

# Edificio Comercial y Residencial EUROACITY en Gibraltar

## *Commercial and Residential Building EUROACITY in Gibraltar*

Mónica Sanz Cid <sup>a</sup>, José Antonio Martín-Caro Álamo <sup>b</sup>, David Rodríguez Tocón <sup>c</sup>,  
Francisco Ibañez Pérez <sup>d</sup>

<sup>a</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director de proyectos. Ines Ingenieros Consultores

<sup>b</sup>Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Director Gerente. Ines Ingenieros Consultores

<sup>c</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniero. Ines Ingenieros Consultores

<sup>d</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Area Manager. Sacyr Engineering and Infrastructures

### RESUMEN

El edificio de carácter comercial y residencial EUROACITY se sitúa en el corazón del distrito de negocios de Gibraltar, destacando con sus tres torres, de uso residencial, de 19, 21 y 22 plantas con alturas de 57, 65.5 y 68.5 m respectivamente, unidas por un zócalo, de uso comercial y aparcamiento. Debido a su ubicación, cercana a la falla de Azores-Gibraltar, el diseño sísmico del edificio cobra una especial importancia. Se ha definido un sistema resistente frente acciones sísmicas formado por núcleos de hormigón (uno por torre) y losas de hormigón de espesor constante, quedando los pilares como un sistema secundario que resiste las acciones verticales y de viento y asume las deformaciones del sismo.

### ABSTRACT

The commercial and residential building EUROACITY is located in the heart of the business district of Gibraltar, standing out with its three towers, for residential use, of 19, 21 and 22 floors with heights of 57, 65.5 and 68.5 m respectively, joined by a plinth, for commercial and parking use. Due to its location, close to the Azores-Gibraltar fault, the building's seismic design takes on special importance. A structural system formed by concrete cores (one per tower) and concrete slabs of constant thickness has been defined in order to carry the seismic action, leaving the columns as a secondary system that carries vertical and wind actions and assumes earthquake deformations.

**PALABRAS CLAVE:** proyecto, edificación, torre, zócalo, zona sísmica, pilotes, hormigón, Eurocódigo

**KEYWORDS:** project, building, tower, plinth, seismic zone, piles, concrete, Eurocode

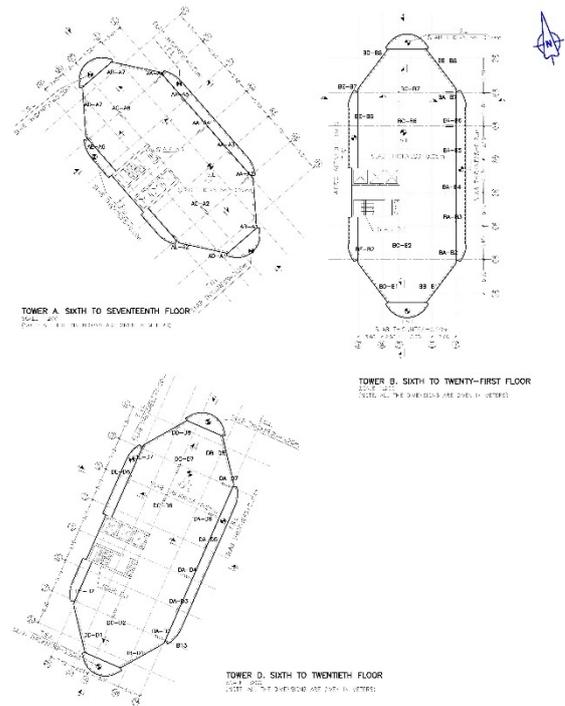
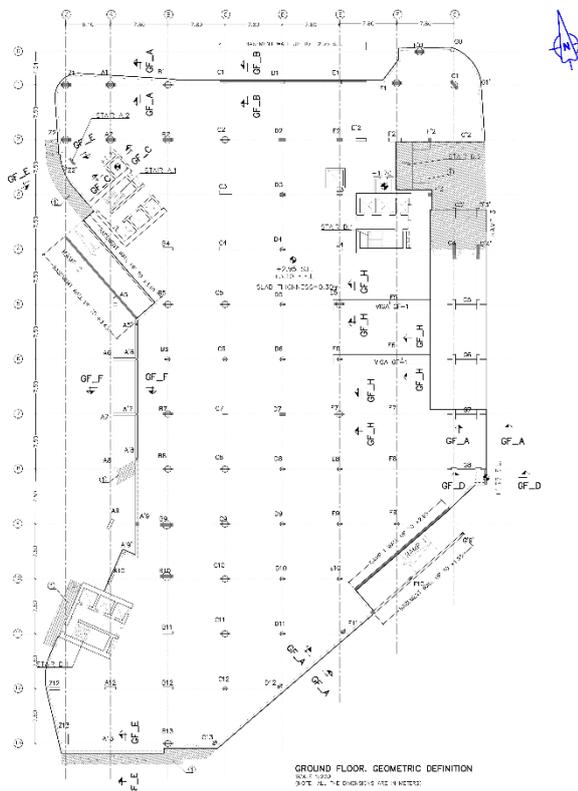
## 1. Descripción del edificio

