

TORRE MOHAMED VI EN RABAT (MARRUECOS). CIMENTACION SINGULAR MEDIANTE MÓDULOS DE PANTALLA DE GRAN PROFUNDIDAD

Mohamed VI tower in Rabat. (Morocco). Singular foundations with great depth diaphragm piles.

Alejandro Bernabeu Larena ^a, Ángel Arcones Torrejón^b, Javier Gómez Mateo^c,
Isabel Sáez Alonso^d,

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Bernabeu Ingenieros. abl@bernabeu.net

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniería del Suelo. aat@ingesuelo.com

^c Arquitecto. Ingeniero de edificación. Máster de estructuras. Bernabeu Ingenieros. jgm@bernabeu.net

^d Arquitecta. Máster de estructuras. Bernabeu Ingenieros. isa@bernabeu.net

RESUMEN

Para la Torre Mohamed VI en Rabat, de 250 m de altura, se ha diseñado una cimentación profunda mediante unas 100 pantallas (barrettes) de 120x270cm y hasta 70m de profundidad; y mediante grupos de pilotes de 60cm de diámetro y 15m de profundidad en el caso del edificio del zócalo asociado. Se ha analizado la mejora del terreno mediante columnas de grava que controlen el riesgo de licuefacción de los estratos superficiales. Las pantallas y los pilotes se unifican por una losa común de canto variable, de 350cm en el caso de la zona de la torre y en el entorno de los 40cm sobre encepados en el caso del zócalo.

ABSTRACT

The foundation of the 250m height Mohamed VI tower in Rabat considers deep foundation with about 100 diaphragm piles (barrettes) 120x270cm and 70m depth, for the tower area, and with groups of 60cm diameter piles 15m depth, for the adjoining plinth building. Besides, a system of ground improvement with gravel columns has also being considered, in order to control the liquefaction risk of the shallow soil layers. The barrettes and group of piles foundations are connected together with a continuous foundation slab with a variable depth, 350cm in the tower area and 40cm over the pile caps in the plinth.

PALABRAS CLAVE: Cimentación profunda, riesgo de licuefacción, sismo, viento, edificio gran altura.

KEYWORDS: Deep foundation, liquefaction risk, seismic and wind loads, high rise building.

1. Descripción del proyecto

La Tour Mohamed VI en Rabat (Marruecos) está proyectada por Rafael de La-Hoz arquitectos y la firma local CHB Cabinet Hakim Benjelloun. El proyecto de cimentación y

estructuras ha sido realizado por Bernabeu Ingenieros, y la construcción, actualmente en proceso, ha sido adjudicado a la UTE formada por las constructoras belgas Besix y Six



Figura 1. Vista general de la torre.

Construct, y la constructora marroquí TGCC, responsables así mismo del desarrollo del proyecto de construcción (Figura 1).

La torre tiene usos mixtos residenciales, oficinas y hoteleros, y alcanza una altura máxima de 250m, lo que le convertirá en la torre más alta del Africa.

La edificación se divide en dos bloques principales, la torre de 250m de altura con planta en forma de huso con radios variables en altura (30-40m de diámetro) y núcleo excéntrico, y el edificio zócalo de 200x120m de planta, ambos sobre un único nivel de sótano enterrado común.

2. Configuración estructural

El sistema estructural de la torre se configura mediante un sistema de doble tubo (“tube in tube”) [1], con tubo exterior de estructura metálica, y tubo interior (núcleo) de hormigón armado [2].

El tubo exterior se analizó con diversas configuraciones y mallados, en particular diagrid y tubo rígido tipo Vierendeel, optando finalmente por el sistema de tubo rígido mediante montantes verticales y vigas horizontales.

El tubo interior se configura mediante pantallas de hormigón armado (espesores de 80cm a 40cm) en calidad C60/75 [3 y 4].

La conexión entre ambos elementos se realiza mediante el diafragma de cada planta que reparte los esfuerzos horizontales. Este diafragma se materializa mediante vigas mixtas radiales de gran canto (IPE600-S355) y forjado de losa colaborante de 160mm de canto total (Figuras 2 y 3).

