

Materiales libres de plomo para atenuación de radiaciones ionizantes en protección radiológica*

Lead Free Materials for the Mitigation of Ionizing Radiation in Radiologic Protection

Recibido: 17 de septiembre de 2014 - Aceptado: 7 de octubre de 2014

Para citar este artículo: M. Mayorga, S. Plazas, E. Salazar, «Materiales libres de plomo para atenuación de radiaciones ionizantes en protección radiológica», *Ingenium*, vol. 15, n.º 30, pp. 39-49, octubre, 2014.



Manuel Alejandro Mayorga Betancourt**

Sergio Enrique Plazas Jiménez***

Emeterio Cruz Salazar****

Resumen

En los servicios de Medicina Nuclear y Radiodiagnóstico es necesario ubicar barreras protectoras para atenuar las radiaciones ionizantes hasta niveles aceptables. Existen diferentes tipos de barreras, como muros de concreto, láminas de plomo, vidrio plomado y accesorios de protección radiológica personal que contienen láminas o placas de plomo. En este trabajo se presenta la etapa de simulación y análisis teórico para la obtención de materiales sin plomo, viables en protección radiológica. Para esto, se utilizó la base de datos

* Artículo de investigación, producto derivado del proyecto de investigación *Desarrollo de materiales atenuadores libres de plomo, para uso en protección radiológica*, realizado en el grupo GIATME, GINIC-HUS e INDETECA de la Universidad Escuela Colombiana de Carreras Industriales, UNIECCI, iniciado en abril de 2013.

** Ingeniero Químico y Magister en Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Docente investigador de la Universidad Escuela Colombiana de Carreras Industriales, UniECCI, área de Mecánica. Experto en el área térmica, energía sostenible, biocombustibles, procesos químicos, materiales y tratamiento de residuos. Líder de la línea de Energía del Grupo de Investigación en Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía, GIATME. e_mail: mmayorgab@eccci.edu.co.

*** Ingeniero Químico de la Universidad Nacional de Colombia y candidato a Magister en Ciencia y Tecnología de Polímeros de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (España). Docente Investigador de la Universidad Escuela Colombiana de Carreras Industriales, UniECCI, área de Plásticos. Especialista en Sistemas de Gestión Integrados de la Universidad Agraria de Colombia. Experto en polímeros, procesos químicos, materiales, energía sostenible y tratamiento de residuos. Líder del Grupo de Investigación en Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía, GIATME. e_mail: splazasj@eccci.edu.co.

**** Físico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y candidato a Magister en Física Médica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Docente investigador de la Universidad Escuela Colombiana de Carreras Industriales, UniECCI, área de Biomedicina. Experto en protección radiológica para medicina nuclear. Participa en el grupo de investigación en Innovación y Desarrollo Tecnológico Aplicado, INDETECA. Editor de la revista TECCIENCIA. e_mail: ecruzs@eccci.edu.co

del National Institute of Standards and Technology, que permite la construcción teórica de materiales a partir de los elementos químicos y hallar los coeficientes de atenuación de estos compuestos. También, se realizó la simulación de la atenuación de estos materiales para energías de 30keV a 1MeV, rango energético común en el campo clínico y se comparó con la atenuación del Plomo para estas energías. Se concluyó que estos materiales atenuadores se pueden ubicar sobre un sustrato poliméricos para lograr su aplicabilidad y se obtuvieron coeficientes de atenuación similar a los del plomo, aplicable tanto en protección personal como en la infraestructura física de instalaciones. También, se puede inferir que desde el punto de vista teórico, los materiales obtenidos presentan una respuesta a la interacción con la radiación similar a la del plomo. Sin embargo, es necesario experimentar la respuesta del material cuando el elemento atenuador está distribuido uniformemente en la matriz polimérica o como recubrimiento de esta para evaluar su viabilidad desde lo económico.

