

# Planta de desalación de agua de mar por ósmosis inversa en Jebel Ali (Dubai)

*Seawater Reverse Osmosis (SWRO) Plant in Jebel Ali (Dubai)*

Mariano Martín Cañueto<sup>a</sup>, David Solera Piña<sup>b</sup>,

Diego Romagosa Sánchez-Monge<sup>c</sup>, Diego Marín Silvestre<sup>d</sup>,

Cristian Jesús Sánchez Correa<sup>e</sup>, Nanda Megías Casado<sup>f</sup>, David Alonso Guinea<sup>g</sup>

<sup>a</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Gerente de Estructuras. Acciona Ingeniería.

[mariano.martin.canueto@acciona.com](mailto:mariano.martin.canueto@acciona.com)

<sup>b</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de Departamento de Edificación y Obra Industrial. Acciona Ingeniería.

[david.solera.pina@acciona.com](mailto:david.solera.pina@acciona.com)

<sup>c</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de Proyectos. Departamento de Obra Civil y Puentes. Acciona Ingeniería.

[diego.romagosa.sanchezmonge@acciona.com](mailto:diego.romagosa.sanchezmonge@acciona.com)

<sup>d</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniero de Proyectos. Departamento de Obra Civil y Puentes. Acciona Ingeniería.

[dimarin@acciona.com](mailto:dimarin@acciona.com)

<sup>e</sup> Ingeniero Industrial. Ingeniero de Proyectos. Departamento de Edificación y Obra Industrial. Acciona Ingeniería.

[cjsanchez@acciona.com](mailto:cjsanchez@acciona.com)

<sup>f</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniero de Proyectos. Departamento de Edificación y Obra Industrial. Acciona Ingeniería.

[nanda.megias.casado@acciona.com](mailto:nanda.megias.casado@acciona.com)

<sup>g</sup> Arquitecto Técnico. Ingeniero de Proyectos. Departamento de Edificación y Obra Industrial. Acciona Ingeniería.

[david.alonso.guinea@acciona.com](mailto:david.alonso.guinea@acciona.com)

## RESUMEN

El presente documento describe las características más importantes de los edificios principales que forman la Planta Desaladora por Ósmosis Inversa de Jebel Ali (Dubai). Se emplea especial énfasis en las particularidades estructurales encontradas, así como en los condicionantes de diseño, entre los que destacan la acción sísmica y el diseño de losas de cimentación de grandes longitudes sin juntas de expansión.

## ABSTRACT

This document describes the most important characteristics of the main buildings that form the Seawater Reverse Osmosis (SWRO) Plant in Jebel Ali (Dubai). Special emphasis is made on the structural particularities of the plant, as well as on the design conditions, among which the seismic action and the design of foundation slabs of great lengths without expansion joints stand out.

**PALABRAS CLAVE:** Desalación, ósmosis inversa, agua, hormigón armado, edificio prefabricado, losa pilotada.

**KEYWORDS:** Desalination, reverse osmosis, water, reinforced concrete, prefabricated building, pile slab.

## 1. Descripción de los Edificios

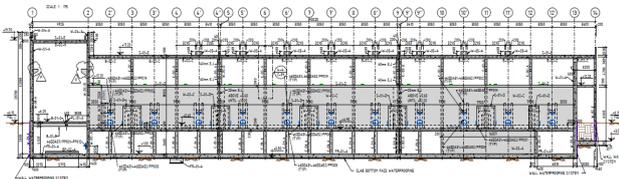
Los edificios principales de la planta desaladora y que a continuación se describen son los siguientes:

- DMF
- DAF
- Edificio de toma
- Edificio de osmosis inversa
- Edificio eléctrico principal



### 1.1 Edificio de filtración de doble medio

En este edificio se desarrolla el proceso de filtración del agua procedente del Edificio de filtración de doble medio (DMF por sus siglas en inglés), que fluye por los filtros duales de gravedad eliminando las partículas orgánicas e inorgánicas restantes por medio de un lecho de filtración.



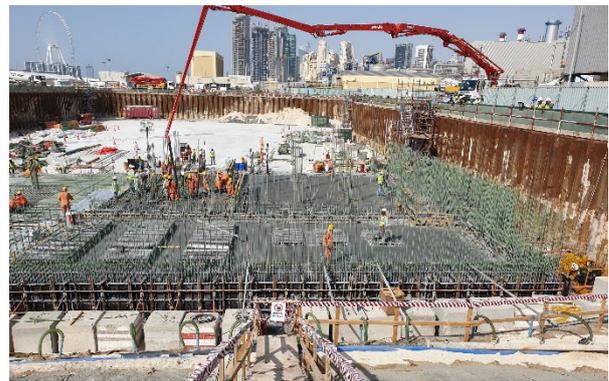
Consiste en una estructura semienterrada de hormigón armado con unas dimensiones en planta de 98m de longitud y 50m de ancho.