El sistema estructural del zócalo viene determinado por la configuración de la cubierta. Se define una estructura para la cubierta mediante vigas y celosías metálicas, que salvan luces desde 8.10m hasta 40.50m, y pilares, también de acero. Los forjados inferiores se

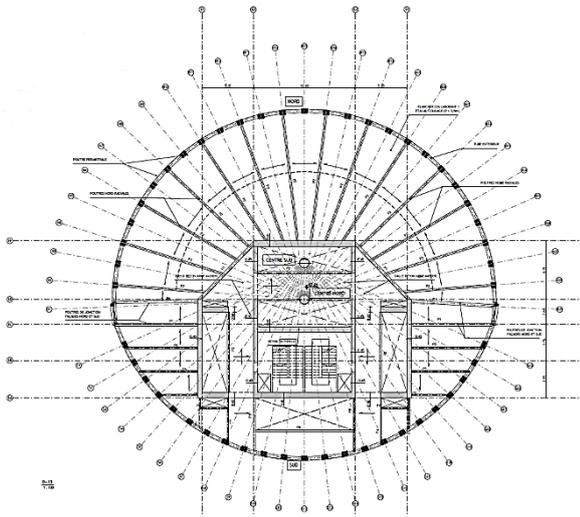


Figura 2. Planta tipo Torre.

definen mediante estructura prefabricada de vigas y placas alveolares, sobre apoyos puntuales en pilares de hormigón armado siguiendo una malla de 8.10m x 8.10m. La rigidez horizontal se consigue mediante núcleos verticales de hormigón armado (pantallas de 30cm y 40cm de espesor) que conectan la cubierta, los forjados intermedios con la cimentación.

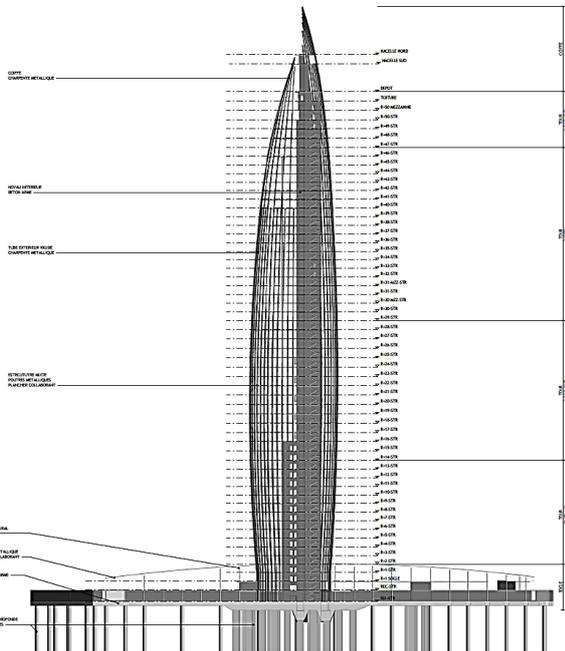


Figura 3. Sección longitudinal.

Los esfuerzos horizontales debidos al viento son de unos 20000kN para la torre y 4000kN para el zócalo. Los esfuerzos horizontales debidos al sismo son de 35000kN para la torre y 25000kN para el zócalo.

3. Características del suelo

El proyecto se ubica en la desembocadura del río Bouregreg en su margen derecha, una llanura aluvial con unos estratos de escasa capacidad portante, arenas limosas/limos arenosos con golpes del SPT de 2 a 8 y presiones límite del ensayo presiométrico inferiores a 1MPa, hasta profundidades en torno a los 60m donde aparecen gravas rodadas con matriz arenosa y arcillas compactas con SPT>50 y presiones límite de 5.5 a 8.0 MPa.

Para la caracterización del suelo se realizaron seis sondeos de entre 30m y 100m de profundidad, con ensayos presiométricos, pruebas SPT, CPT, ensayos geofísicos (downhole), así como ensayos de laboratorio a las muestras inalteradas extraídas (granulométricos, edométricos, corte directo, límites d'Atterberg, etc.).

