

MEDICINA Y SALUD EN EL ÁMBITO NUCLEAR

ESTUDIO DE LA ACTIVACIÓN DEL AIRE Y EL AGUA EN CENTROS DE PROTONTERAPIA

GONZALO F. GARCÍA-FERNÁNDEZ

Departamento de Ingeniería Energética,
ETSI Industriales
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

EDUARDO GALLEGO

Departamento de Ingeniería Energética,
ETSI Industriales
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

JOSÉ Mª GÓMEZ-ROS

Departamento de Protección Radiológica
Medioambiental
CIEMAT

ALEJANDRO CARABE-FERNÁNDEZ

HAMPTON UNIVERSITY PROTON THERAPY
INSTITUTE (HUPTI)

HÉCTOR R. VEGA-CARRILLO

Unidad Académica de Estudios Nucleares
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS

LENIN E. CEVALLOS-ROBALINO

Unidad de Investigación NANOTECH
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

KAREN A. GUZMÁN-GARCÍA

Unidad Académica de Estudios Nucleares
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS

ROBERTO GARCÍA-BAONZA

Departamento de Ingeniería Energética,
ETSI Industriales
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

PABLO GRACIA TOLOSANA

Departamento de Ingeniería Energética,
ETSI Industriales
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

El presente trabajo se enmarca dentro de las actividades de dosimetría y espectrometría de neutrones en centros de protonterapia llevadas a cabo por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). La protonterapia ha llegado recientemente a España con dos centros en funcionamiento desde finales de 2019 y principios de 2020, respectivamente. No obstante, este tipo de radioterapia externa que emplea corrientes de protones de hasta 230 MeV de energía está en constante evolución y desarrollo, destacando dos nuevas modalidades de aplicación de dosis: terapia flash con protones y arco terapia con haces monoenergéticos. En ambos casos se pretende maximizar la dosis depositada en la zona a tratar, reduciendo al máximo la radiación de los tejidos sanos circundantes y de paso.

El objetivo del trabajo ha sido realizar el estudio, mediante el código MCNP6, tanto de la activación del aire de los diferentes recintos (sala del acelerador, salas de tratamiento) como del agua existente (para instalaciones auxiliares y en el nivel freático) de los centros de protones. Para ello se han considerado las modalidades existentes de aplicación activa de dosis (*pencil beam scanning*), así como nuevas técnicas de aplicación de dosis de protones actualmente con mayor proyección y desarrollo (*flash-therapy* y terapia con arco de protones o PMAT).

Los neutrones rápidos, producidos por las interacciones de los protones de alta energía utilizados en protonterapia, reducen su velocidad a energías térmicas mediante múltiples colisiones con las paredes y cerramientos del blindaje, tanto en la sala del acelerador como en las salas de tratamiento. Estos neutrones térmicos pueden generar diferentes elementos radiactivos en el aire, como por ejemplo Ar-41 a través de la reacción de captura de neutrones $^{40}\text{Ar}(n, \gamma)^{41}\text{Ar}$ ($\sigma = 630$ mb), siendo la proporción de Ar-40 aproximadamente del 0,46% en volumen. El Ar-41 es un emisor gamma ($E_\gamma = 1,3$ MeV) con una vida media de 1,8 h. Por una parte, la técnica flash implica irradiación durante menos de 500 milisegundos de una dosis superior a 40 Gy/s, es decir, campos pulsados de alta energía e intensidad. Por otra, la arco terapia, implica campos monoenergéticos con energías menores a las convencionales, pero durante un mayor tiempo, es decir mayor flujo neutrónico. Los resultados obtenidos indican que, en algunos casos, en función de las técnicas utilizadas, deberían aumentarse el número de renovaciones del aire en este tipo de instalaciones.

