

## Pruebas de construcción y auscultación de elementos estructurales a menor escala con materiales inadecuados

### Construction and auscultation testing of structural elements on minor scale and inadequate materials

Ignacio Carazo Carazo<sup>1</sup>; Manuel Morillo García<sup>2</sup>; Miguel A. Fernández Vélez<sup>3</sup>; Ángel Martínez Girón<sup>4</sup>; Daniel Martín Sánchez<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, Director Técnico Vorsevi S.A., e-mail: [ignaciocarazo@vorsevi.com](mailto:ignaciocarazo@vorsevi.com)

<sup>2</sup>Geólogo Especialista en Ensayos In Situ. Vorsevi S.A. e-mail: [manuelmorillo@vorsevi.es](mailto:manuelmorillo@vorsevi.es)

<sup>3</sup>Geólogo. Director de Departamento de Geotecnia, Vorsevi S.A., e-mail: [miguelfernandez@vorsevi.com](mailto:miguelfernandez@vorsevi.com)

<sup>4</sup>Geólogo. Consultor Vorsevi S.A. e-mail: [angelmartinez@vorsevi.es](mailto:angelmartinez@vorsevi.es)

<sup>5</sup>Geólogo. Director Técnico, Vorsevi México S.A. de C.V., e-mail: [danielmartin@vorsevi.mx](mailto:danielmartin@vorsevi.mx)

**RESUMEN:** Los criterios de economía y protección al medio ambiente obligan cada vez más a la mayor utilización de los materiales existentes en el entorno de nuestras obras a pesar de ser de mala calidad. Es importante hacer una caracterización previa de los mismos y estudiar su comportamiento de cara proyectar su uso y conocer sus limitaciones y aplicabilidad. En este artículo se presenta un caso en el que se estudia el empleo de los suelos inadecuados presentes en la traza de una carretera con el objetivo de su empleo en la construcción de una futura autopista, para ello se construye un terraplén experimental de prueba sobre el que se realizan pruebas con los medios de puesta en obra reales y se instalan varios medios de auscultación e instrumentación con tres objetivos principales; analizar el procedimiento de puesta en obra de estos materiales del entorno, controlar su comportamiento frente al agua, y hacer un seguimiento de la deformabilidad a corto, medio y largo plazo del relleno experimental finalmente terminado.

**ABSTRACT:** The economic criteria and the environment protection require increasingly higher use of existing materials in our works surrounding, even in spite having poor quality. It is important make a previous characterization on it and through of behavior investigation to project its usefulness in order to know limitations and applicability. This article shows a case in which, using inadequate grounds found on one highway with the only objective to plan the construction of a future highway, for that reason an experimental embankment was constructed in order to test through of real means on the construction site and also auscultation and instrumentation with three principal targets. Firstly, analyze surrounding material process supply on site, secondly, behavior control with water presence, and lastly monitoring of deformability at short, half and long term on experimental filling finally finished.

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes y objeto

La concesionaria de una autopista que planifica la explotación de un tramo carretero que discurre por una amplia zona en la que no existen materiales aptos para su empleo en terraplenes, o al menos, no se ajusta su empleo a la normativa existente, obliga a realizar un estudio específico con objeto de contrastar su empleo para la validación y probación del uso del mismo y determinación de los condicionantes de diseño y las necesarias medidas de puesta en obra que garanticen su comportamiento a corto, medio y largo plazo.

La escasez de materiales adecuados o tolerables para conformar la explanada y coronación, fundamentalmente por su elevada plasticidad y contenido en finos, aconsejó la realización de un

estudio en profundidad para recabar datos sobre el comportamiento de estos materiales en las condiciones más parecidas posibles a su posterior empleo en terraplenes.

Para poder comprobar el comportamiento de dichos materiales presentes en la traza, para su empleo en la construcción de la futura autopista, se construye un terraplén experimental de prueba caracterizando ampliamente los suelos existentes e instalando en él medios de auscultación e instrumentación con tres objetivos principales:

- Analizar el procedimiento de puesta en obra de los materiales del entorno en la construcción de rellenos encapsulados.

- Control del comportamiento del relleno frente al agua (ensayos de permeabilidad y placa de carga inundada).
- Control de la deformabilidad a corto, medio y largo plazo del relleno experimental terminado.

En este artículo se describe tanto el proceso constructivo como los ensayos realizados sobre dicho Terraplén de Prueba construido al efecto, como la recopilación de datos de los diferentes medios de instrumentación y auscultación instalados en el mismo durante su construcción, y el seguimiento de control que se ha llevado a cabo tras su finalización.

Finalmente se analizan los resultados obtenidos, obteniéndose las conclusiones en relación a los objetivos fijados en el proyecto de construcción y auscultación del terraplén de prueba.

## 1.2 Emplazamiento

La infraestructura a construir se ubica en Andalucía (España). Se trata de una carretera de titularidad autonómica perteneciente a la Red Básica de Articulación del Catálogo de Carreteras de la Junta de Andalucía, y une Baza (Granada) con Huércal - Overa (Almería). Una vez se finalice, actuará como eje de conexión entre la A-92 Norte y la Autovía del Mediterráneo A-7, corredores de gran capacidad para tráfico de largo recorrido.

Se está trabajando en el desdoble de toda la carretera A-334 y así convertirla en la Autovía del Almanzora. Es en este entorno en el que se realizan los trabajos.



