



Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla

Grado en Fundamentos de la Arquitectura

Trabajo Fin de Grado

TFG-B: Construcciones Arquitectónicas-Ingeniería del Terreno-Estructuras de la Edificación

Curso Académico 2017 – 2018

Cimentación en los Edificios de Gran Altura

Autor: Nerea Jiménez Cordero

Grupo: TFG-B-Ingeniería del Terreno

4 de septiembre de 2018

Tutor: Antonio Jaramillo Morilla

Índice

| | |
|---|----|
| 1. OBJETIVOS | 5 |
| 2. INTRODUCCIÓN | 6 |
| 3. ASPECTOS ESPECIFICOS DE EDIFICIOS DE GRAN ALTURA | 9 |
| 3.1. Grandes cargas por el elevado número de plantas..... | 9 |
| 3.2. Efecto sobre estructuras próximas..... | 11 |
| 3.3. Cargas horizontales debido a viento..... | 12 |
| 3.4. Influencia del momento en la base, debido a viento y sismo. | 17 |
| 4. REDUCCIONES DE CARGA | 20 |
| 4.1. Peso Propio..... | 20 |
| 4.2. Sobrecarga de Uso..... | 20 |
| 5. DEFORMACIONES | 23 |
| 5.1. Deformación horizontal..... | 23 |
| 5.2. Deformación vertical..... | 25 |
| 6. VIBRACIONES | 27 |
| 7. TIPOS DE CIMENTACIONES | 29 |
| 7.1. Estudio Geotécnico | 29 |
| 7.2. Cimentaciones Superficiales. | 31 |
| 7.2.1. Zapatas..... | 31 |
| 7.2.2. Losas..... | 33 |
| 7.3. Cimentaciones Profundas. | 37 |
| 7.3.1. Pilotes | 37 |
| 7.3.2. Muros pantalla..... | 39 |
| 7.4. Cimentaciones Mixtas. | 41 |

| | |
|---|-----------|
| 7.4.1. Zapatas y Pilotes..... | 41 |
| 7.4.2. Losas pilotadas | 43 |
| 8. CIMENTACIÓN TORRE SEVILLA. | 46 |
| 8.1. Estimación de cargas | 50 |
| 8.1.1. Datos de partida..... | 50 |
| 8.1.2. Resistencia característica al hundimiento..... | 52 |
| 8.1.3. Carga que transmite la pantalla | 55 |
| 9. CONCLUSIONES | 57 |
| 10. IDEAS PARA AMPLIAR EL TRABAJO | 59 |
| 11. BIBLIOGRAFÍA | 60 |
| NORMAS..... | 60 |
| ARTICULOS | 60 |
| REVISTAS..... | 60 |
| LIBROS..... | 61 |
| PÁGINAS WEB..... | 61 |
| OTROS DOCUMENTOS | 62 |

1. OBJETIVOS

Con este trabajo se pretende conocer las situaciones específicas a las que están sometidos los edificios de gran altura. Son factores que afectan a la hora de llevar a cabo el diseño de su cimentación.

Una vez que estén claras las circunstancias a tener en cuenta en la determinación del tipo de cimentación adecuada, se estudiarán los distintos tipos de cimentaciones posibles en este tipo de construcciones, de acuerdo con las características del terreno en el que se encontrará la edificación y los demás aspectos considerados anteriormente, como son las acciones horizontales debidas a viento y sismo, y la influencia en las construcciones adyacentes.

También se verán los aspectos importantes a tener en cuenta en cada tipo de cimentación.

Cada tipo de cimentación se apoyará con un ejemplo de edificio alto construido con el tipo considerado.

Como caso específico se estudiará la cimentación de la Torre Sevilla. Se comprobará que la tensión transmitida al terreno es soportada por el tipo de cimentación que tiene, y que, por tanto, dicha cimentación es adecuada al tipo de edificio y de terreno, evitándose, de esta manera, el peligro de hundimiento del edificio.

2. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia ha habido una importante evolución en cuanto a la altura de los edificios que se han ido construyendo.

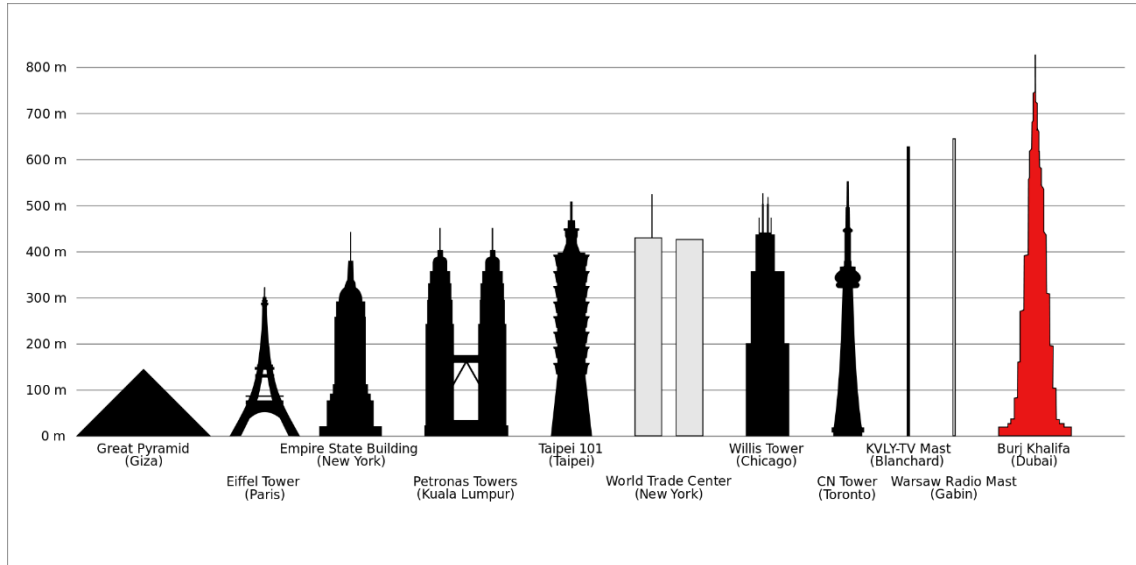


Ilustración 1_Evolución edificios en altura a lo largo de la historia, extraída de internet

En las dos últimas décadas se ha llevado a cabo un importante crecimiento de la construcción de edificios altos, de más de 300 m.

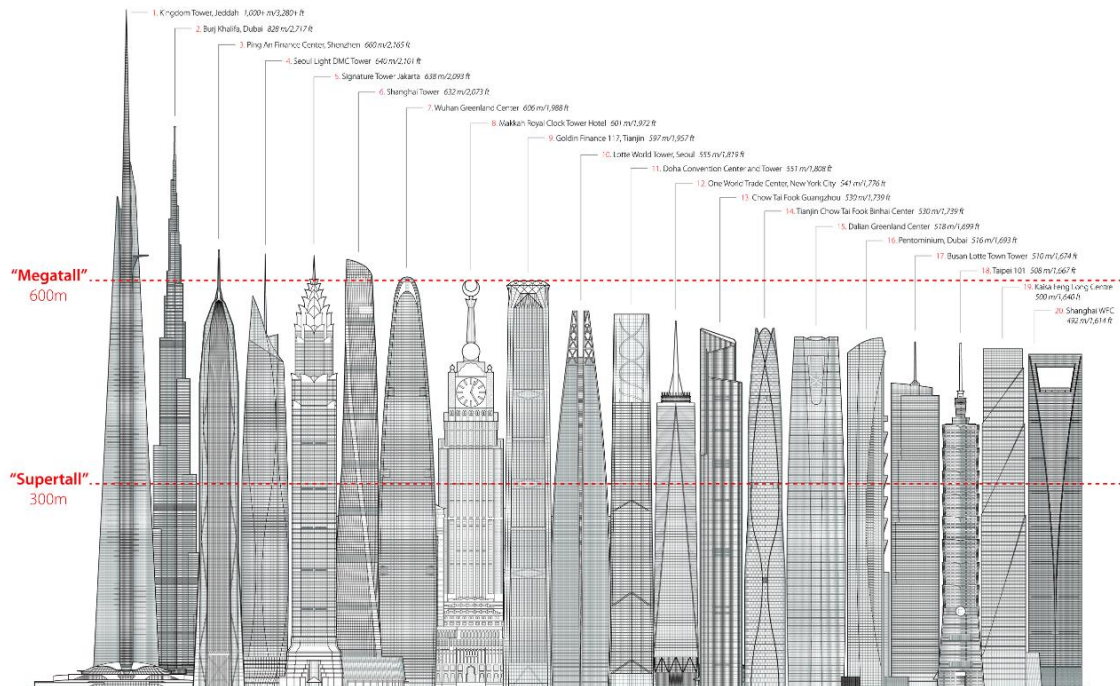


Ilustración 2_Edificios más altos del mundo de las últimas décadas, extraída de internet

Este tipo de construcciones todavía suponen un reto para los arquitectos e ingenieros que tienen que diseñarlos, debido a que no hay una norma específica donde basarse.

Toda cimentación debe cumplir la función principal de transmitir los esfuerzos de la estructura al terreno, a la vez de soportar los esfuerzos de reacción del terreno ante dichas sollicitaciones.

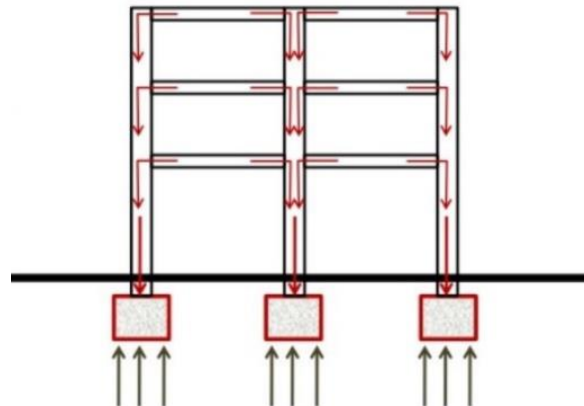


Ilustración 3_Esquema de funcionamiento de la cimentación, extraída de internet

Cuando dimensionamos una cimentación, hay que tener en cuenta las características del terreno en el que nos encontramos, los distintos tipos de cargas que tendremos, dependiendo del tipo de estructura, y el comportamiento del terreno antes dichas cargas.

En el caso de los edificios de gran altura esto no iba a ser menos, al contrario, se requiere de una adecuada elección del tipo de cimentación, donde estos factores cobran todavía una mayor importancia, debido a las enormes cargas que se ponen en juego en este tipo de construcciones.

Las características del terreno, determinan la elección del tipo de cimentación, para que la interacción del terreno con la base del edificio sea la adecuada y no se produzcan daños que impidan un rendimiento adecuado de la estructura.

Además de tener en cuenta las características del terreno y las enormes cargas de estos edificios, hay otros factores importantes a tener en cuenta cuando se dimensiona una cimentación para un edificio alto.

El efecto que se puede originar en las construcciones adyacentes, generalmente más bajas, y el efecto de las acciones horizontales sobre este tipo de edificios, son también determinantes para la elección del tipo de cimentación.

El objetivo de estas cimentaciones es dar respuesta a las importantes deformaciones que se puedan producir en este tipo de edificios debido a las acciones que actúan sobre él, de forma que no se perturbe el confort de los usuarios.

3. ASPECTOS ESPECIFICOS DE EDIFICIOS DE GRAN ALTURA.

En este tipo de edificios hay que tener en cuenta una serie de características que afectan de forma considerable en el diseño de la cimentación.

3.1. Grandes cargas por el elevado número de plantas

En el peso de un edificio influye de forma muy significativa la altura del propio edificio, teniendo en cuenta aspectos como el elevado número de plantas y el peso de los materiales de construcción, se obtiene el peso propio del edificio, siendo considerablemente elevado en este tipo de construcciones.

“El peso del edificio aumenta de forma no lineal con el aumento de la altura, y por lo tanto la carga vertical que se apoya en la base, puede ser sustancial.” (Poulos, H. G. 2012, pag. 1)

Se transmite al terreno una presión bastante elevada, en forma de lo que llamamos “*bulbo de presiones*”. Esta expresión quiere decir que la presión no se transmite de forma linealmente vertical al terreno, si no que se transmite en forma de curvas, siendo mayor la presión transmitida en el centro que en los extremos.

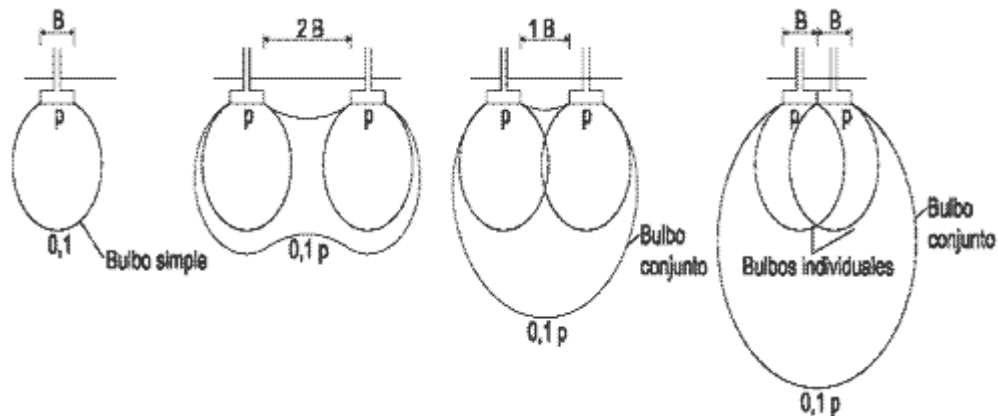


Ilustración 4_Esquemas de bulbos de presiones bajo zapatas, extraída de internet

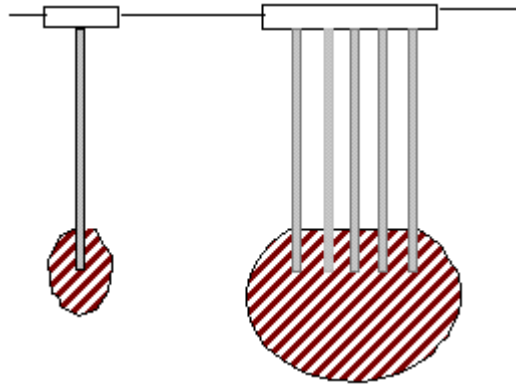


Ilustración 5_Esquema bulbo de presiones bajo pilotes, extraída de internet

En el siguiente esquema se puede ver en qué proporción es transmitida la presión al terreno mediante zapatas:

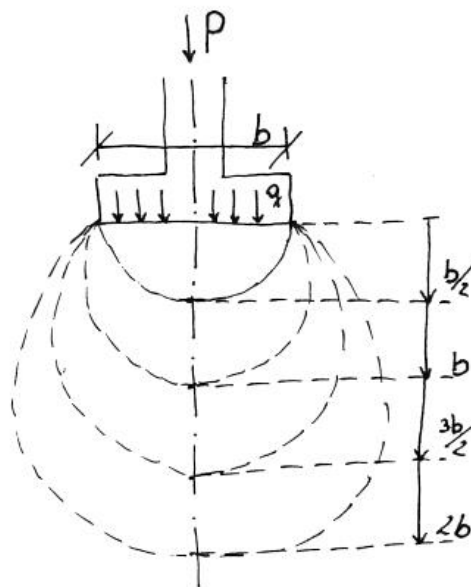


Ilustración 6_Esquema transmisión de presiones al terreno, extraída de internet

3.2. Efecto sobre estructuras próximas.

Otra cuestión importante es la influencia, de la distribución de cargas transmitidas al terreno por parte de edificios altos, en las construcciones adyacentes, ya existentes que los rodean.

