

Ampliación del Estadio de Madrid. Ejecución de la cimentación

Expansion of Madrid Stadium. Foundation construction

Jesús GÓMEZ HERMOSO

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Universidad Politécnica de Madrid

Profesor Titular

jesusgomezhermoso@gmail.com

Ginés LADRÓN DE GUEVARA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

MC2

Director

gines@mc2.es

RESUMEN

En esta ponencia se recogen algunos de los principales aspectos de la cimentación. Partiendo de la cimentación profunda del estadio original se realizaron estudios geotécnicos y geofísicos para determinar con más precisión las características del terreno. Como conclusión de los mismos se ha proyectado y construido una cimentación profunda mediante pilotes bajo la nueva estructura proyectada y un recalce con micropilotes bajo la estructura ya existente. En este documento se recogen algunos aspectos de los estudios del terreno y de la ejecución de los elementos de cimentación.

ABSTRACT

This paper shows some of the main aspects of foundation. The original Stadium has a deep foundation. The project team developed geotechnical and geophysical studies to determine the soil characteristics more exactly. As conclusion of these studies the project team has designed and the construction team has built a new deep foundation with piles under new structure and a reinforced foundation with micropiles under old structure. This document shows some soil studies aspects and construction of foundation elements.

PALABRAS CLAVE: estadio, estudio geofísico, estudio geotécnico, pilotes prefabricados, pilotes hormigón in situ, ensayos de integridad de pilotes

KEYWORDS: stadium, geophysical study, geotechnical study, precast piles, concrete piles, piles integrity test

1. Descripción del edificio

El Estadio de Madrid fue construido en los primeros años de la última década del pasado siglo [1]. Estaba constituido por una graderío principal en uno de sus laterales (Figura 1) y rodeado por una superficie verde natural en los otros tres lados del rectángulo. Su destino inicial era la práctica del atletismo, aun contando con un campo de fútbol en el interior de la pista.

En el año 2004 el Ayuntamiento de Madrid se planteó la ampliación del estadio hasta una capacidad de 70000 espectadores, con el objetivo de convertirlo en estadio olímpico y celebrar en la ciudad los Juegos Olímpicos de 2008 (después se intentó para 2012 y para 2016) [2-4].



Figura 1. Tribuna del estadio de 1994

En un acuerdo con el Club Atlético de Madrid, se planteó que el estadio olímpico se transformara posteriormente en un estadio para la práctica del fútbol. Teniendo en cuenta que no se obtuvo la celebración de los Juegos Olímpicos de 2008 ni de 2012, se estudió la alternativa de que el estadio se remodelara para la práctica del fútbol, posteriormente se transformara en estadio olímpico y, finalmente, se volviera a adaptar para la práctica sólo de fútbol. Esta evolución supuso una serie de cambios en el proyecto y en las alternativas de los procesos de construcción. La diferencia fundamental estriba en la composición de los graderíos. El estadio que finalmente se está construyendo, y cuya finalización está prevista para junio de 2017, cuenta con tres niveles de graderío (alto, medio y bajo). En el caso de la práctica de atletismo las pistas ocuparían, en planta, el espacio del graderío bajo y, por tanto, el estadio tendría sólo graderíos medio y alto.

Teniendo en cuenta la evolución que han sufrido las candidaturas de Madrid como ciudad olímpica, han sido varias las alternativas del proceso constructivo. Finalmente se ha adoptado la construcción del estadio sólo para la práctica del fútbol y como campo de juego del Club Atlético de Madrid.

El esquema general de construcción del estadio ha sido el siguiente:

- Partiendo de una tribuna principal en la zona Oeste, constituida por un graderío alto (cuya forma avala el nombre de “La Peineta”) y un graderío medio, se ha de demoler éste.
- En una segunda fase se construyen los pórticos portagradas de los graderíos medio de la zona Oeste y medio y alto de las zonas Norte, Este y Sur.
- Se comienza la fabricación y el montaje de las gradas de los graderíos del punto anterior.
- Se construyen los pórticos portagradas del graderío bajo en todo el perímetro del campo de juego.
- Se montan el resto de las gradas prefabricadas.

Sobre las características técnicas de la cimentación y la estructura del estadio debe indicarse que la cimentación del original es profunda y está constituida por pilotes ejecutados “in situ”. La actual ampliación se ha llevado a cabo mediante la cimentación con pilotes “in situ” en los nuevos pórticos ejecutados y con recalce con micropilotes en las zonas en que ha sido necesario en la estructura original, motivado por el incremento de cargas en determinados ámbitos.

