

Mejora de un relleno de vertidos de residuos urbanos^(*)

Por J. S. CASANOVAS

Dep. de Ingeniería del Terreno.
Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.

La creciente falta de suelo urbano de características geotécnicas adecuadas obliga cada vez más a utilizar zonas de relleno recientes. En particular, los rellenos de vertidos incontrolados de residuos urbanos con bajo contenido de materia orgánica ocupan extensas áreas cercanas a las grandes aglomeraciones urbanas. El tratamiento adecuado de dichos rellenos recientes permite la utilización de su superficie con la suficiente garantía de estabilidad. En este artículo se presenta un caso real en el que un proceso de precarga del depósito de rellenos condujo a un comportamiento satisfactorio del mismo, resultando sus asentamientos posteriores prácticamente nulos.

INTRODUCCION

Durante el primer semestre de 1983 se construyó un centro comercial de gran superficie cerca de Madrid, junto al río Jarama. El solar en el que se ubica este centro había sido utilizado con anterioridad como una gravera para la extracción de áridos para la construcción; la superficie sometida a procesos extractivos ocupaba una importante fracción del total del solar.

La utilización del solar como posible centro comercial obligaba a asegurar la estabilidad en el tiempo de las rasantes de los pavimentos finales. Como puede suponerse, en superficies comerciales de grandes dimensiones en las que no existen prácticamente elementos verticales (salvo los cerramientos exteriores) resulta condicionante que no se aprecien variaciones sensibles en las rasantes de los pavimentos por los que circulan los usuarios del centro. Los pavimentos de las salas de ventas de estos centros se proyectan y construyen a base de solados de terrazo pulido o placas de mármol (según zonas) colocado sobre una solera de hormigón ligeramente armado. Este tipo de pavimentos son muy susceptibles de romperse cuando se producen fallos de la solera por esfuerzo cortante o por flexión que puedan tener su origen

en movimientos del terreno sobre el que se apoyan.

Bajo estas premisas era necesario tener una cierta confianza de que, en las condiciones de utilización habituales, los movimientos del terreno bajo la solera general del edificio, fueran suficientemente pequeños como para que no se produjeran curvaturas incompatibles con la resistencia de la misma.

Por otro lado, aunque las cargas de uso por m² que impone la utilización de este tipo de centros eran relativamente bajas, los esfuerzos en base de pilares eran de una cierta importancia (especialmente en la zona de oficinas y en los pilares de las fachadas). Por lo anterior, no parecía adecuado cimentar directamente los pilares sobre el terreno «natural».

Se planteó en consecuencia, una doble problemática. Por un lado había que cimentar los elementos estructurales y por otro se debía asegurar la estabilidad de las cotas de los pavimentos.

CARACTERISTICAS DEL CENTRO Y TERRENO

El centro comercial propiamente dicho, ocupa una extensión de unos 25.000 m² (115 m × 215 m), ocupando la zona destinada a

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 28 de febrero de 1990.

aparcamiento y viales de circulación interna unos 51.000 m² adicionales. Las cotas del terreno original oscilaban entonces entre la 556 y 558 con ondulaciones muy suaves.

La figura 1 refleja un perfil medio del terreno. El subsuelo del solar corresponde a una terraza del Río Jarama de potencia relativamente baja (unos siete metros de media). Esta terraza

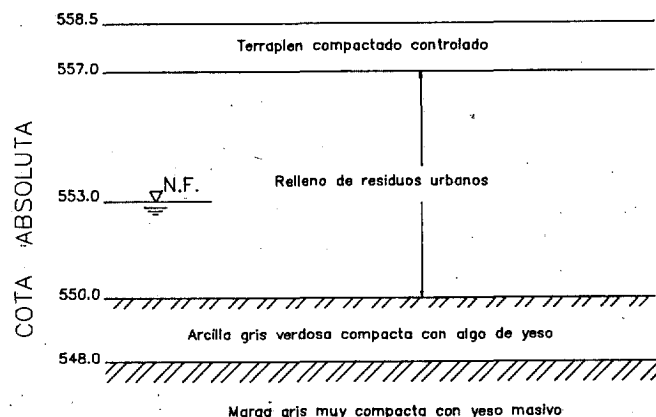


Fig. 1.—Corte típico del terreno.

descansa sobre un estrato de margas yesíferas grises del Mioceno madrileño que contienen abundantes concreciones de yesos masivos a partir de los nueve metros de profundidad, y que presentan unas características geotécnicas muy buenas (rechazo en el SPT de forma sistemática). La cota del contacto entre el aluvial y el zócalo se encuentra, típicamente, en la 550 y es sensiblemente horizontal en esta zona.