Se desarrolla en una altura de 19 metros que se divide en 8 niveles con losas intermedias de hormigón armado de 300 y 500mm de espesor. La cimentación se resuelve con una losa

de 700mm de canto cuya cara superior se encuentra a la cota +1.00m, estando situado el terreno a la +6.10m.

La estructura vertical la forman pilares cuadrados y apantallados por exigencias sísmicas y muros de diferentes espesores en las zonas enterradas y de almacenamiento de agua.

Se han dispuesto dos juntas de expansión en los elementos sobre rasante quedando el edificio dividido en 3 partes sobre rasante, siendo la parte bajo rasante monolítica.



### 1.2. Edificio de flotación por aire disuelto

En el edificio de flotación por aire disuelto (DAF por sus siglas en inglés) se desarrollan los tratamientos para reducir la carga de sólidos en los procesos posteriores y la minimización de los requisitos químicos coagulantes, utilizando tecnología de coagulación y flotación con varios tanques de hormigón.

Es una estructura de hormigón armado con dimensiones exteriores de 105m de largo x 35m de ancho y tres niveles principales. Cimentación a cota +6.40, un segundo nivel ubicado en +13.08 y el nivel de cubierta a cota +21.55. El diseño conceptual de la estructura se distribuye en 22 ejes a lo largo (luces de 5.00m) y 9 ejes en transversal (luces hasta 11.45m).

La cimentación consiste en una losa de 1350mm de espesor sobre pilotes enterrados de diámetro 900 y 1200mm y longitud mínima de 16m. Una serie de muros con espesor de 400mm a 1600mm arrancan sobre esta losa. Estos muros contienen agua de mar en diferentes etapas de su

pretratamiento. Sobre la losa de cimentación nacen también columnas de hormigón de 400x400m hasta la losa nivel +13.08.

El nivel +13.08 (losa intermedia) consiste en una losa de 400mm de espesor con pasillos en dirección norte-sur resueltos con losa de 300mm y pasarelas de tramex. Una serie de muros de 400mm de espesor se ejecutan sobre esta losa a modo de diafragmas para resistir las fuerzas horizontales y sísmicas y manteniendo desplazamientos y deformaciones por debajo de los límites. También pilares de 400x500mm arrancan en este nivel sobre muros de hormigón subiendo hasta la losa de cubierta.

La cubierta consiste en una losa de 300mm de espesor soportada por vigas de 400x750mm (ancho x profundidad) dispuestas cada 10m. La estructura ha sido diseñada incluyendo cargas de equipos mecánicos y de elevación.

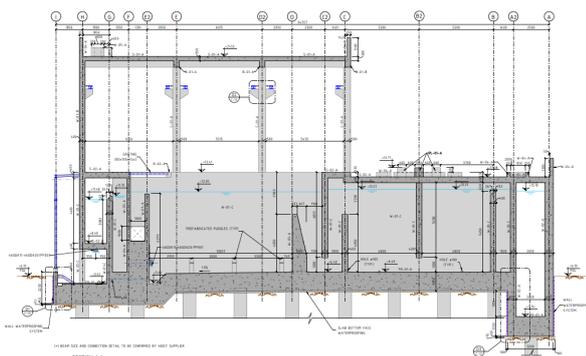


Figura 4. Edificio DAF. Sección transversal.

### 1.3. Edificio de Toma

El edificio de toma (intake por su nombre en inglés) es una estructura enterrada cuya función es recoger el agua marina e impulsarla al resto de la planta.

Las dimensiones en planta del intake son 42m de ancho y 30m de largo. La cota superior de la cimentación es la -9.00m (teniendo ésta un espesor de 1.30m). La cota del terreno se ubica a la cota +6.10m.

El intake se divide en distintas cámaras separadas por muros de hormigón de diversos espesores (desde 0.60m a 1.30m).

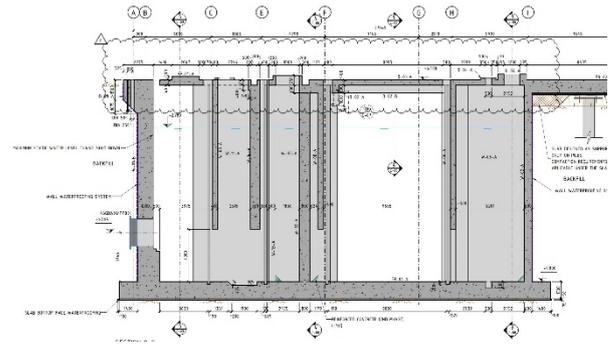


Figura 5. Edificio Intake. Sección transversal.