INTRODUCCIÓN

La terapia de protones está en continua evolución y mejora para obtener tratamientos más precisos y beneficiosos para los pacientes. Algunas tendencias actuales destacadas implican la construcción de centros de protones compactos que incorporan las tecnologías más avanzadas, para reducir su tamaño al mismo tiempo que se consiguen instalaciones más asequibles [Bortfeld and Loeffler, 2015], o la investigación y desarrollo de nuevas técnicas de aplicación de protones, para reducir las dosis innecesarias a los pacientes [Carabe *et al.*, 2020a]. Este trabajo se enmarca en el

proyecto *Contribuciones a la protección radiológica operativa y dosimetría neutrónica en centros compactos de terapia de protones (CPTC)*, cuya misión es evaluar el impacto de dichas innovaciones en protonterapia sobre la protección radiológica operativa y el *commissioning* de estas instalaciones. Así, en los últimos años se han llevado a cabo diferentes tareas relacionadas con el proyecto en temas como: estudio y caracterización de Rem-metros para medir campos de neutrones en CPTC [García-Fernández *et al.*, 2019], el estudio de la eficacia y atenuación del blindaje en CPTC empleando diferentes tipos de hormigón [García-Fernández *et al.*, 2020], entre otros.

Como consecuencia de las reacciones de espalación en la interacción de los protones con los elementos de la línea y con el paciente, se generan importantes flujos de neutrones secundarios con un rango que va desde la energía térmica hasta la energía del protón, 230 MeV. Cuando los materiales alrededor de los aceleradores se exponen a dicha radiación parásita se vuelven radioactivos mediante un proceso de activación, volviendo a su estado fundamental a través de emisión gamma, fundamentalmente, y en menor medida desintegración beta. Esta radiactividad, inducida por los neutrones dispersos generados durante la operación del acelerador, permanece después de que la instalación ha dejado de funcionar, a menudo por muchos años. Con el rango de energía de los neutrones presentes en la instalación se producen radionucleidos por activación del hormigón mediante dos mecanismos principales, reacciones nucleares de dispersión inelástica y reacciones de captura [Tesse *et al.*, 2018]. Las reacciones de dispersión inelástica son generadas por los neutrones de altas energías, dando lugar a radionucleidos tales como Na-22, Mn-54 o Sc-46, que son elementos que se encuentran habitualmente en cualquier tipo de hormigón. Por otra parte, las reacciones de captura (n,gamma), son inducidas por neutrones de bajas energías, térmicos, con producción de isótopos radiactivos de elementos presentes en pequeñas concentraciones (partes por millón en peso) como impurezas. Los principales radioisótopos producidos por captura neutrónica son Eu-152, Eu-154, Co-60 o Cs-134, con una vida media relativamente larga, superior a dos años [Carrol, 2001].

Los isótopos de larga duración inducidos por neutrones producidos dentro de las barreras de hormigón de protección son responsables de la producción de residuos radiactivos de baja actividad al final de la vida útil de la instalación. El manejo y almacenamiento de estos desechos nucleares representa una parte importante de los costes de desmantelamiento de una instalación de protonterapia. En consecuencia, en los últimos años se ha producido un gran desarrollo de los diferentes tipos de hormigones que pueden ser empleados en el blindaje de este tipo de instalaciones, tanto hormigones convencionales como hormigones de alta densidad (con magnetita), o con alto contenido en hidrógeno (con colemánita u otros agregados), o nuevos desarrollos de hormigones de baja activación [Vega-Carrillo *et*

al., 2018]. Con los hormigones de baja activación se puede reducir significativamente, e incluso eliminar por completo la producción de residuos nucleares de baja actividad en este tipo de instalaciones.

