

ESTUDIO DE LA ACTIVACIÓN DE BLINDAJES EN CENTROS DE PROTONTERAPIA EN FUNCIÓN DEL TIPO DE HORMIGÓN



GONZALO F. GARCÍA-FERNÁNDEZ

Profesor
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



NURIA GARCÍA HERRANZ

Profesora titular
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ÓSCAR CABELLOS

Catedrático
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



EDUARDO GALLEGO

Catedrático
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

INTRODUCCIÓN

La protonterapia es una modalidad de radioterapia que utiliza haces de protones acelerados para el tratamiento de tumores, y es una tecnología que ofrece mejoras dosimétricas en determinados casos clínicos debido a que los protones son partículas cargadas, y en su interacción con los tejidos siguen la denominada *Curva de Bragg*, de forma que depositan la mayor parte de su energía, es decir dosis, al final de su trayectoria, en el llamado *Pico de Bragg*. Estos beneficios terapéuticos, junto con el gran desarrollo tecnológico, que ha posibilitado la reducción significativa del tamaño y precio de los equipos, han provocado un crecimiento exponencial de los centros de protonterapia a nivel mundial, y una gran expansión en marcha, con más de cien en funcionamiento hoy en día, y más de setenta nuevos proyectos en diferentes fases de ejecución. Las previsiones futuras actuales estiman que el número de centros de protonterapia se duplicará en los próximos cinco años [1].

A pesar de sus más de sesenta años de existencia, la llegada y expansión de la terapia de protones en España ha sido muy reciente. Tal y como se recoge en la **Figura 1**, el primer centro comenzó a funcionar en diciembre de 2019, y el segundo en abril de 2020, ambos privados y situados en Madrid (estrellas azules). Un tercer centro, el primero público, financiado con fondos europeos, se encuentra en fase

de construcción en Santander (estrella verde). Finalmente, gracias a la donación de 280 M€ de la Fundación Amancio Ortega al Sistema Público de Salud, hay otras diez nuevas salas en diferentes etapas de planificación y ejecución (estrellas rojas), dos en Madrid, dos en Barcelona, una en Valencia, una en Sevilla, una en Málaga, una en Santiago de Compostela, una en San Sebastián, y una en Las Palmas de Gran Canaria [2].

Los centros de protonterapia son instalaciones radiactivas en las que existen importantes campos de neutrones, y en menor medida de fotones, denominados ambos de forma genérica como radiación secundaria. Esta radiación dispersa proviene, tanto de la fase de cascada intranuclear, como de la fase de evaporación, de las reacciones de espalación provocadas por los protones energéticos del haz terapéutico, *radiación primaria*, en su interacción con los elementos de la línea, equipos y pacientes. La energía de los neutrones presentes en la instalación se encuentra entre la energía máxima de los protones, 230 MeV, y la energía térmica, 10^{-9} MeV [3].

Algunos de los isótopos estables presentes en los materiales de la instalación pueden experimentar reacciones de captura con los neutrones dispersos y transmutarse en radioactivos, a través del fenómeno de activación, decayendo mediante emisión de radiación gamma, principalmente, y en



Figura 1. Advenimiento y expansión de la protonterapia en España.

menor medida partículas beta, conocida de forma genérica como radiación inducida. La radiación primaria y secundaria solo se produce con la instalación en marcha, modo *beam-on*, por lo que muchas veces se le denomina radiación pronta o inmediata, mientras que la radiación inducida sigue presente con el acelerador parado, modo *beam-off*, incluso años después de la clausura de la instalación, por lo que también se denomina radiación retardada [4].

Los dos factores principales para reducir la activación serían, por una parte, disminuir las pérdidas en la línea de protones que generan gran cantidad de campos neutrónicos, denominados neutrones externos, y por otra, utilizar materiales de blindaje de baja activación [5]. Sin embargo, en muchos casos, la solución no es inmediata, puesto que para el blindaje habitualmente se emplean hormigones convencionales con alto índice de activación, debido a su menor coste, y además, aunque se redujeran las pérdidas y los neutrones externos, los neutrones generados en la interacción de los protones con el paciente, denominados neutrones internos, son inevitables [6]. La radiactividad inducida permanece en los muros durante años, incluso décadas, después de su cierre, por lo que sería aconsejable realizar un estudio del ciclo de vida completo de explotación del centro, en la fase inicial de los proyectos, para analizar las opciones en la selección del material de blindaje, estimar el inventario radiactivo que podría generarse, y calcular los costes de desmantelamiento en cada caso, ya que pueden suponer una parte relevante de la inversión total [5, 7].

Las disposiciones de la Comisión Europea [8], así como la regulación nacional [9], especifican que la solicitud de autorización de operación de una instalación radiactiva de segunda categoría debería ir acompañada de un plan de desmantelamiento y cierre o de clausura, donde se debería describir la disposición final prevista de los residuos generados, e incluir el estudio del coste y las previsiones económicas y financieras para garantizar el cierre. Las recomendaciones para estudiar la selección de materiales de blindaje en las fases tempranas de los proyectos con aceleradores se encuentran igualmente recogidas en las principales guías y estándares de referencia internacional [10, 11, 12].

