





Diseño y construcción de un búnker de Protonterapia en hormigón armado en Madrid

Design and construction of a reinforced concrete proton therapy bunker in Madrid

Beatriz Suárez Pardo a, Romina González Hierro b y Jorge de Prado Romero c y Carlos Castañón Jiménez d

^a Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Ingeniero de proyectos. IDOM Consulting, Engineering, Architecture.

RESUMEN

En el presente artículo se exponen los criterios de diseño y las técnicas de control de ejecución llevadas a cabo en la construcción del búnker del nuevo Centro Ambulatorio de Quirón Salud destinado a Tratamientos Oncológicos en Pozuelo de Alarcón, Madrid. Se trata de una estructura de carácter singular formada por grandes volúmenes de hormigón, que exigió un detallado análisis de los efectos térmicos, de retracción y fisuración a lo largo del tiempo. Además, con el fin de cumplir con los requisitos de sellado nuclear se realizó un control durante la puesta en obra mediante la monitorización de las temperaturas durante el hormigonado a lo largo del espesor de los muros.

ABSTRACT

This article provides the design criteria and control execution techniques implemented on the bunker construction in the New Ambulatory Centre Quirón Salud for oncological treatments in Pozuelo de Alarcón, Madrid. This is a singular structure composed of massive volumes of concrete, whose design required a detailed thermal, shrinkage and cracking analysis in the short and long term. Furthermore, in order to comply with the nuclear sealing requirements, a temperature monitoring throughout the walls was carried out during concreting and setting.

PALABRAS CLAVE: búnker, hormigón armado gran espesor, retracción, monitorización temperatura. **KEYWORDS:** bunker, great thickness reinforced concrete, shrinkage, temperatures monitoring.

1. Descripción del proyecto

1.1 Descripción general

El nuevo edificio se ha diseñado para albergar el primer centro de Protonterapia de España, con uso de Centro Ambulatorio para prestación de Tratamientos de Oncología. En él se ubicará una zona de consultas médicas y un búnker para el

acelerador de protones, junto con instalaciones correspondientes (Figura 1). La radioterapia de protones es el tratamiento de elección en muchos tipos de cáncer debido a su eficacia igual o superior a la radioterapia convencional y sus menores efectos secundarios, eliminados en gran medida.

El proyecto de redacción se desarrolló a lo largo del 2017 y la obra se llevó a cabo durante el año 2018 y principios del 2019. Se prevé que

^b Ingeniero Industrial. Ingeniero de proyectos. IDOM Consulting, Engineering, Architecture.

^c Ingeniero Técnico Industrial. Ingeniero de proyectos. IDOM Consulting, Engineering, Architecture.

d Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Director de estructuras. IDOM Consulting, Engineering, Architecture.

sea a finales de este mismo año 2019 cuando el centro entre en funcionamiento.

El proyecto hospitalario se concibió de una manera unitaria, pero tanto a nivel estructural como funcional se pueden distinguir en él dos zonas claramente diferenciadas:

- Una primera zona dedicada al tratamiento de Protones encerrada en un búnker de hormigón armado que se sitúa en la parte más resguardada de la parcela y cuya estructura de grandes espesores de hormigón en losas y muros representa la estructura más alta del edificio. El diseño de esta estructura, con fuertes condicionantes de carácter nuclear, es el objeto del presente artículo.

- Una segunda zona destinada al tratamiento ambulatorio con consultas y tratamiento de diagnóstico por imagen que se corresponde con una estructura regular de losas macizas y pilares de hormigón con luces de 6 m y 8,5 m. Este edificio se desarrolla en su gran mayoría en una única planta combinando diferentes alturas, y tiene una zona central con dos plantas y cubierta metálica para albergar las instalaciones.



Figura 1. Vista 3D renderizada del proyecto.