El objetivo del presente trabajo ha sido realizar el análisis comparativo, mediante el código MCNP6, de la activación neutrónica producida en diferentes tipos de hormigones susceptibles de ser empleados en el blindaje de instalaciones de protonterapia: hormigones convencionales, hormigones de alta densidad (con magnetita), hormigones con alto contenido de hidrógeno (con colemánita), y hormigones de baja activación. Considerando la energía que alcanzan los neutrones, hasta los 230 MeV, se han utilizado datos nucleares procedentes de tres librerías diferentes: ENDF/B VII.1, JEFF-3.3 y TENDL2017/2019, para estudiar su sensibilidad. Además, se ha realizado el estudio de la atenuación de cada tipo de hormigón, así como una clasificación de los materiales de blindaje en base a dicha capacidad de atenuación, el grado de activación y el coste base de implantación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Tipos de hormigones empleados en el cerramiento objeto del estudio

Los hormigones considerados en el presente trabajo han sido: hormigón portland convencional, hormirad (hormigón de alta densidad por la incorporación de magnetita), hormigón de colemánita (hormigón borado y con alto porcentaje de hidrógeno), y finalmente dos hormigones de baja activación, denominados LAC1 (*low activation concrete 1*) y LAC2 (*low activation concrete 2*), respectivamente. Las características consideradas para los hormigones estudiados se incluyen en la Tabla 1, de acuerdo con lo recogido en [Gallego *et al.*, 2009] y [García-Fernández *et al.*, 2020].

Término fuente y campos neutrónicos considerados en centros de protones

A partir de los trabajos previos del cálculo del blindaje y atenuación en centros de protones [García-Fernández *et al.*, 2020], los principales puntos de interacción de protones, y en consecuencia producción neutrónica, son el acelerador, el degradador y el colimador, así como el paciente. En la

Componentes principales (fracciones atómicas) y densidad					
Elemento	Portland (estándar)	Hormirad (hierro)	Colemanita (hidrógeno)	LAC1	LAC2
H	0.1688	0.1180	0.8912	0.0072	0.0075
C	0.0014	0.0016	0.0003	0.0891	0.0872
O	0.5625	0.5292	0.0732	0.4777	0.4921
Fe	0.0043	0.2736	5.0963E-5	0.0006	0.0006
Ca	0.0187	0.0309	0.0034	0.4051	0.3405
Si	0.2041	0.0263	0.0012	0.0124	0.0009
Mg	0.0014	0.0070	0.0006	0.0024	0.0016
Na	0.0118	0	0	0.0008	0.0008
B	0	0	0.0297	0	0
Densidad (g/cm ³)	2.30	4.10	2.12	2.18	2.20

Componentes minoritarios e impurezas (fracciones atómicas)					
Elemento	Portland (estándar)	Hormirad (hierro)	Colemanita (hidrógeno)	LAC1	LAC2
Co (ppm)	2.1900E+1	2.1900E+1	2.1900E+1	0.7500	0.2500
Eu (ppm)	1.0800	1.0800	1.0800	0.0230	0.0081
Cs (ppm)	3.2100	3.2100	3.2100	0.0520	0.0100
Al	0.0214	0.0070	0.0003		
K	0.0057	0.0013	7.2813E-5		
Mn	0	0.0001	0		
Ti	0	0.0009	0		
V	0	0.0002	0		
S	0	0.0007	8.0682E-6		
P	0	0.0027	0		
Sr	0	0	4.1300E-5	0	0

Tabla 1. Características principales de los hormigones estudiados.

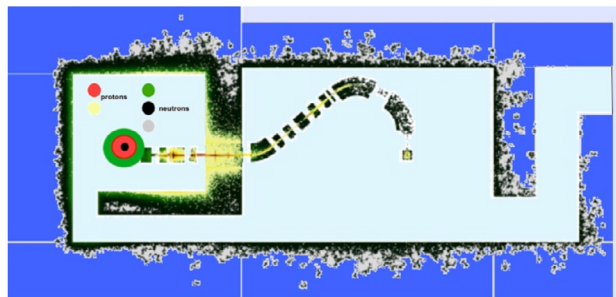
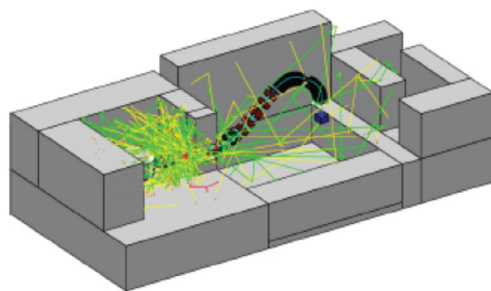


