, al pie del terraplén, resultó algo difusa, estimándose que se situaría en la franja delimitada entre las dos líneas mostradas en la figura.

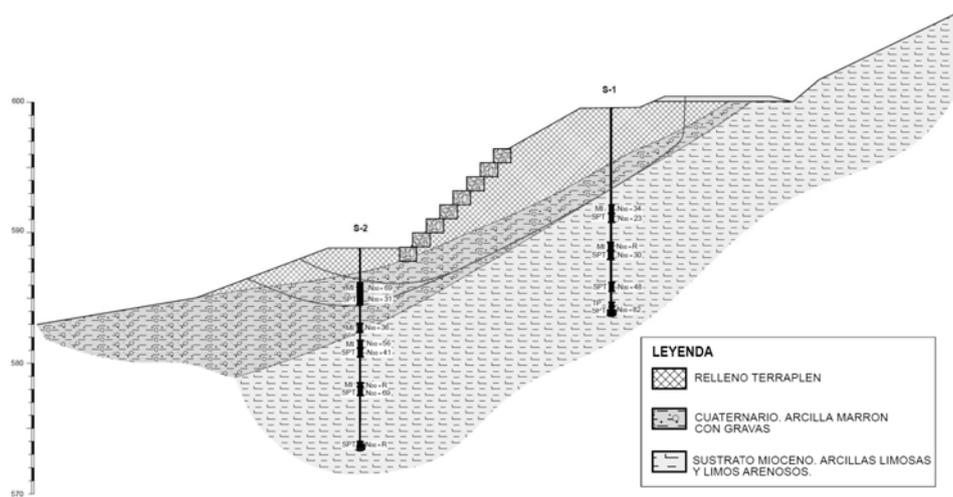


Figura 14: Perfil geológico geotécnico Santos de la Humosa

7.1.2 Planteamiento de soluciones y cálculos

El análisis realizado contempló un buen número de alternativas de actuación, llegando a incluir modificaciones del trazado. Finalmente se optó por el diseño y construcción de una pantalla de pasadores, cuyo principal interés a los efectos ilustrativos de este artículo radica en su emplazamiento con relación a la ladera.

En este sentido ya se ha indicado anteriormente que, en el caso de terraplenes sobre laderas, siempre que sea posible el acceso y la preparación de una plataforma de trabajo, lo más favorable suele ser situar la pantalla al pie de aquél.

Aunque en el caso descrito se daban estas circunstancias, la particular geometría de la ladera, del terraplén y de la superficie de deslizamiento, sugerían, como puede intuirse fácilmente observando la figura, que colocando la pantalla al pie del relleno aún podrían producirse roturas por encima de la misma (la pendiente de la superficie de rotura era importante, y la salida de la misma hacia el exterior, bastante brusca).

Por el contrario, si se colocaba en la parte superior, al borde de la calzada, cabía la posibilidad de que la propia pantalla sirviera de límite superior del movimiento, y el deslizamiento prosiguiera por debajo.

Ante esta dudosa situación se llevó a cabo un extenso análisis de estabilidad, empleando tanto métodos de equilibrio límite como de elementos finitos. En los párrafos siguientes se describen algunos de los resultados más significativos de la solución finalmente seleccionada.

La Tabla 3 recoge las propiedades empleadas en los cálculos de elementos finitos. La resistencia al corte del coluvial se estimó a partir de cálculos retrospectivos, seleccionando por otros procedimientos (ensayos) los parámetros del resto de materiales.

Material	Densidad	E (MPa)	ν	c' (kPa)	ϕ (°)	ψ (°)
Sustrato	19 kN/m ³	100	0,30	200	30,0	0
Coluvial	19 kN/m ³	20	0,30	5	21,5	0
Terraplén	19 kN/m ³	25	0,30	20	30,0	0
Gaviones	19 kN/m ³	45	0,30	50	50,0	0

Tabla 3: Propiedades de los materiales en Santos de la Humosa

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la malla empleada y las deformaciones principales obtenidas en la fase de análisis retrospectivo, aumentadas 20 veces. Se muestra también una pantalla situada a borde de calzada, pero en esta fase de cálculo no se encontraba “activada” y por lo tanto aún no existía.

