

ESTABILIZACIÓN DE TALUDES MEDIANTE PILOTES ALGUNOS EJEMPLOS

Tomás Murillo
Uriel & Asociados, S.A.
UAX
tomasmurillo@urielyasociados.es

Luis Ortuño
Uriel & Asociados, S.A.
UPM
lortuno@urielyasociados.es

INDICE

1.- Introducción

2.- Algunas características habituales

3.- Metodología básica

- Aspectos prácticos de diseño

- Desarrollo del análisis

4.- Ejemplos

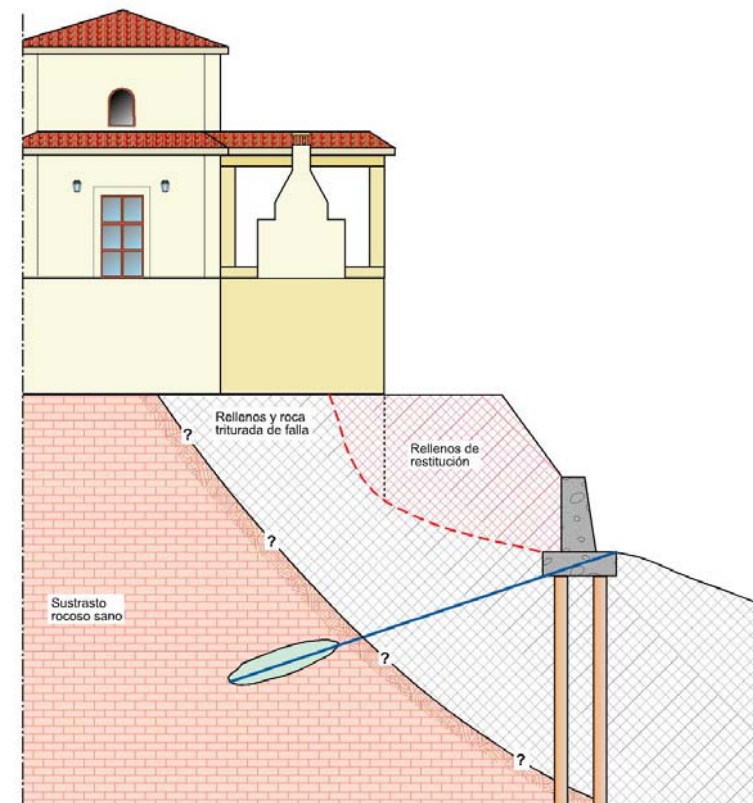
INTRODUCCIÓN

La Zagaleta. Benahavis (Málaga)

Un método tradicional para la estabilización de ciertos deslizamientos consiste en la instalación de “pasadores” que atraviesen y “cosan” la superficie de rotura.

Las posibilidades son muy variadas. Dependiendo de la envergadura del problema y de la fuerza de contención necesaria, pueden emplearse desde simples carriles de ferrocarril hasta grandes recintos de pantallas embutidos en el terreno a modo de “tajamar”.

Como solución permanente, en muchos casos se emplean pantallas de pilotes.



La Zagaleta. Málaga. Deslizamiento de un relleno ejecutado sobre una ladera recubierta por un coluvial arcilloso.

Estabilización de taludes mediante pilotes

Tomás Murillo & Luis Ortuño

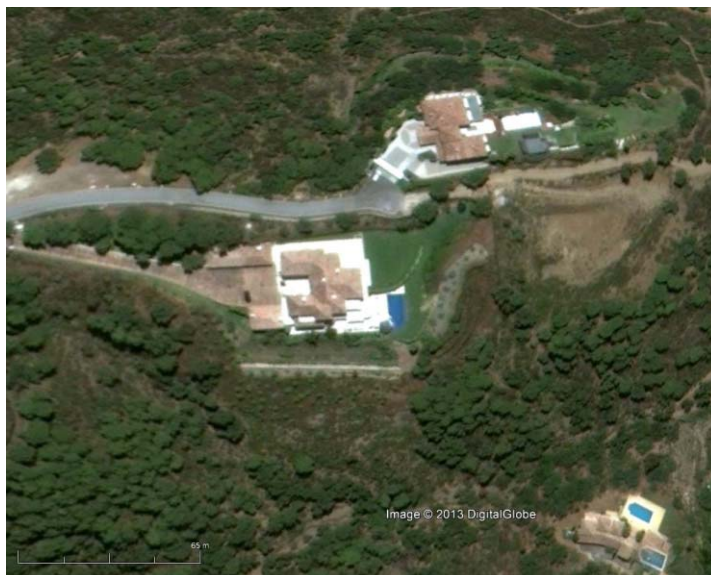
METODOLOGÍA BÁSICA

ASPECTOS PRÁCTICOS DE DISEÑO

La Zagaleta. Benahavis (Málaga)



Fotografías
2003



Fotografías 2012



INTRODUCCIÓN

Casos incluidos en esta presentación



INTRODUCCIÓN

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	-

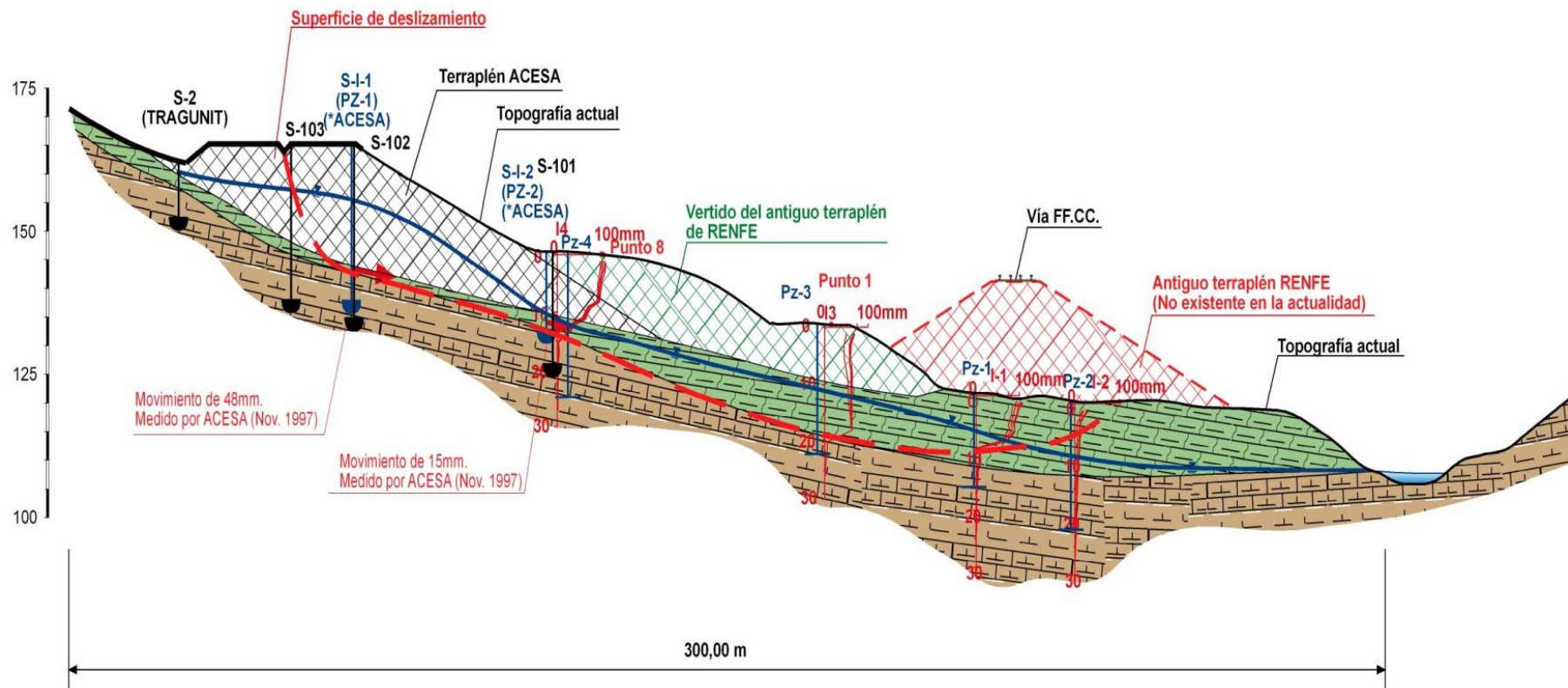
CARACTERISTICAS HABITUALES

CARACTERISTICAS HABITUALES

Sant Sadurní (Barcelona)

1.- Las pantallas de pilotes-pasadores encuentran su principal campo de aplicación en laderas, habitualmente con poca inclinación, en las que se ha producido o puede producirse un deslizamiento más o menos profundo (10 a 20 m de espesor sería usual)

2.- Aunque en la literatura quizás los casos más citados corresponden a desmontes, el uso más frecuente descrito en estas líneas suele estar asociado a deslizamientos provocados por la construcción de terraplenes

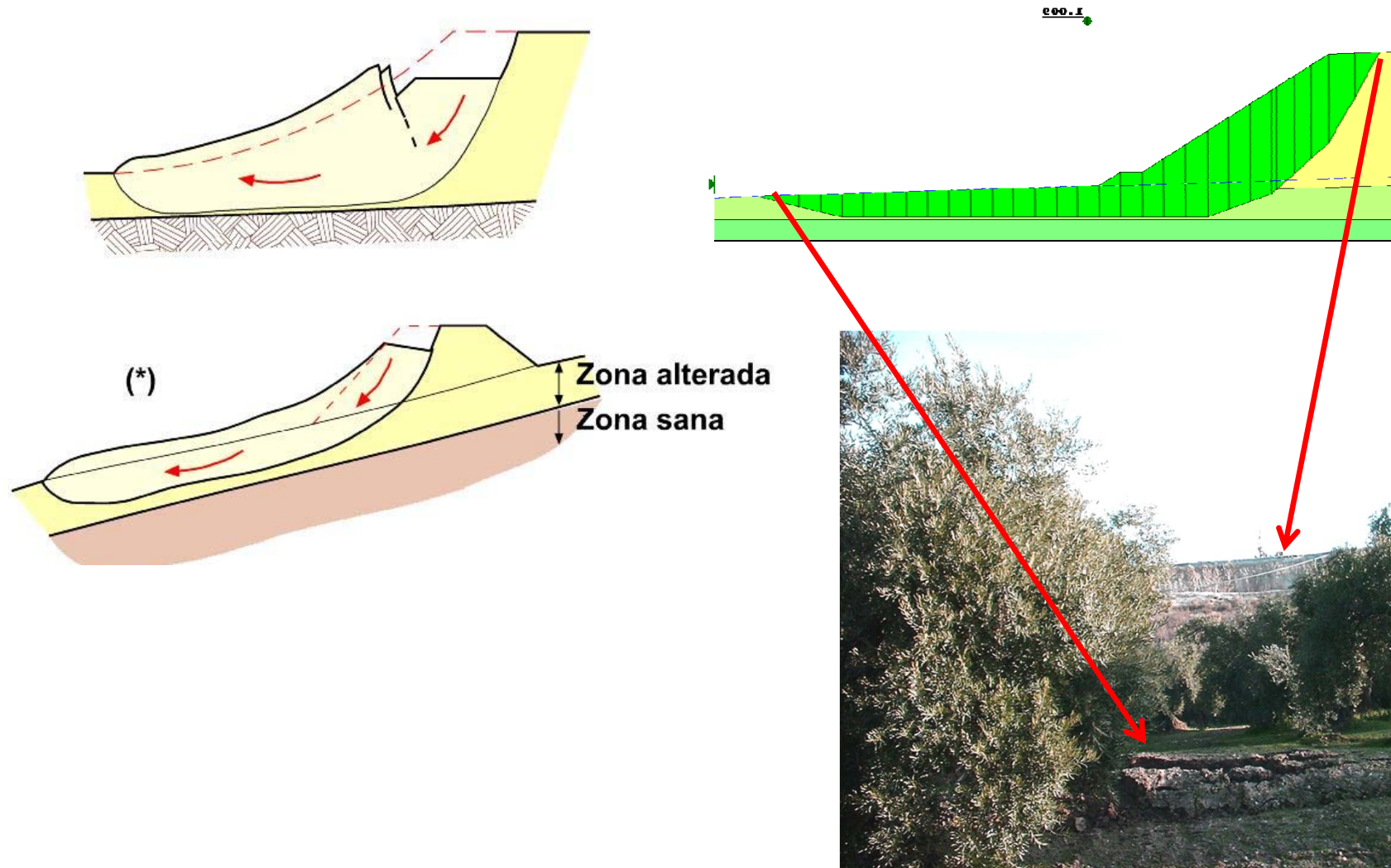


Perfil en Sant Sadurní de A'noia (la ladera tuvo 2 terraplenes)

CARACTERISTICAS HABITUALES

Alfacar (Granada)

3.-Es frecuente que los deslizamientos sean compuestos, pero marcadamente traslacionales en su desarrollo, y que se produzcan aprovechando planos de sedimentación o contactos litológicos (capa de alteración, base de coluvial, etc.)



CARACTERISTICAS HABITUALES

Zalea –Ardales (Málaga)

Monda (Málaga)

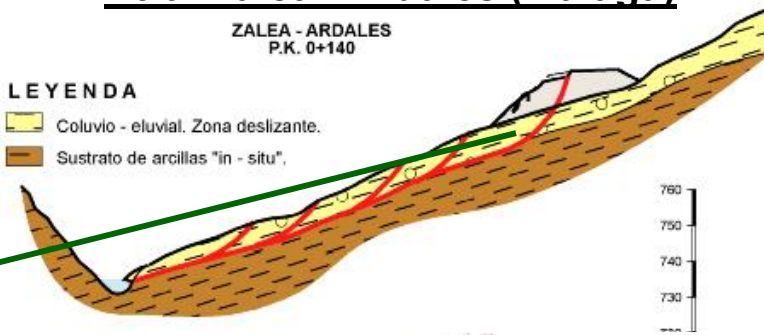
4.- Que tengan encima un terraplén

Ctra Zalea –Ardales (Málaga)

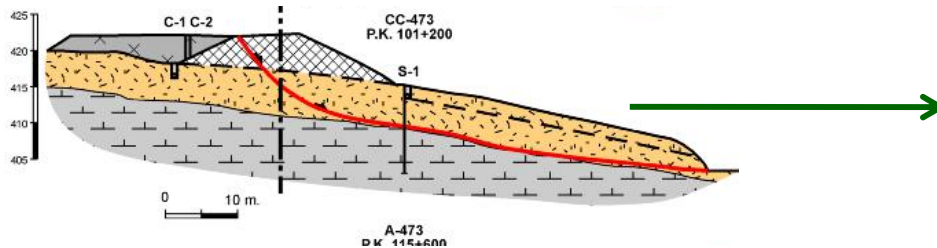
ZALEA - ARDALES
P.K. 0+140

LEYENDA

- Coluvio - eluvial. Zona deslizante.
- Sustrato de arcillas "in - situ".



Monda (Málaga)



Estabilización de taludes mediante pilotes

& Luis Ortuño

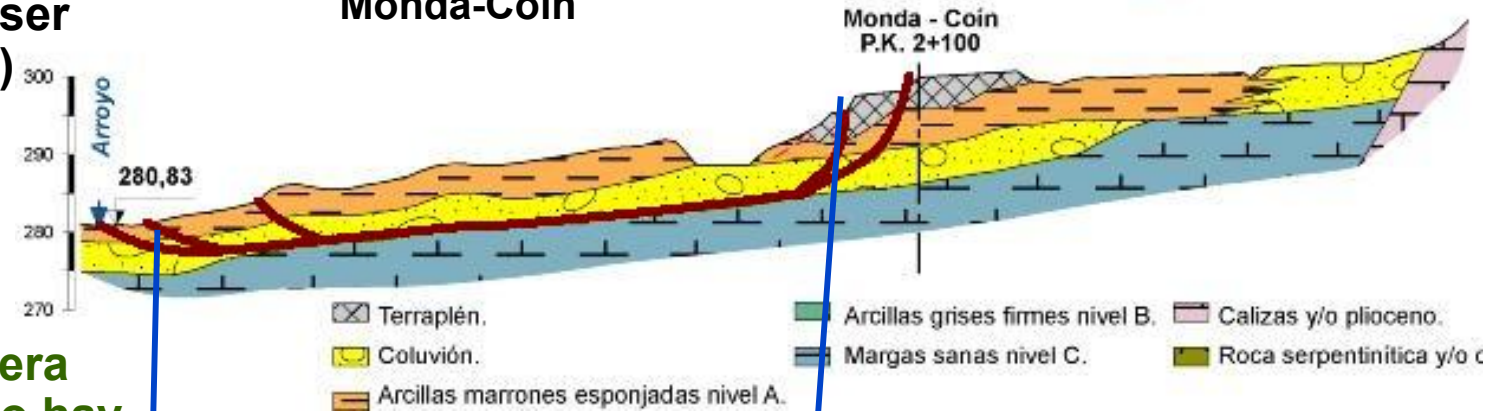
CARACTERISTICAS HABITUALES

Monda-Coín (Málaga)

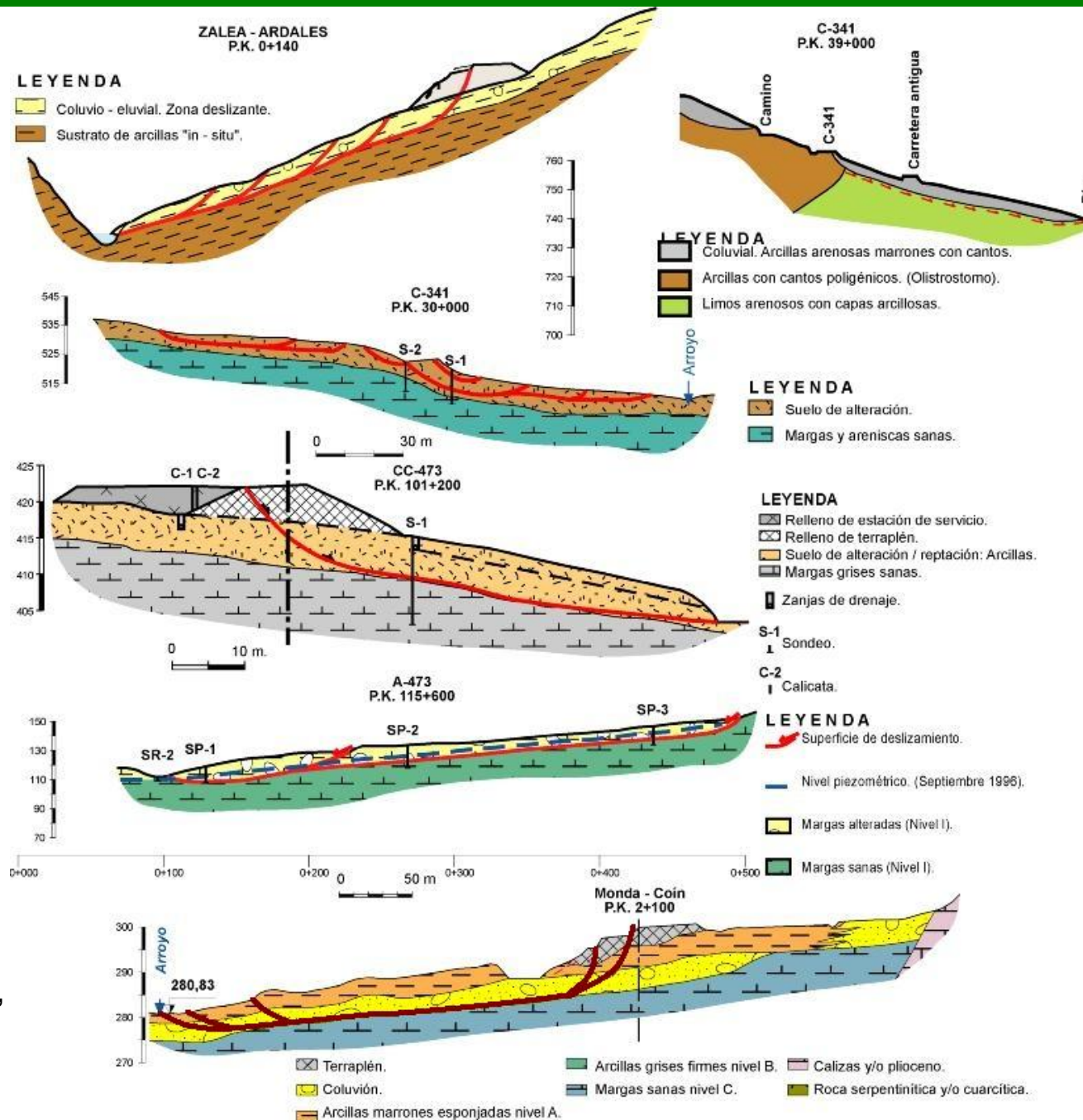
5.-Las dimensiones suelen ser considerables ($\geq 80 - 100$ m)

6.- Y a menudo afloran ladera abajo, junto a un arroyo si lo hay, aunque en ocasiones lo hagan de forma “difusa”

Monda-Coín



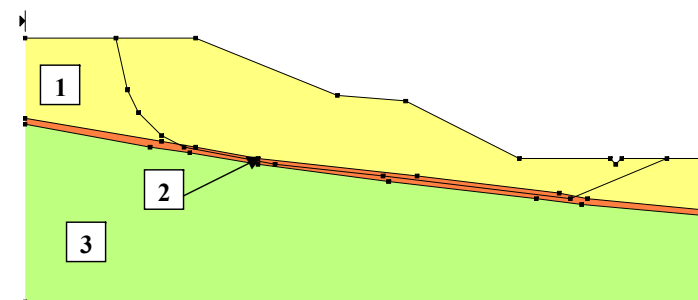
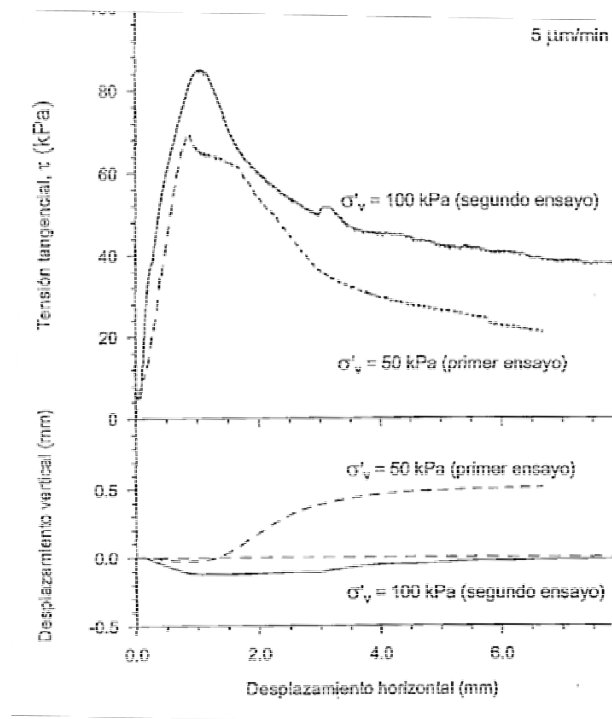
CARACTERISTICAS HABITUALES



Deslizamientos malagueños. González, B. et al (1998)

8.- Debido a la geometría resultante de la masa inestable, el volumen implicado, 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.).

9.- Es frecuente que el terreno esté formado por arcillas terciarias sobreconsolidadas de alta plasticidad, a menudo con comportamiento frágil, en las que la degradación de la resistencia al corte juega un papel muy relevante

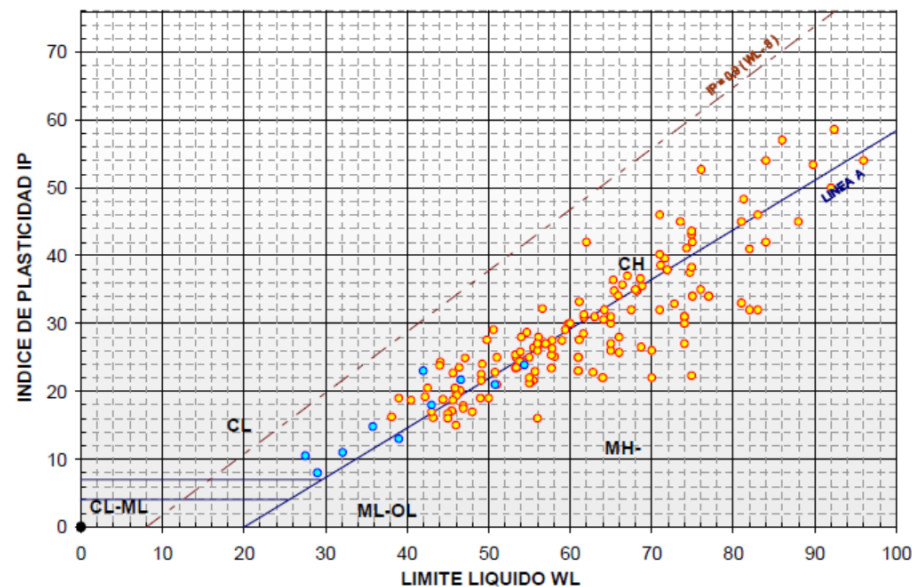
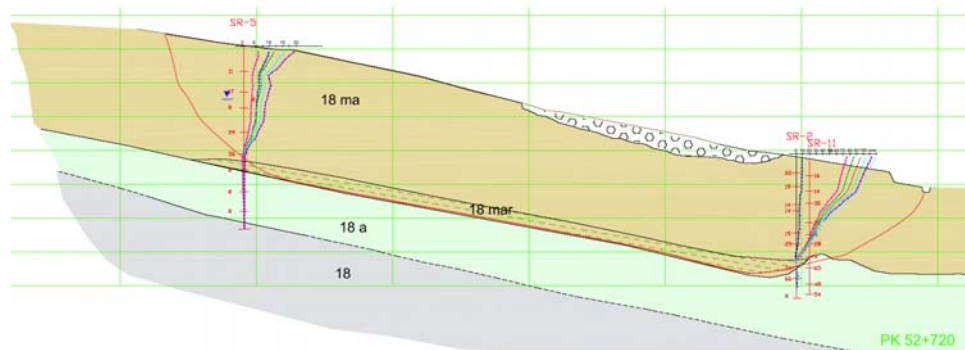


Comportamiento frágil. Ensayo de corte directo sobre muestra intacta. Alonso, E. et al., 2004

CARACTERISTICAS HABITUALES

Herrera (Córdoba)

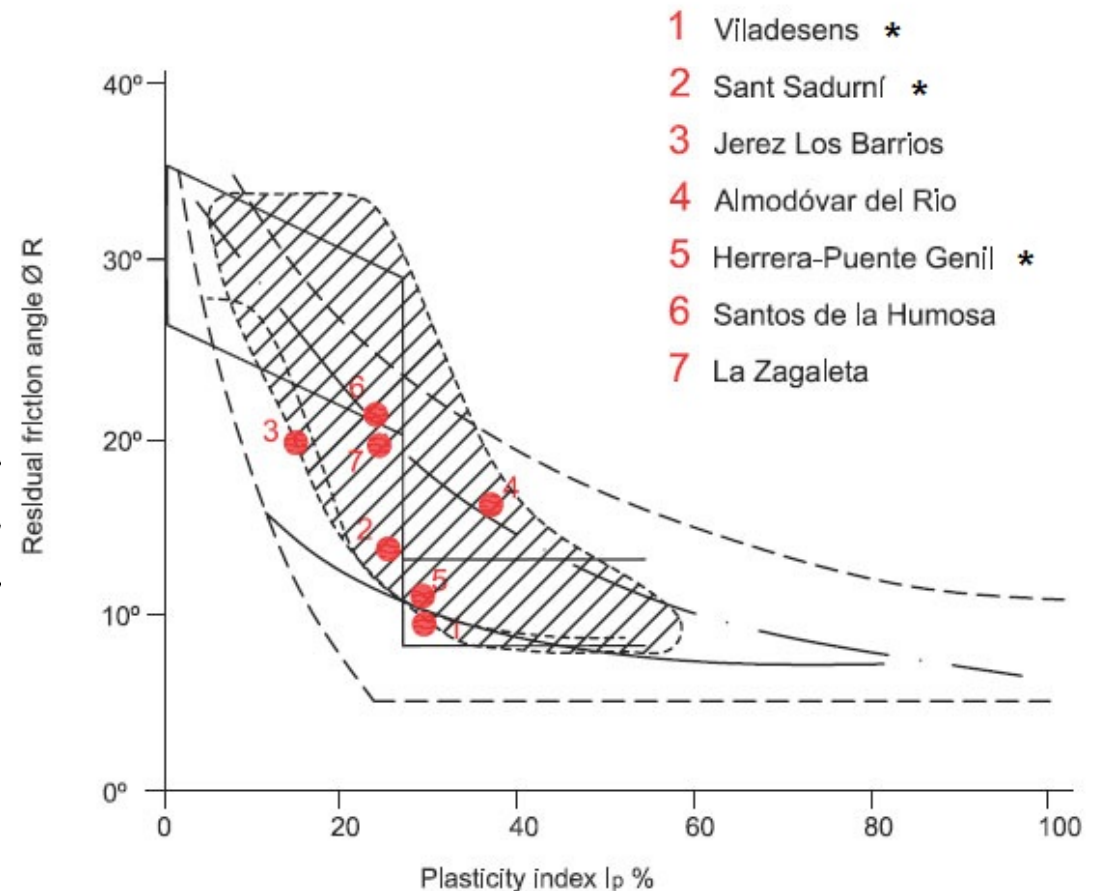
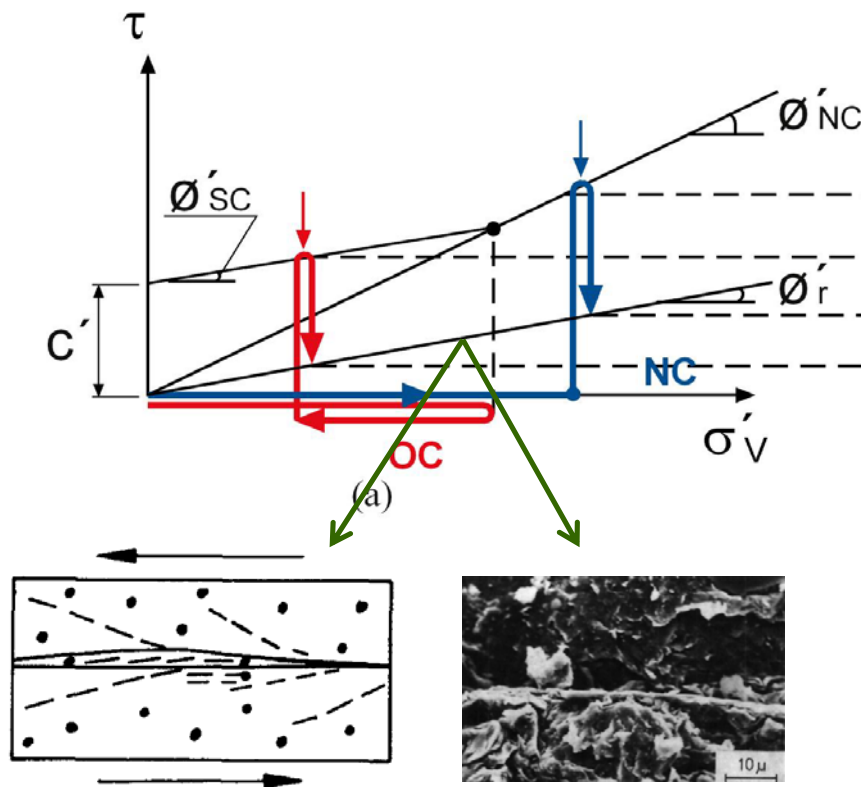
Arcillas de colores grises y verdosos, plegadas, fisuradas, con lisos y planos estriados (procesos de emplazamiento alóctono). Alto contenido en arcilla (45%). Minerales montmorilloníticos. Zonas muy alteradas hasta 15-18 m bajo superficie.



	Pico C'	f'	Residual f_r'
18ma	23-54*	15	10
18a	35	18	11

CARACTERISTICAS HABITUALES

Degradación de resistencia

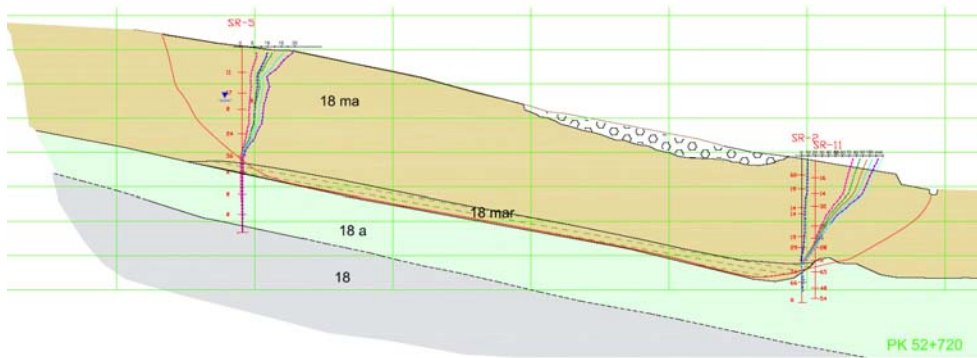


NOTA: En los casos con asterisco (*) se dispuso de ensayos de corte llevados a residual (corte anular o caja de corte multietapas). En el resto, los valores mostrados proceden de cálculos retrospectivos, por lo que ϕ'_R podría resultar inferior al valor mostrado (si la rotura ocurrió antes de la degradación completa de resistencia)

CARACTERISTICAS HABITUALES

Herrera (Córdoba)

10.- También es frecuente que exista un nivel piezométrico elevado, coincidente a veces con algún contacto litológico, o que incluyan niveles u horizontes más permeables, habitualmente areniscos o calcareníticos, que sirvan de camino preferencial de circulación del agua freática



Estabilización de taludes mediante pilotes

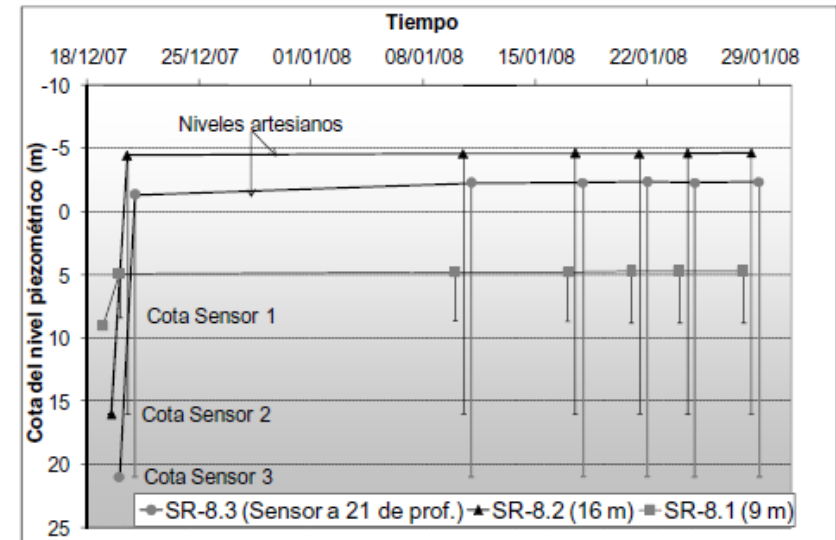
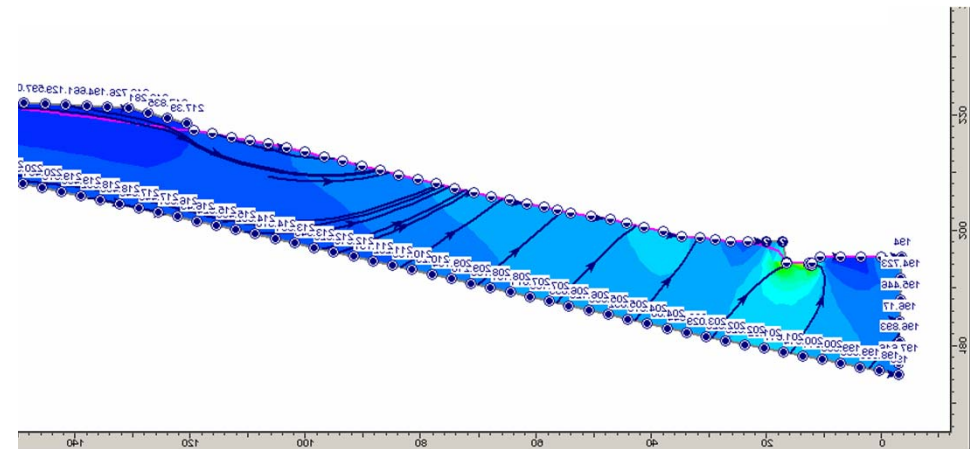


Figura 7. Evolución de niveles piezométricos. Columna de sensores en el sondeo SR-08.