La cubierta del estadio la compone una tensoestructura apoyada en un anillo de compresión exterior constituido por una estructura metálica de sección triangular en una sección radial del estadio, y un anillo de tracción interior con dos niveles de cables. Radialmente hay una familia de cables que, alternativamente, une el punto alto del anillo de compresión con el punto bajo del anillo de tracción y el punto bajo del anillo de compresión con el punto alto del anillo de tracción. Sobre estos cables radiales y anclados a los anillos de tracción y compresión se monta la cubierta textil propiamente dicha.

2. Estudio del terreno

Para el desarrollo del proyecto actual se ha realizado una ampliación de los estudios del terreno previos. El antecedente principal es un estudio geotécnico realizado por la empresa GEOPRIN en enero de 2004, en el que se indicaba que “los terrenos a investigar fueron explotados en su día para la extracción de sepiolita hasta aproximadamente la cota 620 m y posteriormente rellenados hasta la superficie actual sin suficiente control, con la consiguiente problemática de índole geológico-geotécnica asociada, tanto a las edificaciones como al proyecto de urbanización”.

En este estudio geotécnico se destacaban dos problemas fundamentales:

- Los posibles asientos reológicos.
- La presencia de “suelos expansivos, muy plásticos”.

Con el fin de contrastar los resultados de campañas anteriores, aclarar las incertidumbres planteadas y disponer de nuevos ensayos con los que caracterizar el terreno con mayor precisión, se han llevado a cabo los siguientes trabajos complementarios:

- Estudio geofísico mediante sísmica de refracción y sísmica pasiva.
- Sondeos con ensayos presiométricos y toma de muestras para ensayos de laboratorio.
- Penetrómetros DPSH.
- Ensayos dinámicos de carga en pilotes prefabricados hincados.

Se han humectado los 10 a 15 metros superficiales en tres emplazamientos, con el objeto de analizar la evolución del comportamiento de los horizontes superiores de rellenos tras su saturación.

2.1. Estudio Geofísico

El estudio geofísico fue desarrollado por la empresa “International Geophysical Technology, S.L.” (IGT) en abril de 2011 y de cuyo informe se reproducen aquí (entrecomillados) algunos párrafos o frases.

En esta zona, como se ha comentado, existieron explotaciones mineras a cielo abierto en la década de 1980, rellenándose posteriormente las zonas excavadas con los mismos materiales estériles de la excavación. El espesor de estos rellenos puede ser del orden de 30 o 40 metros.

En el estudio se han utilizado los métodos de la “sísmica de refracción” y la “sísmica pasiva”, midiéndose un total de 2686 m de perfil. “La justificación del empleo de estos métodos en este estudio se basa en el hecho de que los rellenos formados por materiales no consolidados se caracterizan por valores de V_p y V_s notablemente más bajos que los del terreno natural, de modo que si se consigue determinar de la forma más detallada posible la distribución de los valores de V_p y/o V_s del terreno, se puede identificar la posición del contacto entre ambas unidades y determinar el espesor de los rellenos”.

“En condiciones normales el estudio podría haberse realizado en su totalidad mediante el método “sísmico de refracción”, pero la existencia de algunas zonas pavimentadas hizo que únicamente fuera viable en ellas el estudio mediante “sísmica pasiva”. ... el empleo de este último método está justificado también como método complementario al “sísmico de refracción” para confirmar el orden de magnitud del espesor de los rellenos y el hecho de que éstos cubren la zona de estudio en su totalidad”.

Para la realización de las medidas de la sísmica pasiva se empleó un dispositivo lineal o implantación formado por 24 geófonos espaciados entre 3 y 5 metros.

Los resultados de este estudio y los criterios empleados se basan en la consideración de “rellenos no consolidados” los materiales con $V_s < 370$ m/s y “terreno natural consolidado” los materiales con V_s entre 500 y 600 m/s. Siguiendo estos criterios, el espesor de los rellenos obtenido de las medidas efectuadas es del orden de 40 metros.

En cuanto a la “sísmica de refracción” se obtuvieron los valores de velocidad de transmisión de las ondas de compresión (V_p) a través del terreno, dependiendo estos valores del grado de consolidación y de la integridad de los materiales del subsuelo. Estableciendo el límite entre los rellenos y el terreno natural en valores de este parámetro entre los 1000 y los 1250 m/s, de los resultados medidos se concluye que existe un espesor de rellenos del orden de 35 a 40 metros, lo que resulta coherente con las conclusiones arrojadas por el ensayo de sísmica pasiva.

