

Diseño civil de los edificios de ITER

L. Chiva, J. Gutiérrez del Olmo y A. Cía

En este artículo se describe la situación actual de las obras de construcción del ITER.

This article describes the current status of construction of the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER).

INTRODUCCIÓN

Al pie de los Alpes, a escasos kilómetros de *Aix-en-Provence*, avanzan fruto de la colaboración internacional las obras de construcción de ITER. Las proporciones de los trabajos en el emplazamiento son comparables a las de una central nuclear de fisión convencional; grandes movimientos de tierra, uso extensivo de hormigón fuertemente armado, multitud de edificios interconectados por múltiples galerías y entre los que se abre paso un ejército de técnicos y trabajadores necesarios para su construcción.

Las obras son un paso más de una colaboración internacional que comenzó en 1985 por acuerdo entre Reagan y Gorbachov al que luego se fueron uniendo otros países. Un paso importante pero de objetivos relativamente modestos, simplemente un escalón más, aunque necesario, en lo que aún supondrá una larga marcha para obtener energía generada por fusión de manera industrialmente rentable.

Concebido para experimentar las condiciones con las cuales tal explotación industrial sería posible, se espera que genere 500 MW con la aportación únicamente de 50 MW (factor de diez) durante unos pocos minutos. Aún lejos de lo que sería necesario a nivel industrial, tal vez un factor de cinco veces esa potencia y de duración casi constante. Desde el punto de vista meramente constructivo y de montaje los retos serían abrumadores; supuesto que el tamaño de la instalación, o al menos de los edificios principales, crezca con la potencia a generar, no ya en un factor de cinco, sino pongamos de dos, resulta difícil imaginarse cómo sería el montaje, instalación y coste de una máquina el doble de grande de la que se está construyendo en Cadarache.

En cualquier caso, los objetivos de ITER en el avance del conocimiento en control de plasmas, materiales y re-

generación de tritio, son ambiciosos, y constituirán un punto de inflexión en el desarrollo de la fusión como fuente viable de energía.

DISPOSICIÓN GENERAL DE LA PLANTA

La planta está formada por 39 edificios y áreas técnicas que dan servicio a las operaciones del *Tokamak*, donde se producirán las reacciones de fusión. El edificio del *Tokamak* es el corazón de la instalación y está previsto que entre en funcionamiento (al menos los primeros experimentos de control de plasma) en noviembre de 2019. El edificio del *Tokamak* tiene 73 m de altura (13 de sótanos y 60 sobre rasante) y un edificio anexo para el pre-montaje de los mayores componentes conocido como *Assembly Building*. Una de las razones por las que la instalación tiene un tamaño tan importante está en relación con la necesidad de fabricar y montar buena parte de los equipos en el emplazamiento (ver más adelante, edificio *PF coil*). El edificio de montaje es una característica de esta instalación en comparación con las centrales de fisión, donde todos los equipos se traen de fuera y se instalan *in situ*, incluidos la vasija y los generadores de vapor.

En los alrededores del complejo del *Tokamak* (edificios 11, 14 y 74, ver esquemas de planta en páginas siguientes) se dispondrán muchos otros edificios, como el de control (71), torres de refrigeración (67, 68 y 69) y de suministro eléctrico (75 y 40s), así como una planta criogénica (51 y 52) para suministro del helio líquido necesario para mantener propiedades óptimas de conductividad en los magnetos.

El diseño preliminar de los edificios se completó en 2010 por ITER Organization (IO) previamente a la firma del contrato de construcción de los edificios e infraestructuras de la planta por parte de *FusionforEnergy* (F4E) por 537 millones de euros. Posteriormente, el



LUIS CHIVA ROBLES

(Empresarios Agrupados)
Responsable de ingeniería en Madrid del contrato ITER arquitectura/ingeniería. *Team Leader non-nuclear facilities 1* para ENGAGE.

Licenciado en CC. Físicas por la UNED e ingeniero de Caminos por la UPM.