Generalmente estas construcciones suelen ser edificios más bajos, cuya cimentación no ha sido diseñada para soportar las nuevas tensiones que genera el nuevo tipo de edificio, ocasionándose asentamientos diferenciales importantes, que pueden llegar a originar deformaciones a dichas construcciones.

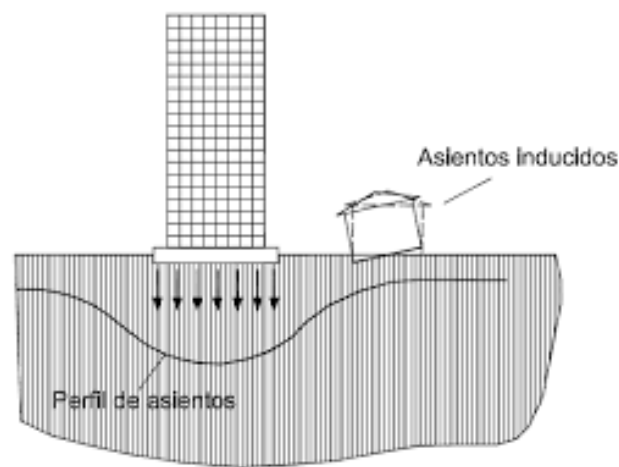


Ilustración 7_Influencia de edificios altos en construcciones adyacentes, extraída de internet

La excavación de sótanos del nuevo edificio puede generar levantamientos en las estructuras próximas, debido a que las tensiones bajo la excavación disminuyen.

Los cambios de nivel freático durante la construcción del edificio alto también son objeto de producir deformaciones en las construcciones adyacentes a estos, debido a que:

- Se lleva a cabo un bombeo, y, por tanto, reducción del nivel freático para la construcción de la cimentación, pudiendo originar asentamientos en las edificaciones que rodean el nuevo edificio alto.
- Una vez finalizado el bombeo cuando, terminan los trabajos de cimentación, el nivel freático recupera su nivel inicial, pudiendo originar levantamientos de las construcciones adyacentes.

3.3. Cargas horizontales debido a viento.

El Viento es una carga dinámica, que varía en el tiempo, con una determinada dirección e intensidad, es decir, una masa de aire en movimiento que al encontrarse con el edificio tiende a volcarlo o desplazarlo.

El efecto de la carga de viento depende de varios factores, que son importante conocer a la hora de determinar el valor de dicha carga, porque influye bastante en el diseño del edificio.

FACTORES

- **Zona:** se considerará una *velocidad de referencia del viento* en función de la zona en la que se encuentra situado el edificio para obtener la *presión dinámica del viento* (q_b)



Ilustración 8_Zonas climáticas de España, extraída del CTE DB SE AE

Según el CTE DB SE AE:

“El valor básico de la velocidad del viento en cada localidad puede obtenerse del mapa de la figura D.1. El de la presión dinámica es, respectivamente de 0,42 kN/m², 0,45 kN/m² y 0,52 kN/m² para las zonas A, B y C de dicho mapa.” (CTE DB SE AE, 2006, pag. 27)

- **Destino:** en función del uso y destino del edificio, vida útil del edificio, se considera la posibilidad de que la velocidad del viento de la zona en la que se encuentre cambie durante este tiempo, por lo que se le aplicará, a la presión dinámica del viento, un *coeficiente corrector*.

Tabla D.1 Corrección de la velocidad básica en función del periodo de servicio

| Periodo de retorno (años) | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 | 200 |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Coeficiente corrector | 0,41 | 0,78 | 0,85 | 0,90 | 0,95 | 1,00 | 1,08 |

Ilustración 9_tabla extraída del CTE DB SE AE

- **Exposición:** dependiendo del grado de protección del edificio por otras construcciones, la intensidad del viento variará, por lo que se aplica el coeficiente de exposición (c_e)

Tabla 3.4. Valores del coeficiente de exposición c_e

| Grado de aspereza del entorno | Altura del punto considerado (m) | | | | | | | |
|--|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 24 | 30 |
| I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud | 2,4 | 2,7 | 3,0 | 3,1 | 3,3 | 3,4 | 3,5 | 3,7 |
| II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia | 2,1 | 2,5 | 2,7 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,3 | 3,5 |
| III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas | 1,6 | 2,0 | 2,3 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,9 | 3,1 |
| IV Zona urbana en general, industrial o forestal | 1,3 | 1,4 | 1,7 | 1,9 | 2,1 | 2,2 | 2,4 | 2,6 |
| V Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,9 | 2,0 |

Ilustración 10_tabla extraída del CTE-DB-SE-AE

Se observa que en la norma no se establece un coeficiente de exposición para construcciones que superen los 30 m de altura.

- **Forma y Orientación:** dependiendo de la orientación del edificio cada fachada estará expuesta a presión o succión del viento, a lo que se aplicará un *coeficiente eólico o de presión* (C_p) para calcular su efecto.

Según el CTE DB SE AE:

“3.3.4 Coeficiente eólico de edificios de pisos

1 En edificios de pisos, con forjados que conectan todas las fachadas a intervalos regulares, con huecos o ventanas pequeños practicables o herméticos, y compartimentados interiormente, para el análisis global de la estructura, bastará considerar coeficientes eólicos globales a

barlovento y sotavento, aplicando la acción de viento a la superficie proyección del volumen edificado en un plano perpendicular a la acción de viento. Como coeficientes eólicos globales, podrán adoptarse los de la tabla 3.5.” (CTE DB SE AE, 2006, pag. 12)

Tabla 3.5. Coeficiente eólico en edificios de pisos

| | Esbeltez en el plano paralelo al viento | | | | | |
|--------------------------------------|---|------|------|------|------|--------|
| | < 0,25 | 0,50 | 0,75 | 1,00 | 1,25 | ≥ 5,00 |
| Coeficiente eólico de presión, c_p | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| Coeficiente eólico de succión, c_s | -0,3 | -0,4 | -0,4 | -0,5 | -0,6 | -0,7 |

Ilustración 11_tabla extraída del CTE-DB-SE-AE

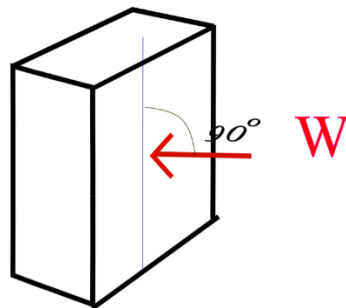
A la hora de calcular, se considera el coeficiente eólico de presión por ser más desfavorable.

Teniendo en cuenta todos estos factores:

“La acción de viento, en general una fuerza perpendicular a la superficie de cada punto expuesto, o presión estática, q_e puede expresarse como:” (CTE DB SE AE, 2006, pag. 11)

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p$$

Para el cálculo se considera el viento en dirección horizontal y aplicado en el plano medio de la fachada.



Hasta aquí se obtiene la carga que actúa en el edificio por superficie de fachada expuesta. Para obtener la carga concreta W (KN), se multiplica por el área de influencia y por la altura del edificio, quedando:

$$W = q_e \cdot a \cdot h_e$$

En el caso de los edificios de gran altura, en el CTE hay varias carencias en cuanto a la influencia de factores importantes, como la altura, esbeltez, del edificio. Sin embargo,

la Norma NBE AE 88 si establece la aplicación de un coeficiente para tener en cuenta la influencia de la esbeltez.

- **Altura:** la carga de viento aumenta con la altura y la anchura del edificio.

Según la Norma NBE AE 88:

“5.7. Influencia de la esbeltez

La acción del viento es mayor en los edificios cuya esbeltez es grande. En función de la relación entre los valores medios de la altura h y de la anchura b de la construcción en el plano normal al viento, los coeficientes eólicos de los artículos 5.4, 5.5 y 5.6 se multiplicarán por el factor eólico de esbeltez k dado por la Tabla 5.5

En estructuras reticuladas abiertas se aplicará el factor eólico de esbeltez k que corresponda a la esbeltez media de sus barras, si éste es mayor que el general de la estructura.” (NBE AE 88, 1988, pag. 19)

| Tabla 5.5 Factor eólico de esbeltez | | | |
|---|-------|------|------------|
| Esbeltez: $\frac{h}{b}$ si $h > b$ $\frac{b}{h}$ si $b > h$ | 1 a 5 | 10 | 60 o mayor |
| Factor eólico de esbeltez k | 1 | 1,25 | 1,50 |
| Valores intermedios pueden interpolarse linealmente. | | | |

Ilustración 12_Tabla extraída de la norma NBE AE 88

En general, el CTE y otras normal de cálculo de nuestro país, no tienen en cuenta aspectos importantes en cuanto a la construcción de este tipo de edificaciones, que cada vez son más frecuentes.

Partiendo de esa base, es muy difícil, determinar el valor exacto de la acción del viento sobre un edificio de gran altura atendiendo a las normas en las que se basan las construcciones actualmente.

La influencia del viento en edificios que tienen una altura elevada es bastante importante debido al comportamiento, de ménsula, que dichas construcciones tienen ante estas solicitaciones, comprometiendo su estabilidad, por lo que es necesario conocer el valor de dichas cargas de la forma más exacta posible.

Para ello hay que acudir a ensayos en túneles aerodinámicos, utilizando modelos a escala de la edificación a estudiar, con las mismas características de flexibilidad que el modelo real y donde el flujo de viento alrededor del modelo sea también lo más similar posible a la realidad.

A la vez, estas pruebas en túneles de viento, sirven para ver cómo reaccionan los modelos y comprobar el comportamiento de la estructura frente a las solicitaciones que genera la acción del viento, de esta manera sabremos cómo va a reaccionar el edificio antes de su construcción, evitándose deformaciones de esta.

“El uso de ensayos de túneles aerodinámicos descansa en el llamado principio de semejanza, que es ampliamente utilizado para obtener información acerca de las cargas de viento sobre un cuerpo real mediante ensayos con modelos a escala” (Gómez Hermoso, J., Irastorza, L., Pascual, J., Calzón, J. M., & Castañón Jiménez, C, 2014, pag. 60)

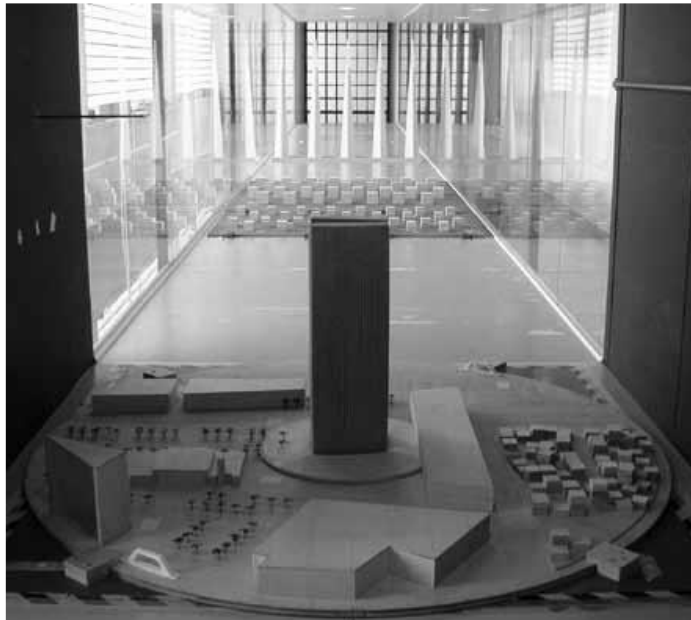


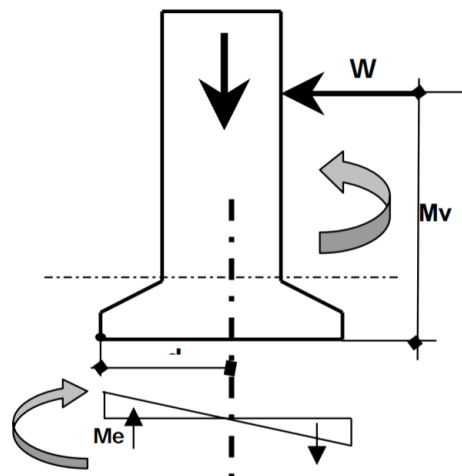
Ilustración 13_Ensayo en túnel aerodinámico de un modelo a escala, extraída de la revista Ingenieros de camino, canales y puertos.

3.4. Influencia del momento en la base, debido a viento y sismo.

VIENTO

El viento es una fuerza perpendicular al plano de acción, en el caso de los edificios, perpendicular a la fachada, que hace que el edificio se comporte como una ménsula, produciéndose un momento volcador en la base de éste.