2.2. Estudio Geotécnico

Del estudio inicial llevado a cabo por GEOPRIN en 2004 se deducía que existían las siguientes capas de terreno:

- Rellenos antrópicos tipo 1 (R-1), delimitados por valores del N_{20} del ensayos de penetración dinámica DPSH menores a 18 y con valores medios de 10.
- Rellenos antrópicos tipo 2 y Terciario alterado (R-2): comprende materiales de relleno con una mayor compacidad que los anteriores por el efecto de su mayor antigüedad y la precarga existente, así como terreno natural (Terciario) alterado o descomprimido por la removilización de los materiales que lo cubrían en su origen.
- Terreno Natural (Terciario) (UG-1): alternancias de arenas, limos arenosos y limos arcillosos, de plasticidad variable (peñuelas, lutitas y arcillas litificadas por sobreconsolidación o cementaciones carbonatadas).

Partiendo de estos antecedentes, el trabajo de los nuevos estudios a realizar (llevados a cabo por la empresas IGT y EUROCONSULT) han sido los siguientes:

- Estudio geofísico mediante sísmica de refracción y sísmica pasiva (ya descritos).
- Perforación de diecisiete (17) sondeos mecánicos a rotación con extracción continua de testigo, ensayos de penetración estándar (SPT) y toma de muestras inalteradas y parafinadas.
- Sobre estos sondeos se realizan 18 ensayos presiométricos Menard, y 15 presiodilatométricos, además de ensayos de permeabilidad Lefranc.
- Diecinueve (19) ensayos de penetración dinámica de tipo DPSH, hasta rechazo.
- Doce (12) sondeos mecánicos a rotación “a destroza” sin recuperación de testigo. En estas perforaciones se realizan ensayos de inundación.



Figura 2. Ensayo de inundación

Para el análisis de la potencial colapsabilidad de los rellenos, se diseñó un ensayo específico denominado “de inundación” o “combinado”.

“Con este ensayo se pretende comparar el comportamiento de los rellenos antes y después de ser inundados, ya que el colapso depende en gran medida del grado de saturación. Por tanto, en tres zonas concretas, junto a tres sondeos ejecutados en las condiciones normales del relleno ..., se realizaron varias perforaciones por las que se inundó controladamente un volumen significativo de terreno. Sobre ese terreno, que se pretendía saturar, se ejecutaron nuevos sondeos y penetrómetros” (Figura 2).

El ensayo de inundación se tenía las siguientes fases:

- Fase 1: Se ejecutó el sondeo de cada zona de ensayo, en condiciones normales.
- Fase 2: Se ejecutaron varias perforaciones (de 18 ó 25 m, según el área de estudio) con las que se pretendía afectar a un volumen importante de los rellenos) y se inundaron. También se inundó el sondeo de la Fase 1.
- Fase 3: Se ejecutó el sondeo correspondiente y también un penetrómetro DPSH con los que contrastar resultados.

2.3. Ensayos de hinca de pilotes

También se planteó la alternativa de realizar la cimentación profunda mediante pilotes prefabricados de hormigón estructural. Para comprobar, tanto su capacidad como la afección sobre la estructura ya construida, se llevaron a cabo pruebas de carga en pilotes hincados con el analizador electrónico de hinca (ASTM-D 4945-89. “Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles”) (Figura 3) para dar respuesta a los siguientes puntos:

- “Comprobación de que con estos pilotes puede alcanzarse un sustrato resistente, superando la totalidad de los rellenos no consolidados, sin menoscabo de su integridad estructural durante la hinca.
- “Determinación de la carga de hundimiento de los pilotes hincados a partir de las medidas realizadas en los pilotes de prueba mediante el analizador de hinca (PDA).
- “Establecimiento de un criterio de rechazo a partir de los resultados obtenidos.

- “Análisis de la posible afección del proceso de hincado a las cimentaciones existentes, mediante la medición de las velocidades de vibración a distintas distancias del pilote durante todo el proceso de hincado”.



Figura 3. Ensayo de hincado de pilotes prefabricados

Estos ensayos de campo se concretaron en las siguientes actuaciones:

- Hincado de 6 pilotes cuadrados de hormigón de 400 mm de lado en tres emplazamientos diferentes (2 pilotes/emplazamiento)
- Durante la hincado de los 6 pilotes se realizó un pilote-penetrómetro, que en esencia consiste en la realización de un perfil de resistencia del terreno a la penetración contabilizando el número de golpes necesarios para hincado 20 cm a lo largo de todo el fuste.
- Determinación, con los métodos CASE y CAPWAP de la capacidad portante del pilote, al final de su hincado y en la rehincado realizada de tres a cinco días después de la misma.