Fig. 1. Aspecto del terraplén de prueba

## 2 GEOLOGÍA

### 2.1 Evolución Geológica de la Cuenca del Río Almanzora

Al comenzar la Era Secundaria, las tierras que hoy forman la Cuenca del Alto Almanzora, como gran parte de Andalucía, se encontraban sumergidas

formando un gran brazo de mar que comunicaba el Mediterráneo y el Atlántico y separaba el macizo hispánico del norte de África. En el fondo de este mar se fueron acumulando los sedimentos arrancados por la erosión a las tierras circundantes.

Durante el Terciario, esta situación se ve profundamente afectada por la Orogenia Alpina. La evolución tectónica de las cordilleras béticas durante dicha orogenia es muy compleja, diferenciándose dos fases:

1º. Apilamiento inicial de los mantos de plegamiento, acompañado de plegamiento y cabalgamiento.

2º. Deformaciones posteriores, fundamentalmente corrimientos y cabalgamientos.

A finales del Mioceno, las sierras que encuadran la cuenca del Almanzora estaban ya emergidas, quedando entre ellas la depresión del Almanzora, inundada por las aguas, que ponía en comunicación el mar semicerrado que ocupaba la depresión Guadix - Baza con el Mediterráneo. Durante el Neógeno, la depresión se fue llenando con materiales procedentes de estas sierras.

En el periodo Tortonense se produjo la sedimentación de los conglomerados rojos de la zona de Purchena. Estos materiales tienen un carácter fluvio-marino, lo que indica una sedimentación costera formada por los aportes de las sierras. Los agentes de transporte fueron principalmente grandes avenidas y deslizamientos gravitatorios, entre los cuales se producían momentos de calma erosiva. Los conglomerados rojos fueron afectados por movimientos tectónicos de las sierras. En el periodo Mesiniense se depositó la formación de arenas y limos en un medio marino de poca profundidad.

Durante el Plioceno, la sedimentación fue mucho más heterogénea. En esta fase se produjo un levantamiento general de las Cordilleras Béticas, sufriendo estas zonas elevadas una gran erosión. Estos fenómenos dieron lugar a la formación de cuencas semicerradas y, por último, a la retirada del mar. La fuerte evaporación en las albuferas dio lugar a las intercalaciones de yesos.

En el Cuaternario, el Valle queda expuesto a la acción erosiva de los agentes geológicos externos que producen aumentos de gravas y arenas. También se produce el encajamiento de la red hidrográfica del Almanzora. En el modelado del relieve juegan un papel importante los agentes erosivos y la naturaleza de los materiales; aquellos más resistentes dan lugar a colinas mientras que los

materiales poco consistentes dan lugar a cárcavas formando bad – lans.

2.2 Estratigrafía

Materiales Preorogénicos (Depositados antes de la orogenia alpina).

Estos materiales constituyen las sierras y fueron fuertemente tectonizados por la orogenia. Los materiales de la zona pertenecen a cuatro complejos estructurales diferentes que son, de abajo arriba: Nevado-Filábride, Ballabona-Cucharón, Alpujárride y Maláguide. En la zona concreta de este estudio, el complejo Maláguide no tiene mucho interés.

Materiales Post-orogénicos.

Se encuentran de manera discordante sobre los materiales preorogénicos recubriendo las cubetas terciarias. Después de los orógenos alpinos se fueron depositando los materiales arrancados de las sierras limítrofes, que rellenaron el valle durante todo el Neógeno. Estos materiales terciarios fueron cubiertos durante el período Cuaternario.

Dentro del Cuaternario se han distinguido los siguientes pisos:

1. Glacis.- El Neógeno está cubierto en parte por una serie de Glacis que se extienden hasta las estribaciones de la Sierra de las Estancias. Con frecuencia se encuentran ligados a los ríos actuales y a veces en una sola ladera, por lo que dan valles asimétricos.

La superficie del Glacis se encuentra formada por conglomerados y arcillas de color rojo. Estos Glacis parecen abarrancados por dos períodos erosivos, el primero de los cuales dio lugar a valles amplios y poco profundos en los que se encajan los actuales cauces que han dado erosión en "badland".

2. Depósitos Aluviales.- Ocupan los lechos de las ramblas y ríos actuales, estando constituidos por arenas, gravas, producto de la erosión de los materiales de relleno de la cuenca.

3. Depósitos de pie de monte y derrubios de ladera.- Se encuentran en la desembocadura de los arroyos que vienen de las formaciones montañosas limítrofes. Los materiales que constituyen estos depósitos son fundamentalmente gravas, arenas, etc.

4. Travertinos.- Formado por calizas de crecimiento sobre restos vegetales, estos depósitos presentan

poca extensión localizándose en las proximidades de Lúcar.

5. Cuaternario indiferenciado.- Formado por derrubios que se han localizado en las zonas próximas a los relieves montañosos y en donde la erosión ha sido más intensa. Está constituido por bloques, cantos, gravas, arenas y arcillas.

3 CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES EXISTENTES

En la traza abundan dos tipos de materiales principales, las denominadas Tierras Blancas de naturaleza arcillomargosa y un glacis Cuaternario de recubrimiento de comportamiento granular.

3.1 Ensayos de laboratorio

De los ensayos realizados para construcción del terraplén, podemos diferenciar dos tipos de material:

TIERRAS BLANCAS: son suelos arcillosos (CL y CH), con plasticidad elevada, hinchamiento libre superior al 3% y en casos superior al 5%, CBR inferior a 5. Suelos marginales o inadecuados para terraplenes.