Figura 1. a) Principales interacciones de protones, adaptado de [Tesse et. al, 2019]. b) Interacciones de neutrones con las barreras del centro (verde, negro y gris)

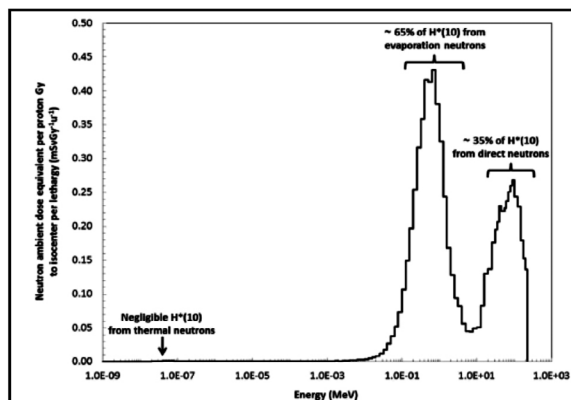
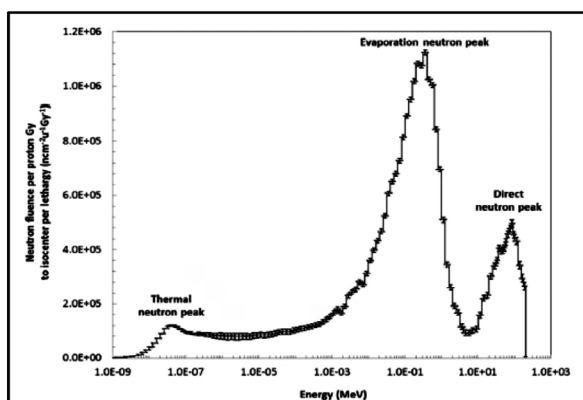


Figura 2. Espectro neutrónico empleado en los cálculos [Howell and Burget, 2014].

Figura 1a y 1b se indican los puntos donde se producen la mayor cantidad de interacciones de protones, experimentando reacciones de espalación con producción neutrónica (rojo y amarillo), así como los puntos donde existen mayores interacciones de los neutrones con el blindaje de la instalación (verde, negro y gris).

Espectro neutrónico considerado en los cálculos

El espectro energético simulado en la irradiación, Figura 2a, proviene de un tratamiento real, cuya producción neutrónica ha sido medida experimentalmente mediante esferas Bonner ampliadas [Howell and Burget, 2014]. En dicho espectro se observan los tres picos característicos del espectro neutrónico en instalaciones de protonterapia: el pico de alta energía, correspondiente a las reacciones de espalación y cascada intranuclear, el pico intermedio de las reacciones de evaporación, con emisión isotropa de neutrones, y finalmente el pico de neutrones térmicos, a la derecha. En la Figura 2b se realiza la conversión de dicho espectro neutrónico en dosis equivalente ambiental, $H^*(10)$.

Datos, configuración MCNP6.2, librerías y modelos nucleares

El código de cálculo utilizado en las simulaciones del presente proyecto ha sido MCNP6.2 [Werner, 2017]. Teniendo en cuenta que la energía de las reacciones consideradas alcanza hasta los 230 MeV, en los cálculos con el código se requiere el uso de modelos físicos de cascada intranuclear más evaporación, pues las librerías actuales procesan da-

tos nucleares hasta 20 MeV o 150 MeV, en función de cada librería y del isótopo considerado. El modelo de cascada intranuclear aplicado en las simulaciones con energías de neutrones superiores a 20 MeV, empleando la opción mix & match de MCNP6, han sido los modelos por defecto del MCNP6.2, CEM03.03 para la cascada intranuclear, y GEM para las reacciones de evaporación, aplicado en todas las simulaciones, ya que la velocidad de procesamiento es superior con dichos modelos.