El edificio Eurocity Gibraltar es una edificación de carácter comercial y residencial situada en el corazón del distrito de negocios de Gibraltar, que destaca en su entorno por sus torres, de uso residencial, de 19, 21 y 22 plantas con alturas de 57, 65.5 y 68.5 m respectivamente, unidas por un zócalo de 4 plantas sobre rasante, y un semisótano para uso comercial y aparcamiento,

definiéndose en la cuarta planta un piscina y zonas ajardinadas.

El zócalo presenta una forma trapezoidal de 50 x 90 m de dimensiones máximas, y se define mediante losas macizas de hormigón armado con una cuadrícula de pilares con unas luces típicas de 7.50 x 7.80 m. Se ha evitado el uso de juntas de dilatación con el objeto de mejorar la

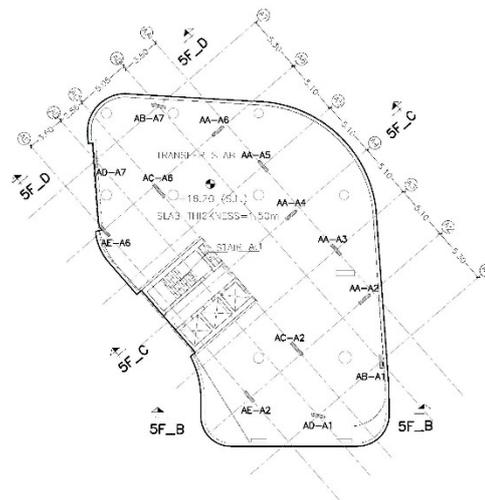
vida útil de la estructura, además de mejorar el comportamiento de conjunto frente acciones horizontales.



Las tres torres tienen geometrías similares, con formas ovoides en planta, cuyas dimensiones máximas son 38 x 18 m para la torre A, y 43 x 18 m para las torres B y D. En todos los casos los forjados se resuelven mediante losa macizas de hormigón armado con una cuadrícula de pilares con unas luces típicas de 7.50 x 5.00 m. Todas las torres se coronan con una última planta definida como un entramado metálico de altura variable.

La estructura vertical del edificio está formada por una serie de pilares de hormigón armado, de secciones circulares y rectangulares de diferentes escuadrías, y de una serie de núcleos, uno por torre, también de hormigón armado. Estos núcleos se sitúan en los núcleos de comunicación (escaleras y ascensores), y tienen una doble función, por un lado, forman parte del sistema resistente del edificio, y por otro sirven de cerramiento a estos elementos de comunicación vertical.

La posición de los pilares en planta no es la misma en el zócalo que en las torres, por lo que se han definido tres losas de transferencia de gran canto, una por núcleo, donde se produce la transición de los pilares de apoyo de los forjados del zócalo a los pilares de apoyo de los forjados de las torres. Los núcleos de hormigón armado si mantienen su posición en toda su altura.



A nivel geotécnico, el edificio se sitúa en las tierras ganadas al mar, por lo que presenta un nivel de rellenos antrópicos de hasta 15 m de espesor en algunas partes de la parcela, por lo

que la cimentación se ha definido mediante pilotes de entre 850 y 1800 mm de diámetro, con profundidades de hasta 25 m.

En la mayoría de los pilares se ha diseñado un único pilote, por lo que se ha definido una losa arriostrante que ata todos los pilotes. En los casos en que ha sido necesario disponer más de un pilote, y en el caso de los núcleos se han diseñado una serie de encepados de diferentes dimensiones en planta y cantos.

## 2. Intervinientes en el proyecto y obra el edificio

El proyecto de estructuras ha sido desarrollado por la empresa Ines Ingenieros Consultores, y la empresa constructora encargada de realizar las obras, además de coordinar los proyectos de estructuras, instalaciones y arquitectura, es Sacyr Engineering and Infraestructures.

La propiedad del proyecto es de Eurocity Development.



Figura 4. Infografía 3D de la edificación. (Fuente: Eurocity Development)

## 3. Bases de cálculo del diseño estructural del edificio

La ubicación del edificio presenta la idiosincrasia de pertenecer a la península ibérica desde el punto de vista geográfico, y al Reino Unido

desde el punto de vista administrativo, lo que implica que a nivel normativo se deben satisfacer los requerimientos establecidos en las British Standard o en los Eurocódigo. Sin embargo, estas normativas, en numerosas ocasiones no recogen las particularidades de la situación geográfica de Gibraltar.