Dicho momento depende de la altura y de la superficie expuesta del edificio. A mayor altura, mayor velocidad del viento y, por tanto, mayor es la acción que genera el momento volcador. Lo mismo ocurre con la superficie expuesta, la acción es mayor cuanto mayor sea la superficie de contacto.



$$\frac{M_e}{M_v} \geq 1,5$$

Me: Momento estabilizador.

Mv: Momento volcador.

Ilustración 14_Esquema de actuación del viento en un edificio, extraída de internet

Para que el edificio sea estable frente al momento volcador que genera la acción del viento, debe cumplirse que el Momento estabilizador (Me) sea una vez y media mayor o igual que el Momento volcador (Mv), es decir, se trabaja con un coeficiente de seguridad mayor o igual a 1,5. Para esta verificación se toma el edificio descargado, es decir teniendo en cuenta solo las cargas permanentes.

SISMO

La acción sísmica produce oscilaciones tanto verticales como horizontales.

Generalmente las oscilaciones verticales no producen daños en la estructura ni comprometen la estabilidad de ésta, debido a que está calculada para soportar importantes

cargas verticales, para lo que se han utilizado coeficientes de seguridad que absorben dichos esfuerzos.

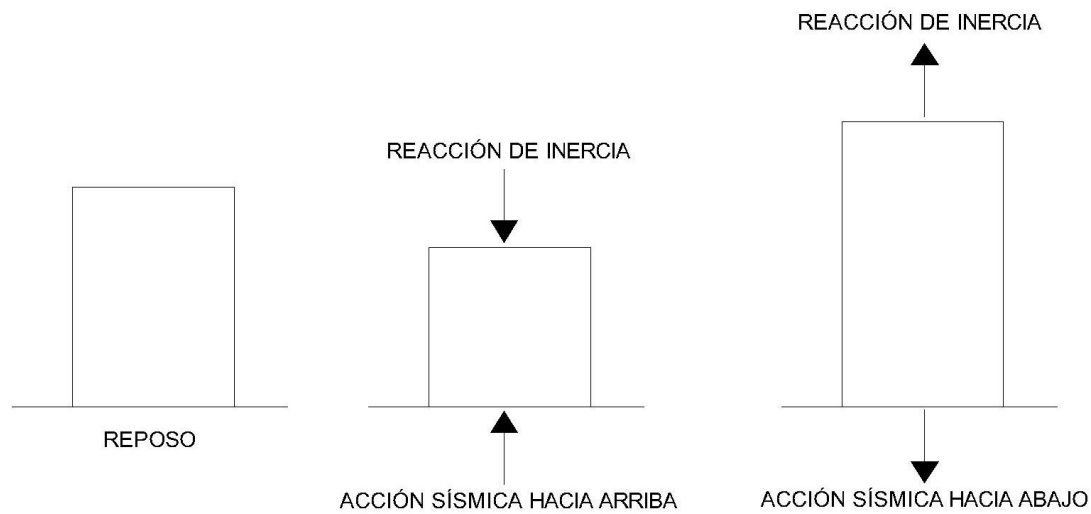


Ilustración 15_Oscilaciones verticales de un edificio, extraída de internet

Sin embargo, las oscilaciones horizontales producidas por la acción sísmica, actúan en la estructura en ambos sentidos, produciendo un momento en la base que, normalmente, no es absorbido por los coeficientes de seguridad empleados para soportar los esfuerzos verticales.

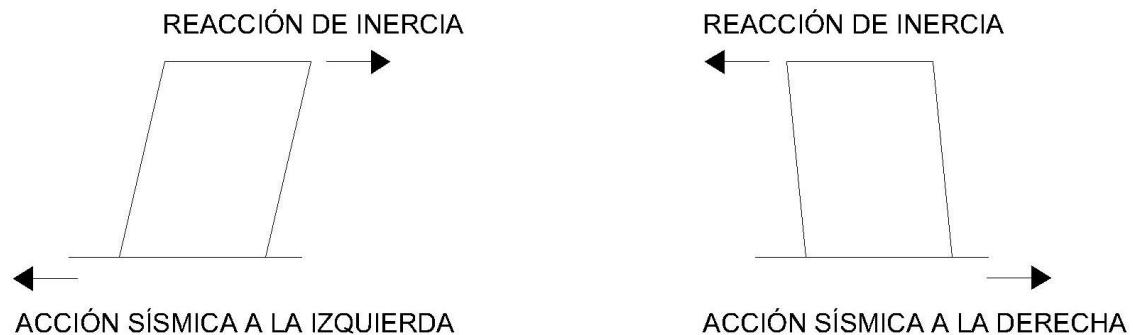


Ilustración 16_Oscilaciones horizontales de un edificio, extraída de internet

Los esfuerzos sísmicos dependen de la masa y características del edificio y del grado de violencia del sismo.

$$\mathbf{F = M \cdot a}$$

F: Fuerza sísmica
M: Masa del edificio
A: Aceleración

A mayor masa del edificio y mayor rigidez, los edificios altos son bastante pesados, mayor son las fuerzas de inercia que generan el momento en la base. Para disminuir lo máximo posible dichos momentos es conveniente que la estructura sea lo menos pesada y flexible posible. Pero también hay que tener en cuenta que, si la estructura es demasiado flexible, no habrá daños estructurales por roturas, pero las enormes oscilaciones sí que afectarán a al confort de los habitantes.

Con respecto a la naturaleza del sismo, la variación de la magnitud de las acciones que recibe la estructura se pueden producir:

- en un periodo de tiempo normal, donde las aceleraciones del suelo no causen daños importantes a la estructura.
- en un periodo de tiempo relativamente corto, donde las aceleraciones del terreno que recibe la construcción son de gran importancia, generándose momentos adicionales en la base modificando las tensiones y deformaciones de la estructura.

Para evitar que las acciones horizontales generadas por la acción sísmica produzcan daños en la estructura, se aplicará un coeficiente de seguridad para que la interacción suelo – estructura cumpla con los requisitos que establece el Estado Limite de Servicio.

4. REDUCCIONES DE CARGA.

Las acciones que afectan a un edificio alto son las mismas que afectan a las demás construcciones, lo que es muy diferente es el efecto que producen en éstos. La magnitud de los efectos es mucho mayor, ya que estamos hablando de una construcción mucho mayor a las que habitualmente estamos acostumbrados a ver.

4.1. Peso Propio.

Las acciones gravitatorias aumentan con la altura, debido a la acumulación de los materiales estructurales con el creciente número de plantas.

Aunque en las normas no aparecen aspectos a tener en cuenta en este tipo de edificaciones con respecto al intento de disminuir lo máximo posible su peso, es importante la utilización de materiales ligeros, como hormigones ligeros con densidades que oscilan entre 1.700 y 1.900 kg/ m² y de alta resistencia, debido a que, como hemos visto, el efecto de las acciones aumenta con el aumento de peso. De esta manera se consigue, en la medida de lo posible, disminuir el efecto de dichas sollicitaciones sobre el edificio.

4.2. Sobrecarga de Uso.

Al igual que ocurre con las acciones gravitatorias, las acciones de servicio también incrementan su efecto con el aumento del número de plantas del edificio.

En este caso sí que aparece recogido en la norma la utilización de coeficientes de reducción de sobrecargas, en función de la categoría de uso, a la hora de calcular dichas acciones.

Según Norma NBE AE 88

“3.7. Reducción de sobrecargas

En los edificios de varios pisos, incluidos en los apartados B y C de la Tabla 3.1, se podrá considerar para el cálculo de todo elemento resistente: jácena, pilar, muro, cimiento, etc., que reciba la carga de varias plantas, la reducción en la suma de las sobrecargas de los elementos cuya carga recibe, que se indica en la Tabla 3.2.” (NBE AE 88, 1988, pag. 12)

| Uso del elemento | Sobrecarga kg/m ² |
|--|---------------------------------|
| A. Azoteas | |
| Accesibles sólo para conservación | 100 |
| Accesibles sólo privadamente | 150 |
| Accesibles al público | Según su uso |
| B. Viviendas | |
| Habitaciones de viviendas | 200 |
| Escaleras y accesos públicos | 300 |
| Balcones volados | Según art. 3.5 |
| C. Hoteles, hospitales, cárceles, etc. | |
| Zonas de dormitorio | 200 |
| Zonas públicas, escaleras, accesos | 300 |
| Locales de reunión y de espectáculo | 500 |
| Balcones volados | Según art. 3.5 |
| D. Oficinas y comercios | |
| Locales privados | 200 |
| Oficinas públicas, tiendas | 300 |
| Galerías comerciales, escaleras y accesos | 400 |
| Locales de almacén | Según su uso |
| Balcones volados | Según art. 3.5 |
| E. Edificios docentes | |
| Aulas, despachos y comedores | 300 |
| Escaleras y accesos | 400 |
| Balcones volados | Según art. 3.5 |
| F. Iglesias, edificios de reunión y de espectáculos | |
| Locales con asientos fijos | 300 |
| Locales sin asientos, tribunas, escaleras | 500 |
| Balcones volados | Según art. 3.5 |
| G. Calzadas y garajes | |
| Sólo automóviles de turismo | 400 |
| Camiones | 1.000 |

| Número de pisos que actúan sobre el elemento | Reducción en la suma de sobrecargas % |
|--|---------------------------------------|
| 1, 2, 3 | 0 |
| 4 | 10 |
| 5 | 20 |
| 6 o más | 30 |

La cubierta se considera como un piso.

Ilustración 17_Tablas extraídas de la norma NBE AE 88

Según Norma CTE DB SE AE

“3.1.2 Reducción de sobrecargas

1 Para el dimensionado de los elementos portantes horizontales (vigas, nervios de forjados, etc.), y de sus elementos de enlace (ménsulas, ábacos, etc.), la suma de las sobrecargas de una misma categoría de uso que actúen sobre él, puede reducirse multiplicándola por el coeficiente de la Tabla 3.2, para las categorías de uso A, B, C y D.

2 Para el dimensionado de un elemento vertical (pilar, muro), la suma de las sobrecargas de un mismo uso que graviten sobre él, puede reducirse multiplicándola por el coeficiente de la Tabla 3.2, para las categorías de uso A, B, C y D.

3 Los coeficientes de reducción anteriores podrán aplicarse simultáneamente en un elemento vertical cuando las plantas situadas por encima de dicho elemento estén destinadas al mismo uso y siempre que correspondan a diferentes usuarios, lo que se hará constar en la memoria del proyecto y en las instrucciones de uso y mantenimiento. En el caso de 1 ó 2 plantas, se puede aplicar la reducción por superficie tributaria a los elementos verticales.” (CTE DB SE AE, 2006, pag. 10)

Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso

| Categoría de uso | | Subcategorías de uso | | Carga uniforme [kN/m ²] | Carga concentrada [kN] |
|------------------|--|----------------------|---|--|---------------------------|
| A | Zonas residenciales | A1 | Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles | 2 | 2 |
| | | A2 | Trasteros | 3 | 2 |
| B | Zonas administrativas | | | 2 | 2 |
| C | Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D) | C1 | Zonas con mesas y sillas | 3 | 4 |
| | | C2 | Zonas con asientos fijos | 4 | 4 |
| | | C3 | Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc. | 5 | 4 |
| | | C4 | Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas | 5 | 7 |
| | | C5 | Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc) | 5 | 4 |
| D | Zonas comerciales | D1 | Locales comerciales | 5 | 4 |
| | | D2 | Supermercados, hipermercados o grandes superficies | 5 | 7 |
| E | Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN) | | | 2 | 20 ⁽¹⁾ |
| F | Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente ⁽²⁾ | | | 1 | 2 |
| G | Cubiertas accesibles únicamente para conservación ⁽³⁾ | G1 ⁽⁷⁾ | Cubiertas con inclinación inferior a 20° | 1 ⁽⁴⁾ ⁽⁵⁾ | 2 |
| | | | Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) ⁽⁵⁾ | 0,4 ⁽⁴⁾ | 1 |
| | | G2 | Cubiertas con inclinación superior a 40° | 0 | 2 |

Tabla 3.2. Coeficiente de reducción de sobrecargas

| Elementos verticales | | | Elementos horizontales | | | |
|---------------------------------|-------|---------|---|-----|-----|-----|
| Número de plantas del mismo uso | | | Superficie tributaria (m ²) | | | |
| 1 ó 2 | 3 ó 4 | 5 ó más | 16 | 25 | 50 | 100 |
| 1,0 | 0,9 | 0,8 | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,7 |

Ilustración 18_Tablas extraídas del CTE DB SE AE

5. DEFORMACIONES

En el caso de los edificios altos hay que acostumbrarse a otra escala de valores con limitaciones distintas a las que normalmente utilizamos en los edificios convencionales.

Al tratarse de edificios que superan la escala de los edificios convencionales, las limitaciones que recogen las normas, el CTE actualmente, no son de aplicación para este tipo de estructuras, ya que todo se lleva a una escala mucho mayor: el tamaño del edificio, las acciones que actúan sobre él y los efectos que éstas producen en ellos.

Al igual que ocurre con las acciones, las deformaciones también aumentan con el aumento de las plantas, debido a la suma de pequeñas deformaciones de cada planta.

En las normas no aparecen, como se ha dicho, limitaciones de dichos valores, por lo que hay que basarse en tablas de artículos basadas en diferentes casos de estudio de construcciones de edificios altos ya existentes.

5.1. Deformación horizontal

Las acciones horizontales, que ya se han visto en puntos anteriores, son las que generan importantes movimientos en la estructura, siendo uno de los factores principales a la hora de elegir el tipo de cimentación del edificio que sea más adecuado para que soporte dichos esfuerzos.

Dichos movimientos son importantes controlarlos para la adecuada conservación de los elementos estructurales y para garantizar el confort de los usuarios.