El objetivo de este trabajo ha sido evaluar la activación en el blindaje de centros de protones, comparando cuatro tipos diferentes de hormigón, Portland convencional (HPOR), de alta densidad con magnetita (HMAG), de alto contenido en hidrógeno con colemanita (HCOL), y finalmente, de baja activación (HBA1). En esta reseña se incluyen solamente las instalaciones con sincrociclotrón, que será el tipo de tecnología mayoritariamente utilizado, en once de los trece centros programados (diez públicos y uno privado). El trabajo se enmarca en el proyecto *Contribuciones a la protección radiológica operacional y la dosimetría de neutrones en centros compactos de protonterapia* (CPTC), iniciado en el año 2017 por el Área de Ingeniería Nuclear (ETSII) de la Universidad Politécnica de Madrid, cuyos resultados principales se recogen en tesis doctorales, trabajos fin de máster y publicaciones internacionales [2, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20].

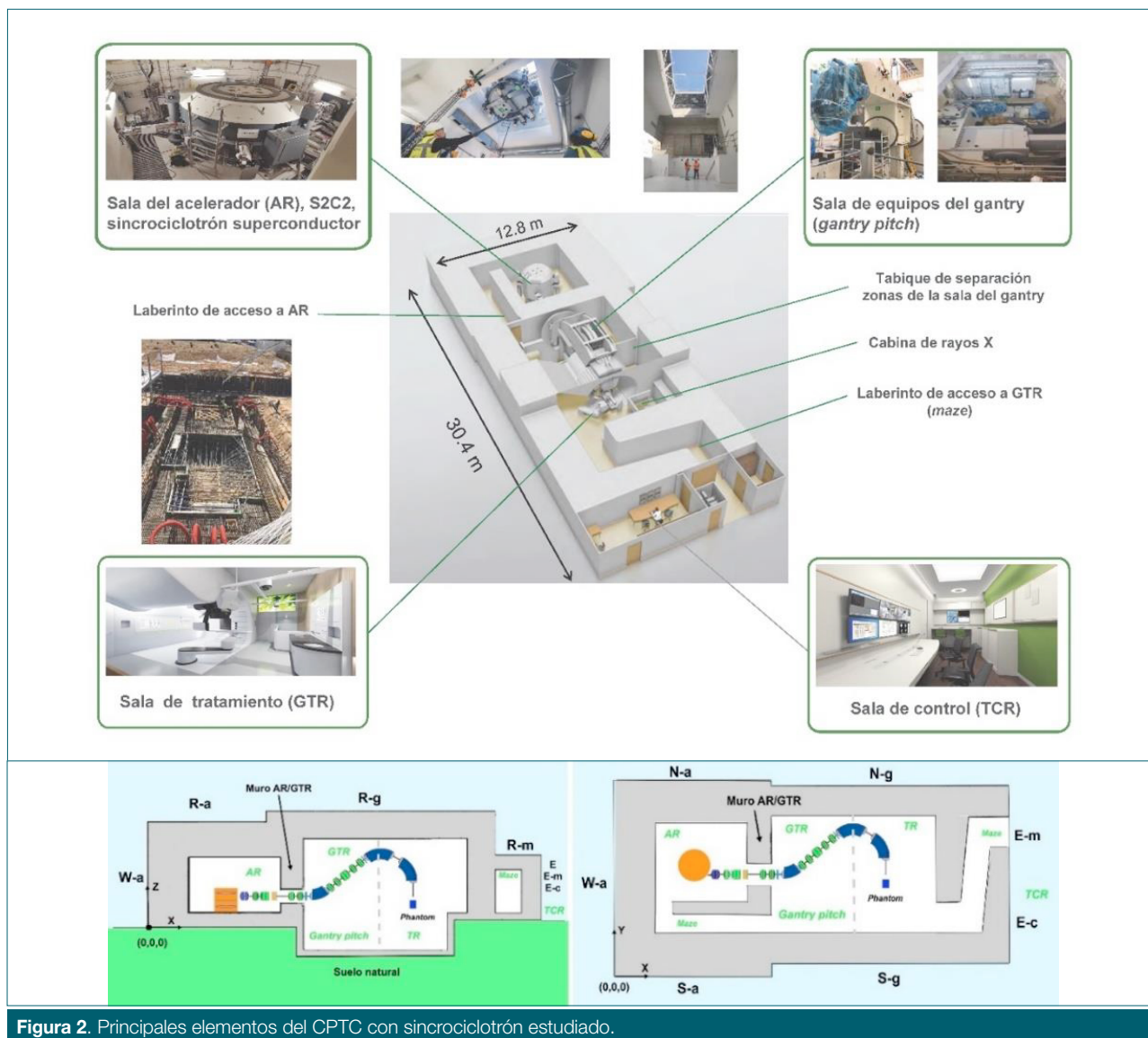


Figura 2. Principales elementos del CPTC con sincrociclotrón estudiado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Centro de protonterapia considerado en el estudio

Las características principales del Centro Compacto de Terapia de Protones (CPTC) consideradas en este trabajo, así como la identificación de muros y espacios [2, 16], se resumen en la **Figura 2**.

