

# LA ESTRUCTURA DEL HOTEL VELA DE BARCELONA

**Luis MATUTE RUBIO**

Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Director General

luis.matute@ideam.es

**Miguel ORTEGA CORNEJO**

Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Jefe de Proyectos

miguel.ortega@ideam.es

**Francisco MILLANES MATO**

Dr. Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Presidente

general@ideam.es

## Resumen

El Hotel Vela es un edificio singular situado en la bocana del puerto de Barcelona, proyectado por el Taller de Arquitectura de Ricardo Bofill, del cual IDEAM ha realizado el proyecto constructivo de la estructura y la asistencia técnica a la Dirección de Obra de la misma.

El Hotel se compone de tres edificios de los cuales la Torre con forma de vela, de 26 plantas y 100 m de altura es el edificio más singular en cuanto a sus dimensiones, geometría y estructura.

El artículo describe las singularidades de la estructura del edificio, incidiendo en la problemática de la cimentación mediante el empleo de pilotes prefabricados hincados de hormigón, y los procedimientos de cálculo empleados para la obtención de los coeficientes de arrastre de las acciones de viento.

**Palabras Clave:** Edificación singular, Torre, pilotes hincados, pantallas de hormigón, túnel de viento.

## 1. Descripción de los edificios del Hotel Vela

El Hotel Vela se localiza frente al mar en la bocana del puerto de Barcelona (Fig. 1a), y se compone de tres edificios de 47000 m<sup>2</sup> de superficie total, la Torre, el Atrio, y el Podium separados por juntas de dilatación. El Podium es un edificio bajo con sólo dos niveles sobre cimentación, donde se ubican las zonas comunes con los salones, bares, restaurantes, las cocinas, el gimnasio, el spa, y las salas para congresos, sobre el que se elevan los edificios principales del Hotel, el Atrio y la Torre. La estructura del Podium está compuesta por una distribución de luces en cuadrícula de 9x9 m con pilares de hormigón y forjados con losas macizas de hormigón armado de 0.35 m de espesor. En el Podium hay una gran sala (Ballroom) para congresos y conferencias con una cubierta con una luz principal de 27 m. La cubierta está formada por una serie de vigas metálicas en celosía (Figs. 1a y 1b).