A pesar de su importancia, no hay una norma que recoja los valores que limitan estas deformaciones. En varios artículos, basados en experiencias, podemos encontrar limitaciones que establecen el valor máximo admisible de flecha en coronación del edificio de:

- Según **Calavera, J. (1984). *Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón armado para edificios***

$L/700$ ó $L/1000$ (Siendo L la altura del edificio)

- Según Manterola Armisen, J. (1985). La estructura resistente de los edificios altos.

$$L/400 \quad \text{ó} \quad L/600 \quad (\text{Siendo } L \text{ la altura del edificio})$$

En este artículo se tiene en cuenta otra limitación más restrictiva, para el caso de edificios altos con cerramientos importantes, de $L/300$.

Como se puede observar, no hay una restricción común, por lo que hay que tener en cuenta el criterio de cada uno a la hora de establecer la limitación. Teniendo en cuenta uno de los factores que más afectan a este tipo de construcciones, el viento, se puede establecer una limitación de:

$$L/600$$

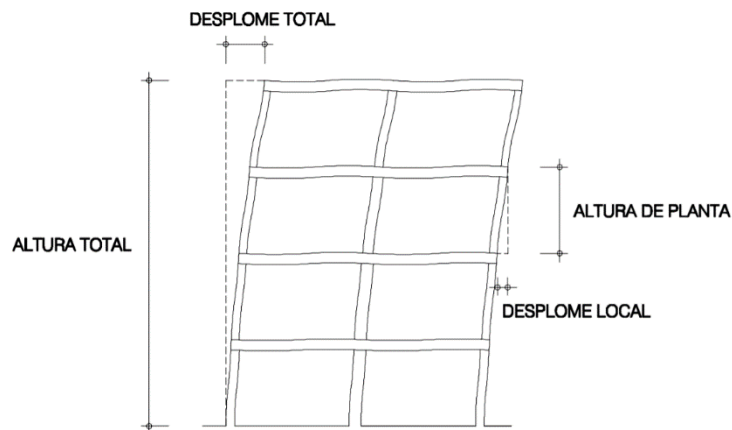


Ilustración 19_Extraída de internet

5.2. Deformación vertical

Las deformaciones verticales se dan por varias causas:

- Asientos del terreno.

El límite aceptable de los asientos que se producen en edificios altos es muy superior al de los edificios convencionales. Asientos de más de 100 mm son aceptables, según experiencias contempladas en la siguiente tabla, sin que se produzcan daños estructurales.

Tabla 2. sugerido criterios de servicio para las estructuras (Zhang y Ng, 2006)

| Cantidad | Valor | comentarios |
|--|--|---|
| La limitación mm de asentamiento tolerable | 106 | Basado en 52 casos de cimentaciones profundas. |
| Observadas mm de asentamiento intolerables | 349 | Basado en 52 casos de cimentaciones profundas. |
| La limitación tolerable distorsión angular rad | 1/500 | Basado en 57 casos de cimentaciones profundas. |
| La limitación tolerable distorsión angular rad | 1/250 (H <24m) a 1/1000 (H > 100 m) | Desde 2002 China Código H = altura del edificio |
| Observado rad intolerable distorsión angular | 1/125 | Basado en 57 casos de cimentaciones profundas. |

Ilustración 20_Tabla de limitaciones de deformaciones extraída del artículo de Foundation

- Causas térmicas.

Las variaciones de temperatura, que en edificios convencionales determinan la colocación de las juntas de dilatación, en edificios altos pueden generar esfuerzos importantes en los forjados, debido a la acumulación de alargamiento o acortamiento en las diferentes plantas.

Por ello es importante controlar la temperatura en los pilares. En este caso las diferencias de temperatura entre los pilares que están expuestos al exterior y los pilares interiores es bastante notable, llegando a ocasionar deformaciones diferenciales entre ellos.

Por ejemplo, los pilares exteriores están expuestos a la radiación solar y por tanto sufren una dilatación térmica distinta a los pilares que están más hacia el interior, que se encuentran generalmente en ambientes con aire acondicionado.

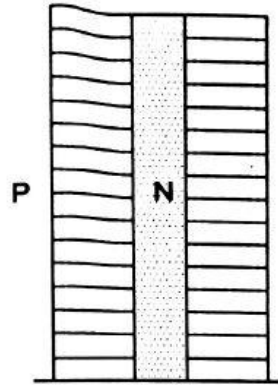


Ilustración 21_Extraída del libro Calavera, J. (1984).

- Diferencia de solicitaciones de tensiones entre diferentes elementos portantes.

Por ejemplo, entre pilares y pantallas o núcleos



Ilustración 22_Extraída del libro Calavera, J. (1984), e internet

Deformadas típicas de una pantalla, un pórtico y una estructura pantalla-pórtico combinados.

6. VIBRACIONES

Las acciones del viento y del sismo, frente al comportamiento de ménsula de los edificios altos ante dichas acciones, pueden generar oscilaciones de la estructura molestas para los usuarios, por lo que a la hora de diseñarlos hay que tener en cuenta que dichos valores se encuentren dentro de los niveles de percepción humana de la dinámica de movimientos.

Los criterios para establecer cuál es el nivel de confort humano es muy subjetivo, ya que cada persona responde de una manera diferente ante un estímulo.

No aparece en ninguna norma un criterio que establezca limitaciones de dichos valores, por lo hay que basarse en limitaciones encontradas en varios artículos que estudian este tema;

Tabla 3. Niveles de percepción humana de la dinámica de movimiento (Mendis et al, 2007)

| Nivel de Movimiento | Aceleración metro ² /s | Efecto |
|---------------------|---|--|
| 1 | <0,05 | Los seres humanos no pueden percibir el movimiento |
| 2 | ,05-0,1 | Las personas sensibles pueden percibir el movimiento. Los objetos pueden moverse ligeramente |
| 3 | 0.1 - 0.25 | La mayoría de la gente percibe el movimiento. Nivel de movimiento puede afectar trabajo de escritorio. La exposición a largo puede producir mareo. |
| 4 | Escritorio de trabajo 0.4 difícil o imposible - 0,25. | Deambulación todavía posible. |
| 5 | 0,4-0,5 | La gente percibe fuertemente el movimiento, y tienen dificultad para caminar. personas de pie pueden perder el equilibrio. |
| 6 | 0.5 - 0.6 | La mayoría de las personas no pueden tolerar el movimiento y son incapaces de caminar naturalmente. |
| 7 | ,6-,7 | La gente no puede caminar o tolerar el movimiento. |
| 8 | > 0.85 | Objetos comienzan a caer y la gente pueden ser lesionados. |

Ilustración 23_Tabla extraída del artículo *Foundation Design for Tall Building*

Y según Khan y Parmelee:

“No perceptible aceleración menor 0,004 g.

Raramente perceptible, aceleración entre 0,004 g y 0,0075 g.

Perceptible aceleración entre 0,0075 g y 0,02 g.

Molesta aceleración mayor 0,02 g.

g=9,81 m/seg²” (Manterola Armisén, J, 1985, pag. 6)

A la hora de evitar, o disminuir lo máximo posible, estas vibraciones, es importante la utilización de elementos estructurales dúctiles ante dichas acciones, que generen el menor número de daños posibles a la estructura y afecte lo menos posible al confort de los usuarios.

7. TIPOS DE CIMENTACIONES

7.1. Estudio Geotécnico

A la hora de diseñar una cimentación hay que tener muy en cuenta las características del terreno en el que nos encontramos. Teniendo en cuentas las características y el tipo de estructura prevista se llevará a cabo el tipo de cimentación que sea más adecuado.

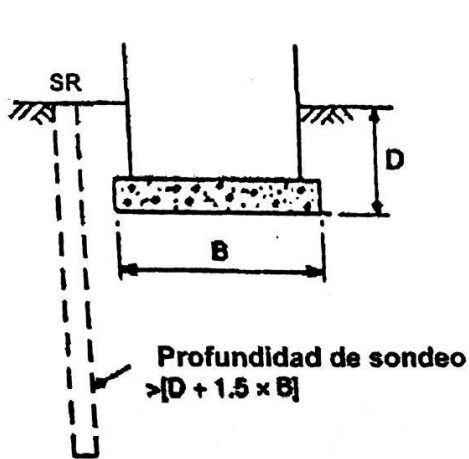
En primer lugar, se tiene que realizar un estudio geotécnico que contenga tanto trabajos de campo, de ensayos in situ y de extracción de muestras del terreno, como ensayos de laboratorio de dichas muestras.

Un aspecto importante a tener en cuenta a la hora de realizar un sondeo es la profundidad. Se debe llegar hasta la profundidad en la que deje de aumentar el valor de las tensiones que sufre el terreno. El CTE establece que *“el efecto de la estructura deja de ser apreciable cuando el incremento de tensión vertical es inferior al 10% de la tensión transmitida a nivel de la cimentación”* (CTE DB SE C, 2006, pag.)

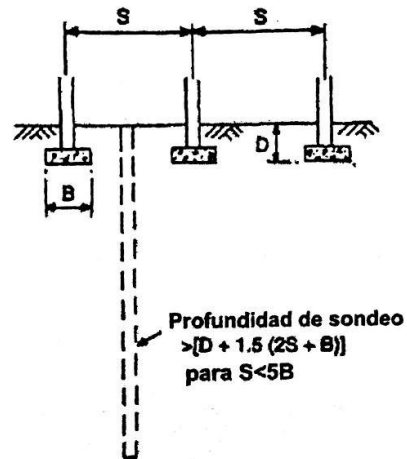
La Asociación Científico - Técnica del Hormigón Estructural establece, de manera aproximada, una profundidad de investigación del terreno según cada tipo de cimentación.

| Elemento de cimentación | | Profundidad aproximada de investigación bajo nivel de apoyo | |
|--|----------------------------|---|------|
| Zapatas | Espaciadas ($S \geq 5B$) | Cuadrada | 2B |
| | | Corrida | 4B |
| | Próximas ($S < 5B$) | | 2S+B |
| Pilotes | | Máximo de 3 m ó 3 \emptyset | |
| Losas | | $\geq 1,5B$ (*) | |
| Losas pilotadas | | 1,5B+2/3D | |
| Ancho zapata (B), separación entre zapatas (S), diámetro de pilotes (\emptyset), ancho losa (B) y profundidad de apoyo de la cimentación (D) – en el caso de pilotes y losas pilotadas, la profundidad de apoyo es la distancia entre la superficie y el pie de los pilotes. | | | |
| (*) En losas muy cargadas hay que tomar con precaución esta regla | | | |

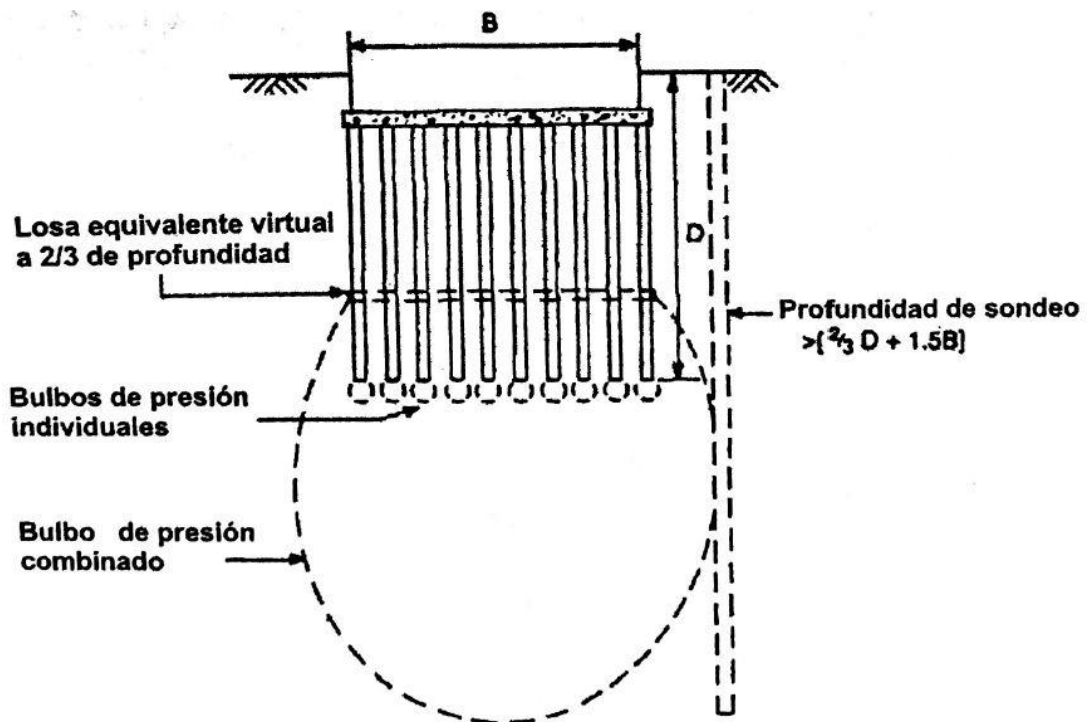
Ilustración 24_Tabla extraída de la norma Asociación C.-T. del H



25_Estructura sobre zapata aislada o losa



26_Zapatas aisladas o corridas próximas



27_Estructura sobre pilotes de fricción

Extraídas, de la norma Asociación C.-T. del H

Como se ha visto hasta ahora, hay varios factores que intervienen en la elección del tipo de cimentación adecuado para un edificio alto. Entre los más determinantes se encuentran, las características del propio edificio a construir y del terreno en el que se va a apoyar, y la influencia que pueda generar en las construcciones adyacentes.

Para decidir el tipo de cimentación se tiene que comprobar lo siguiente:

- Situación del edificio y entorno.
- Condiciones del terreno:
 - Seguridad frente al hundimiento
 - Seguridad frente a ELU
 - Asientos diferenciales
 - Giros
 - Verificación de ELS

7.2. Cimentaciones Superficiales.

7.2.1. Zapatas

- Se trata de la solución más económica.
- Transmisión de esfuerzos de forma puntual.
- Se utiliza en terrenos con gran resistencia, como el granito.



Ilustración 28_Diagrama de esfuerzos de las zapatas en diferentes tipos de terrenos, extraída de internet

- No se debe utilizar en terrenos con tensiones admisibles inferiores a los 0,5 MPa, porque saldrían dimensiones demasiado grandes.