Dado que la ubicación del proyecto está sometida a movimientos sísmicos ($a_g=0.16g$, $M_w=6.5$), que el estrato superior es fundamentalmente arenoso con un escaso contenido en finos (índices de plasticidad del orden del 10% al 20% y fracción de partículas por debajo de los $80\mu m$ desde el 20% al 80%) y está bajo el nivel freático, se estudia por lo tanto el riesgo de licuefacción de estos primeros metros de suelo. Se emplea el método de Seed & Idriss concluyendo de partida que se puede llegar a producir la licuefacción en los primeros 25m de suelo.

Debido al riesgo de licuefacción de los estratos superficiales [5 y 6] no se considera por lo tanto la capacidad a rozamiento del fuste en los primeros metros teniendo en cuenta además este riesgo de licuefacción en la capacidad de carga de los pilotes y los módulos de pantalla mediante un rozamiento negativo. Se estudia además la mejora o refuerzo del terreno mediante columnas de grava (colonnes ballastées) que permiten controlar esta licuefacción y optimizar la capacidad portante de estos estratos superficiales [7].

Además, es necesario tener en cuenta las condiciones de inundabilidad del solar en el que se ubica el presente proyecto que requieren considerar cargas por subpresión de agua.

La Tabla 1 a continuación indica la caracterización del terreno en los distintos estrados.

Tabla 1. Estratos del suelo

Estrato	Descripción.	Prof. (m)
1	Limo arcilloso parduzco a rojizo	2,5 - 3,0
2	Alternancia de fango grisáceo, fango arenoso grisáceo, arena fangosa grisácea y arena blanquecina grisácea	68,0
3	Arena parduzca con aluviones rodados	71,0
4	Aluviones rodados con arena parduzca	82,0 - 86,0
5	Marga compacta gris claro	100,0

4. Sistema de Cimentación

Dadas las malas condiciones geotécnicas del suelo y teniendo en cuenta la diferencia de las tipologías de edificación en que se configura el proyecto, de los sistemas estructurales contemplados, así como de las cargas transmitidas al sistema de cimentaciones entre la torre y el zócalo, se definen dos sistemas de cimentación para cada tipología, torre y edificio zócalo.

Estas dos soluciones de cimentación se analizan considerando la interacción entre ambas [8] tanto a nivel de transmisión de cargas verticales y horizontales, como a nivel de asentamientos y esfuerzos de retracción. La interacción entre los dos sistemas de cimentación frente a cargas verticales conlleva el análisis iterativo de los asentamientos del suelo en función de las cargas transmitidas y del análisis de rigidez de la interacción suelo-estructura. Del mismo modo frente a las acciones horizontales de sismo se analiza y dimensiona el sistema frente a tres posibilidades: toda la acción sísmica vinculada a la torre debe

ser resistida por la cimentación profunda sin contar con la contribución del sistema de pilotes; toda la acción sísmica del zócalo debe ser soportada por el sistema de pilotes sin considerar la contribución de los módulos pantalla profundos; y por último análisis de la interacción de ambos sistemas con un reparto de cargas entre ambos en función de su rigidez. Frente a las deformaciones impuestas debidas a la retracción se prevé una junta (zone de clavetage) entre la losa del zócalo (40cm de espesor) y la losa de la torre (350cm de espesor) durante la fase de ejecución (3 meses), reduciendo de este modo en un 30% los esfuerzos debidos a la retracción de la losa de la torre y transmitidos a la losa del zócalo.

Al inicio de la ejecución se realizan ensayos de carga a dos pilotes in situ, a tracción y a compresión, así como como ensayos de dos pantallas (barretes) mediante células de Osterberg, para contrastar los análisis de capacidad portante realizados en fase de proyecto con los datos obtenidos de los distintos estudios geotécnicos realizados (Figura 4).



Figura 4. Células de Osterberg en el solar.