Como el nivel de cimentación está muy por debajo del nivel freático (+2.20m), y con el fin de evitar la flotabilidad del intake, se provee a la cimentación de un tacón perimetral de 1.40m.

Sobre la estructura de hormigón arranca una estructura metálica con el fin de albergar 2 puentes grúas con capacidades de 19tn y 40tn.



Figura 6. Edificio Intake. Fase de construcción.

### 1.4. Edificio de Ósmosis Inversa

El edificio de ósmosis (RO, por sus siglas en inglés) es donde se desarrolla el proceso de ósmosis inversa, el tratamiento de desalación del agua de mar. Es por ello que el 90% de las tuberías de proceso pasan por el interior del edificio y se apoyan en racks metálicos empaquetados como si de un radiador se tratase.

El edificio tiene unas dimensiones en planta de 84x46 m y cuenta con una losa de cimentación sin juntas y con pilotes de 1200mm de diámetro y longitudes de entre 17 y 23m.



Figura 7. Racks de apoyo de tuberías de proceso.

Todas las tuberías del proceso de ósmosis se colocan sobre la losa pilotada en un proceso crítico y con una duración planificada de aproximadamente tres meses, durante los cuales la losa se encuentra sometida al paso de potentes grúas, material apilado y personal de montaje, en una situación transitoria hasta el montaje del edificio prefabricado sobre la losa.

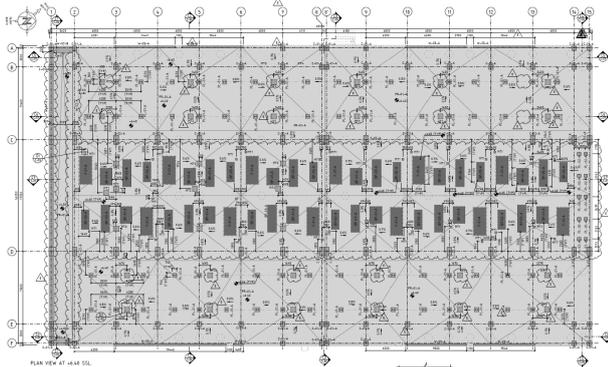


Figura 8. Vista en planta de la losa pilotada del edificio de ósmosis.

Dicho montaje comienza una vez todas las tuberías del proceso de ósmosis inversa y sus estructuras metálicas portantes se encuentran colocadas sobre la losa de cimentación.

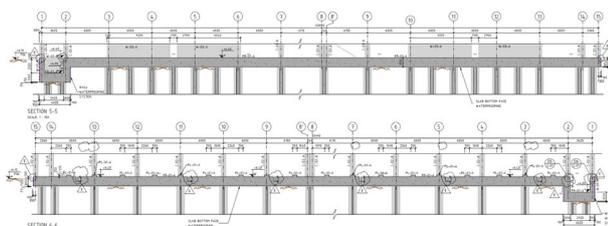


Figura 9. Sección transversal de la losa pilotada del edificio de ósmosis.

El edificio prefabricado cuenta con dos niveles (el primero a 9 metros de altura y la

cubierta a 13 metros sobre el primer nivel) y un mecanismo resistente a la acción sísmica de cuatro muros de cortantes paralelos al lado largo del edificio y de pórticos con pilares apantallados en la dirección transversal.

Los pilares tienen una sección de 700x1400mm y las vigas son postesadas y de dimensiones 800x1200mm. En dirección longitudinal, las vigas son también postesadas, pero de cantos menores.

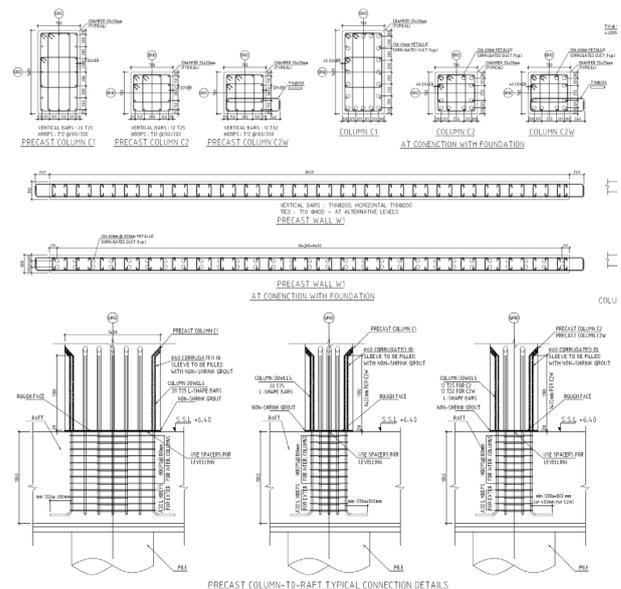


Figura 10. Detalles de la estructura prefabricada.