La carga de trabajo anual igual empleada es igual a la suma de las pérdidas en los elementos de la línea de protones, 88.540 nA h/año ($2 \cdot 10^{18}$ protones/año). Se ha asumido una irradiación continua durante 20 años, sin tener en cuenta periodos de enfriamiento (hipótesis conservadora), de forma que la intensidad utilizada en los cálculos ha sido equivalente a una intensidad continua, $I = 6,31 \cdot 10^{10}$ p/s [2].

Con los datos del *workload* (carga de trabajo) y los escenarios considerados, se han calculado los campos neutrónicos dispersos y el espectro neutrónico, φ , en cada zona o muro del centro [2, 16].

Como ejemplo de cálculo, la **Figura 3** recoge el espectro

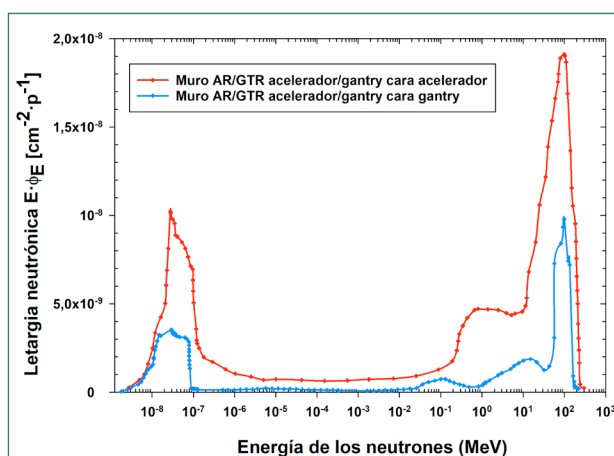


Figura 3. Espectro neutrónico obtenido en el muro AR/GTR.

de neutrones en la pared entre la sala de tratamiento y la sala de aceleradores, AR/GTR, que es la pared más exigente en términos de activación.

Elemento	Portland (HPOR)	Magnetita (HMAG)	Colemanita (HCOL)	Baja activación 1 (HBA1)
H	0,01	0,118	0,891	0,0072
C	0,001	0,0016	0,0003	0,089
O	0,53	0,5292	0,0727	0,4776
Fe	0,014	0,2736	0,00005	0,0006
Ca	0,044	0,0309	0,0031	0,40492
Si	0,337	0,0263	0,0011	0,012
Al	0,034	0,007	0,0003	0,0027
Mg	0,002	0,007	0,0006	0,0024
Na	0,016	0	0	0,0008
B	0	0	0,029703	0
K	0,011	0,0013	0,00008	0,0003
Mn	0	0,0001	0	0
Ti	0	0,0009	0	0
V	0	0,0002	0	0
S	0	0,0007	0,000008	0,0009
P	0	0,0022	0	0
Sr	0	0	0,000041	0,0003
N	0	0	0,000018	0
Cu	0	0	0	0,00008
Ru	0	0	0	0,0002
Densidad (g/cm ³)	2,30	4,10	2,12	2,18

Tabla 1. Componentes considerados en los hormigones estudiados (fracción atómica).

Elemento	Portland (HPOR)	Magnetita (HMAG)	Colemanita (HCOL)	Baja activación 1 (HBA1)
Co* (ppm)	21,9	21,9	21,9	0,2066
Eu** (ppm)	1,08	1,08	1,08	0,0316
Cs*** (ppm)	3,21	3,21	3,21	0,0942

- * El cobalto se incluye como impureza de los aceros de las armaduras. Composición isotópica, ⁵⁹Co, 100%
- ** Composición isotópica, ¹⁵¹Eu, 48%, ¹⁵²Eu, 52%
- *** Composición isotópica, ¹³³Cs, 100%

Tabla 2. Impurezas consideradas en los hormigones estudiados (ppm en peso).

Tipos de hormigón considerados en el estudio

Los principales componentes de los hormigones se recogen en la siguiente **Tabla 1**.

La activación por reacciones de captura está dominada por las impurezas o trazas de materiales. Las principales impurezas consideradas en el estudio se recogen en la **Tabla 2**.

Los datos de la composición de los diferentes hormigones anteriores se han obtenido de las siguientes referencias: hormigón Portland convencional, HPOR, de [21], hormigón con magnetita, HMAG, y hormigón con colemanita, HCOL, de [22], y finalmente para el hormigón de baja activación, HBA1, de [23].

Códigos de Monte Carlo y datos nucleares

Las simulaciones se han llevado a cabo con códigos Monte Carlo, MCNP6 [24] y PHITS [25], considerando un número de historias lo suficientemente alto para obtener incertidum-

bres estadísticas inferiores al 3%, aunque en la mayoría de los cálculos dicho error está por debajo del 1%. Teniendo en cuenta que la energía de las reacciones estudiadas alcanza hasta los 230 MeV, se han empleado diferentes librerías de datos y modelos físicos, en función del código [26, 27, 28, 29, 30].