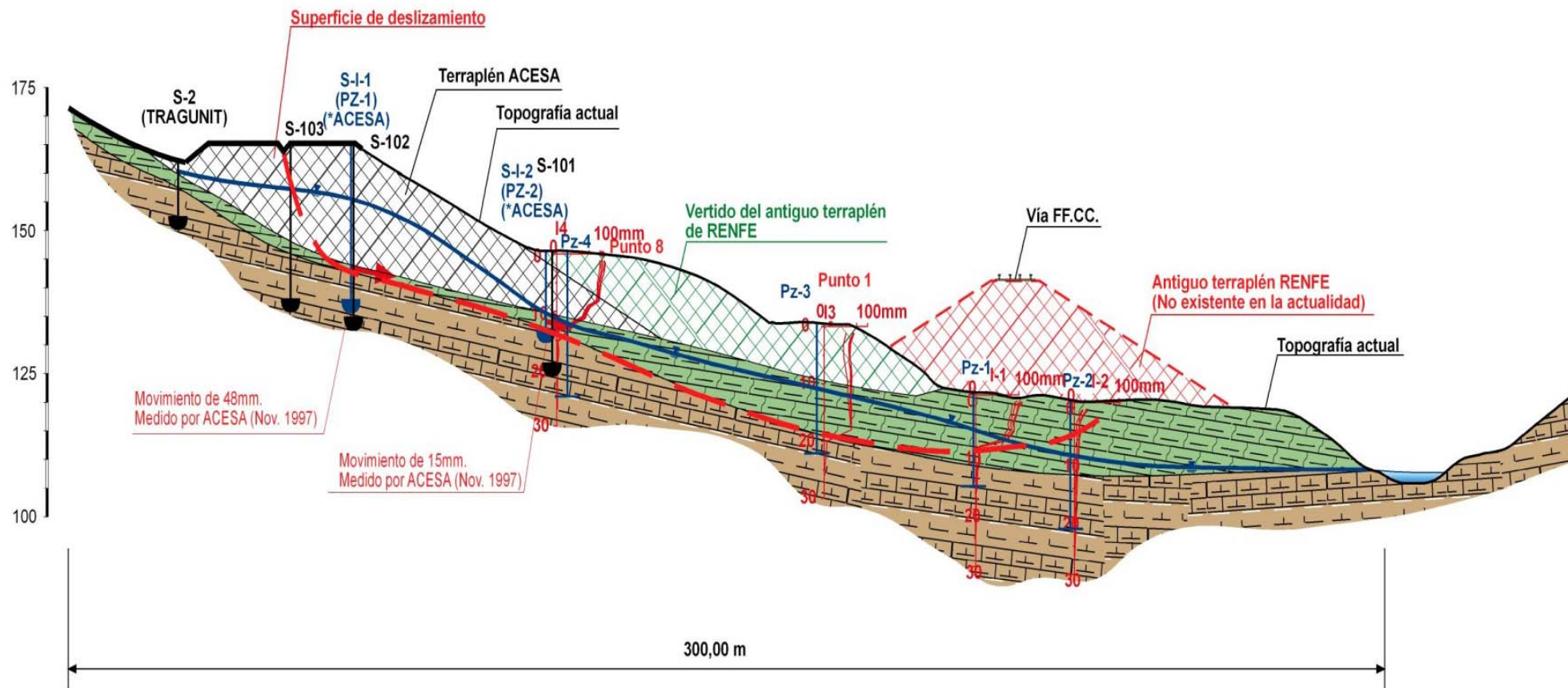


Tomás Murillo & Luis Ortuño

CARACTERISTICAS HABITUALES

Sant Sadurní (Barcelona)

El agua en el terraplén de San Sadurní siempre fue una constante



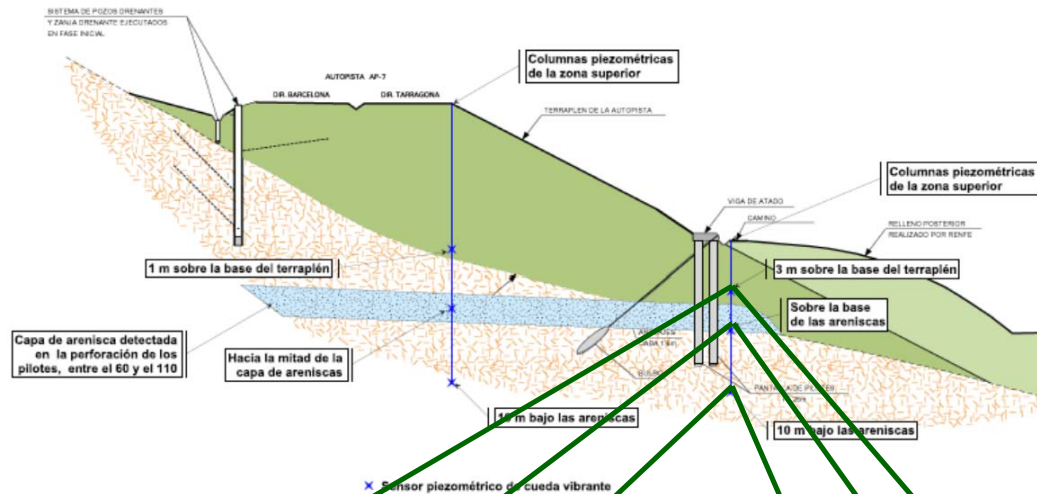
Perfil en Sant Sadurní de A'noia (la ladera tuvo 2 terraplenes)

CARACTERÍSTICAS HABITUALES

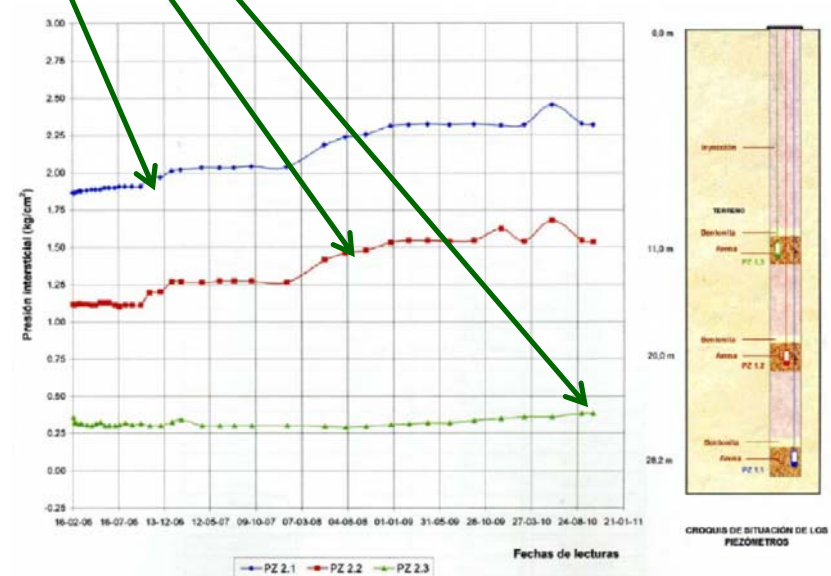
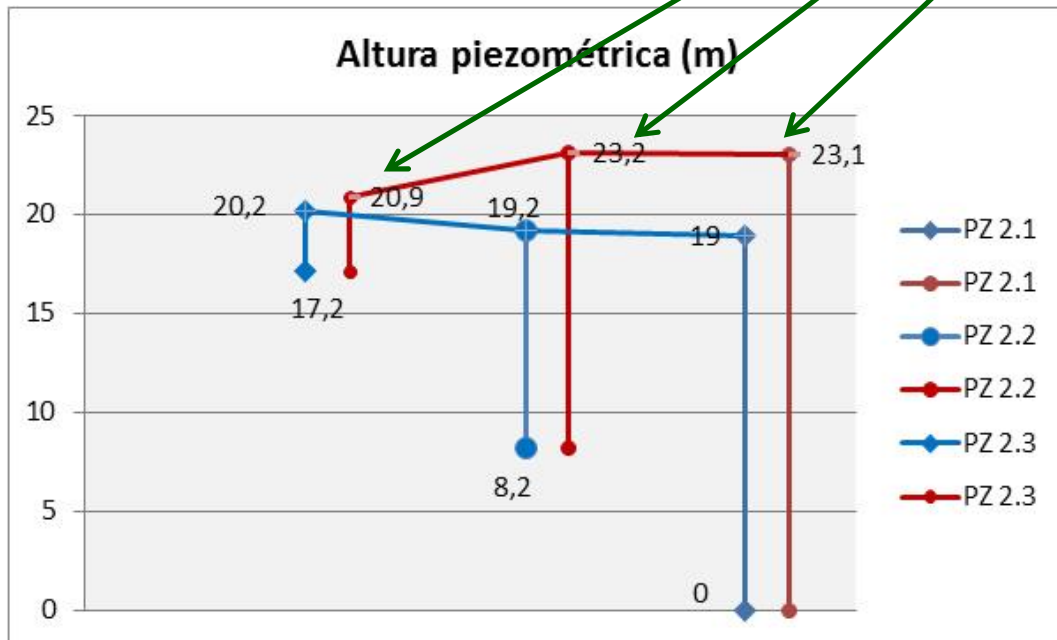
Sant Sadurní (Barcelona)

Últimos datos de auscultación disponibles (Proyecto de Refuerzo 2011; EPSA)

Piezómetros



Sube la altura piezométrica unos 4 m en los piezómetros instalados en terreno natural (bajo el terraplén), especialmente a partir de comienzos de 2008



CARACTERÍSTICAS HABITUALES

De las dos últimas características se deriva la conveniencia de:

- **Tomar muestras de calidad para estudiar la resistencia residual y compararla con los resultados del análisis retrospectivo.**

- **Instalar cuanto antes piezómetros en el terreno.**

METODOLOGÍA BÁSICA

ASPECTOS PRÁCTICOS DE DISEÑO

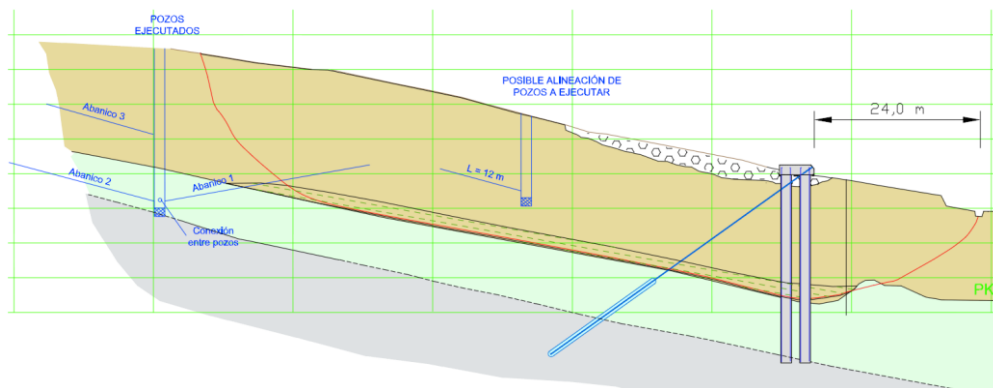
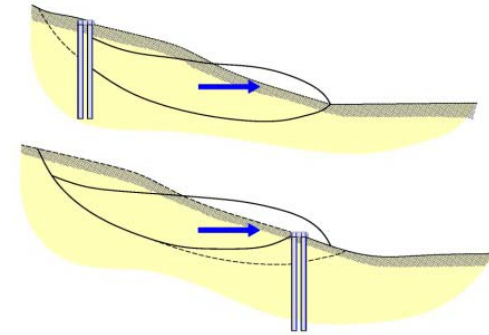
METODOLOGÍA BÁSICA

ASPECTOS PRÁCTICOS DE DISEÑO

Herrera y Almodóvar del Río (Córdoba)

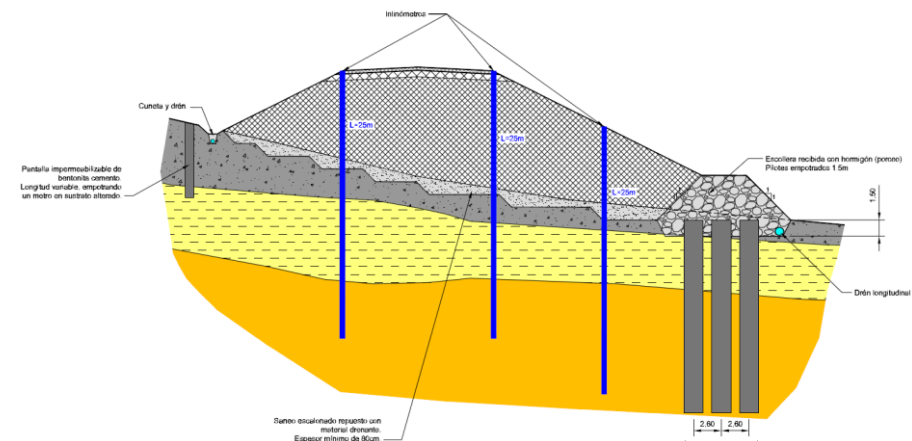
Emplazamiento de la pantalla en la ladera:

- Ni muy alta, ni muy baja
- En laderas suaves de pendiente constante, más o menos a 1/3 de la altura
- En el caso de terraplenes, al pie, donde se concentran las tensiones (además, es el terraplén lo que habitualmente deseamos restituir y/o proteger). Si no hay espacio o acceso, en coronación, al borde
- Se necesita una plataforma de trabajo suficiente (> 12 m), sin desestabilizar la ladera. Este aspecto puede ser muy relevante incluso con pendientes no muy pronunciadas



Deslizamiento de Herrera – Puente Genil (Córdoba)

Estabilización de taludes mediante pilotes



Deslizamiento de Almodóvar del Río (Córdoba)

Tomás Murillo & Luis Ortuño

METODOLOGÍA BÁSICA

ASPECTOS PRÁCTICOS DE DISEÑO

Herrera (Córdoba)

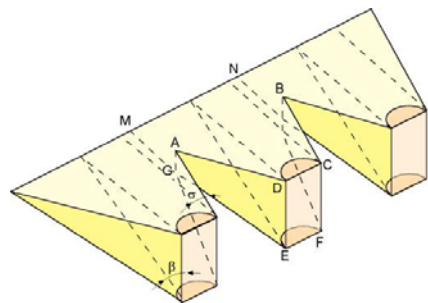
Diámetro de pilotes y separación : Lo obvio. Serán función de los esfuerzos a resistir

Son habituales en España los pilotes de 0,85 a 1,80 m de diámetro (muestran un buen equilibrio entre capacidad de carga, facilidad de ejecución y precio)

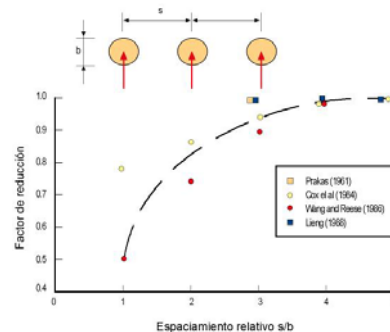
Separación:

Bastantes criterios: evitar flujo, no solapar zonas de influencia, etc.

Para las cargas que resultan, no se suelen separar más de 2 diámetros (1,35 a 1,5). De hecho, es frecuente distribuirlos al “tresbolillo”, entre otras cosas para que la separación no sea excesivamente pequeña a efectos de ejecución



Cuñas de rotura para grupos de pilotes en arena.
(Reese et al. 1992)



Reducción de la capacidad resistente de un pilote en función de la separación.
(Reese et al. 1992)



METODOLOGÍA BÁSICA

ASPECTOS PRÁCTICOS DE DISEÑO

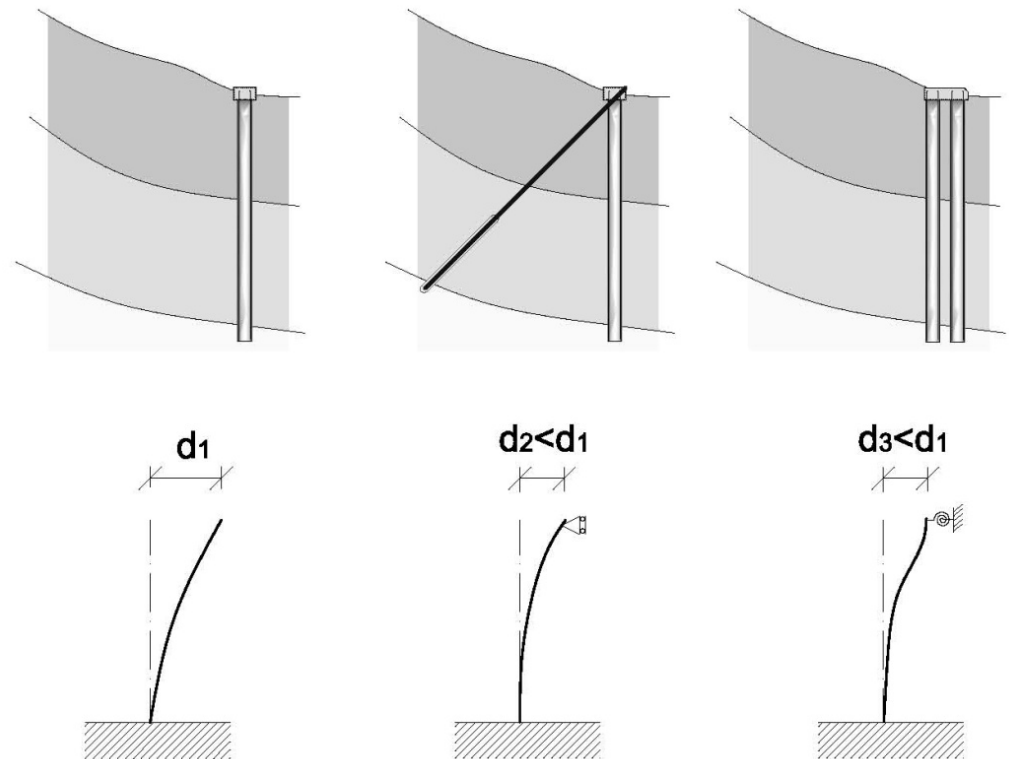
Longitud:

- Ha de haber suficiente empotramiento bajo la superficie de deslizamiento
- Frecuentemente son suficientes empotramientos bajo la superficie de deslizamiento de 1/3 de la longitud total de los pilotes, especialmente en el caso de que se anclen o arriostren en cabeza (lecturas de inclinómetros)

Arriostramiento en cabeza:

- Mejoran el comportamiento estructural de las pantallas (especialmente interesante a partir de 6- 8 m de “voladizo”):

1. Perforación de anclajes en cabeza de pantalla
2. Ejecución de los pilotes en 2 filas, al trespelillo, uniendo sus cabezas mediante un encepado, que proporciona coacción al giro
3. Una combinación de las dos anteriores.



METODOLOGÍA BÁSICA

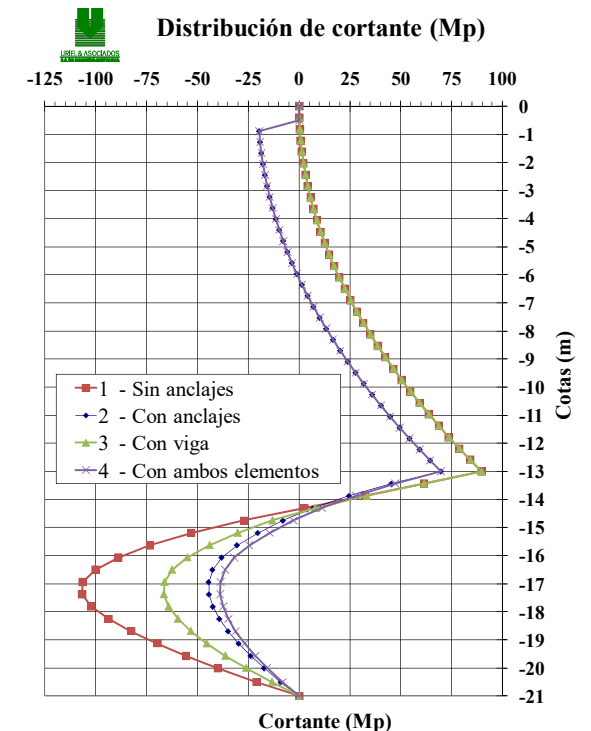
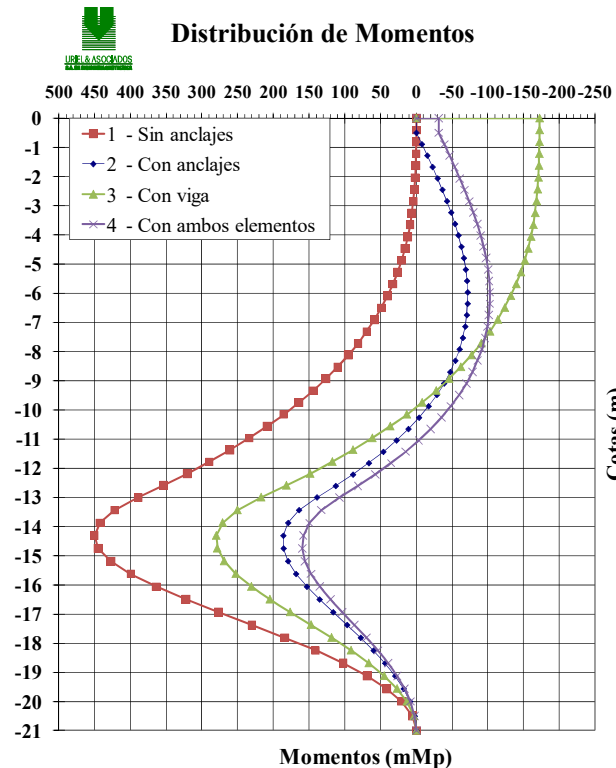
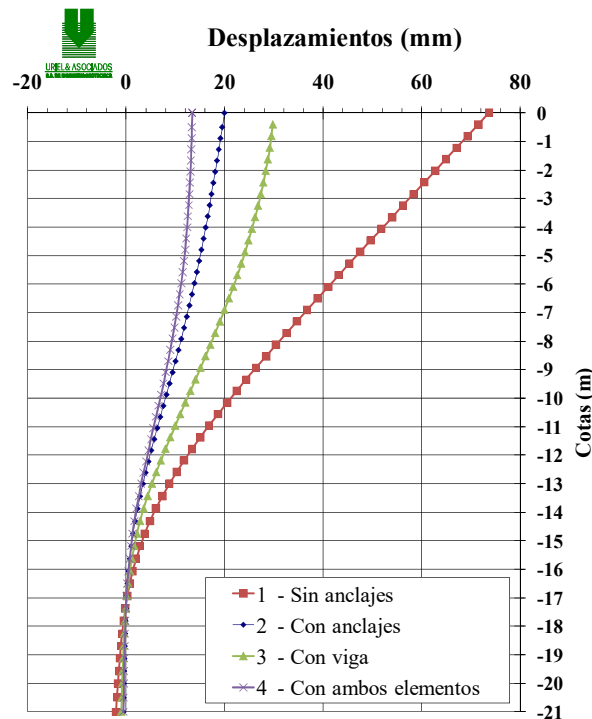
ASPECTOS PRÁCTICOS DE DISEÑO

Viladesens (Gerona)

Ejemplo del efecto del arriostramiento:

Arriostramiento en cabeza	Esfuerzos máximos		
	Desplazamiento (mm)	Momento (tm/m)	Cortante (t/m)
Libre	74	450	107
Viga	30	279	90
Anclajes	20	186	70
Anclajes y viga	13	160	70

Arriostramiento en cabeza	% Respecto a valor con cabeza libre		
	Desplazamiento (mm)	Momento (tm/m)	Cortante (t/m)
Libre	100	100	100
Viga	41	62	84
Anclajes	27	41	65
Anclajes y viga	18	36	65

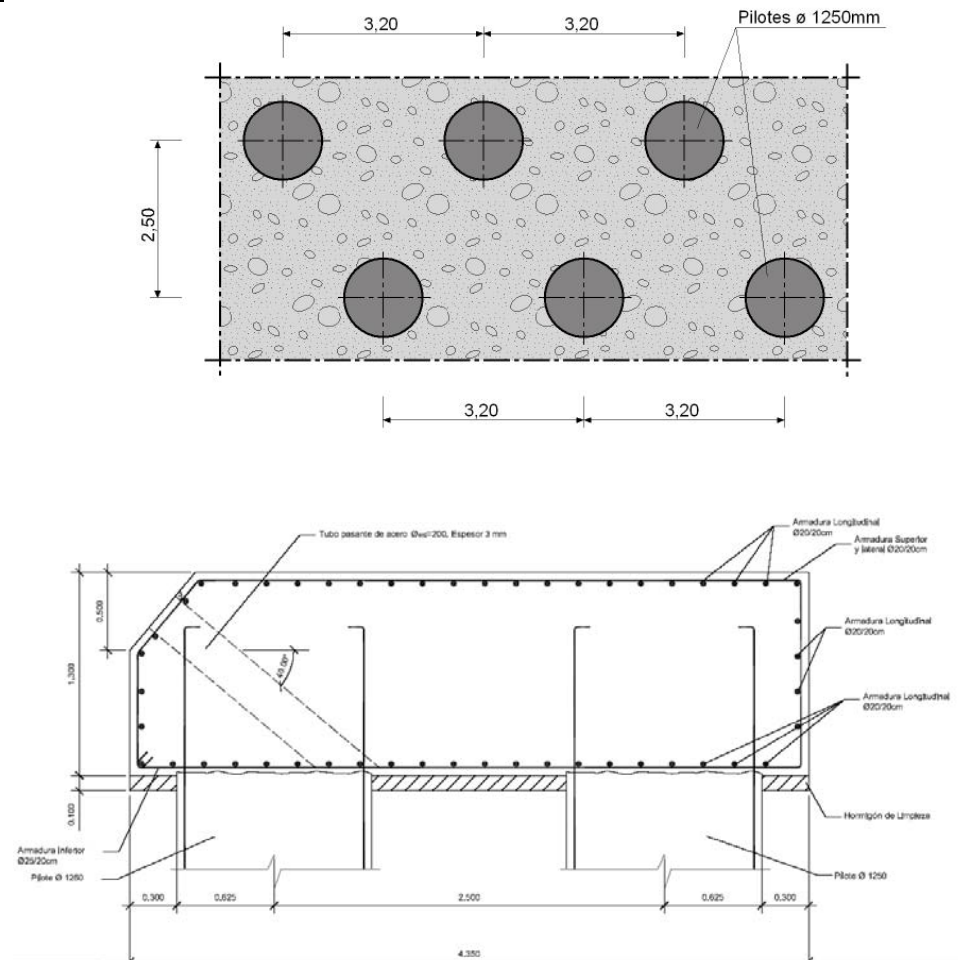
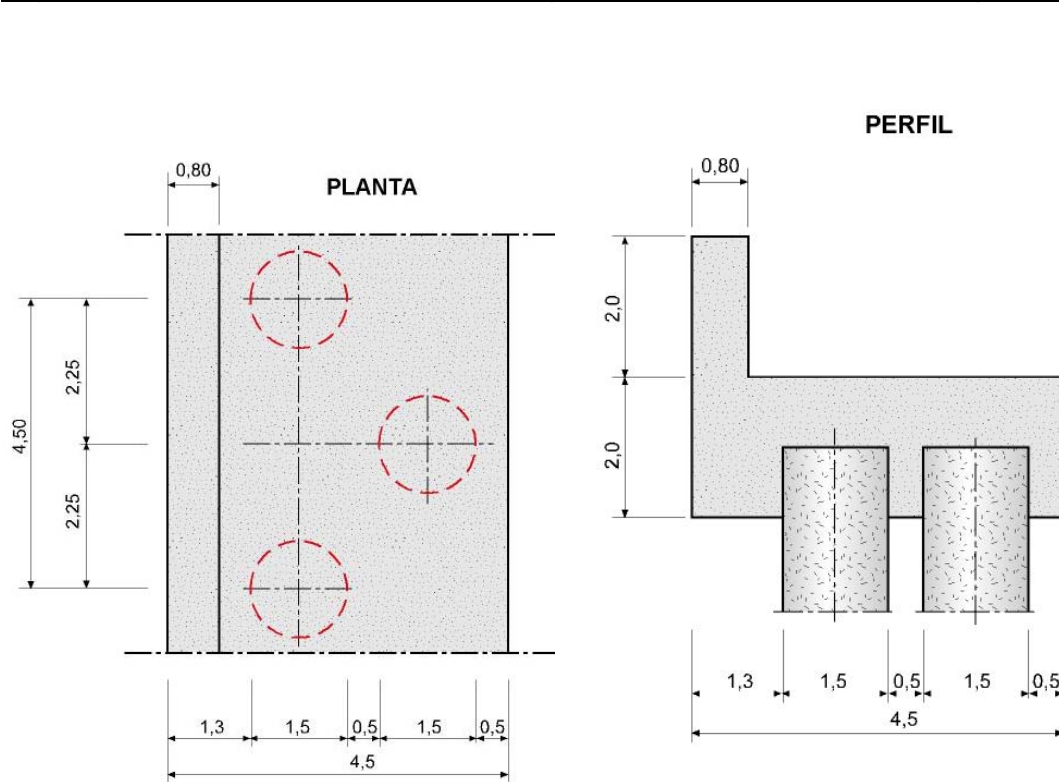


METODOLOGÍA BÁSICA

ASPECTOS PRÁCTICOS DE DISEÑO

Alfacar (Granada) y Sant Sadurní (Barcelona)

Ejemplos. Casuística y órdenes de magnitud



Pantalla y peto-encepado. **Deslizamiento de Alfacar**

Pilotes de ϕ 1500 mm y 17-20 m de longitud aproximadamente (6 m bajo superficie de rotura). Al pie de un terraplén

Estabilización de taludes mediante pilotes

Pantalla y encepado. **Deslizamiento de Sant Sadurní**

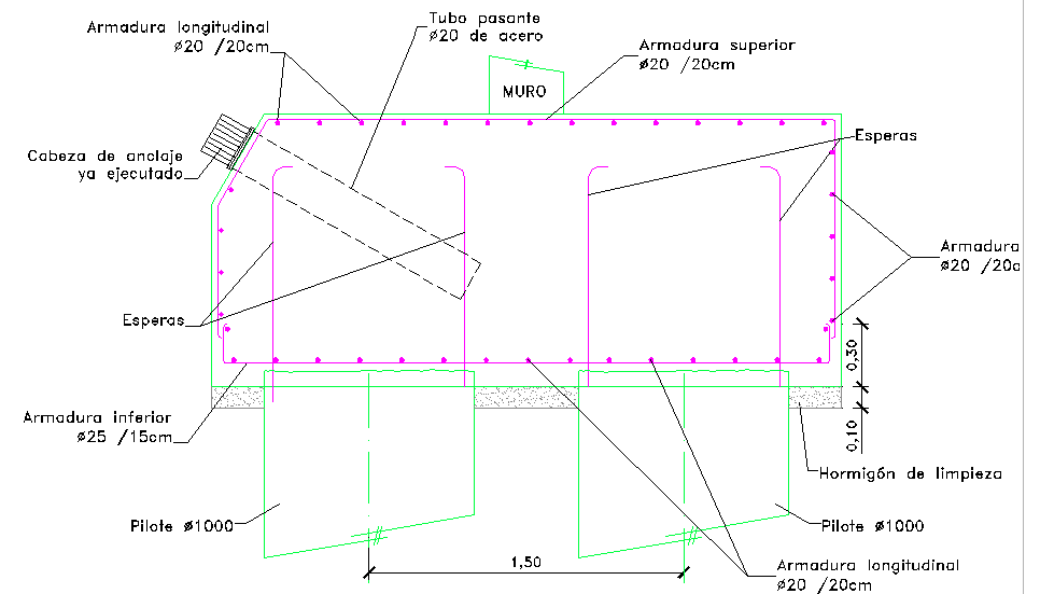
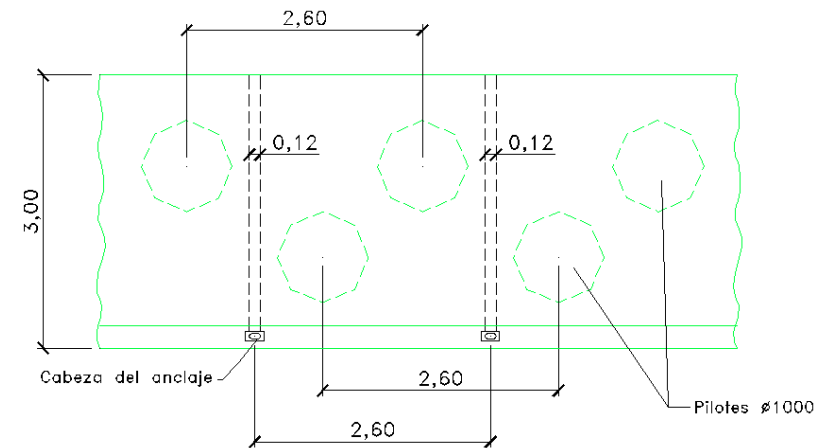
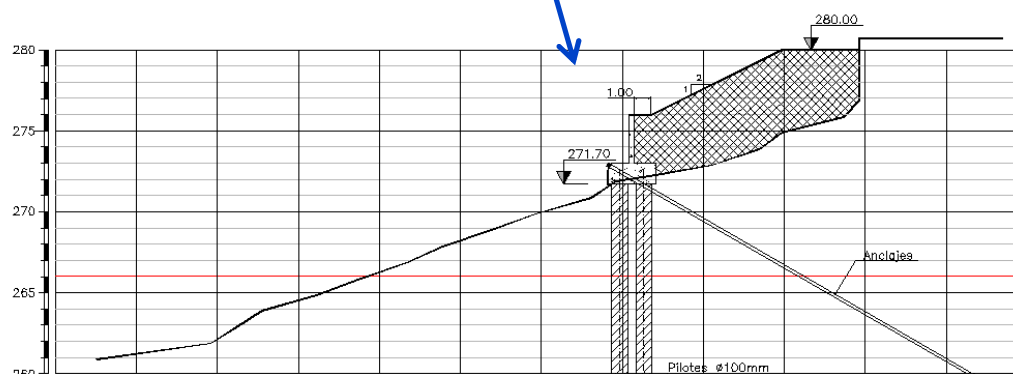
Pilotes de ϕ 1250 mm y 21 m de longitud (7 m bajo superficie de rotura). Al pie de un terraplén

Tomás Murillo & Luis Ortuño

METODOLOGÍA BÁSICA

ASPECTOS PRÁCTICOS DE DISEÑO

La Zagaleta. Benahavis (Málaga)

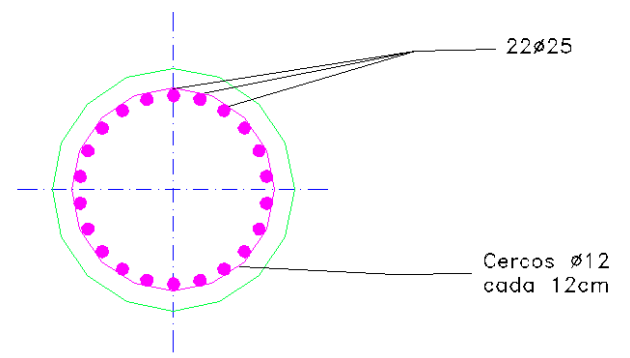
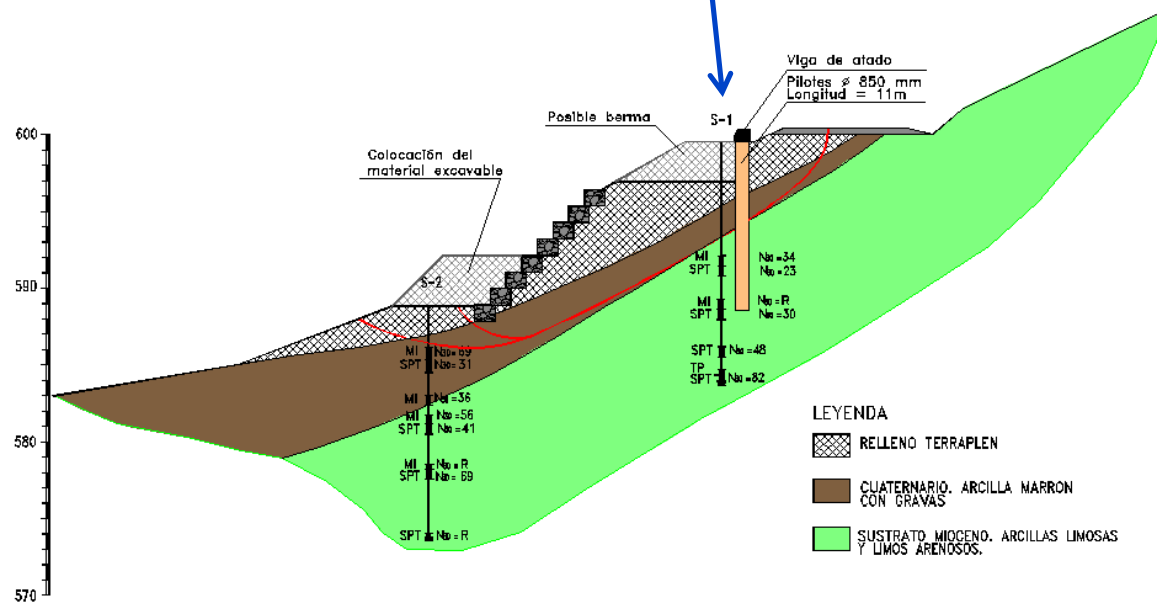
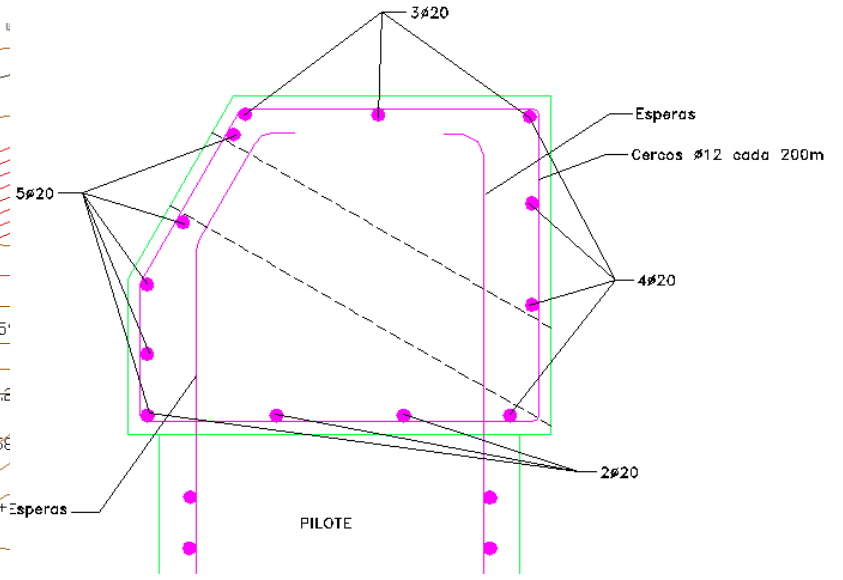
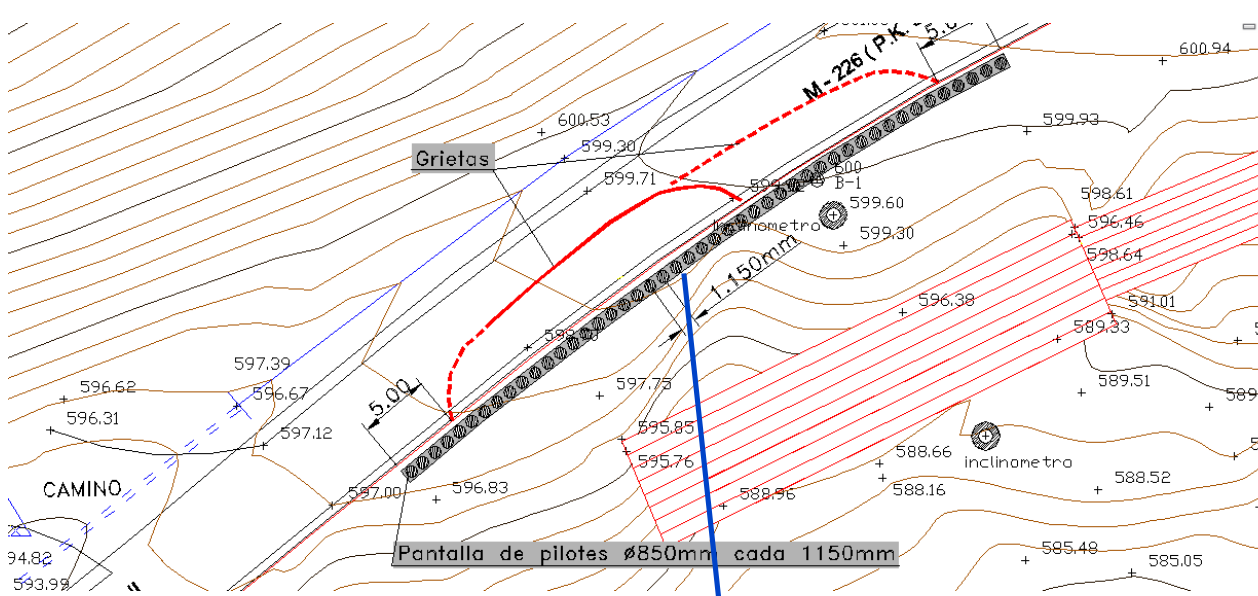


Pilotes de ϕ 1000 mm y 14 a 18 m de longitud, buscando empotramiento en sustrato de roca. Muro a media ladera y a pie de terraplén

METODOLOGÍA BÁSICA

ASPECTOS PRÁCTICOS DE DISEÑO

Santos de la Humosa (Madrid)



Pilotes de ϕ 850 mm y 11 m de longitud, separados 1,15 m entre ejes y empotrados 5 m bajo la superficie de rotura.
Nótese que se trata de un fila única de pilotes en voladizo (mayor longitud de empotramiento)

LEYENDA

	RELLENO TERRAPLEN
	CUATERNARIO. ARCILLA MARRON CON GRAVAS
	SUSTRATO MIOCENO. ARCILLAS LIMOSAS Y LIMOS ARENOSOS.