De forma ocasional, entre la formación de margas y los rellenos superiores se comprobó la existencia de algunos niveles de gravas con bolos cuyo espesor y localización eran muy variables, así como alguna zona de limos arenosos de localización igualmente errática.

El nivel freático se situaba en aquella época hacia la cota 553 (unos cuatro metros por debajo de la superficie).

A través de sondeos a rotación y catas en los niveles superiores, se comprobó que era muy abundante la presencia de restos de materiales de construcción (derribos), materiales plásticos, vidrios, algunos elementos metálicos, etc. Este relleno podría clasificarse como residuo urbano con escasa materia orgánica suscepti-

ble de descomposición. La antigüedad del «depósito» se estimó, a partir de los datos aportados por los vecinos de la zona, entre diez años y quince años.

Se daba la circunstancia adicional de que esta zona había estado sometida en diversas ocasiones a inundaciones ocurridas como consecuencia de avenidas del río Jarama al actuar la carretera N-II a modo de pequeña represa.

Como se ha dicho anteriormente, una de las condiciones que imponía la funcionalidad de la sala de ventas del centro comercial era la estabilidad en el tiempo de la cota del pavimento de la misma. Esta condición se estimó suficientemente crítica como para no atribuir al relleno existente ninguna capacidad de soporte con independencia del nivel de cargas impuesto.

Con objeto de evaluar en una primera aproximación las características de deformación del relleno original, se decidió realizar una serie de ensayos de carga con placa circular de gran diámetro. Se eligió una placa de 60 cm de diámetro con objeto de incluir el mayor volumen de material posible; con este diámetro se tenía en cuenta un espesor de relleno de más de 1 m. Previamente a los ensayos, se procedió a efectuar un somero desbroce del terreno retirando los decímetros superiores de la capa de rellenos en un área suficientemente amplia como para evitar efectos de borde laterales.

El proceso de carga consistió en dar una primera sobrecarga equivalente a 0,5 kg/cm² de presión media de contacto en escalones de 0,5 kg/cm² y hasta llegar a 3 kg/cm². Se procedió entonces a realizar un ciclo de descarga y recarga en escalones de 1 kg/cm² para volver a descargar completamente en la fase final.

En la figura 2 se reproducen los resultados extremos obtenidos en los ensayos realizados. En esta figura aparecen en ordenadas los valores de la presión media de contacto, en kg/cm², y en abscisas los valores de los asentamientos medios en centésimas de mm.

A partir de estos resultados se han calculado los valores de los «módulos de deformación aparentes» en las hipótesis de placa flexible y placa rígida situada sobre un semiespacio de

MEJORA DE UN RELLENO DE VERTIDOS DE RESIDUOS URBANOS

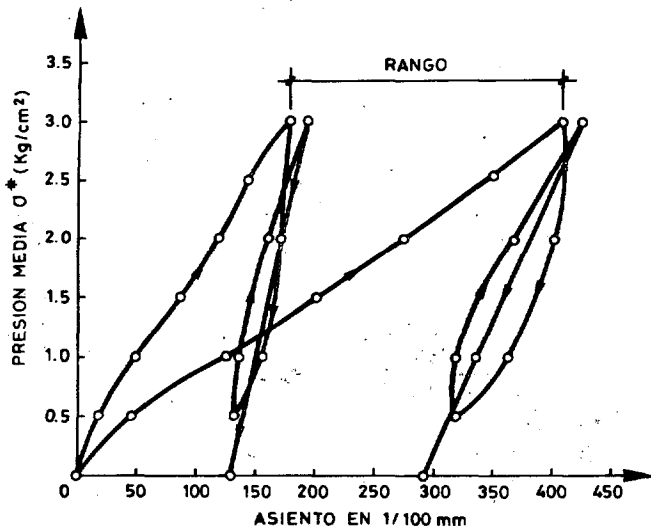


Fig. 2.—Rango de curvas de los ensayos de placa de carga.