### 3.1. Enfoque general

Con carácter general, previamente al desarrollo de cualquier proyecto de estructuras se establecen las normativas que son de obligado cumplimiento. En este caso, al tratarse de un edificio situado dentro del Territorio Británico de Ultramar del Reino Unido se establece que las normativas de aplicación son los Eurocódigos.

En líneas generales, la aplicación de los EC-0, EC-2 y EC-3 no tiene implicaciones con la situación geográfica del proyecto.

Sin embargo, en el EC-1 (especialmente para la acción del viento) y en el EC-8 la situación geográfica de la estructura cobra especial importancia.

En el caso del EC-1-4 (acción del viento), en el anejo nacional del Reino Unido no se incluye el mapa de velocidades del viento para Gibraltar, por lo que fue necesario recurrir a la normativa española para establecer la velocidad básica del viento. El caso de la determinación de las acciones sísmicas requiere un análisis más detallado que se desarrollará en el siguiente epígrafe.

### 3.2. Acciones sísmicas

Como ya hemos comentado, en este caso, la normativa a emplear para el diseño de estructuras sismorresistentes debe ser el EC-8 (BS EN 1998), completado con su anejo nacional correspondiente.

El EC-8 define los requisitos básicos del comportamiento y los criterios de comprobación aplicables a las estructuras situadas en regiones sísmicas, proporciona las reglas para la representación de las acciones

sísmicas y para su combinación con otras acciones, define las reglas generales para edificios y las reglas específicas sobre los diferentes materiales y elementos estructurales de los edificios.

En relación con la representación de las acciones sísmicas, de acuerdo con el EC-8 la acción sísmica se define a partir del valor de referencia de aceleración máxima ( $a_{gR}$ ) del suelo para un terreno tipo A.

Esta aceleración máxima de referencia del suelo se define para cada región sísmica por las administraciones nacionales correspondientes y se corresponde con el periodo de retorno de referencia  $T_{NCR}$  (475 años) de la acción sísmica. A este parámetro de referencia se le asigna un coeficiente de importancia igual a 1.

Para periodos de retorno diferentes al de referencia, en función de la clase de importancia de la estructura, se le asigna un coeficiente de importancia diferente de la unidad, siendo por tanto el valor de cálculo de la aceleración del suelo en un terreno tipo A igual a  $a_{gR}$  veces el coeficiente de importancia ( $a_g = \gamma_I a_{gR}$ ).

A partir de esta aceleración de cálculo, y los parámetros del terreno, que se definen en el informe geotécnico, el EC-8 define un espectro de respuesta elástico.

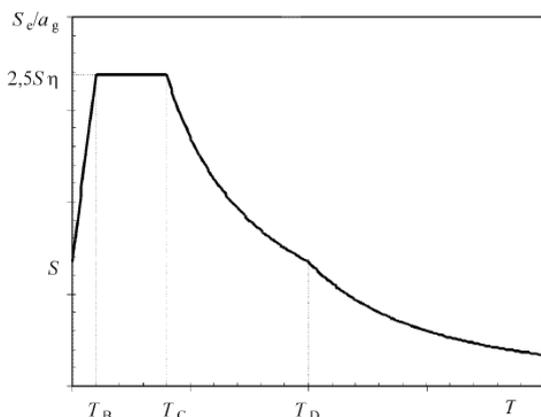


Figura 5. Espectro de respuesta elástica de acuerdo con el EC-8

Por lo tanto, el factor principal para definir el espectro de respuesta de la acción sísmica es la aceleración máxima de referencia ( $a_{gR}$ ), que debe venir dada en los anejos nacionales del EC-8.

El anejo nacional británico del EC-8 hace referencia a la norma PD6698, donde se define la aceleración de referencia exclusivamente para la isla de Gran Bretaña e Irlanda del Norte, quedando fuera de esta normativa los terrenos de ultramar como es el caso de Gibraltar.