METODOLOGÍA BÁSICA

- DESARROLLO DEL ANÁLISIS

METODOLOGÍA BÁSICA

Es un problema complejo de interacción suelo-estructura. Los modelos de cálculo han ido evolucionando con el tiempo (y con la disponibilidad de herramientas de cálculo). Básicamente los pasos a seguir son:

- ❑ **Obtener la fuerza de estabilización necesaria para lograr el factor de seguridad deseado**

- ❑ **Calcular la pantalla para que soporte dicha fuerza. Esto a su vez conlleva:**
 - **Adoptar una distribución de la fuerza de estabilización a lo largo de la pantalla**

 - **Determinar los esfuerzos en la pantalla para su armado**

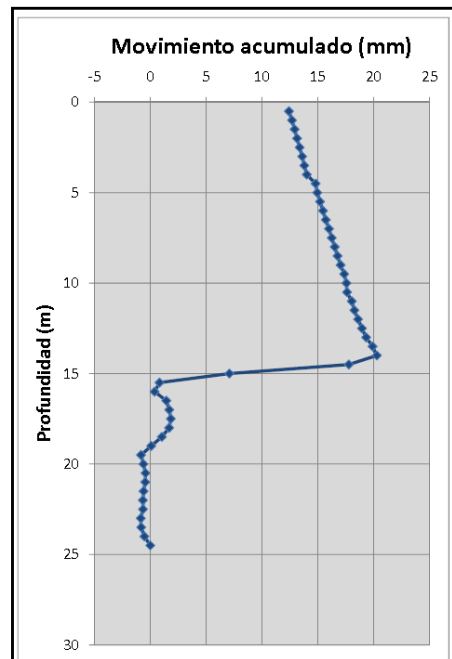
METODOLOGÍA BÁSICA

DESARROLLO DEL ANÁLISIS

Almodóvar del Río (Córdoba)

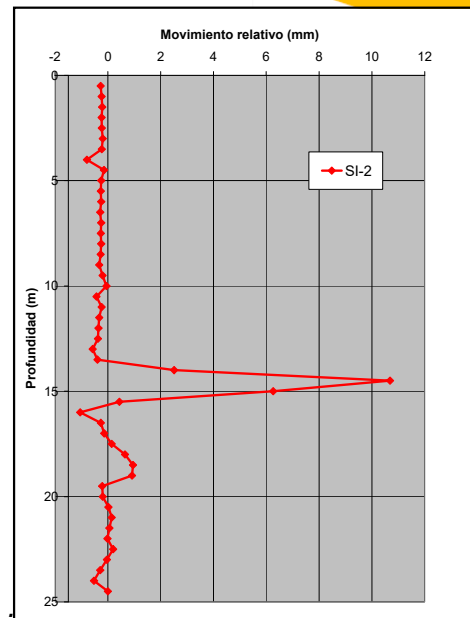
Obtención de parámetros geotécnicos. Investigación y retroanálisis

• A partir de investigaciones de campo y laboratorio, datos de instrumentación y análisis retrospectivos se construye el modelo geotécnico: perfil geotécnico y propiedades básicas del terreno, geometría del deslizamiento, resistencia al corte de los materiales implicados y condiciones del agua intersticial



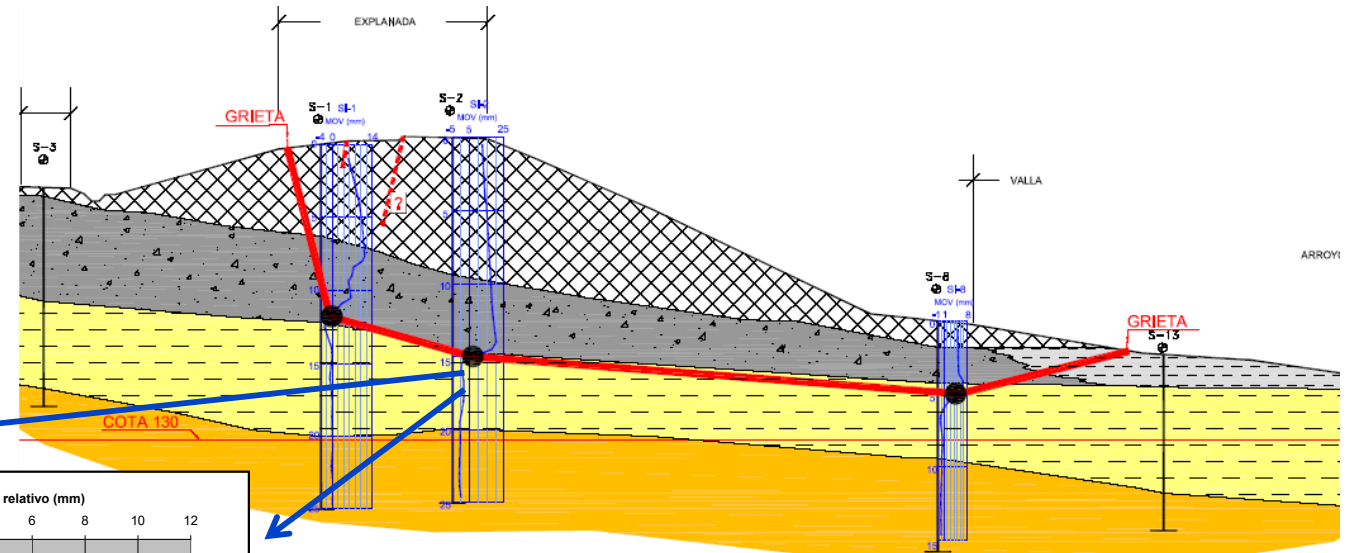
Lecturas acumuladas

Inclinómetro SI-2



Lecturas relativas

Estabilización de taludes mediante pirotes



Superficie de tanteo para análisis retrospectivo

FACTORES:

- Geometría de ladera y de sup. rotura
- Piezometría (hipótesis?)
- Degradación de resistencia (a veces no hace falta llegar a residual)

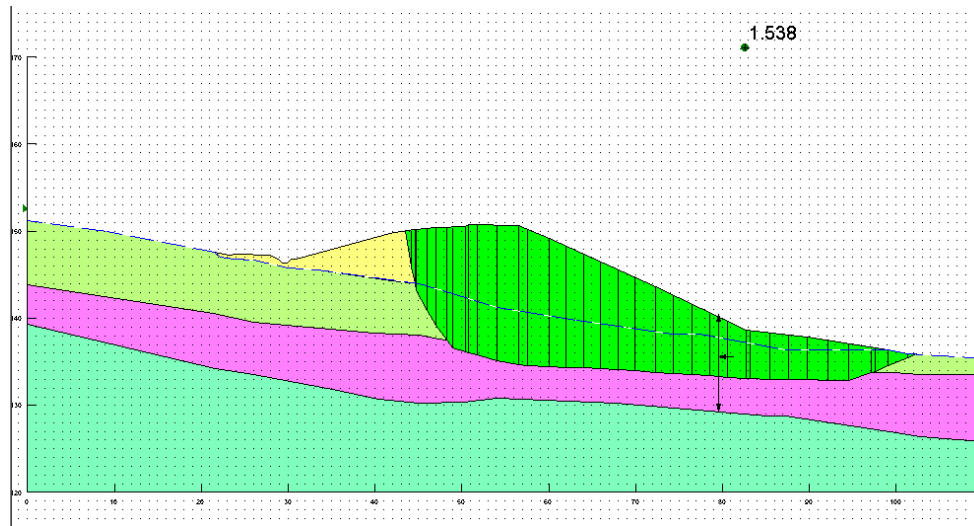
METODOLOGÍA BÁSICA DESARROLLO DEL ANÁLISIS

Almodóvar del Río (Córdoba)

Estimación de la fuerza de estabilización necesaria. Factor de seguridad

• Existen varios procedimientos. Uno sencillo e intuitivo consiste emplear métodos convencionales de rebanadas e introducir 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 hasta alcanzar el factor de seguridad deseado

(NOTA: La posición en vertical de la fuerza tiene una influencia limitada para deslizamientos marcadamente traslacionales como los descritos. Es habitual suponerla a 1/3 del espesor de terreno inestable, lo que equivale asumir una ley triangular (lineal) de empuje)



En roturas de tipo traslacional el incremento del factor de seguridad (FS) es proporcional a la magnitud de la fuerza estabilizadora introducida (F)

(Subir de FS= 1,00 a 1,2 “cuesta” el doble de anclaje, por ejemplo, que de 1,00 a 1,10)

TIPO DE ROTURA	FUERZA NECESARIA (kN/m)	FACTOR DE SEGURIDAD
Poligonal	730	1.508

METODOLOGÍA BÁSICA

DESARROLLO DEL ANÁLISIS

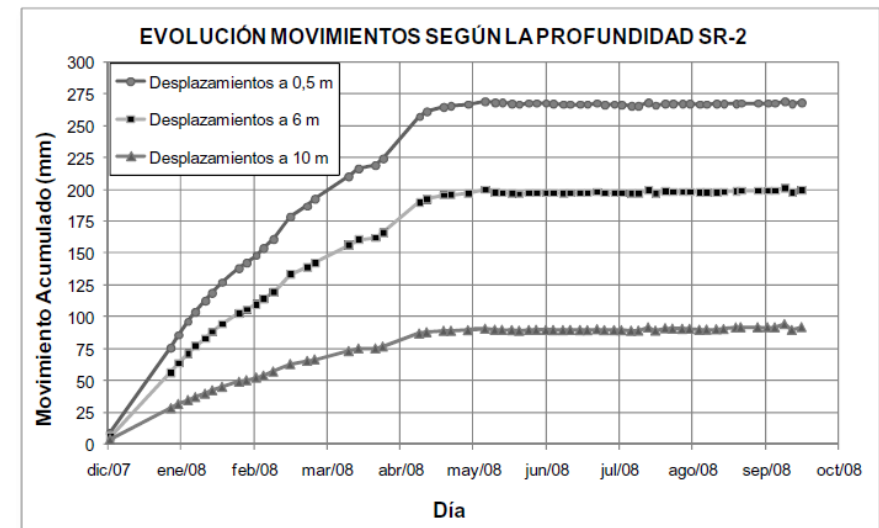
Herrera (Córdoba)

Estimación de la fuerza de estabilización necesaria. Factor de seguridad

- Para seleccionar la fuerza de estabilización “es necesario pensar qué se hace con el agua“
- Es muy frecuente introducir medidas de drenaje (zanjas, pozos con drenes, etc).
- Reducir la presión intersticial suele tener un efecto enormemente beneficioso, de manera que conviene ser prudentes en las hipótesis sobre la efectividad de las medidas de drenaje, especialmente si no se conocen bien las condiciones en las que se desencadenó el deslizamiento
- ¿Qué ocurre si el drenaje proyectado no era tan efectivo como pensábamos o simplemente deja de funcionar? ¿Buscamos al menos $FS=1,05$ a $1,10$ “con otras cosas” por si falla?



Estabilización de taludes mediante pilotes



Paralización de movimientos en SR-2 tras la ejecución del drenaje

METODOLOGÍA BÁSICA DESARROLLO DEL ANÁLISIS

Herrera (Córdoba)

La efectividad de los pozos, salvados algunos inconvenientes iniciales, fue espléndida



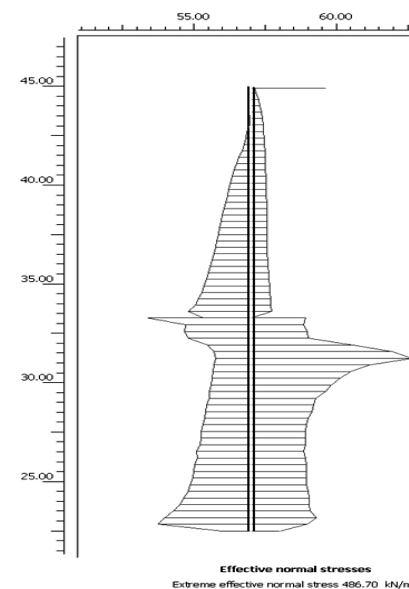
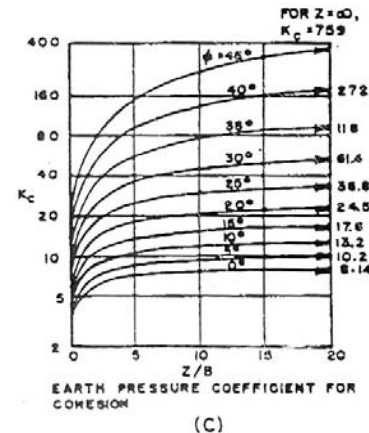
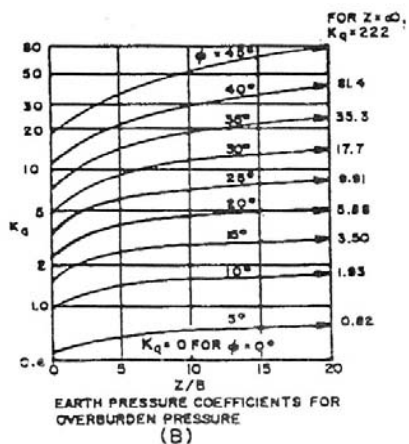
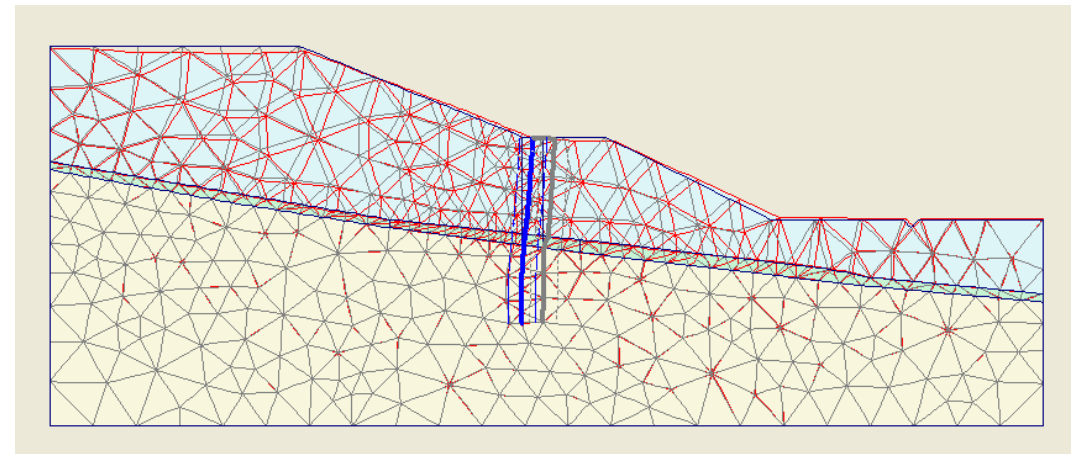
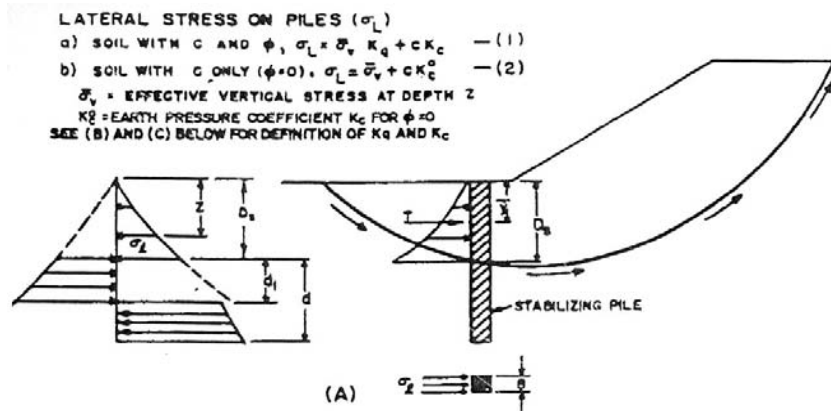
METODOLOGÍA BÁSICA

DESARROLLO DEL ANÁLISIS

Viladesens (Gerona)

Distribución de empujes sobre la pantalla. Cálculo de esfuerzos y armado

- Las diversas metodologías difieren considerablemente en este punto. Para los deslizamientos estudiados se adoptaron leyes triangulares (lineales)



Forma de las leyes de empuje obtenidas degradando progresivamente la resistencia en la franja de deslizamiento (Plaxis)

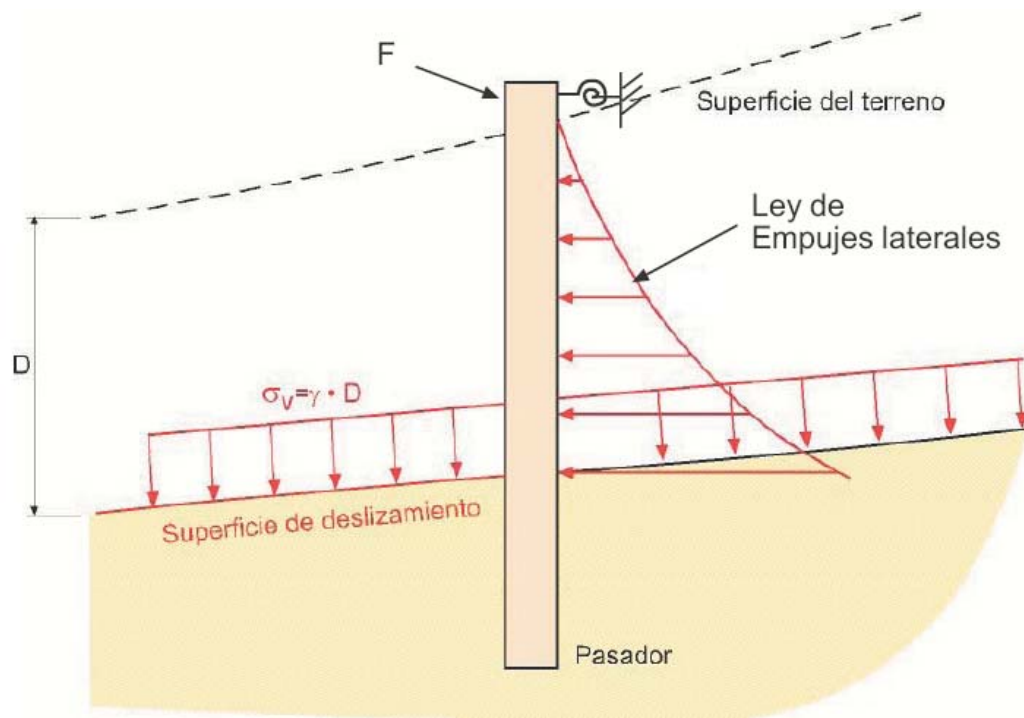
NAVFAC, 1971

METODOLOGÍA BÁSICA

DESARROLLO DEL ANÁLISIS

Distribución de empujes sobre la pantalla. Cálculo de esfuerzos y armado

Un cálculo sencillo y conservador, basado en una propuesta de Estaire, J. & Sopeña, L. (2001), consiste en asumir una distribución lineal de empujes cuya resultante es la fuerza de estabilización buscada, y calcular con procedimientos habituales de pantallas



Se pueden incorporar varios efectos:

- Posible “despegue” del terreno situado ladera abajo de la pantalla de pilotes
- Efecto de la sobrecarga por debajo de la superficie de rotura.
- Coacciones en cabeza (por encepado, anclaje, etc).

METODOLOGÍA BÁSICA

DESARROLLO DEL ANÁLISIS

Distribución de empujes sobre la pantalla. Cálculo de esfuerzos y armado

Dado que los esfuerzos se obtienen a partir de una fuerza de estabilización previamente calculada para alcanzar un determinado coeficiente de seguridad ($F_{\text{estabilidad}}$), en realidad 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:

$$F_F^* = \frac{F_F}{F_{\text{estabilidad}}}$$

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

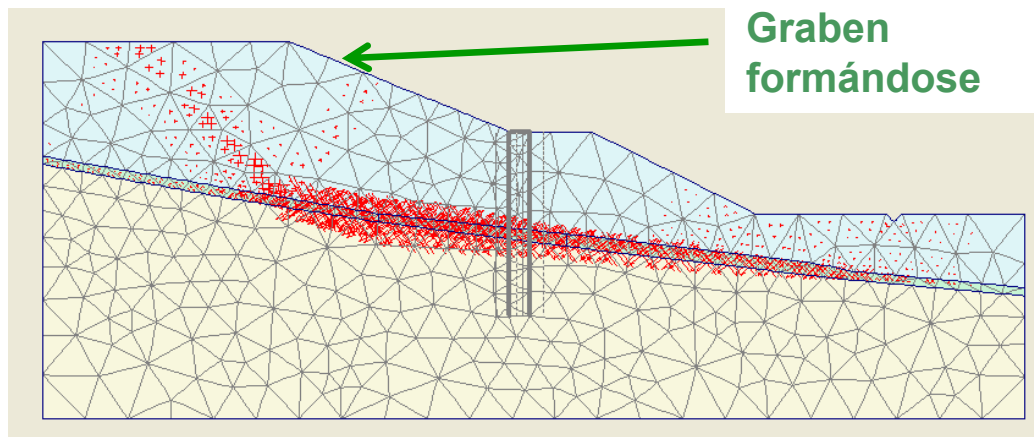
METODOLOGÍA BÁSICA

DESARROLLO DEL ANÁLISIS

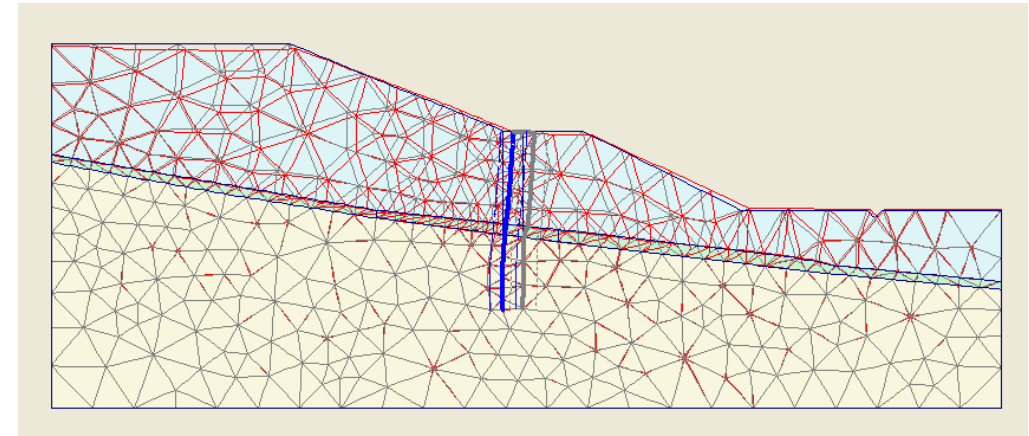
Viladesens (Gerona)

Distribución de empujes sobre la pantalla. Cálculo de esfuerzos y armado

También se pueden emplear EF. Su bondad dependerá de los modelos constitutivos seleccionados. Se puede intentar reproducir la degradación de resistencia. En general la modelización por EF resulta “más flexible” que las de otros procedimientos más clásicos.

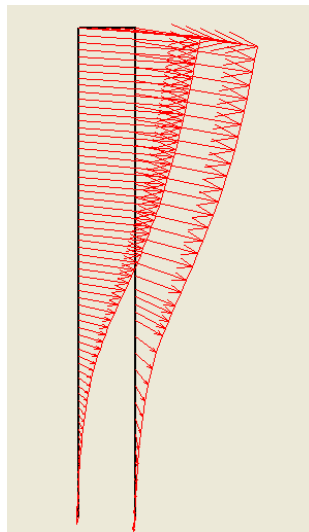


Deformaciones (sin pilotes)



Malla deformada (con pilotes)

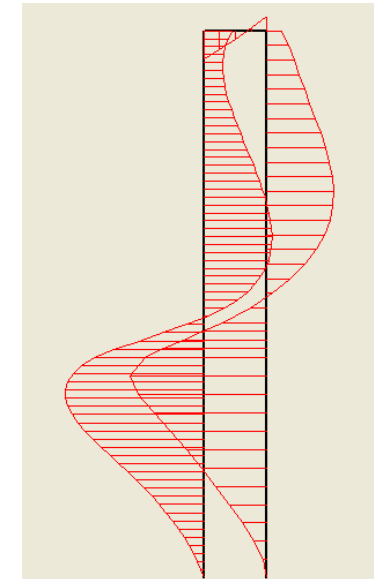
Desplazamientos



Cortantes



Momentos



METODOLOGÍA BÁSICA

DESARROLLO DEL ANÁLISIS

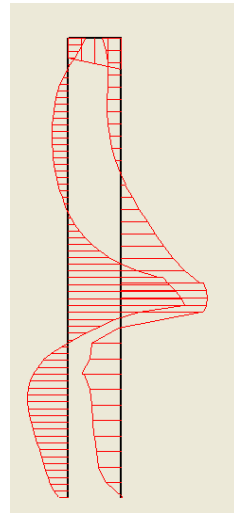
Viladesens (Gerona)

El aspecto de las leyes es similar, pero la magnitud de los esfuerzos es menor en EF
 El efecto de la coacción por efecto del encepado también parece reducido en EF

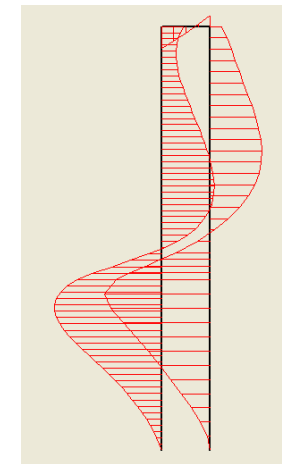
Desplazamientos



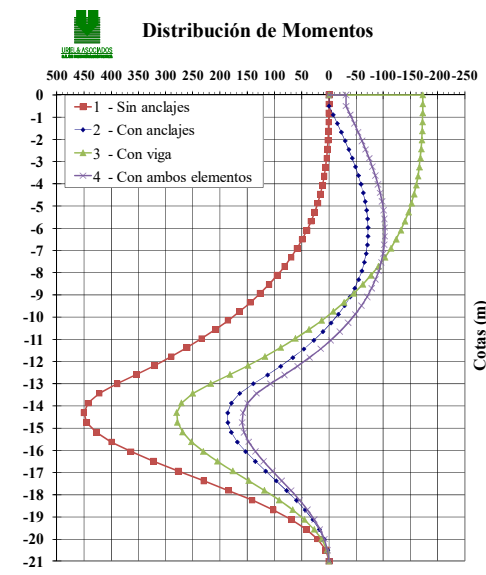
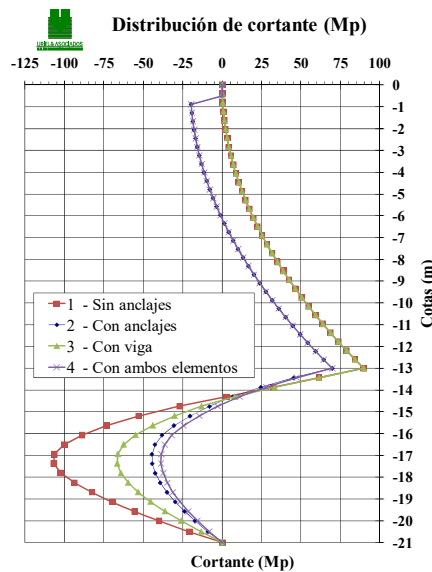
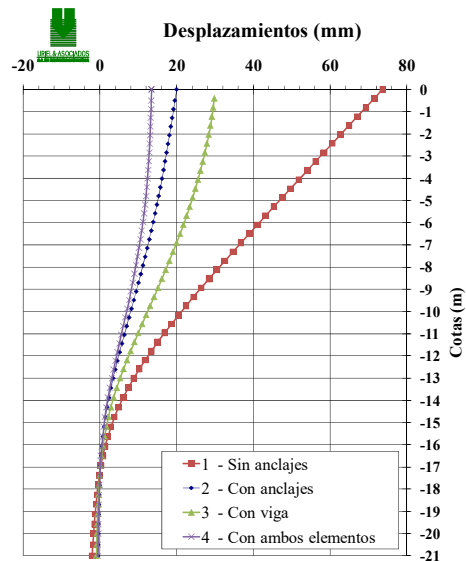
Cortantes



Momentos



EF (Plaxis)



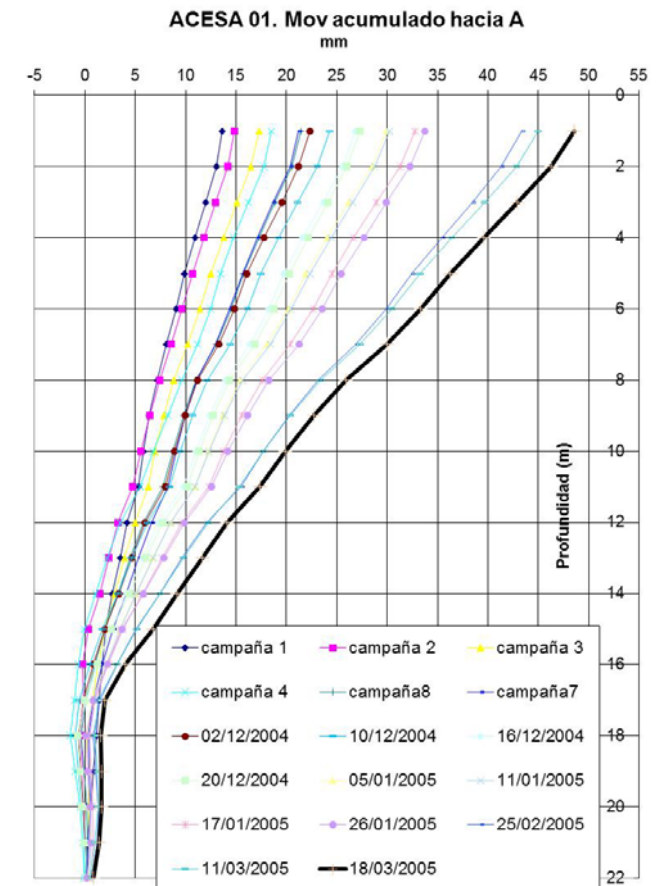
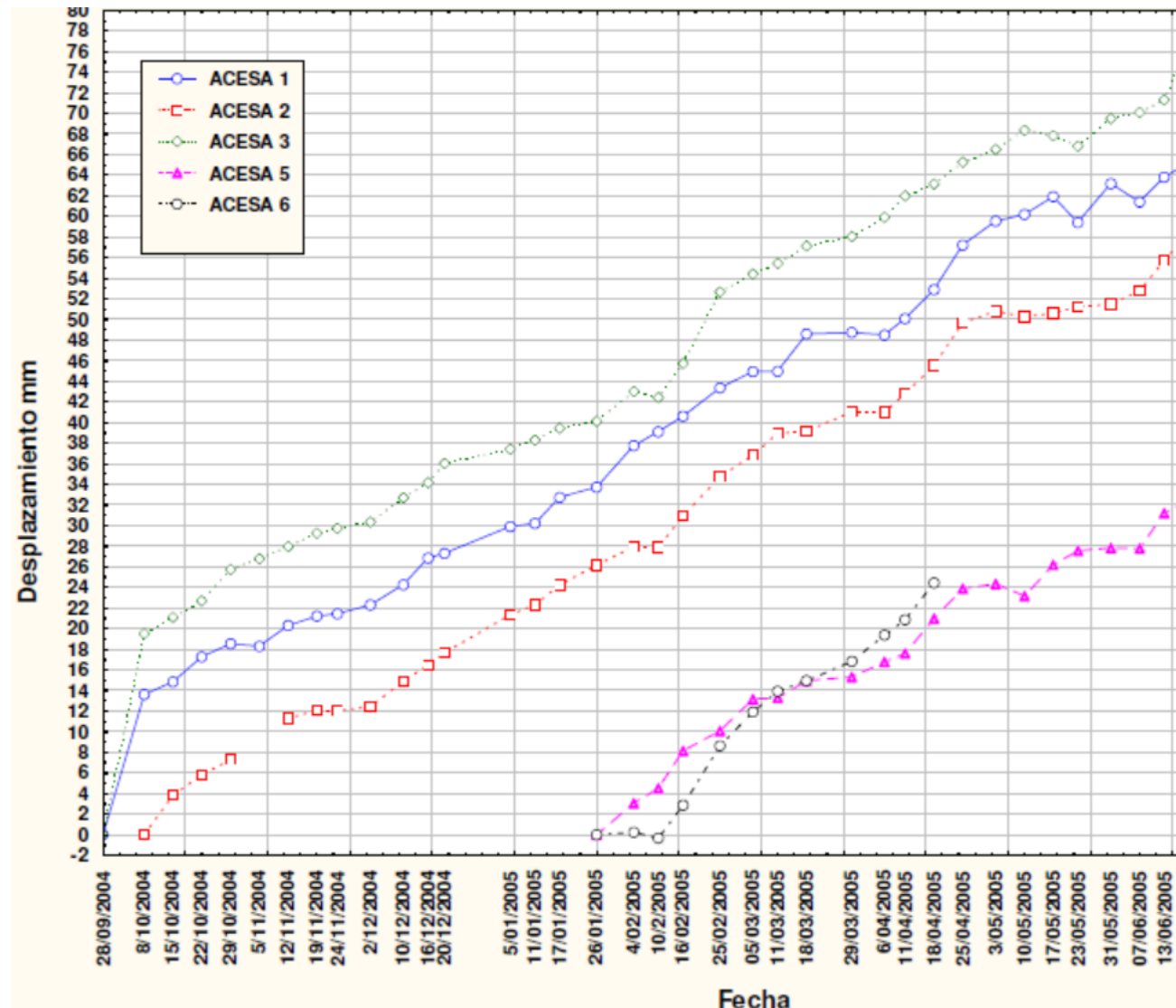
Winkler (Rido)

METODOLOGÍA BÁSICA

DESARROLLO DEL ANÁLISIS

Viladesens (Gerona)