JAVIER GUTIÉRREZ DEL OLMO Y MIGUEL

(Empresarios Agrupados)
Jefe de Proyecto Civil *non-nuclear facilities 1* para ENGAGE.
Ingeniero de Caminos por la UPM.



ADOLFO CÍA LÓPEZ

(Empresarios Agrupados)
Ingeniero de proyecto de *non-nuclear facilities 1* para ENGAGE.
Ingeniero Industrial por la UPM.

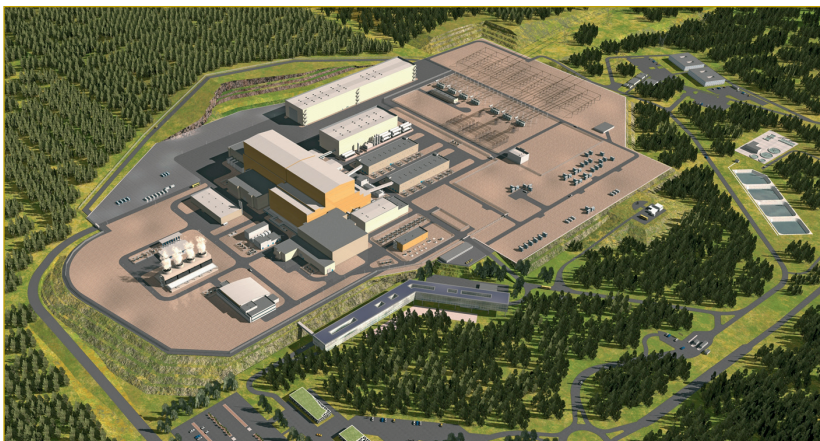


Figura 1. Infografía de la instalación. Destacan en naranja el complejo del Tokamak y edificio de montaje. Foto, cortesía IO.



Figura 2. Vista aérea de la planta. Se observa claramente el pozo del Tokamak para aislamiento sísmico, el edificio PF coil sobre el extremo superior, la subestación de RTE a la derecha y la nueva sede de IO fuera de la plataforma junto al pozo del Tokamak. Actualmente la sede de IO y F4E se encuentra en los edificios de la derecha en la foto. Júzguese el estado de avance por comparación con la infografía de esta misma página. Foto, cortesía Engage/F4E. Diciembre 2012.

consorcio europeo Engage, formado por las empresas francesas Assystem e Iosis, la británica Atkins y la española Empresarios Agrupados fue elegido por F4E como el arquitecto/ingeniero de la planta para la realización de los diseños de oferta, construcción, infraestructuras del emplazamiento, así como de control y gestión de las actividades de construcción. Engage asistirá a F4E desde abril de 2010 hasta la finalización de la construcción en 2018, movilizando un equipo multidisciplinar de más de 200 ingenieros y diseñadores (Figuras 1 y 2).

Los edificios del complejo se pueden clasificar de distintas formas atendiendo a sus características estructurales, a si contienen o no material radiactivo y a su función en relación a la seguridad. Veamos cuáles serían los desgloses de edificios atendiendo a esas características:

Clasificación de los edificios por tipologías estructurales

En origen, los sistemas de la planta se dividieron en PBS (acrónimo de *Plant Breakdown System*), que para los edificios se materializó en dos denominaciones; "PBS 63" para los de acero y "PBS 62" para los de hormigón. El desglose original en edificios de acero y hormigón perdió significado, pues se iban cambiando las tipologías según se avanzaba en el diseño. Con todo, la denominación se mantuvo de modo que hoy día pueden encontrarse en ambos PBS edificios que integran indistintamente ambos materiales.

En líneas generales, los edificios de hormigón, lo son fundamentalmente debido a algún requisito de diseño que así lo requiere, por ejemplo, resistencia ante explosiones, bunkerización, resistencia al fuego, necesidades de contención, confinamiento, etc. Los

edificios de acero, esto es, estructura principal y secundaria de acero con cerramientos de panel tipo *sándwich* se han reservado para cometidos menos exigentes. Entre ambos niveles de exigencia, existen soluciones mixtas, (edificio PF coil) con el uso de pilares de hormigón y cerchas de acero determinados por requisitos específicos, como cargas de puente grúa o luces especiales entre pórticos transversales.