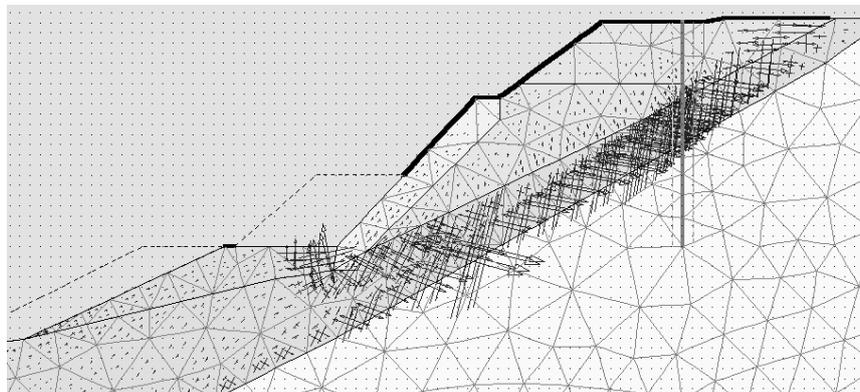


Figura 15: Cálculo retrospectivo en Santos de la Humosa. Deformaciones totales (x20)

Con la ejecución de la pantalla, como era de esperar, la superficie de deslizamiento más desfavorable pasaba a desarrollarse ladera abajo (Figura 16), lo que hacía albergar algunas dudas sobre las condiciones de estabilidad de la propia pantalla a largo plazo, siempre dependiente del confinamiento que le pudiera aportar el terreno situado en su intradós. De hecho, el factor de seguridad que se obtenía para la nueva superficie de deslizamiento, por

debajo de la pantalla, era próximo a la unidad (y de tan sólo 1,12 en los cálculos de equilibrio límite).

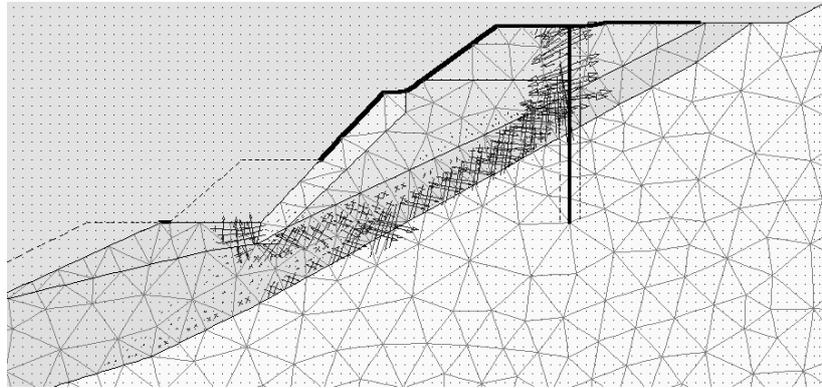


Figura 16: Santos de la Humosa. Cálculo de estabilidad con pantalla superior. Deformaciones totales (x50).

A la vista de estos resultados se consideró conveniente diseñar medidas complementarias de estabilización. Así, se analizó la posibilidad de aprovechar la pantalla para excavar una berma en el intradós de la pantalla, reduciendo de esta forma el peso desestabilizador de tierras en coronación. De forma complementaria, para conseguir una mejora adicional en la seguridad, se planteó la posibilidad de que las tierras retiradas pudieran colocarse en caso necesario al pie del terraplén.

En la Figura 17 se muestra el campo de deformaciones totales de esta alternativa, con la que se conseguía aumentar el factor de seguridad global a 1,17 en los cálculos de elementos finitos y a 1,35 en los de equilibrio límite.