Palabras clave

Atenuadores de radiación, blindajes contra las radiaciones ionizantes, protección radiológica

Abstract

In services of Nuclear Medicine and Radiology is necessary to place protective barriers to attenuate ionizing radiation to acceptable levels. There are different types of barriers such as concrete walls, lead sheets, leaded glass and accessories for personal radiation protection sheets or plates containing lead. In this paper the simulation phase and theoretical analysis for obtaining materials unleaded viable radiation protection is presented. Database of the National Institute of Standards and Technology, which enables the theoretical construction materials from the chemical elements and finding the coefficients of attenuation of these compounds was used for this. Simulating the attenuation of energy of these materials to 30keV to 1MeV, common energy range in the clinical field was also carried out and compared with the attenuation of lead for these energies. It was concluded that these materials can be placed attenuators on a polymeric substrate to achieve its applicability and coefficients similar to those of lead attenuation is obtained, applicable both personal protection and physical infrastructure facilities. Also, you can infer that from the theoretical point of view, the materials obtained have a response to the interaction with lead similar to the radiation. However, it is necessary the material response experiment when the attenuator element is uniformly distributed in the polymer matrix or coating is to evaluate from the economic viability.

Keywords

Shielding against ionizing radiation, radiation attenuators, radiation protection.

1. Introducción

Un requerimiento para la habilitación de Servicios de Radiodiagnóstico y Medicina Nuclear, consiste en garantizar medidas de protección radiológica (PR) para todo el personal en riesgo potencial a exposición con radiaciones ionizantes [1]. Las medidas de PR involucran

entre otras acciones, obra civil adecuada referente a muros de concreto, concreto con láminas de plomo y otras barreras físicas, que atenúen las radiaciones ionizantes. También, accesorios personales y barreras móviles. Tradicionalmente, recubrimientos y delantales para protección contra las radiaciones han sido manufacturados con hojas de plomo (Pb), u hojas de polímeros cargados con partículas de plomo. Los primeros estudios con materiales sin plomo se realizaron con el objeto de reducir el peso de los elementos de protección personal y la posibilidad de mejorar de desempeño atenuador. El reto está en desarrollar procesos que incorporen polvos metálicos u otros compuestos atenuadores, dentro de hojas de materiales poliméricos, en la cantidad suficiente para lograr una atenuación efectiva, pero a la vez suficientemente robustas para evitar que se rompan, fisuren o sufran otras formas de deterioro. Además el plomo es un material tóxico y los problemas que supone su disposición, también son una importante razón para el desarrollo de materiales atenuadores sin plomo [2].

En el desarrollo de materiales atenuadores sin plomo se han empleado elementos metálicos como cadmio, indio, estaño, antimonio, cesio, bario, cerio, gadolinio, tungsteno y bismuto [2]. También se ha encontrado que compuestos con estos elementos como sulfato de bario, se emplean para atenuar las radiaciones X y γ , sustituyendo las hojas de plomo. Estas opciones de materiales presentan alta viabilidad económica en la medida en que el material atenuador se disponga de manera adecuada para aumentar la eficiencia del blindaje con baja cantidad de material atenuador. Existen mezclas de bario, tungsteno, bismuto, silicio, molibdeno, caucho y silicio, de espesor equivalente a 0.3 mm de plomo que pueden ofrecer una capacidad de blindaje satisfactoria con un empaquetamiento de 30 % y una porosidad mayor al 20 % [3].

Al evaluar estos elementos en cuanto a su poder atenuador se ha encontrado por ejemplo que el bario presenta una mejor atenuación que el plomo desde los 38 keV hasta los 85 keV, dentro de una parte del rango de las aplicaciones de diagnóstico médico como se observa en la figura 1.

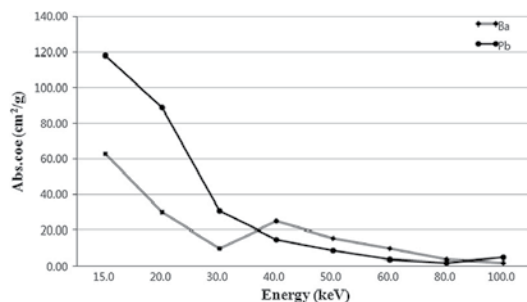


Figura 1. Atenuación de una hoja de bario comparada con la de una hoja de plomo de iguales espesores [3].

También se han evaluado no solo los elementos puros, sino también sus compuestos, como por ejemplo:

- óxido de bario, se utilizó en aplicaciones ópticas, como atenuador en lentes para filtros UV;

- cenizas de cascarilla de arroz (óxido de bario y óxido de boro), con uso potencial como blindaje de radiación gamma [4] y sistemas de varios óxidos para lentes que atenúen las radiaciones ionizantes [5];
- compuestos de óxido de tungsteno en resinas epóxicas para blindajes de Rx para radiología y mamografía, de 10 a 40 keV; en estos un aumento del material de relleno generó una mejora en las propiedades mecánicas del material. De otro lado, el incremento del atenuante lleva a un deterioro en la resistencia a la flexión y dureza [6].
- sistemas de vidrio, como el borosilicato de bismuto, para uso en blindajes contra la radiación en aplicaciones médicas [7].