Las magnitudes físicas directamente calculadas a través de las *tallies* correspondientes del código MCNP han sido la fluencia neutrónica, el número de reacciones nucleares de interés por unidad de volumen y la deposición de energía por unidad de masa. El número de historias procesadas ha sido seleccionado en cada caso para conseguir un error estadístico menor del 3 %, aunque en la mayoría de los cálculos dicho error está por debajo del 1 %.

Con el objetivo de estudiar la sensibilidad de los cálculos a los datos nucleares, las magnitudes anteriores se han calculado empleando diferentes librerías:

- ENDF/B (versión VII.1), de la cual se encarga el *Cross Section Evaluation Working Group* (CSEWG), coordinado por el *National Nuclear Data Center* en el *Brookhaven National Laboratory* (Chadwick et al., 2011).
- JEFF (versión 3.3), de la cual se encargan de manera conjunta los grupos *Joint European File* (JEF) y la *European Fusion File* (EFF). Este grupo está coordinado por la *NEA Data Bank*, perteneciente a la *Nuclear Energy Agency* (NEA) de la OCDE (Plompen et al., 2020).
- TENDL 2017 y 2019, *Talys Evaluated Nuclear Data Library* (Koning and Rochman, 2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de la fluencia neutrónica obtenidos a lo largo del muro considerado (160 cm) se recogen en la Figura 3, para los diferentes hormigones y librerías utilizadas. Posteriormente, en la Figura 4 se comparan los valores totales de la fluencia, tomando como referencia los valores obtenidos en un bloque de aire equivalente.

Partiendo de los datos de fluencia, en la Figura 5a se muestran los valores de la transferencia lineal de energía (MeV/g) a lo largo del muro considerado, y se comparan para diferentes librerías y tipos de hormigón considerados, Figura 5b.

Los valores de la fluencia neutrónica y la deposición longitudinal de energía tienen un impacto directo en la activación de las impurezas presentes en los distintos hormigones (Figura 6a). En la Figura 6b, y a título de ejemplo, se incluye el caso del Eu-151, con gran sección eficaz de captura (9198 barn), y cuyo isótopo activado, Eu-152, tiene una vida media relativamente larga, 13.33 años.

Tanto la activación como la atenuación dependen en gran medida de las reacciones elásticas

en el blindaje de hormigón (Figura 7a), y su contenido en hidrógeno es un factor relevante (Figura 7b).

El estudio de la atenuación de los diferentes tipos de hormigones, convencional (Portland), alta densidad (hormirad), alto contenido de hidrógeno (colemanita), y los dos tipos de materiales de baja activación (LAC1 y LAC2) considerados, se muestran en la Figura 8.

A modo de resumen, en la Figura 9, se recogen tres parámetros importantes a la hora de decidir el tipo óptimo de hormigón, como serían la atenuación, para lograr las dosis equivalente ambiental $H^*(10)$ exigida por la autoridad nuclear, la activación, para reducir la cantidad de residuos radiactivos al final de la vida útil de la instalación, y el coste de los materiales y su puesta en obra.

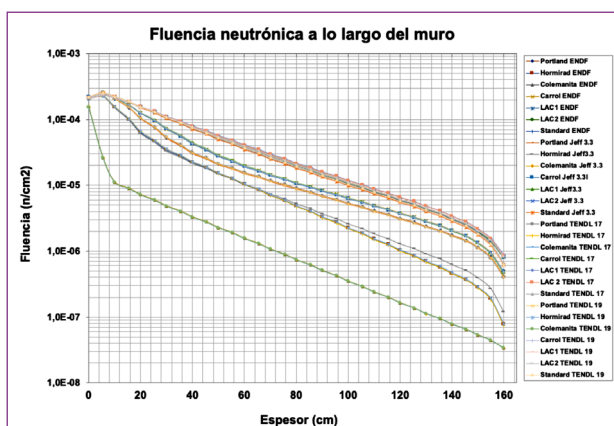


Figura 3. Fluencia neutrónica longitudinal en función del tipo de hormigón.