Las reacciones de captura con neutrones de baja energía se producen en cualquier instalación radiactiva con presencia de neutrones, con independencia de su energía. Las secciones eficaces de captura neutrónica de los componentes comunes en cementos, tales como H, C, O, Fe, Ca, Si y Al, no son significativamente elevadas, sin embargo contienen trazas de impurezas (partes por millón, ppm) que incluyen elementos con secciones eficaces muy altas, produciendo isótopos de vida relativamente larga con un papel relevante en el inventario radiactivo final, entre los que destacarían, ¹⁵¹Eu(n,γ)¹⁵²Eu, ¹⁵³Eu(n,γ)¹⁵⁴Eu, ⁵⁹Co(n,γ)⁶⁰Co, ¹³³Cs(n,γ)¹³⁴Cs [31]. Sin embargo, en instalaciones con aceleradores donde

se producen neutrones de energía superior a 30 MeV, existe un segundo canal exclusivo de altas energías para producir isótopos radiactivos, a través de los procesos de dispersión inelástica y espalación. Estas reacciones son inducidas en elementos habituales de cementos, como Na, Al, Mg, Si, generando radionucleidos como Na-22, con una vida media de $T_{1/2}=2,6$ años, a través de diversos canales, como $^{23}\text{Na}(n,x)$, $^{27}\text{Al}(n,x)$, $^{24}\text{Mg}(n,x)$, y/o $^{28}\text{Si}(n,x)$, respectivamente. Otros radionucleidos relevantes producidos por espalación son Mn-54 y Sc-46 [32].

La IAEA recomienda el siguiente criterio para identificar si un material compuesto debe ser considerado como un residuo radiactivo o no [33, 34]:

$$CI = \sum_i^n \frac{a_i}{(CL)_i} \leq 1$$

En dicha expresión, a_i es la actividad específica, o concentración de actividad, en Bq/g, del radionucleido i -ésimo en el material, $(CL)_i$ es el límite de exención (*clearance level*), del radionucleido i -ésimo, y n es el número de especies de radionucleidos presentes en el material considerado. Si el índice de desclasificación (CI, *clearance index*) es mayor de uno, se excede el nivel de desclasificación, y el material deberá ser tratado como residuo radiactivo.

RESULTADOS

Comportamiento frente a la atenuación

Con el objetivo de verificar que todos los hormigones es-

tudiados cumplen las condiciones de atenuación necesarias desde el punto de vista del blindaje, se recoge en la siguiente **Figura 4** la curva de atenuación de dosis, en función del tipo de hormigón seleccionado, y calculada con la librería ENDF/B VII.1, para el muro W-a, alrededor del acelerador, uno de los más exigentes con respecto a la dosis equivalente ambiental, $H^*(10)$.

Como se aprecia, los cuatro hormigones verifican las condiciones necesarias de atenuación de dosis.

Isótopos generados y curvas de activación de muros

La estimación de la cantidad de isótopos radiactivos generados en los muros del centro de protonterapia, se ha llevado a cabo estudiando las tasas de reacción de los neutrones que conducen a los isótopos encontrados habitualmente en los desmantelamientos de aceleradores de media y alta energía [35].

La carta de isótopos producidos en el CPTC, en un hormigón tipo HPOR, durante la irradiación (modo *beam-on*), calculados con el *tally T-Chain* de PHITS, se muestran en la **Figura 5**.

A partir de los cálculos anteriores de las interacciones de los neutrones con los blindajes, y las tasas de reacción para la generación de isótopos radiactivos, el resultado obtenido son las denominadas *curvas de activación*, es decir, la evolución de la actividad en cada muro, en función del tiempo de irradiación.

En la **Figura 6** se recoge la curva de activación obtenida para los principales radionucleidos, del muro AR/GTR.

En la gráfica, el índice de exención, CI (*clearance index*)

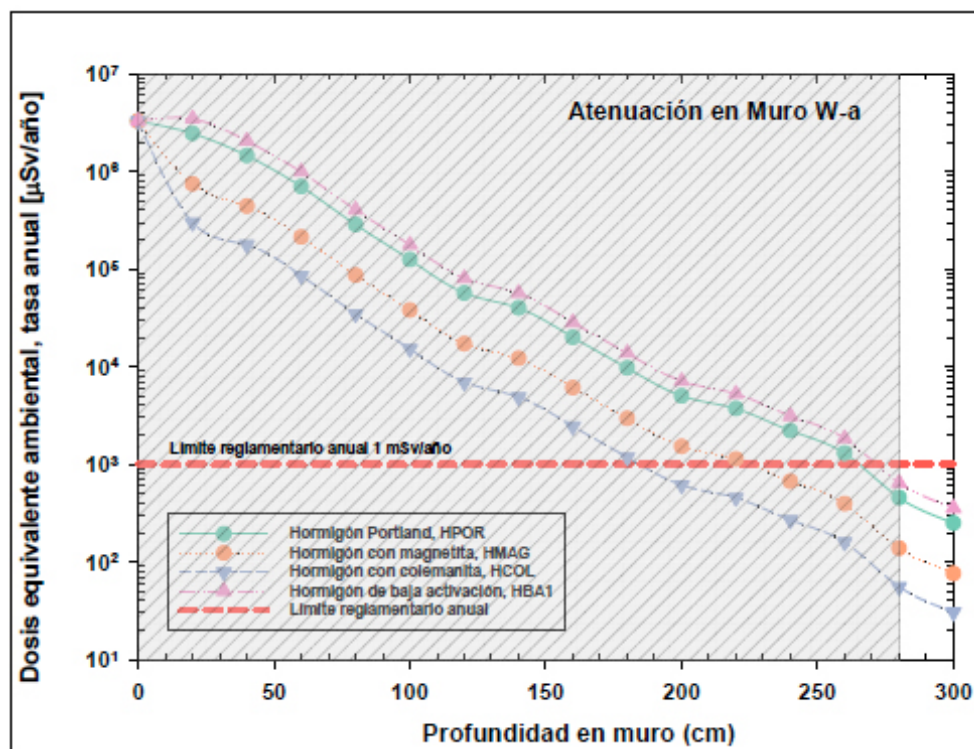


Figura 4. Comportamiento frente a la atenuación en el muro W-a.