GLACIS: son gravas arcillosas con arena. No cumplen como suelos seleccionados para terraplén debido a su contenido en materia orgánica y yesos ésta. El CBR es superior a 10 y no presentan plasticidad.

Ensayos de Identificación y Estado																									
Consolidación										Límites de Atterberg		Densidad relativa de las partículas (g/cm <sup>3</sup> )													
T <sub>un</sub>	T <sub>11</sub>	T <sub>12</sub>	T <sub>13</sub>	T <sub>14</sub>	T <sub>15</sub>	T <sub>16</sub>	T <sub>17</sub>	T <sub>18</sub>	T <sub>19</sub>	T <sub>20</sub>	V <sub>L</sub>	V <sub>P</sub>	I <sub>p</sub>	(g/cm <sup>3</sup> )											
<b>TIERRAS BLANCAS</b>																									
NUMERO DE MUESTRAS										2		2		1											
VALORES MAXIMOS										100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.0	58.0	24.9	33.1	2.7		
VALORES MINIMOS										100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	39.0	37.0	39.0	51.3	21.9	29.4	2.7	
PROMEDIO										100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.5	36.5	37.0	54.7	23.4	31.3	2.7		
<b>GLACIS</b>																									
NUMERO DE MUESTRAS										11		11		2											
VALORES MAXIMOS										100	100	100	85	82	78	70	58	46	28.6	15.9	0.0	0.0	0.0	2.8	
VALORES MINIMOS										100	84.2	64.8	61.9	56.6	53.0	42.2	32.0	21.4	10.2	4.8	0.0	0.0	0.0	2.6	
PROMEDIO										100	86.6	63.6	78.3	63.9	66.8	57.3	47.8	39.3	21.0	10.6					2.7

HM	Compactación				Cambio de volumen y deformabilidad				FERRUG. RELEV. (%)	Químicos																		
	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )	Proctor	H <sub>max</sub> (%)	Límites	Límites	CBR	Hinchamiento libre	Hinchamiento		March (%)	%	%	%															
														Formabilidad en estado húmedo	Formabilidad en estado seco	Materia Orgánica (%)	Yeso (%)	Sales Solubles (%)	Sulfatos (S <sub>2</sub> ) (UNE 12321)									
<b>TIERRAS BLANCAS</b>																												
NUMERO DE MUESTRAS													4	3	2	1	0	2	2	2	2							
VALORES MAXIMOS													1.80	16.63	5.30	4.30	10.30	7.82	0.6	5.1	0.5	0.0	0.0	0.00E+00	0.39	0.30	0.74	0.36
VALORES MINIMOS													1.80	12.28	3.60	2.40	5.30	3.28	0.5	4.9	0.5	0.0	0.0	0.00E+00	0.25	0.10	0.36	0.39
PROMEDIO													1.85	11.92	4.27	3.43	6.43	4.98	0.5	5.0	0.5	0.0	0.0	0.23	0.22	0.55	0.28	
<b>GLACIS</b>																												
NUMERO DE MUESTRAS													22	21	11	9	9	11	11	11	2							
VALORES MAXIMOS													2.16	11.90	10.20	90.40	6.40	0.00	0.4	0.0	0.4	0.2	0.2	8.45E-03	0.39	0.00	0.44	0.00
VALORES MINIMOS													1.96	6.02	20.00	16.40	3.00	0.00	0.3	0.0	0.3	0.1	0.1	2.00E-04	0.42	0.00	0.20	0.00
PROMEDIO													2.08	8.76	12.25	40.76	4.25	0.00	0.3	0.0	0.3	0.1	0.1	2.41E-03	0.65	0.00	0.28	0.00

Tabla 1. Resumen de ensayos de laboratorio

Como se puede observar, los materiales denominados Tierras Blancas presentan elevados valores de hinchamiento y unos valores de capacidad portante bajos. Para validar su comportamiento será importante asegurar su estabilidad frente al agua.

3.2 Ensayos de campo sobre el terraplén

En total se realizaron cuatro sondeos en el núcleo del terraplén, con profundidades de entre 4,08 y 4,20 m. Los dos primeros sondeos se perforaron a la cota 4,00 m desde la base del terraplén y los dos últimos a la cota 10,00 m en la coronación del terraplén.



Escala 1:100 0.00 0.20 0.40 0.60 0.80 1.00 1.20 1.40 1.60 1.80 2.00 2.20 2.40 2.60 2.80 3.00 3.20 3.40 3.60 3.80 4.00 4.20 4.40 4.60 4.80 5.00 5.20 5.40 5.60 5.80 6.00 6.20 6.40 6.60 6.80 7.00 7.20 7.40 7.60 7.80 8.00 8.20 8.40 8.60 8.80 9.00 9.20 9.40 9.60 9.80 10.00 10.20 10.40 10.60 10.80 11.00 11.20 11.40 11.60 11.80 12.00 12.20 12.40 12.60 12.80 13.00 13.20 13.40 13.60 13.80 14.00 14.20 14.40 14.60 14.80 15.00	Profundidad (m)	Estratigrafía	Descripción	ENSAYOS IN SITU				
				Neutro	Presión	Módulo	S.P.T.	Nsgl
0.00 - 6.80	0.00 - 6.80	QIG. GLACIS CUATERNARIO. GRAVAS Y CANTOS EN MATRIZ LIMOSA CEMENTADA. -Color blanquecino de 9 a 11.50 m. -Tramo más limoso de color marrón oscuro de 1.50 a 4.10 m. -Tramo con mayor porcentaje de matriz limosa color gris claro de 4.10 a 6.80 m. -Gravas heterométricas poligónicas de naturaleza carbonatada micrométrica principalmente. -Cantos subangulosos.						
6.80 - 15.00	6.80 - 15.00	Tp-3. MARGAS Y MARGOSOLIZAS MIOCENO. MARGAS Y MARGOSOLIZAS BLANQUECINAS AMARIL-LENTAS. -Tramo de grava arenosa en matriz limosa muy cementada de 10.80 a 11.30 m. -Presencia de vetas de cristalizaciones de yesos.						