La estructura del búnker está formada por grandes volúmenes de hormigón, con espesores en losas de hasta 2.5 m y en muros de hasta 2.8 m, que lo convierten en una construcción con un comportamiento totalmente rígido y cerrado para poder garantizar los requisitos derivados de la radiación nuclear que tiene lugar en su interior (Figura 2 y 3).

Las dimensiones en planta son 28 m x 13 m y la losa superior se ubica a una altura de 7.05 m sobre la cual apoya una planta de estructura metálica con salas destinadas a instalaciones.

El diseño del búnker se hizo acorde a lo establecido y requerido por el operador nuclear

según el documento IBA Interface Building Document Standards IBD: Proteus One [1].

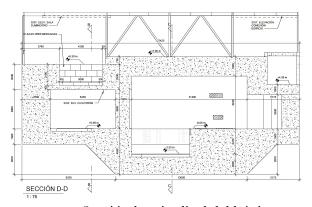


Figura 2. Sección longitudinal del búnker.

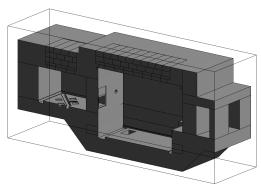


Figura 3. Corte longitudinal del modelo Revit 3D búnker.

La cimentación está formada por una losa de hormigón armado de 1,5 m de espesor en las zonas laterales a la cota de superior de -0,8 m y con un foso en su zona central de 2 m de profundidad a una cota superior de hormigón de -2.55 m. La transición entre ambas se realiza con un ángulo de 45°.



2. Cálculo del búnker

Este conjunto de piezas, alineadas en varias capas y apoyadas en la losa superior del búnker a media madera, debe garantizar también el sellado del búnker frente a la radiación (Figura 4).

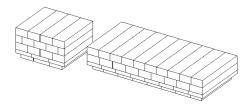


Figura 4. Vista 3D bloques prefabricados.

Como punto de partida en el diseño del búnker, se llevó a cabo un análisis minucioso de las cargas actuantes correspondientes a todos los equipos y maquinaria especial que integran el edificio. Para ello, además de la normativa correspondiente, se tomó también como referencia lo establecido en el documento IBA Interface Building Document Standards IBD: Proteus One [1]. Asimismo, también se tuvieron en cuenta las cargas correspondientes a la ejecución en el futuro de un posible segundo búnker adyacente al actual.

En la Figura 6 se muestra un ejemplo de los planos de carga del proyecto.

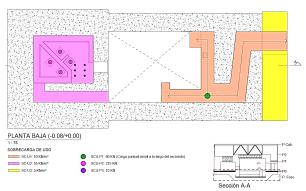


Figura 6. Plano de cargas.

Como dato particular, la losa inferior sobre la que apoya la máquina origen del disparo de los protones está preparada para resistir hasta 55 kN/m², correspondientes al peso del ciclotrón. En la imagen inferior (Figura 7) se puede observar la magnitud de dicha máquina, apoyada provisionalmente en el exterior antes de ser introducida y posicionada en el búnker.



Figura 7. Imagen del Ciclotrón.

2.2 Estudio de cimentación: asientos diferenciales

máximo desvío permitido a lo largo de la trayectoria del haz de protones debe ser menor a 3 mm. Para verificar esta condición, se realizó un análisis evaluando los asientos diferenciales entre los puntos de origen y fin de radiación, los cuales se corresponden con los Isocentros de las máquinas (Figura 8).

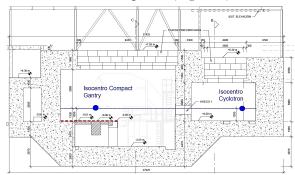


Figura 8. Posición de Isocentros.

La cimentación del búnker apoya en la unidad geotécnica UG-I. Terciario, en un terreno con carácter arenoso o granular. En este tipo de terrenos, los asientos debidos a la consolidación primaria se producen de forma instantánea, mientras que los debidos a la consolidación secundaria ocurren lentamente y se puede suponer, como límite superior, que supondrán un 20% del valor calculado para el corto plazo.