Una vez colocadas las columnas, las vigas postesadas en su posición, las conexiones entre vigas y columnas se hormigonan in situ con disposiciones de armados que proporcionan muy alta ductilidad frente a la acción sísmica y con hormigones de alta resistencia. Con esto se consiguen nudos perfectamente monolíticos y muy dúctiles para prevenir la rotura frágil.

### 1.5. Edificio Eléctrico Principal

El edificio eléctrico principal es el edificio desde el cual se opera y controla el funcionamiento de toda la Planta de Osmosis Inversa. Es por ello que la mayoría de cuadros de control, VSDs y demás equipos eléctricos, de éste y del resto de edificios, se concentran en este edificio.

Al albergar la mayoría de equipos eléctricos, el edificio eléctrico es considerado

uno de los edificios clave de la planta, y por ello se han exigido cumplir ciertos requisitos fundamentales que garanticen su correcto funcionamiento.

Las dimensiones en planta del edificio son 70m de largo y 42m de ancho, mientras que su altura total son 18m divididos en tres niveles.

La estructura es de hormigón armado y consta de cuatro bloques independientes unidos entre sí por una losa de cimentación, de 1.35m de canto, pilotada con un total de 315 pilotes de hormigón armado de 900mm de diámetro y longitudes de 16 y 23m.

El sistema sísmico resistente de este edificio está formado por pórticos en ambas direcciones principales, así como por muros de cortante, tanto exteriores como interiores, de 500mm de espesor.

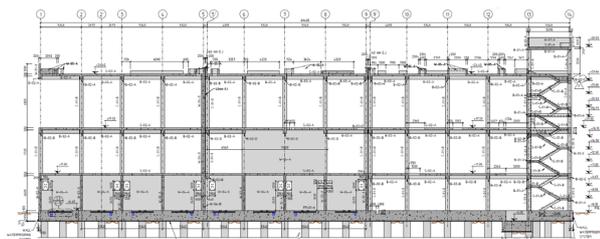


Figura 11. Edificio eléctrico principal. Sección transversal

## 2. Condicionantes de Diseño

Cuatro eran los condicionantes principales de diseño para las estructuras de la planta.

1) Durabilidad. Según pliego, se establecía una vida útil de la planta desaladora de 50 años. Para garantizar dicha vida útil se exigían recubrimientos de 75mm en todas las estructuras de hormigón expuestas al terreno o al agua, exigiendo una apertura de fisura de 0.20mm. Para las estructuras por encima del terreno se reducía el recubrimiento hasta un valor de 50mm, limitando además la apertura de fisura a 0.30mm. Adicionalmente, el armado debía estar protegido con un revestimiento de resina epoxi para las estructuras ubicadas bajo la cota de suelo terminado.

2) Sismo. El espectro de diseño estaba basado en la IBC 2009 [6], con aceleraciones en meseta de 0.75g.

3) Temperatura. Se impusieron incrementos térmicos en cubierta de 42°C y de 27°C en el resto del edificio. Los decrementos térmicos considerados fueron de -27°C.

4) Limitaciones de asientos. Se limitaron por pliego los asientos en todos los edificios de la planta a un valor de 25mm. Estos asientos debían incluir los asientos desde el inicio de la construcción de la planta (es decir con la totalidad del peso propio), el peso del agua, la sobrecarga, el 50% de las deformaciones sísmicas y las deformaciones térmicas.

## 3. Particularidades Estructurales

### 3.1. Sismo

Uno de los condicionantes de diseño más importantes del proyecto fueron las acciones sísmicas. A continuación, se exponen las particularidades más destacables del diseño sísmico para este proyecto.

#### 3.1.1. Espectros de Respuesta

Tal y como se expone en la publicación del The Concrete Society “*Guide to the Design of Concrete Structures in Arabian Peninsula*” (octubre 2008), no existe una práctica única, ni común, para evaluar los daños sísmicos en la región del Golfo Árabe. Así pues, se ha llevado a cabo un estudio comparativo de los espectros de respuesta obtenidos a partir de los códigos técnicos de diseño más empleados en la región; con el fin de utilizar el más conservador y quedar con ello del lado de la seguridad.