Otro aspecto importante a considerar es el efecto del material atenuador incorporado dentro de una matriz de soporte con potencial uso en prendas y blindajes móviles. Para esto se han llevado a cabo estudios para determinar los coeficientes de atenuación máscicos de diferentes materiales atenuadores distribuidos en matrices poliméricas. En ellos se observó una alta dependencia de la atenuación, con la densidad y la masa molar [8]. Para lograr una adecuada dispersión del atenuador en la matriz polimérica se puede partir de estudios realizados con compuestos de boro en polietileno de alta densidad (PEAD) [9].

Para barreras sólidas fijas hay un amplio panorama de estudios de materiales atenuadores en concreto, para radiación secundaria, usando diferentes especies de iones como blindaje para aceleradores en hadronterapia [10]. La adición de tres compuestos de boro en el blindaje de hormigón contra la radiación [11] ha dado excelentes resultados, se han ensayado materiales a base de hidrógeno, hierro y silicio, consiguiendo una mayor atenuación a la radiación gamma y de neutrones, que el mismo hormigón [12]. El uso de hormigón con agregados de escoria de horno de arco eléctrico y retazos de acero, en una proporción de 50 % reduce el costo de la barrera por el menor espesor de hormigón sin perder propiedades [13]. La zeolita como agregado en el hormigón no constituye una alternativa como blindaje contra la radiación gamma, ya que el coeficiente de atenuación lineal disminuye con una mayor concentración de zeolita [14].

Otras aplicaciones de materiales atenuadores para uso en blindajes, como los neutrones rápidos en reactores nucleares, donde se han ensayado blindajes con óxido de samario [15], y para la protección contra radiación electromagnética intrínseca se han investigado recubrimientos con películas delgadas de polianilina en cuerpos transparentes como puertas y ventanas de edificios satisfaciendo la transmisión óptica [16].

La mayoría de materiales atenuadores se combinan con plomo que es un material de alta toxicidad y por tanto es necesario reemplazarlo por otros que permitan el mismo efecto protector. Una de las barreras para el uso de los materiales que han dado buenos resultados como atenuadores es su alto costo. En este artículo se presenta la primera etapa del proyecto de desarrollo de materiales atenuadores sin plomo. Desarrollado por los grupos de Investigación de Innovación y Desarrollo Tecnológico Aplicado y el Grupo de Investigación en Ingeniería Clínica de la Universidad ECCI-Hospital Universitario de la Samaritana y el grupo de Investigación en Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía de la Universidad ECCI en Colombia.

En esta primera etapa del proyecto se evaluaron teóricamente los materiales poliméricos (polietileno, polipropileno, policloruro de vinilo y polietilén tereftalato) que servirán de matriz contenedora de los elementos o compuestos atenuadores; también se evaluaron tanto elementos como compuestos de materiales atenuadores y finalmente se evaluaron mezclas de materiales atenuadores con polímeros. El cálculo de los coeficientes de atenuación y la simulación de su respuesta a las radiaciones ionizantes se realizó en el rango de energías de 30keV a 1MeV.

2. Método

El estudio teórico de los materiales atenuadores se basó en la probabilidad de interacción de la radiación con la materia. Esta interacción depende de la energía de los fotones incidentes, de los átomos y su configuración en el material con el cual se interactúa. Por tal razón, se abordó la probabilidad de interacción a partir de las bases de datos del NIST –National Institute of Standards and Technology consolidadas a partir de su PML– Physical Measurement Laboratory.

Este laboratorio cuenta entre otras investigaciones, con métodos espectroscópicos y normas para infrarrojo, visible, ultravioleta, **rayos X**, y **la radiación de rayos gamma**; investiga la estructura y dinámica de los átomos, las moléculas y biomoléculas [17]. Junto con las bases de datos del NIST, se empleó el software WinXCom, un programa para el cálculo de los coeficientes de atenuación de Rayos X, desarrollado por The Technical University of Denmark.