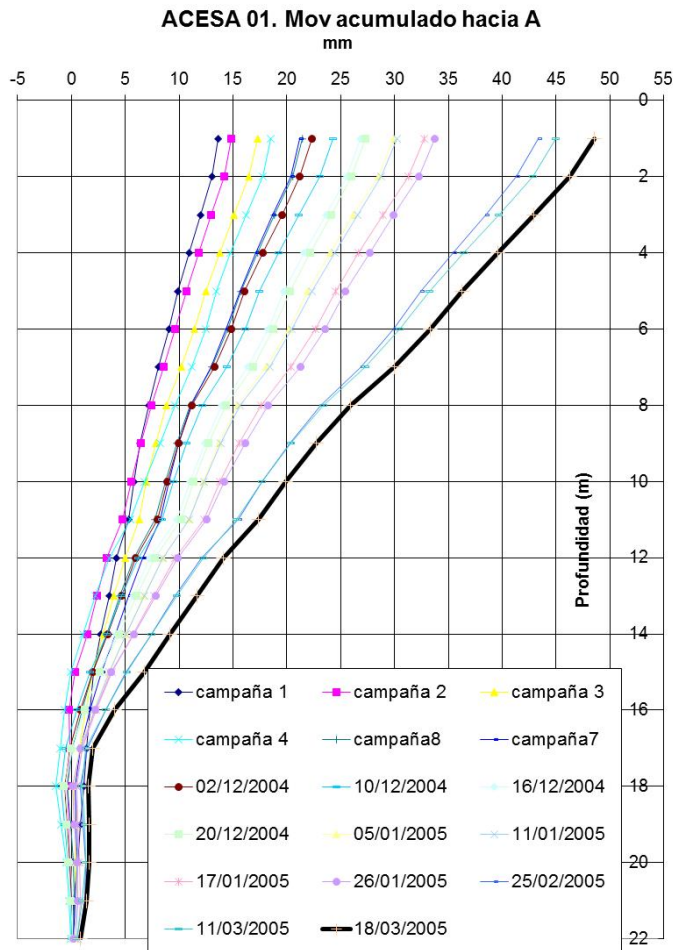
Inclinómetros en pilotes (Septiembre 2004 a Junio de 2005)



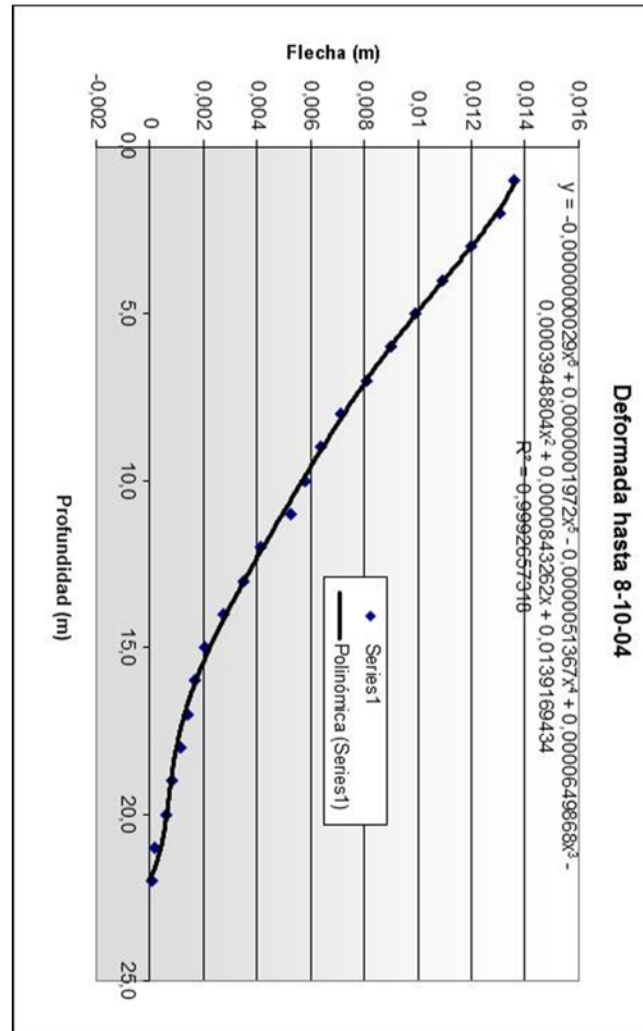
METODOLOGÍA BÁSICA DESARROLLO DEL ANÁLISIS

Viladesens (Gerona)

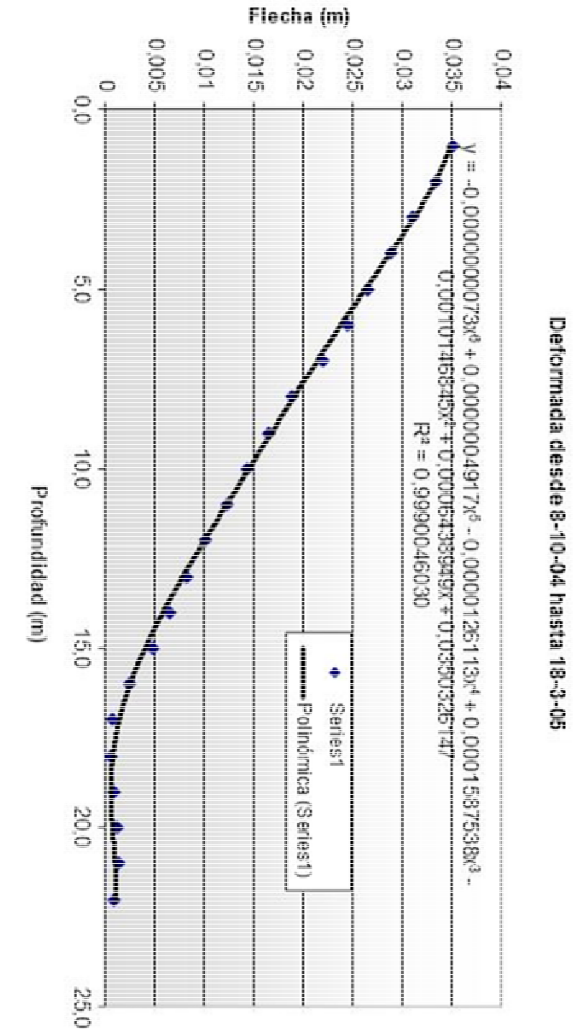
Movimiento de pilotes, estimación de esfuerzos



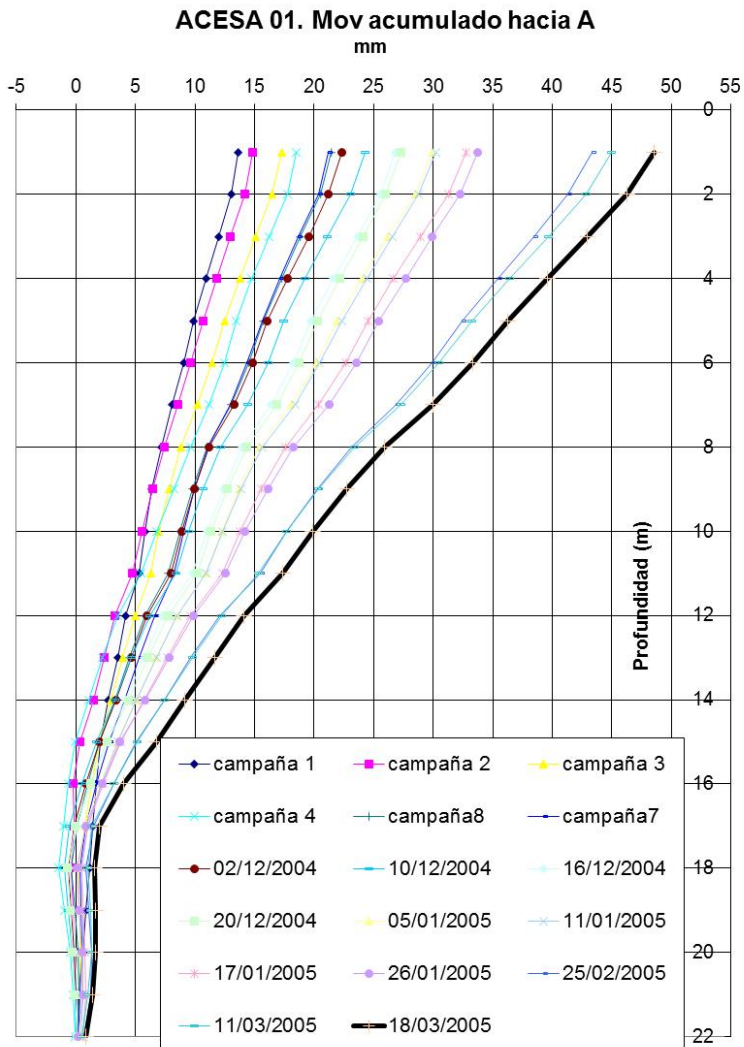
Inclinómetro en pilote



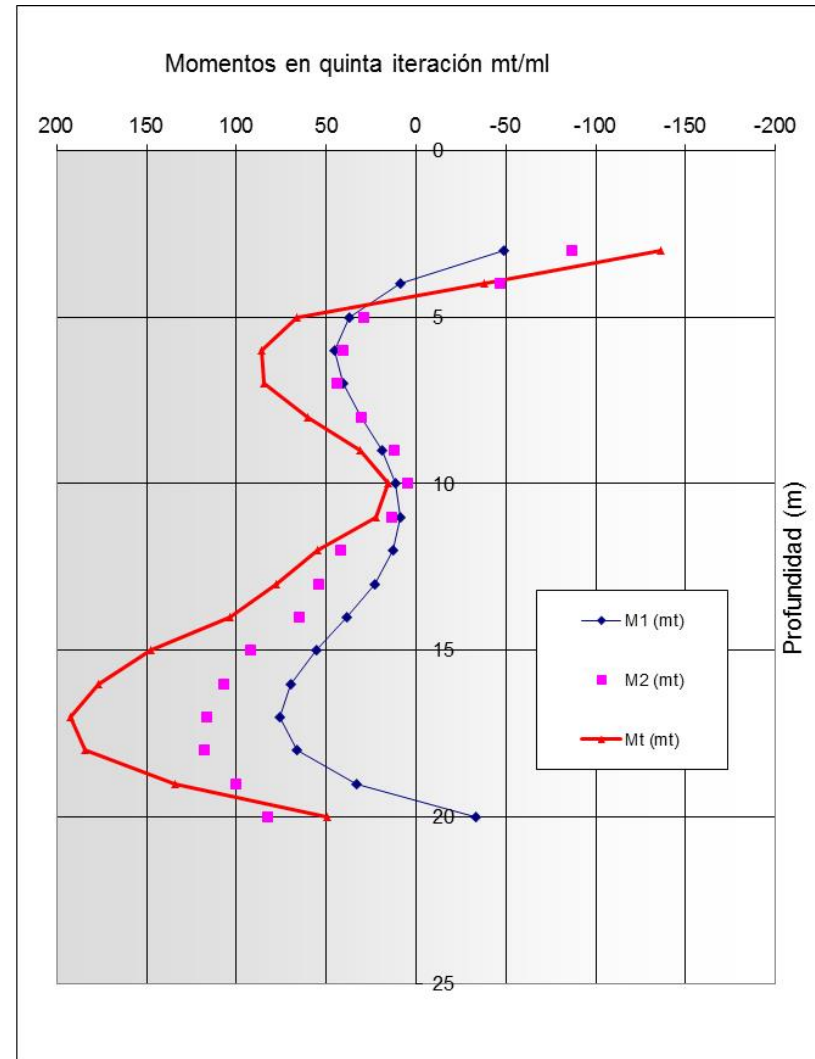
Ajuste y "suavización" de la deformada



Movimiento de pilotes, estimación de esfuerzos

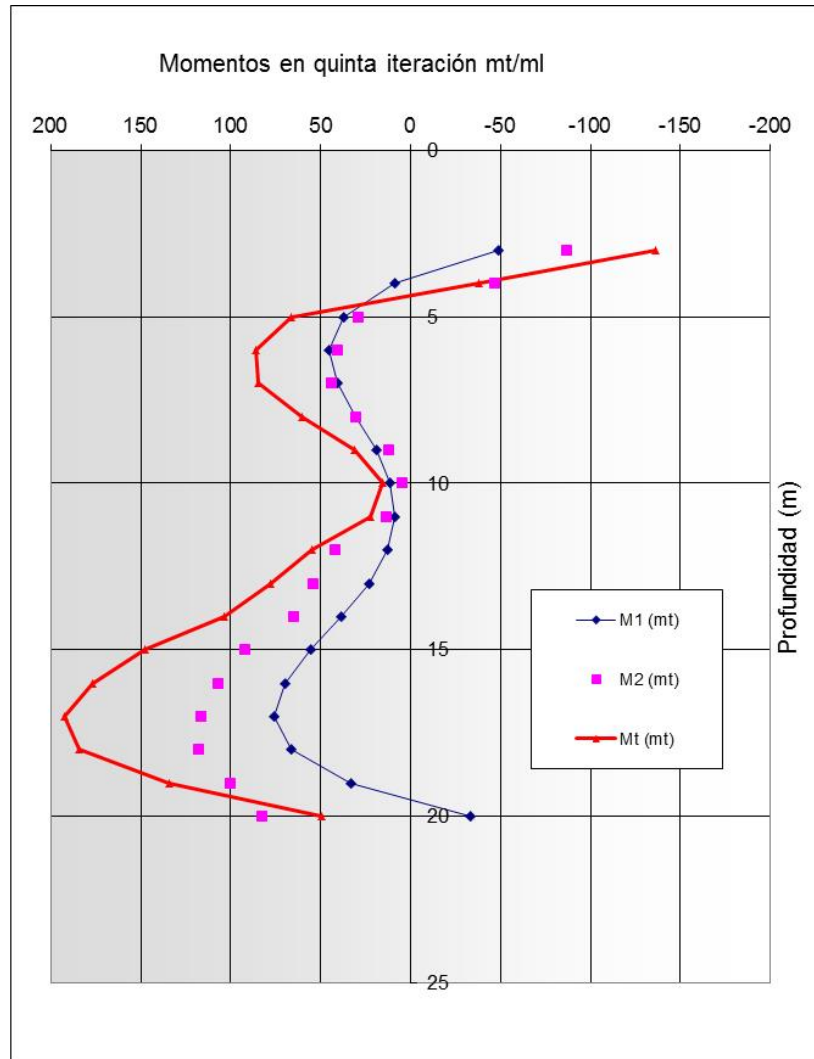


Inclinometro en pilote

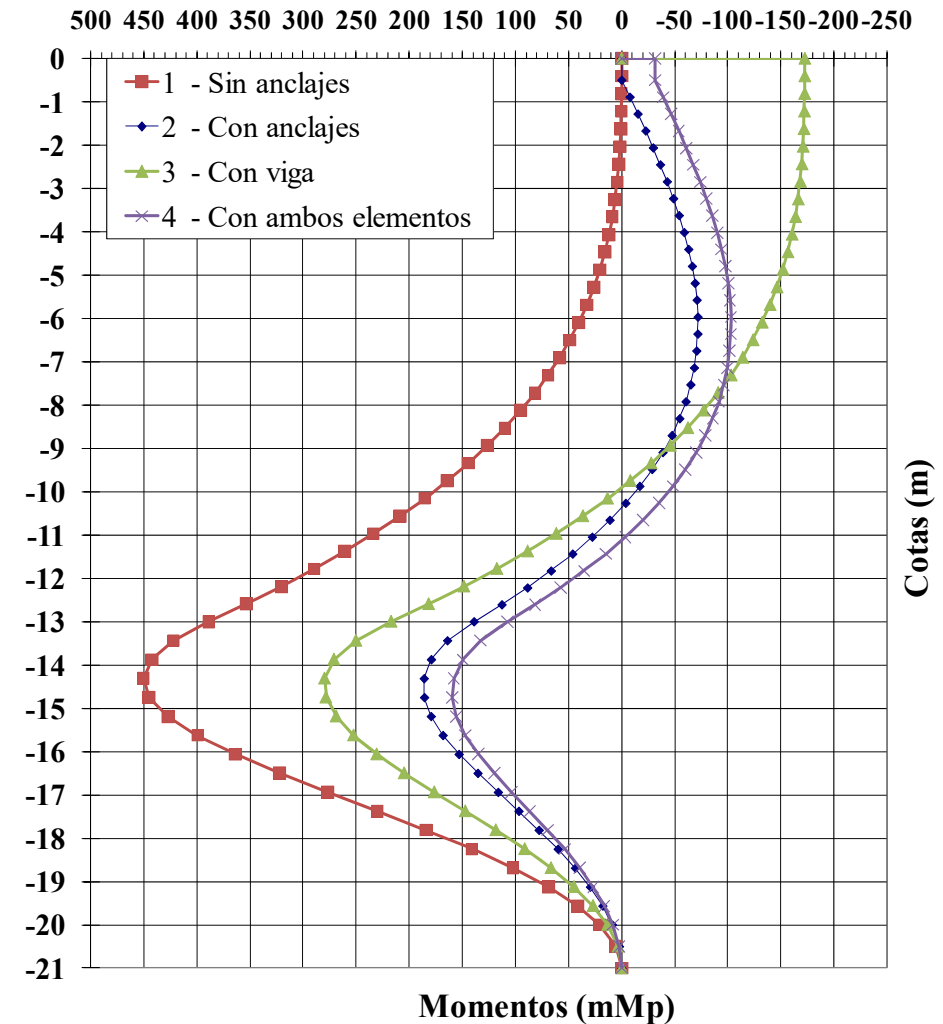


Momentos deducidos

Movimiento de pilotes, estimación de esfuerzos

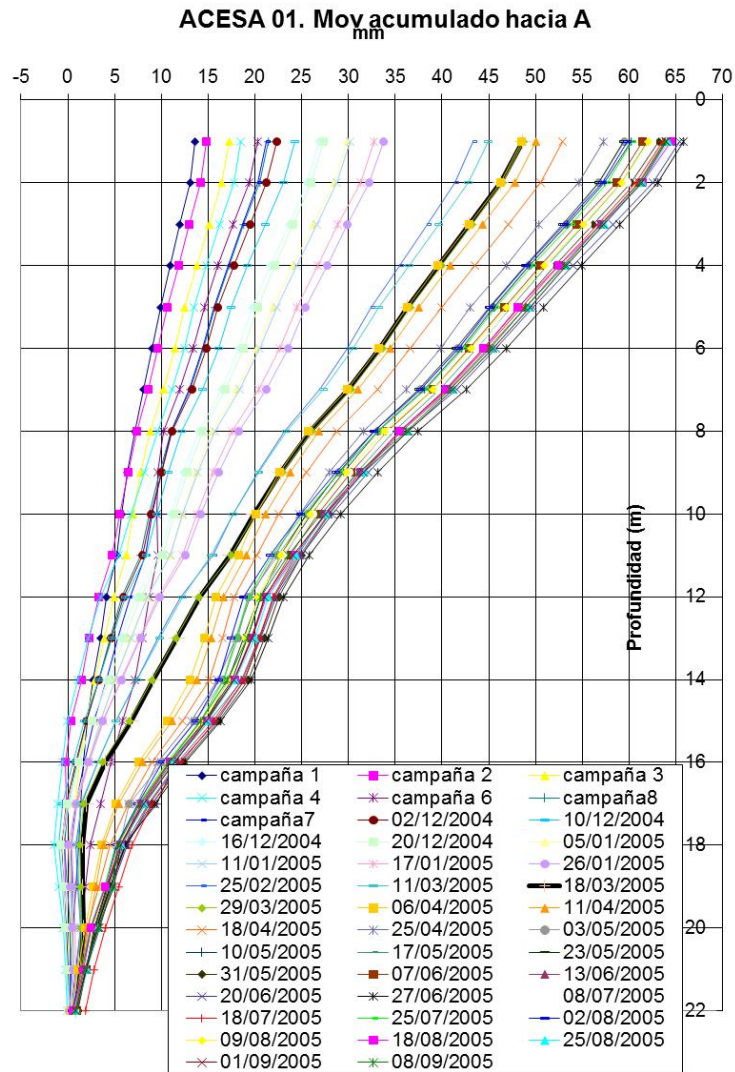


Distribución de Momentos

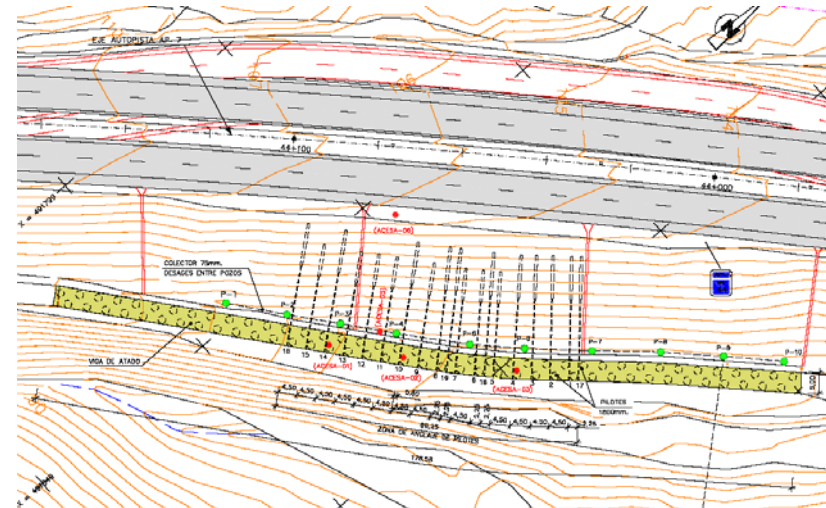


Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens

Movimiento de pilotes, anclaje y



Inclinómetro en pilote

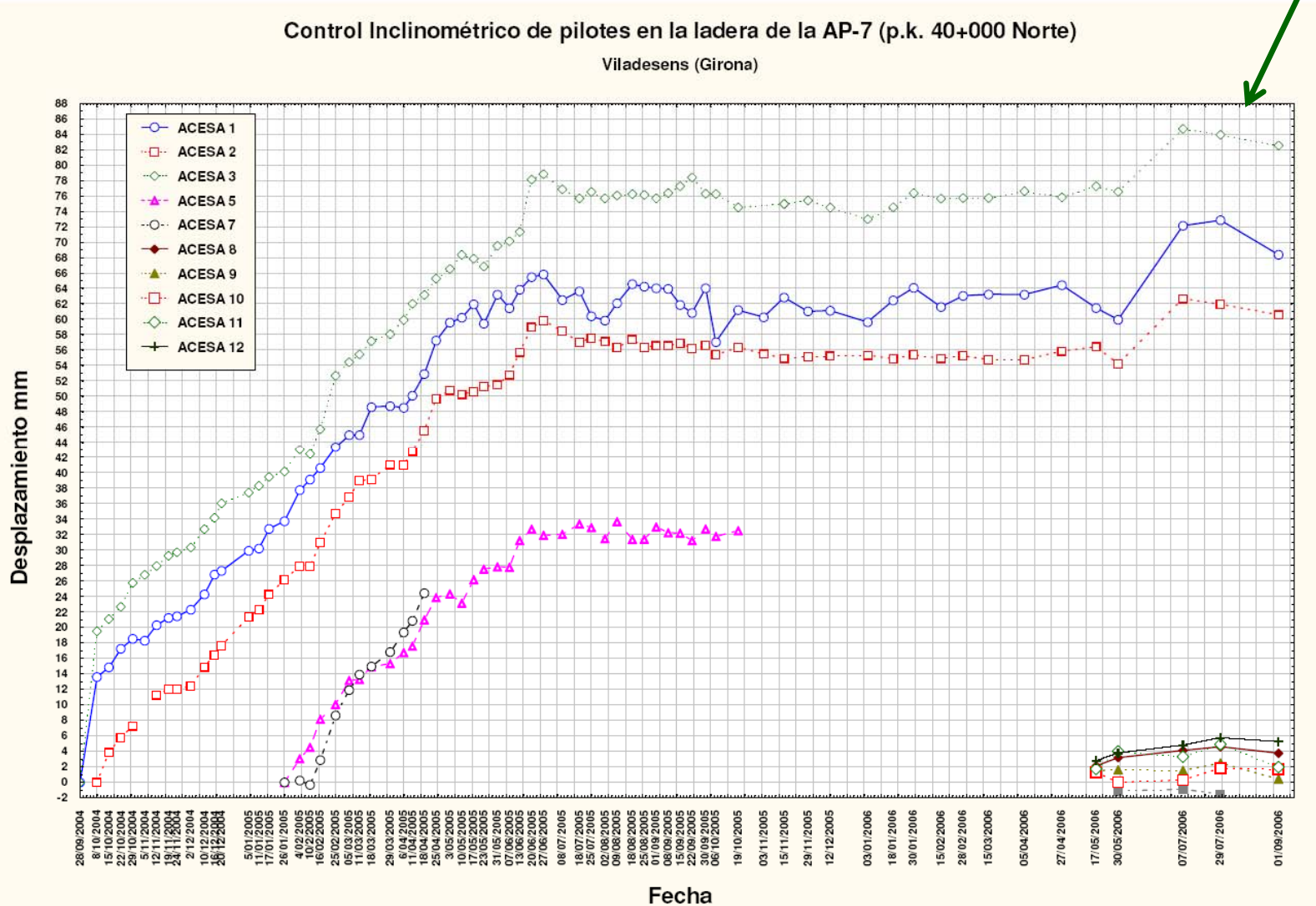


METODOLOGÍA BÁSICA DESARROLLO DEL ANÁLISIS

Viladesens (Gerona)

Estabilización...

...¿?



Conclusiones

1. La rotura de terraplenes (y desmontes) en laderas formadas por arcillas sobreconsolidadas de alta plasticidad resulta bastante frecuente
2. Habitualmente en la zona de deslizamiento existen previamente presiones intersticiales elevadas. Es muy deseable realizar un estudio hidrogeológico adecuado y medir ya en fase de proyecto. Frecuentemente los signos de existencia de agua y sus consecuencias, no se evalúan adecuadamente
3. La rotura se produce frecuentemente tras un proceso de degradación de resistencia, en ocasiones antes de alcanzar valores residuales
4. Los análisis retrospectivos son bastante deterministas (superficie de deslizamiento previamente conocida). Predecir la rotura no es sencillo
5. La combinación de pantallas de pilotes con sistemas de drenaje mediante pozos es efectiva. Hay que decidir no obstante cuánto confiar en el drenaje y qué esfuerzos pueden actuar sobre los pilotes
6. Las coacciones en cabeza (anclaje, encepado) resultan muy interesantes para limitar esfuerzos
7. Los métodos de muelles parecen conservadores. Los de EF con programas comerciales no están tan claros



EJEMPLOS



Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens



Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de San Sadurní



•Un nuevo viaducto para trenes de alta velocidad

•El viaducto de ferrocarril que sustituyó al terraplén original

El terraplén de la autopista

El vertido de un antiguo terraplén de ferrocarril

Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de San Sadurní



Terraplén de la Autopista AP-7 en SANT SADURNÍ



Terraplén de la Autopista AP-7 en SANT SADURNÍ



Estabilización de taludes mediante pilotes

Terraplén de la Autopista AP-7 en SANT SADURNÍ

Antecedentes del Ferrocarril

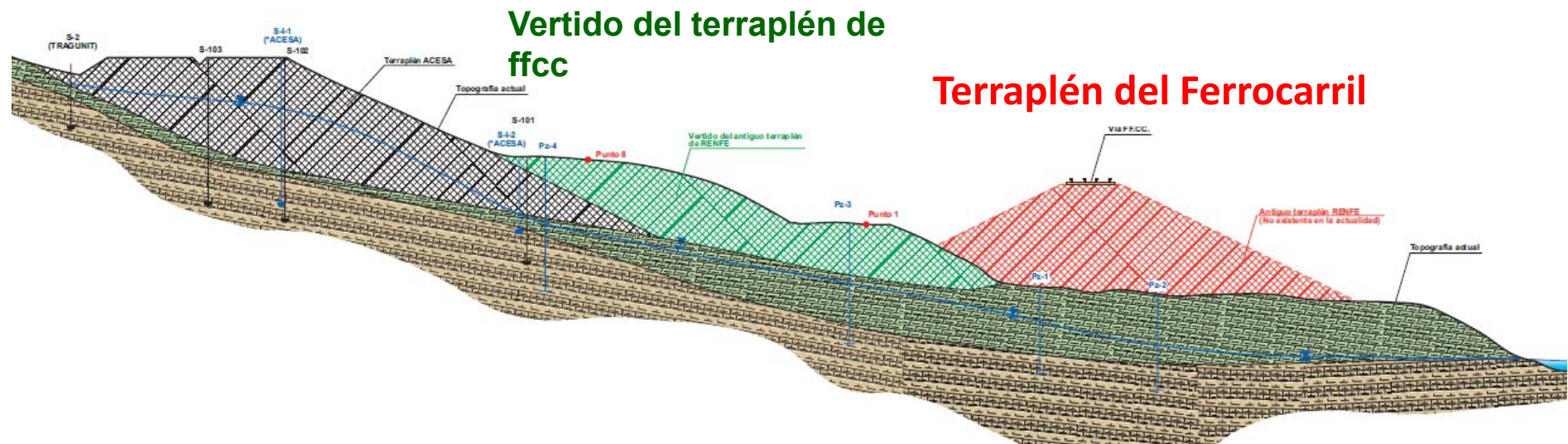
Se construyó en el siglo XIX (color rojo)

Sufrió grandes problemas de inestabilidad con cortes de vía → se cambió a viaducto en los años 80.

El material del terraplén se adosó (color verde) a la autopista (color gris)

El movimiento siguió,. Algunas pilas tuvieron que ser aislaron del terreno construyendo pantallas a modo de “tajamares” a su alrededor.

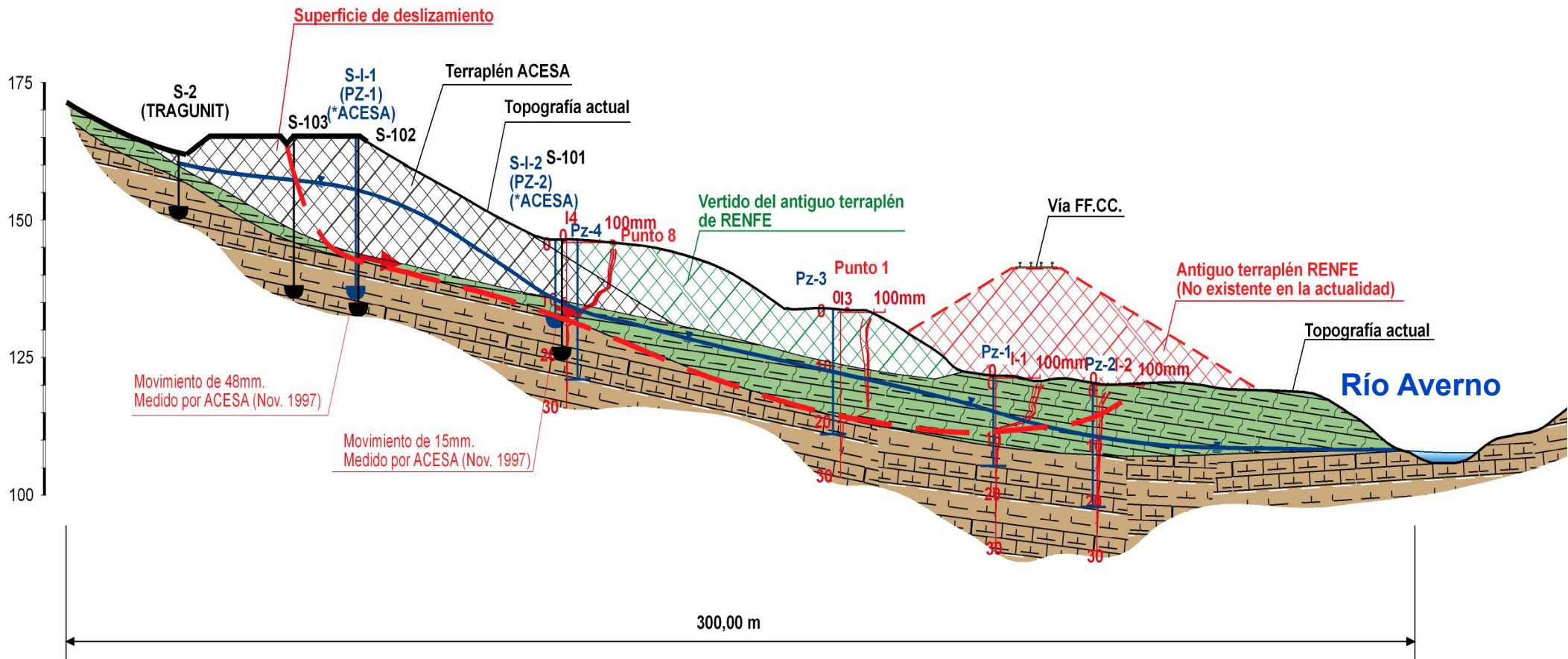
Terraplén autopista



Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de San Sadurní

La ladera esta formada por arcillas margosas de alta plasticidad (LL=55% ; IP=30%) con intercalaciones de arenisca. Muestra un potente nivel de alteración

Se instrumentó fuertemente toda la ladera con inclinómetros y piezómetros. Se detectó muy bien la superficie de deslizamiento



Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de San Sadurní

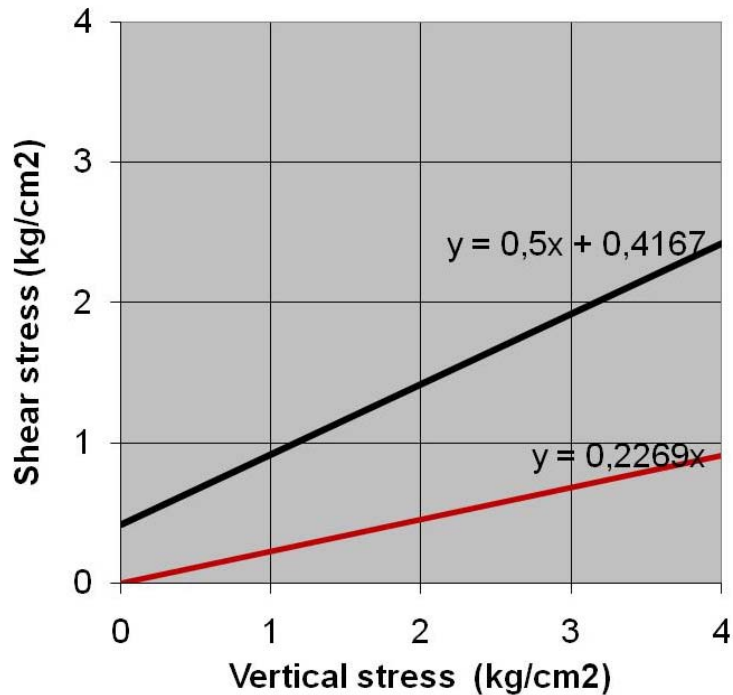
Las pilas pilote del viaducto se encuentran protegidas en el interior de “tajamares” de pantallas continuas, anclados contra la ladera.