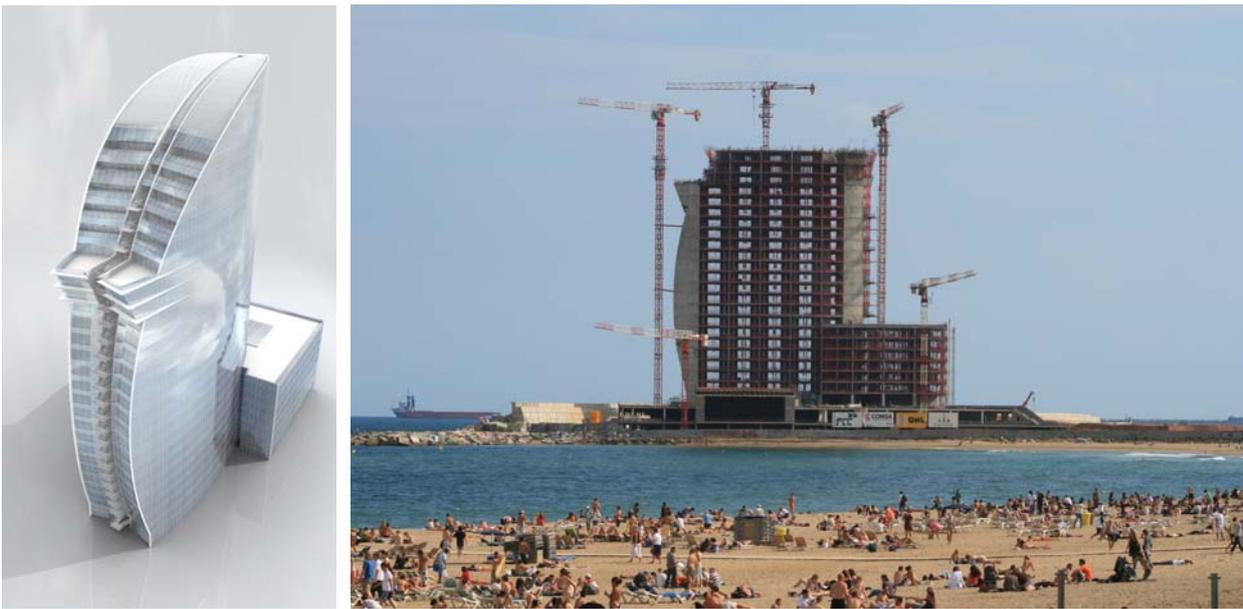


*Figs. 1a, y 1b: Vista del Podium y primeras plantas de Torre y Atrio y vista del interior del Ballroom durante la ejecución*

La Torre es un edificio con forma de Vela, de ahí el nombre del Hotel, tiene 26 plantas, más un altillo y la cubierta superior, y una altura máxima de 100 m sobre la cota de rasante. El Atrio es un edificio de 7 plantas con forma de paralelepípedo adosado a la parte trasera de la Torre, situado en la parte del muelle por donde se accederá al hotel (Figs. 2a, y 2b).

Los edificios del Atrio y la Torre se destinan, desde la P-1 hacia arriba, a alojar las habitaciones del hotel, el cual pretende ser el más lujoso de Barcelona una vez concluido. Las habitaciones tendrán como mínimo una superficie de 45 m<sup>2</sup> cada una.

Las plantas del edificio principal, la Torre, tienen forma de ojo, con sus dos extremos truncados por cortes oblicuos (Fig. 9). En altura, las plantas aumentan ligeramente de longitud desde la P-1 hasta la P-10, mientras que desde la P-10 hasta la cubierta se van reduciendo logrando la forma de Vela (Figs. 2a, y 2b). Al nivel de las plantas 18, 19, y 20 sale un voladizo a modo de mirador frente al mar rompiendo la forma curva de la Vela.



Figs. 2a, y 2b: Fotomontaje y vista durante la ejecución del Hotel Vela

En la dirección longitudinal la dimensión mayor de la planta 10 de la Torre es aproximadamente de 57,90 m, mientras que en la dimensión menor el ancho de 23,15 m es siempre constante. En la figura 3 se aprecia una planta tipo de la Torre, y en la figura 5 se detalla una planta tipo con los edificios de la Torre y el Atrio.