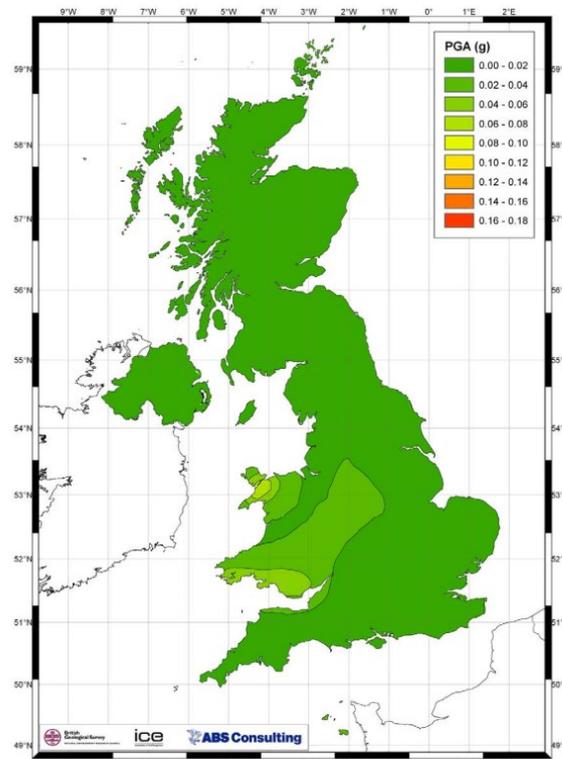


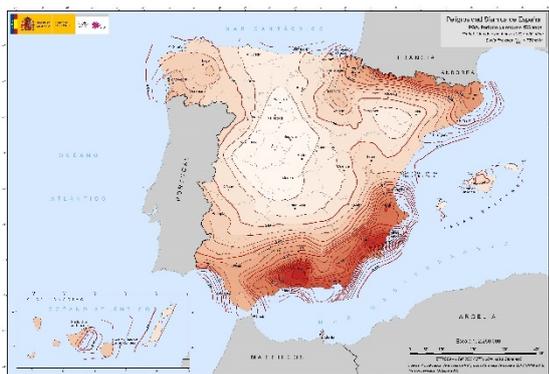
Figure 15 - PGA hazard map for 475 year return period.

Figura 6. Mapa de aceleración de referencia para un periodo de retorno de 475 años de acuerdo con la norma PD6698 [6]

Por lo tanto, la normativa vigente británica no define el parámetro principal e imprescindible para definir el espectro de respuesta del sismo.

Ante esta indefinición se recurre al anejo español del EC-8, y a la normativa española vigente para diseño sísmico de edificios NCSE-02.

En el momento de redacción del proyecto, el anejo nacional español al EC-8 está en fase de aprobación, por lo que tan solo se dispone de una “Propuesta de Anejo Nacional del Eurocódigo 8” que no aún no ha sido aprobado. Además de estas normativas, el Instituto Geográfico Nacional ha publicado en el año 2015, tras el terremoto registrado en Lorca en el año 2011, una actualización de la aceleración de referencia para la península ibérica.



**Figura 7. Mapa de aceleración de referencia para un periodo de retorno de 475 para la Península Ibérica publicado por IGN en 2015**

Analizando las normativas vigentes, y el mapa de peligrosidad sísmica del IGN, se observa que cada uno de los documentos define diferentes valores para la aceleración de referencia.

En la siguiente la siguiente tabla se incluyen las aceleraciones máximas de referencia para cada uno de estos documentos.

**Tabla 1. Aceleraciones máximas de referencia**

Normativa Documento	Aceleración max. referencia
NCSE-02	0.06 g
Propuesta Anejo Nacional EC-8	0.09 g
Mapa peligrosidad sísmica IGN	0.09 g

Tal y como puede observarse la propuesta del anejo nacional español del EC-8 se corresponde con el mapa del IGN, o lo que es lo mismo, se corresponden con valores actualizados tras el terremoto de Lorca de 2011.

Por otro lado, la norma NCSE-02 mantiene las aceleraciones máximas de referencia definidas en la normativa antes de este terremoto.

La normativa vigente en España es la NCSE-02, por lo tanto, esta es la normativa a aplicar en la redacción de proyectos, al menos hasta que el anejo nacional del EC-8 sea vigente, aunque teniendo en cuenta lo acontecido en Lorca en 2011 esta norma parece haber quedado obsoleta. En el caso del edificio Eurocity Gibraltar, tras diferentes estudios de las repercusiones, tanto a nivel de definición geométrica de los diferentes

elementos estructurales, como a nivel económico, de diseñar la estructura para la aceleración de referencia definida en la propuesta del anejo nacional del EC-8, la propiedad decidió diseñar la estructura del edificio para la normativa vigente en España (NCSE-02), es decir para una aceleración máxima de referencia de 0.06g.

De esta experiencia podemos concluir, que la entrada en vigor el nuevo mapa de peligrosidad sísmica supondrá un incremento del coste de edificaciones situadas en zona sísmica.

## 4. Concepción estructural frente acciones horizontales

Desde el punto de vista del comportamiento estructural, cobra especial importancia la concepción estructural frente acciones horizontales (acción viento y acción sísmica).

Debido al diferente origen de cada una de estas acciones, la concepción estructural para cada una de ellas es diferente.

De forma general las acciones horizontales son resistidas por los elementos verticales de la estructura, en nuestro caso pilares y núcleos de hormigón armado, que se encuentran arriostrados entre si mediante la estructura horizontal del edificio (losas).

### 4.1. Acción del viento

En el caso de la acción del viento, se considera que todos los elementos verticales (pilares y núcleos) forman parte del sistema resistente, repartiéndose la carga en función de sus rigideces.