Boussinesq de acuerdo con las fórmulas siguientes (Poulos y Davis, 1974):

$$E^* = \frac{E}{1-\nu^2} = \frac{\sigma^* B}{\rho}$$

$$E^* = \frac{E}{1-\nu^2} = \frac{\pi}{4} \frac{\sigma^* B}{\rho}$$

donde: E^* es el módulo de deformación aparente,

E y ν son los parámetros elásticos,
 σ^* es la presión de contacto media,
 B es el diámetro de la placa y
 ρ es el asiento medio medido.

Los resultados de los ensayos se recogen en la Tabla 1 y de ellos se desprende un resultado inesperado en principio. El módulo medio medido en primera carga resultó ser del orden de 500 kg/cm² y del orden del triple en las fases de descarga-recarga. Estos módulos evidenciaban unos comportamientos mucho más rígidos que los esperados para el tipo de terreno encontrado (estimábamos unos módulos no superiores a 20 ó 30 kg/cm²).

En nuestro caso pensamos que estos resultados no podían ser considerados como el comportamiento global del relleno aunque pudieran serlo, eventualmente, de la costra superior del estrato que pudiera haber estado sometida a un

Módulo Aparente E^* kg/cm ²		Ensayo número				Valores medios
		1	2	3	4	
1. ^a Carga	Flexible	400	600	570	850	605
	Rígida	315	471	447	667	475
Recarga	Flexible	1.390	1.710	2.400	2.400	1.975
	Rígida	1.091	1.345	1.885	1.885	1.550

TABLA 1.—Resultados de los ensayos de carga con placa.

proceso de sobreconsolidación por desecación cíclica (aunque de haber sido así probablemente la relación entre los valores de los módulos aparentes correspondientes a primera carga y a descarga hubiera sido menor) lo cual era coherente con la historia de inundaciones comentada anteriormente.

ALTERNATIVAS DE MEJORA DEL SUELO

A la vista de los condicionantes de asientos que imponía el uso del centro comercial, se creyó conveniente la mejora de las características del terreno, en la medida de lo posible, para tener la suficiente confianza en el comportamiento del pavimento a largo plazo.

Las posibles soluciones pasaban por: a) Substitución total o parcial del relleno de vertidos no controlado; b) Precompresión por carga estática; c) Compactación dinámica; d) Inyecciones.

La posibilidad de inyectar, quedó prácticamente descartada de entrada debido a la gran heterogeneidad del terreno, al gran volumen de suelo a tratar y a la falta de garantía de los resultados.

Respecto a la compactación dinámica existe alguna evidencia, Charles et al. (1981), de que rellenos del tipo que se encontró en el solar han sido tratados mediante esta técnica con resultados diversos. La eficacia de la compactación dinámica se reduce muy rápidamente en profundidad y, además, se generan excesos de presión intersticial de intensidades muy poco homogéneas y cuya disipación puede ocasionar asientos de consolidación diferidos con distribución muy irregular. Este último aspecto se

consideró determinante, en nuestro caso, dado que el centro comercial debía ser operativo en unos pocos meses tras la eventual mejora del terreno. En cuanto a los asientos observados, en la mencionada referencia se citan deformaciones medidas de hasta el 10 por ciento como resultado de proceso de mejora.

La otra posibilidad consistía en realizar una precarga estática de la zona comercial. Esta técnica, antigua y muy extendida, ha sido utilizada con éxito para mejorar las características de depósitos de residuos urbanos e industriales de forma que pudieran constituir, incluso, bases a cimentación de edificios de viviendas y de equipamientos diversos. Se han descrito compactaciones efectivas de rellenos de más de 20 m (Cartier et al., 1981).

Una característica fundamental de este proceso y para el tipo de «suelo» encontrado es que los asientos que se producen como consecuencia del proceso de carga son muy rápidos, siendo muy breve el período de consolidación hidrodinámica. Por otro lado, al ser un proceso estático, puede controlarse la progresión de los asientos de forma continua y determinarse con precisión cuando han terminado. Otra ventaja, fundamental desde el punto de vista económico y de plazos, de este método radica en la utilización de maquinaria convencional de movimiento de tierras de la que dispone cualquier contratista general de Obra Civil.

Como inconveniente existía un cierto riesgo de que la precompresión pudiera ser incapaz de hacer colapsar algún hueco del relleno no controlado o de reducir encapsulamientos locales (por ejemplo botellas u otros elementos contenedores).

Se daba una circunstancia adicional que favorecía en este caso la precompresión como técnica de mejora a elegir. El elemento básico para la precarga (tierras) debía ser necesariamente aportado a la obra con objeto de elevar la rasante de las zonas de viales interiores y aparcamiento. Este volumen de tierras (algo más de 50.000 m³ permitía disponer una precarga equivalente a unos dos metros de altura de tierras.