Fig. 2. Sondeo en terraplén

Durante la realización de los sondeos, se han extraído seis muestras representativas del terreno a distintas cotas, lo que equivale a un ensayo cada 2,67 m, para la realización de los ensayos geotécnicos y así clasificar los suelos atravesados y definir sus propiedades de resistencia y deformabilidad.

Fig. 3. Columna de sondeo bajo el terraplén

4 CARACTERÍSTICAS DEL TERRAPLÉN EXPERIMENTAL

Se diseña un relleno experimental con el objeto de verificar el comportamiento real de los materiales presentes en la zona de cara a su asiento, estabilidad frente al agua y capacidad portante.

4.1 Geometría y secciones

El terraplén tiene geometría trapezoidal, con 70 m de base y 30 m de coronación y una altura total de 10,0 m medidos desde su base. Está constituido por un material de relleno, arenas limosas con gravas y bolos que llamaremos Glacis en los espaldones y coronación final del terraplén y unas arcillas miocenas que denominaremos Tierras Blancas para el núcleo.

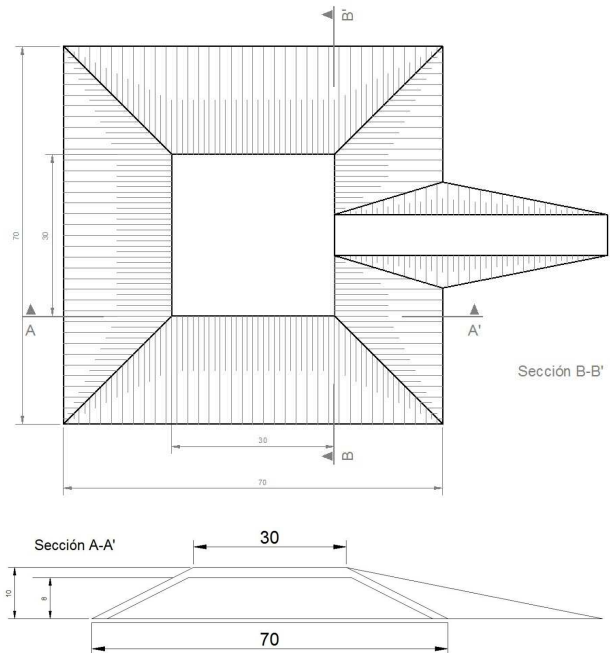


Fig 4. TERRAPLÉN: Núcleo: tierras blancas (tres capas)  
Espaldones: glacis

### Coronación: glacis

#### 4.2 Proceso constructivo

Se ejecuta el relleno con las mismas condiciones que habría de ejecutarse posteriormente en obra; se disponen tongadas de 30 cm de material compactado ("Tierras Blancas").

En la base del relleno se disponen de dos líneas continuas de asiento. Al llegar a la altura de 5 metros se replantea la excavación de las células de asiento y se realizan las excavaciones de dos zanjas en el núcleo del terraplén de tierras blancas, para el montaje de seis células de asiento, tres por zanja, separadas 15 m entre sí, coincidiendo la disposición de dichas zanjas con las ejecutadas para las líneas de asiento en la base del terraplén, en la base del mismo.

Cada célula de asiento está compuesta por transductor de presión, tubo relleno de fluido desaireado y depósito de reserva.

Posteriormente se procede a continuar con el proceso de extendido, humectación y compactación de cada capa, del núcleo y de los espaldones del terraplén, realizando los ensayos de densidad humedad y placa de carga según normativa.

Al alcanzar los 8,0 m se llega a la altura de coronación del núcleo de tierras blancas, a partir de aquí y hasta los 10,0 m se extenderán capas de glacis que compondrán la coronación final del terraplén.

## 6 INSTRUMENTACIÓN Y AUSCULTACIÓN EL TERRAPLÉN EXPERIMENTAL

### 6.1 Líneas Continuas de Asiento (LCA)

Para la ejecución del terraplén de prueba se han instalado dos líneas de asiento en el cimiento, que se instalaron al comienzo de la ejecución de dicho terraplén (ver tabla resumen adjunta). Se colocan perpendicularmente al eje de terraplén, con longitudes de 81 y 90 metros.

El terraplén se construye sobre las líneas de manera que según se deforme el terreno por el efecto de la superestructura, la propia manguera de la línea se deformará también de forma solidaria. Una vez se mide la deformación de la manguera, conocemos



con total precisión la magnitud y distribución de asientos bajo el terraplén.

### Fig. 5. Instalación de líneas continuas de asiento

Las líneas continuas de asiento, colocadas al comienzo de la ejecución del terraplén, consisten básicamente en colocar perpendicularmente al eje de terraplén una manguera flexible. Esta manguera irá colocada en una pequeña zanja con arena, excavada en la misma cimentación del terraplén. El terraplén se irá construyendo sobre la línea, de manera que según se deforma el terreno por el efecto de la superestructura, la propia manguera se deformará también de forma solidaria. Una vez medida la deformación de la manguera, conocemos con total precisión, la magnitud y distribución de asientos bajo el terraplén.