Con todo lo anterior, se modelizó la estructura con el fin de conocer el valor de los asientos instantáneos, considerando cuatro posibles escenarios en función del valor del módulo de balasto, según se muestra en la Tabla 1 y las Figuras 9 y 10.

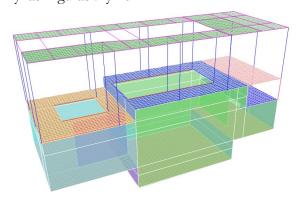


Figura 9. Vista 3D del modelo de cálculo.

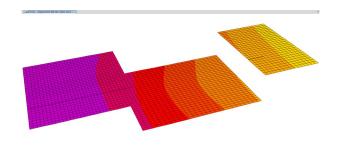


Figura 10. Deformación U_z en planta de cimentación.

Hipótesis	k (kN/m3)	
1	k = 27151,9 kN/m^3	Uniforme en toda la losa (Valor teórico - Informe Geotécnico).
2	$k = 13576$ kN/m^3	Uniforme en toda la losa (Mitad del valor teórico)
3	$k = 54304$ kN/m^3	Uniforme en toda la losa (Doble del valor teórico)
4	$k_{sup.}$ = 13575,9 kN/m3 $k_{inf.}$ = 27151,9 kN/m^3	Mitad del valor en losa superior que inferior

A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 2, la diferencia de asiento a largo plazo esperable acorde a los parámetros del informe geotécnico sería de 0,71 mm (Caso 1), lo que supone un factor de seguridad de algo más de 3,9. Para los otros casos, en los que se ha variado el valor del módulo de balasto, se obtendrían también valores de asiento inferiores a 3 mm.

Tabla 2. Resultados del análisis de diferencia de asientos entre los Isocentros en la losa de cimentación del búnker.

Hipótesis	ΔS largo plazo (mm)	Factor de seguridad (ΔS límite/ΔS largo plazo)
1	0.77	3.90
2	1.53	1.97
3	0.39	7.69
4	1.87	1.60

Por lo tanto, teniendo en cuenta las consideraciones expuestas con anterioridad, se estima que, con los datos de partida disponible y la metodología propuesta en la GCOC [2] (Guía de cimentaciones en obras de carretera), el asiento diferencial durante los dos primeros años de funcionamiento de la máquina será inferior a 3mm.

2.3 Estudio de retracción

Otro fuerte condicionante y/o requisito por requerimiento de blindaje frente a radiación está relacionado con los efectos del fenómeno de la retracción en los grandes espesores de los muros del búnker y la posible aparición de fisuras. Con el fin de cumplir con estos requisitos mediante la limitación de la fisura al máximo valor permitido por la normativa, se realizó un estudio detallado de la retracción a lo largo del tiempo. Para ello, se consideró por una parte la retracción a corto plazo (debida al proceso de curado del hormigón y a la gran diferencia de temperaturas generadas a lo largo de sus secciones) y por otra parte a largo plazo, debida al proceso de secado. En la Figura 11 se pueden observar los distintos muros que forman parte del búnker.

En cuanto a la normativa empleada, se usó como referencia lo establecido en la Instrucción de Hormigón Estructural EHE08 [3], el Eurocódigo UNE-EN 1992-1-1:2013 Proyecto de Estructuras de Hormigón [4] y también la guía de diseño y recomendaciones estructurales CIRIA C660 [5].

2.3.1. Apertura de fisura

La máxima apertura de fisura permitida se corresponde con 0,4 mm para una clase de exposición I, de acuerdo con la EHE08 [3]. Este valor se debe comparar con la suma de las dos componentes.

$$w_{max} \ge w_{(corto\ plazo)} + w_{(largo\ plazo)}$$
 (1)

2.3.2. Retracción a corto plazo

La retracción a corto plazo o retracción autógena (ϵ_{ca}) se ha calculado para los muros de hormigón

según lo establecido en la guía de diseño CIRIA C660 [5] y ampliado con información obtenida de la ACI-207.2R_07 [6] y ACI-207.2R_95 [7].