En base a lo anterior, y a que el coste por

m² era algo menor (aunque no significativamente) para el proceso de precarga en comparación con el proceso de compactación dinámica, se optó por aquel procedimiento.

Por otro lado, como ya se ha dicho, las cotas del solar inicialmente se situaban entre la 556 y 558. La cota de coronación de terraplén en la sala de ventas del centro se fijó (por criterios de seguridad frente a avenidas del río) en la 558,50. Con objeto de facilitar el control del terraplenado se consideró conveniente hacer una compensación lateral de tierras de forma que en el terreno «natural» se generara una plataforma para el «cimientto» del terraplén sensiblemente horizontal a la cota 557. Así pues, se disponía de un espesor mínimo de terraplén controlado del orden de 1,50 m bajo la solera del centro.

Se planteó la incógnita de que un terraplenado de 1,50 m pudiese conducir a un estado «normalmente consolidado» al depósito de residuos sobrepasando la eventual e hipotética pequeña sobreconsolidación producida por antigüedad («aging») y por variaciones del nivel freático. Si este fuera el caso, el depósito, tras la sobrecarga, estaría de nuevo en situación de generar grandes asientos incluso sometido a bajas sobrecargas adicionales. Este hecho condicionaba, de alguna manera, la intensidad de la precarga a disponer.

La sobrecarga máxima de uso en la zona de ventas se estimaba del orden de 1 ton/m², por lo que desde un punto de vista teórico (aunque quizá irreal), era suficiente disponer una precarga equivalente a 0,5 m de espesor de tierras compactadas con un peso específico natural de 2 ton/m³. Con objeto de tener un margen de seguridad adecuado y acelerar y amplificar el proceso, se consideró conveniente utilizar una intensidad de carga sensiblemente mayor, y se dispuso, finalmente, una precarga de 4 tn/m² es decir unos dos metros de terraplén ligeramente compactado utilizando para ello el acopio de tierras que se precisaba para el terraplenado de la zona de aparcamiento.

No es fácil evaluar la influencia que ejerce, a modo de acción adicional, la vibración que se introduce durante el proceso de compactación del terraplén mediante rodillos vibratorios. Muy

probablemente la acción vibratoria puede favorecer el colapso de zonas metaestables localizadas en las capas más superficiales del relleno «natural» antiguo, aumentando su densidad antes del efecto derivado de la precarga.

CONTROL DEL PROCESO

Para tener un conocimiento preciso de la evolución del proceso de mejora, no resulta adecuado, en este tipo de rellenos, el empleo de piezómetros. En consecuencia, la única manera de conocer el estado del proceso consiste en disponer células de medida de asientos dispuestas en la superficie del terreno. En nuestro caso se situaron en la cota 557.

La solución más idónea pasaba por la utilización de células hidráulicas de asiento dado que, una vez instaladas, no producían interferencias con la construcción del terraplén posterior, y por tanto el contratista no tenía condicionantes «molestos» que le impidiesen cumplir con los plazos estrictos que imponía la propiedad.

Las células hidráulicas de asiento son dispositivos simples basados en el principio de los vasos comunicantes. Las variaciones de cota de la célula se reflejan en un panel de medida dotado de una escala con una precisión de un milímetro.

El rango de medidas, se limitó a 1 m por lo que se utilizaron escalas de esta longitud, coincidiendo el tramo superior de su escala con la cota de la base del terraplén a disponer.

Problemas de suministro de tubos de unión entre células y paneles obligaron a disponer estos en dos casetas (A y B) situadas en los puntos que indica el esquema de la figura 3. Por igual motivo, aunque en principio se proyectó disponer 20 células, sólo se colocaron finalmente 14 células regularmente distribuidas en la superficie del solar (o sea una célula por cada 1.100 m² aproximadamente) cuya localización se refleja en la misma figura 3.