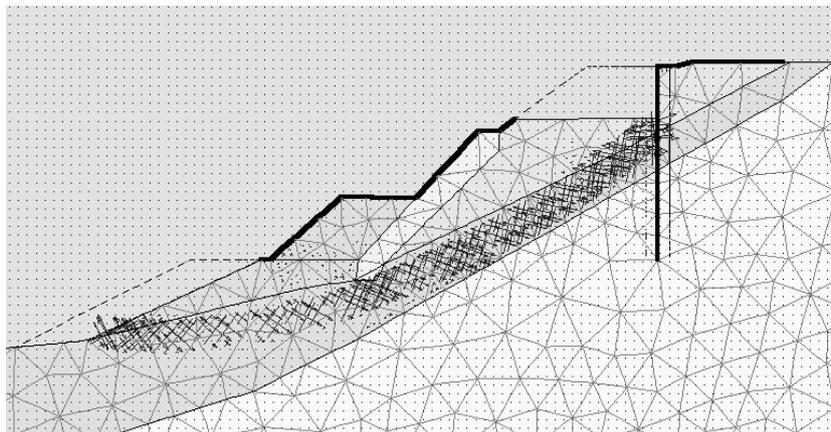


Figura 17: Cálculo final. Excavación de berma, pantalla en voladizo y relleno al pie. Deformaciones totales (x20)

7.1.3 Obras de estabilización finalmente ejecutadas. Conclusiones

Finalmente se decidió ejecutar exclusivamente la pantalla, y se dejaron pendientes para una eventual segunda fase las actuaciones complementarias citadas. La decisión final sobre su necesidad última dependería de los resultados de auscultación (inclinometría) instalada. Los autores no tienen constancia de que se hayan acometido más medidas.

Las características principales de la pantalla construida fueron las siguientes:

- Pilotes de 850 mm de diámetro y 11 m de longitud, separados 1,150 m entre ejes y encepados en cabeza con una viga de atado cuadrada de 1 m de lado.
- Armadura longitudinal de 22 ϕ 25mm y cercos ϕ 12 cada 12 cm. Hormigón de 25 MPa de resistencia característica y acero de 500 MPa de límite elástico.

Cabe indicar por último que el diseño estructural de la pantalla se realizó empleando el modelo de Winkler descrito en apartados anteriores.

7.2 Terraplén de la autopista AP-7, en Viladesens

7.2.1 Descripción

La autopista de peaje AP-7 discurre en paralelo a todo el litoral mediterráneo español, llegando a conectar en su extremo norte la Península Ibérica con Francia. El caso que se describe a continuación corresponde a un terraplén de dicha autopista, situado a pocos kilómetros de la frontera francesa, cuya rotura a lo largo de unos 200 m se produjo en la primavera de 2004.

Construido sobre una suave ladera a cuyo pie discurre un pequeño arroyo, el terraplén permaneció 30 años en servicio sin manifestar problemas de relevancia, si bien en los últimos años se habían venido detectando ligeros asentamientos que eran reparados de forma más o menos sistemática mediante las pertinentes campañas de reafirmado.

El deslizamiento se produjo tras un largo periodo de intensas y persistentes lluvias. Primero se observaron algunas fisuras, que rápidamente evolucionaron a grietas y a escalones, que obligaron a un primer desvío del tráfico. En algo menos de una semana se desencadenó la rotura completa.

En la Fotografía 1 se muestra el estado del terraplén el 24 Mayo de 2004. La Fotografía 2 muestra el terraplén deslizado 7 días después.



Fotografía 1: Grietas y escalones previos a la rotura completa



Fotografía 2: Panorámica parcial del deslizamiento y esquema de forma de rotura (el pie queda a la derecha, fuera de la fotografía).

La ladera natural, de tan sólo unos 8° de inclinación media con la horizontal, estaba formada por unas arcillas terciarias sobreconsolidadas, de muy alta plasticidad. Su porcentaje de finos rondaba el 100 %, con un 25% de arcilla. El límite líquido resultó variable, abundando valores entre el 70 y el 100 %.

En los testigos de los sondeos se observaron superficies pulidas y estriadas, indicativas de la existencia de movimientos anteriores (Fotografía 3).



Fotografía 3: Superficie pulida en testigo de sondeo.

Habida cuenta de las anteriores observaciones se llevaron a cabo ensayos específicos encaminados a analizar la fragilidad en resistencia de las arcillas del substrato. A tal efecto se realizaron ensayos de corte directo sobre el material intacto, ensayos de corte anular sobre suelo remoldeado y ensayos de corte directo multietapa sobre junta.

Los resultados obtenidos confirmaron el acentuado comportamiento frágil del terreno sobre el que apoyaba el terraplén, cuya resistencia podía degradarse desde ángulos de rozamiento del orden de 20-22° en estado intacto hasta tan sólo unos 9 ó 10°.