En la actualidad, la mayoría de edificios tienen decidida su tipología y materiales, excepto un reducido número de edificios, cuyo diseño dependerá únicamente de criterios económicos. En otras palabras, son edificios cuya modalidad de contratación de la construcción incluye el diseño y por ende su tipología (Figura 3).

Clasificación por requisitos de seguridad

El inventario de material radiactivo de la planta es muy pequeño en comparación con los de las centrales de fisión actuales, pero con todo, algunos edificios contendrán tritio por lo que han sido diseñados con todas las medidas necesarias en cuanto a su confinamiento y contención. Atendiendo a si albergarán material radiactivo o no, los edificios se dividen en un primer grupo formado por el complejo del Tokamak (11, 14 y 74), el edificio de celdas calientes (21) y el edificio de residuos (23) y un segundo grupo que englobaría al resto.

La función de los edificios en relación a la seguridad, también permite dividirlos en aquellos que albergan sistemas o componentes de seguridad y los que solo albergan sistemas y componentes convencionales. En ese caso, el círculo de edificios se amplía para incluir, entre otros, los diesel de emergencia (42, 43, 44 y 45), el edificio de control (71) y otros edificios que albergan procesos relacionados con la seguridad (75, 13, 15 y 37) (Figura 4).

Clasificación por categorías sísmicas

Cadarache se encuentra en una zona sísmica, por lo que el terremoto es uno de los principales condicionantes de los edificios. Previo al diseño, se necesita la clasificación de las estructuras en categorías sísmicas que se otorgan en función de los sistemas que contienen, su clasificación de seguridad y qué se espera de los mismos en caso de evento sísmico de una determinada envergadura (Figura 5). Dichas categorías sísmicas son:

- **SC1 (SF)**. Se debe mantener la estabilidad estructural y la funcionalidad

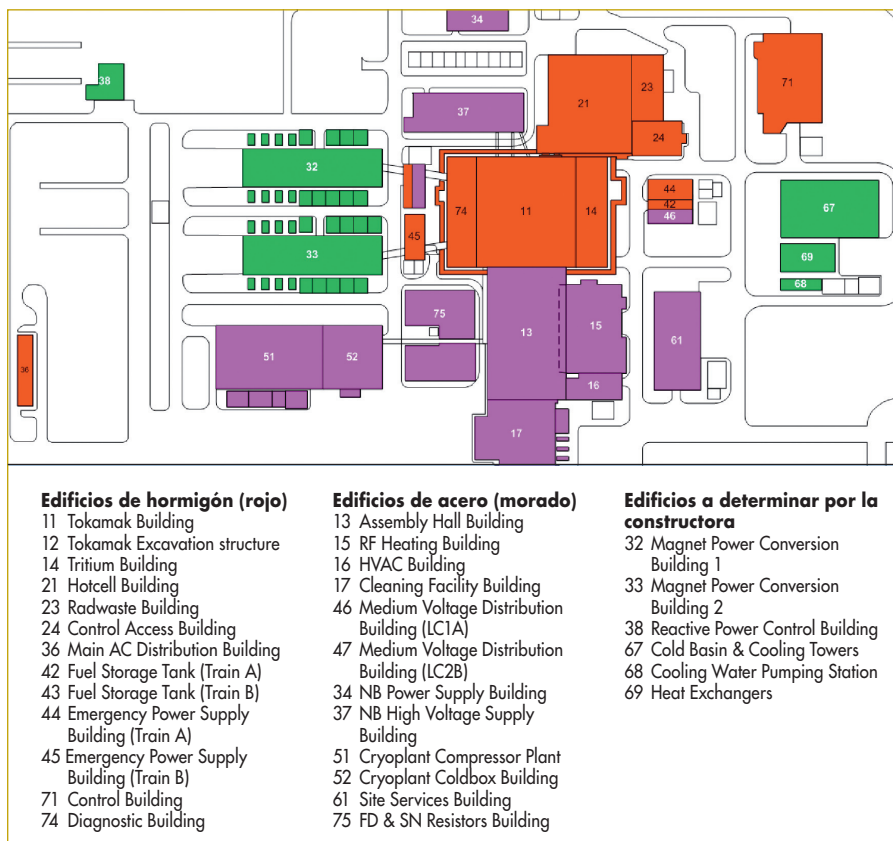


Figura 3. Edificios principales de la instalación clasificados por su tipología.