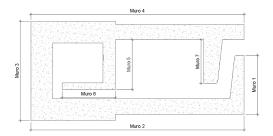


Figura 11. Esquema muros búnker.

A través de una hoja de cálculo propia elaborada en base a esta guía, que tiene en cuenta la geometría, parámetros de contorno y ambientales, y un armado base asignado, se obtienen los distintos valores del ancho de fisura a corto plazo:

Tabla 3. Resultados de apertura de fisura por retracción autógena **E**ca.

Muro	Armadura horizontal	W corto plazo (mm)
1 (e=1.60 m)	ф25/100	0.08
2/4 (e=2.00 m)	ф25/100	0.08
2/4 (e=2.00 m)	Ф32/100	0.07
2/3/4(e=2.80 m)	Ф32/100	0.07
5 (e=1.60 m)	ф25/150	0.10
6 (e=0.86 m)	ф20/150	0.10

Como se puede apreciar en la tabla anterior, en todos los casos el valor de apertura de fisura está comprendido entre 0,07 mm y 0,10 mm.

2.3.3. Retracción a largo plazo

Para estimar la apertura de fisura a largo plazo o retracción de secado (ε_{cd}) se calcularon las deformaciones correspondientes a las temperaturas equivalentes para cada uno de los muros, de acuerdo con lo establecido en el Eurocódigo EN 1992-1-1:2013 Anexo B.1 [4].

Los valores tanto del coeficiente de fluencia (φ(t,t0), t=vida útil) como de la temperatura equivalente obtenidos para los distintos muros del búnker son los siguientes:

Tabla 4. Coeficiente de fluencia $\phi(t,t0)$ y Temperaturas equivalentes (ΔT_{cd}) a la deformación a largo plazo (ϵ_{cd}).

Muro	ΔT_{cd}	φ(t,t0)
Muro 0.86 m	-32.0 °C	3.6
Muro 1.60 m	-29.6 °C	3.4
Muro 2.00 m	-28.2 °C	3.3
Muro 2.80 m	-25.4 °C	3.2

Una vez obtenidas las temperaturas, éstas se asignaron en forma de carga térmica a los muros en el programa de cálculo (Figura 12). En él, los muros se modelizaron considerando un apoyo lineal en toda su base, restringiendo de esta forma la deformación y obteniendo resultados más conservadores.

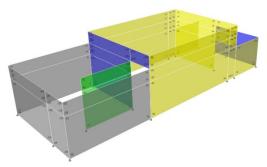


Figura 12. Temperaturas de retracción.

$$E_{\text{c,eff}} = \frac{E_{\text{cm}}}{1 + \varphi(\infty, t_0)}$$

Considerando una vida útil de la estructura de 75 años se obtuvieron los siguientes valores en función del espesor de hormigón:

Tabla 5. Módulo de elasticidad eficaz

Muro	Eff (t =75 años)
Muro 0.86 m	11789 MPa
Muro 1.60 m	12202 MPa
Muro 2.00 m	12337 MPa
Muro 2.80 m	12528 MPa
-	

2.3.4. Dimensionamiento de muros: diseño de armadura

Una vez obtenidos los esfuerzos axiles (Figura 13) a lo largo del muro generados por la retracción, se llevó a cabo el cálculo de la apertura de fisura a largo plazo. En aquellos casos en los que la armadura asignada (requerida por los esfuerzos de cálculo) no fuese suficiente para limitar la apertura de fisura total a 0,4 mm, esta se debió incrementar para asegurar esa condición.

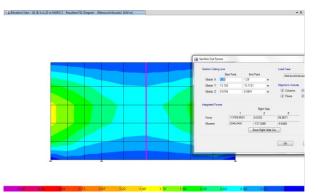


Figura 13. Esfuerzo axil en Muro 1

En la siguiente tabla se puede observar la armadura dispuesta finalmente en cada muro para garantizar el límite de fisura, y los valores de esta (corto plazo, largo plazo y total):

Tabla 6. Armadura horizontal y apertura de fisura total.