Por problemas de pérdidas en las líneas, dos de las células de asiento (células números 5 y 11 quedaron fuera de servicio a los tres meses de su colocación cuando ya, por fortuna, se había producido la casi totalidad de los asien-

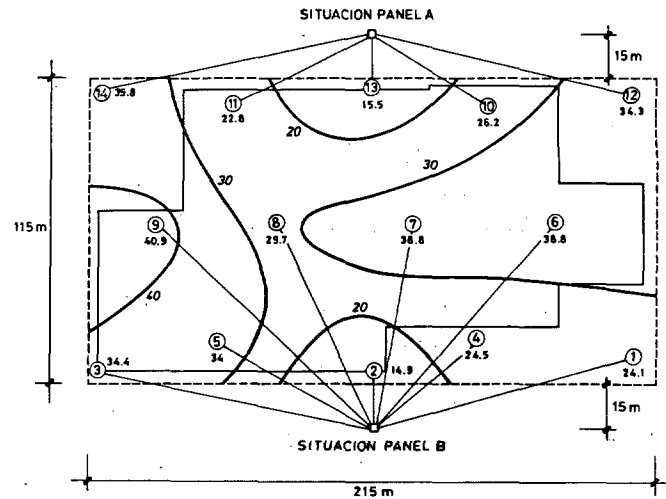


Fig. 3.—Posición de las células de asiento y paneles de lecturas. Curvas de nivel de asientos y asientos medidos (cm).

tos y éstos estaban prácticamente estabilizados.

Las células quedaron colocadas y conectadas a los paneles de lectura el día 31 de agosto de 1982, tomándose entonces la lectura origen.

La colocación de la precarga se hizo de forma sensiblemente lineal en el tiempo de forma que la duración de terraplenado supuso un incremento medio de presión del orden de 0,15 ton/m² por día. El terraplén comenzó a construirse el día 2 de septiembre de 1982 y terminó el día 28 del mismo mes.

Las lecturas significativas de las células de asiento se iniciaron el día 15 de septiembre, es decir prácticamente a mitad del proceso de precarga. Este hecho suponía un posible problema de interpretación del proceso de asientos dado el desfase entre la acción y la medición de los asientos. Sin embargo no fue así debido a la gran linealidad y proporcionalidad de la progresión de asientos con el proceso de carga tal como comentamos más adelante.

No se realizaron lecturas entre el 26 de octubre y el 30 de noviembre de 1982. Se efectuaron tres procesos de desaireación del sistema; la primera se realizó justo después de la colocación de las células, la segunda se realizó dos meses después y la tercera transcurridos cuatro meses desde la anterior. Dado que pudieran presentarse problemas de fiabilidad en las lecturas tras largos períodos de tiempo transcurridos sin desairear los sistemas de con-