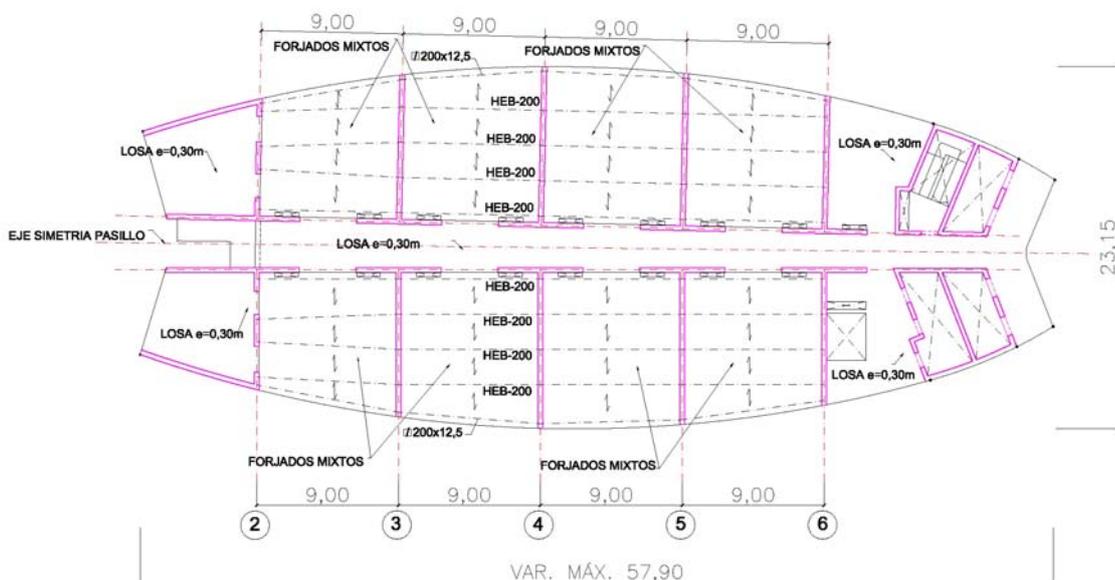


Fig. 3: Planta tipo de la Torre del Hotel Vela

La estructura vertical resistente frente a cargas gravitatorias de la Torre y las acciones horizontales del viento, la componen una serie de pantallas de hormigón armado de 30 cm de espesor en HA-40 dispuestas cada 9 m en la dirección perpendicular al pasillo central, junto con las pantallas del pasillo central dispuestas en la dirección longitudinal del edificio, las dos pantallas frontales centrales que siguen la forma curva de la Vela y los núcleos de ascensores y escaleras situadas en el extremo trasero de la Torre junto al Atrio (Figs. 4a, 4b, y 4c).

Entre cada dos pantallas transversales separadas 9 m se disponen dos habitaciones, con un total de 16 habitaciones por planta más otras dos destinadas a servicios del hotel.



Figs. 4a, 4b y 4c: Esquema de elementos verticales y vistas de la estructura de la Torre y el Atrio durante la ejecución

Los forjados de la Torre son losas macizas de hormigón armado de 30 cm de espesor en los módulos extremos, así como en el pasillo central que arriostra las pantallas del pasillo. En la zona central de la Torre, a cada lado del pasillo, los forjados de los 4 vanos con luces de 9 m se proyectaron inicialmente mediante forjados mixtos, con perfiles HEB-200 dispuestos en la dirección longitudinal del edificio y conectados al forjado superior constituido por una chapa nervada colaborante junto con el hormigón superior (Fig. 3). Finalmente, durante la fase de ejecución del edificio, el contratista planteó el cambio a forjados con prelasas prefabricadas y losa superior "in situ".

El Atrio se trata de un edificio más convencional por su altura, geometría y tipología. Se compone de forjados con losas de hormigón armado de 30 cm de espesor, y pilares creando una cuadrícula principal de 9x7,5 m. (Figs. 4b, 4c y 5)