Muro	Armadura horizontal	w corto plazo (mm)	w _{largo} plazo (mm)	w total (mm)
1 (1.6 m)	ф 25 c/0.10	0.08	0.20	0.28
2 (2.8 m)	ф 32 с/0.10	0.07	0.20	0.27
2 (2.0 m)	ф 25 с/0.10	0.08	0.31	0.39
3 (2.8 m)	ф 32 с/0.10	0.07	0.20	0.27
4 (2.8 m)	ф 32 c/0.10	0.07	0.28	0.35
4 (2.0 m)	ф 25 c/0.10	0.08	0.31	0.39
5 (1.6 m)	ф 25 c/0.15	0.10	0.22	0.32
6 (0.86 m)	ф 20 c/0.15	0.10	0.25	0.35
7 (2.0 m)	ф 25 с/0.10	0.08	0.28	0.36

La siguiente imagen (Figura 14) muestra la colocación de la armadura en los muros pudiéndose apreciar su gran espesor a escala real.



Figura 14. Colocación de armadura en muros.

3 Estudio de temperaturas durante el hormigonado

3.1 Análisis teórico de temperaturas esperadas

El control de la apertura de fisura derivada del fenómeno de retracción a corto plazo causado por incrementos térmicos debe ser especificado en las obras con grandes volúmenes de hormigón, permitiendo ciertos valores de picos de temperatura (T_{max}) en la zona central del elemento e incrementos diferenciales a lo largo de la sección (ΔT_{max}) durante un periodo posterior al hormigonado (Figura 15).

Para ello, se propuso la monitorización del control de temperaturas estableciendo puntos de control en el hormigón por medio de termopares en los muros del búnker.

Dichas medidas se tomaron para cada uno de los puntos tanto el centro de la sección (T_p) como en las zonas situadas a una profundidad igual a la de las armaduras superficiales $(T_{s1}\ y\ T_{s2})$. Además, se registró también la temperatura ambiental (T_a) durante todo el proceso de hormigonado.

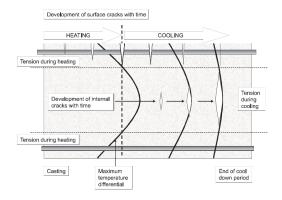


Figura 15. Esquema del desarrollo de la fisura a lo largo de la sección de hormigón. CIRIA C660 [5].

Los valores de temperatura medidos permiten calcular los siguientes parámetros de control de ancho de fisura y resistencia:

- A. La máxima temperatura pico (T_{max}) del hormigón durante su proceso de hormigonado.
- B. La diferencia entre la temperatura pico y la temperatura ambiente (ΔT_1) en un mismo instante de tiempo.
- C. El gradiente interno de temperatura (ΔT max), es decir, la diferencia de temperatura entre el centro de la sección y la superficie.

Además, para cada fase de hormigonado se midió también el valor de los siguientes parámetros:

- D. La densidad de cemento de la mezcla
- E. La resistencia cilíndrica característica del hormigón (f_{ck})
- F. La temperatura de colocación del hormigón (T_o)

Se realizó un estudio previo para estimar los valores anteriormente mencionados y usarlo como referencia para posteriormente compararlos con los proporcionados por las mediciones in situ. En la siguiente tabla (Tabla 7) se muestran los valores esperados de los parámetros de control para cada uno de los muros.

Tabla 7. Valores de temperaturas esperadas durante el hormigonado.