### 4.2. Acción sísmica

En el caso de la acción sísmica, la concepción estructural se basa en que sean los núcleos de hormigón armado los encargados de resistir el 100% de los esfuerzos derivados de la acción sísmica, ya que la rigidez de estos elementos es

muy superior a la de los pilares, formando estos últimos un sistema resistente secundario capaz de soportar las cargas verticales al mismo tiempo que resisten los desplazamientos relativos entre plantas (drift) a los que está sometido el edificio durante la acción sísmica.

En el diseño de la estructura se controla que estos desplazamientos relativos (drift) sean inferiores a la altura entre plantas entre 200, con el objeto de evitar daños en los elementos no estructurales del edificio.

## 5. Cimentación

El edificio Eurocity Gibraltar se encuentra situado en las tierras ganadas al mar durante el siglo XX. Por este motivo, la parcela presenta un nivel de rellenos antrópicos de hasta 15 m de espesor en algunas partes de la parcela, las características geotécnicas de este nivel hacen imposible la cimentación superficial del edificio, por lo que es necesario recurrir a cimentaciones profundas (micropilotes o pilotes), que se apoyen en los estratos competentes inferiores (substrato terciario).

Por otro lado, la situación costera del edificio hace que exista un nivel freático a escasos 2 m de profundidad desde la cota de calle.

Este es el motivo principal por el que el edificio no cuenta con sótanos, tan solo se ha definido un semisótano, de forma que su cota de solera queda por encima del nivel freático.

Cabe destacar que esta práctica es habitual en Gibraltar, y que en todas las edificaciones se evita la definición de sótanos.

Durante el proyecto se estudiaron dos soluciones, una con micropilotes y otra con pilotes.

En primer lugar, se optó por una solución con micropilotes, esta elección vino marcada principalmente por el uso habitual de esta solución en la zona.

Debido a la geometría del edificio (torres de gran altura, grandes cargas en el zócalo, geometrías no simétricas, etc.), las acciones horizontales,

principalmente debidas al sismo, tenían cierta importancia, por lo que la solución con micropilotes implicaba un gran número de estos (ver figura 9), lo que conllevaba unos plazos de ejecución inasumibles por la propiedad.



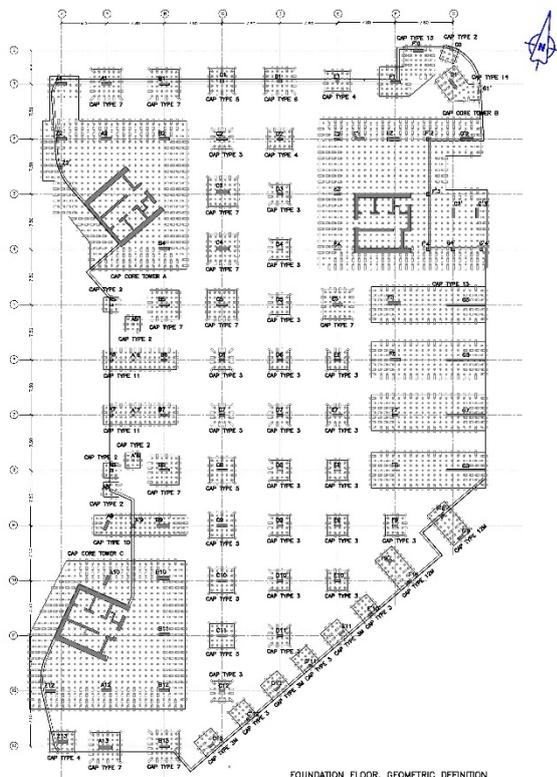
Figura 8. Tierras ganadas al mar en la Bahía de Algeciras hasta 2010. (Fuente: “Tierras ganadas al mar”. Wikipedia)

Por este motivo, Sacyr plantea estudiar una solución con pilotes ejecutados in situ que, si bien no es una solución habitual en Gibraltar, no existe ningún motivo que impida su utilización. La solución con pilotes permite un ahorro económico, y lo que es más importante reduce el plazo de ejecución de la cimentación en comparación con la solución con micropilotes.

### 5.1. Solución con micropilotes

En esta solución se tantearon micropilotes de 250 mm de diámetro, con tubos estructurales de Ø114x7 y Ø139.7x9 mm de acero de límite elástico garantizado de 560 N/mm<sup>2</sup>.

En la figura 9 se muestra un plano de la planta de cimentación con la solución de micropilotes. En las zonas de los núcleos de hormigón se produce una gran concentración de micropilotes, con encepados de grandes dimensiones.