4.1 Edificio zócalo

Para la cimentación del zócalo se han analizado tres posibles soluciones:

1. Losa continua sobre suelo mejorado mediante columnas de grava y precarga del suelo.

2. Sistema de pilotes de profundidad media (10-20m), y losa de cimentación
3. Pilotes profundos (50-60m) de 150cm de diámetro en malla de 16.20x8.10m con vigas de transferencia para los pilares superiores (malla de 8.1m x 8.1m)

La primera solución tiene el inconveniente, dada la baja capacidad portante de los primeros estratos, de tener la mayor diferencia de asentos entre la torre y el zócalo de las soluciones barajadas, pese a la precarga considerada; siendo esta gestión de la precarga compleja en fase de obra tanto por logística como por coordinación de tiempos de ejecución.

La tercera solución es la más conservadora de las planteadas dado que se lleva la carga tanto de la torre como del zócalo a los mismos estratos, controlando de este modo los asentos entre las dos tipologías estructurales, pero tiene el peaje de un coste mayor dada la profundidad de los elementos considerados, pese a la estrategia de reducir el número de pilotes mediante vigas de transferencia en cabeza.

El contratista (Besix-TGCC) opta finalmente en el proyecto constructivo por la ejecución de la segunda solución mediante pilotes de 10-15m de profundidad y 60cm de diámetro, encepados de 100-150cm de canto y losa de 40cm de espesor (Figura 5). La capacidad de carga característica varía en función de las zonas de estratos en la que se ubique; a compresión está entre 500kN y 1400kN y a tracción entre 280kN y 560kN.



Figura 5. Ejecución de la cimentación del zócalo

Los pilotes se agrupan en función de las cargas transmitidas por el elemento a cimentar, teniendo por lo tanto desde pilotes aislados hasta encepados con 18 pilotes, considerando en estos casos la interacción entre elementos o efecto grupo en su capacidad portante.

4.2 Torre

La cimentación de la torre se conforma mediante dos elementos: encepado de reparto de cargas de unos 50mx50m con 3.5m de espesor; y 100 módulos pantalla (barrettes) de 120x270cm y 70m de profundidad, distribuidas en una malla de unos 5x5m (Figura 6).

Las pantallas, al tener un eje fuerte y un eje débil muy diferenciados, se orientan en las dos direcciones horizontales alternando la disposición longitudinal y transversal para conseguir la misma rigidez lateral frente a esfuerzos horizontales en ambos sentidos.

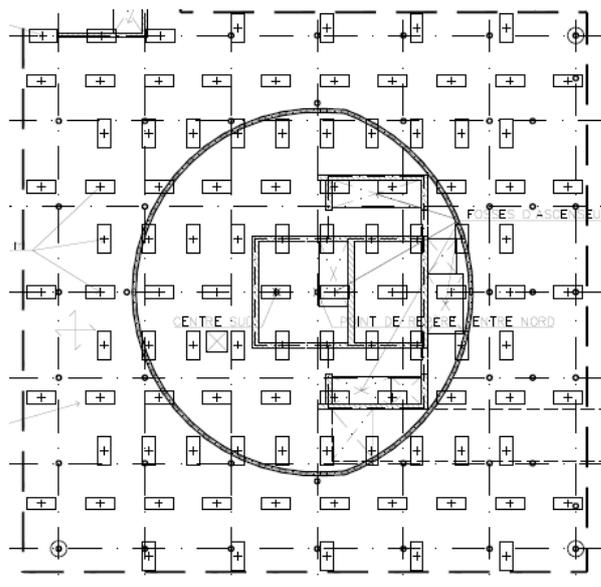


Figura 6. Distribución de módulos pantalla

Las cargas verticales características son de 1115 MN. Siendo las caras horizontales debidas al sismo de 35MN y debidas al viento de 20MN.

Los ensayos mediante células de Osterberg realizados en dos barrettes dan como resultado una capacidad a rozamiento de 52kPa hasta los 47.50m de profundidad y de 103kPa a partir de estos 47.50m. Para la punta se obtiene una capacidad de 2.5MPa. Se tiene por lo tanto

una capacidad de carga vertical media de entre 15MN y 25MN.