ASPECTOS A TENER EN CUENTA:

- En zapatas de igual transmisión de presión al terreno, pero con distinta superficie debido a pilares con distinta carga, las zapatas con menor superficie sufrirán un asiento menor que las zapatas que tengan mayor superficie.

- La superposición de las leyes de tensiones que las zapatas transmiten al terreno generará un asiento mayor en las zapatas del interior del edificio que en las del perímetro.
- Hay que comprobar la estabilidad a vuelco, las zapatas tienen que absorber los enormes esfuerzos que generan las solicitaciones de viento y sismo, lo que puede generar enormes cantos de zapatas fuertemente armadas.

EJEMPLO

Torres Gemelas, Nueva York, 1973.



Ilustración 29_Extraída de internet

Con una altura de 110 pisos (417m).

Estaban situadas sobre terreno de relleno del río Hudson.

Para su construcción se llevó a cabo un muro perimetral de hormigón de 90 cm de espesor anclado a las rocas (cota -21m), que contuviera los empujes del terreno.



Ilustración 30_Foto de la excavación de la cimentación de las Torres Gemelas, extraída de internet

Su cimentación consistía en zapatas de acero ancladas a las rocas bajo cada uno de los pilares que rodeaban las torres.

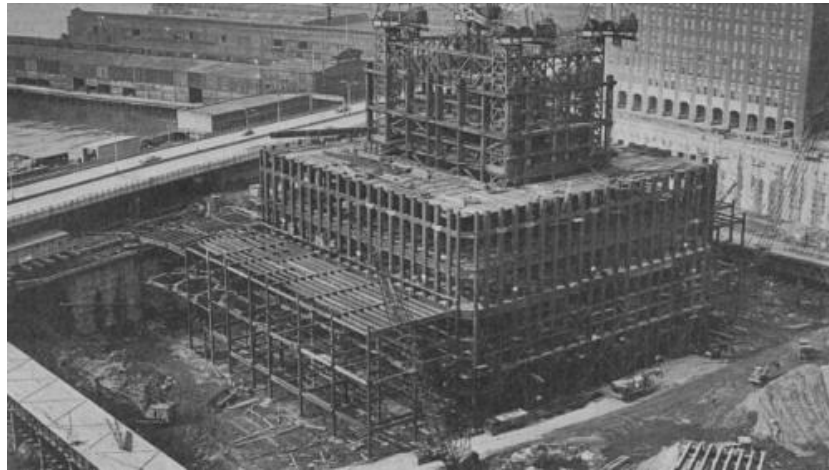


Ilustración 31_Foto de la cimentación de las Torres Gemelas, extraída de internet

7.2.2. Losas

Para un buen funcionamiento de las losas, donde se reduzcan lo máximo posible los asentamientos esperados, se utiliza el principio de cimentación compensada. Éste consiste en que la losa transmita una tensión igual o menor a la que había en el terreno antes de la excavación, evitando el hundimiento del edificio y consiguiendo asentamientos muy reducidos o despreciables.

Este tipo de cimentación, en edificios de gran altura, se utilizan cuando:

- La superficie de zapatas superaría el 50% de la superficie del edificio en planta.
- Los terrenos de apoyo tienen una resistencia media - baja.
- Se desea minimizar los asientos diferenciales.
- Se quieren construir sótanos bajo nivel freático.

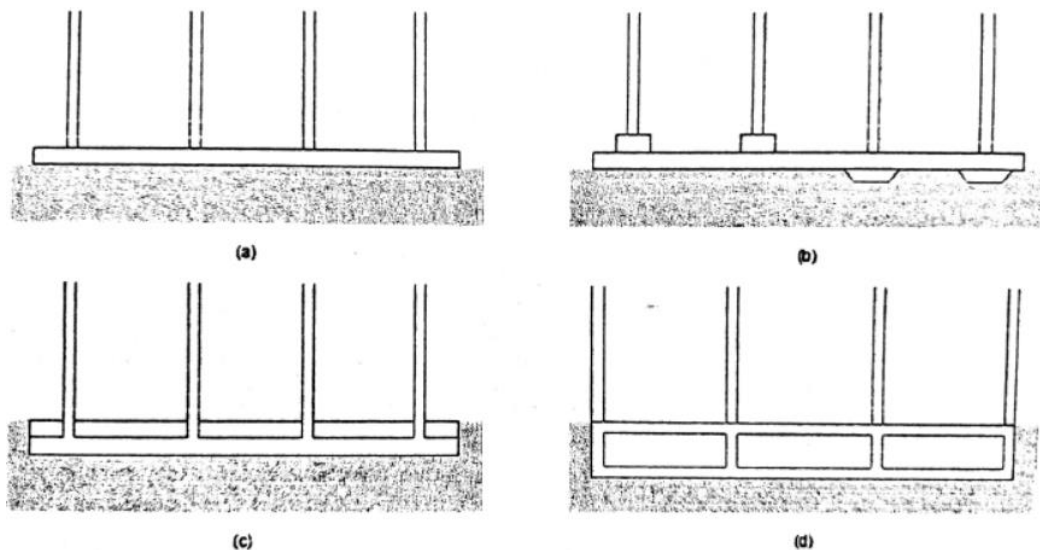


Ilustración 32_Esquema de diferentes tipos de losas, extraída de la norma Asociación C.-T. del H

ASPECTOS A TENER EN CUENTA:

- En edificios con zonas de distinta altura, la cimentación debe ir separada mediante juntas de asiento para que la presión que transmite la losa en cada caso siga siendo igual a la tensión previa a la excavación, lo que lleva a distintos niveles de sótanos.

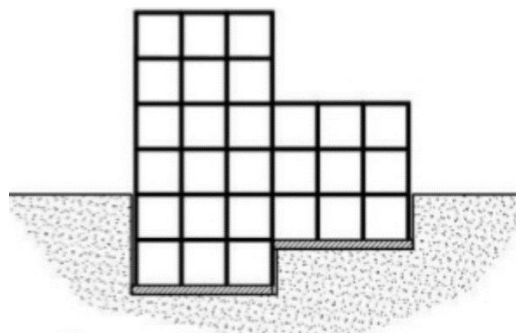


Ilustración 33_Esquema cimentación compensada, extraída de internet

- Se tiene que tener en cuenta que el centro de gravedad de la losa coincida, lo máximo posible, con el de las cargas verticales del edificio, para evitar el giro de éste debido a la acción de su peso propio.
- Generalmente se producen más asientos en la zona central de una losa flexible, por lo que se lleva a cabo una cimentación más profunda en la zona central, para evitar los asientos diferenciales.

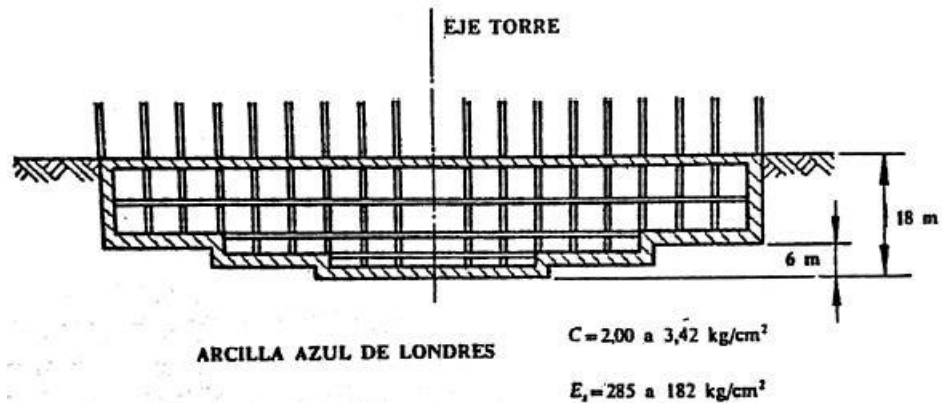


Ilustración 34_Cimentación con losa a diferentes profundidades, extraída de la norma Asociación C-T.delH

- En el caso de las losas, la estabilidad al vuelco, debida a las enormes sollicitaciones de viento y sismo, se consigue con la construcción de sótanos bajo rasante, consiguiendo así una cimentación más profunda para estabilizar cargas y estabilizar la edificación.

EJEMPLO:

Torre Caja Madrid, Madrid 2009.



Ilustración 35_Extraída de internet

42 plantas y 5 niveles de sótano (250 m).

Se encuentra situada sobre terreno de arenas tosquizas hasta los 15 y 25 m, y un sustrato de tosco arenoso.

La torre cuenta con una cimentación de losa de hormigón armado de 5 m de canto, apoyada sobre tosco. Sobre la losa asientan los dos núcleos de hormigón de la estructura portante del edificio.

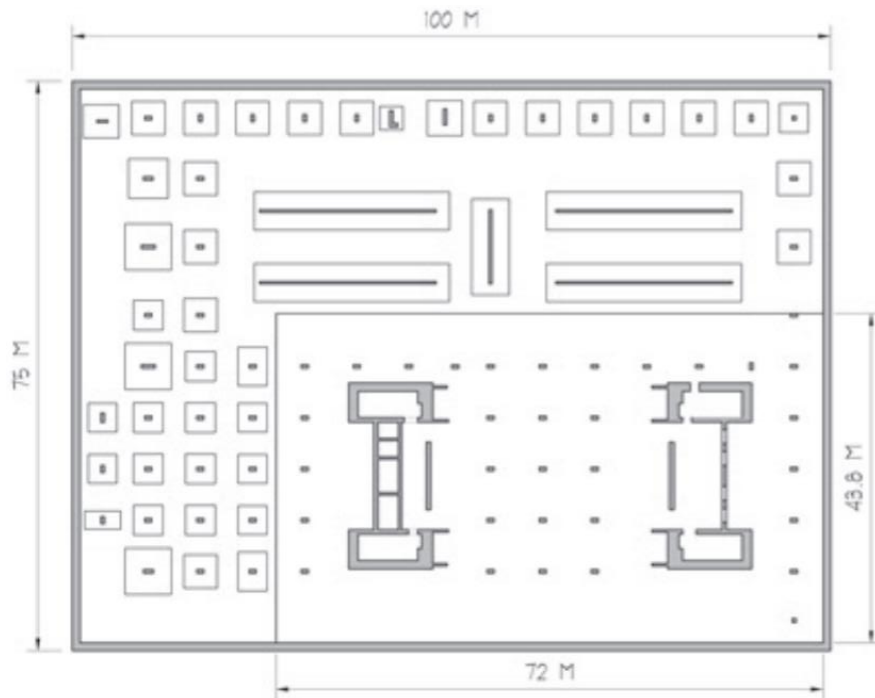


Ilustración 36_Planta cimentación Torre Caja Madrid, extraída de internet



Ilustración 37_Foto ejecución losa de cimentación Torre Caja Madrid, extraída de internet

7.3. Cimentaciones Profundas.

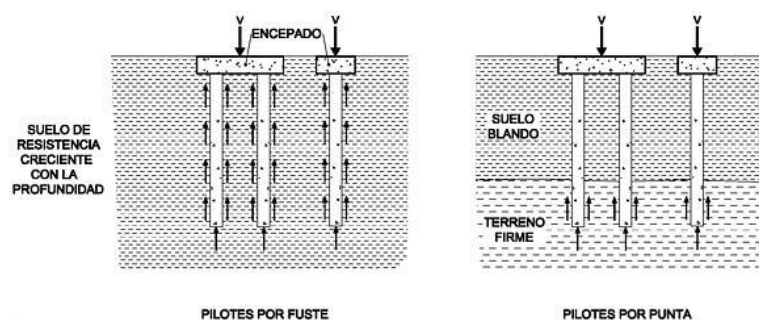
“Una cimentación se considera profunda cuando su cota de apoyo se encuentra a una profundidad igual o mayor a cinco veces la mínima dimensión en planta del elemento de cimentación (el diámetro en el caso de un pilote), con un valor mínimo entre 5 y 6 m.” (Asociación C.-T. del H, pag. 408)

Se utiliza cuando se dan las siguientes situaciones:

- Asientos excesivos con las soluciones de zapatas o losas.
- Cuando la capa resistente de apoyo se encuentra a bastante profundidad.
- Por condiciones de estabilidad (giro).
- Cuando aparecen tracciones (levantamientos) debido a las acciones de viento o sismo.
- Por flotabilidad del edificio. La subpresión total en el fondo de la excavación, debida al nivel freático, sea mayor que el peso total del edificio.

7.3.1. Pilotes

- Sección circular entre 1000mm y 2500mm.
- Profundidad habitual 35m, excepcionalmente 50m. La profundidad no debe superar los 30 – 40 diámetros del pilote, por cuestiones de esbeltez y sistemas de ejecución.
- Separación habitual entre ejes de pilotes de 2 – 3 diámetros.
- Los pilotes pueden trabajar por fuste o por punta, dependiendo del terreno en el que se encuentren.



ASPECTOS A TENER EN CUENTA:

- A mayor diámetro de pilote, mayor separación entre sus ejes. A consecuencia, el encepado tendrá una mayor superficie y requerirá un elevado canto para considerarlo rígido.
- La separación entre ejes de pilotes es bastante importante, debido a que el comportamiento de un pilote aislado difiere mucho de un grupo de pilotes. Por lo tanto, la separación entre ejes debe ser, según CTE, mayor a 2 diámetros, para que no se produzca el efecto grupo y se vea reducida la capacidad de carga de los pilotes. Un pilote que trabaja de forma individual tiene una mayor capacidad de soporte.
- Los asentamientos que se producen también se ven afectados por el efecto grupo, en un grupo de pilotes se da un asiento bastante mayor que en un pilote aislado.
- Normalmente se utilizan encepados flexibles, dada la dificultad de conseguir encepados rígidos, debido a las grandes dimensiones. Se suele emplear una gran losa que une los pilotes de varios elementos estructurales cercanos.

EJEMPLO:

Edificio Taipei 101 en Taiwan, 2004



Ilustración 38_Extraída de internet

Con 101 plantas y 5 niveles de sótano (508m).

Se encuentra situado sobre terreno pantanoso, donde el sustrato rocoso se encuentra a 60 m de profundidad.