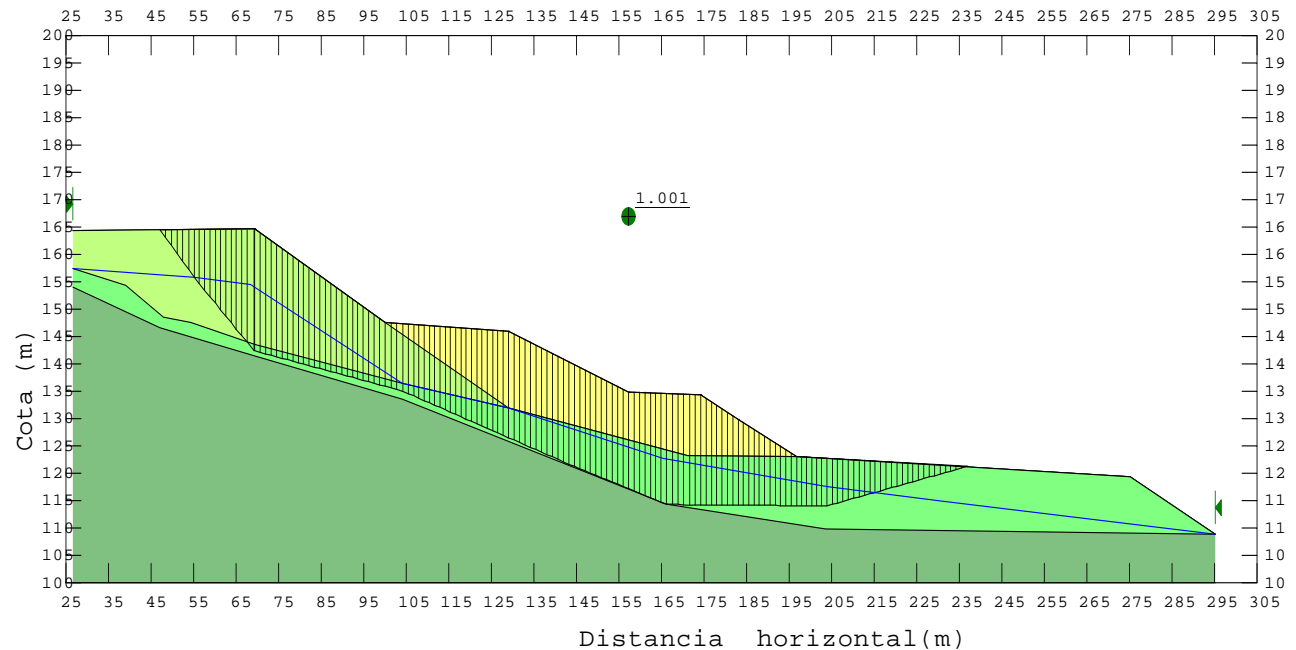
Dos geometrías distintas, correspondientes a dos fases de actuación en la ladera

Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de San Sadurní

Ensayos de laboratorio y retroanálisis



- Resistencia de pico (intacta): $c' = 50$ kPa; $\phi' = 23^\circ$
- Residual: $\phi' = 13 - 14^\circ$
- Rotura: $c' = 0$; $\phi' \cong 15^\circ$



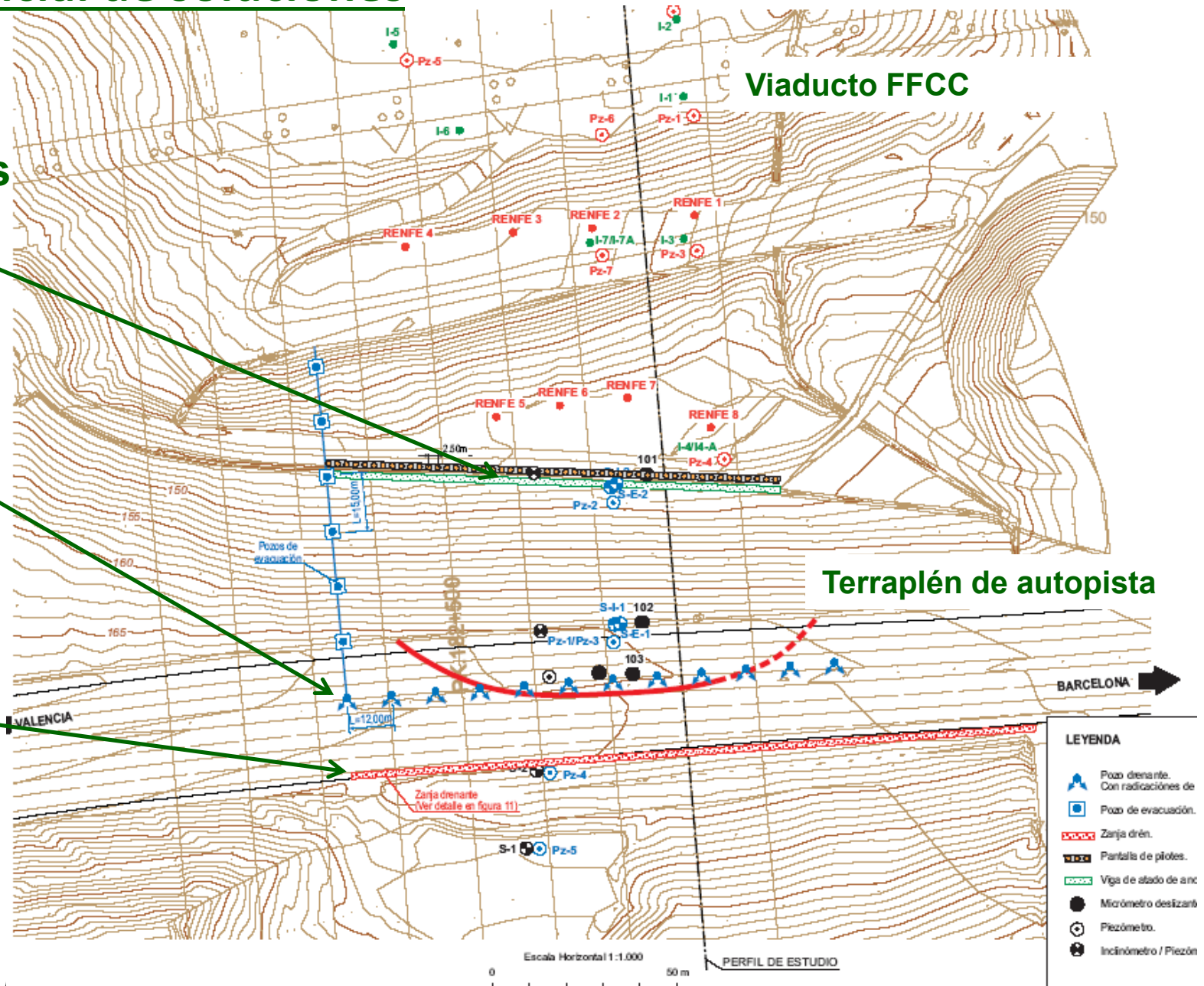
Autopista del Mediterráneo AP-7. San Sadurní

Planteamiento inicial de soluciones

Pantalla de pilotes anclada

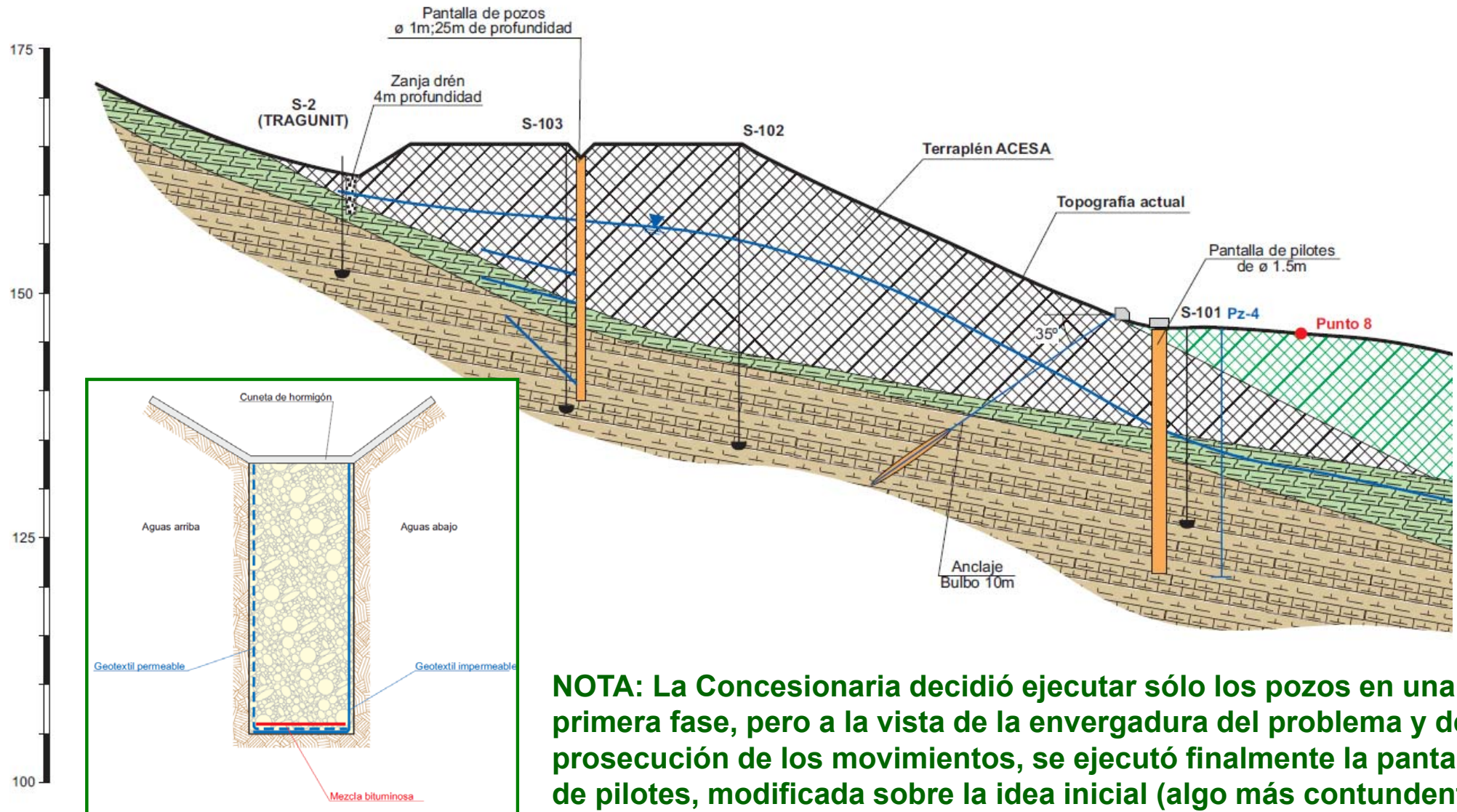
Pozos de drenaje

Zanja drenante



Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de San Sadurní

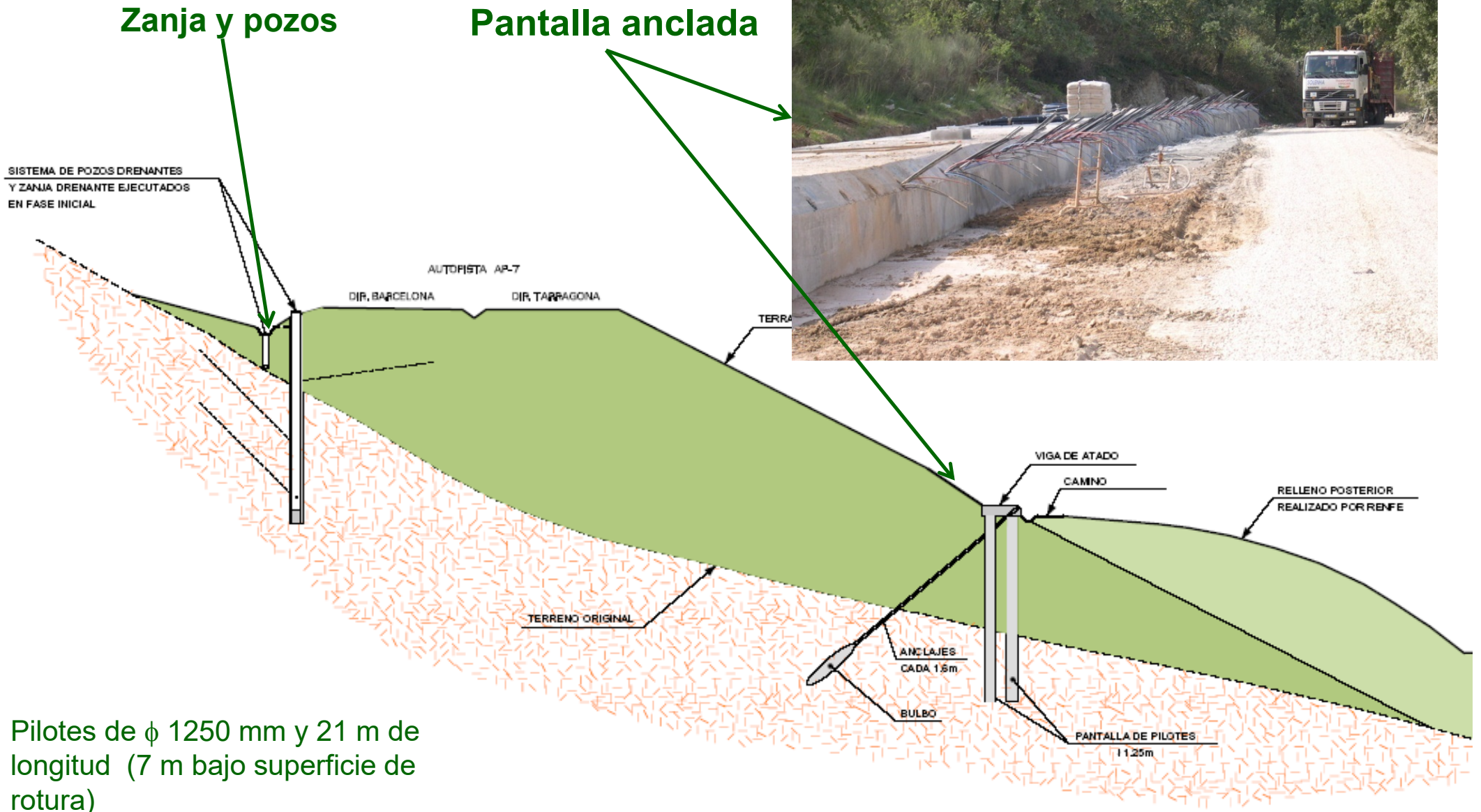
Planteamiento inicial de soluciones



NOTA: La Concesionaria decidió ejecutar sólo los pozos en una primera fase, pero a la vista de la envergadura del problema y de la prosecución de los movimientos, se ejecutó finalmente la pantalla de pilotes, modificada sobre la idea inicial (algo más contundente que la original)

Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de San Sadurní

Solución ejecutada



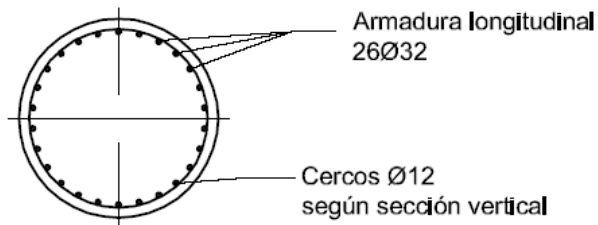
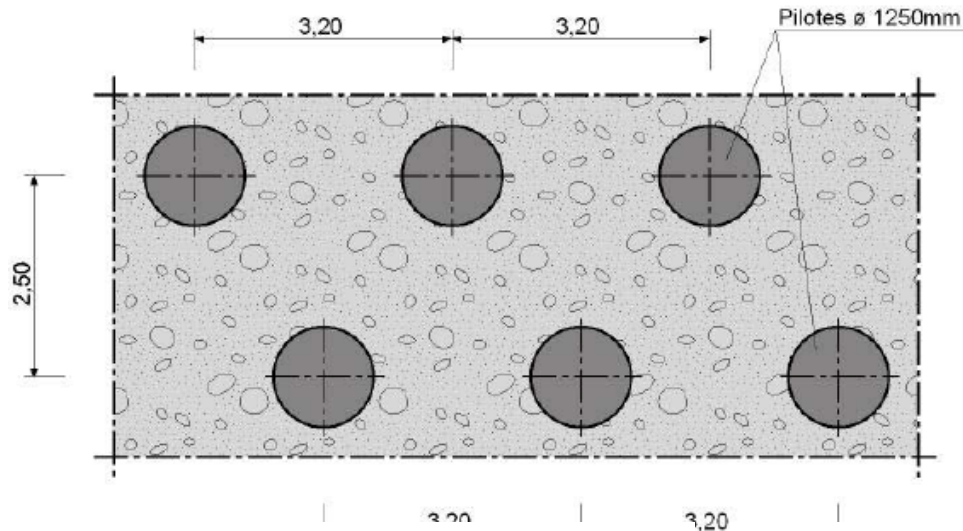
Pilotes de ϕ 1250 mm y 21 m de longitud (7 m bajo superficie de rotura)

Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de San Sadurní

Algunos detalles constructivos

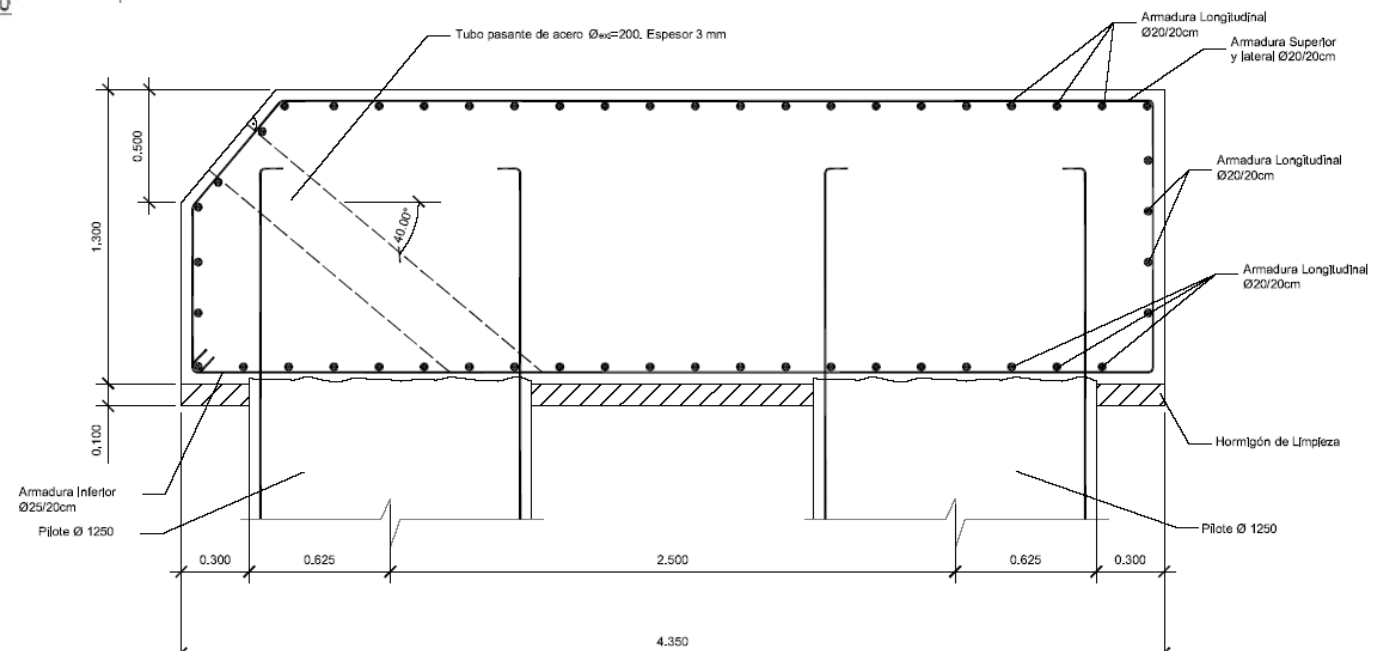
Anclajes cada 1.6 m

PLANTA DE DISTRIBUCIÓN DE PILOTES



Pilotes de ϕ 1250 mm y 21 m de longitud (7 m bajo superficie de rotura)

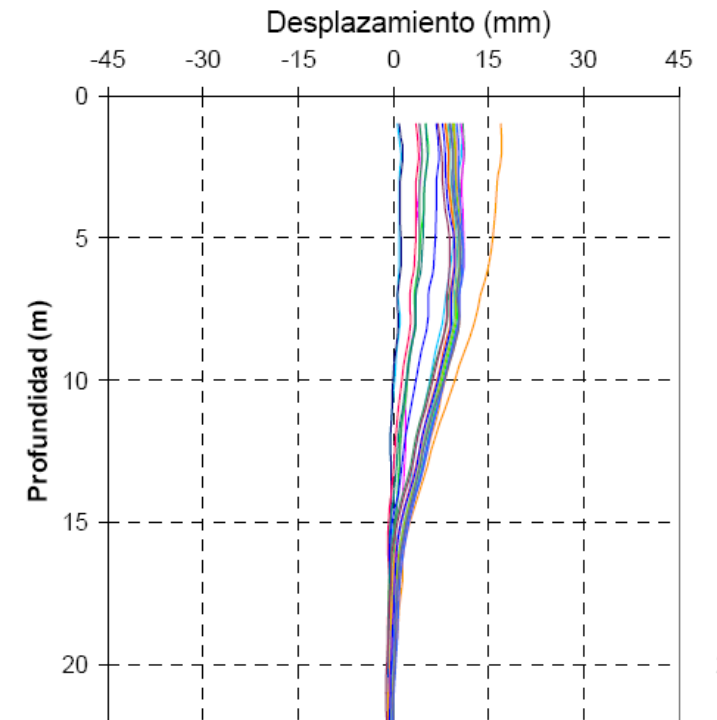
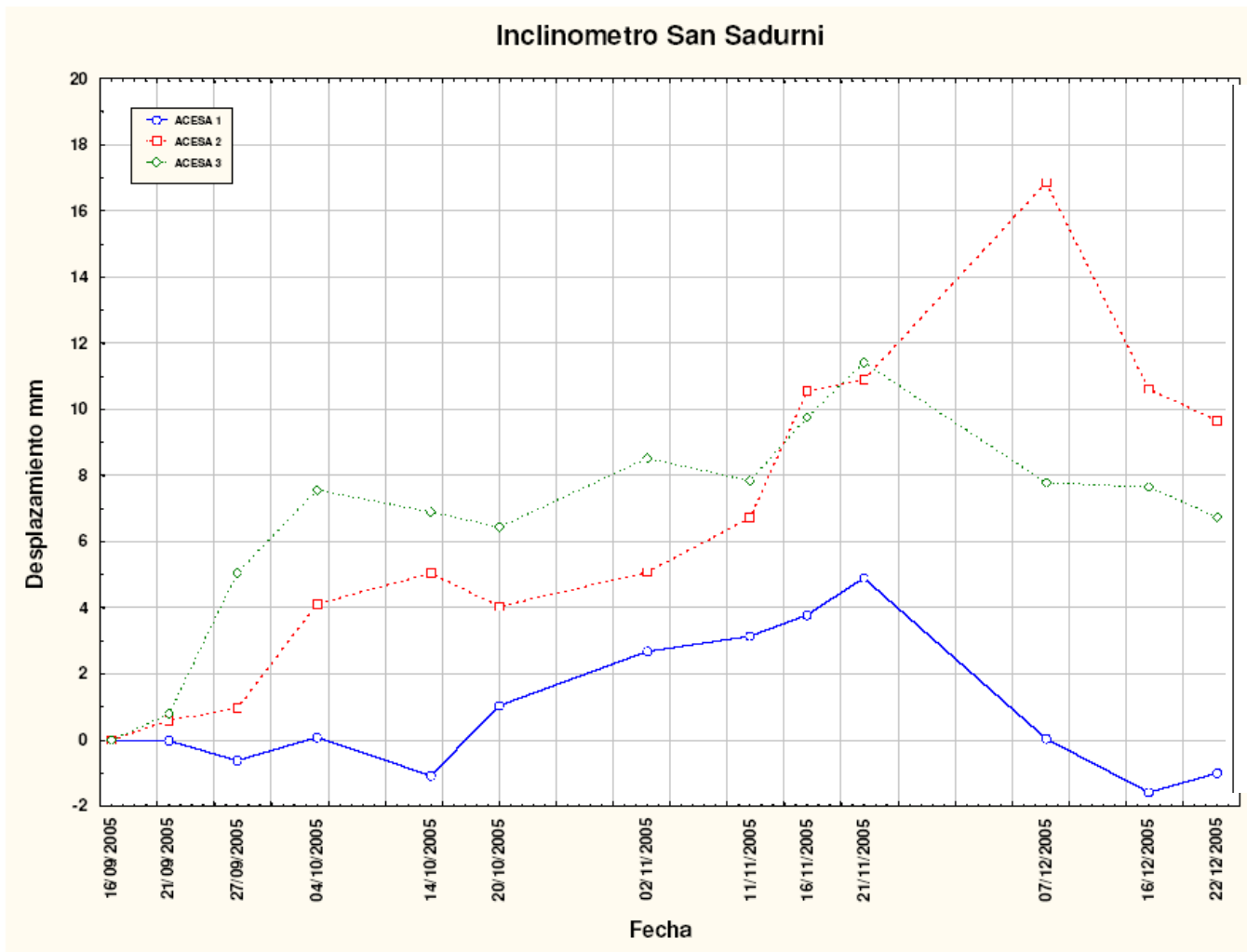
Tipo de anclaje:	Permanente de cables
nº de cables:	6 cables
tipo de cable:	Y 1860 S7 15.20
Diámetro perforación en el bulbo:	125 mm
Inclinación:	39 y 41º alternamente
Longitud libre:	20 m
Longitud de bulbo:	7 m
Cabeza:	Retesable (rabos largos)
Carga de tesado:	730 kN



Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de San Sadurní

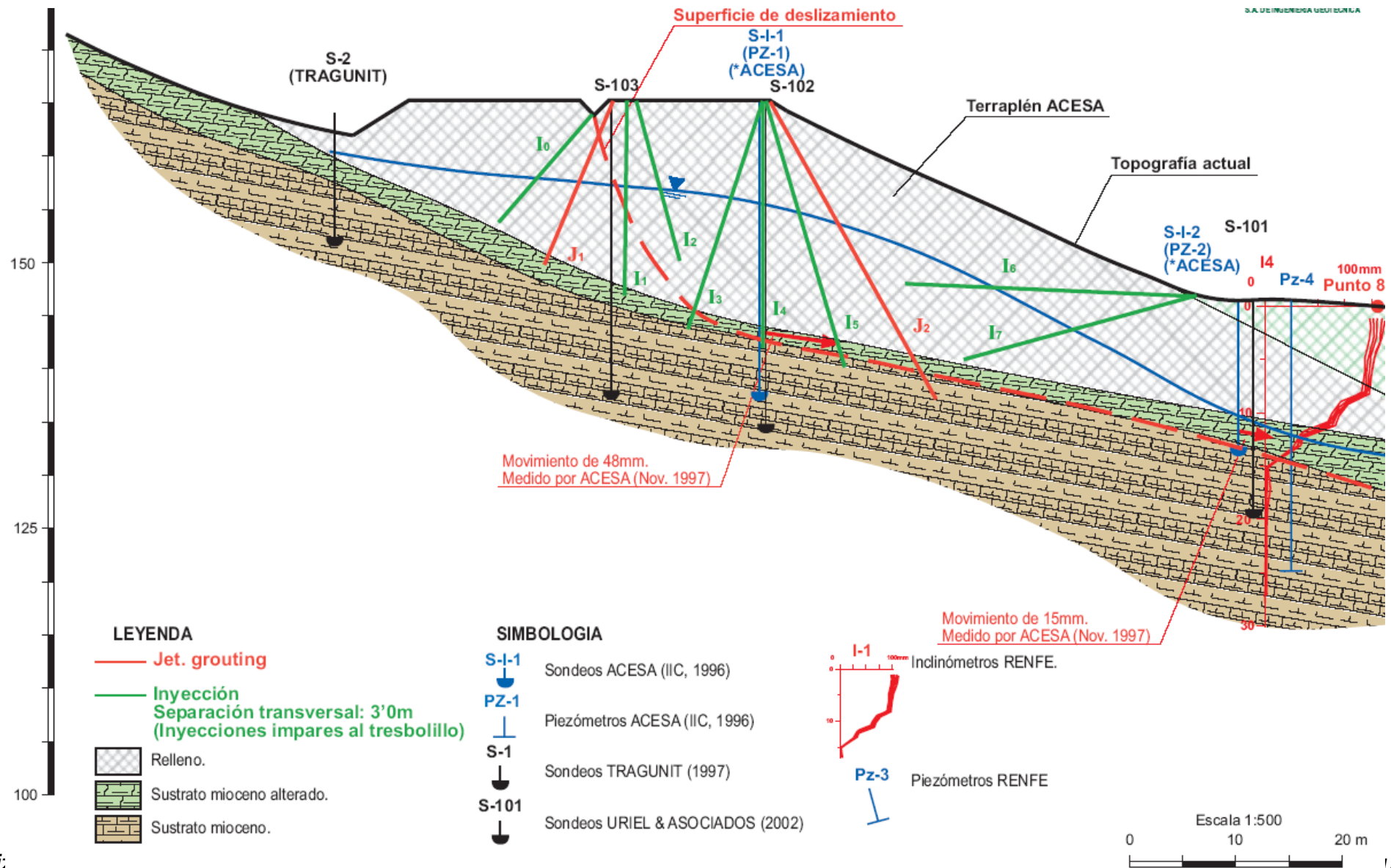
Algunos detalles de comportamiento

Se instalaron inclinómetros en pilotes y células de carga en anclajes. La entrada en carga de los anclajes redujo drásticamente los movimientos



Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de San Sadurní

Propuesta de tratamiento final del cuerpo del terraplén mediante inyecciones (jet-grouting y tubos-manguito)



Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de San Sadurní

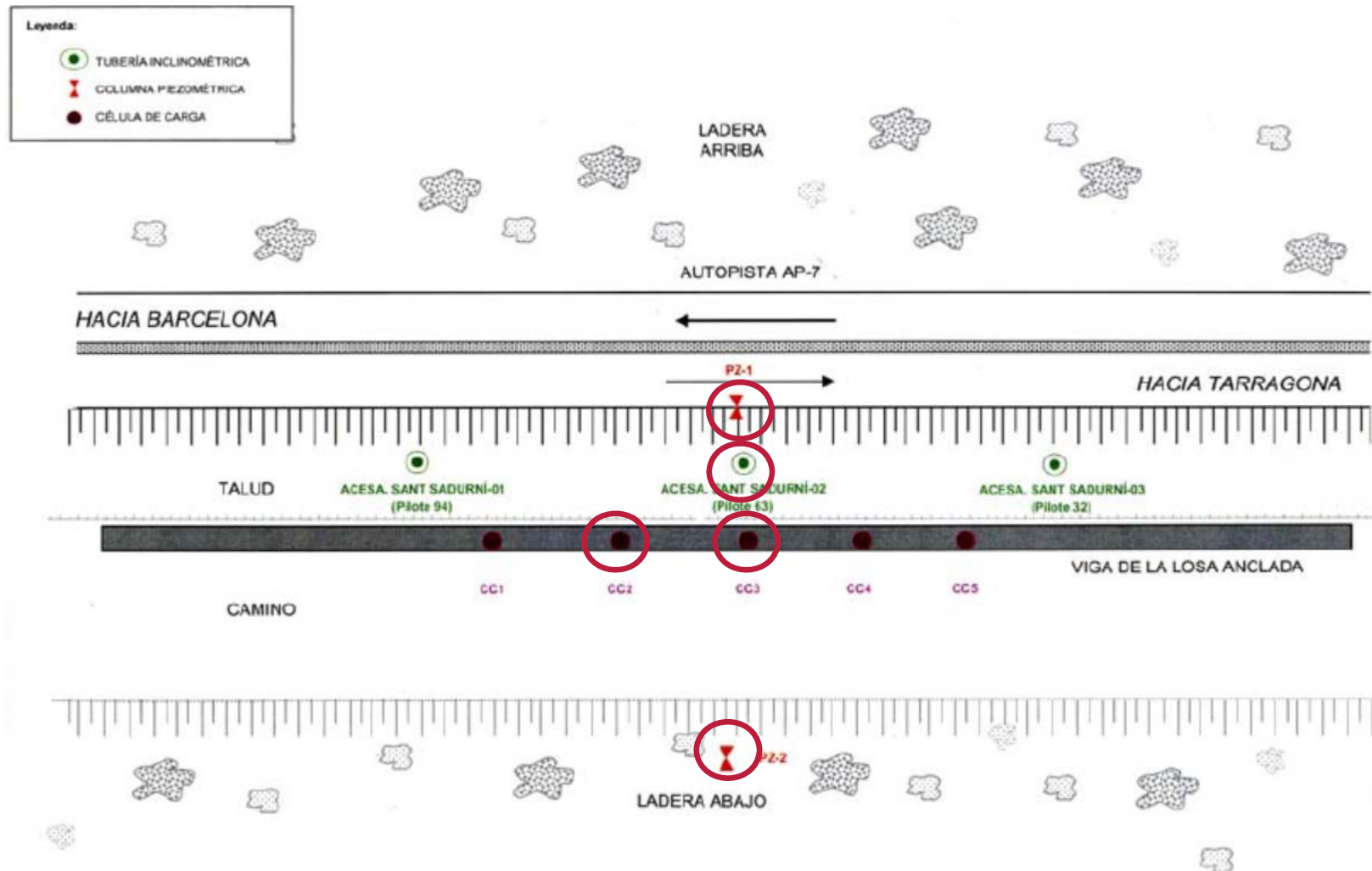
Mientras se ejecutaban estas medidas llegó el ferrocarril de alta velocidad y, siguiendo la tradición....



Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de San Sadurní

Últimos datos de auscultación disponibles (Proyecto de Refuerzo 2011; EPSA)

Situación de inclinómetros, piezómetros y células de carga



Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de San Sadurní

Últimos datos de auscultación disponibles (Proyecto de Refuerzo 2011; EPSA)
Inclinómetro central (pilote 63). Lecturas de finales 2010

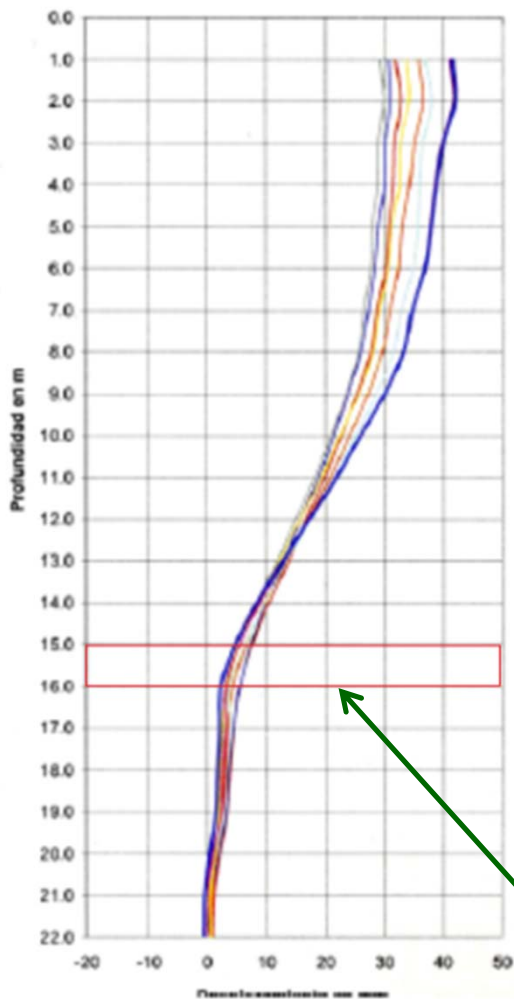
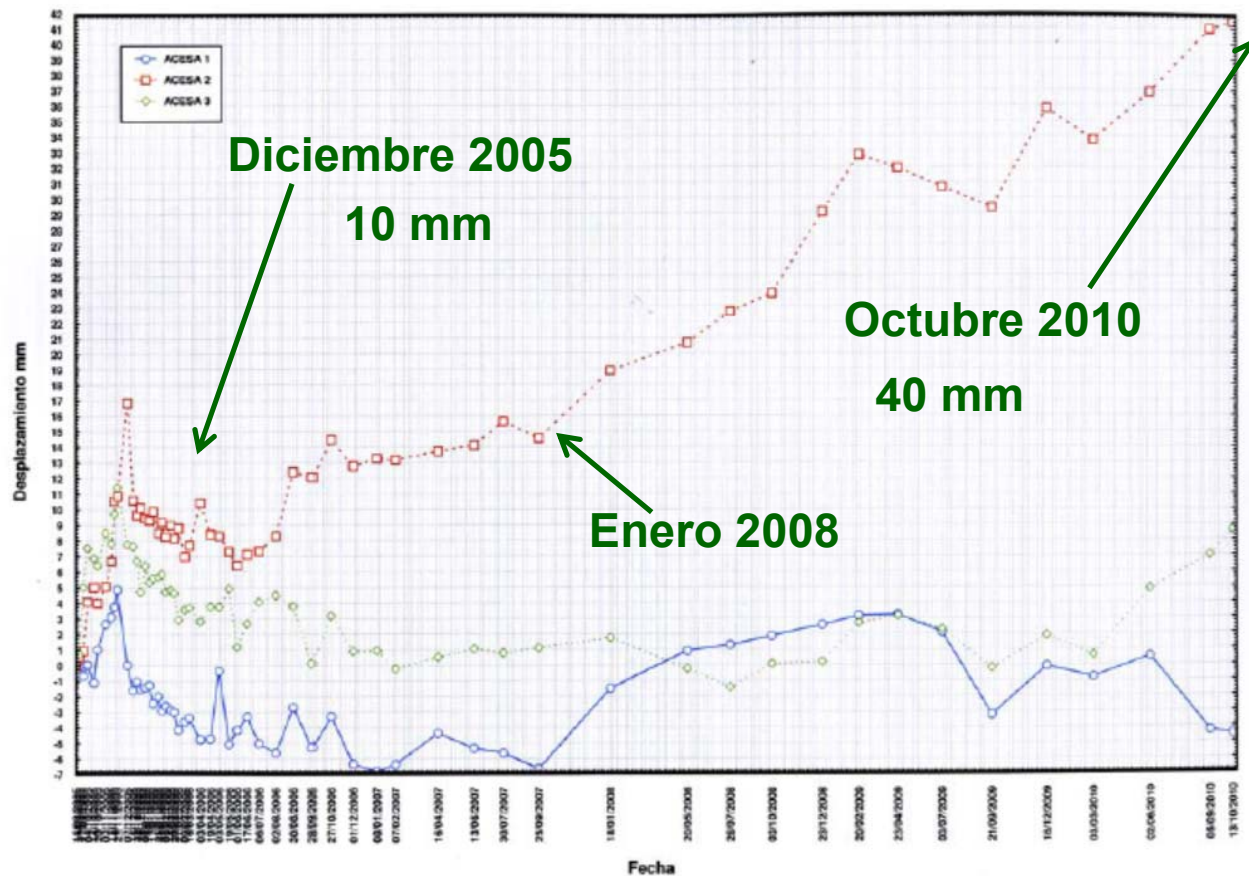