En la figura 2, al inicio de este texto, se recoge precisamente uno de los ensayos de corte realizados sobre muestra intacta en estos materiales. En la Figura 18 se muestran, por su parte, los ángulos de rozamiento movilizados para diversos tipos de ensayos realizados y distintas presiones normales.

En cuanto a las condiciones hidrogeológicas reinantes, a partir de los sondeos se definió una línea de saturación sobre el contacto entre el terraplén y la ladera natural, que venía a ajustarse a un factor de presión intersticial $r_u=0,2$ aproximadamente.

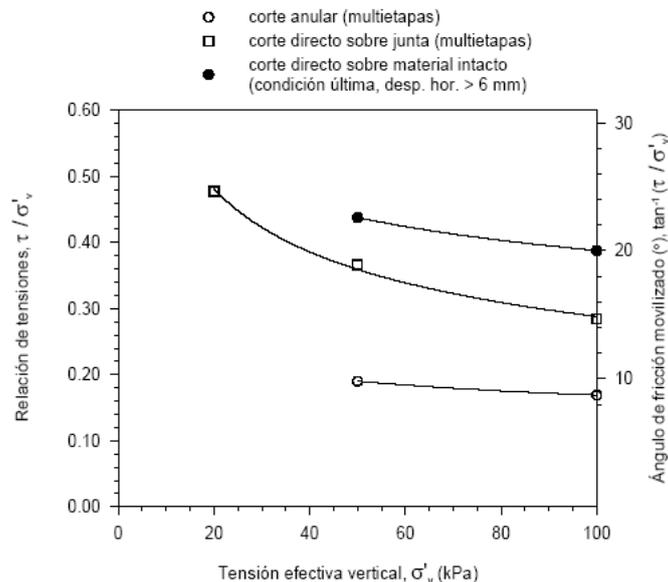


Figura 18: Ángulo de rozamiento movilizado para diversas presiones normales y diferentes ensayos

Afortunadamente las investigaciones pudieron acometerse con celeridad tras detectarse las primeras grietas en el pavimento, lo que permitió entre otras cosas la instalación de inclinómetros que pudieron leerse al menos un par de veces en el corto intervalo de tiempo transcurrido hasta la rotura completa.

En conjunto, la información obtenida permitió delimitar con bastante precisión la situación de la superficie de rotura, que se alineaba paralelamente a la suave ladera original con un mecanismo marcadamente traslacional, y penetraba ligeramente en el substrato de arcillas plásticas, concentrándose en una estrecha franja cercana al contacto con la base del terraplén.

Sólo en zona del pie, junto al arroyo, su posición se hacía algo más incierta por la ausencia de una salida neta de la masa deslizada.

Empleando diferentes combinaciones de resistencia al corte para el terraplén y el substrato sano, basadas todas ellas en la generosa batería de ensayos disponibles, se llevaron a cabo cálculos retrospectivos para determinar la resistencia operativa en la franja de rotura en el momento del deslizamiento (Figura 19).

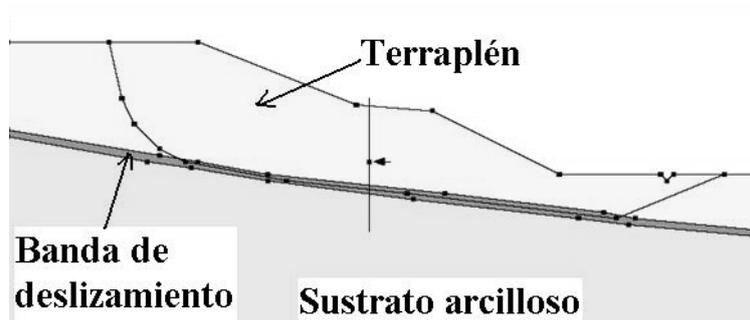


Figura 19: Cálculo de estabilidad. Autopista AP-7 en Viladesens.

De forma sistemática los ángulos de rozamiento obtenidos se situaron en el entorno de los residuales de laboratorio, mostrando que la rotura había sido debida a la degradación progresiva de la resistencia del terreno.