Dispone de 380 pilotes de 1500mm de diámetro de 80m de longitud, empotrados en terreno rocoso.

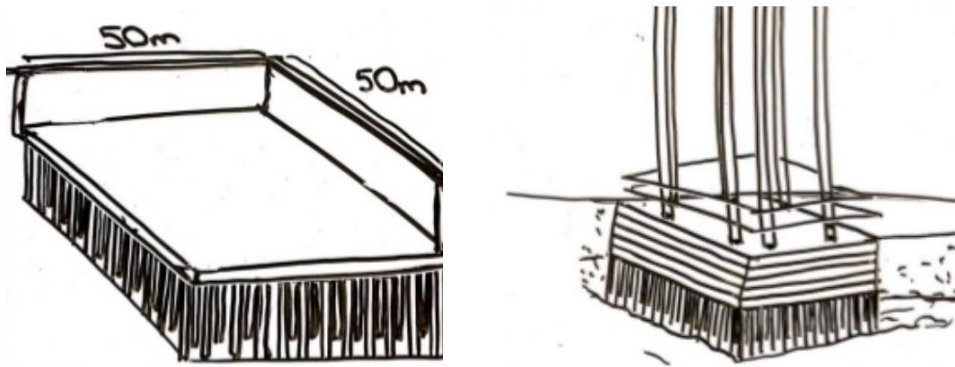


Ilustración 39_Esquemas cimentación edificio Taipei 101, extraída de internet

7.3.2. Muros pantalla

- Adecuado para cimentar muros, pantallas del edificio o pilares puesto que hay una transmisión continua de un elemento a otro.
- Se ejecutan por bataches, cuyas dimensiones dependen del tamaño máximo de la cuchara disponible en mercado, que se sitúa en torno a los 5m.
- Espesores desde los 400 mm a los 1200mm, bastante superiores a los espesores de los elementos estructurales, debido a que éstos transmiten una tensión superior a la tensión admisible de los elementos de cimentación.
- La máxima profundidad de excavación se sitúa entre 35 y 40 m. De forma excepcional se pueden alcanzar los 100m de profundidad, mediante el empleo de maquinaria específica.
- Mayor capacidad para absorber esfuerzos horizontales.
- Capacidad portante 30% menos que lo pilotes aislados, pero sólo es necesaria una viga de coronación como elemento que conecta el muro con el elemento estructural, frente al enorme encepado necesario en el caso de los pilotes, y por tanto se necesita menos hormigón y acero que el encepado de los pilotes.

ASPECTOS A TENER EN CUENTA:

- Cuando las dimensiones de los bataches necesarios sean superiores a las máximas disponibles según los métodos de ejecución del mercado (5m), se tendrán que ejecutar varios bataches. En este caso, la viga de atado tendrá que repartir la carga entre todos los bataches para evitar movimientos diferenciales entre ellos, por lo que tendrá un canto importante para obtener mayor rigidez.
- El encepado lineal que une los diferentes bataches ocupa una superficie menor que la necesaria en un encepado de pilotes.
- Es importante que la excavación se realice lo más vertical posible para evitar excentricidades que hagan necesarios, el aumento del canto de la viga de coronación, o el empleo de vigas centradoras.
- Normalmente, en los edificios altos se lleva a cabo la ejecución de un muro pantalla perimetral, que permite la construcción de varios niveles de sótano, de forma que, si se utiliza el mismo equipo para la excavación de la cimentación, sin necesidad de llevar una pilotadora, se consigue un ahorro económico importante.

EJEMPLO:

Torre Sevilla (*estudiada en un apartado posterior*)

7.4. Cimentaciones Mixtas.

Este tipo de cimentaciones se puede llevar a cabo tanto en terrenos blandos como duros. Con él se produce un importante ahorro económico y de tiempos de ejecución, respecto al sistema de cimentación mediante pilotes, debido a que parte de la carga transmitida al terreno es asumida por la losa o zapatas y otra parte por los pilotes.

7.4.1. Zapatas y Pilotes

- Adecuada para cimentaciones donde:
 - el terreno resistente (piedra caliza) no se encuentra en la superficie.
 - La tensión admisible del terreno es superior a la tensión transmitida por el edificio al terreno, de forma que el terreno tiende a levantar las zapatas y los pilotes evitan esa situación.
- En este tipo de cimentaciones:
 - los pilotes trabajan a tracción para soportar los empujes del terreno que tienden a levantar las zapatas.
 - las zapatas son las encargadas de transmitir las fuerzas de compresión de la estructura al terreno

ASPECTOS A TENER EN CUENTA:

- Ahorro económico respecto a una cimentación exclusivamente con pilotes. Con las zapatas transmitiendo los esfuerzos al terreno, evitamos la ejecución del encepado de gran canto necesario en el caso de cimentación por pilotes.
- Se emplea cuando la superficie ocupada por las zapatas es menor que la mitad de la superficie total ocupada en planta por el edificio.

EJEMPLO:

Por lo general, no es adecuada la utilización de varios sistemas de cimentación a la vez, es decir, el uso de cimentaciones mixtas, por riesgos del correcto funcionamiento de la combinación de dichos elementos.

En los edificios altos aumenta ese riesgo, por lo que no se encuentra un ejemplo de este tipo de edificios construido con un sistema de cimentación combinados de zapatas y pilotes. Este sistema podría ocasionar importantes asientos diferenciales.

7.4.2. Losas pilotadas

- Funcionan sobre arcillas relativamente rígidas o arenas relativamente densas.
- Se utiliza cuando:
 - la relación entre la altura del edificio y el lado menor de su cimentación es superior a cuatro.
 - las cargas verticales son transmitidas con una importante excentricidad respecto al centro de gravedad de la losa.
 - en una cimentación exclusivamente con losa se transmiten tensiones muy elevadas al terreno.

ASPECTOS A TENER EN CUENTA:

- Es bastante adecuada para edificios con grandes diferencias de carga entre distintas partes de éste, de forma que se evita la ejecución de juntas de asiento, cuya construcción es bastante compleja. Además, de esta manera, se evitan asientos diferenciales entre diferentes partes con distintas cargas.
- Por su ejecución, la capa superior del terreno no se reblandece ni pierde sus propiedades y, las tensiones efectivas del terreno no disminuyen, como en el caso de las cimentaciones compensadas.
- Se reduce el giro o inclinación de la cimentación por causas como irregularidades del terreno o excentricidades de las cargas.
- Ahorro económico mediante la disminución de los esfuerzos en la losa debido a la correcta posición de los pilotes.

EJEMPLO:

El caso de losa combinada con pilotes es diferente a lo que ocurre en el caso de zapatas combinadas con pilotes. Por el contrario, la mayor parte de edificios de gran altura se construyen con este sistema, dado su adecuado funcionamiento en edificios de este tipo.

En este sistema la losa funciona como encepado de los pilotes, con la diferencia de que contiene un mayor armado que el encepado, permitiéndole soportar parte de los esfuerzos, además de hacer la función de encepado.

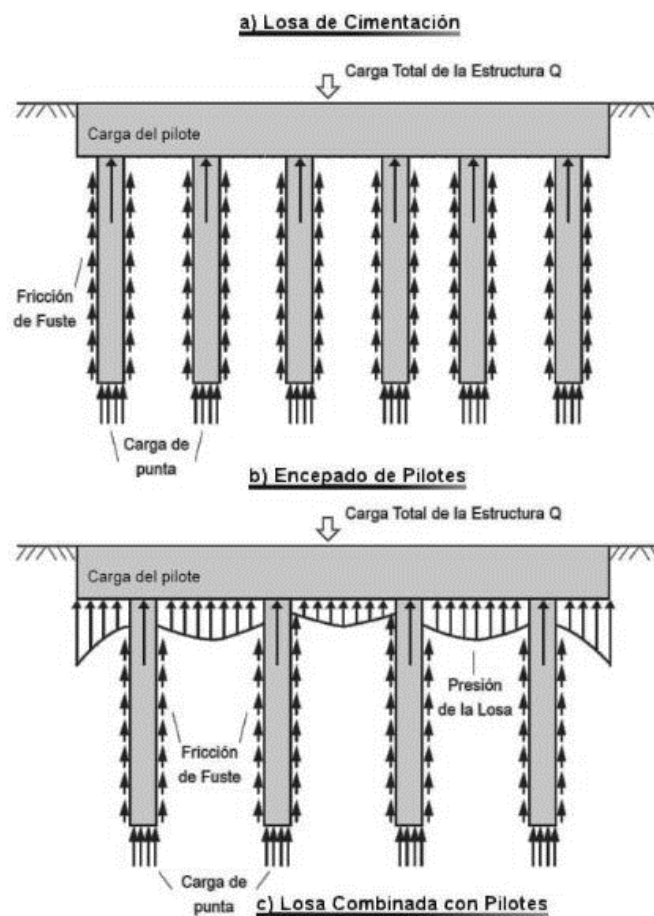


Ilustración 40_Extraída de internet

El edificio más alto del mundo actualmente, Burj Khalifa, en Dubai, está construido con este sistema de cimentación.

Burj Khalifa, Dubai, 2010.



Ilustración 41_Extraída de internet

Con 158 plantas (828m).

Losa de Hormigón armado de 3,7m de canto.

194 pilotes de 1,5m de diámetro y 43m de longitud hasta llegar al terreno resistente.

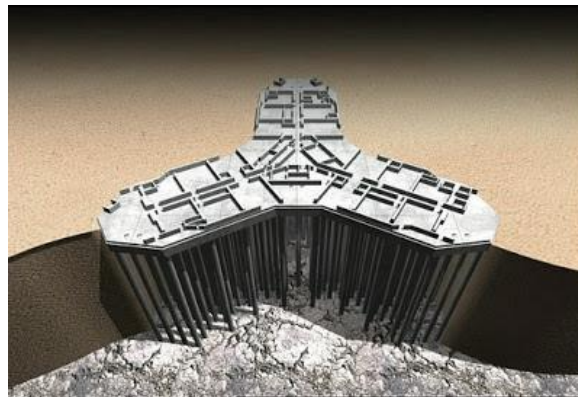


Ilustración 42_Esquema de cimentación edificio Burj Khalifa, extraída de internet



Ilustración 43_Foto cimentación edificio Burj Khalifa, extraída de internet

8. CIMENTACIÓN TORRE SEVILLA.

La Torre Cajazol de Sevilla, también llamada Torre Sevilla o Torre Pelli, es el edificio más alto de toda Andalucía.

Se encuentra situada en La Isla de La cartuja de Sevilla y dispone de una cimentación separada del resto del edificio.



Ilustración 44_Emplazamiento Torre Sevilla con plano actual superpuesto a plano de 1959, imagen propia

Teniendo en cuenta las características del terreno en el que se encuentra, que son terrenos de relleno de la antigua corta de San Jerónimo, había que hacer una cimentación profunda que se apoyara en las margas resistentes del subsuelo de Sevilla.

Finalmente se llegó a una solución de cimentación de dos muros pantalla concéntricos de 0,80m de espesor, anclados en la cota -48,72m, unidos por un encepado de 4 m de canto en la cota -7,72m.

El muro interior transmite al terreno los esfuerzos del núcleo central de la torre, y el muro exterior recoge y transmite los esfuerzos de los pilares exteriores de la torre.