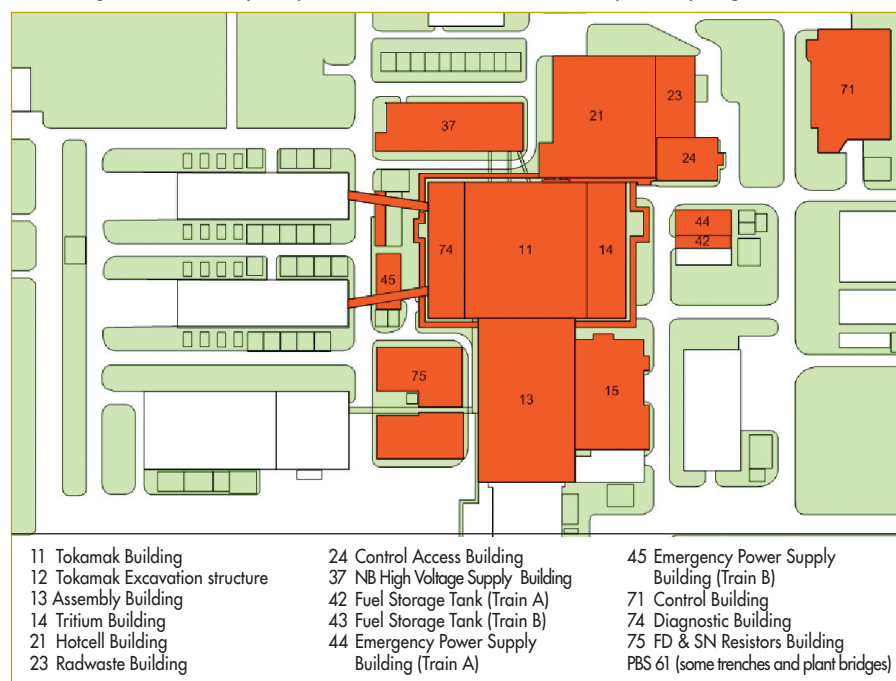


Figura 4. Edificios con requisitos de seguridad

de los sistemas de seguridad en caso de sismo. No aplica a edificios.

- **SC1 (S).** Se debe mantener la estabilidad estructural en caso de sismo sin ruptura de tuberías, colapso de estructuras o equipos. Comportamiento plástico y fisuración limitados de modo que se mantenga su

integridad y las funciones para los que están diseñados.

- **SC2.** Sin daño a estructuras y equipos SC1, ni a estructuras y edificios que alberguen equipos relacionados con la seguridad o que puedan dañar dichas estructuras en caso de colapso.

- **NSC.** Sin requisitos sísmicos adicionales. Les aplica la normativa sísmica aplicable (Eurocódigo 8 con el anexo nacional francés).

Las zanjas y galerías tienen también su categoría sísmica y las hay de todos los tipos, SC1(S), SC2 y NSC.

Conocida la clasificación de edificios por categoría sísmica, hay que asignar un nivel sísmico asociado a cada categoría que permita diseñarlos de forma efectiva. Los sismos de diseño de los distintos edificios asociados a su categoría sísmica son:

- **Edificios SC1(S).** Nivel sísmico SL-2 como se define en la guía de seguridad del OIEA, definido como la envolvente de dos sismos, el SMS (*Seisme Majoré de Surêté*) y el paleosismo aplicable a la zona de Cada-rache.
- **Edificios SC2.** El mismo nivel sísmico SL-2.
- **Edificios NSC:**
 - Eurocódigo EN 1998 - Eurocode 8
 - Zona sísmica: 4 (Zona de sismicidad media).
 - Categoría de importancia de los edificios: III.