MEJORA DE UN RELLENO DE VERTIDOS DE RESIDUOS URBANOS

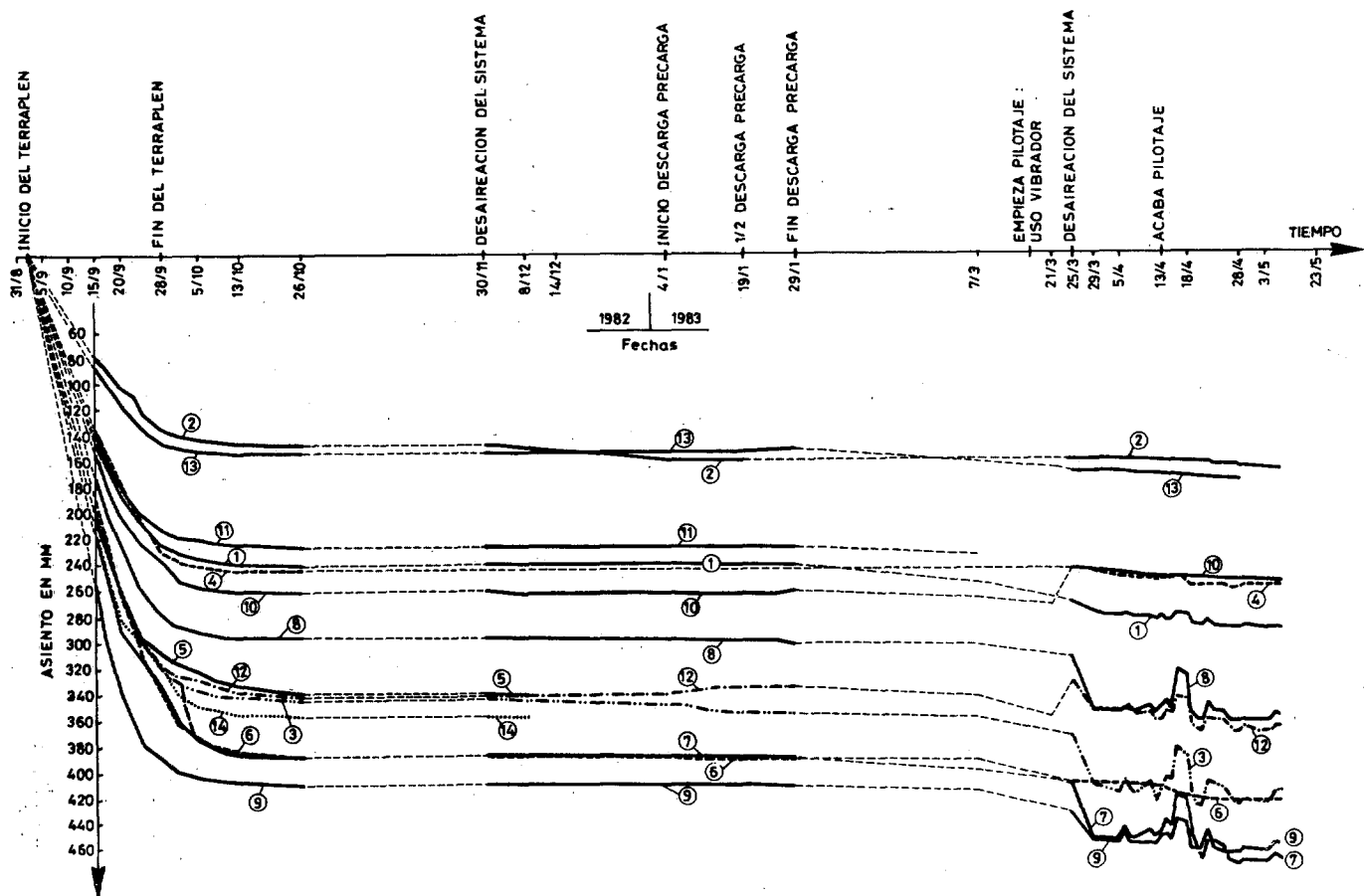


Fig. 4.—Evolución de los asientos en el tiempo.

rol, las lecturas realizadas durante los meses de febrero y marzo de 1983 se han reflejado en línea de trazos.

RESULTADOS

En la figura 4 se muestra el registro de asientos en el tiempo así como unas anotaciones de los eventos más notables que se produjeron durante el tiempo que duró el proceso de medidas de asientos (hasta mayo de 1989).

Un primer hecho interesante fue la notable coincidencia entre los orígenes de las curvas de asiento de cada una de las células colocadas cuando éstas se extrapolaron en base a prolongar simplemente la zona inicial de las curvas, que era en todos los casos sensiblemente recta, hasta el eje de tiempos. Tal como muestran las líneas de trazados, todas las extrapolaciones convergen sobre un mismo punto que es,

además, el correspondiente al instante de inicio de la construcción del terraplén. Este resultado parece indicar que el depósito de «suelo» se comporta de forma lineal con el nivel de sobrecargas impuesto y que la respuesta es prácticamente inmediata.

Esta linealidad entre cargas y asientos empieza a perderse y a ser menos evidente a partir del momento en que se entra en el último tramo del proceso de carga. Las curvas tienden a estabilizarse ligeramente, pero los asientos crecen aún algo después de colocada totalmente la sobrecarga; este incremento diferido de asiento no parece guardar una proporción constante con el asiento inmediato producido.

La magnitud de los asientos que se midieron fue muy variable de unas zonas a otras aunque siempre de gran magnitud (entre 14.9 y 40.9 cm), poniendo en evidencia la gran heterogeneidad que se da en este tipo de vertidos no

controlados. Estos asientos representan unas deformaciones verticales comprendidas entre 2,1 por ciento y 5,8 por ciento, y unos módulos de deformación vertical (de tipo edométrico) comprendidos entre 70 ton/m² y 190 ton/m². La baja densidad de puntos de lectura no permite establecer valores representativos de deflexiones angulares o curvaturas de la superficie deformada.

Los asientos quedan estabilizados en todos los casos a los 30 días tras la finalización de la carga, aunque podría decirse que a partir de los 15 días se ha producido más del 95 por ciento del asiento total.

El proceso de retirada de la precarga comenzó a primeros de 1983 (el 4 de enero) y se prolongó durante los 25 días siguientes.