No obstante, en uno de los escenarios más pesimistas en cuanto a la resistencia del terraplén y del sustrato intacto, no llegaba a ser necesario degradar completamente la resistencia de la banda de rotura para explicar el deslizamiento. Esta situación, aunque improbable por el conservadurismo de las hipótesis de resistencia asignada al resto de terrenos, planteaba la posibilidad de que la resistencia al corte de la arcilla pudiera seguir degradándose tras la colocación de las medidas de estabilización si proseguían las deformaciones.

7.2.2 Planteamiento de soluciones y cálculos

Tras el análisis de alternativas pertinente, se adoptó como solución la ejecución de una pantalla de pilotes situada en una berma intermedia del terraplén (la línea vertical de la figura anterior). La pantalla se complementaría con un sistema de drenaje mediante pozos.

La pantalla se diseñó empleando el modelo de Winkler adoptando empujes triangulares. El factor de seguridad a alcanzar se fijó en 1,15, sin incluir en él las eventuales mejoras debidas a los pozos de drenaje.

Se realizaron cálculos por elementos finitos en los que se iba degradando progresivamente la resistencia en la banda de rotura prefijada. En algunos casos se introducía la pantalla en un punto intermedio del proceso de degradación, que podía corresponder al momento del deslizamiento, y se seguía simulando la reducción de la resistencia en la franja de rotura, lo que permitía analizar el proceso de puesta en carga que podría sufrir la pantalla cuando se reconstruyese el terraplén. En la Figura 7 y en la Figura 8 anteriores se recogen ejemplos de estos cálculos.

La pantalla finalmente proyectada y construida presentaba las siguientes características (véase de nuevo la Figura 3):

- Los pilotes se diseñaron con 1800 mm de diámetro y se dispusieron al tresbolillo en dos filas paralelas, situadas a 2,60 m de distancia entre ejes de pilotes. A lo largo de cada fila, la distancia entre ejes fue de 4,50 m.
- Se perforaron con 21 m de longitud, de manera que se hicieron penetrar entre 8 y 10 m bajo la superficie de deslizamiento.
- Se armaron longitudinalmente con 42 barras de acero de 32 mm diámetro, y se dispusieron cercos de cortante de 16 mm cada 12 cm. El hormigón fue de 25 MPa de resistencia característica y el acero de 500 MPa de límite elástico.
- Se recogieron en cabeza con una viga-encepado de hormigón armado de 1,50 m de canto.

En realidad, aunque la pantalla se calculó para trabajar en voladizo en uno de los escenarios más desfavorables, se dejó abierta la posibilidad de instalar anclajes en coronación para el caso de que se verificase el escenario pésimo antes mencionado, que supondría que en el momento de la rotura aún no se había alcanzado la resistencia residual en toda la superficie de deslizamiento.

Se realizaron los cálculos para este escenario, se comprobaron los esfuerzos en los diversos elementos estructurales y se diseñaron los anclajes necesarios, si bien se optó por no instalarlos inicialmente, dejando esta decisión a la espera de comprobar el funcionamiento de la pantalla, del terraplén y de la propia la ladera a partir de la instrumentación prevista.

7.2.3 Puesta en servicio y seguimiento. Estimación de esfuerzos en la pantalla

La Figura 20 muestra una planta de la ladera y la autopista, con la situación de los pilotes, la viga de coronación y los pozos de drenaje.

Se muestran también con línea discontinua los anclajes a instalar en el caso de que los movimientos de la ladera prosiguieran.

Una vez restaurado el terraplén en su posición, la pantalla entró en carga de forma notable, registrándose deformaciones en los pilotes que durante unos meses aumentaron de forma aproximadamente lineal en el tiempo, lo que causó una lógica preocupación.

Para ilustrar lo anterior en la Figura 21 se muestran sucesivas lecturas inclinométricas del interior de uno de los pilotes. Se puede observar que en este pilote llegó a registrarse un desplazamiento de unos 8 cm en cabeza.