Fig. 6. Célula de asiento

### 6.2 Células de Asiento de Cuerda Vibrante (CA)

Se han instalado dos secciones tipo de control idénticas compuestas, cada una, por tres células de asiento. Ambas se sitúan a la cota +4,5m del relleno ejecutado.

La primera sección de control, denominada SC01, se sitúa alineada en planta con uno de los bordes de la coronación del terraplén. La segunda sección, denominada SC02, se sitúa paralela a la primera y en el centro del relleno. En sección transversal, las células se distribuyen en cada una coincidiendo con la proyección de los bordes de la coronación y la tercera célula en el centro del relleno, todas situadas aproximadamente a cota +4,5m de relleno.

Para la instalación de las células de asiento se siguieron los siguientes procedimientos de montaje:

Se ejecutaron dos zanjas de unos 50 cm de profundidad y 50 cm de ancho, perpendicular al trazado y a la altura fijada, prolongándolas hasta uno de los bordes del terraplén.

Se rellenaron y compactaron las zanjas con una cama de arena de 10 cm de espesor.

Se situó cada célula en su lugar, obteniéndose su cota inicial de instalación por métodos topográficos de precisión.

Se tendió el cable y los tubos desde cada una de las células hasta su salida por uno de los extremos del terraplén.

Se cubrió cada zanja con arena hasta la cota superior de la zanja, compactando con medios ligeros. Las cajas con el depósito de reserva, los mandos de operación y terminales de medida se instalaron convenientemente enterrados en el extremo del terraplén, junto a la salida de las tuberías y cables.

Se purgó todo el sistema y rellenó el depósito de reserva con líquido desaireado, realizando una comprobación del funcionamiento de todo el sistema. Se realizó una nivelación de precisión para dar la cota exacta del nivel del líquido en los depósitos de reserva.

### 6.3 Hitos de Nivelación (HN)

En la coronación del terraplén se colocaron hitos de nivelación para llevar un control topográfico.

Cada hito instalado consta de dos partes, una es la que hace que se fije al suelo y que está formada por un clavo grande y hueco de 0,5 m, el cual a su vez lleva en su parte interna otros tres clavos que se clavan después en tres direcciones diferentes, asegurando que no se mueva una vez clavado el hito. La segunda es la base rectangular que permanece en superficie fija gracias a los clavos, esta base dispone de una zona superior en la que se realizarán siempre las mediciones.

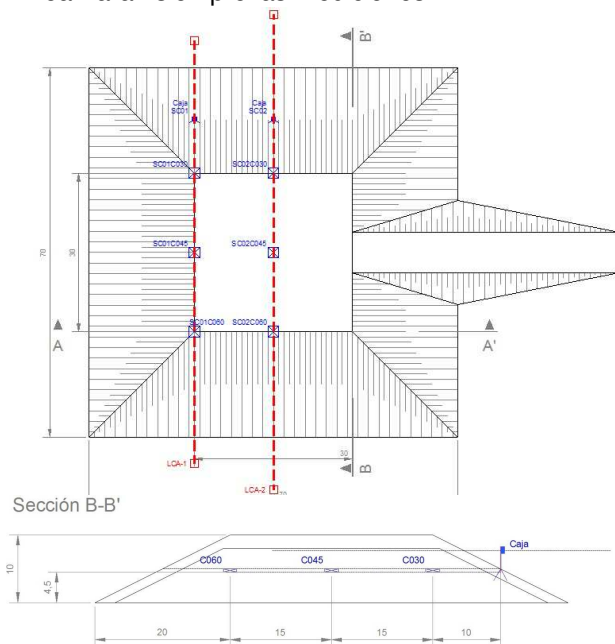


Fig. 7. Hitos en terraplén

### 6.4 Seguimiento y control de la instrumentación

Para el control de los asientos que se producen en el relleno realizado, y así poder tener una idea de su comportamiento, se han realizado lecturas con carácter semanal de los distintos medios instalados en él.

Con la instrumentación dispuesta se ha podido observar que durante el proceso de instrumentación la línea continua 1 (LCA1) ha registrado un asiento

máximo acumulado, registrado por las tres células instaladas, de 5,9 cm.

Durante el periodo de control posterior, el comportamiento es similar al registrado durante la fase de construcción, obteniendo un asiento máximo acumulado de 7 cm.

Se muestran a continuación las distintas lecturas realizadas en la sección correspondiente a la LCA 1, situada en la base del terraplén, así como de las tres células de asiento de cuerda vibrante a 4,5 m de altura respecto de la cimentación del terraplén y también de los hitos de nivelación situados en la coronación.