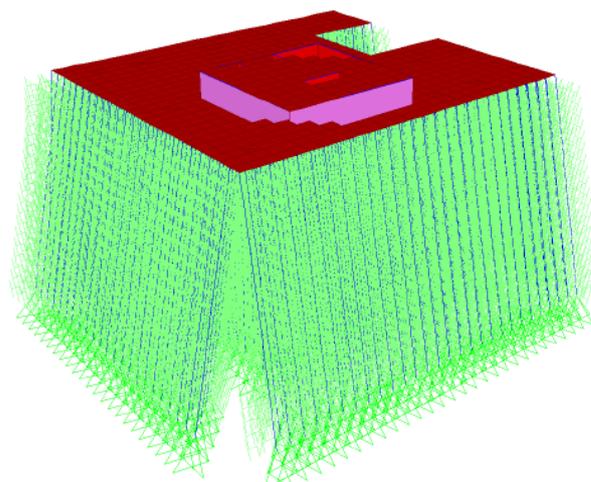
**Figura 9. Cimentación mediante micropilotes.**  
Planta de cimentación.

Los micropilotes se diseñaron de acuerdo con los condicionantes geotécnicos para una carga máxima de 1100 kN (compresión), y se admitía una carga mínima de 660 kN (tracción), considerando siempre un empotramiento de al menos 7 m en el estrato competente, por lo que las longitudes de los micropilotes variaban entre 13 y 18.5 m.

El diseño tanto de los micropilotes, como de sus encepados se realizó de acuerdo con los criterios de capacidad establecidos en el EC-8, mediante la realización de modelos tridimensionales con un programa de elementos finitos. En la siguiente figura se incluye el modelo de cálculo correspondiente al encepado de uno de los núcleos de hormigón.

Los micropilotes son elementos de cimentación que trabajan fundamentalmente a axil, por lo que

trabajan bien para acciones verticales y momentos (que se transforman en pares de fuerzas verticales a través del encepado), pero son poco eficaces para resistir las acciones horizontales, en este caso debidas a las acciones del viento y del sismo. Por lo que se definieron familias de micropilotes inclinados entre 5° y 10° que recogían las acciones horizontales en forma de axiles.



**Figura 10. Modelo de cálculo de encepado de micropilotes de núcleo de hormigón.**

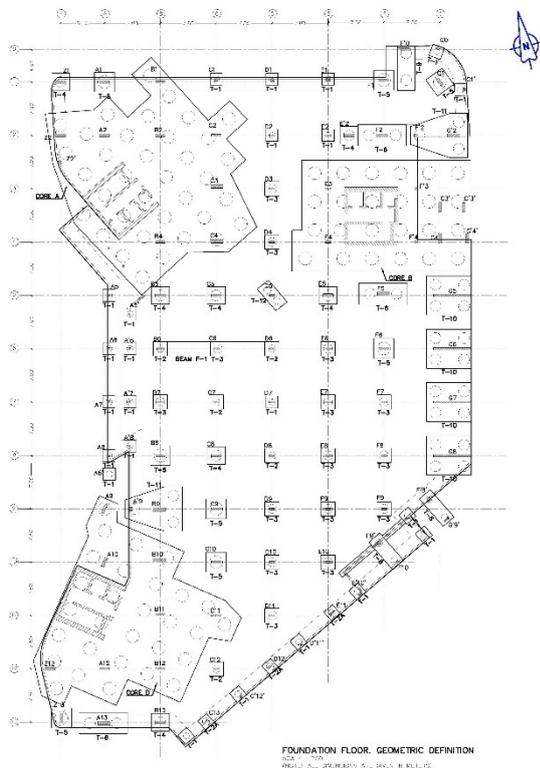
Por otro lado, y de acuerdo con la “Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera” se definió un módulo de balasto horizontal, a lo largo de los micropilotes que representaba la rigidez lateral del terreno. La inclusión de una rigidez moderada del terreno produce flexiones asumibles en los micropilotes y relaja la solución con axiles puros de un sistema muy hiperestático en el que fuerzas verticales, horizontales y momentos tienen un fuerte acoplamiento.

### 5.2. Solución con pilotes

Para esta segunda alternativa se han definido pilotes tipo CPI- 6 de diámetros entre 0.85 y 1.80 m, ejecutados con un hormigón C30/37 y armados con acero de armar Clase C500.

El empleo de pilotes tipo CPI-6 con lodos bentoníticos se debe a la existencia del nivel freático. Teniendo en cuenta la excavación necesaria para el vaciado del semisótano, y para

la ejecución de los encepados, se tiene que el pilote se ejecuta por debajo del nivel freático. En la figura 11 se muestra un plano de la planta de cimentación con la solución de pilotes.