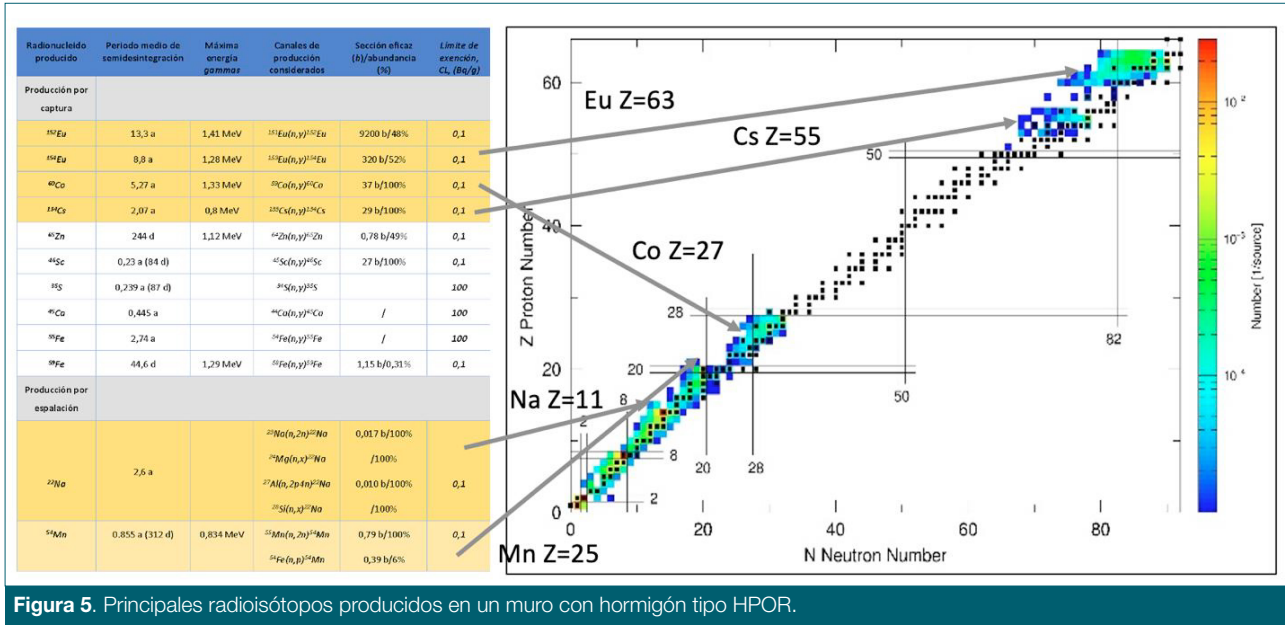


Figura 5. Principales radioisótopos producidos en un muro con hormigón tipo HPOR.

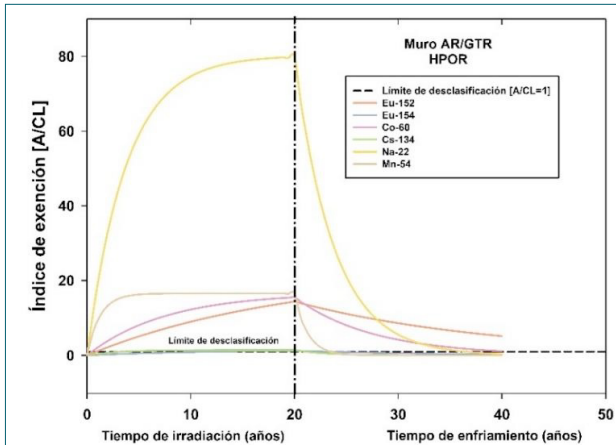


Figura 6. Curva de activación del muro AR/GTR con HPOR y librería ENDF/B VII.1.

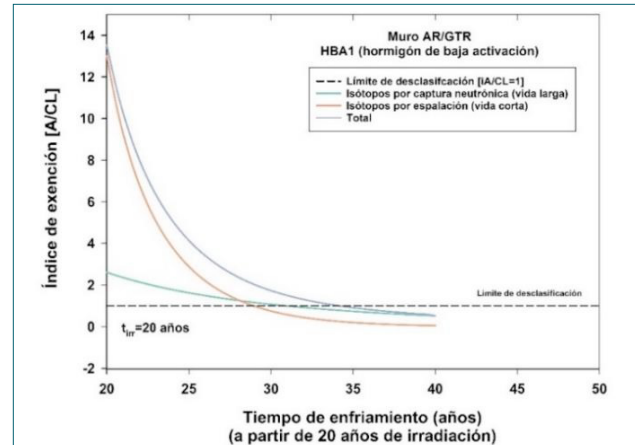


Figura 7. Curva de enfriamiento del muro AR/GTR con HBA1 y librería ENDF/B VII.1.

está indicado con una línea negra horizontal a trazos, en el valor de la unidad. Se observa el comportamiento diferente de los isótopos producidos por captura, como Eu-152, Eu-154, Co-60 y Cs-134, de vida intermedia y larga, y los generados por espalación, como Na-22 y Mn-54, de vida corta.