También se define un sismo base de operación SL-1 según la guía de seguridad de la IAEA como la tercera parte del SL-2.

DESCRIPCIÓN DE LOS EDIFICIOS PRINCIPALES

El corazón de la planta es el complejo del *Tokamak*. El *Tokamak*, acrónimo ruso de "cámara toroidal con bobinas magnéticas" es el reactor donde han de producirse las reacciones de fusión y se encuentra enclaustrado en un edificio de hormigón formado por tres naves. La principal y más grande es el edificio del *Tokamak* propiamente dicho que se haya coronado por cerchas de acero en el que destaca el hall superior del puente grúa. En la parte inferior, semienterrada, la propia máquina y todos los sistemas que le dan servicio de forma directa. En los laterales, dos naves, la primera dedicada a los dispositivos de diagnóstico y simétricamente la segunda, para la gestión del tritio. Todo el conjunto es estructuralmente un único edificio sobre una cimentación anti-sísmica. Linda al norte de planta con el edificio de celdas calientes (21) y al sur con el de montaje (13) que no están sísmicamente aislados (cimentación convencional).

El edificio de montaje (*Assembly Building*), es básicamente un puente grúa gigantesco para el montaje de la máquina. Tiene la misma altura sobre rasante que el edificio del *Tokamak*

con el que linda por uno de sus testeros, aunque no tiene sótanos. En un lateral, tiene anexo el edificio de radio frecuencia (15), aunque son estructuralmente independientes. En el testero restante, se encuentra el edificio de limpieza (17), que es una nave exenta que permite administrar tratamientos previos a las bobinas y equipos en el momento de ser introducidos en el de

montaje. También es estructuralmente independiente (Figuras 6 y 7).

Descripción de los edificios actualmente en construcción

En la actualidad los primeros edificios de la instalación se encuentran en plena construcción o incluso han sido finalizados y están a la espera de los

equipos e instalaciones de los procesos que van a albergar. Veamos cuáles son sus principales características y cuál es su estado de avance actual.

Edificio para el devanado de las bobinas de campo poloidal "PF coil"

El edificio de bobinado de los magnetos del campo poloidal albergará todo lo necesario para la fabricación de las bobinas de campo poloidal que forman parte del *Tokamak*, cuyos diámetros varían entre 8 y 24 m. Debido a sus dimensiones, la opción de fabricarlas lejos del emplazamiento fue descartada frente a la opción más económica de fabricarlas in situ. Esas actividades requerían una instalación al efecto que comúnmente se conoce como *PF coil building*.

El edificio está concebido para albergar y dar servicios a unas enormes salas limpias a modo de caja para el bobinado, impregnación y prueba de las bobinas, y que se instalarán una vez el edificio esté concluido. El edificio se asemeja a un hangar de aviación pero con dos enormes puertas en uno de los laterales en vez de en los pórticos testeros (Figuras 8 y 9).

Destacan los medios de elevación de los que dispone, en especial uno de los puentes grúa con forma circular diseñado específicamente para elevar las bobinas. Las estrictas tolerancias de deformación admisibles en las bobinas han obligado a diseñar una grúa con forma de araña de 25 patas, específica para sus necesidades. La grúa será capaz de levantar y trasladar a lo largo del edificio las bobinas de mayor diámetro (24m) minimizando las deformaciones diferenciales entre cualquiera de sus puntos (Figuras 10 y 11).

El edificio fue especificado por F4E con la colaboración de Empresarios



Figura 5. Edificios principales de la instalación clasificados por categorías sísmicas.