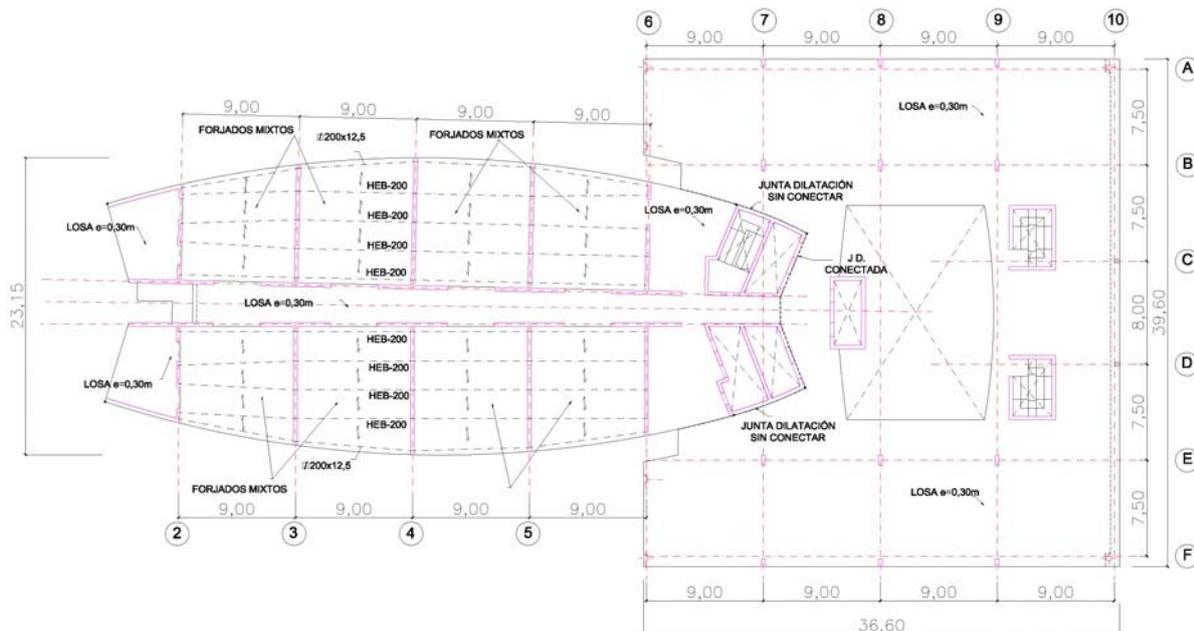


Fig. 5: Planta tipo entre P-1 y P-7 con los edificios Torre y Atrio del Hotel Vela

## 2. Cimentación de los edificios

### 2.1 Condiciones geotécnicas del terreno

En la zona superficial donde se localiza el Hotel existen unos 8 m de rellenos bastante heterogéneos compuestos por bolos, gravas, ladrillos, hormigón, bloques de granito, etc..., que materializan la plataforma de terreno ganada al mar por el dique de la bocana del puerto de Barcelona (Fig. 6).



Fig. 6: Vista de la zona del terreno en la bocana del puerto de Barcelona ganada al mar previo a la ejecución del Hotel Vela.

Debajo del relleno heterogéneo existe una capa de arenas medias de color marrón y cuya base alcanza una profundidad entre 17 y 23 m bajo la capa de rellenos heterogéneos.

Bajo las arenas se detecta una capa arcillosa de consistencia en ocasiones muy blanda y con intercalación de capas de arenas. La cota inferior de este sustrato se sitúa hacia la -38 respecto de la cota superficial de terreno natural.

Bajo las arcillas, a unos 40 m de profundidad aparece una capa de arena limosa y de limos arenosos competentes.

### 2.2 Cimentación

En una primera aproximación a la cimentación el informe geotécnico inicial planteaba los tres edificios pilotados, con pilotes largos cimentando en la capa de arenas competente a casi 40 m de profundidad.

La cimentación del Podium, edificio con sólo dos plantas separado de la Torre y el Atrio por juntas de dilatación, se planteó con una cimentación diferente al ser las cargas transmitidas al terreno mucho menores. Para poder realizar una cimentación mediante una losa maciza fue necesario realizar una serie de tareas de mejora del terreno para evitar asentamientos diferenciales importantes entre los tres edificios.

El posible inconveniente de la cimentación mediante una losa en el Podium es que al tener que apoyar la misma sobre un terreno con una deformabilidad alta, debido al relleno heterogéneo de los 8 m superiores existente, se podrían producir unos asentamientos que dañaran a la estructura.

Existen diversos tipos de tratamiento que permiten aumentar la resistencia del terreno y disminuir la deformabilidad. Para este caso particular, se propuso realizar una compactación dinámica superficial para evitar problemas de asentamientos diferenciales entre unas zonas y otras del estrato superficial heterogéneo, así como la aplicación de una precarga de 2 m de altura de tierras durante unos 3 meses para compactar las arcillas compresibles situadas en un nivel intermedio, y así evitar asentamientos diferidos importantes.

Tras estos dos tratamientos del terreno, se propuso cimentar el Podium de unos 6000 m<sup>2</sup> de superficie en planta mediante una losa de cimentación de hormigón, con espesores entre 45 y 60 cm según las zonas con mayor o menor niveles de carga. Estos tratamientos del terreno y la losa de cimentación supusieron un ahorro en el Podium de casi 150 pilotes prefabricados hincados, o lo que es lo mismo unos 6000 metros lineales de pilote.

Los niveles de reacciones verticales transmitidos al terreno en los edificios de la Torre, con 26 plantas y el Atrio con 7, desaconsejaban cualquier cimentación que no fuera profunda, para evitar asentamientos diferenciales sensibles entre edificios. De esta manera se estudiaron varias alternativas pilotadas todas ellas de hasta 40 m de profundidad.