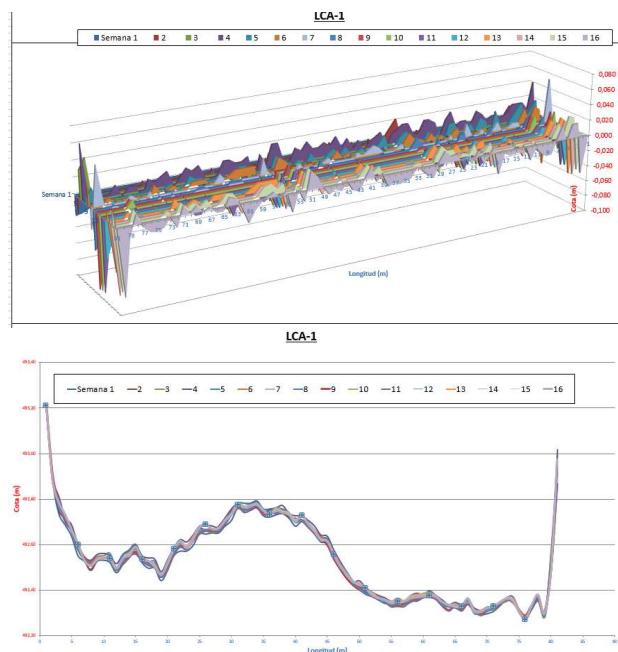


Fig. 8. Gráficas características de líneas de asiento

En el caso de las células de asiento (CA) se ha podido observar que el asiento acumulado máximo registrado por las tres células instaladas en esta sección ha sido de 5,7 cm y la media de dichas lecturas se sitúa en los 1,1 cm. Durante el periodo de seguimiento obtenemos un comportamiento similar al registrado durante la fase de construcción, obteniendo un asiento máximo acumulado de 7,3 cm, siendo la media de los desplazamientos verticales, 1,4 cm en sentido descendente.

En lo referente a los hitos de nivelación (HN) decir que se registran asientos durante todo el periodo de control, en todos los hitos de nivelación, en el intervalo de 1 a 6 mm, con un asiento medio de 3,5 mm, por lo que apenas hay descensos en la coronación.

### 6.5 Resultados obtenidos

A partir de las 8 semanas, que es el momento en que tenemos terminado el terraplén e instalados los hitos de nivelación en coronación, podemos obtener asientos acumulados de 5,70 cm en coronación del

relleno a los cuatro meses de su inicio y dos meses de su conclusión.

Se obtienen estos valores como valor absoluto entre los obtenidos por las células de asiento (aproximadamente en la mitad del terraplén) y los obtenidos en el cimienta mediante las líneas continuas de asiento y adicionando los tomados en coronación del mismo.

Gravas y cantos en matriz limosa cementada.  
 Densidad aparente  $\gamma_{ap} = 21 \text{ kN/m}^3$   
 Angulo de rozamiento interno  $\Phi = 36$   
 Cohesión efectiva  $c' = 10 \text{ kN/m}^2$   
 Módulo de Elasticidad,  $E = 67200 \text{ kN/m}^2$

**UG 2: SUSTRATO MIOGENO.**

Margas arcillosas y margocalizas blanquecinas amarillentas  
 Densidad aparente  $\gamma_{ap} = 21 \text{ kN/m}^3$   
 Angulo de rozamiento interno  $\Phi = 35$   
 Cohesión efectiva  $c' = 20 \text{ kN/m}^2$   
 Módulo de Elasticidad,  $E = 65000 \text{ kN/m}^2$

**TERRAPLÉN EXTERNO**

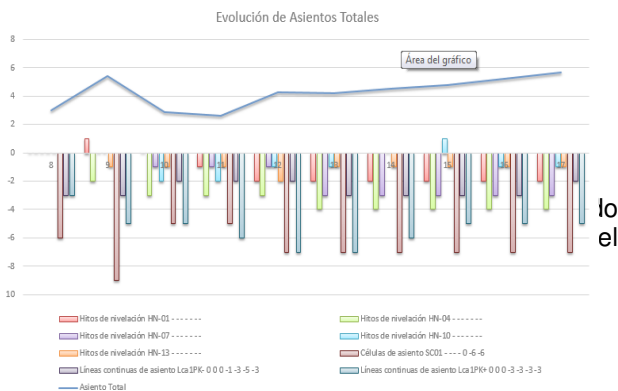
Densidad aparente  $\gamma_{ap} = 21 \text{ kN/m}^3$   
 Angulo de rozamiento interno  $\Phi = 36$   
 Cohesión efectiva  $c' = 5 \text{ kN/m}^2$   
 Módulo de Elasticidad,  $E = 43700 \text{ kN/m}^2$

**TERRAPLÉN INTERNO**

Densidad aparente  $\gamma_{ap} = 21 \text{ kN/m}^3$   
 Angulo de rozamiento interno  $\Phi = 25$   
 Cohesión efectiva  $c' = 40 \text{ kN/m}^2$   
 Módulo de Elasticidad,  $E = 31600 \text{ kN/m}^2$

Elemento de control	Punto de control	Fecha de observaciones (semanas)									
		8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Hitos de nivelación	HN-01	0	1	0	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-2
	HN-04	0	-2	-3	-3	-3	-4	-4	-4	-4	-4
	HN-07	0	0	-1	-1	-1	-3	-3	-3	-3	-3
	HN-10	0	0	-2	-2	-1	-1	0	1	-1	-1
	HN-13	0	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1
Células de asiento	SC01	-6	-9	-5	-5	-7	-7	-7	-7	-7	-7
Líneas continuas de asiento	La3PK-	-3	-3	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-2	
	La3PK+	-3	-5	-5	-6	-7	-7	-6	-5	-5	
Asiento Total		3,00	5,40	2,90	2,90	4,30	4,30	4,50	4,80	5,00	5,70