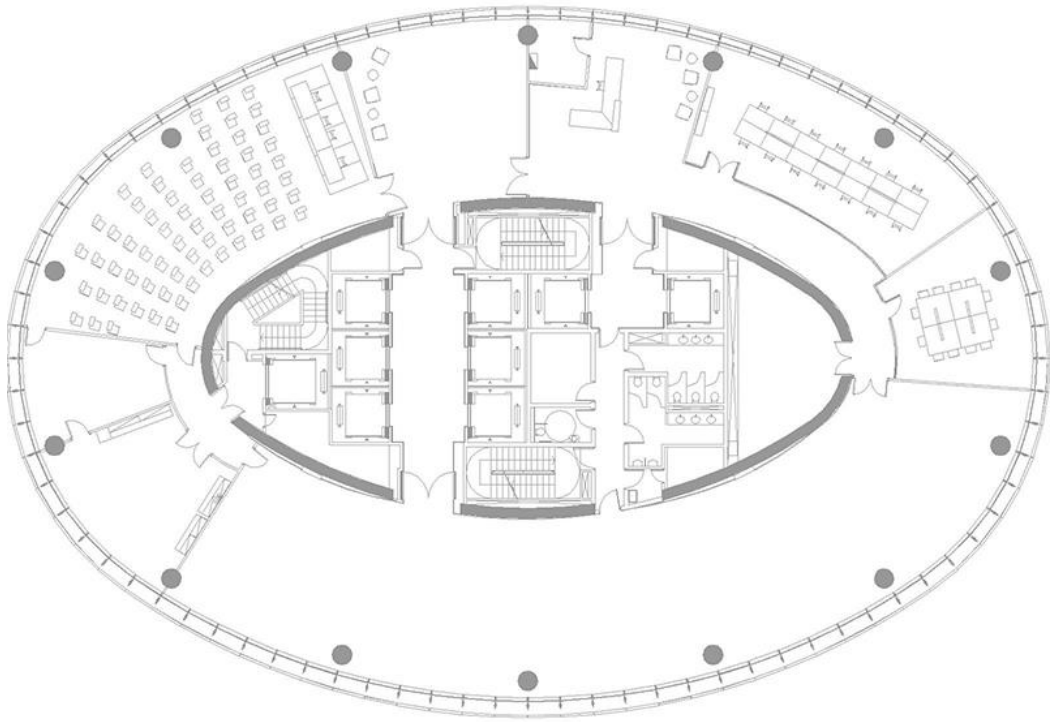


Ilustración 45_Planta Torre Sevilla, extraída de internet

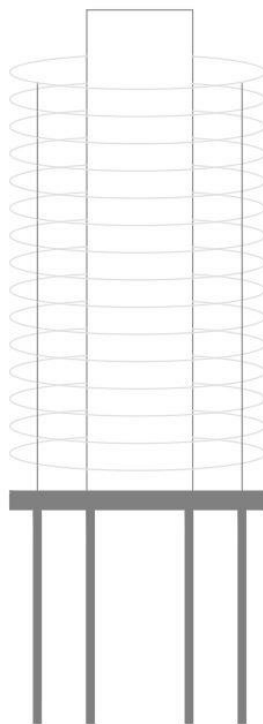


Ilustración 46_Esquema Torre Sevilla, imagen propia

FOTOS DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LA CIMENTACIÓN



Ilustración 47_Cedida por el profesor José Sánchez



Ilustración 48_Cedida por el profesor José Sánchez

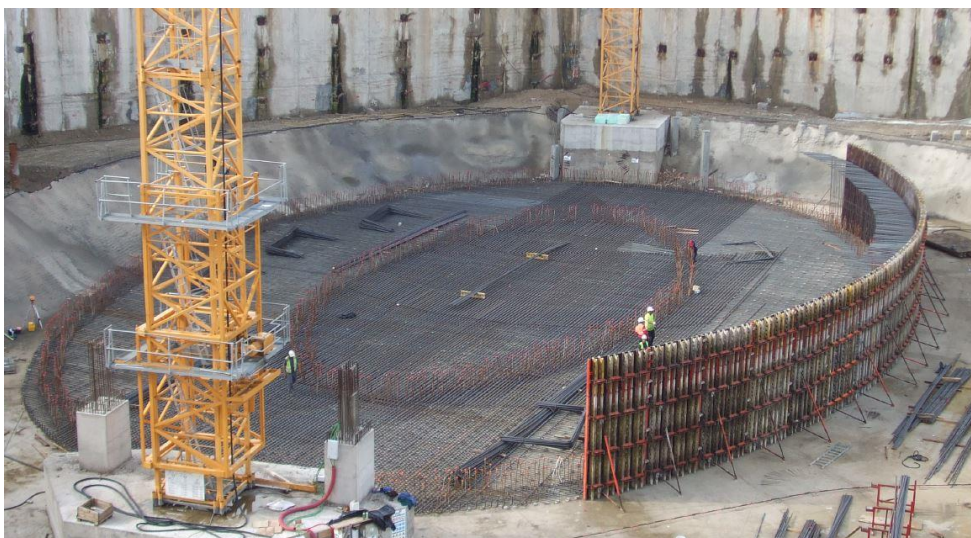


Ilustración 49_Cedida por el profesor José Sánchez



Ilustración 50_Cedida por el profesor José Sánchez

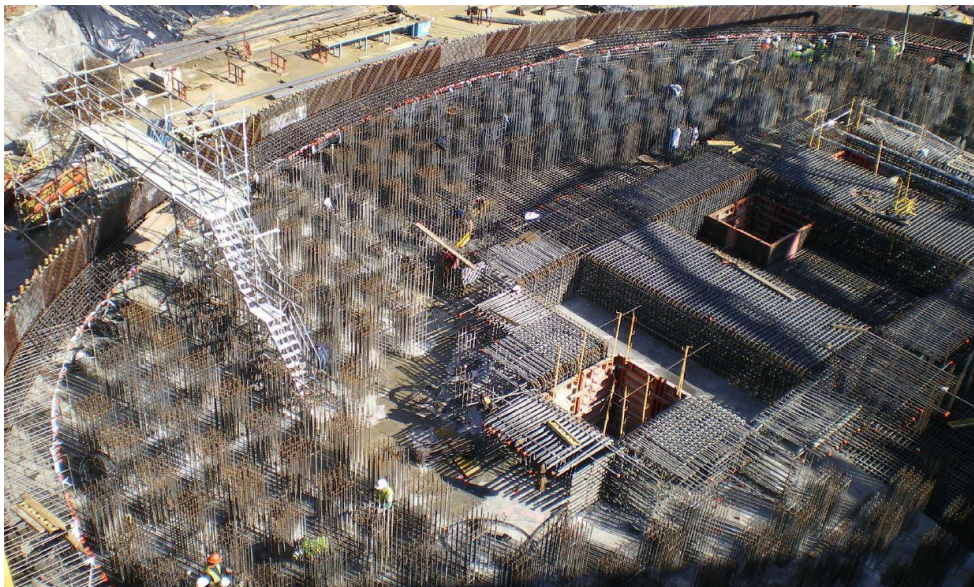


Ilustración 51_Cedida por el profesor José Sánchez



Ilustración 52_Cedida por el profesor José Sánchez

8.1. Estimación de cargas

Se realizará una estimación de cargas que soportan las pantallas por metro lineal.

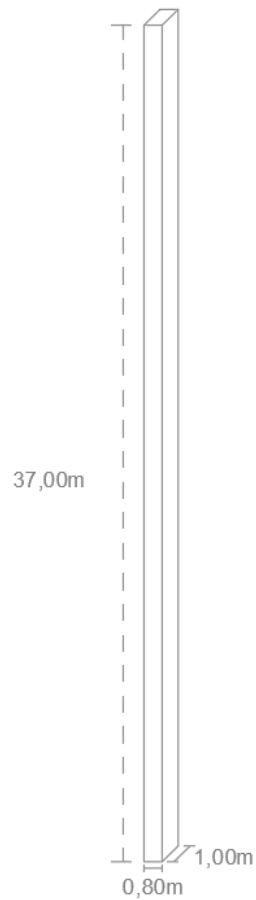


Ilustración 53_Esquema metro lineal de muro, imagen propia

8.1.1. Datos de partida

- 39 Plantas de altura (2 de ellas dedicadas a instalaciones) más 3 Plantas bajo rasante.
- Un área aproximada por cada planta de 1170 m².
- Hormigón armado como material principal de la estructura y cimentación.

PESO PROPIO

- 37 Plantas
- 2 Plantas técnicas
- 3 Plantas bajo rasante

| | |
|--|-------------------------|
| P. Propio del forjado (losa de h. armado de 30 cm de espesor)..... | 7,50 KN/m ² |
| Pavimentos..... | 1,20 KN/m ² |
| Cerramiento..... | 10,00 KN/m ² |
| Peso Propio pantalla de hormigón armado..... | 25,00 KN/m ² |
| Instalaciones de ventilación..... | 25,00 KN/m ² |

48,70 KN/m²

TOTAL: 48,70 KN/m² · (37,00m · 1170 m²).....**2.466.620,91 KN**

SOBRECARGA DE USO

- 23 Plantas de Oficina
- 1 Planta eventos
- 1 Planta vestíbulo hotel
- 12 Plantas de habitaciones de hotel
- 2 Plantas técnicas
- 3 Plantas de aparcamiento bajo rasante

| | |
|--|-----------|
| Zona Administrativa...2,00 KN/m ² · (23 · 1170 m ²)..... | 53.820 KN |
| Habitaciones Hotel.....2,00 KN/m ² · (12 · 1170 m ²)..... | 28.080 KN |
| Zona sin obstáculos....5,00 KN/m ² · (2 · 1170 m ²)..... | 11.700 KN |
| Aparcamiento.....2,00 KN/m ² · (3 · 1170 m ²)..... | 7.020 KN |
| Instalaciones.....5,00 KN/m ² · (2 · 1170 m ²)..... | 11.700 KN |

112.320 KN

Se aplica un coeficiente de reducción de 0,8 (elementos verticales)

TOTAL:.....**89.856 KN**

8.1.2. Resistencia característica al hundimiento

Se calcula la resistencia característica al hundimiento de la pantalla para comprobar lo que puede soportar la pantalla.

Para ello hay que tener en cuenta las características del terreno obtenidas en los estudios geotécnicos realizados.

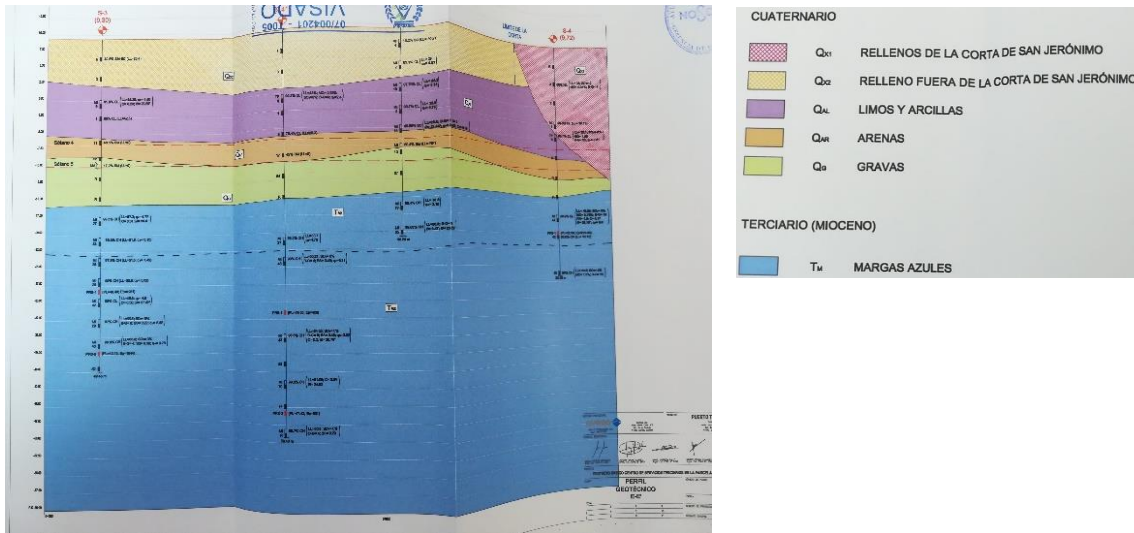


Ilustración 54_Estudio Geotécnico extraído del proyecto básico de Torre Sevilla, extraída del Proyecto Básico

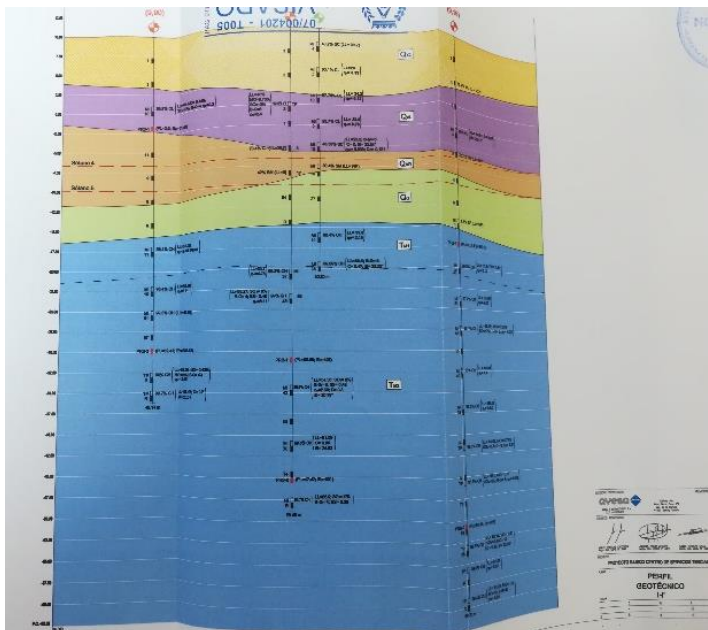


Ilustración 55_Estudio Geotécnico extraído del proyecto básico de Torre Sevilla, extraída del Proyecto Básico

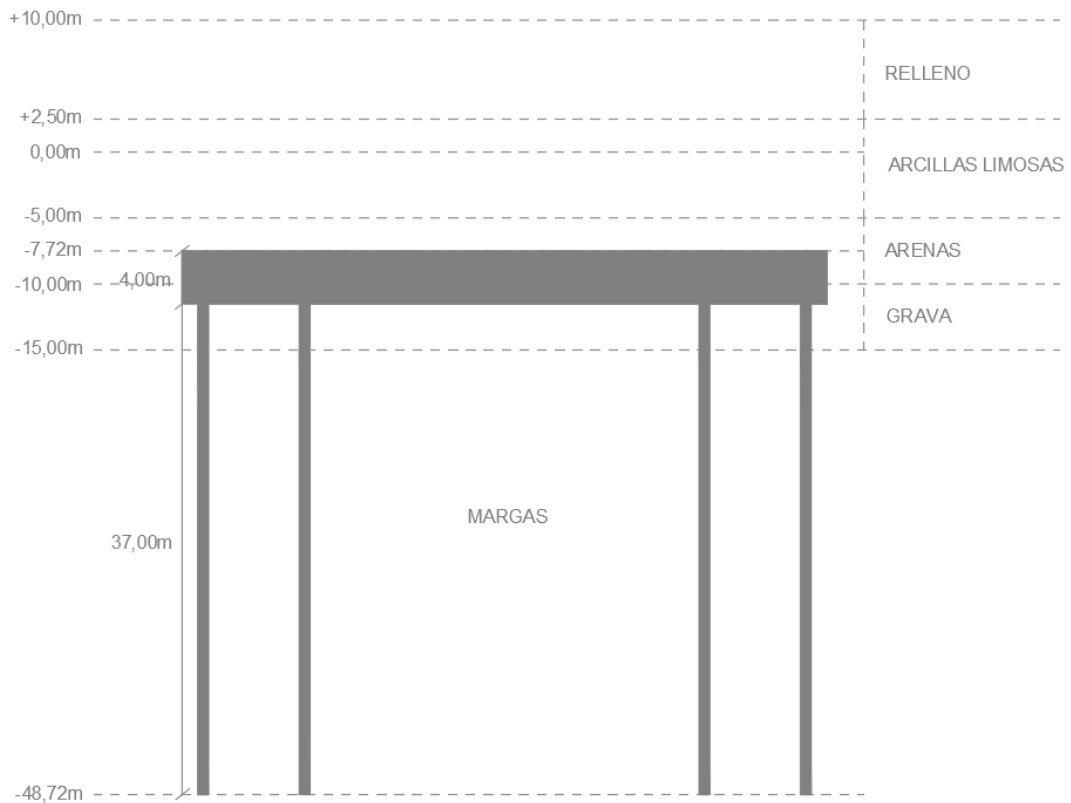


Ilustración 56_Esquema de cimentación y estratos del terreno para el cálculo, imagen propia

El nivel freático se sitúa entre las cotas +1,50 y +2,80 m.