Se obtuvieron espectros de respuesta para los siguientes códigos:

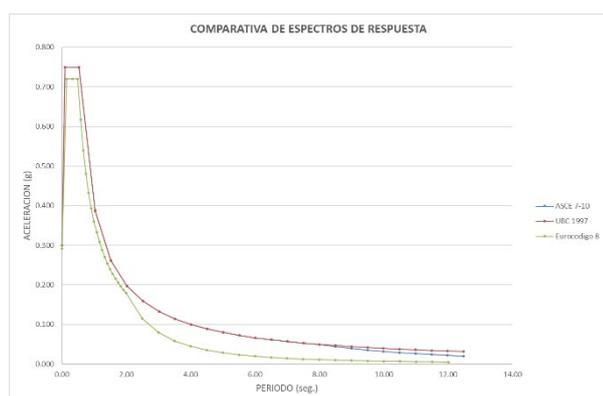
- UBC-1997 (Uniform Building Code) [5]
- IBC 2009 (International Building Code) [6]/ASCE 7-10 (American Standard of Civil Engineers) [4]

- Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1 and 4 [1]

En la Figura 12 se muestran los espectros obtenidos para cada normativa. De la gráfica se deduce que los espectros según el UC-1997 y el ASCE 7-10 [4] son iguales hasta alcanzar periodos altos ( $T > 8$  seg.), a partir de los cuales los valores de aceleraciones difieren levemente.

Por su parte, el espectro obtenido según el Eurocódigo 8 [1] difiere de los demás, mostrando una diferencia de aceleraciones en torno a un 10% menos para periodos inferiores a 2 segundos, aumentando esta diferencia gradualmente para periodos mayores llegando incluso a doblarse.

Según estos resultados, se decidió emplear el espectro de respuesta obtenido según el ASCE 7-10 [4], calculado a partir de los parámetros locales. A pesar de utilizar el espectro de respuesta obtenido según el ASCE 7-10 [4], las comprobaciones de diseño sísmico, tanto en estado límite último, estado límite de servicio y detallado de refuerzo, fueron llevadas a cabo según Eurocódigo 8 [1] Parte 1 para los edificios y Eurocódigo 8 [1] Parte 4 para los tanques del proyecto, al ser este un requisito del proyecto.



**Figura 12. Comparativa de Espectros de Respuesta entre códigos.**

### 3.1.2. Sistemas Resistentes

El sistema sísmico resistente empleado en la mayoría de los edificios es un “sistema dual equivalente a muro”. Para cumplir esta condición, los muros de cortantes añadidos a las estructuras porticadas debían tener una

resistencia a cortante en la base de los mismos que fuese superior al 50% de la resistencia total del edificio (sistema estructural completo). La resistencia a cortante que tienen estos muros varía entre el 70 y el 90% del total dependiendo del edificio analizado. Gracias a ello, se pudo aplicar un factor de comportamiento por clase de ductilidad media de 3.0 (correspondiente al sistema dual; DCM). Posteriormente, dicho valor se reducía a 2.4 debido a las irregularidades en planta y en altura que muestran casi la totalidad de los edificios.

### 3.1.3. Sismo en Depósitos en Estado Límite de Servicio

De acuerdo con los requerimientos del Eurocódigo 8 para el diseño sismorresistente de depósitos (Parte 4), se realizaron las comprobaciones necesarias para asegurar que, ante cargas sísmica, los depósitos cumplieran con los requisitos para el estado de limitación de daños:

- Leak tightness (estanqueidad): se comprobó la abertura de fisura máxima bajo la acción sísmica ( $w_{lim} = 0.20$  mm)
- Freeboard (resguardo): se verificó que el resguardo era adecuado bajo el desplazamiento vertical máximo de la superficie del líquido, para evitar daños en el techo debido a la presión del chapoteo o para evitar derrames en caso de no disponer de cubierta rígida.

## 3.2. Estructuras Sin Juntas

En los edificios principales y de mayor envergadura de la planta el diseño inicial planteado minimizaba la disposición de juntas de expansión, debido a la experiencia obtenida en plantas ya ejecutadas en las que se alcanzaron longitudes de hasta 140 m sin que la estructura fuera afectada negativamente por tensiones y deformaciones.

La eliminación de juntas se compensaba con un aumento en la cuantía de armado horizontal de refuerzo, requerida para controlar el ancho de fisura por temperatura y retracción,

cumpliendo con los requisitos de BS 8007: 1987 [2] Apéndices A y B.

Las ventajas que reúne un edificio sin juntas de expansión engloba el mejor comportamiento bajo cargas sísmicas (evitando colisión entre partes de los edificios), la eliminación del mantenimiento de las juntas y su riesgo de fugas a través de ellas, así como evitar asentamientos diferenciales entre diferentes zonas del edificio.

Finalmente, aunque la decisión del cliente fue la inclusión de juntas en los grandes edificios, para el caso de sus losas de cimentación sí se exigió la total continuidad del elemento. Las dimensiones de las losas de cimentación ejecutadas sin juntas de dilatación fueron las siguientes:

DAF: **105 m** x 35 m

RO: **84 m** x 46 m

DMF: **98.025 m** x 46.65 m

Edificio eléctrico: **70 m** x 42 m

### 3.3. Asientos

De acuerdo con el pliego, los asientos permitidos para estructuras ubicadas en áreas que no hubieran recibido ningún tratamiento de mejora del terreno no podía superar en ningún caso los 2.5cm.