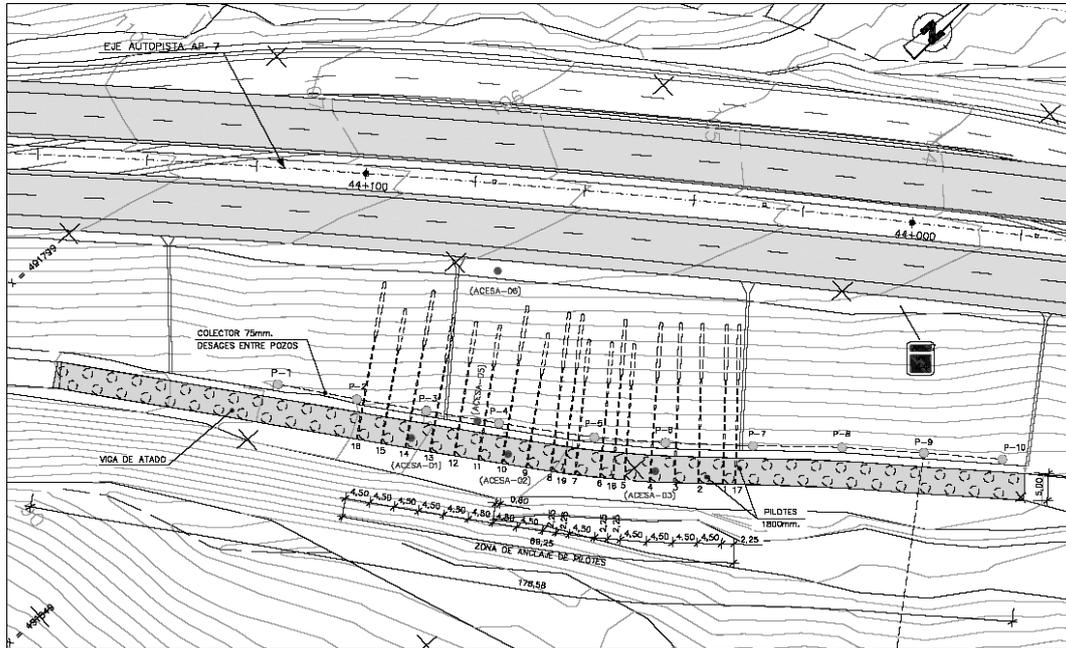


Figura 20: Autopista AP-7 en Viladesens. Pantalla de pilotes, anclajes, línea de pozos e inclinómetros

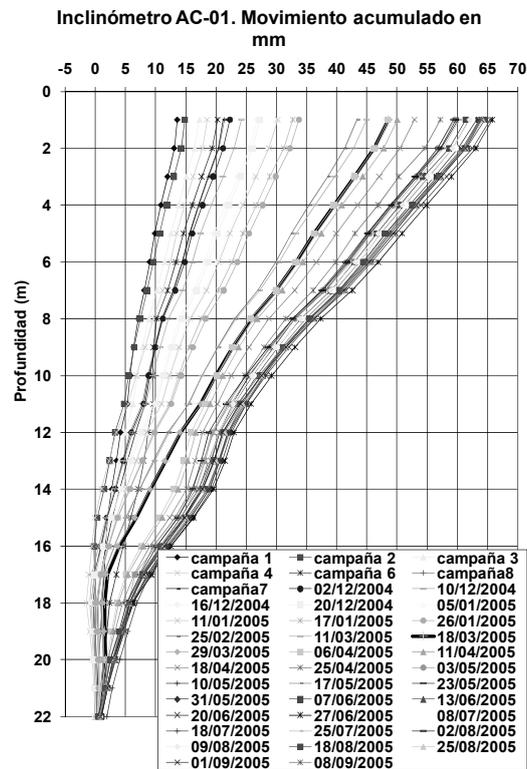


Figura 21: Evolución del movimiento horizontal en un pilote de control

Por su parte, la Figura 22 muestra el movimiento horizontal a lo largo del tiempo, en mm, en puntos concretos de varios pilotes (en cabeza y a 10 m de profundidad principalmente).