Para mostrar una comparativa con otro material de blindaje, los resultados considerando hormigón de baja activación, HBA1, se muestran en la siguiente **Figura 7**.

Se observa una reducción significativa de los isótopos de vida larga, con un índice de exención, CI, casi diez veces menos que con el hormigón convencional. Además, en un periodo inferior a diez años, ambos índices, los correspondientes a isótopos de vida corta y de vida larga están por debajo del índice de exención, es decir, el material dejaría de ser radiactivo y podría tratarse como un residuo convencional.

Comparación de materiales de blindaje

El muro más crítico desde el punto de vista de la activa-

ción, es el muro separador entre el acelerador y el gantry, AR/GTR, cuya activación, en términos cuantitativos, es prácticamente independiente del material considerado, excepto con HBA1, donde la activación alcanza 1 m de espesor, sin embargo cualitativamente hay diferencias importantes, ya que la mayoría son isótopos de vida corta (espalación).

El volumen total de material activado sería de 458 m³ para HPOR, 365 m³ para HMAG, 350 m³ para HCOL, y 458 m³ para HBA1, respectivamente.

La activación, aunque es un factor importante en la elección del material, no es el único, y cada instalación tiene sus propios condicionantes de calidad, económicos u organizativos. Como ejemplo, se podrían utilizar tres parámetros para analizar el desempeño de los materiales de blindaje: 1) Atenuación contra la radiación inmediata; 2) Activación, para reducir la cantidad de material radiactivo al final de la vida útil de la instalación; 3) Coste, considerando el suministro y su aplicación en el edificio, y se ha definido como puesta en obra.

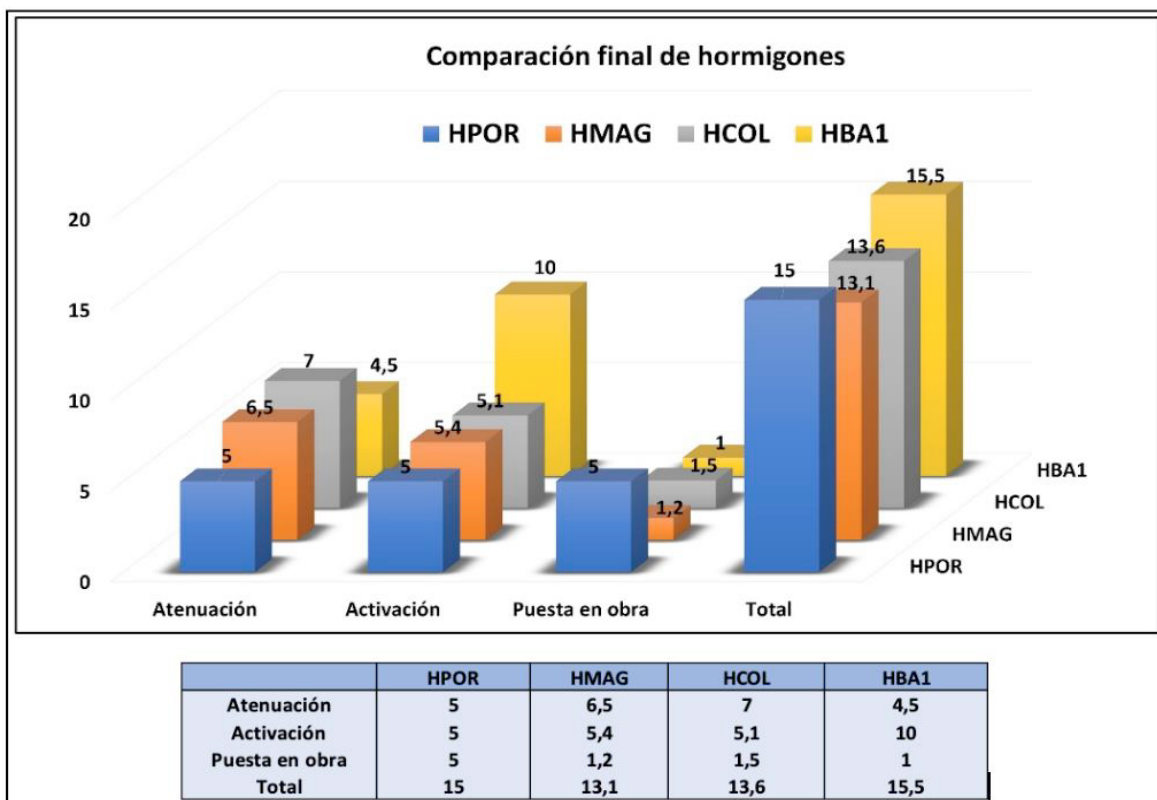


Figura 8. Resumen del rendimiento de los hormigones considerados en este trabajo.