En la fase de anteproyecto se realizó un estudio comparativo económico completo de las cimentaciones pilotadas de los edificios de la Torre y el Atrio en las alternativas de pilotes prefabricados hincados de hormigón de 40x40 cm de sección, pilotes prefabricados metálicos hincados mediante perfiles especiales de alta capacidad de carga tipo Histar, así como cimentaciones mediante pilotes convencionales perforados ejecutados "in situ" con diámetros de 2,00 m.

La cimentación elegida tras el análisis de las tres anteriores, finalmente proyectada y ejecutada, fue la de hinca de pilotes prefabricados de hormigón pretensado de aproximadamente 45 m de longitud y sección de 40x40 cm. La Torre se cimentó mediante 398 pilotes bajo las pantallas principales, más 36 pilotes en los pilares perimetrales que sólo soportan dos plantas de carga, mientras que los pilares y núcleos de pantallas del Atrio se cimentaron mediante otros 120 pilotes, lo que hace un total de 518 pilotes y una longitud total de hinca de más de 23.3 Km de pilote (Figs. 7, y 8).

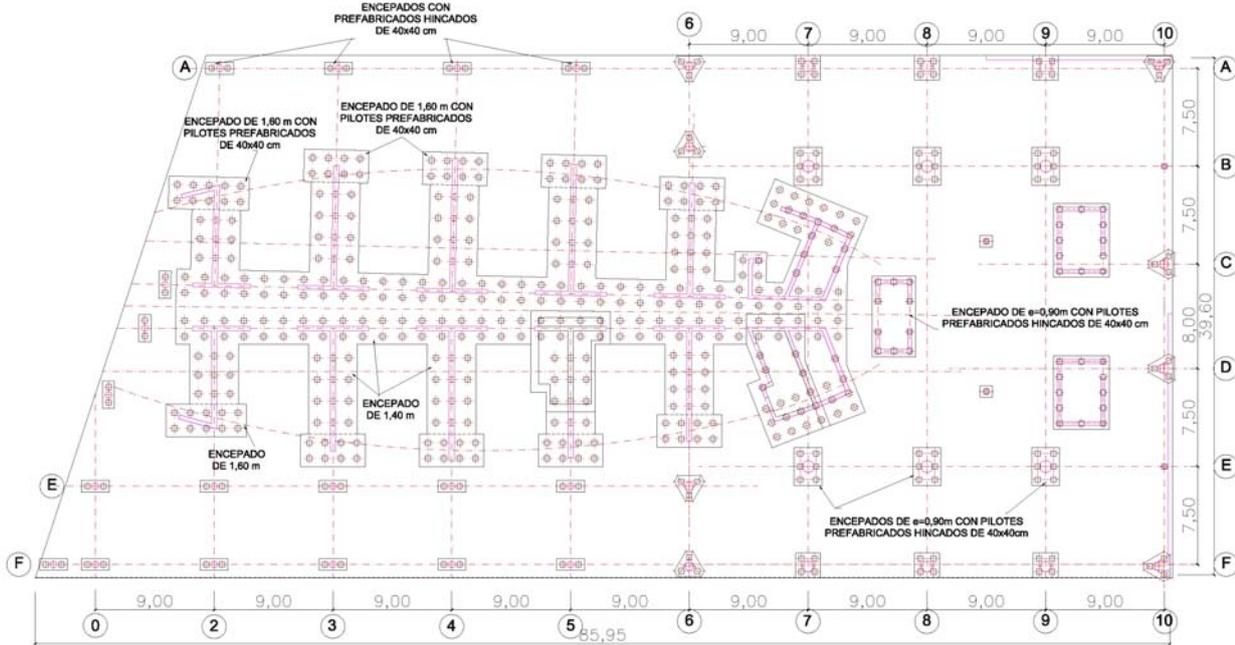


Fig. 7: Planta de la cimentación de los edificios Torre y Atrio con pilotes prefabricados hincados



Figs. 8a y 8b: Vista de pilotes prefabricados hincados y encepados de la Torre durante su ejecución

Uno de los principales problemas a la hora de la hinca de los pilotes era atravesar la capa inicial de 8 m de rellenos heterogéneos, donde la posibilidad de rechazo era bastante alta debido a la presencia de elementos duros que impidiesen la correcta hinca del pilote. Este problema se solucionó llevando a cabo una perforación previa entubada de esa capa de rellenos en los pilotes afectados, para posteriormente realizar la hinca del pilote.