El análisis de la interacción suelo estructura [8] considera dos situaciones, acciones dinámicas de corta duración y acciones estáticas. La rigidez vertical de la barrette tipo en el caso estático es del orden de los 0.95E6 kN/m, mientras que la rigidez horizontal varía del orden de los 0.15E6 kN/m en el eje fuerte y 0.08E6 kN/m en el eje débil. Y en el caso dinámico de 1.50E6 kN/m en vertical; 0.25E6 kN/m y 0.15E6 kN/m en horizontal eje fuerte y eje débil respectivamente.



Figura 7. Ejecución del descabezado de los módulos pantalla

Dada la profundidad de excavación necesaria para el descabezado de las barretes y el fondo de la losa de reparto junto con la presencia de nivel freático lleva a una ejecución del vaciado necesario para la ejecución de la losa de cimentación mediante un recinto de tablaestacas con bombeo de agua controlado (Figura 7).

Para el control de la ejecución de los módulos pantalla se implementan seis tubos de auscultación por barrette que permiten la detección de deficiencias en el hormigonado de este, desprendimientos, fallos de inclinación, etc.

5. Conclusiones

Las especiales condiciones del suelo: muy baja capacidad portante en los primeros 50m,

riesgo de licuefacción, nivel freático con subpresión, unidas a la tipología estructural: edificio en altura de 250m de gran esbeltez y sometido principalmente a acciones horizontales (sismo y viento) marcan unos condicionantes de diseño del sistema de cimentación de gran singularidad. Soluciones equivalentes frente a grandes cargas verticales y horizontales y cimentaciones profundas mediante módulos pantalla han sido igualmente empleadas en proyectos para edificios de gran altura [9].

Se diseña por lo tanto una cimentación para la torre mediante módulos pantalla de gran profundidad (70m) alternando la disposición longitudinal y transversal para alcanzar la rigidez horizontal necesaria para el control de los esfuerzos y desplazamientos horizontales en ambas direcciones.

Para el edificio del zócalo se plantea una cimentación de profundidad media, mediante pilotes de 10-15m y losa de 40cm, conectada a la cimentación de la torre para controlar los esfuerzos horizontales. Esta conexión de los dos elementos de cimentación vinculados a las dos tipologías estructurales presentes en el proyecto, torre y zócalo, requiere un análisis y un control de los asientos diferenciales así como de los esfuerzos horizontales inducidos tanto por sismo como por deformaciones impuestas (retracción).

Referencias

- [1] Monografía, A. C. H. E. "Proyecto de Edificios Altos." Madrid: ACHE (2013).
- [2] Martínez Calzón, J., and M. Gómez Navarro. "Torre Sacyr-Vallehermoso. La estructura del edificio." *Hormigón y Acero* 59.249 (2008).
- [3] Corres Peiretti, Hugo. "Nuevos hormigones, nuevas posibilidades estructurales. Ejemplos de aplicación a puentes y edificios." (2008).
- [4] Martínez Calzón, J. "Hormigones de alta resistencia en la edificación de gran altura. Aplicación particular al Edificio Torre

Espacio en el Paseo de la Castellana Madrid." *Hormigón y acero* 54.228 (2003).

- [5] Seed, Harry Bolton, and Izzat M. Idriss. "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential." *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div* (1971).
- [6] Idriss, I. M. "An update to the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential." *Proc., TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction, Publ. n. FHWA-RD-99-165, Federal Highway Administration* (1999).
- [7] Contreras, Arturo Canalda. "Compactación del terreno por vibroflotación para la central térmica de «Los Barrios», en Algeciras H Jesús Llorca Aquesolo." (1982).
- [8] Ministerio de Fomento. Soriano Peña, Antonio. "Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias (ROM 0.5-05)." (2005).
- [9] Chanvaivit, K., Ly, A., & Clair, C. (2015). The structural design and construction of the mahanakhon tower. *Council on Tall Buildings and Urban Habitat*, 47-55.