Figura 5.3

Franja de deslizamiento



Diciembre 2005
10 mm

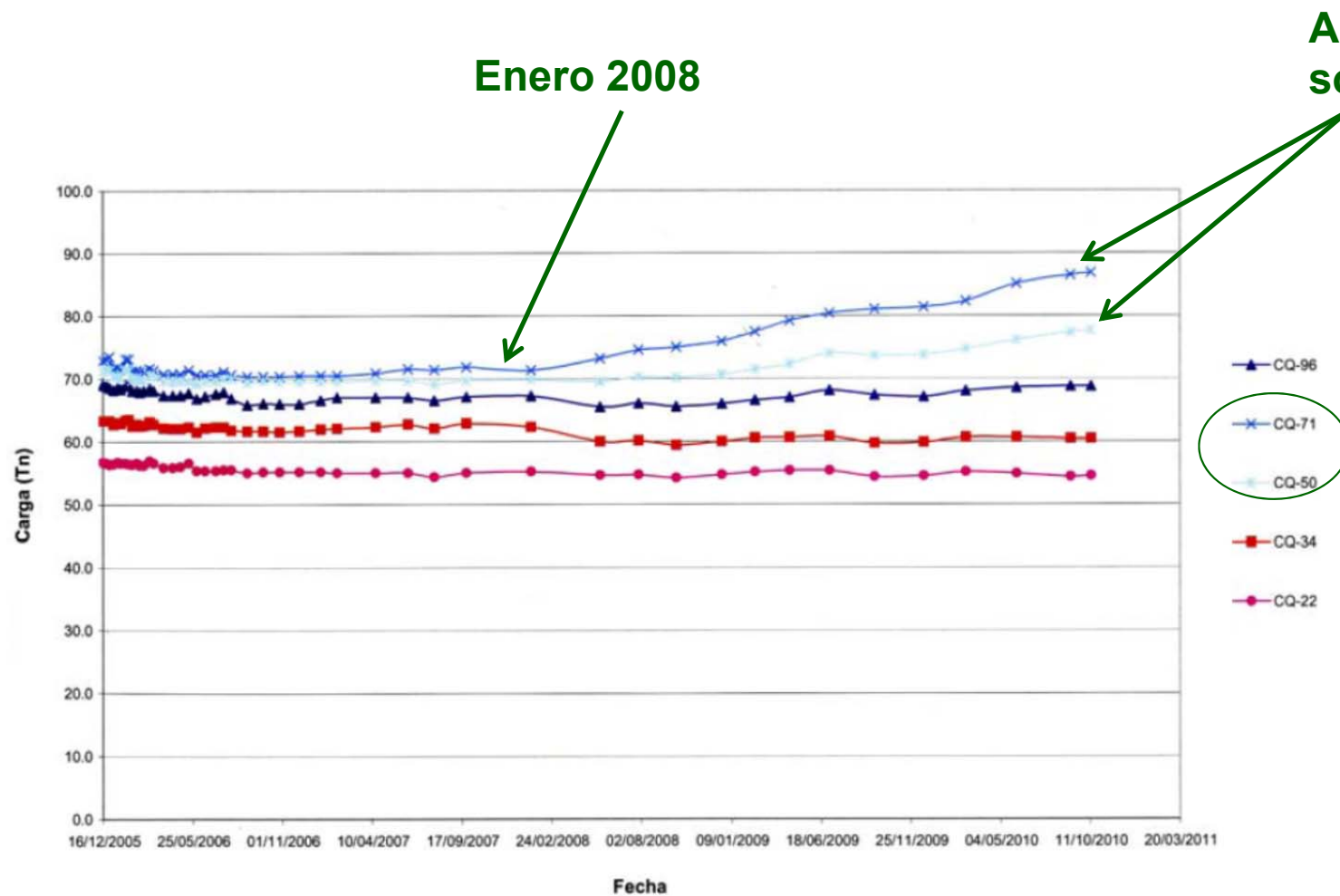
Octubre 2010
40 mm

Enero 2008

Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de San Sadurní

Últimos datos de auscultación disponibles (Proyecto de Refuerzo 2011; EPSA)

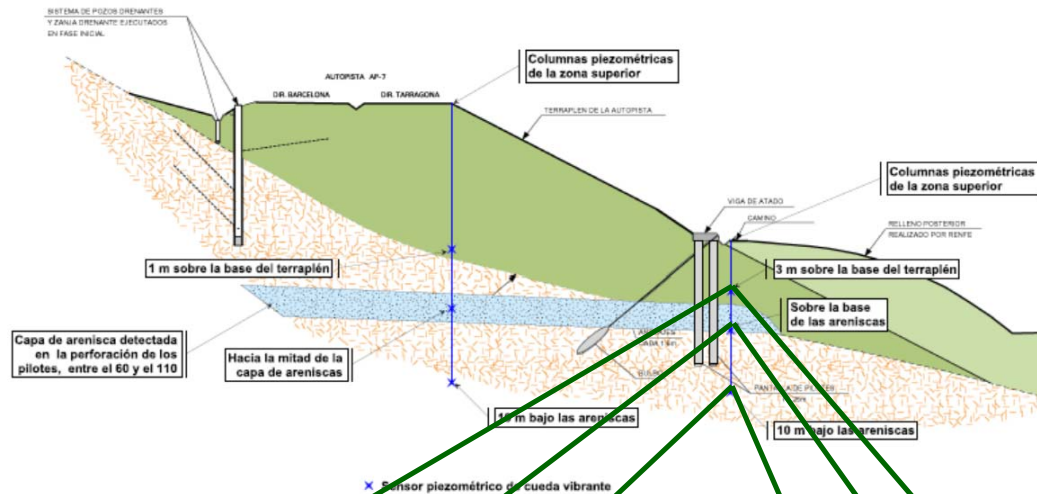
Células de carga



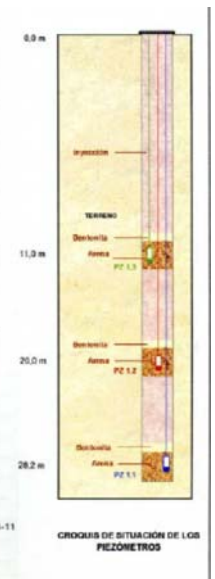
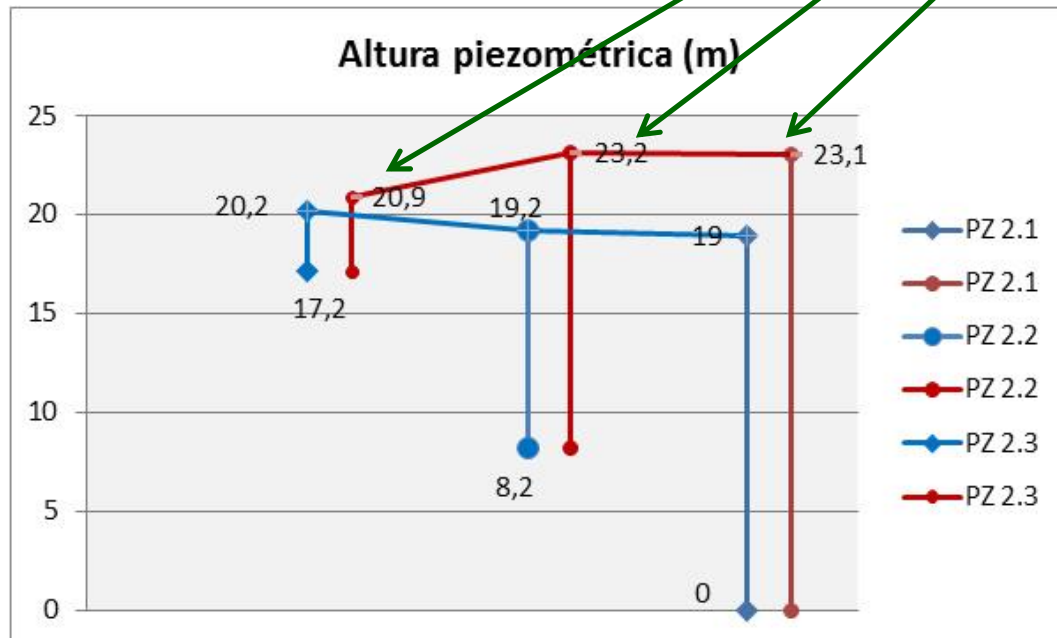
Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de San Sadurní

Últimos datos de auscultación disponibles (Proyecto de Refuerzo 2011; EPSA)

Piezómetros



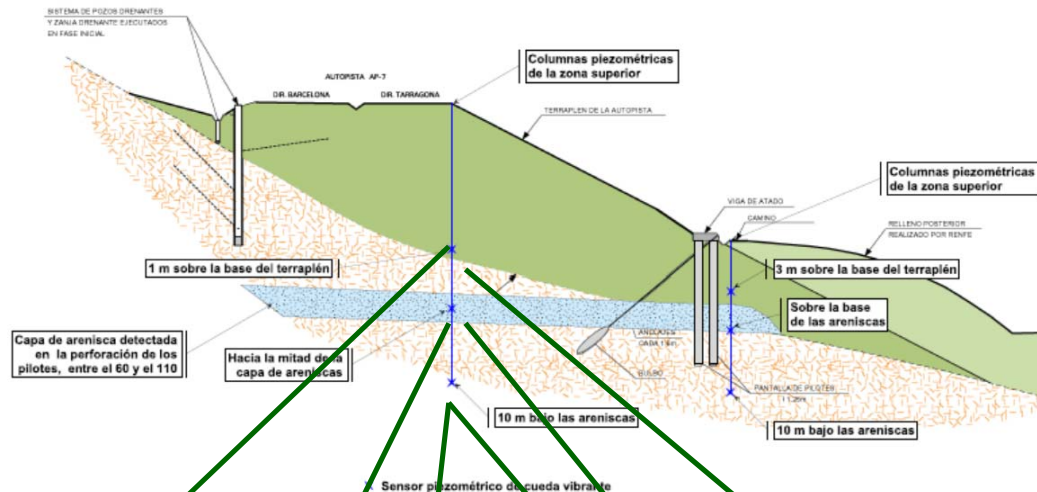
Sube la altura piezométrica unos 4 m en los piezómetros instalados en terreno natural (bajo el terraplén), especialmente a partir de comienzos de 2008



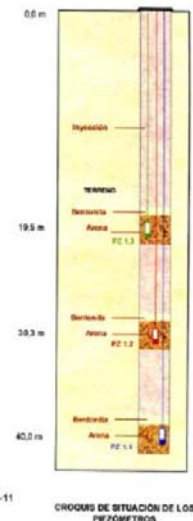
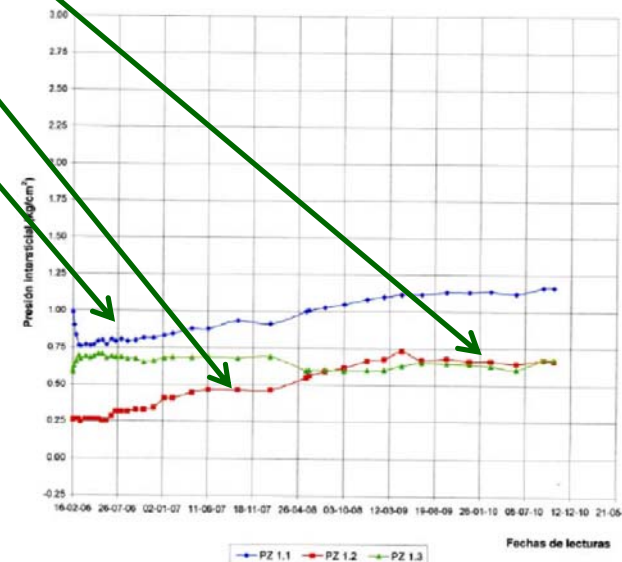
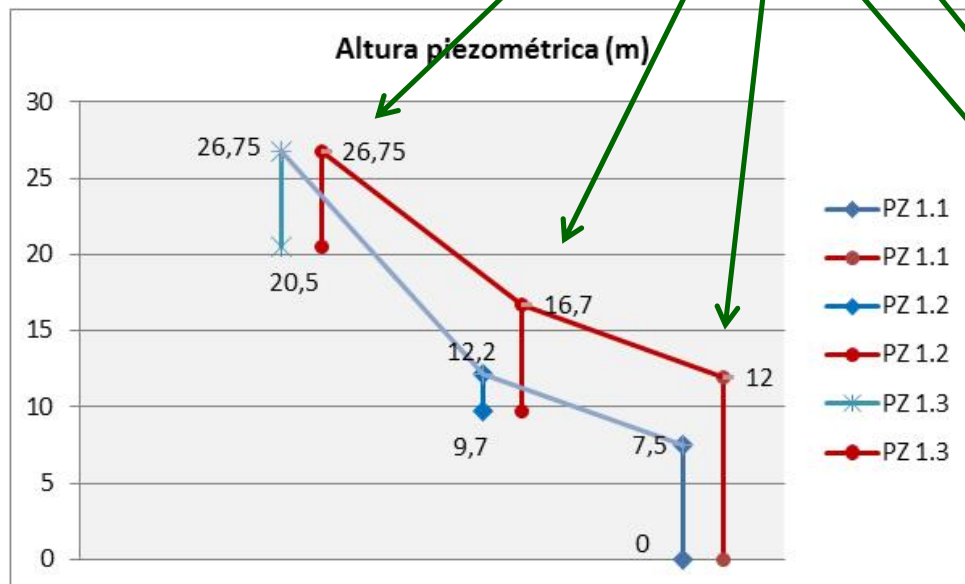
Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de San Sadurní

Últimos datos de auscultación disponibles (Proyecto de Refuerzo 2011; EPSA)

Piezómetros



Sube la altura piezométrica unos 4 m en los piezómetros instalados en terreno natural (bajo el terraplén), especialmente a partir de comienzos de 2008



Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Herrera. Desmante 4 Córdoba

Dio problemas durante obra, supuestamente superficiales. Se tendió a un talud 4H:1V, se ejecutó a su pie un muro de escollera de unos 2 m de altura y se trató en superficie con un geocompuesto impermeabilizante a base de una geomembrana, bentonita y geotextil, sobre la cual se colocaron geoceldas y se rellenaron con tierra vegetal. En algunas zonas del talud se colocó incluso un encachado con escollera de pequeño tamaño



Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Herrera. Desmonte 4 Córdoba

Se produjo el deslizamiento poco antes de la inauguración de la línea. La superficie se detectó con inclinómetros a 15 – 17 m de profundidad.

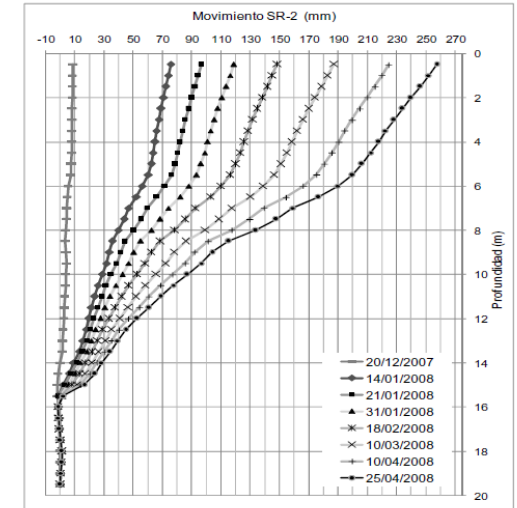
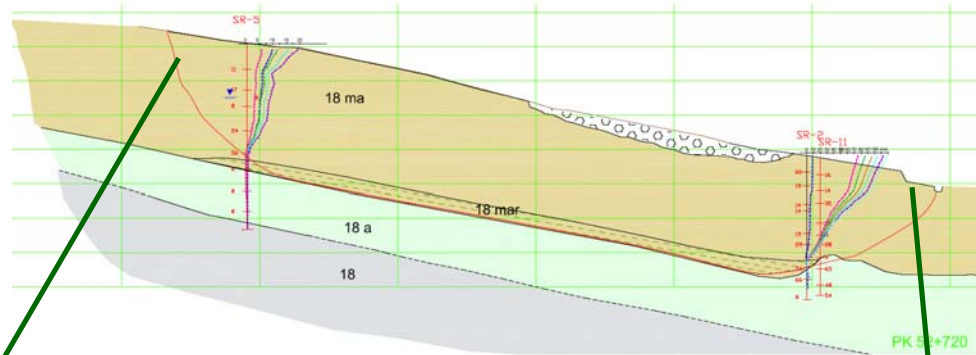


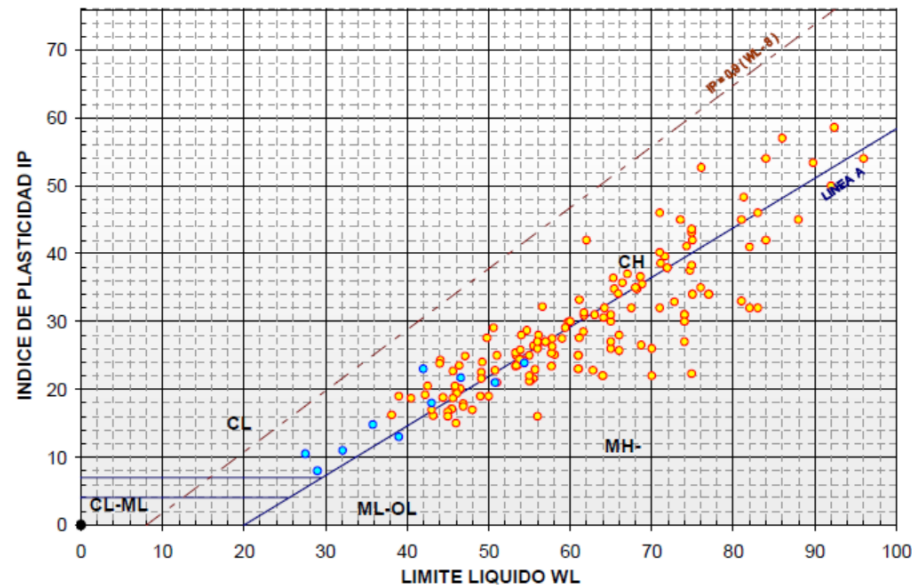
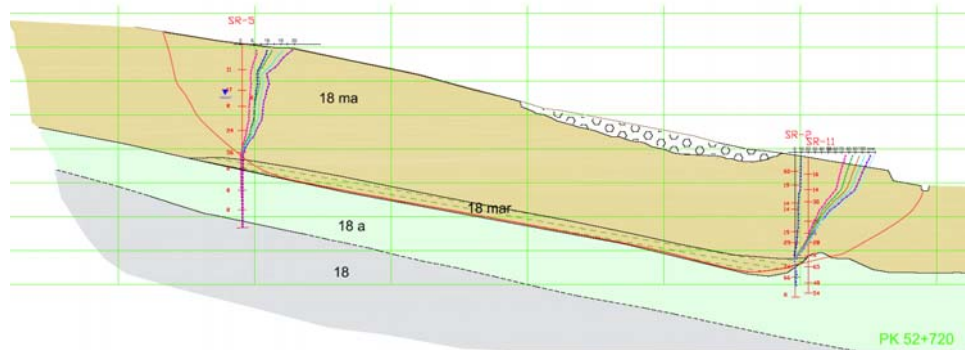
Figura 5. Evolución de movimientos con el tiempo en el inclinómetro SR-2, en el pie del desmorte.



Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Herrera.

Desmante 4. Córdoba

Arcillas de colores grises y verdosos, plegadas, fisuradas, con lisos y planos estriados (procesos de emplazamiento alóctono). Alto contenido en arcilla (45%). Minerales montmorilloníticos. Zonas muy alteradas hasta 15-18 m bajo superficie.



	Pico C'	f'	Residual f _r '
18ma	23-54*	15	10
18a	35	18	11

Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Herrera. Desmante 4. Córdoba



Intercalaciones de arenas y areniscas



Texturas de la arcilla

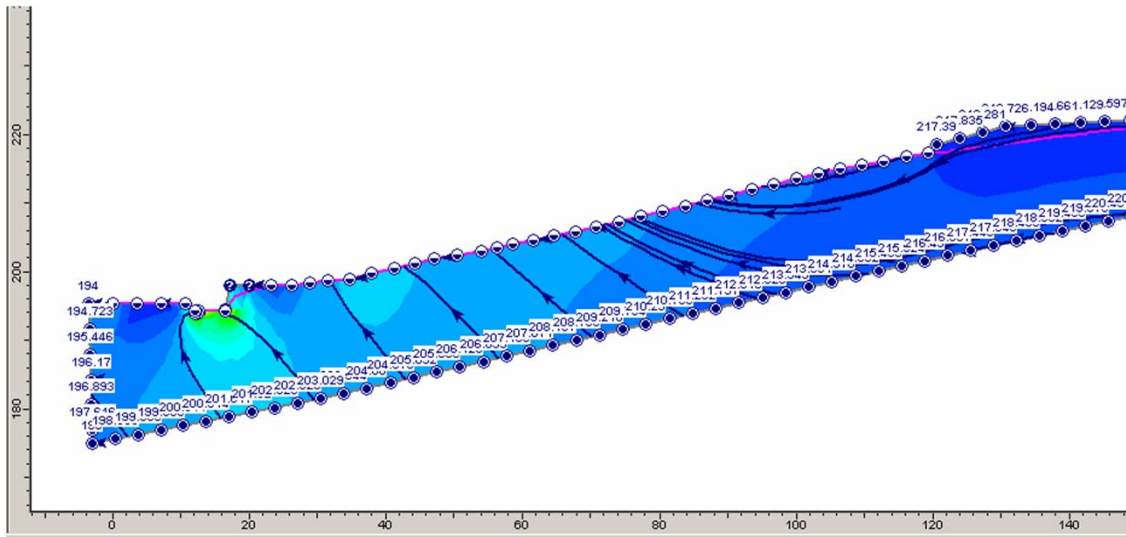


Estabilización de taludes mediante pilotes

Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Herrera.

Desmonte 4. Córdoba

Se detectaron condiciones artesianas, con cota piezométrica situada hasta 4 m por encima de la superficie del terreno



Modelo de flujo implementado en cálculo

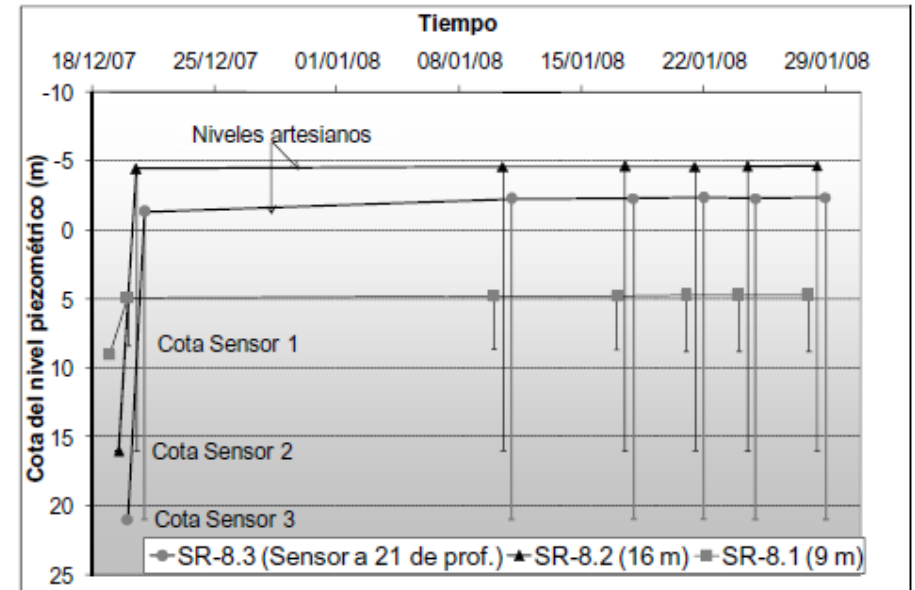
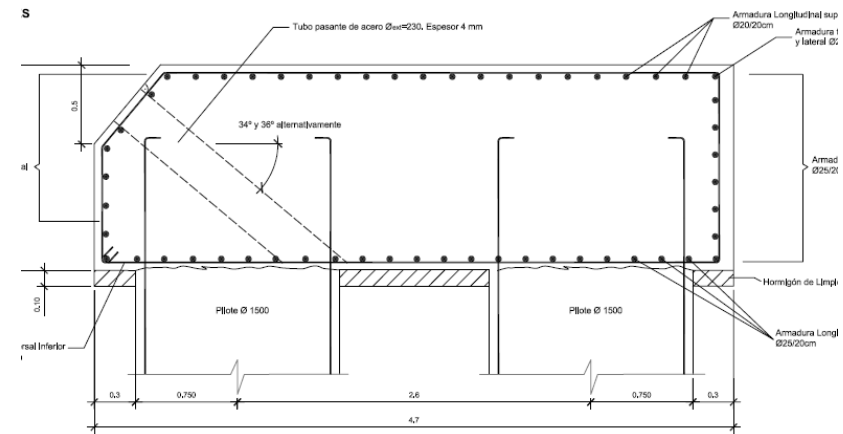
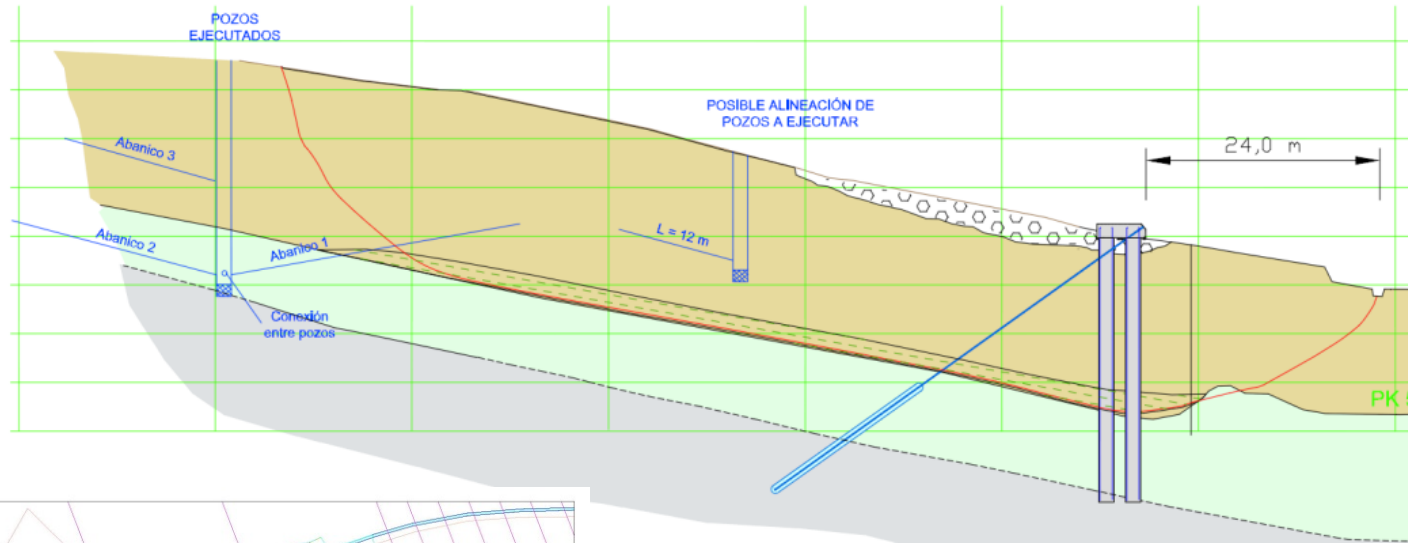


Figura 7. Evolución de niveles piezométricos. Columna de sensores en el sondeo SR-08.

Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Herrera.

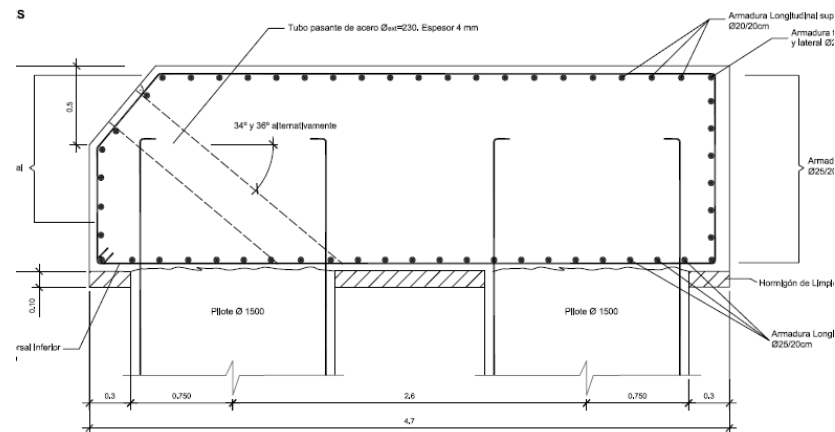
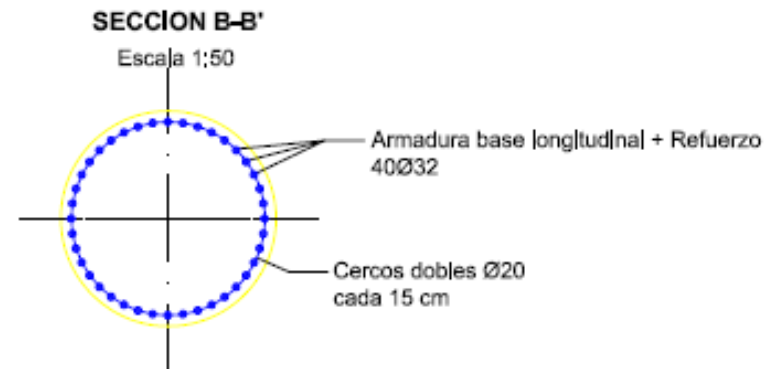
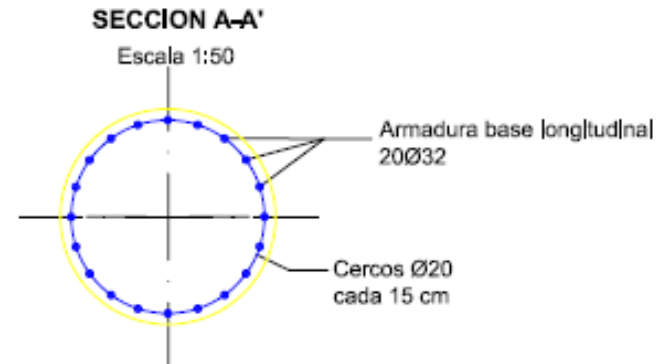
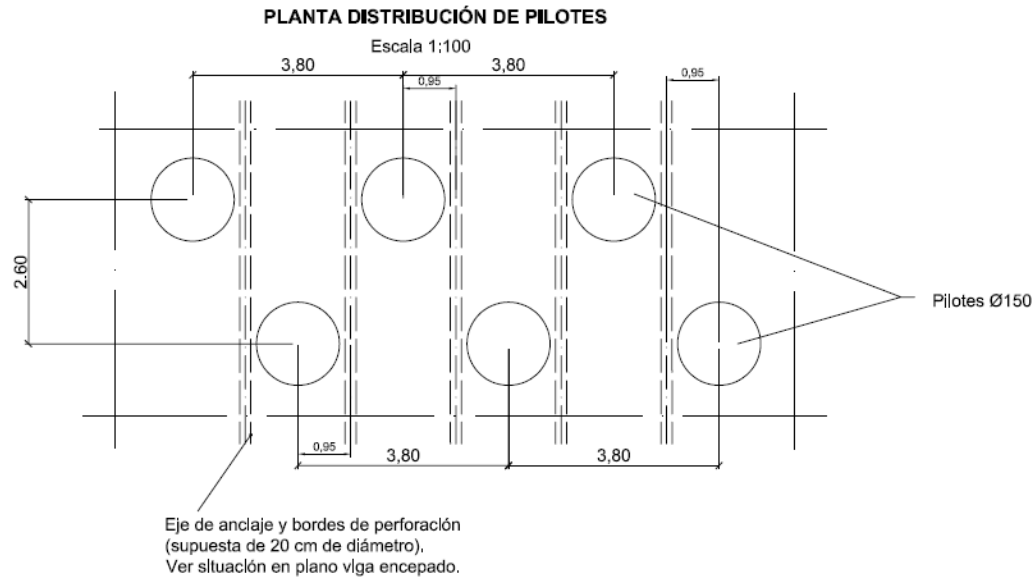
Desmante 4. Córdoba

Actuaciones: Pozos de drenaje y pantalla de pilotes de 1,5 m de diámetro y 27 m de profundidad, al tresbolillo y con anclajes de 900 kN



Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Herrera.

Desmante 4. Córdoba



Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Herrera. Desmante 4. Córdoba

La efectividad de los pozos, salvados algunos inconvenientes iniciales, fue espléndida



Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Herrera. Desmante 4. Córdoba

La efectividad de los pozos, salvados algunos inconvenientes iniciales, fue espléndida

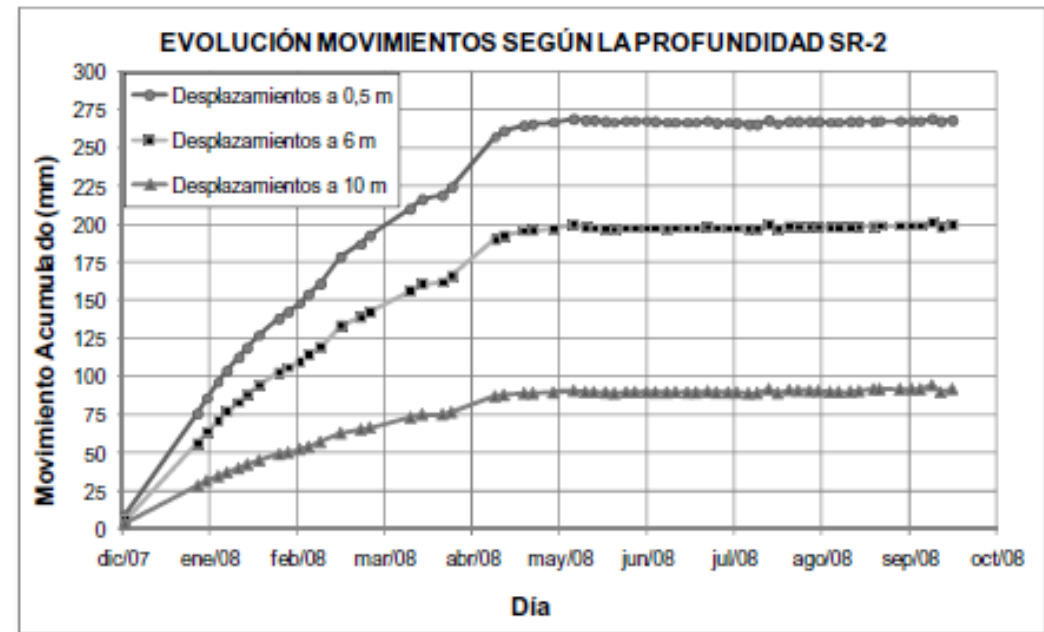
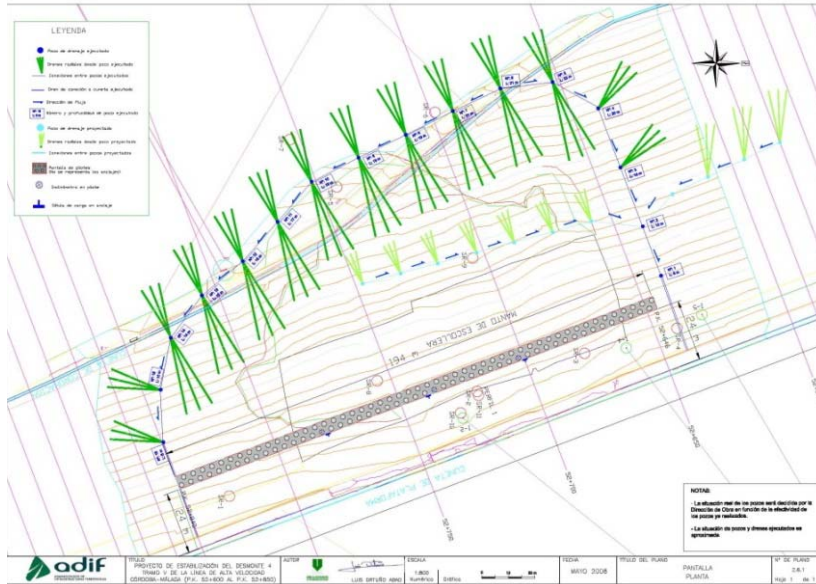


Figura 14. Movimientos en el inclinómetro SR-2 después de ejecutar la solución de drenaje.

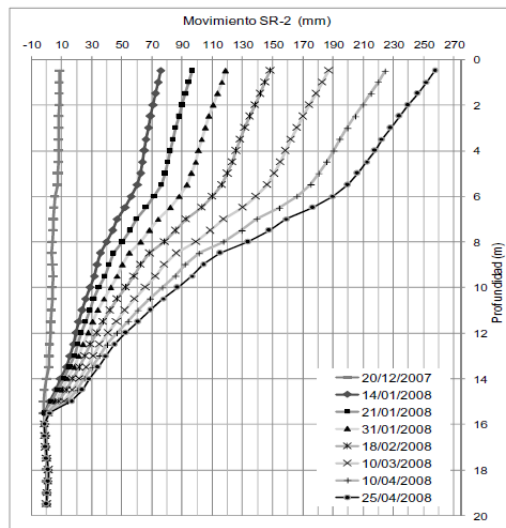


Figura 5. Evolución de movimientos con el tiempo en el inclinómetro SR-2, en el pie del desmante.

Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Herrera. Desmonte 4. Córdoba



Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Herrera. Desmante 4. Córdoba



Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Herrera. Desmonte 4. Córdoba



Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Herrera. Desmante 4. Córdoba



Fotografías 1: Vista general de la pantalla de pilotes.

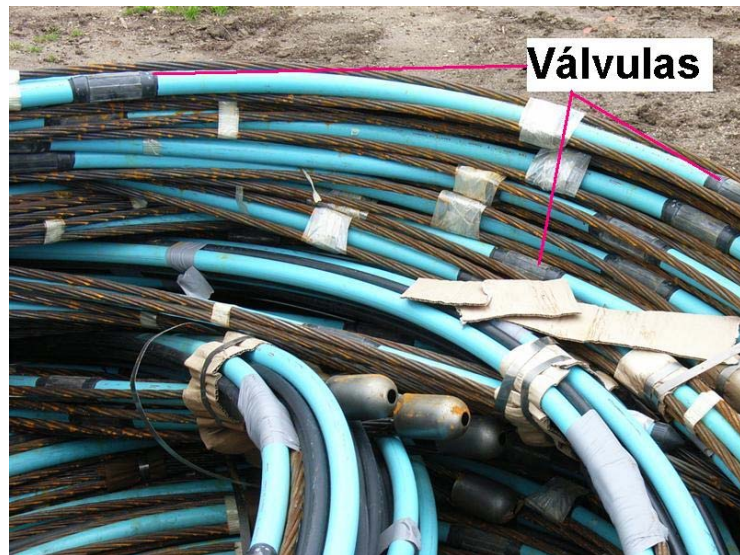
Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Herrera. Desmonte 4. Córdoba



EJECUCIÓN. INYECCIÓN

Inyección repetitiva selectiva IRS

Tubo flexible para inyección IRS.
Anclajes provisionales



Válvula antirretorno. Anclaje permanente.
INYECCIÓN IRS. TUBERÍA FLEXIBLE.