Muro	To (°C)	Ta (°C)	T max (°C)	T1 max (°C)	ΔT max (°C)
M1 (1.60 m)	10	9.5	60.8	51.3	51.3
M2A (2.8 m)	10	11	63.6	52.6	52.6
M2B (2.0 m)	10	11	61.0	50.0	50.0
M3 (2.80 m)	10	11	63.6	52.6	52.6
M4A (2.8 m)	10	11	63.6	52.6	52.6
M4B (2.0 m)	10	11	61.0	50.0	50.0
M5 (1.60 m)	10	11	60.8	49.8	49.8
M6 (0.86 m)	10	11	58.9	47.9	47.9
M7 (2.00 m)	10	11	61.0	50.0	50.0

Por otra parte, también se obtuvieron los valores límites de los parámetros de control anteriormente mencionados para cada uno de los muros permitiendo el valor máximo de apertura de fisura de 0,4 mm (Tabla 8).

Tabla 8. Temperaturas límite esperadas.

Muro	Tºmax (°C)	ΔT°1 max (°C)	ΔT° max (°C)
M1 (1.60 m)	134.5	125	148
M2A (2.8 m)	79	68	60
M2B (2.0 m)	111	100	105
M3 (2.80 m)	79	68	61
M4A (2.8 m)	72	61	56
M4B (2.0 m)	109	98	105
M5 (1.60 m)	143	132	155
M6 (0.86 m)	131	120	205
M7 (2.00 m)	73	62	68

3.2 Monitorización de temperaturas durante el hormigonado

Se colocaron 3 termopares tipo "J" en una sección del muro 4 (primer muro hormigonado) situada a 2,40 m. de la cota superior. Uno de los termopares se colocó en el centro de la sección del muro (Figura 17) y los dos restantes junto a los paramentos exteriores, a la altura de la capa exterior de las armaduras. Estos termopares se conectaron a un equipo de adquisición de datos programado para registrar cada 5 minutos las medidas de los termopares y la temperatura

ambiente (Figura 18). En la Figura 16 se indica de forma esquemática la situación de la instrumentación colocada que verse en las fotografías siguientes.

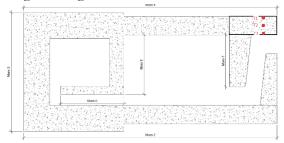


Figura 16. Planta con la ubicación de los termopares.



Figura 17 Termopar instalado en el centro del núcleo.



Figura 18. Equipo de adquisición de datos.

3.3 Resultados obtenidos y conclusiones

Se registraron valores de las temperaturas cada 5 minutos durante 103 horas posteriores al inicio del hormigonado.

En la siguiente tabla (Tabla 8) se muestra los valores máximos de las temperaturas registradas y en la Figura 19 puede observarse la evolución en el tiempo. Se puede observar que la temperatura máxima se alcanza alrededor de las 48 horas.

Tabla 8. Temperaturas máximas registradas.

Termopar exterior (T1)	Termopar núcleo (T2)	Termopar interior (T3)	Ambiente
54.3ºC	55.1ºC	45.8ºC	28.7ºC

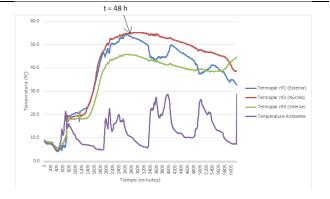


Figura 19. Evolución de las temperaturas en el tiempo.

En base a la metodología seguida y formulación empleada, se ha comprobado que los resultados de los valores de temperaturas obtenidos son inferiores a los esperados, siendo éstos últimos más conservadores. Por lo tanto, el resultado fue satisfactorio y no hubo que tomar ninguna medida adicional durante le ejecución de los muros.

Referencias

- [1] IBA Interface Building Document Standards IBD: Proteus One.
- [2] Guía de cimentaciones en obras de carretera
- [3] Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08.
- [4] UNE-EN 1992-1-1_2013_Proyecto de Estructuras de Hormigón.
- [5] CIRIA C660_Early-age thermal crack control in concrete.
- [6] ACI-207.2R_07_Report on Thermal & Volume Change Effects on Cracking of MC.
- [7] ACI-207.2R_95 Effect of Restrain, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of MC.