De nuevo se produjo un resultado interesante por cuanto los levantamientos producidos como consecuencia de la reducción de carga fueron prácticamente nulos en todos los puntos de medida que quedaban operativos (para entonces 4 células habían quedado fuera de uso). Aparentemente todas las deformaciones producidas eran de carácter plástico no recuperable.

Posteriormente, durante la fase de construcción de los pilotes de cimentación de la estructura, se siguieron controlando los asientos. Los pilotes eran del tipo perforado con barrena, encamisado temporal y hormigonado «in situ» con extracción de camisa. Tanto la colocación de la camisa como su posterior extracción se efectuaron mediante una pinza vibratoria.

En la figura 4 se reflejan asimismo las fechas de comienzo y fin del proceso de pilotaje, y puede observarse como durante el proceso de construcción del mismo se producen movimientos erráticos de sentido ascendente y descendente.

Aunque parece a primera vista que existe una correlación entre los movimientos de algunas de las células durante la fase de ejecución de los pilotes, no se trata de una tendencia generalizada. El hecho de que no se observara el mismo comportamiento errático en todas las células que se centralizaban en cualquiera de las dos casetas de medida parece destacar que el movimiento tuviera su origen, no en las células propiamente dichas, sino en movimientos de los propios paneles de lectura; las células

números 3 y 4 coincidían en un panel de lectura y los números 5, 6, 7, 8 y 9 en otro panel pero ambos situados en la misma caseta (A en la figura 3), mientras que el resto de células, números 10 a 14 inclusive se canalizaban hacia un panel situado en la otra caseta (B en la figura 3).

Podría aventurarse, por consiguiente que fue posiblemente la vibración producida por la hincas de las camisas de los pilotes la responsable de que se registraran los altibajos de las lecturas, aunque este hecho no podrá nunca llegarse a comprobar.

Hasta la fecha y desde que el centro comercial fue inaugurado en otoño de 1983, el comportamiento del pavimento de la sala de ventas parece reflejar la ausencia de movimientos apreciables del subsuelo.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a Ingeniería y Coordinaciones (INGECO) y a la empresa EMASA, contratista de las obras, su eficaz colaboración durante todo el proceso de control de la obra.

CONCLUSIONES

Las conclusiones más importantes que, a nuestro juicio, pueden destacarse del caso que se presenta podrían ser que:

- La deformabilidad de los rellenos de vertidos no controlados de residuos urbanos básicamente no orgánicos, no puede cuantificarse en general mediante ensayos de placa de carga de gran diámetro.
- El tratamiento masivo de rellenos con vertidos no controlados de productos de desecho industrial y urbano puede realizarse satisfactoriamente mediante procesos de precarga estática. Sobre estos rellenos pueden colocarse pavimentos rígidos (y con mayor motivo flexibles).
- El orden de magnitud de los asientos provocados por sobrecargas relativamente bajas puede ser muy importante y llegar hasta más del 5 por ciento del espesor de

la capa de relleno. Los módulos medios de deformación vertical son del orden de 100 ton/m².

- d) Los asentamientos se producen de forma prácticamente inmediata al proceso de carga.
- e) El proceso de deformación parece ser prácticamente lineal con la presión transmitida, y los asientos son, prácticamente, en su totalidad de carácter no recuperable (no hay componente «elástica»).
- f) La existencia de vibraciones puede conducir a movimientos erráticos de signo alternativo con un resultado neto de incremento de asiento variando entre el 5 por ciento y el 15 por ciento del asiento total provocado por la precarga «estática». De nuevo estos movimientos son prácticamente simultáneos con la perturbación.

REFERENCIAS

1. CARTIER G., LONG N.T., POUGET P., BARGILLAT R. and CUDENNEC J.P. (1981): «Déchets urbains et

pneumatiques usagés en génie civil». Proc X Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engrg. Stockholm.

2. CHARLES J.A., BURFORD D. and WATTS K.S. (1981): «Field studies of the effectiveness of dynamic consolidation». Proc. X Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engrg. Stockholm.
3. POULOS H.G. and DAVIES E.H. (1974): «Elastic solutions for soil and rock mechanics». Ed. John Wiley. New York.

J. S. Casanovas



Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Promoción 1971. Master of Sciences por el Imperial College (Universidad de Londres). Profesor titular de M.S. en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Trabajó en el Ayuntamiento de Barcelona entre 1981 y 1985. Autor de varios proyectos e informes técnicos sobre cimentaciones y patología de construcciones.