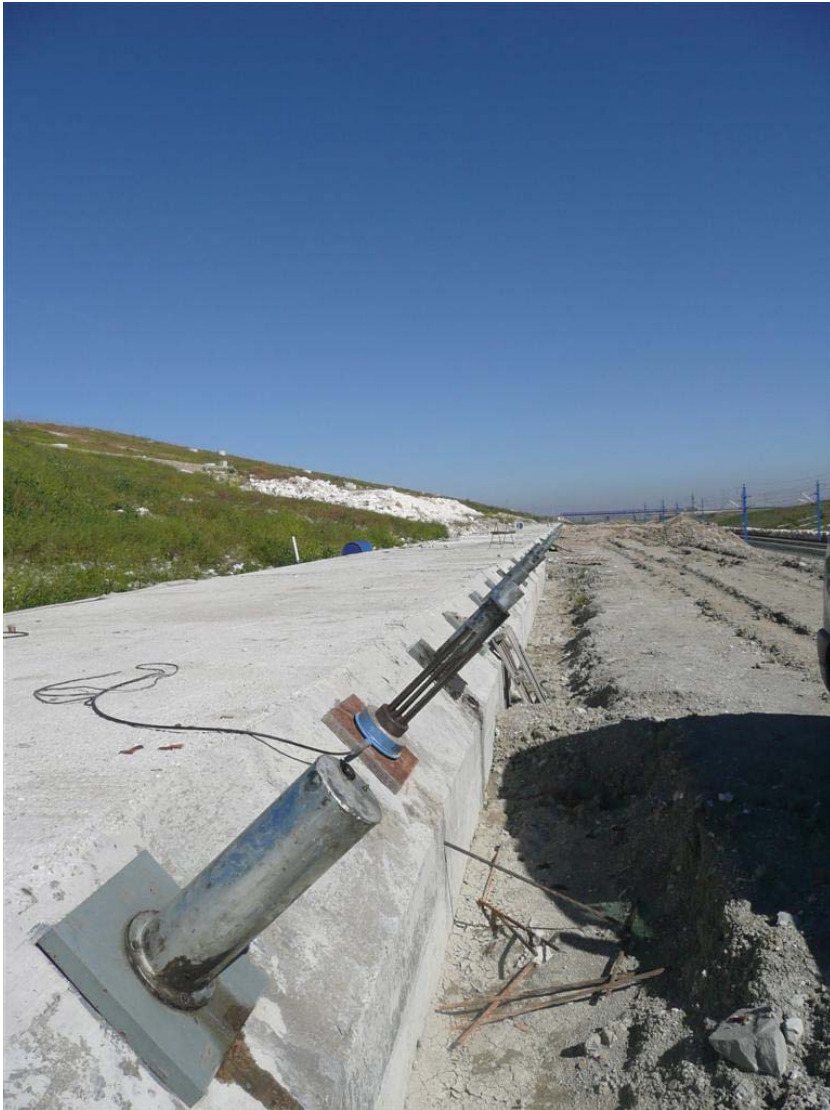
EJECUCIÓN. INYECCIÓN

Inyección repetitiva selectiva IRS



Obturador doble de membrana para inyección IRS por el interior de tuberías de pequeño diámetro. Salida de lechada en tramo en espiral

Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Herrera. Desmante 4. Córdoba



Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens



24-MAYO-2004



Alonso, E., Oliden, J. & Ortuño, L. (2004)

Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens

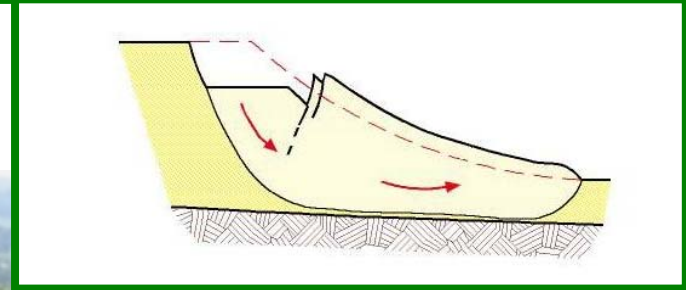
31-MAYO-2004



Pantalla de micropilotes

Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens

31-MAYO-2004



Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens

31-MAYO-2004



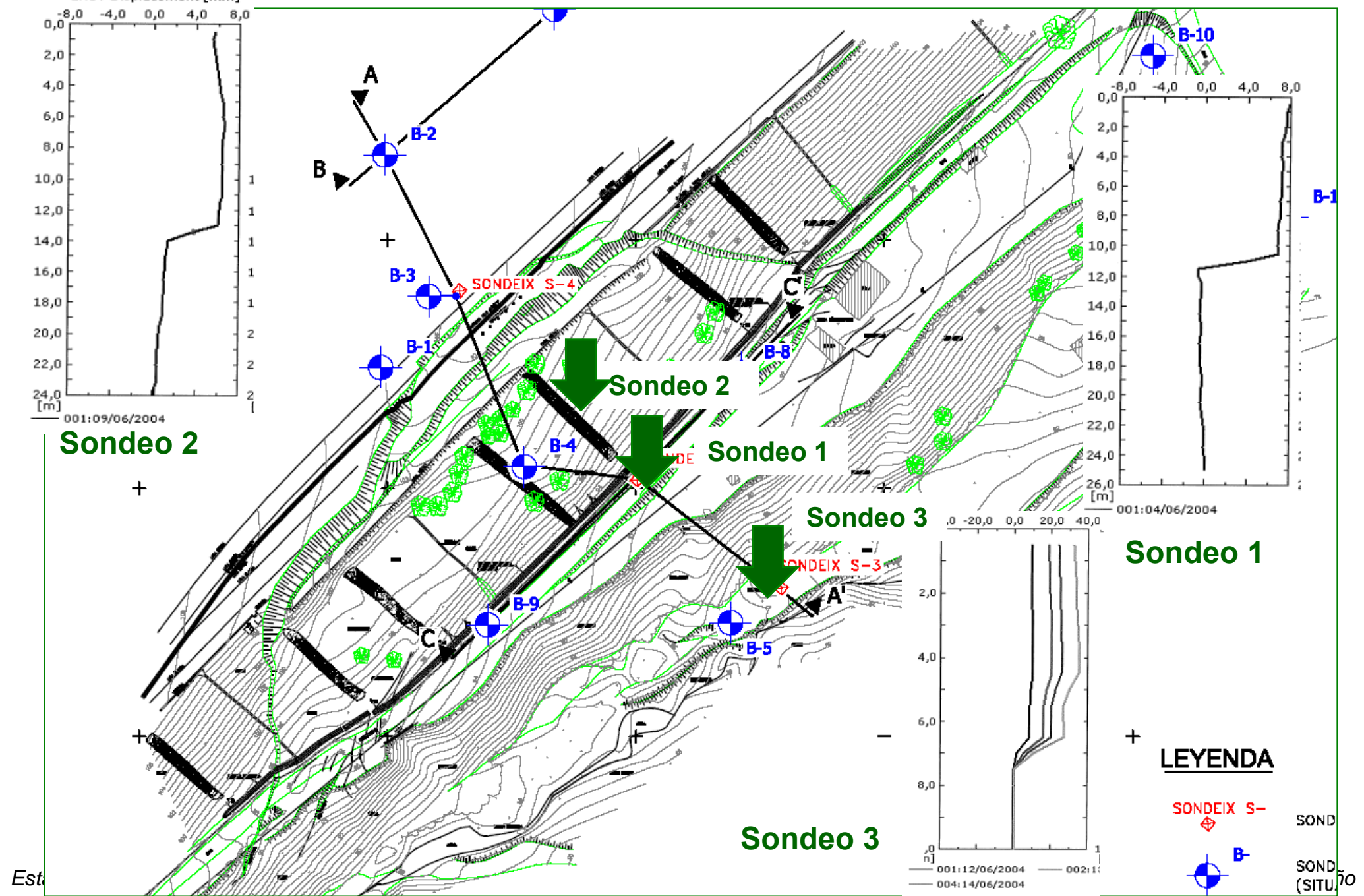
Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens

31-MAYO-2004

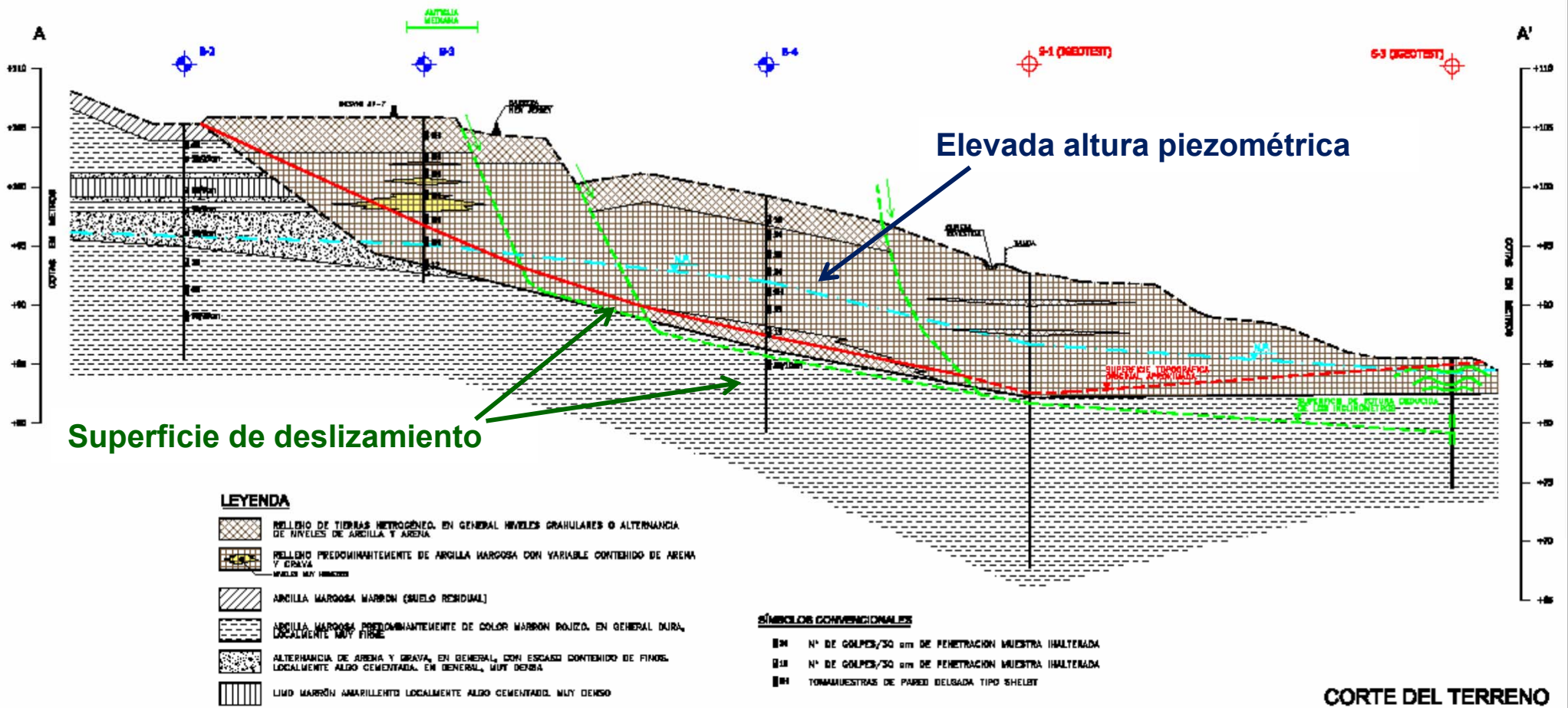
Pie del deslizamiento “algo difuso”



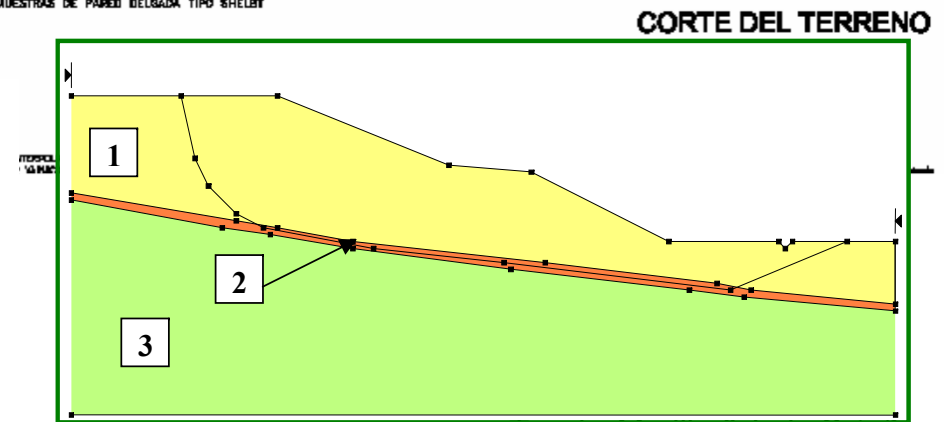
Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens



Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens



Los inclinómetros revelaron que el deslizamiento era marcadamente traslacional, y que la superficie de rotura se situaba en el sustrato arcilloso alterado, cerca de la base del terraplén



Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens

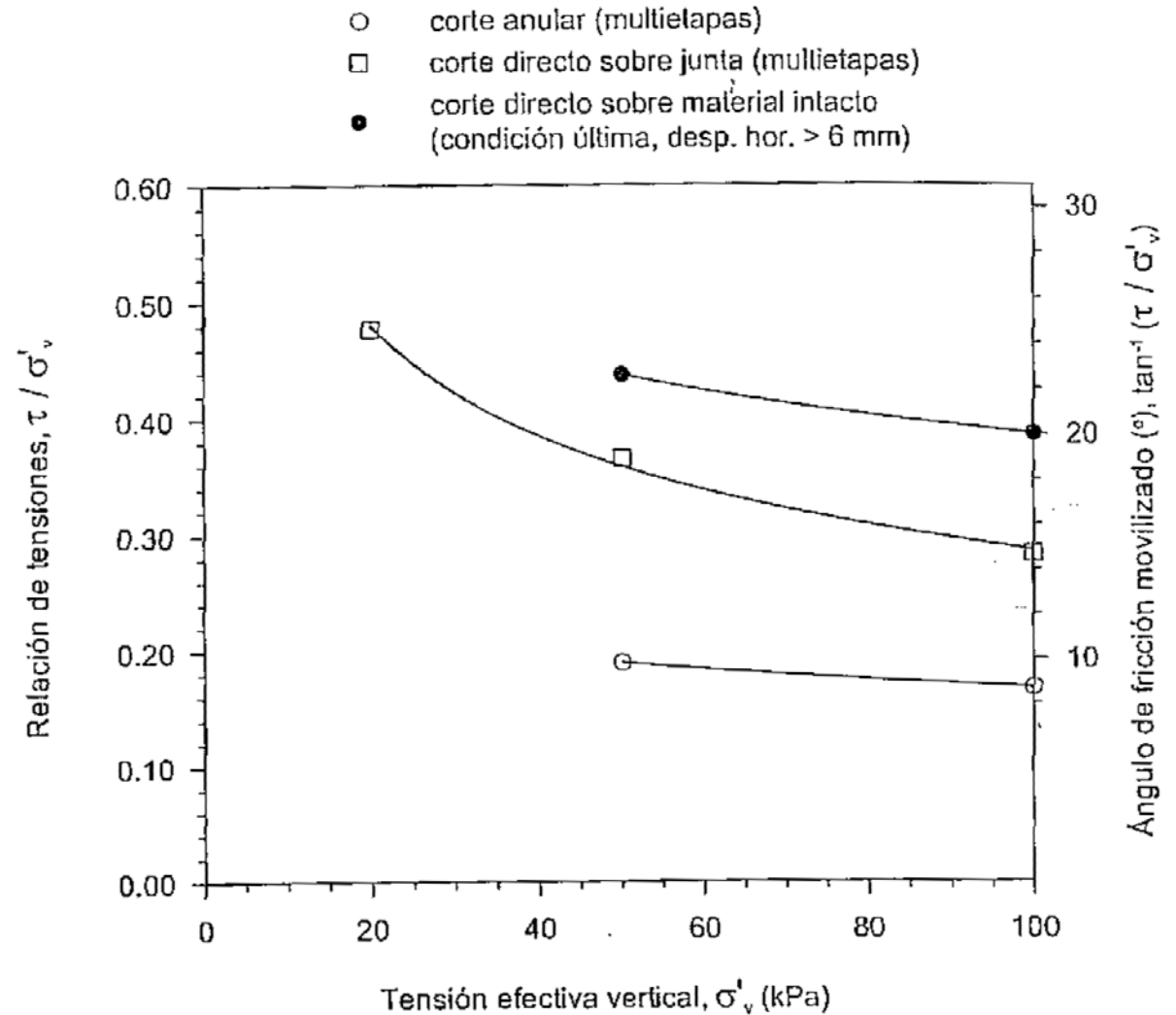
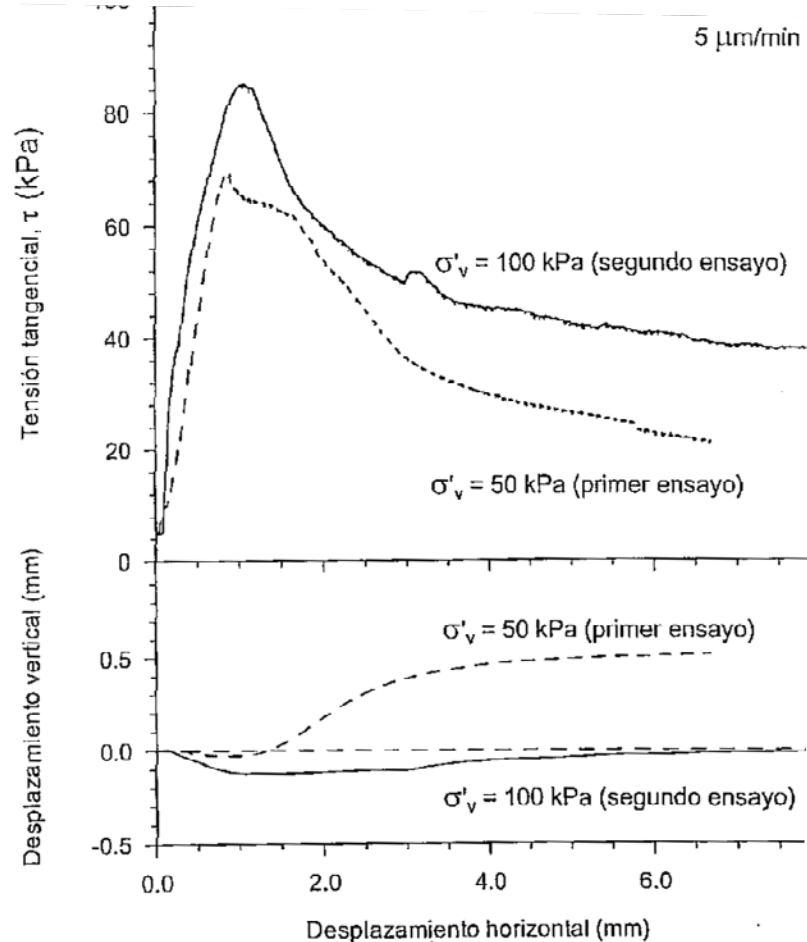
Las arcillas del sustrato mostraron una plasticidad elevada, con límites líquidos de hasta el 100%, e índices de plasticidad del 40%.

En los sondeos se observaron superficies de rotura con estrías, pulidas y brillantes (slickensides).



Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens

Se ejecutaron ensayos de corte de varios tipos, que reflejaron una acusada fragilidad en resistencia



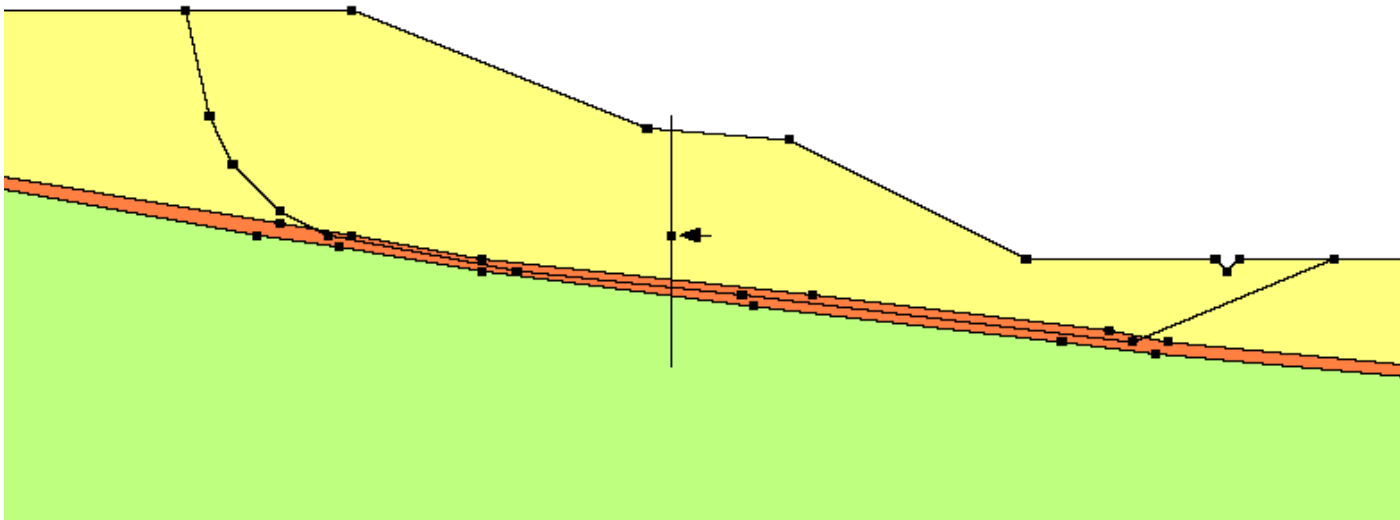
$\phi' (\tau/\sigma') = 20^\circ$ (intacto)
 $\phi' (\tau/\sigma') = 9^\circ$ (degradado)

Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens

Cálculos retrospectivos y estimación de fuerza estabilizadora

Se calcularon diversos escenarios (dependientes del resto de variables). En algunos de ellos la rotura se explicaba con ángulos de rozamiento del orden de $11,5^\circ$, mayor que el residual de laboratorio).

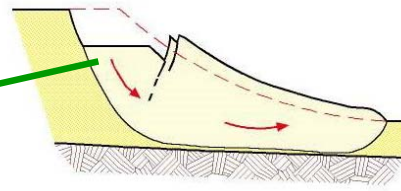
ESCENARIO	FUERZA NECESARIA (kN/m)	FACTOR DE SEGURIDAD
A	700	1.15
B	700	1.21
D (con degradación adicional de resistencia)	900	1.15



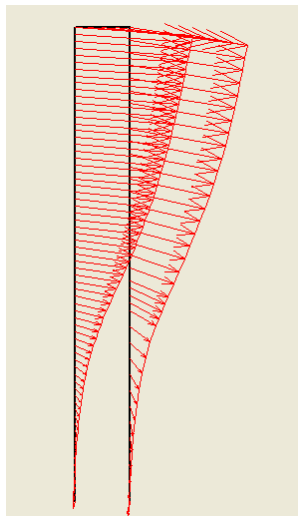
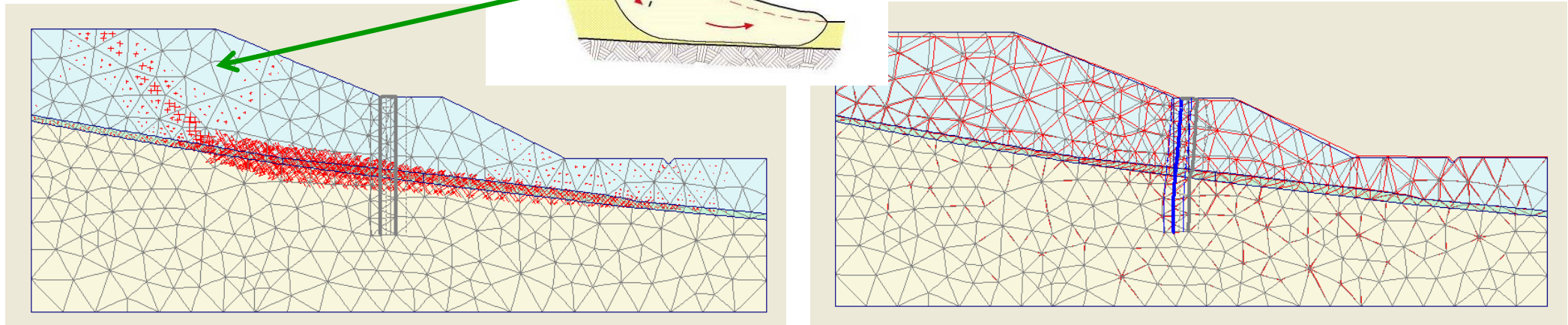
Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens

Se modeló también con EF la degradación de resistencia

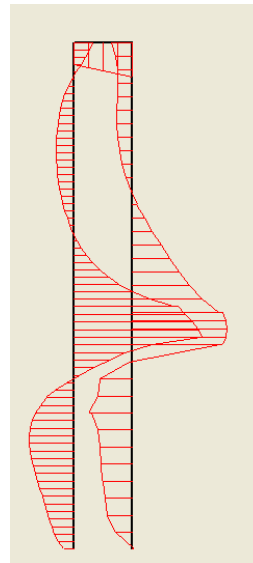
Deformaciones (sin pilotes)



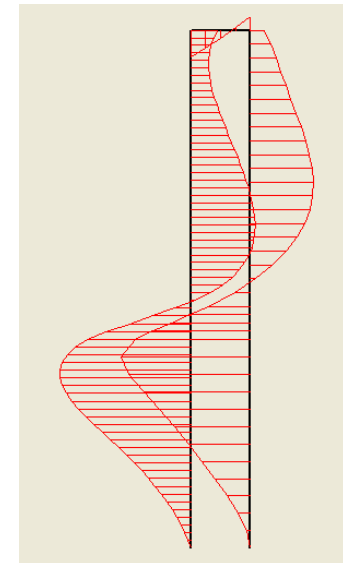
Malla deformada (con pilotes)



Desplazamientos



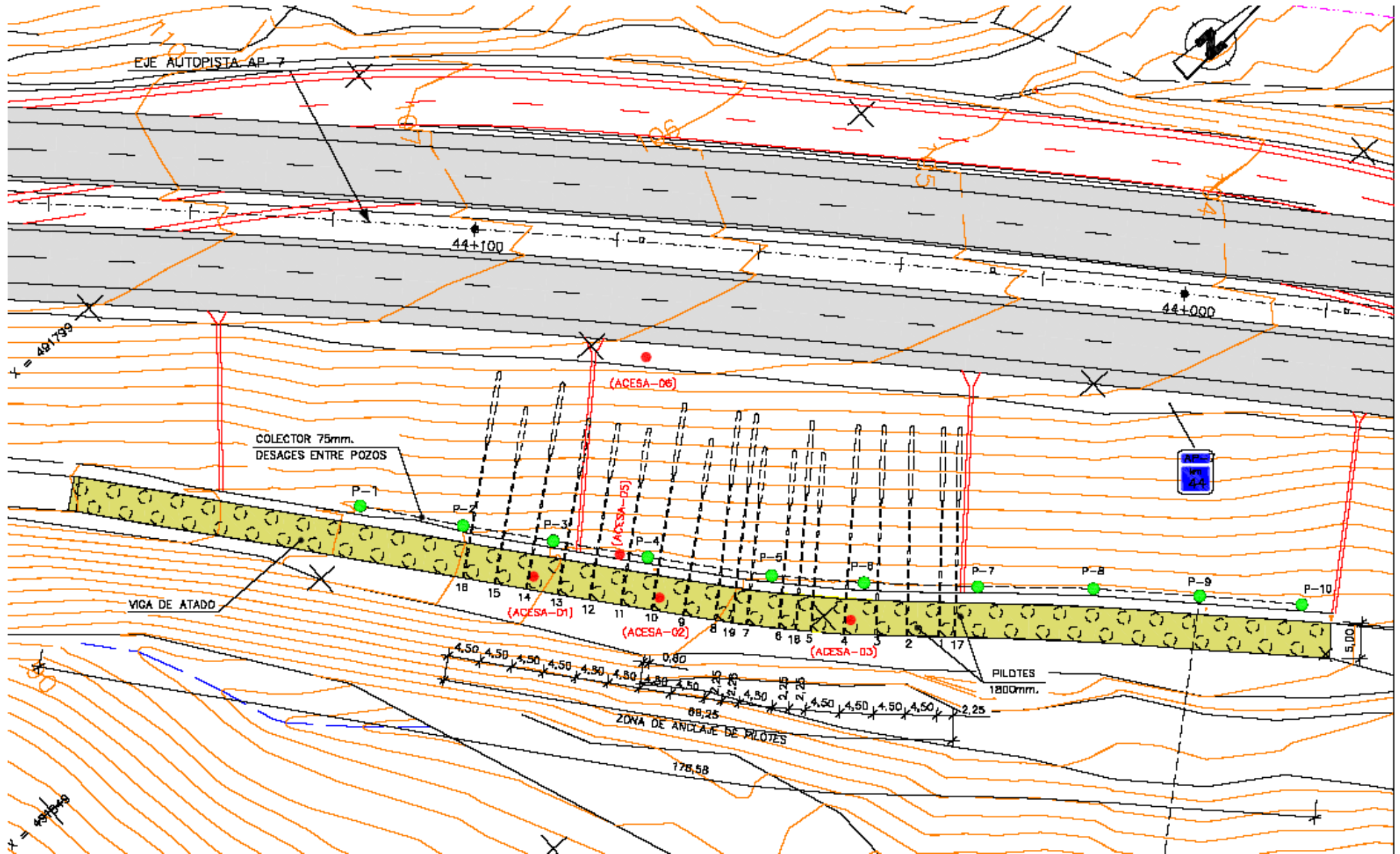
Cortantes



Momentos

Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens

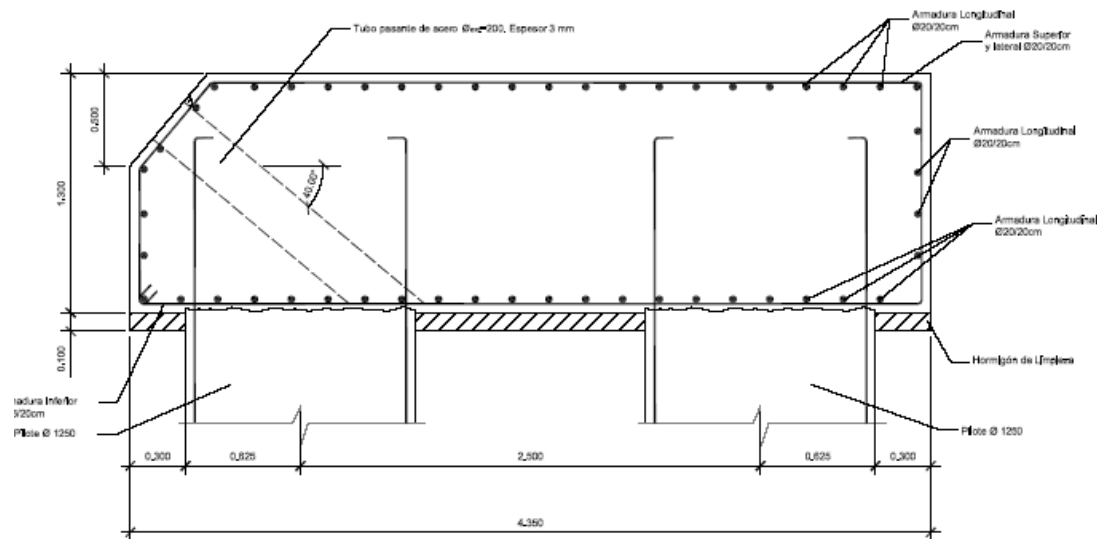
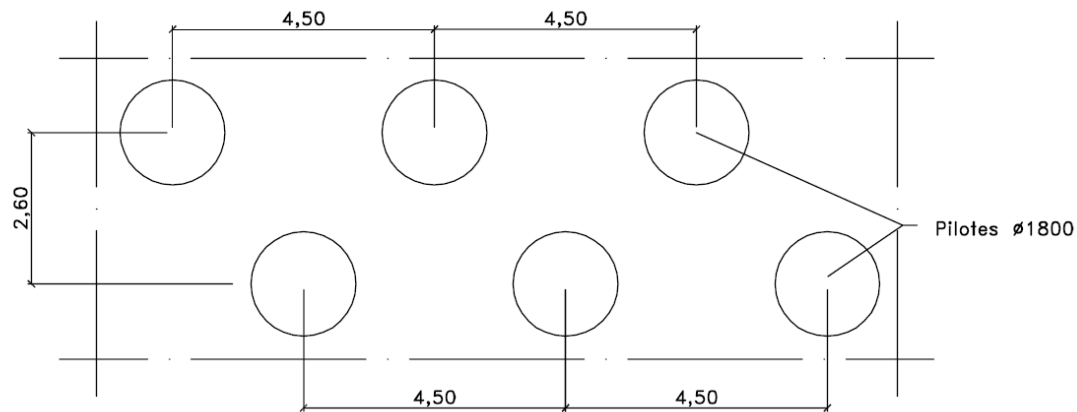
Definición de la solución: Pantalla de pilotes anclada y pozos de drenaje



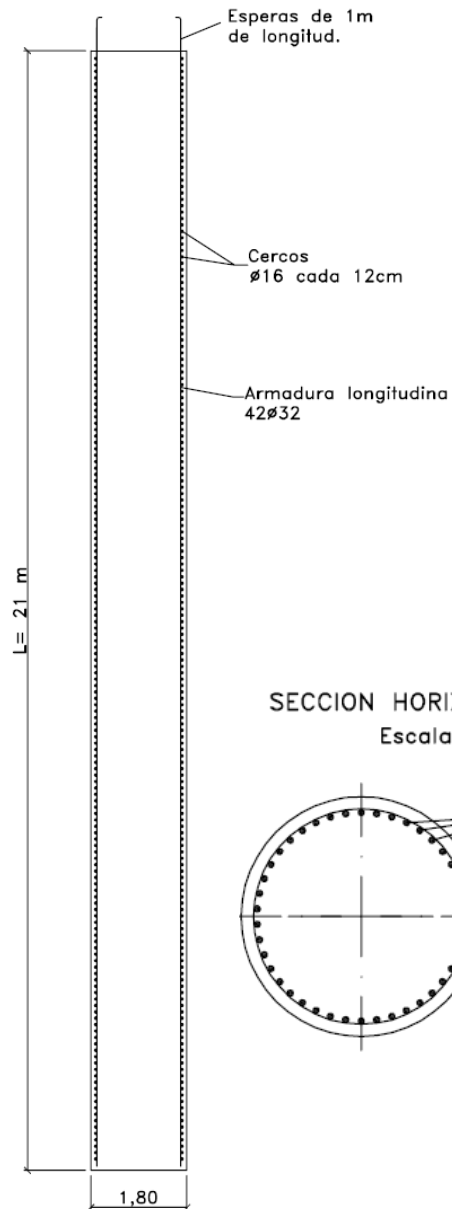
Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens

Definición de la solución

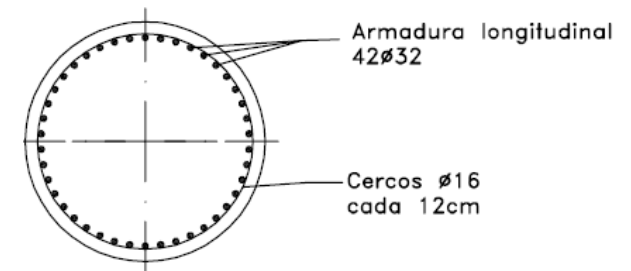
PLANTA DISTRIBUCIÓN DE PILOTES
Escala 1:100



SECCION VERTICAL PILOTE
Escala 1:100



SECCION HORIZONTAL PILOTE
Escala 1:50



Longitud de pilotes: 21 m (de los cuales 7 son empotramiento)