Para el cumplimiento de esta limitación fue necesario adoptar, en la mayor parte de las cimentaciones, soluciones pilotadas con pilotes de diámetros de 0.90 y 1.20m que se prolongan en profundidades de entre 16 y 23m hasta empotrarse en roca.

La capacidad de estos pilotes además estaba limitada tanto por la capacidad vertical de los pilotes, como por el límite establecido en el pliego donde se indicaba que la compresión neta dentro del hormigón no debía nunca exceder los 5 Mpa.

### 3.4. Análisis Dinámico de Equipos

Debido a los grandes caudales que se manejan en la planta, era necesario contar con potentes

bombas de alta presión que fuesen capaces de impulsar el agua a lo largo de la misma, para realizar el proceso de desalación a lo largo de los diferentes edificios. Estos equipos son muy sensibles ante vibraciones y, por requerimientos de pliego, del propio cliente y de las características de funcionamiento óptimas de las propias bombas, era necesario realizar un análisis de vibraciones para asegurar que las mismas se encontraban dentro de unos límites de funcionamiento óptimos.

Se empleó la norma ACI-351-3R-18: "Report on Foundations for Dynamic Equipment" [3] gracias a la cual se optó por independizar los equipos sometidos a grandes vibraciones de las losas de cimentación y se decidió anclarlos en voluminosas zapatas con juntas para aislar dichas vibraciones del resto de las cimentaciones. Las dimensiones obtenidas, del orden de 5x2 m en planta y cantos de 2.5m, eran las necesarias para, según la norma, poder simular el conjunto suelo-zapata-equipo como un sistema muy rígido y evaluarlo en un modelo dinámico de 1 gdl.

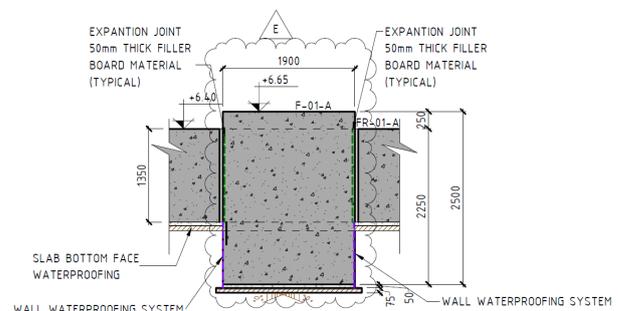


Figura 13. Esquema de zapata aislada.

Para ello, se empleó el método de Richart-Whitman gracias al cual se obtenían los muelles equivalentes que modelaban la rigidez del conjunto, así como el amortiguamiento equivalente del mismo, y permitían realizar un sencillo análisis de velocidades y aceleraciones a un sistema de 1gdl sometido a una carga periódica (la carga dinámica de funcionamiento de la bomba), obteniendo de esta manera las velocidades y aceleraciones máximas del conjunto en las tres direcciones del espacio (3 sistemas de 1 gdl).

Para comprobar si las vibraciones obtenidas eran aceptables, se usaron las tablas de velocidades y aceleraciones permitidas que la propia ACI-351-3R-18 [3] tiene implementadas, así como las recomendaciones y tablas de valores de velocidades máximas permitidas de ISO 10816-3:2009 [7].

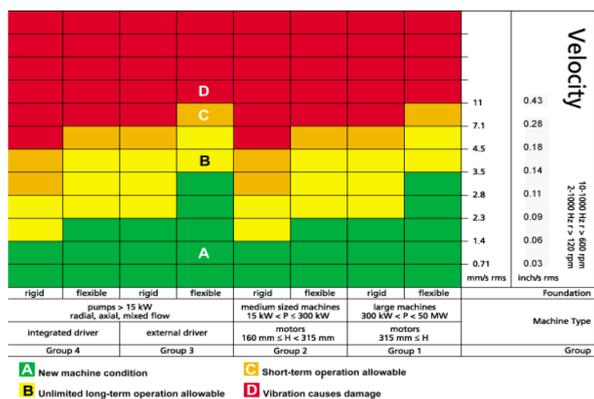


Figura 14. Valores permitidos de velocidades según ISO 10816-3:2009.

Comprobando que los valores de velocidades y aceleraciones obtenidas en los modelos de 1gdl se encontraban dentro de los límites marcados por ACI-351-3R-18 e ISO 10816-3:2009, el cliente validó el diseño estructural y el óptimo funcionamiento de las bombas centrífugas de alta presión.

### 3.5. Diseño Frente a Explosiones

Entre los equipos necesarios en el edificio eléctrico de la planta se encuentra una serie de transformadores ubicados individualmente dentro de habitaciones independientes. Estas habitaciones están conformadas por muros de hormigón armado que, por requerimientos del cliente, han de ser capaces de resistir las explosiones que pudieran producirse por la acumulación de gases inflamables, explosión de depósitos de líquidos inflamables o cualquier otra causa producto del funcionamiento de dichos transformadores.