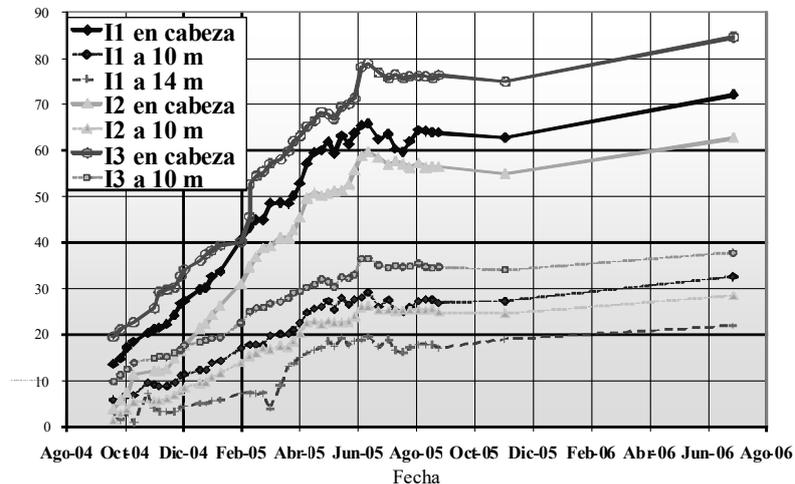


Figura 22: Movimientos horizontales medidos en pilotes de control

Como puede apreciarse, desde el otoño de 2004, cuando se comenzó a medir, hasta Junio de 2005, el movimiento resultó marcadamente lineal.

Para analizar la situación y el estado de la pantalla, a partir de los datos de los inclinómetros se estimaron los esfuerzos en los pilotes. La metodología que debe seguirse para ello se basa en la “sencilla” fórmula de resistencia de materiales:

$$y'' = \frac{M_f}{E \cdot I}$$

siendo y'' la derivada segunda de la flecha, o lo que es lo mismo, la curvatura.

La aplicación de la fórmula es, sin embargo, compleja, como lo es en general el cálculo de flechas de estructuras de hormigón, ya que:

- La inercia (I) no es constante, sino que depende de la fisuración de la sección, la cual depende a su vez de la combinación de esfuerzos de flexión y axil. La inercia depende por tanto de la evolución de las cargas en el tiempo
- El hormigón está sujeto a fenómenos reológicos de retracción, fluencia y envejecimiento, lo que hace que su módulo (E) varíe con el tiempo
- Ambos fenómenos son además simultáneos.

Para paliar estas dificultades, las aproximaciones que se aceptaron fueron, por un lado, suponer que los axiles eran nulos, y por otro, suponer constante el módulo E en cada periodo de tiempo, que tiene menos influencia que la variación de inercia.

En cuanto a la variación de inercia con el nivel de carga, o lo que es lo mismo, el nivel de deformación, deben tomarse deformadas de distintos periodos, calculando para cada uno de ellos los momentos, e iterativamente disminuyendo la inercia a cada profundidad en función del momento alcanzado. En este caso se emplearon 2 periodos.

Una tercera dificultad que se presenta al partir de los datos de inclinometría deriva de la sensibilidad de los esfuerzos a las pequeñas variaciones de curvatura que se producen entre cada tramo de lectura inclinométrica. Para evitar este problema, las deformadas deben ser ajustadas a curvas (polinómicas). Con esto se consigue además tener una expresión matemática de la deformación, que puede derivarse para obtener los momentos. La derivada analítica es sencilla si la curva es polinómica. También puede obtenerse numéricamente, a partir de la pendiente entre dos puntos, y nuevamente obteniendo la pendiente entre puntos del proceso anterior. Para lecturas cada metro, la tangente segunda en un punto (x_n, y_n) resulta ser:

$$y'' = -1/12 * y_{n-2} + 4/3 * y_{n-1} - 5/2 * y_n + 4/3 * y_{n+1} - 1/12 * y_{n+2}$$

Con todo ello, los momentos que se obtuvieron cuando el inclinómetro mostrada un desplazamiento en cabeza de 35 mm, fueron los siguientes:

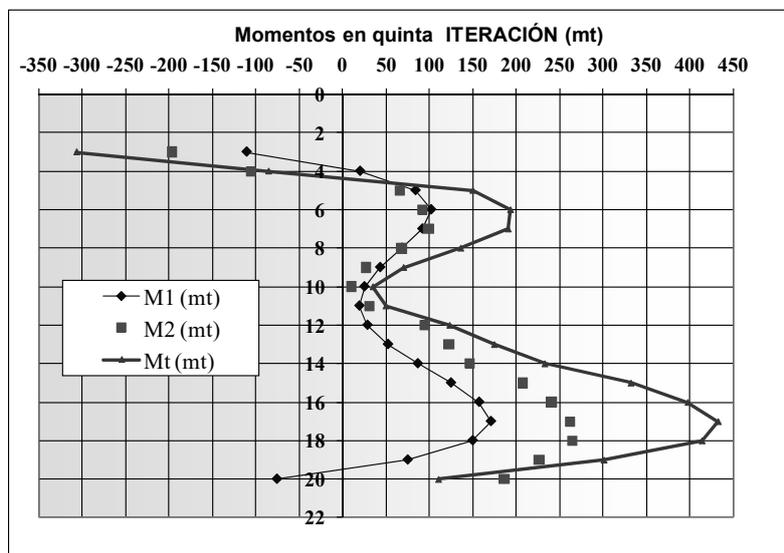


Figura 23: Momentos obtenidos a partir de las deformaciones.

Sin olvidar las limitaciones del procedimiento descrito se observa que:

- La curva se ajusta a lo esperado al tener un momento positivo en la mitad inferior (tracción aguas abajo) y negativo en la superior, como consecuencia de la coacción de la viga).
- Como aspecto inesperado, se aprecian dos zonas de momento positivo en lugar de una sola. El resultado es consistente con la doble curvatura observable en el inclinómetro. Puede deberse a la aparición de una superficie de deslizamiento secundaria a menor profundidad.
- Los momentos por coacción de la viga son de igual magnitud que los que se producen en la parte inferior, o incluso superiores, pues ha de notarse que por el método seguido sólo se han estimado momentos desde 3 m de profundidad, cuando en realidad la viga tiene 1,5 m de canto.
- El momento máximo estimado por pilote es 4500 kNm, que equivale a 2000 kNm por metro lineal de pantalla. El momento máximo de cálculo era 2800 kNm/ml, lo cual supone que el método de cálculo se mantiene del lado de la seguridad, al menos para el nivel de deformación en el que se estimaron los momentos.

El control anterior de estimación de momentos se siguió realizando a lo largo del tiempo hasta que, al constatar que los movimientos proseguían, se decidió ejecutar la segunda fase prevista, esto es, la instalación de anclajes (ver planta en Figura 20). Se colocaron finalmente anclajes de 900 kN de carga unitaria, dispuestos cada 4,5 m en la zona central de la pantalla. El movimiento se detuvo coincidiendo en el tiempo aproximadamente con el tesado de los anclajes.

8 AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento a E. Alonso, J. Olíden, J. Pozo, M. Oliveros y P. Fernández.

9 REFERENCIAS

- Alonso, E., Olíden, J. & Ortuño, L. 2004. Informe sobre el deslizamiento producido en el pk 44 de la autopista AP-7.
- Estaire, J. & Sopena, L. (2001). Dimensionamiento de pasadores estructurales para la estabilización de deslizamientos. V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Madrid.
- González, B., Tavira, A., Ortuño, L. & Oliveros, M.A., 1998. Análisis de deslizamientos planos sobre terrenos arcillosos como tipología frecuente en los temporales de los años 95 y 96 en Andalucía. I Congreso Andaluz de Carreteras. Volumen II: 1887-1891. Granada.
- Lucas, L., Serrano, L., Monge, J.C., Ortuño, L. & Murillo, T., 2009. Estabilización del desmonte 4 de la LAV Córdoba-Málaga mediante drenaje profundo y pantalla de pilotes anclada. VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Barcelona.

- Naval Facilities Engineering Command, "Design Manual 7.01", pag 341, 1986.
- Pasternak, P.L. (1954) On a new method of analysis of an elastic foundation by means of two foundations constants. Gosudarstvennoe Izdatelstro Liberaturi po Stroitelstvui Arkhitekture, Moscow.
- Poulos, H.G. (1995). Design of reinforcing piles to increase slope stability. Canadian Geotechnical Journal, , Vol 32, n°5, 808-818.
- Reese, L. C., Cox, W. R. and Koop, F. D. (1975). "Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay." Proc., 7th Offshore Technology Conf., Paper No. OTC 2321, Houston, Texas, 671-690.
- Vesic, A. S. (1961). "Beam on elastic subgrade and the Winkler hypothesis." Proc., 5th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Engrg., Paris, Vol. 1, 845-850
- Uriel, A. 1996. Pantallas, tablestacas y entibaciones. Diseño. Simposio sobre estructuras de contención de terrenos. SEMSC. Santander.