Se realizó también la medición de las frecuencias y amplitudes de las vibraciones producidas en el terreno circundante y en la estructura del estadio. Los valores medidos son inferiores a los valores de referencia de vibración de las cimentaciones indicado por el CTE [5].

Estos ensayos fueron realizados por las empresas RODIO-KRONSA y TERRATEST.

2.4. Conclusiones de los estudios realizados

De los estudios del terreno llevados a cabo y de los ensayos realizados sobre los pilotes prefabricados se obtienen las siguientes conclusiones:

- Para la cimentación profunda del edificio eran factibles tanto los pilotes “in situ” como los pilotes prefabricados.
- El efecto (vibración) del golpeo de los pilotes prefabricados sobre los elementos de cimentación y estructurales ya existentes es inferior al admisible por la normativa.
- Desde la cota de encepado tipo (672 m) hasta la cota de “terreno competente” (636 m, según zonas) hay 36 m. Este valor, sin embargo, es variable en función de los dos previos, ya que

ni todos los encepados parten de la misma cota ni el terreno competente se encuentra en el mismo nivel en todos los casos.

- Se distinguirán dos zonas de los rellenos consolidados, divididos por una denominada “línea neutra”. El situado bajo ésta se considera suficientemente consolidado y, por tanto, con pocas posibilidades de asiento; el que se encuentra sobre la misma se considera menos consolidado, con posibilidades de asiento y, por tanto, con capacidad para transmitir un rozamiento negativo con el que se dimensionaron los pilotes.

Finalmente se decidió ejecutar la cimentación mediante pilotes “in situ”. Razones económicas y de capacidad de suministro de los pilotes prefabricados fueron las que inclinaron la decisión a favor de los ejecutados con hormigón vertido “in situ”.

3. Ejecución de pilotes “in situ”

La cimentación profunda mediante pilotes fue proyectada de nuevo a raíz de las conclusiones de los estudios del terreno realizados (Figura 4) [6]. Se mantuvieron los mismos tipos de pilotes iniciales, con diámetros de 850 y 1500 mm. La diferencia entre ambos proyectos se encontraba en la longitud de los pilotes, ya que el estudio del terreno realizado permitió optimizar los valores de la resistencia por fuste y resistencia por punta de los mismos, así como del rozamiento negativo del citado terreno.

Los pilotes se ejecutaron con hormigón HA-30/B/20/Ila-Qb

Y acero B500S

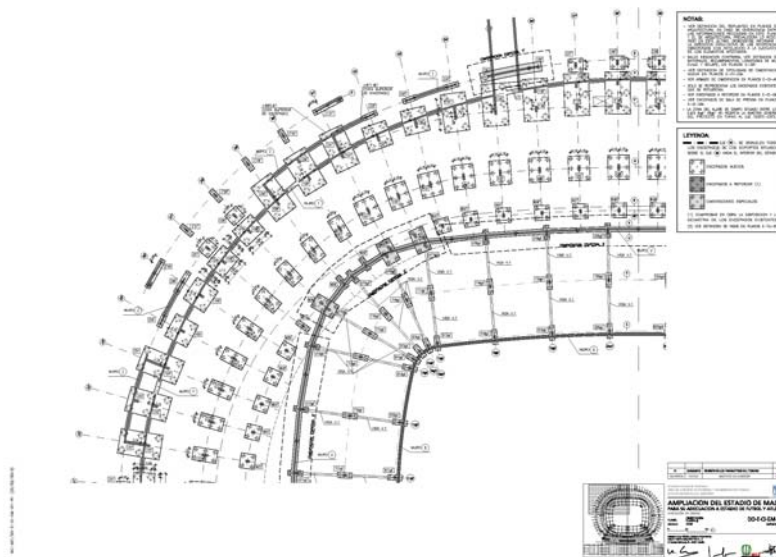


Figura 4. Planta nordeste de la cimentación



Figura 5. Fabricación de armadura de los pilotes

La fabricación de la armadura de los pilotes se llevó a cabo en obra (Figura 5), utilizando procedimientos industrializados y aprovechando el espacio que el antiguo campo de fútbol interior a las pistas de atletismo dejaba en el recinto.

En la ejecución de los pilotes había que tener en cuenta las características del terreno en sus distintas capas a lo largo de los 36 a 40 metros de distancia entre la cota del encepado y la cota del “terreno competente”, teniendo en cuenta también la longitud de empotramiento en éste.