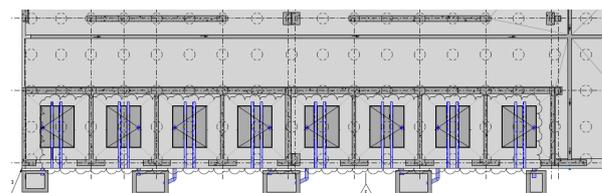


Figura 15. Habitaciones de transformadores dentro del edificio eléctrico principal.

Para el diseño de dichos muros frente a explosiones, se han seguido las indicaciones incluidas en la publicación del ASCE “Design of Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities” [8].

De los dos tipos de ondas que se pueden dar en una explosión, en este caso se utilizaron ondas de choque (shock waves), al considerarse más apropiadas para un recinto cerrado y la reducida distancia entre los muros y el foco de la explosión.

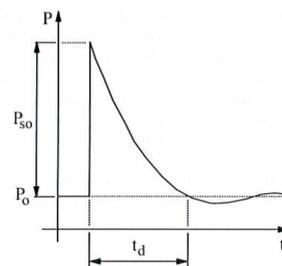


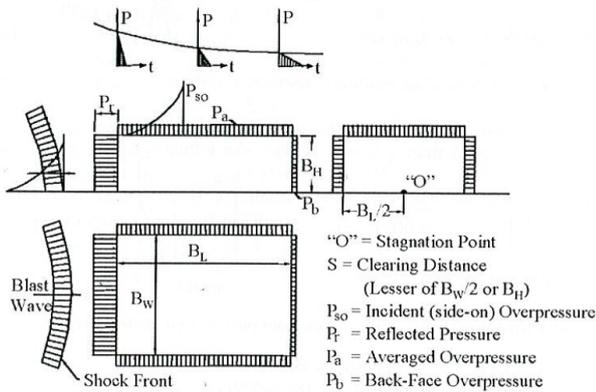
Figura 16. Forma característica de la onda de explosión de choque (shock wave). [Referencia: Design of Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities. Figure 3.3].

La onda de choque se define a partir de la sobrepresión lateral de pico,  $P_{so}$ , (peak side-on overpressure) y la duración de la explosión,  $t_d$ . Para este análisis se consideró un dato de sobrepresión lateral de pico  $P_{so} = 69 \text{ kN/m}^2$  y una duración de la explosión conservadora  $t_d = 0.05 \text{ seg}$ .

Cabe mencionar, que a la fase de onda de choque positiva le sigue una onda de choque negativa, que, en este caso, y habitualmente, no se tiene en cuenta al ser esta mucho más débil y gradual que la fase positiva.

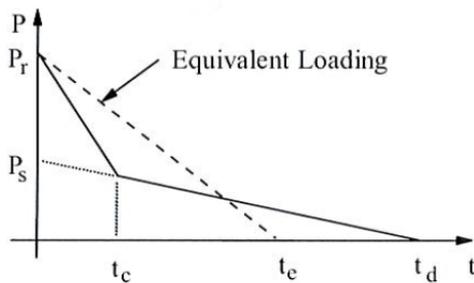
Una vez definida la onda de explosión, se definieron las fuerzas que inciden sobre cada uno de los muros como consecuencia de la onda de choque. El valor de estas fuerzas depende de la ubicación del foco de la explosión con

respecto al elemento sobre el que inciden, como se ilustra en la Figura 17.



**Figura 17. Esquema de fuerzas debida a una explosión sobre un edificio rectangular. [Referencia: Design of Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities. Figure 3.6]**

En el caso de los muros que rodean los transformadores, las fuerzas a considerar corresponden a lo que se conoce como presión reflejada,  $P_r$ , (reflected pressure). En la Figura 18 se muestra la forma bilineal de esa presión reflejada en el tiempo, así como su simplificación equivalente.

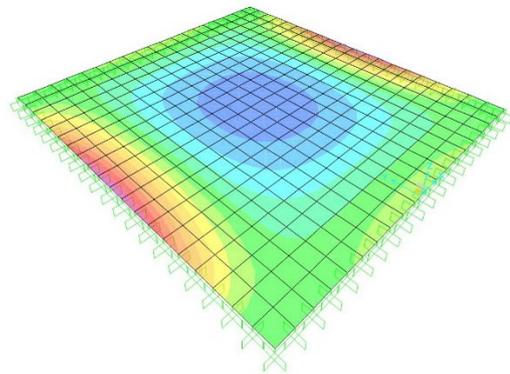


**Figura 18. Carga para muro frontal. [Referencia: Design of Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities. Figure 3.7]**

En cuanto a las propiedades de los materiales, cabe mencionar que sus rigideces se incrementaron aplicando los factores de incremento dinámico, DIF, y los factores de incremento de rigidez, SIF, que tienen en cuenta la mayor resistencia de los materiales bajo cargas dinámicas y la habitual infravaloración del límite elástico del acero en los códigos habituales, respectivamente.