Otra dificultad que se planteó a la hora de la ejecución "in situ" fue la elevada longitud de los pilotes de más de 40 m, lo que obligó a realizar varios empalmes entre tramos de pilote, y en algunos casos, durante la fase de ejecución en obra, hubo que rediseñar algún encepado por la necesidad de volver a hincar pilotes cercanos a otros inicialmente proyectados por problemas de cortes en los mismos.

### 3. Análisis de las acciones de viento

El elevado coste relativo de las cimentaciones de la Torre y el Atrio obligaron a optimizar las acciones del viento sobre el edificio para no encarecerlas en exceso, por lo que el análisis de los coeficientes de forma o de arrastre de la Torre, con el viento incidiendo perpendicular a la forma de la Vela, haciendola flexionar con el menor brazo, se convirtió en una cuestión fundamental. En las referencias [1] y [2] se detalla con más profundidad el estudio comparativo de las acciones de viento según diferentes normativas realizado, comparando los coeficientes de exposición, la velocidad de cálculo, y la presión dinámica del viento en función de la altura.

Ante la incertidumbre en la evaluación de los coeficientes de forma o de arrastre del edificio, y su posible sobre o infra-dimensionamiento al simplificar la complicada geometría de la Torre, asimilándola a geometrías sencillas tipificadas definidas en las normativas sobre acciones de viento, la UTE VELA BCN a petición de IDEAM y del Taller de Arquitectura de Ricardo Bofill, encargaron el estudio de los coeficientes de arrastre del edificio mediante un ensayo en túnel de viento a escala reducida (Fig. 9) al Instituto Universitario "Ignacio da Riva" de la Escuela de Ingenieros Aeronáuticos de la Universidad Politécnica de Madrid [3].



Fig. 9: Ensayo en túnel de viento del Hotel Vela

Para contrastar los coeficientes de arrastre obtenidos en primer lugar mediante la asimilación de la geometría real a formas tipificadas sencillas, y posteriormente su obtención mediante el ensayo en túnel de viento, se realizaron dos simulaciones diferentes mediante ordenador. Los resultados del ensayo en túnel de viento, así como los obtenidos mediante los contrastes mediante los modelos de partículas se exponen en detalle en las referencias [1] y [2].

En la figura 10 se detalla la deformada frente a las acciones de viento de la Torre, con el viento incidiendo perpendicularmente a la Vela, haciendo flexionar a la Torre con el menor brazo. La flecha en cabeza de la Torre es de 5,60 cm a una altura de 100 m, lo que supone una relación flecha/altura de 1/1785 muy alejada del límite de control de deformabilidad horizontal fijado en 1/750 según el CTE [4].

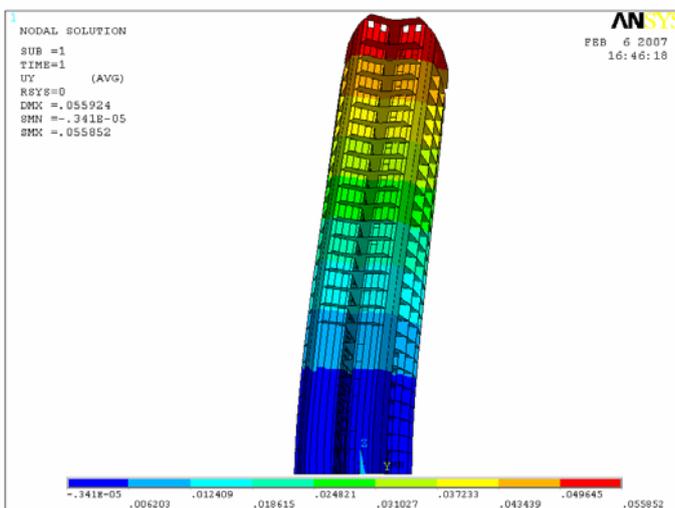


Fig.10: Deformada de la Torre frente a los esfuerzos de viento perpendiculares a la vela

#### 4. Descripción del proceso constructivo

En primer lugar se ejecutaron las mejoras del terreno mediante la precarga y la compactación dinámica realizados en la zona del Podium, para posteriormente ejecutar la losa de cimentación del Podium y realizar las cimentaciones pilotadas de la Torre y el Atrio según se ha descrito en el apartado 2.