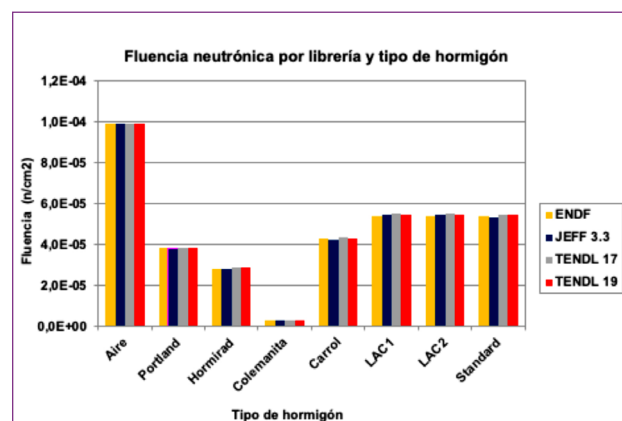


Figura 4. Fluencia neutrónica en función de las librerías nucleares para cada hormigón.

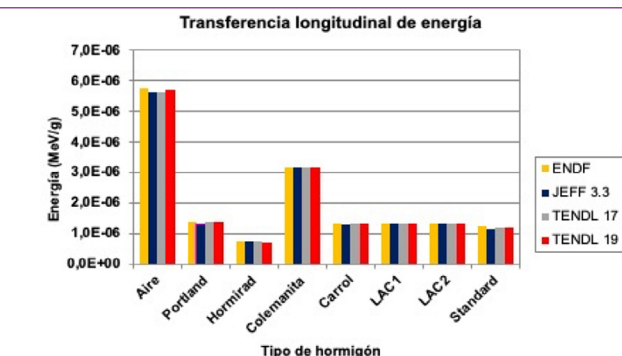
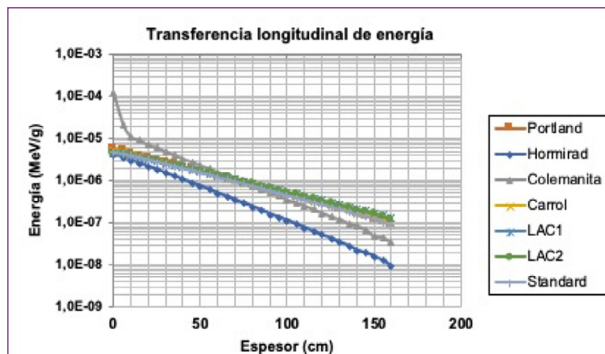


Figura 5. a) Transferencia longitudinal de energía, b) Comparativa de librerías nucleares.