Para determinar la respuesta dinámica de los muros frente a las acciones de la explosión,

se desarrollaron modelos de SAP2000 con sistemas de un solo grado de libertad (SDOF, por sus siglas en inglés). Se modelizó cada uno de los muros con su geometría, materiales y condiciones de contorno propios, con el objetivo de encontrar el valor mínimo de la fuerza de explosión que, aplicada a la superficie del muro, produce el fallo por capacidad a flexión por un lado ( $R_b$ ) y por capacidad a cortante por el otro ( $R_s$ ). La menor de las dos capacidades anteriores define cual es el comportamiento que gobierna el diseño de la estructura ( $R_u$ ), bien sea flexión o cortante.

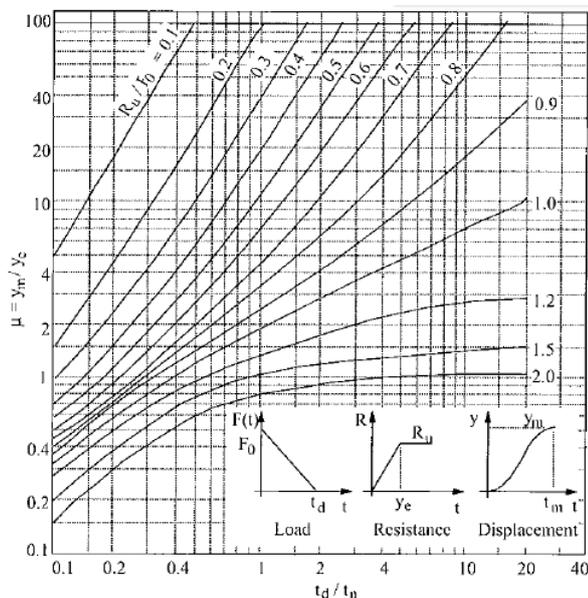


**Figura 19. Modelo SDOF de uno de los muros.**

Las deformaciones obtenidas de los modelos SDOF fueron comparadas con los límites incluidos en la Tabla 5.B.3 de la publicación de la ASCE [8]. El cumplimiento de estos límites garantiza el correcto funcionamiento de las estructuras analizadas frente a cargas explosivas. Estos límites son diferentes según el tipo de elemento estructural y el nivel de daño asumible a nuestra estructura, y son resultado de estudios y evidencias empíricas.

Para finalizar, se analizó la respuesta elasto-plástica del sistema SDOF utilizando el método de solución gráfico incluido en la publicación ASCE [8]. En este, se obtiene la demanda máxima de ductilidad ( $\mu_d$ ) y el tiempo máximo de respuesta ( $t_m$ ) de nuestro sistema SDOF a partir del uso de gráficas y de los valores obtenidos de la máxima fuerza aplicada ( $F_o$ ) y su duración ( $t_d$ ), la resistencia última obtenida ( $R_u$ ) y

el periodo del sistema equivalente SDOF ( $t_n$ ) obtenido de los modelos.



**Figura 20. Gráfica para método de solución gráfica para sistema SDOF elasto-plástico. [Referencia: Design of Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities. Figure 6.6]**

En los casos donde no se cumplían los límites de deformaciones en una primera instancia, se consiguió reducir la demanda máxima de ductilidad incrementando la resistencia última ( $R_u$ ) de la sección al disponer armadura adicional.

### **Agradecimientos**

A todo el equipo de Acciona Ingeniería que ha participado en el proyecto.

A Francisco Javier Nieto García, Luis Sánchez Lillo y María Paz Campo San Martín, de Acciona Agua.

A Jose Miguel Haro Tornero y Carla María Sancho Pérez por su ayuda y apoyo en la realización del proyecto.

### **Referencias**

- [1] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance.
  - BS EN 1998-1:2004: General rules, seismic actions and rules for buildings.
  - BS EN 1998-4:2006: Silos, tanks and pipelines
- [2] BS 8007 para el control de la fisuración en estructuras para contención de líquidos, 1987
- [3] ACI-351-3R-18: “Report on Foundations for Dynamic Equipment”
- [4] ASCE 7-10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures
- [5] UBC Uniform Building Code, 1997
- [6] IBC 2009: International Building Code
- [7] ISO 10816-3:2009 “Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situ”
- [8] ASCE: “Design of Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities” 2ª edición preparada por el Task Committee on Blast-Resistant Design of the Petrochemical Committee of the Energy Division of the American Society of Civil Engineers.