En la fase del proyecto constructivo el contratista planteó, para poder reducir plazos de ejecución, la solución de realizar el edificio de la Torre mediante el empleo de pantallas deslizantes que fueran subiendo de manera continua y se fueran arriostando por detrás mediante la ejecución de los módulos extremos y los pasillos de hormigón para posteriormente, por detrás y con un cierto decalaje en altura ir ejecutando los forjados mixtos inicialmente diseñados en proyecto (Fig. 3). Bajo esta premisa se realizó el proyecto constructivo, pero en las fases previas de ejecución de la cimentación pilotada el contratista se replanteó el proceso constructivo, planteando una ejecución algo más convencional en edificación, subiendo planta a planta.

En la figuras 11 y 12 se pueden apreciar las primeras fases de ejecución, con el edificio del Podium concluido (Fig. 12) y los dos edificios principales, la Torre y el Atrio en fase de ejecución planta a planta.



Fig. 11: Ejecución del Hotel en la bocana del puerto



Fig. 12: Vista del Podium de dos plantas y de inicios de Atrio y Torre

La figura 13 muestra una vista superior de la zona del Podium, más la cubierta principal del Ballroom (Figs. 13, 1a y 1b). El nivel inferior del Podium da acceso directo a la playa en la bocana del puerto de Barcelona.

En la figura 14a se aprecia la estructura del Atrio hasta el nivel de la planta 7 (cubierta) ya concluida y las fases de ascenso de la Torre con las pantallas transversales situadas cada 9 m, los núcleos traseros de escaleras y ascensores junto al Atrio, y las pantallas frontales (Fig. 14 b) que siguen la forma de la vela.



Fig. 13: Vista del Podium y cubierta del Ballroom



Figs. 14a y 14 b: Vista del Atrio concluido y la Torre en ejecución

## 5. Forjados mediante prelasas prefabricadas y losa in situ

Durante la fase de anteproyecto se estudiaron una serie de alternativas en cuanto a la tipología de los forjados de la Torre tanto a nivel económico como a nivel de plazos de ejecución.

En una primera fase de concepción arquitectónica la Torre se concibió con luces de 4.5 m disponiendo pilares intermedios coincidiendo con los tabiques entre habitaciones partiendo la luz de 9 m entre pantallas en dos. En esta fase los forjados propuestos fueron losas macizas armadas de 22 cm de espesor.

Esta primera propuesta enseguida se desechó evitando duplicar cimentaciones de pilares intermedios, dejando el edificio con luces principales de 9 m entre pantallas transversales (Fig. 3) sin pilares intermedios.

Con esta distribución final de elementos verticales (Fig. 3) se estudiaron en procesos constructivos cimbrados planta a planta las losas macizas armadas de 30 cm de espesor, y los forjados reticulares, algo menos económicos frente a la solución de losa maciza al estar en el límite de esta tipología con una luz principal de 9 m.

Para poder reducir plazos de ejecución, intentando evitar las tareas de cimbrado y encofrado de cada forjado, el contratista propuso la alternativa de realizar la Torre mediante pantallas deslizantes de hormigón armado por lo que el proyecto constructivo se realizó con esta tipología con vigas mixtas y forjado con chapa nervada colaborante.

Como ya se ha descrito anteriormente el contratista decidió modificar su propuesta inicial de ejecutar el edificio de la Torre mediante el empleo de forjados mixtos y pantallas deslizantes por un sistema de ejecución planta a planta que en lugar de forjados mixtos emplease prelasas prefabricadas pretensadas evitando cimbrar y encofrar los forjados, de manera que se agilizaran los plazos de ejecución de la estructura del hotel.