RESISTENCIA POR PUNTA

Margas – $q_u = 1000 \text{ KPa} - 350 \text{ KPa} \rightarrow q_u = 500 \text{ KPa}$

$$C_u = q_u / 2$$

$$C_u = 500 \text{ KPa} / 2$$

$$C_u = 250 \text{ KPa}$$

$$q_p = N_p \cdot C_u$$

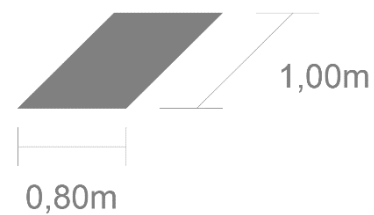
$$q_p = 7,5 \cdot 250 \text{ KPa}$$

$$q_p = 1.875 \text{ KPa}$$

$$R_{pk} = q_p \cdot A_p$$

$$R_{pk} = 1.875 \text{ KPa} \cdot (0,80 \text{ m} \cdot 1,00 \text{ m})$$

$$\mathbf{R_{pk} = 1.500 \text{ KPa}}$$



RESISTENCIA POR FUSTE

$$\tau_f = (100 \cdot C_u) / (100 + C_u)$$

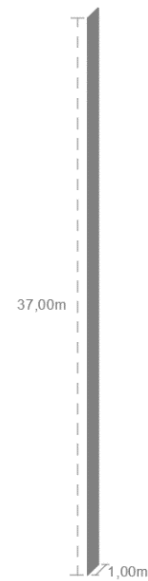
$$\tau_f = (100 \cdot 250 \text{ KPa}) / (100 + 250 \text{ KPa})$$

$$\tau_f = 71,43 \text{ KPa}$$

$$R_{fk} = \tau_{fi} \cdot A_{fi}$$

$$R_{fk} = 71,43 \text{ KPa} \cdot (37,00 \text{ m} \cdot 1,00 \text{ m} \cdot 2 \text{ caras})$$

$$R_{fk} = \mathbf{5.285,82 \text{ KPa}}$$

RESISTENCIA CARACTERÍSTICA A HUNDIMIENTO

$$R_{ck} = R_{ck} + R_{ck}$$

$$R_{fk} = 1.500 \text{ KPa} + 5.285 \text{ KPa}$$

$$R_{fk} = \mathbf{6.785 \text{ KPa}}$$

8.1.3. Carga que transmite la pantalla

Se calcula la resistencia que está transmitiendo al terreno la pantalla, por metro lineal, para comprobar si están trabajando bien y no hay peligro de hundimiento de la estructura.

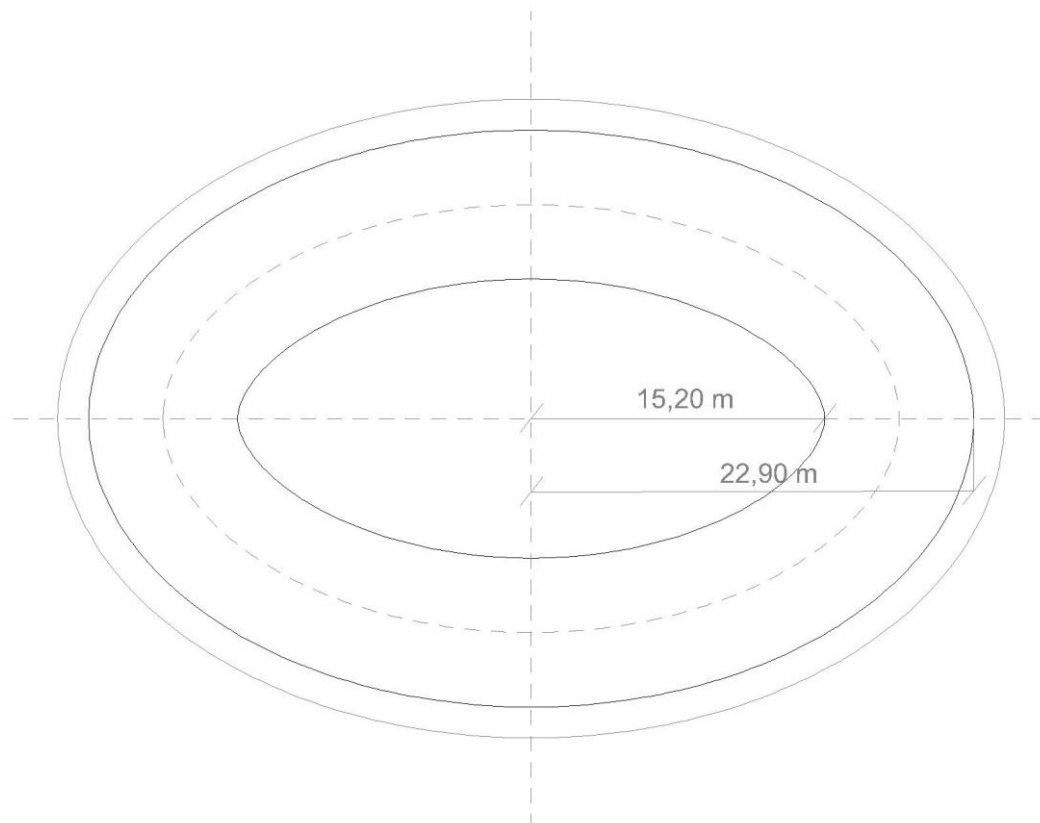


Ilustración 57_Esquema planta Torre Sevilla, imagen propia

CARGA TOTAL/ml (PP+SU)=2.466.620,91KN+89.856KN = 2.556.476,91KN

Calculamos la longitud de la pantalla de cimentación (para hacerlo de forma simplificada y sacar una aproximación, se considerará la planta circular, con un radio aproximado de 23 m):

$$L = 2\pi r = 2 \cdot \pi \cdot 23\text{m} = 144,50\text{m}, \text{ Se tomará como valor aproximado } \mathbf{150\text{m}}$$

De esta manera se ha obtenido la longitud de una cara de la pantalla. Hay que multiplicar este valor por dos para obtener la longitud de las dos caras de la pantalla, de forma que queda:

$$L_T = 150\text{m} \cdot 2 = 300\text{m}$$

Una vez sacada la longitud total de las dos caras que forman de la pantalla, se multiplicará por la carga total por metro lineal que aguantan para obtener la carga total que transmite la pantalla al terreno:

$$\mathbf{CARGA\ TOTAL = 2.556.476,91KN \cdot 300m = 7.669.430,73\ KN}$$

Para comprobar que no hay peligro de hundimiento se tiene que comprobar que el coeficiente de seguridad al hundimiento igual o mayor que 3:

$$\gamma = 7.669.430,73\ KN / 2.556.476,91KN = 3 \longrightarrow \mathbf{CUMPLE}$$

Por tanto, del análisis aproximado de la cimentación de la Torre Sevilla realizado, se obtiene que el sistema de cimentación empleado es adecuado para el tipo de edificio, según el terreno en el que se encuentra, sin que existan, a priori, problemas de hundimiento.

9. CONCLUSIONES

Cuando se habla de edificios de gran altura hay que centrarse en una escala de valores y dimensiones totalmente distinta a la que normalmente se utiliza en construcciones más convencionales.

Con la altura, el efecto de las acciones que intervienen en un edificio de este tipo se incrementa. Por tanto, a la hora de dimensionar su cimentación es muy importante tener en cuenta factores como el viento, el sismo y el propio peso del edificio, que serán determinantes, junto con el tipo de terreno, para la elección del tipo de cimentación adecuado.

El efecto de dichos factores hace que las cimentaciones sean propias edificaciones en sí, ya que alcanzan dimensiones de edificios convencionales, con cantos de encepados de 4m, como en el caso de la Torre Sevilla, y pilotes de bastante profundidad.

La cimentación, en el caso de edificios de gran altura, tiene que soportar grandes momentos en la base debido a acciones horizontales de viento y sismo, además de empujes los empujes del terreno. Todo ello puede contribuir a problemas de vuelco de la estructura, cosa que tiene que evitar la cimentación.

Se trata de la parte estructural del edificio encargada de transmitir las cargas al terreno, por lo que se tendrá que realizar en función de las características del mismo.

El asegurar la estabilidad de estos grandes edificios es lo que hace que la cimentación tenga grandes dimensiones y profundidad.

El coste de este tipo de construcciones es bastante elevado, por lo que es importante buscar siempre la solución más económica posible. En el caso de la cimentación hay que tener en cuenta que sea el tipo adecuado para el terreno en el que se encuentra el edificio para que cumpla con los requisitos de estabilidad.

En general, es usual ir a losas cuando el terreno tiene una suficiente consistencia y, por tanto, no se esperan grandes asientos diferenciales. En el caso contrario (grandes asientos esperables), se recurre a encepados de pilotes. Con el primer sistema se atribuye la transmisión de las cargas totalmente a la losa y con el segundo, a los pilotes, despreciando lo que pueda contribuir el encepado. Pues bien, una losa pilotada es una cimentación que está en el punto intermedio entre losa y encepado de pilotes, consiguiendo minorar en gran medida tanto los asientos esperables si se hubiera elegido una cimentación losa, como el coste de hacer un encepado con un alto número de pilotes. Es decir, funciona, es seguro y es mucho más barato.

Básicamente, con el uso de una losa combinada con pilotes, se logra que una parte de la carga de la estructura (y no toda) sea traspasada a mayores profundidades. Esto hace, por lo tanto, que las losas pilotadas sean particularmente efectivas cuando la calidad del suelo, como es lo típico, mejora con la profundidad.

No se puede descuidar el hecho de que el edificio es construido para ser habitado, por lo que el factor de confort humano también cobra un papel importante a tener en cuenta.

10. IDEAS PARA AMPLIAR EL TRABAJO

Se plantean algunas ideas de posible ampliación del trabajo,

- Con respecto a los aspectos específicos a tener en cuenta a la hora de diseñar la cimentación de un edificio de gran altura se podría completar con más información e incluso ejemplos prácticos, ya que este apartado es bastante amplio e importante a la hora de elegir un diseño de cimentación adecuado.
- El caso de los tipos de cimentaciones se podría completar con más casos de cimentaciones de edificios de gran altura en determinados tipos de terrenos de especiales características, es decir, suelos no ideales y conocer la solución de cimentación que se ha elegido.
- También se podrían incluir más casos de ejemplos prácticos como el de Torre Sevilla para ver los diferentes rendimientos de diferentes tipos de cimentación en distintos tipos de suelos.

11. BIBLIOGRAFÍA

NORMAS

Ministerio de Vivienda. (2009). CTE DB SE-AE Acciones en la edificación. *Publicaciones Ministerio Vivienda*, 1–42.

Gobierno de España. (2008). CTE-SE-C-Seguridad estructural Cimientos. *Boletín Oficial Del Estado*, 1–160.

Decreto, R. (1988). NBE-AE/88. Acciones en la edificación, 1–33.

Estructural, A. (Asociación C.-T. del H. (n.d.). Proyecto de edificios altos.

ARTICULOS

Manterola Armisén, J. (1985). La estructura resistente de los edificios altos. *Informes de La Construcción*, 371, 5–30.

Poulos, H. G. (2012). Foundation design for tall building. *Geotechnical Engineering State of the Art and Practice: Keynote Lectures from GeoCongress 2012 (GSP 226)*, (September), 786–809. <https://doi.org/10.1061/9780784412138.0028>

Honors, H., Citation, D., Fellow, T., Scholar, J. a M., & Embry, R. (2013). D e. b, 2004, 1–5.

Burgos, J. R. (2008). Nueva sede social Caja Madrid New Caja Madrid headquarters, 59(1).

FCC CONSTRUCCIÓN. (2010). Torre Caja Madrid.

REVISTAS

Gómez Hermoso, J., Irastorza, L., Pascual, J., Calzón, J. M., & Castañón Jiménez, C. (2014). La revista de los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos El significado, la realidad y la trascendencia de los edificios altos Visión crítica y reflexiones acerca del estado actual de los edificios altos, 1–108.

CIVIL, I. (2012). Ing Civil 166.

LIBROS

Calavera, J. (1984). *Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón armado para edificios* (2a ed.). [Madrid]: Intemac.

Rafeiner, F. (1969). *Construcción de edificios en altura*. Barcelona [etc.]: Blume.

Rechea Alberola, M. (2006). *Guía de cimentación de edificios*. Valencia: Instituto Valenciano de la Edificación.

Calavera, J. (2015). *Cálculo de estructuras de cimentación* (5a ed.). [Madrid]: Instituto Técnico de Materiales y Construcciones. Rodríguez Ortíz, J. M. (1980). *Cimentaciones*. Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.

Ferrer Kutter, C. (1956). *Cimentaciones y pilotajes*. Barcelona [etc.]: José Montesó.

Lauder, V. C. (1975). *Cimientos*. Barcelona [etc.]: Blume.

PÁGINAS WEB

<http://laboratoriorediam.cica.es/concrete/index.php/herramientas/comparador-de-wms/>

<https://es.slideshare.net/DamianBruzos/acciones-sismicas-en-edificios-de-gran-altura-2015>

<http://blog.360gradosenconcreto.com/cuatro-torres-business-area-alcanzando-el-cielo-de-espana/>

<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/taipei-101/>

<http://www.jmhdezhdz.com/2011/08/taipei-101-taiwan-planos-plans.html>

<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/torres-gemelas-new-york/>

<https://www.infobae.com/america/fotos/2016/09/10/las-torres-gemelas-asinacio-uno-de-los-mayores-simbolos-de-nueva-york/>

<http://www.revistacyt.com.mx/index.php/tecnologia/21-burj-khalifa-una-construccion-de-excelencia>

<http://blog.360gradosenconcreto.com/burj-khalifa-record-en-altura-y-bombeo-de-concreto/>

<https://www.torre-sevilla.com/>

OTROS DOCUMENTOS

Proyecto básico del Centro de Servicios Terciarios situado en parcela CT1 PERI ARI-DT-10 en Isla de la Cartuja Sevilla