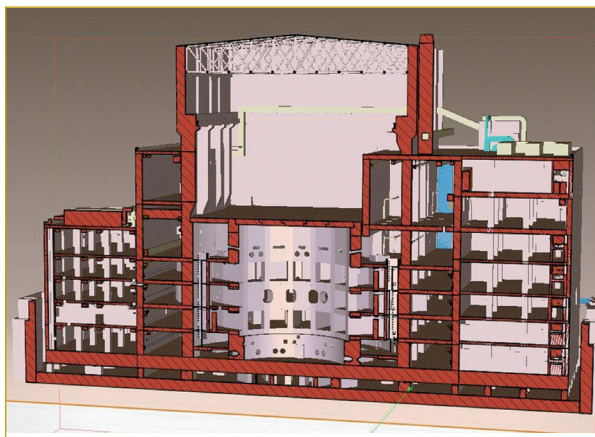


Figura 6. Sección del edificio del complejo del *Tokamak*. De izquierda a derecha edificio de diagnóstico (74), *Tokamak hall* (12) y edificio del tritio (11). Nótese el sistema de aislamiento sísmico. Foto septiembre 2011, cortesía IO.

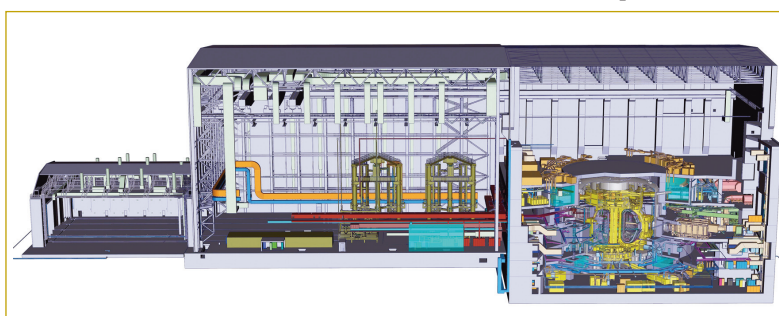


Figura 7. Sección del modelo CATIA empleado en el control de configuración. La instantánea sacada del modelo 3D incluye tres edificios independientes estructuralmente. De izquierda a derecha el edificio con instalaciones de limpieza de las bobinas (17), antesala de acceso de las bobinas al edificio de montaje (13). A la derecha, edificio del *Tokamak* (11, 14 y 74). El edificio de montaje y el del *Tokamak* comparten el puente grúa. Este último está aislado sísmicamente y los otros dos no. Se observan sobre el lateral del edificio de montaje los bastidores para manejo de las secciones del *Tokamak*. Foto abril 2010, cortesía IO.



Figura 8. Vista aérea del PF coil. Se observan sobre el lateral del edificio más cercano al observador las puertas de 30m cada una para dar salida a las bobinas poloidales de 24m y la solera de la zona de pruebas. Septiembre 2011. Foto, cortesía IO.



Figura 9. Vista lateral del PF coil. A la derecha de la imagen se aprecian los anexos a la nave principal del edificio para servicios y oficinas. Septiembre 2011. Foto, cortesía F4E.



Figura 10. Grúa del interior del PF coil. Diseñada específicamente para elevar las bobinas poloidales, se observan las patas diametrales sobre las que se sujetarán las bobinas para evitar deformaciones en las mismas. Foto noviembre 2011, cortesía F4E.



Figura 11. Vista de la nave principal del PF coil. Con su nave principal exenta para la instalación de las salas de devanado y pruebas, el PF coil es uno de los edificios más grandes de la instalación. Se aprecia el puente grúa en primer término y la tipología estructural mixta consistente en estructura principal de hormigón armado y cerchas de acero. Foto Septiembre 2011, cortesía F4E.

Agrupados. El consorcio seleccionado para el diseño y construcción del edificio está formado por SpieBatignolles, Omega Concept y Setec.

Datos del edificio PF coil

- Periodo de construcción: 18 meses (completado en diciembre de 2011).
- Superficie: 12000 m²
- Longitud: 257 m
- Ancho: 49 m
- Alto: 18 m
- Número de pilares de hormigón: 62
- Número de cerchas de acero: 34
- Solera: 40 cm de espesor, diseñado para soportar 42 t/m²
- Superficie de cerramientos: 9500 m²
- Superficie de cubierta: 11000 m²
- Capacidad del primer puente grúa: 25 t. Capacidad del segundo puente grúa: 50 t empleando el puente grúa circular o 100 t.