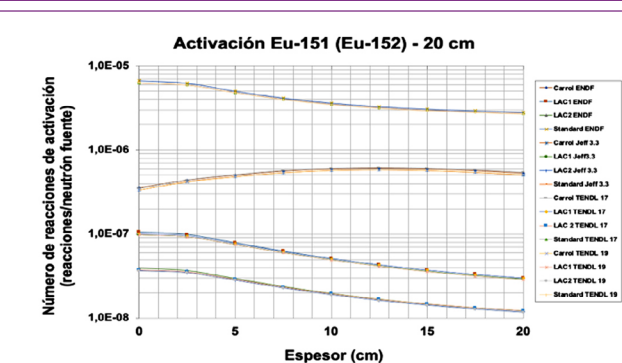
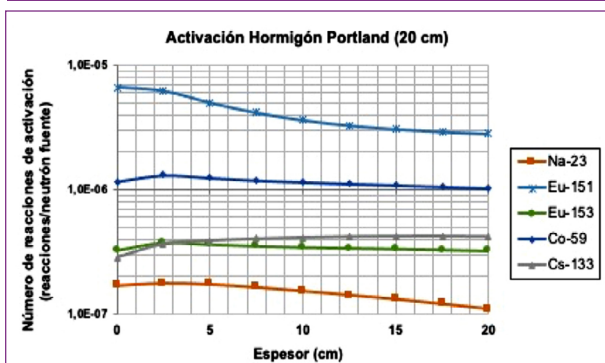
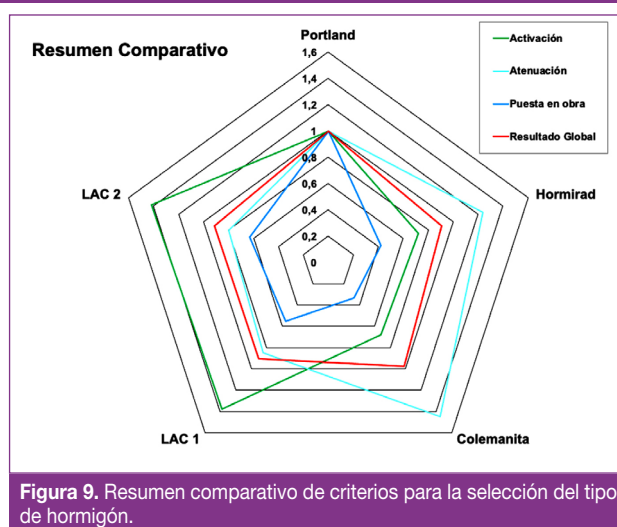
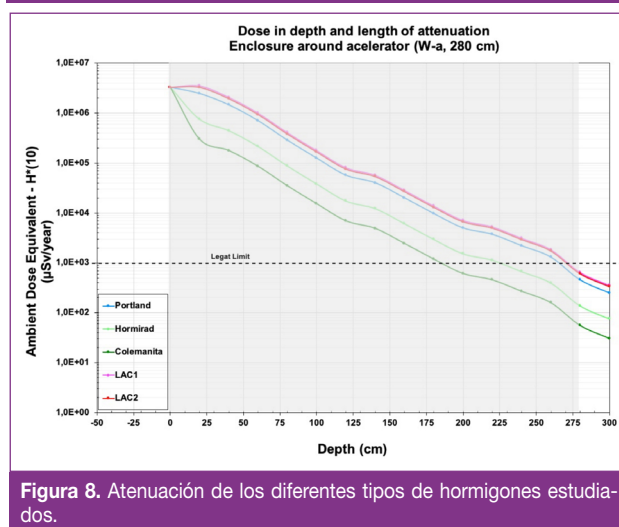
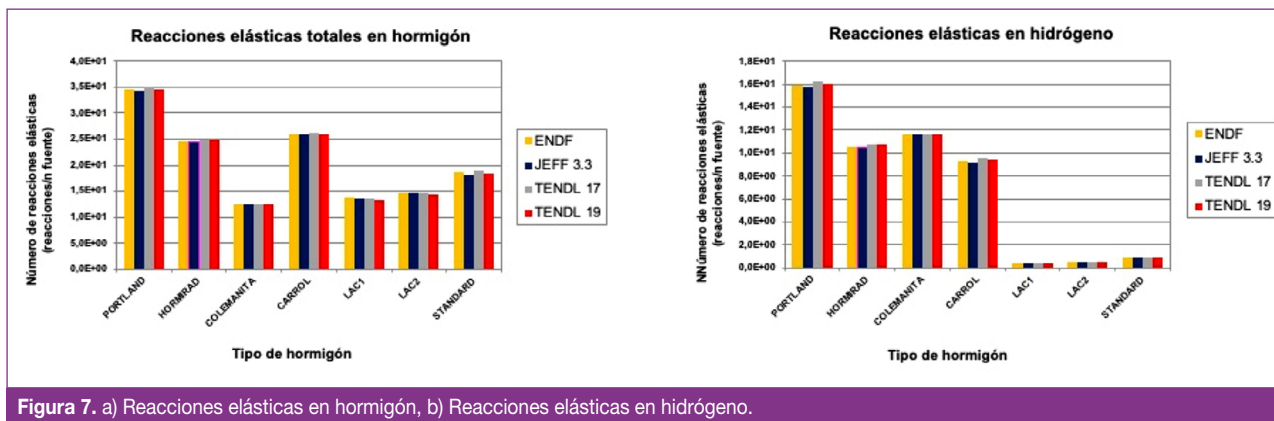


Figura 6. a) Activación del hormigón Portland, b) Activación del Eu-151 ($^{151}\text{Eu}(n,\gamma)^{152}\text{Eu}$).