Las fases de ejecución de cada pilotes eran las siguientes:

- Excavación del terreno mediante barrena (Figura 6)
- Introducción de un tramo de 4 m de entubación recuperable
- Vertido de lodos bentoníticos
- Introducción de la armadura
- Vertido del hormigón “in situ” con extracción de los lodos bentoníticos

El tramo de entubación recuperable se introdujo para evitar la caída sobre la excavación de la capa superior de material más granular o con menor cohesión de los rellenos, menos compactados debido a su ubicación.

Los lodos bentoníticos fueron sustituidos en parte de los pilotes por lodos con polímeros. El resultado fue igualmente satisfactorio.



Figura 6. Ejecución de pilotes “in situ”

Tras la ejecución de los pilotes se procedía a su descabezado, montaje de la armadura de los encepados, encofrado y hormigonado de éstos. Excepcionalmente ha sido necesario ampliar la dimensión de los encepados para recoger algún pilote adicional derivado de algún resultado dudoso de los ensayos de integridad.

4. Control de ejecución de los pilotes

Se han realizado ensayos de integridad sobre los pilotes, tanto ensayos sínicos (Figura 7), como de impedancia.

En el caso de los ensayos sínicos se ha realizado un estudio adicional que permitiera relacionar sus resultados con los de los ensayos de resistencia a compresión del hormigón vertido. Existen relaciones entre la velocidad del sonido en el hormigón y el módulo de deformación del mismo, así como entre éste y la resistencia a compresión del hormigón [7]. Sin embargo, cuando se producen resultados irregulares de algún ensayo sínico en los pilotes, siempre surge la duda en la aplicación de estas relaciones, finalizando con la necesidad de realizar unas perforaciones en el pilote hasta la cota que presenta irregularidades, obtener probetas testigos y ensayarlas a compresión. Para intentar evitar estos trabajos y obtener una relación más precisa entre unos y otros resultados se ha sistematizado un trabajo que, cuando arroje sus conclusiones finales, se pretende que permita extrapolaciones que aporten más información sin necesidad de ensayos costosos adicionales. Aún no se dispone del análisis de resultados y conclusiones del mencionado estudio.

Agradecimientos

En ésta, como en toda obra colectiva, es importante citar la participación de aquellas instituciones y personas que han hecho posible la misma. Entre ellos, sin pretender abarcar a todos pero sí a los que han intervenido de forma más significativa en el estudio del terreno y el proyecto y la ejecución de la cimentación debe citarse a Alberto Bernal (MC2), Fernando Rodríguez Ballesteros, Fernando Ferrer, Luis Rubín, José Manuel Tellado y Cristina Martínez (FCC Construcción) y Manuel Bueno

(Euroconsult). Y subrayar la participación en todo momento del Club Atlético de Madrid (Manuel Cifuentes), los proyectistas y Dirección de Obra (Antonio Cruz y Antonio Ortiz, arquitectos), todo el equipo de MC2 y la dirección de obra de FCC Construcción (Fernando Bernaldo de Quirós, Víctor Rey y Gonzalo Esteras).



Figura 7. Armadura de pilotes con tubos para ensayos sísmicos

Referencias

- [1] J. Martínez-Calzón, Estructura del Estadio de atletismo de la Comunidad de Madrid, Hormigón y Acero, nº 196, Madrid, 1995, 91-95
- [2] A. Cruz y A. Ortiz, Ampliación del Estadio de Madrid, Informes de la Construcción, Vol. 56, nº 492, 2004
- [3] J. Martínez-Calzón, M. Gómez Navarro, M. Schlaich, Revista de Obras Públicas, nº 3502, 2009
- [4] J. Martínez-Calzón, J. Gómez-Hermoso, G. Ladrón de Guevara, D. Rodríguez-Muñoz, F. Rodríguez-Ballesteros, L. Rubín-Fierro, Expansion of Madrid Stadium: Foundation and Grandstands, Structural Engineering International (IABSE), Vol 24, 1 (2014), 45-48.
- [5] Código Técnico de la Edificación, Ministerio de la Vivienda, Madrid, 2006
- [6] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008
- [7] F. Sánchez, J. L. García de la Oliva, C. de las Heras, J. M. Echave, J. J. Muñoz y J. L. Ríos, Recomendaciones para la ejecución e interpretación de ensayos de integridad de pilotes y pantallas "in situ", Ministerio de Fomento y Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 2006