- Comienzo de las operaciones de bobinado: finales de 2012.

Excavación del complejo del Tokamak y área del edificio de celdas calientes.

Previamente al hormigonado del pozo del Tokamak se realizó la excavación del mismo y del área adyacente donde se construirá el edificio de celdas calientes (21), el edificio de residuos (23) y el de control de accesos (24). Durante la excavación se extrajeron 210.000 m³ de terreno rocoso, comenzando en agosto de 2010 y terminando 10 meses después (Figuras 12 y 13).

La plataforma de la planta es fundamentalmente desmonte en roca caliza sana bajo la zona del complejo del Tokamak por lo que hubo de recurrir a voladuras y medios mecánicos. No toda la plataforma son desmontes en

roca, también hay zonas al este del emplazamiento donde afloran terrenos del mioceno, así como zonas al oeste a base de rellenos estructurales debidamente compactados para alcanzar las características resistentes necesarias (Figuras 14 y 15).

Datos de la excavación del complejo del Tokamak

- Periodo de excavación: 10 meses.
- Profundidad de la excavación: 17 m
- Dimensiones del pozo del Tokamak: 90 x 130 m
- Volumen de terreno excavado: 210.000 m³
- Masa del complejo del Tokamak: 360.000 t (incluyendo las 23.000 t del Tokamak).
- Altura del edificio del Tokamak: 73 m (aproximadamente 60 m sobre la rasante).



Figura 12. Vista aérea de la excavación del Tokamak. Foto abril 2011, cortesía Spie/Batignoles.



Figura 13. Fondo de excavación del Tokamak del lado de la zona del edificio de celdas calientes. Foto mayo 2011, cortesía IO.



Figura 14. Instantánea de una voladura controlada durante la excavación. Foto mayo 2011, cortesía IO.



Figura 15. Trabajos de excavación por medios mecánicos. Foto febrero 2011, cortesía F4E.



Figura 16. Vista aérea del pozo del Tokamak durante el hormigonado. Aspecto de las tareas de ferrallado y hormigonado de la losa del pozo del Tokamak hacia el verano de 2011. Se observan los primeros soportes de los disipadores a la derecha del pozo. Al fondo el PF coil y la subestación de RTE. Foto septiembre 2011, cortesía IO.

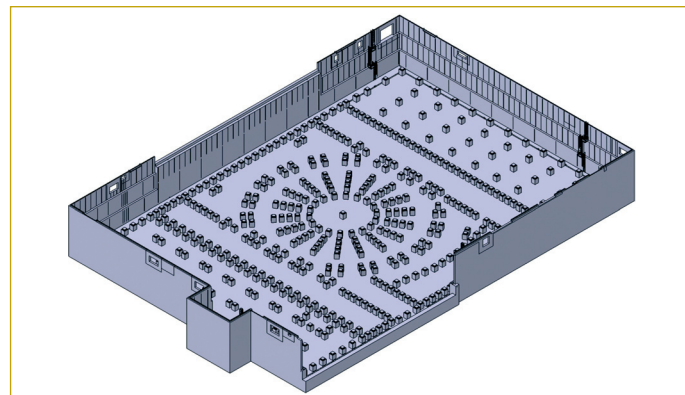


Figura 17. Vista del modelo CATIA del pozo del Tokamak. La posición de los disipadores sísmicos delata el trazado de los muros de cortante y soportes del Tokamak. Inmediatamente encima de los apoyos se empezará a hormigonar la losa inferior del edificio. La apertura en el muro en primer plano es la interfase con el edificio de celdas calientes, que no cuenta con aislamiento sísmico. De forma similar en el muro opuesto se aprecia la interfase con la losa del edificio de montaje, tampoco aislado. Las juntas en dichas zonas deben absorber los movimientos sísmicos diferenciales. Foto septiembre 2012, cortesía IO.