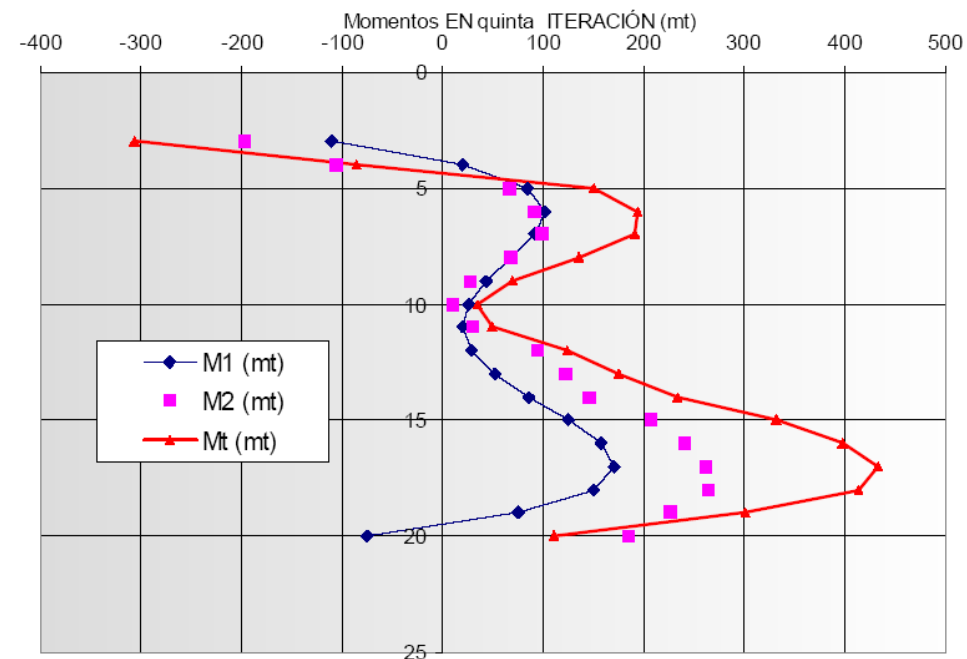
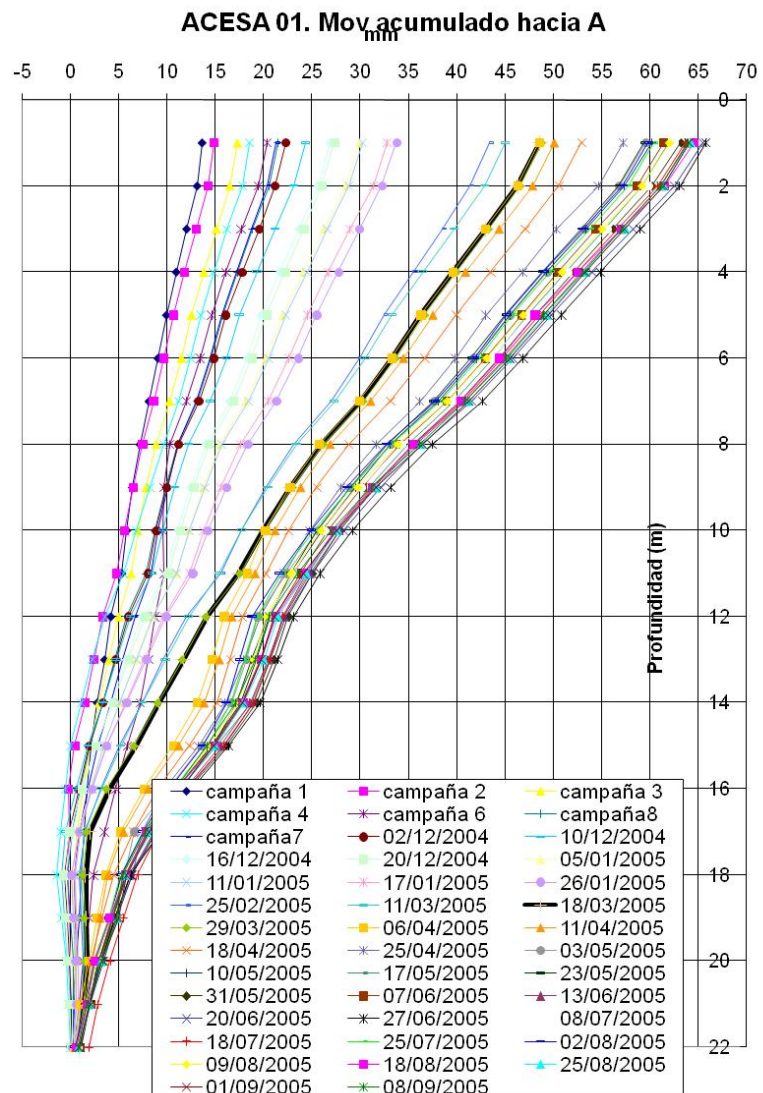
Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens

Ejecución de la obra



Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens

Movimiento de pilotes, anclaje posterior y estabilización



Momentos deducidos

Inclinómetro en pilote

Estabilización de taludes mediante pilotes

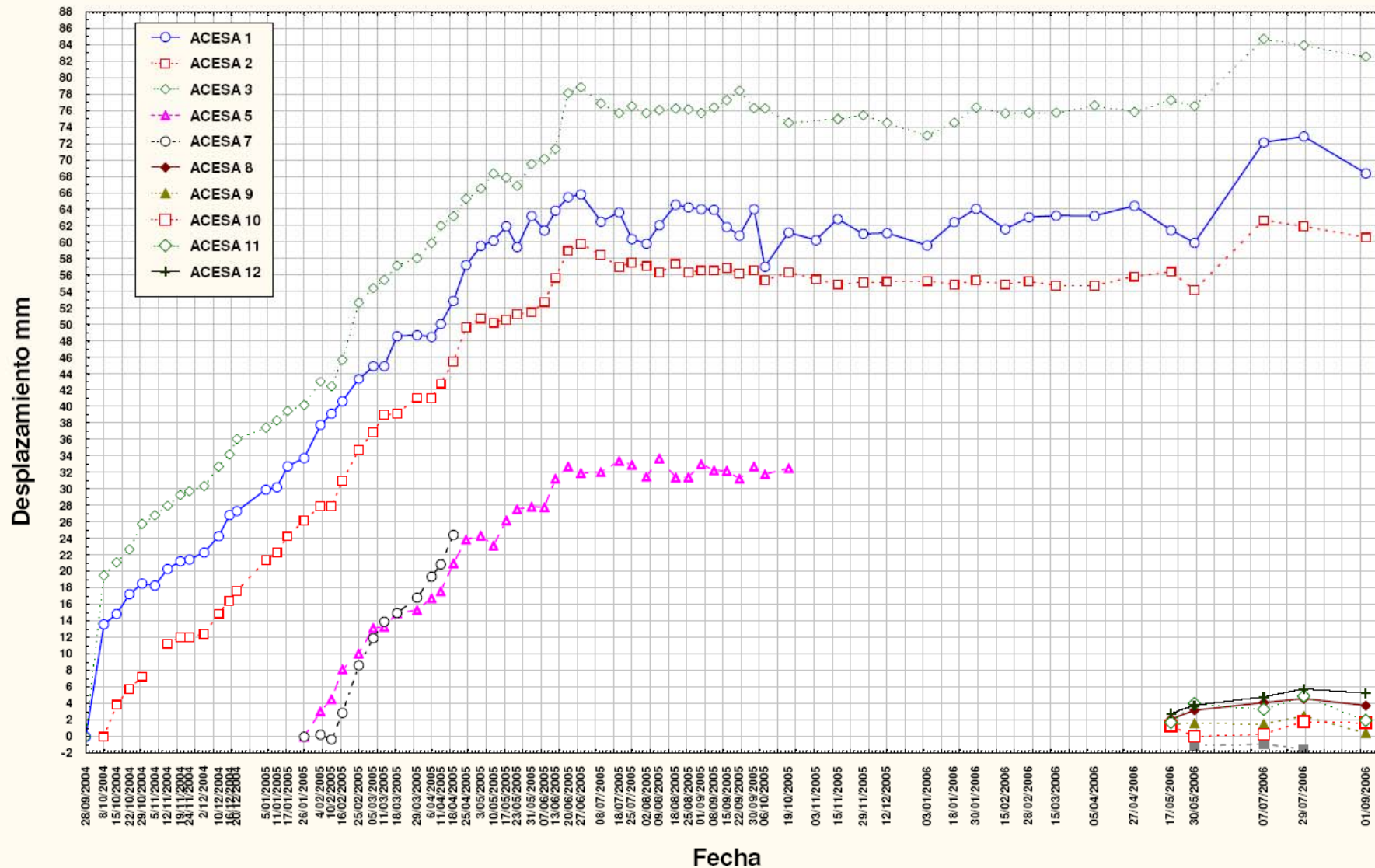
Tomás Murillo & Luis Ortuño

Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens

Movimiento de pilotes

Control Inclinométrico de pilotes en la ladera de la AP-7 (p.k. 40+000 Norte)

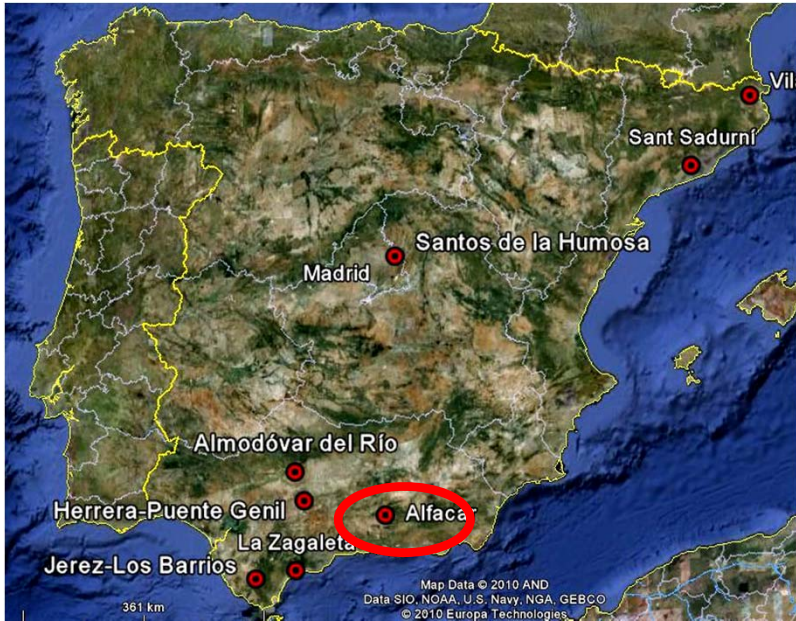
Viladesens (Girona)



Autopista del Mediterráneo AP-7. Terraplén de Viladesens



AUTOVÍA A-92. ALFACAR (GRANADA)



Estabilización de taludes mediante pilotes

Terraplén de 22 m de altura sobre un aluvial arcilloso y un sustrato mioceno (arcillas de alta plasticidad). El terraplén fue ampliado y falló

Entre ambas fotos transcurrió un mes aproximadamente

AUTOVÍA A-92. ALFACAR (GRANADA)



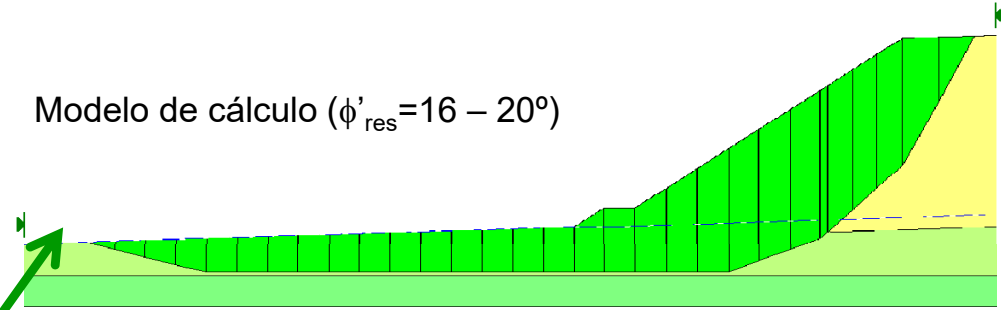
Extrusión del camino de servicio

AUTOVÍA A-92. ALFACAR (GRANADA)

Los inclinómetros mostraron que el deslizamiento se desarrollaba por el contacto aluvial-sustrato, a unos 5 m de profundidad, y que se extendía unos 80 m más allá del pie del terraplén.

Se detectó agua artesisiana en los sondeos

Modelo de cálculo ($\phi'_{res} = 16 - 20^\circ$)

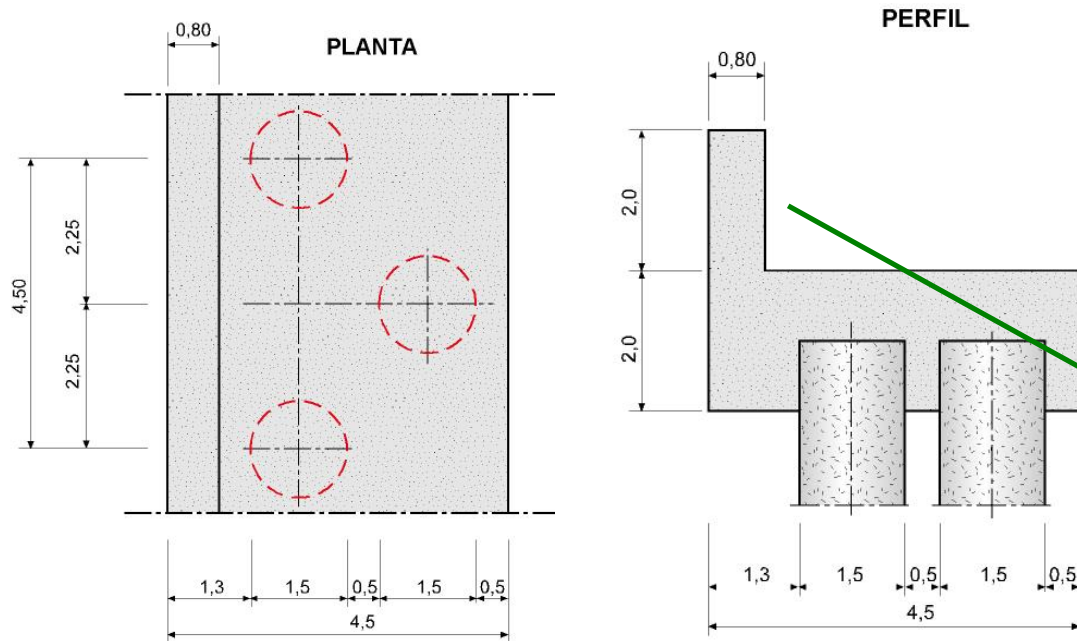


Salidas del deslizamiento, a 80 m del terraplén



AUTOVÍA A-92. ALFACAR (GRANADA)

Definición de la solución: Pantalla de pilotes anclada y pozos de drenaje



Pilotes de ϕ 1500 mm y 17-20 m de longitud aproximadamente (6 m bajo superficie de rotura). Disposición esquemática

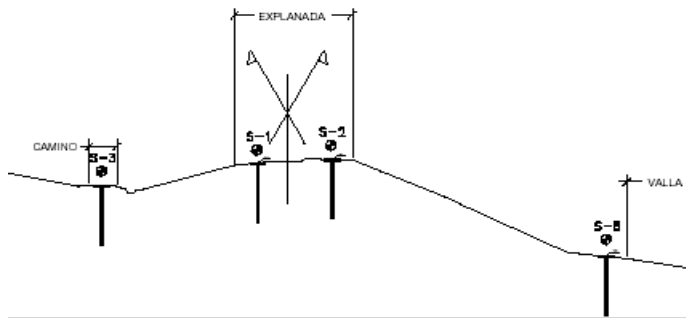


Muro-encepado (además de los grafitis, lleva pilotes, anclajes y pozos)

Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Almodóvar del Río (II)



TRANSVERSAL POR P.K. 114+761.66



-Terminado en 2003

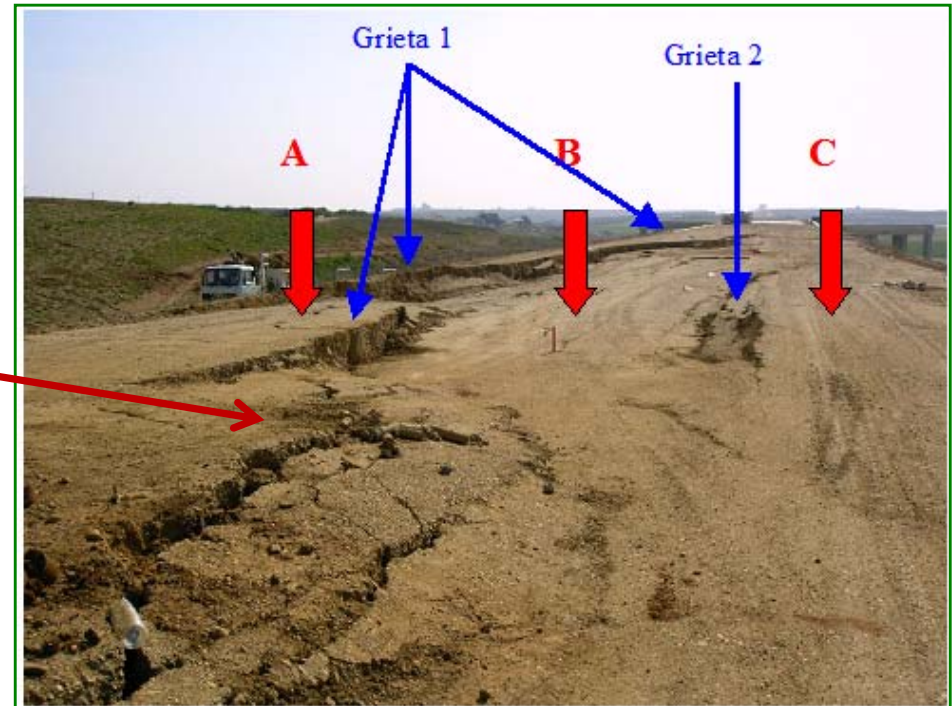
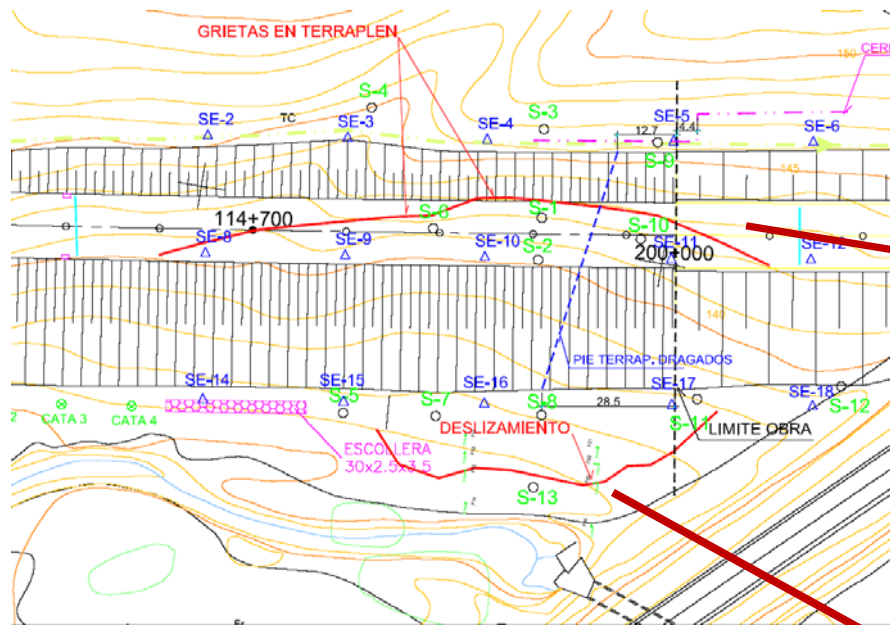
- Pendiente natural extremadamente suave

- Lluvias intensas en Octubre 2003 y comienzo de agrietamiento en coronación

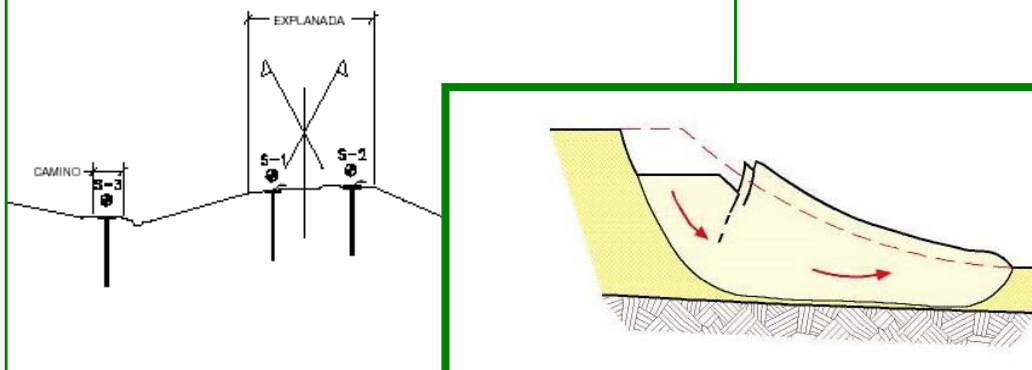
Estabilización de taludes mediante pilotes

Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Almodóvar del Río (II)

Patologías observadas

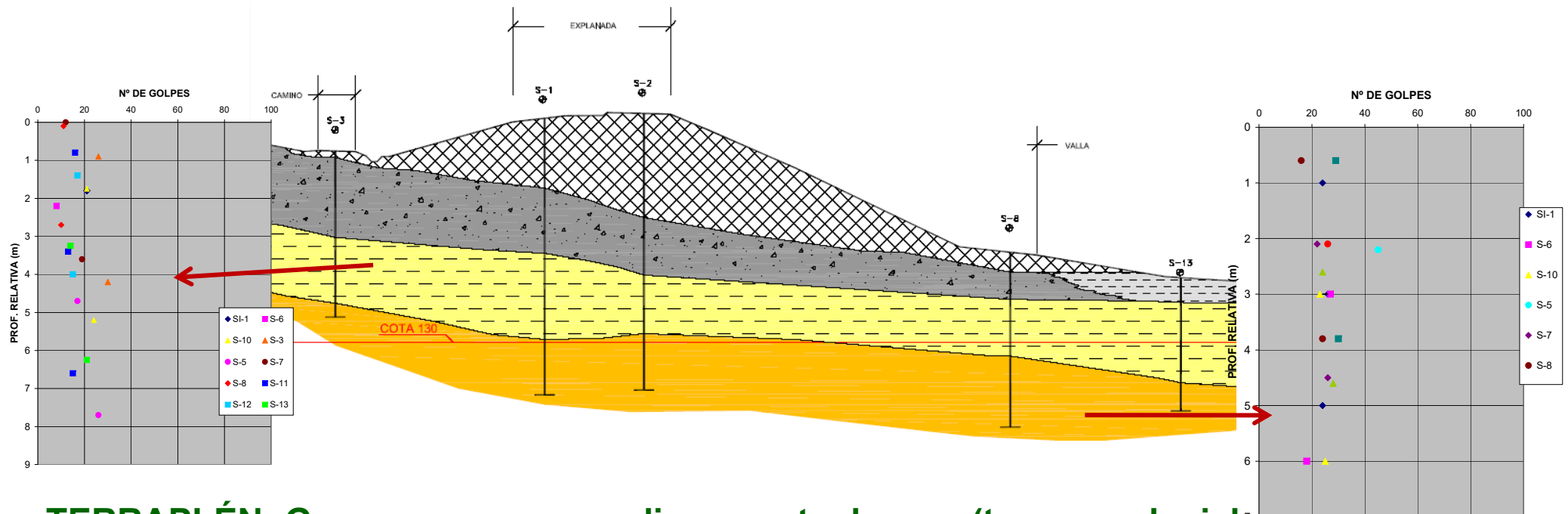


TRANSVERSAL POR P.K. 114+761.66



Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Almodóvar del Río (II)

Perfil litológico



TERRAPLÉN: Gravas arenosas medianamente densas (terrazas aluviales)

COLUVIAL: Gravas y bolos con matriz. (entre 6 y 2,5 m tras saneo obra).

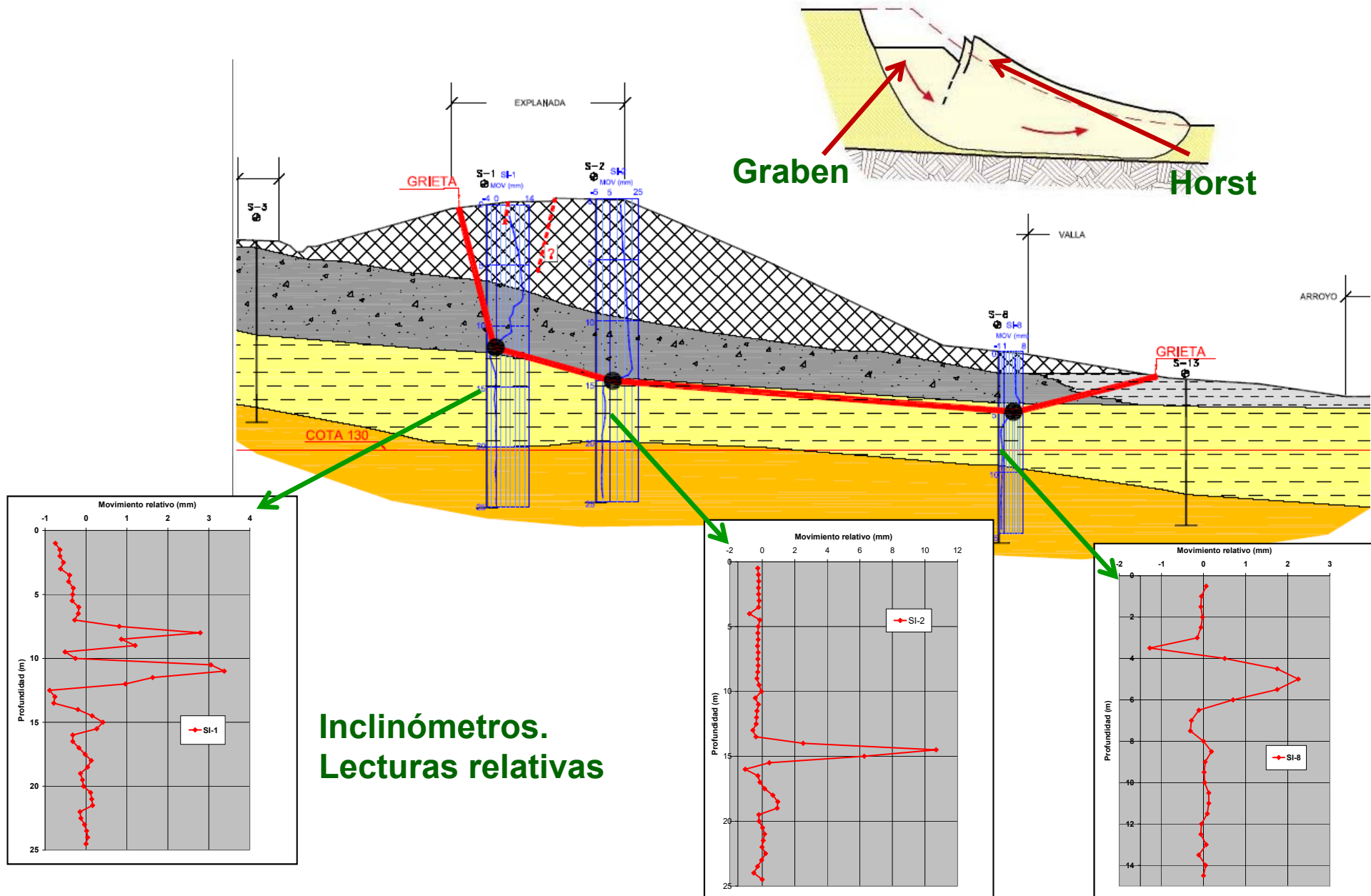
ARCILLAS MIOCENAS CH: $w_l=61\%$, $IP=40\%$. 5 – 9 m de alteración intensa

ALUVIAL ARCILLOSO. Al pie, junto al arroyo.

NIVEL FREÁTICO (Febrero 2004): Entre 2,3 y 5,7 m por encima del contacto con el sustrato

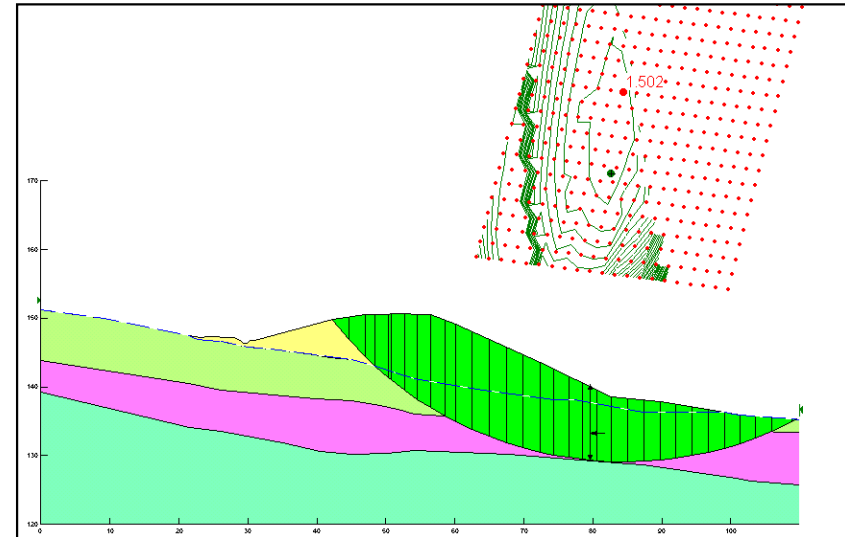
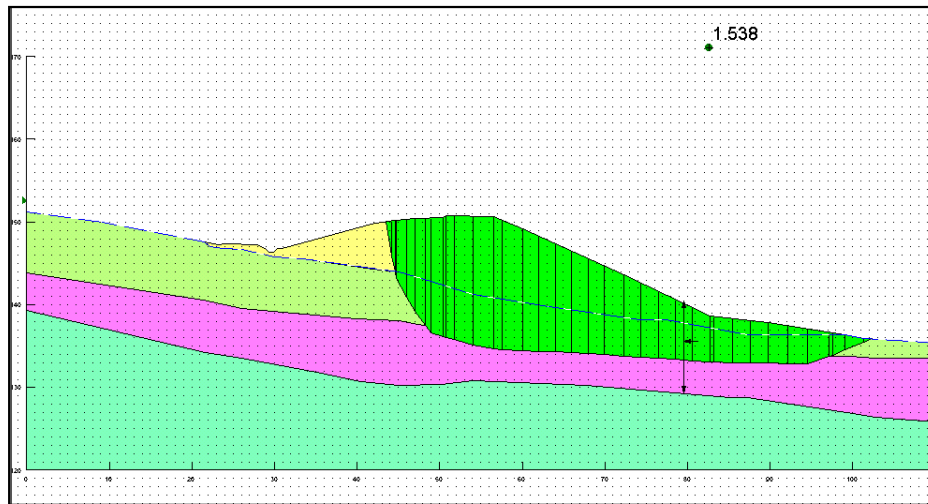
Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Almodóvar del Río (II)

Mecanismo de rotura



Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Almodóvar del Río (II)

Análisis retrospectivo y fuerza estabilizadora

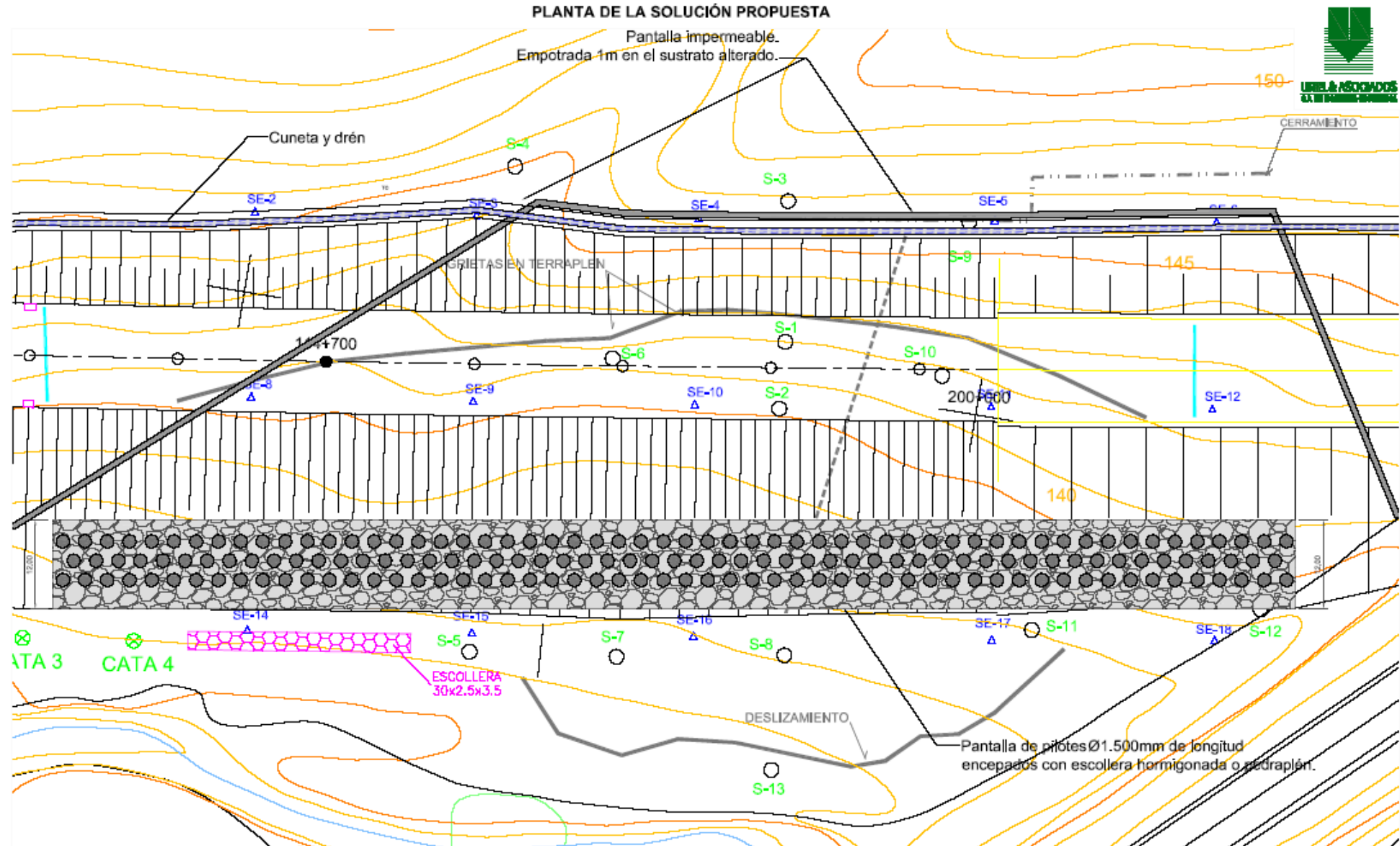


Se tantearon varias superficies y mecanismos de rotura, que proporcionaron un ángulo de rozamiento residual en el sustrato alterado $\phi' (\tau/\sigma') = 11$ a 16° . Se buscó un factor de seguridad de 1,50, muy elevado para la práctica habitual

TIPO DE ROTURA	FUERZA NECESARIA (kN/m)	FACTOR DE SEGURIDAD
Poligonal	730	1.508
Circular	900	1.502

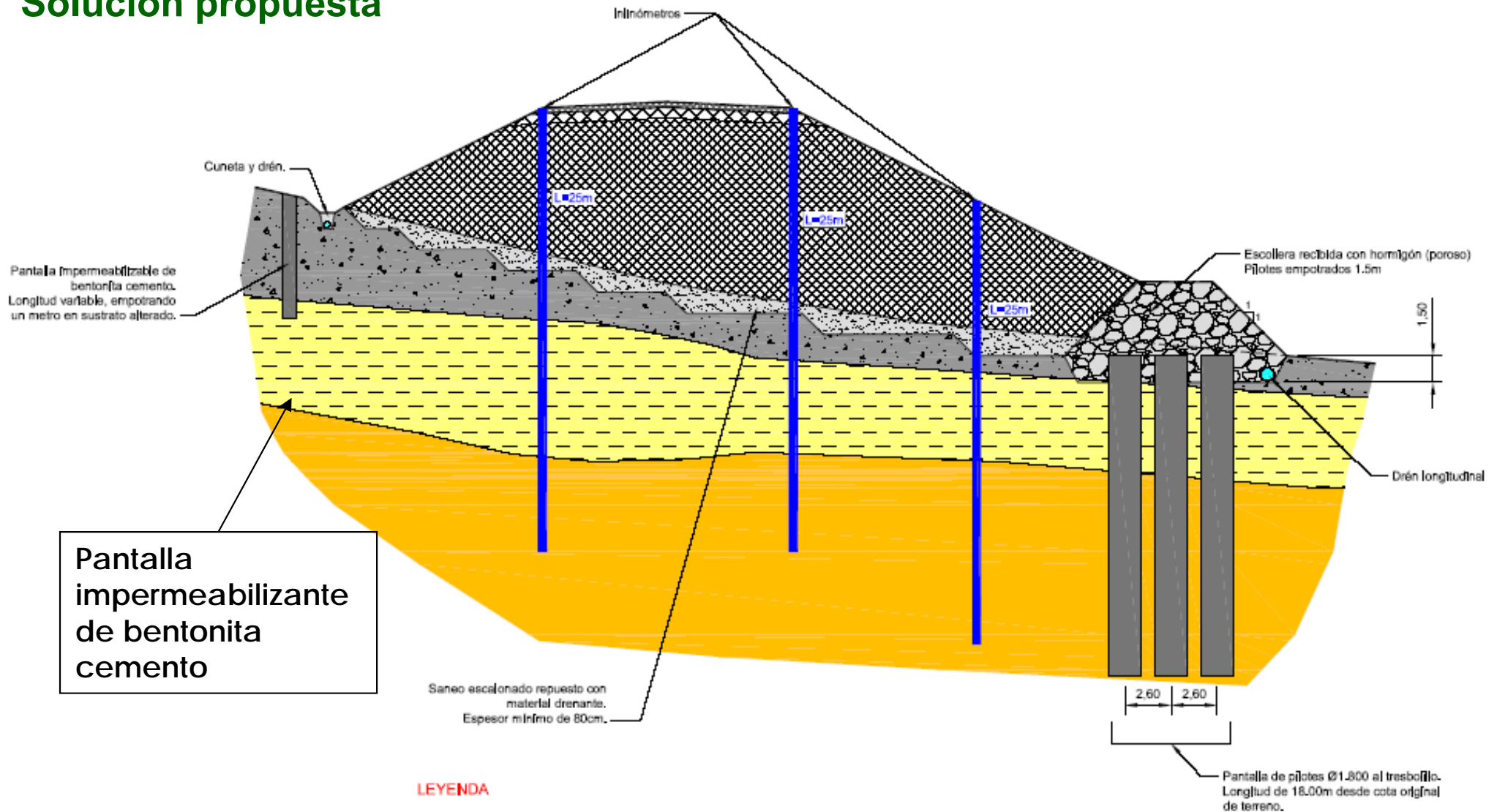
Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Almodóvar del Río (II)

Solución propuesta: Pilotes encepados en un pie de escollera y pantalla de bentonita-cemento para desviar el flujo de agua (la última no se construyó finalmente)



Terraplén FFCC alta velocidad (LAV). Almodóvar del Río (II)

Solución propuesta



Pilotes de ϕ 1800 mm y 18 m de longitud (se buscó un empotramiento generoso en el sustrato sano).

Se dispusieron al tresbolillo en tres filas, con separación entre ejes de 3,00 m entre ejes, y se enceparon con una gran pie de escollera