Las prelasas prefabricadas son pretensadas con forma de  $\pi$  invertida, sobre la cual se dispone un aligeramiento de porexpan para reducir peso (Fig. 15 y 16), para posteriormente hormigonar una losa de compresión superior.



Fig. 15: Vista de prelasas prefabricada pretensada con aligeramiento interior.

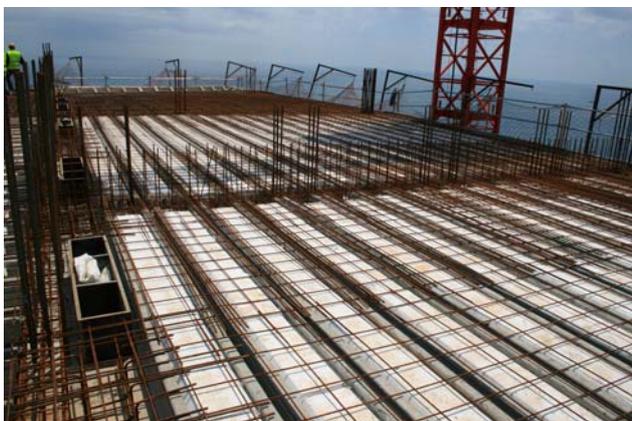


Fig. 16: Vista de prelasas prefabricadas y ferralla superior de losa    Fig. 17: Vista de prelasas entre dos pantallas situadas a 9 m

Las prelasas salvan los 9 m de luz entre las pantallas verticales de la Torre, materializando una sucesión de vanos continuos de 9 m de luz. En la figura 16 se aprecia la vista superior de un forjado con prelasas entre las pantallas de la Torre, con los aligeramientos entre nervios y la ferralla superior de la losa, y en la figura 17 se puede ver las prelasas de

un vano entre pantallas apuntaladas hasta que el hormigón superior de la losa adquiere resistencia suficiente. El tramo entre pantallas de 9 m se compartimenta posteriormente mediante un tabique intermedio en dos habitaciones de 4.5 m de ancho cada una.

Al disponer prelosas pretensadas entre pantallas rígidas de hormigón, es necesario considerar que parte del pretensado de taller se perderá debido a la coacción que las pantallas ejercen sobre las prelosas al no permitirles el libre movimiento por retracción y fluencia de las mismas. En este sentido para evitar problemas de fisuraciones en positivos fue necesario disponer un refuerzo de amadura pasiva entre los nervios de las prelosas.

## 6. Principales participantes en el proyecto del Hotel Vela de Barcelona.

Proyecto y Dirección de Obra: Ricardo Bofill. Taller de Arquitectura

Dirección de Obra de la Estructura: Arquitecto Eduard Palao

Promotor y Constructor: UTE VELA BCN: FCC-OHL-Comsa-Sacresa

Proyecto de la Estructura y Asistencia Técnica a la Dirección de Obra : IDEAM

Luis Matute, Miguel Ortega, Francisco Millanes, Juan José Laso, Carlos Gordo.

## 7. Referencias

- [1] ORTEGA M., "Análisis de viento en edificios singulares. Aplicación al caso del Hotel Vela de Barcelona", *IV Congreso ACHE. Valencia. Nov- 2008*
- [2] ORTEGA M., LACOMA L.M., HOLMAN D.M., "Análisis de las acciones de viento en edificios singulares. Aplicación al Hotel Vela de Barcelona". *Hormigón y Acero. Vol 59,nº 250. 2008.*
- [3] PINDADO S., FRANCHINI S., MESEGUER J., "Medida de las cargas de viento en un modelo aerodinámico del Hotel Vela de Barcelona". Laboratorio de Aerodinámica IDR/UPM ETSI Aeronáuticos de Madrid. Feb. 2007
- [4] Código Técnico de la Edificación (CTE) "Seguridad Estructural: Bases de Cálculo y Acciones en la Edificación". Libro 2. Ministerio de Vivienda. 2006.