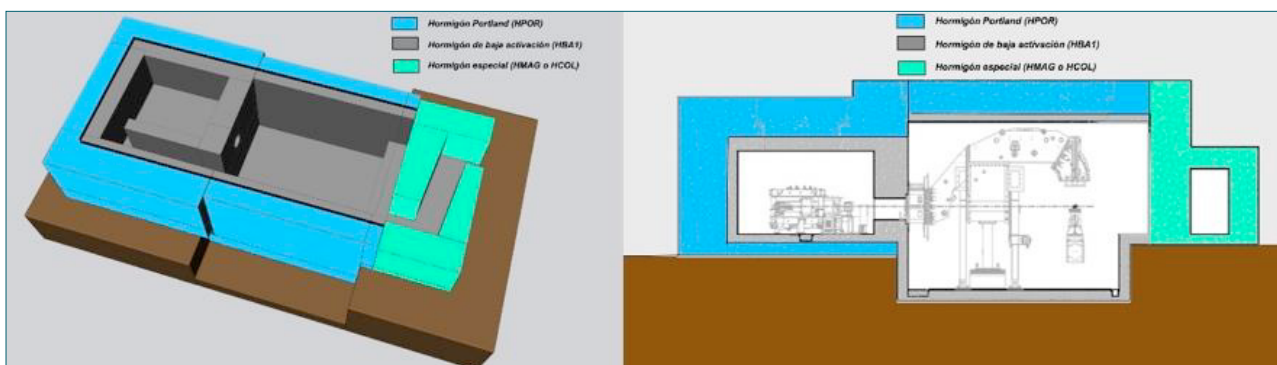


Figura 9. Propuesta para la implementación de diferentes hormigones en diferentes áreas.

Cada parámetro se ha valorado tomando como base la puntuación de 5 para el hormigón o material Portland convencional, HPOR. Una puntuación por debajo de 5 indica un peor desempeño que el material HPOR, y viceversa. El resultado de la comparación realizada se recoge en la siguiente **Figura 8**, donde se aprecia visualmente la puntuación en cada categoría para cada uno de los materiales, así como la puntuación global.

Los centros de protonterapia son instalaciones complejas, en términos de fuentes de radiación, con áreas de diferente carga radiológica, por lo que una posible solución podría ser utilizar diferentes materiales en diferentes áreas, en función de los campos de radiación estimados en dicha zona, y optimizando el coste.

La **Figura 9** muestra una posible implementación práctica, a modo de ejemplo, utilizando tres tipos diferentes de materiales.

CONCLUSIONES

El objetivo del presente trabajo ha sido analizar las características de varias soluciones técnicas para el material de blindaje de una instalación de protonterapia, en base a los campos de radiación y generación neutrónica estimados durante la vida útil de estos centros. La elección del material de blindaje podría hacerse entonces, teniendo en cuenta varios requerimientos y factores:

1. Atenuar la radiación inmediata por debajo de los límites reglamentarios de dosis.
2. Reducir la exposición a la radiación gamma procedente de la activación de los cerramientos, tanto al staff clínico como a los pacientes y público en general.
3. Generar la menor cantidad de residuos radiactivos posible.

4. Optimizar el coste de construcción y desmantelamiento de manera conjunta.

El flujo y espectro de neutrones varían significativamente en cada área de los centros de protonterapia, por lo que sería recomendable utilizar diferentes hormigones en diferentes áreas, optimizando la selección en base a, por ejemplo, características como la capacidad de atenuación, la activación experimentada, y el coste de los materiales, tanto de puesta en obra como de desmantelamiento, como se propone en este trabajo. Un elemento primordial es la verificación de los cálculos de activación mediante medidas experimentales [36].

La reglamentación española indica explícitamente que el plan de desmantelamiento y cierre o de clausura de un centro de protonterapia (instalación radiactiva de segunda categoría), es un documento obligatorio en la solicitud de autorización de funcionamiento, y debe describir la disposición final prevista de los residuos generados, e incluir el estudio del coste y las previsiones económicas y financieras para garantizar el cierre. Es decir, el plan debería ser un documento cuantitativo, y existen herramientas y referencias suficientes para completar dichos requerimientos legales de manera precisa.