**7 CÁLCULO TEÓRICO DE ASIENTOS**



**7.2 Cálculo en Programa Settle 3D**

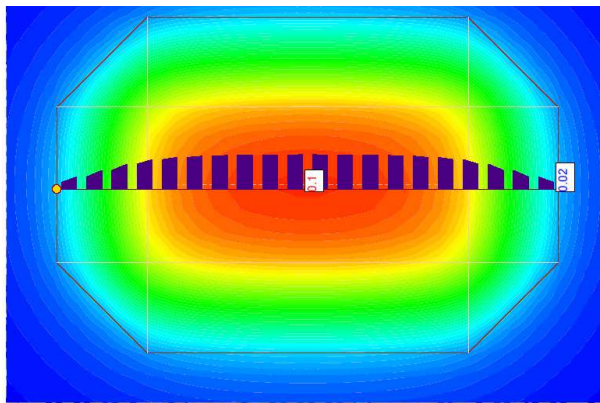
Este programa calcula los esfuerzos tridimensionales debido a cargas superficiales. Sin embargo, los desplazamientos o asentamientos y las presiones de poros son calculadas en una dimensión, asumiendo que sólo pueden producirse desplazamientos verticales.

Todas las capas son asumidas para ser horizontales y continuas. No es posible especificar geometrías no horizontales.

Las cargas aplicadas son flexibles, así que los esfuerzos en la superficie directamente bajo la carga son constantes, no así los desplazamientos.

El asentamiento total se calcula como la suma del asentamiento inmediato, del de consolidación y del asentamiento secundario o creep. En nuestro caso, el asentamiento predominante es el inmediato, al tratarse de suelos duros no saturados.

Los resultados del análisis se recogen en el gráfico, alcanzándose un asiento máximo de **9,65 cm** en la base del terraplén.



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Es (kPa)	Eur (kPa)
GLACIS CUATERNARIO		21	67200	67200
...		...	...	...

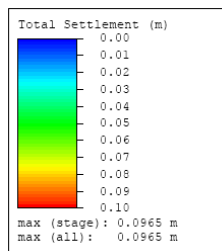
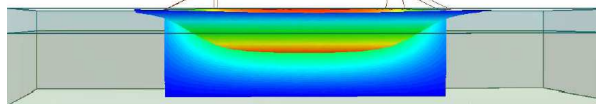


Fig. 10. Resultados asiento SETTLE 3D

transversal (dirección z). Los desplazamientos y deformaciones en la dirección z se consideran nulos. Sin embargo, se tienen en cuenta completamente los esfuerzos en la dirección z.

Se utiliza el modelo más extendido de Mohr-Coulomb, que incluye cinco parámetros, a saber: el módulo de Young,  $E$ , el coeficiente de Poisson,  $\nu$ , la cohesión,  $c$ , el ángulo de fricción,  $\Phi$ , y el ángulo de dilatación,  $\psi$ .

El módulo de elasticidad se puede definir a través de correlaciones empíricas al uso basadas en el NSPT y CU y a través de ensayos presiométricos.

En la situación de carga escalonada, permite estimar el asiento en la base del terraplén en 8,07 cm, y el asiento final en coronación de terraplén a 60 días de su terminación, 10,42 cm.

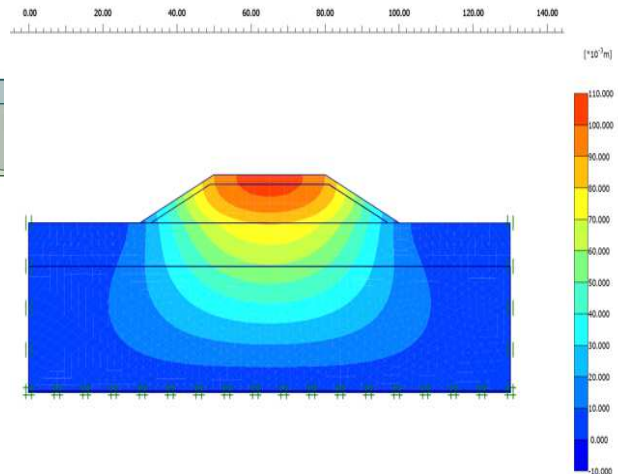


Fig. 11. Resultados gráficos con Plaxis

### 7.3 Cálculo en Programa Plaxis 2D

Para llevar a cabo un análisis de elementos finitos utilizando PLAXIS, se debe crear una malla de elementos finitos y especificar las propiedades de los materiales y las condiciones de contorno generando un modelo geométrico compuesto por puntos, líneas y otros componentes en las dos dimensiones del plano x-y. La generación de la malla y de sus propiedades y la imposición de las condiciones de contorno a nivel de elemento es ejecutada de forma automática por el generador de mallas PLAXIS basándose en la introducción del modelo geométrico.

Las situaciones modelizables corresponden a problemas de deformación plana o con aximetría. El programa utiliza una interfaz gráfica que permite a los usuarios generar rápidamente un modelo geométrico y una malla de elementos finitos basada en una sección vertical representativa del problema que se trate.

Se utiliza un modelo de Deformación plana (Plane strain) en el caso de geometrías con una sección transversal (más o menos) uniforme para las que pueda suponerse que los correspondientes estados tensionales y de cargas son uniformes a lo largo de una determinada longitud perpendicular a la sección

## 8. CONCLUSIONES

Un terraplén experimental de 10 m de altura fue construido con suelos de deficiente comportamiento geotécnico, marginales o inadecuados para validar su utilización dentro de una autopista en Andalucía (España).