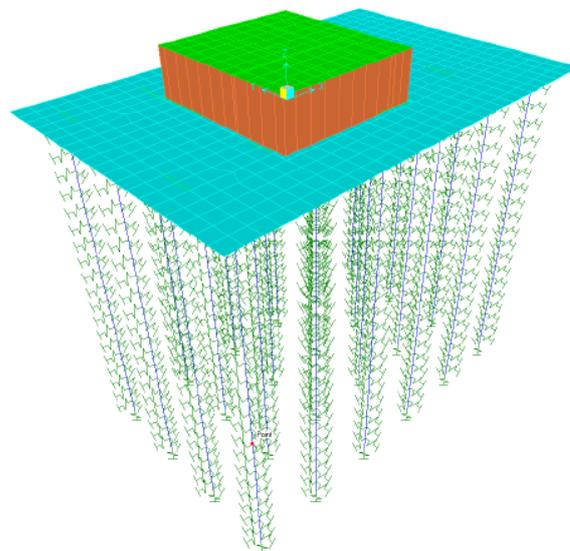
**Figura 11. Cimentación mediante pilotes. Planta de cimentación.**

Tal y como puede observarse, en las zonas de los núcleos de hormigón, al igual que en la solución anterior, se produce una gran concentración de pilotes, con encepados de grandes dimensiones, que unifican la cimentación de los núcleos con la de los pilares más cercanos.

Los pilotes se diseñaron de acuerdo con los condicionantes geotécnicos para un tope estructural de 5000 kN/m<sup>2</sup>, lo que suponía una longitud de empotramiento mínimo, en el estrato competente, de aproximadamente 11 m, obteniéndose longitudes de pilotes de entre 15 y 22.5 m.

Análogamente a la solución anterior, el diseño tanto de los pilotes, como de sus encepados se realizó de acuerdo con los criterios de capacidad establecidos en el EC-8, mediante la realización de modelos tridimensionales con un programa de elementos finitos. En la siguiente figura se

incluye el modelo de cálculo correspondiente al encepado de uno de los núcleos de hormigón.



**Figura 12. Modelo de cálculo de encepado de pilotes de núcleo de hormigón.**

Para el dimensionamiento de los pilotes de los grandes encepados se los consideró articulados en su encuentro con el encepado, en el caso de las cimentaciones con único pilote, estos se dimensionaron con continuidad con los pilares. Las cimentaciones profundas con pilotes, como se ha indicado anteriormente, no son habituales en Gibraltar, por lo que, durante la ejecución de las obras se decidió realizar, además de los ensayos de integridad habituales para este tipo de elementos estructurales, el ensayo con Célula de Osterberg (Ensayo O-Cell®), con el objeto de confirmar la capacidad a axil considerada en el proyecto.

El ensayo O-Cell® permite determinar la capacidad axil de pilotes, su principal ventaja es que no requiere la aplicación de una carga en superficie y permite obtener las capacidades por fuste y punta de forma directa e independiente. En la figura 13 se muestra un esquema del ensayo O-Cell®.

Para la realización del ensayo se dispone una celda de carga en la punta del pilote, y se aplica una carga ascendente y otra descendente de forma simultánea. La aplicación de las cargas se realiza hasta que se alcanza la falla por fricción o en la punta de pilote.

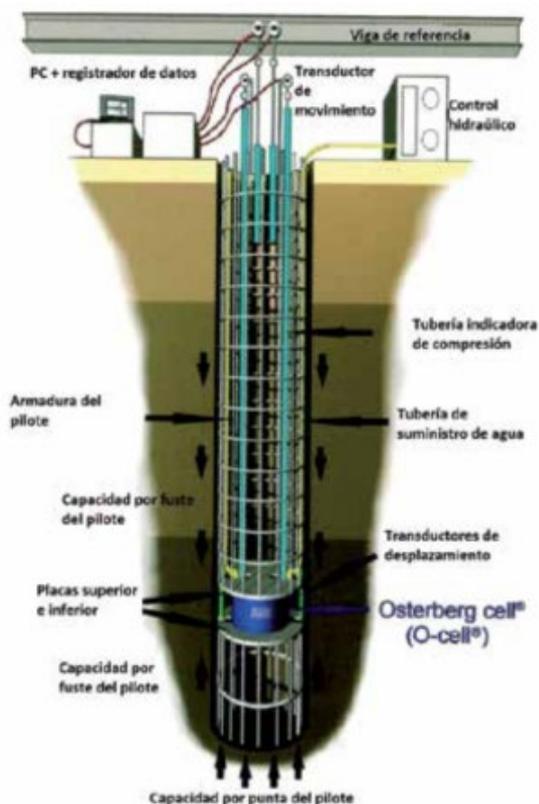


Figura 13. Esquema de funcionamiento e instrumentos del ensayo con Célula de Osterber (O-Cell). (Fuente: Fugro Loadtest 2016)

El resultado de la prueba son curvas de carga versus desplazamiento para la carga ascendente y para la descendente. La información obtenida con el ensayo O-Cell® se interpreta de forma similar a la información obtenida por medio de un ensayo de carga tradicional con la carga aplicada en la cabeza del pilote.