REFERENCIAS

- [1] Yan, S., Ngoma, T.A., Bortfeld, T.R. Global democratisation of proton radiotherapy. *Lancet Oncol*, 2023; e245-54.
- [2] García-Fernández, G.F. et al. Benchmarking of stray neutron fields produced by synchrocyclotrons and synchrotrons in compact proton therapy centers (CPTC) using MCNP6 Monte Carlo code. *Applied Rad. Isotopes*, (2023) Vol. 193, pp. 110645.
- [3] IAEA. 2020a. Regulatory control of the safety of ion radiotherapy facilities. IAEA-TECDOC-1891. IAEA, Vienna, 2020.
- [4] IAEA. 2020b. Decommissioning of particle accelerators. IAEA-NES-NW-T-2.9. IAEA, Vienna, 2020.
- [5] IAEA. 2019. Methodologies for assessing the induced activation source term for use in decommissioning applications. IAEA-SRS-95. IAEA, Vienna, 2019.
- [6] Hålg, R.A., Schneider, U. Neutron dose and its measurement in proton therapy., current State of Knowledge. *Br. J. Radiol.* 2020, 92, 20190412.
- [7] EC. 1999. Evaluation of the radiological and economic consequences of decommissioning particle accelerators. Report of European Commission 19151, 1999.
- [8] EC. 2013. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. *Of. J. EU.* 13 1–73, 2014.
- [9] RINR. 1999. Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas. BOE 313, de 31/12/1999. Ministerio de Ind. y Energía.
- [10] ICRP. 2014. Radiological Protection in Ion Beam Radiotherapy. ICRP Publication 127. ICRP. Ann. ICRP 43(4), 2014.
- [11] Ipe, N.E. PTCOG. Shielding Design and Radiation Safety of Charged Particle Therapy Facilities. PTCOG Report 1 (2010).
- [12] NCRP. 2005. Radiation Protection for Particle Acceleration Facilities. Report 144, Revision. 2005. NCRP.
- [13] García-Fernández, G.F. Contribuciones a la protección radiológica operacional y la dosimetría de neutrones en centros compactos de protonterapia. Tesis Doctoral. 2022. Universidad Politécnica de Madrid..
- [14] García-Fernández, G.F., Gallego, E., Núñez, L. Los nuevos Centros de Protonterapia en España. *Radioprotección* (2019), Publicación SEPR, 94: 19-28..
- [15] García-Fernández, G.F. et al. Monte Carlo characterization and benchmarking of extended range REM-meters for its application in shielding and radiation area monitoring in CPTC. *Appl Radiat Isot* (2019) Vol. 152: 115-126.
- [16] García-Fernández, G.F. et al. Neutron dosimetry and shielding verification in commissioning of Compact Proton Therapy Centers (CPTC) using MCNP6.2 Monte Carlo code. *Appl Radiat Isot.* (2021) Vol 169: pp 109279..
- [17] García-Fernández, G.F. et al. Design of Operational Radiation Protection in Compact Proton Therapy Centers (CPTC). Springer Verlag (2021) Volume 1456. ISBN: 978-3-030-89940-0.
- [18] Navarro Hernández, D., García-Fernandez, G.F., Gallego Díaz, E. Development of a Compact Synchrotron Proton Therapy Center Model for Monte Carlo-Based Radiation Protection Studies. *Proceedings of CITIS'2023*. Volume 1. Springer Nature S AG 2024. ISBN 978-3-031-51982-6.
- [19] García-Fernandez, G.F., Gallego, E., Gómez-Ros, J.M., Carabe-Fernández, A., Bertolet-Reina, A. Impact of new delivery methods in proton therapy on radiation protection of Compact Proton Therapy Centers (CPTC). *NEA (2024), Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities (SATIF-15)*, OECD Publishing, Paris.
- [20] García-Fernández, G.F., Gallego, E. Evaluation of ambient dose from Activated Walls Depending on the Material in Shielding of Compact Proton Therapy Centers (CPTC). *International Conference, IAEA, Vienna, Austria*, 2023.
- [21] Detwiler, R.S. et al. Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modelling. *PNNL*, 2021.
- [22] Gallego, E. et al. Testing of a high-density concrete as neutron shielding material. *Nucl. Technol*, 2009 (162): 399–404.
- [23] EPO. 2020. Compositions of low activation concrete and use thereof. European Patent Office, EP 3266754a1 (2020).
- [24] Werner, C.J. et al. MCNP Version 6.2 Release Notes. Report LA-UR- 18-20808. Los Alamos National Laboratory, US. (2018).
- [25] Sato, T. et al. Recent improvements of the particle and heavy ion transport code system – PHITS version 3.33. *Journal of Nuclear Science and Technology*, (2024), 61(1), 127–135.
- [26] Conlin, J.L. Listing of available ACE data tables. Report LA-UR-13-21822, rev. 4. LANL, Los Alamos National Laboratory, US, 2014.
- [27] Chadwick, M.B. et al. ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for

- Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data. Nuclear Data Sheets, Volume 112, Issue 12, 2011, Pages 2887-2996, ISSN 0090-3752.
- [28] Plompen, A.J.M., Cabellos, O. et al. The joint evaluated fission and fusion nuclear data library, JEFF-3.3. Eur. Phys. J. A 56, 181 (2020).
- [29] Koning, A.J, Rochman, D., Modern Nuclear Data Evaluation with the TALYS Code System. Nucl. Data Sheets 2012 (113): 2841–2934.
- [30] Shibata, K et al. JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering. J. Nuc. Sc. Tech. (48), No. 1, p. 1-30, 2011.
- [31] Carroll, L.R. Predicting Long-Lived, Neutron-Induced Activation of Concrete in a Cyclotron Vault. American Inst. Ph., 2001.
- [32] Vincke, H., Theis, C., Roesler, S. Induced radioactivity in and around high-energy particle accelerators. Radiat Prot Dosimetry, 2011;146(4): 434-9.
- [33] IAEA. 2023. Application of the Concept of Exemption. IAEA- GSG-17. IAEA, Vienna, 2023.
- [34] IAEA. 2023. Application of the Concept of Clearance. IAEA-GSG-18. IAEA. Vienna, 2023.
- [35] Yoshida, G. et al. Investigation into activation of accelerators at various synchrotron radiation facilities in Japan. J. N. S. and Tech., (2022), 59(5), 543–554.
- [36] Matsumura, H. et al. Investigation of concrete radioactivation in cyclotron type proton therapy facilities using in situ ^{24}Na measurement method. Radiation Safety Management, 2022; 21:13–25. ■