Existen dos tipos de materiales en la traza; unos con elevado contenido en finos, CBR bajos y problemas de hinchamiento, que es el que se encuentra en mayor volumen en la futura obra, y otros de mejores características pero presentes en una cantidad muy limitada. El costo de otro tipo de material es muy elevado por su inexistencia en el entorno y las grandes distancias de transporte que conllevaría.

El material de menor calidad es utilizado en el núcleo del terraplén y el material de mejor calidad es empleado en coronación y en los espaldones con objeto de proteger el núcleo frente a la acción del agua y evitar el lavado y/o hinchamiento en éste.

Aunque no es objeto de este artículo, si mencionamos que sobre el terraplén construido, se realizaron pruebas de capacidad portante (placas de



carga, ensayo de huella, densidad in situ, etc.) tanto en el extendido de las capas como en coronación dando resultados aceptables.

En lo que respecta a las deformaciones del cimientado del terraplén, se han estudiado desde el punto de vista teórico y mediante instrumentación real. Las estimadas previamente mediante el programa SETTLE 3D que ha arrojado valores de 9,65 cm en la base del terraplén. En Plaxis en una situación de carga escalonada en dos fases, el asiento en la base del terraplén es de 8,07 cm, y el asiento final en coronación de terraplén a 60 días de su terminación, 10,42 cm.

La instrumentación dispuesta (líneas continuas de asiento, instaladas en el terreno natural o cimientado, células de asiento, a mitad del relleno (a 5 metros), y los hitos de nivelación (a 10 metros), situados en coronación, han dado deformaciones de 5,9 cm durante el periodo de construcción y de observación posterior (4 meses aproximadamente), un 36 % inferior a los valores teóricos de Plaxis.

Al tratarse el terreno sobre el que apoya el terraplén de un terreno rígido, sus deformaciones predominantes son de carácter elástico, y su tiempo de producción rápido paralelo a su construcción.

La variación de los módulos de elasticidad del terreno, obtenidos en ensayos "in situ" han podido condicionar las diferencias observadas.

Por lo que respecta a las deformaciones del propio cuerpo del terraplén, medidas a partir de las células de asiento y de los hitos de nivelación, los valores obtenidos están comprendidos entre 5 y 9 cm, si bien un porcentaje reducido debe ser achacable a la deformación del cimientado.

La bibliografía disponible sobre asientos post constructivos de cuerpos o núcleos de terraplenes, aporta numerosas expresiones para su estimación y tiempo de producción. Su magnitud suele estar comprendida entre el 0,5 y el 2 % del espesor del terraplén dependiendo del tipo de material empleado, siendo mayor la magnitud cuanto peores son las características geotécnicas de los materiales que lo componen.

Aunque podemos decir que el diseño del terraplén ha permitido que el agua no afecte a la estabilidad del mismo, a largo plazo debería asentarse o acortarse un valor aproximado del doble al registrado por ser de pobres características geotécnicas el material usado en su construcción. El resultado de la instrumentación da un valor un tanto alejado de lo previsto, si bien cabe mencionar que el período de observación de varios meses (4) se considera reducido en relación a los 2-3 años esperables habitualmente para su conclusión por fenómenos reológicos de fluencia lenta.

## REFERENCIAS

Chávez M. y Alcántara L. (1990). "Interacción suelo-estructura en estaciones acelerográficas de la ciudad de México", *Memorias XV Reunión*

*Nacional de Mecánica de Suelos*, Publicación SMMS, San Luis Potosí, SLP, Vol. 1: 69-76

Rodríguez Miranda, M (1986) "Pedraplenes" Simposio sobre Terraplenes, Pedraplenes y otros rellenos, Madrid, pp 219-245.

Sánchez Alciturri, J, Cañizal, J, Sagaseta, C "Field Performance of staged construction of an embankment" Proceedings Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructures, Amsterdam.

Van Impe, W, (1983) "Improvement of settlement behaviour of soft layers by means of stone columns", 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation, Helsinki, pp. 309-312.

Rodríguez Miranda, M (1986). "Diseño, construcción y comportamiento de rellenos tipo sándwich en la autopista Bilbao-Behovia" Simposio sobre Terraplenes, Pedraplenes y otros rellenos, Madrid, pp 282-292.

Asaoka, A (1978). "Observational procedure of settlement prediction". Soils and Foundations, Diciembre, pp 87-101

Fé Marqués, M, Sagaseta, C (2000) "Diseño Geotécnico del terraplén de Las Brisas, en el subtramo VI de la LAV Zaragoza-Lleida, apoyado sobre limos blandos por encima del límite líquido". Simposio sobre Geotecnia de las Infraestructuras del Transporte, Barcelona, pp 521-536.

Rodríguez, R, Romana, M et al (2000). "Deformaciones de los terraplenes de los subtramos IX y X de la nueva línea ferroviaria de alta velocidad Madrid-Barcelona" Simposio sobre Geotecnia de las Infraestructuras del Transporte, Barcelona, pp 801-811.

Duncan, J, Chang, CY, (1970) "Nonlinear analysis of stress and strain in soils", Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE, Vol 96, pp.1629-1653

IGP-2004, GIF-ADIF « Instrucciones y Recomendaciones para redacción de proyectos de plataforma » IGP-1 Geotecnia y Obras de Tierras.

IGP 1.1 Recomendaciones sobre desmontes y terraplenes, pp2-6.

Jiménez Salas, (1981). "Geotecnia y Cimientos", Tomo II, Ed. Rueda, Madrid, pp-189.