Figura 14. Preparación del ensayo O-Cell® en obra

Previamente a la ejecución de la cimentación se ejecutaron dos pilotes de sacrificio, uno de 850 mm de diámetro y otro de 1000 mm de diámetro, con los que se realizaron sendos ensayos de O-Cell®.

Los resultados obtenidos confirmaron en ambos casos las hipótesis de cálculo del proyecto, por

lo que procedió con la ejecución de la cimentación de edificio.



Figura 15. Ejecución de uno de los pilotes en obra

## 6. Estructura horizontal

La estructura horizontal del edificio se define, en todos los casos, mediante losas de hormigón armado de diferentes cantos en función de la distancia entre pilares y de las cargas a las que esté sometida.

## 7. Singularidades

A priori cabe pensar que la estructura del edificio Eurocity es convencional, y que su única peculiaridad es que se encuentra situada en zona de riesgo sísmico, sin embargo, este edificio presenta otras singularidades.

### 7.1. Edificio sin juntas

El zócalo del edificio presenta unas dimensiones en planta de aproximadamente 50x90 m. Si bien

la dimensión de 50 m no presenta inconveniente alguno, no se puede decir lo mismo de la longitud de 90 m, aunque en la actualidad esta dimensión empieza a ser bastante habitual en edificios sin juntas.

La elección de no hacer juntas se plantea con el objeto de evitar los problemas de mantenimiento y durabilidad generados por las juntas de dilatación, por un lado, y de definir una estructura resistente única frente a la acción sísmica.

La eliminación de juntas en estructuras largas afecta principalmente a la primera planta sobre el nivel de cimentación, por lo que se realizó un estudio detallado del comportamiento del edificio en estado límite último y de servicio de la planta primera, tras el cual fue necesario aumentar la cuantía base de las losas unos 5 kg/m<sup>2</sup> con respecto al resto de plantas.

## 7.2. Losa de transferencia zócalo-torres

Debido a diferentes requerimientos de la arquitectura, la cuadrícula de los pilares del zócalo no coincide con la de las torres, por lo que ha sido necesario definir unas losas de transferencia entre unos pilares y otros.

Estas losas de transferencia se han definido mediante losas de hormigón armado de 1.40 m de canto.

El empleo de este tipo de elementos es bastante usual en aquellas edificaciones en que las primeras plantas tienen un uso muy diferente del de las plantas superiores. En zonas sin riesgo sísmico estas soluciones no presentan mayor inconveniente que un estudio detallado de la transmisión de cargas.

En este caso, al estar en zona de riesgo sísmico, además de las comprobaciones anteriores, se ha realizado un modelo 3D donde se recoge esta singularidad, y se ha analizado el comportamiento global del edificio tanto para las acciones transitorias y persistentes, como para las accidentales (sismo).

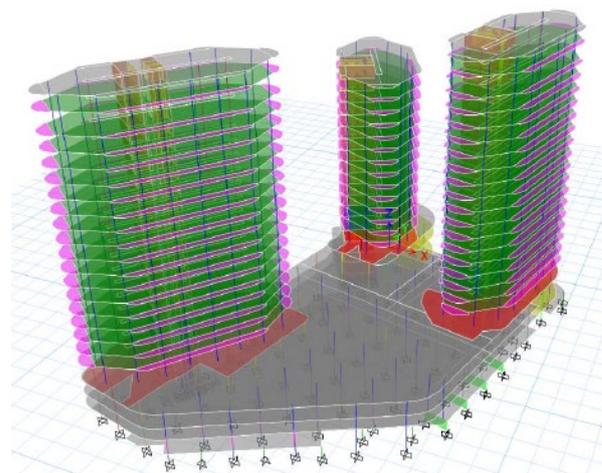


Figura 16. Modelo de cálculo 3D con el programa ETABS

## Agradecimientos

Jaime Rodríguez Cabello. SACYR Engineering and Infrastructures

Francisco Javier Rodríguez Ortiz. SACYR Construcciones S.A.

## Referencias

- [1] Eurocódigo 0 (BS EN 1990). Definición de las bases de cálculo de estructuras.
- [2] Eurocódigo 1 (BS EN 1991). Definición de las diferentes acciones en estructuras.
- [3] Eurocódigo 2 (BS EN 1992). Diseño de estructuras de hormigón.
- [4] Eurocódigo 3 (BS EN 1993). Diseño de estructuras metálicas.
- [5] Eurocódigo 8 (BS EN 1998). Diseño de estructuras sismorresistentes.
- [6] PD 6698:2009. Recommendations for the design of structures for earthquake resistance to BS EN 1998.
- [7] Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02). Ministerio de Fomento. 2009.
- [8] Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carreteras. Ministerio de Fomento. 2005.