El pozo del Tokamak

El complejo del Tokamak formado por un edificio único que contiene el propio Tokamak, las zonas de diagnóstico y las dedicadas a la gestión del tritio, cuenta con un sistema de aislamiento sísmico que le permite independizar los movimientos del suelo

y la estructura (filtrado de frecuencias) y reducir considerablemente las cargas sísmicas horizontales. La forma de conseguirlo es conceptualmente sencilla y consiste en excavar un pozo revestido de hormigón armado con una multitud de plintos también de hormigón sobre los que apoyar el

edificio. En el punto de contacto entre cada plinto con el edificio es donde se dispone el aislador sísmico. La técnica es muy conocida y ampliamente probada en países de gran sismicidad (Figura 16 y 17).

La complejidad constructiva y de colocación de los disipadores obliga a



Figura 18. Detalle de un disipador sísmico durante el hormigonado en segunda fase. Fabricados por NTS, los más de 400 soportes requieren un minucioso control de calidad durante su puesta en obra como durante su ejecución. Destacan los conectores soldados a la chapa superior, en espera de ser embebidos en la losa inferior del Tokamak, y diseñados para transmitir las fuerzas de cortante. Foto noviembre 2011, cortesía IO.



Figura 19. Detalle de la zona central del pozo del Tokamak. Esta foto es representativa de las distintas fases de ejecución de los plintos de los disipadores sísmicos. A la izquierda, armaduras de los plintos en espera, hacia el fondo, plintos con los disipadores ya instalados. Y hacia el centro, plintos con armadura en espera de hormigonado de segunda fase. Foto enero 2012, cortesía IO.



Figura 20. Vista de la nueva sede de IO en construcción. Foto septiembre 2011, cortesía IO.



Figura 21. Vista de la nueva sede de IO en construcción. Al fondo se aprecia la sede provisional de IO y de F4E en el emplazamiento. Foto septiembre 2011, cortesía IO.

extremar los controles de calidad. En la actualidad acaban de terminarse las actividades de hormigonado del pozo y montaje de los disipadores, a la espera de las primeras fases constructivas de la losa inferior del edificio del Tokamak (Figuras 18 y 19).

Datos de la excavación del pozo del Tokamak

- Plazo de construcción de losa inferior y muros de retención: 5 meses
- Acero de armar: 3400 t
- Volumen de hormigón: 110000 m³
- Espesor losa del pozo sísmico: 1.5 m
- Espesor losa del Tokamak: 1.5 m
- Espesor de los muros de retención del pozo: desde 1.5 m (parte inferior) a 0.5 m (superior)
- Número de aislantes sísmicos: 493

Sede de ITER Organization

Formalmente fuera del perímetro conocido como Instalación Nuclear de Base (INB, por sus siglas

en francés), se encuentra el edificio que albergará la sede de IO. Es básicamente un edificio de oficinas de arquitectura representativa con todos los servicios necesarios como cafetería y terraza o una amplia sala de conferencias. Muy cerca se encuentran el centro de acogida y el centro médico de la planta. Desde su interior se puede contemplar la plataforma de la planta y está comunicado con el edificio de control (71) mediante una pasarela que se convierte en túnel al llegar a la altura de la plataforma. Cuando esté terminado y listo para ser ocupado en verano de 2012, sustituirá a la actual sede de IO en el edificio B23, que puede verse al fondo a la derecha de una de las fotografías anteriores y a las oficinas cedidas a ITER por la CEA.

El diseño del edificio fue encargado y financiado por la agencia do-

méstica europea F4E y financiado conjuntamente por el Estado Francés como país anfitrión, mediante un contrato diferente al de arquitectura/ingeniería de la planta que desarrolla el consorcio Engage (Figuras 20 y 21).

Datos del edificio sede de IO:

- Periodo de construcción: 2 años
- Superficie: 20.500 m²
- Longitud: 180 m
- Altura: 20 m
- Número de plantas: sótano y cinco alturas (6 plantas)
- Número de parasoles: 3.104
- Dimensiones de los parasoles: 3.5 cm de espesor x 3.5 m altura, hechos de fibra de hormigón.
- Capacidad: 500 personas.
- Autores: Rudy Ricciotti, architect / Laurent Bonhomme, architect / SNC-Lavalin / Cap-Ingelec.■