CONCLUSIONES

Considerando los resultados obtenidos, las principales conclusiones serían las siguientes:

1. Desde el punto de vista de la activación, los hormigones más recomendables son aquellos con menor contenido de impurezas susceptibles de activarse y generar residuos, LAC1 y LAC2.
2. Desde el punto de vista de la atenuación, sin embargo, los hormigones de alta densidad (con magnetita) o con alto contenido en hidrógeno (con colemánita) son más eficientes.
3. El hormigón convencional tipo Portland tiene un comportamiento intermedio en la activación y atenuación, y su coste de puesta en obra es más rentable que el de los hormigones especiales.

En resumen, teniendo en cuenta que el flujo y el espectro neutrónico varía sensiblemente en cada zona de la instalación, sería recomendable utilizar diferentes hormigones para cada zona, optimizando la selección con criterios basados en la atenuación, activación y el coste de puesta en obra.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del Programa de Doctorado industrial IND2017/AMB-7797, financiado por la Comunidad de Madrid (CM).

REFERENCIAS

- Bortfeld, T.R. and Loeffler, J.S., Three ways to make proton therapy affordable, *Nature*, vol. 549 2017.
- Carabe-Fernández, A. et al., Is there a role for arcing techniques in proton therapy? *The British Journal of Radiology*, 2020a (93):1107.
- Carroll, L.R., Predicting Long-Lived, Neutron-Induced Activation of Concrete in a Cyclotron Vault, *American Institute of Physics*, 2001.
- Chadwick, M.B., et al., ENDF/B-VII.1 nuclear data for science and technology: Cross sections, covariances, fission product yields and decay data. *Nucl. Data Sheets*, 2011 (112), 2887–2996.
- Farr, J. et al., New horizons in particle therapy systems, *Medical Physics*, 2018, 45 (11).
- Gallego, E. et al., Testing of a high-density concrete as neutron shielding material, *Nucl. Technol.*, 2009 (162): 399–404.
- 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, *Ap. Rad. Isot.*, 2019 (152): 115-126.
- García-Fernández, G.F. et al., Neutron dosimetry and shielding verification in Commissioning of CPTC using MCNP6.2 Monte Carlo code, *Applied Radiation and Isotopes*, 2020: 109279.

- Howell, M. and Burgett, A., Secondary neutron spectrum from 250-MeV passively scattered proton therapy: Measurement with an extended-range Bonner sphere system, 2014.
- Koning, A.J and Rochman, D., Modern Nuclear Data Evaluation with the TALYS Code System, Nucl. Data Sheets 2012 (113): 2841–2934.
- Plompen, A.J.M., et al. The joint evaluated fission and fusion nuclear data library, JEFF-3.3, 2020, The European Physical Journal A. Springer Berlin Heidelberg.
- Tesse, R., et al., GEANT4 benchmark with MCNPX and PHITS for activation of concrete, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B, vol. 416, pp 68-72, 2018.
- Tesse, R., et al., Simulations of the activation of a proton therapy facility using a complete beamline model with BD-SIM, 2019, Proceedings of the IPAC2019.
- Vega-Carrillo, H.R. et al., Photon and neutron shielding features of quarry tuff, Annals of Nuc. Energy, 2018 (112): 411-417.
- Werner, C.J. (Ed.), 2017. MCNP User's Manual - Code Version 6.2, LA-UR-17-29981. Los Alamos National Laboratories.■