Los fundamentos físicos de las bases de datos del NIST que permitieron los datos utilizados para este trabajo teórico, se presentan a continuación. Se realizó una evaluación teórica de los coeficientes de atenuación de polímeros de uso general, como el polipropileno (PP), poliestireno (PS), polietilentereftalato (PET), policloruro de vinilo (PVC) y policarbonato (PC), seleccionados por ser materias primas de amplio uso y disponibilidad. Este único criterio de selección de las matrices poliméricas a evaluar, pues los materiales atenuadores son por lo general costosos y se requiere que la matriz polimérica sea de bajo costo, como los son algunos de estos plásticos de consumo masivo. Además, los polímeros por estar constituidos por átomos de bajo peso molecular (principalmente carbono $Z=12$), no se espera de ellos grandes contribuciones al efecto atenuador de la mezcla polímero-compuesto atenuador. Estructuralmente producen láminas con suficiente resistencia mecánica para soportar el uso y contener adecuadamente los materiales de carga atenuadores; siempre y cuando, no superen los contenidos de cargas o rellenos que puedan reducir drásticamente las propiedades mecánicas de las matrices poliméricas haciéndolas inapropiadas para uso en blindajes. Por esta razón, se limitará la simulación de las mezclas a contenidos máximos de 50 %. Aunque solo pruebas mecánicas reales determinarán si son viables contenidos tan elevados de material atenuador.

El criterio para la selección de los elementos y compuestos atenuadores es el peso atómico; teniendo como referente el elemento atenuador de mayor uso, el plomo ($Z=82$ y densidad de $11,36 \text{ g/cm}^3$). Con estos criterios se evaluaron los coeficientes

de atenuación de compuestos metálicos con átomos de alto número atómico (Z), tales como: óxido de bario (BaO), óxido de bismuto (Bi_2O_3), óxido de tungsteno (WO_2) y sulfato de bario (BaSO_4). Una vez realizada la evaluación de cada material por separado, se seleccionaron los de mayores coeficientes de atenuación (polímero y sustancia atenuadora), los cuales se mezclaron en proporciones del 5 % hasta 50 % en contenido de material atenuador.

El método a seguir empleando el software Win XCom fue:

- Evaluación del coeficiente de atenuación de las matrices poliméricas puras.
- Cálculo del coeficiente de atenuación de los compuestos atenuadores.
- Determinación del coeficiente de atenuación del mejor compuesto atenuador mezclado con polímero de PP en proporciones de hasta 50 %.

2.1 El coeficiente de atenuación másico, μ/ρ

Asumiendo un haz estrecho de fotones monoenergéticos con una intensidad incidente I_0 , que interactúa con una capa de material de espesor X y densidad ρ , emerge con intensidad I . La siguiente expresión representa esta situación.

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\frac{\mu}{\rho}x} \quad (1)$$

La ecuación (1) se puede reescribir:

$$\frac{\mu}{\rho} = x^{-1} \ln \frac{I_0}{I} \quad (2)$$

Los μ/ρ dependen en gran medida de los valores teóricos de la sección eficaz total por átomo, σ_{tot} , la cual está relacionada con μ/ρ según la expresión:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma_{tot}}{uA} \quad (3)$$

El coeficiente de atenuación, las secciones eficaces de interacción fotónica y las otras magnitudes relacionadas, son funciones de la energía de los fotones. La sección eficaz total se puede escribir como la suma de las contribuciones de las principales interacciones de los fotones [18]:

$$\sigma_{tot} = \sigma_{pe} + \sigma_{coh} + \sigma_{incoh} + \sigma_{pair} + \sigma_{trip} + \sigma_{phn} \quad (4)$$

2.2 El coeficiente másico de absorción de energía, μ_{en}/ρ

Los métodos utilizados para calcular el coeficiente másico de absorción de energía, μ_{en}/ρ , se hallan mediante el coeficiente másico de transferencia de energía, μ_{tr}/ρ . A partir de este coeficiente másico de transferencia es posible obtener el KERMA [19].

2.3 Procedimiento con las bases de datos del NIST

Para la presente simulación se emplearon las tablas 1, 2, 3 y 4 del NIST: Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements $Z = 1$ to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest Mixtures and compounds [3]. Para los elementos tabulados en la tabla 3 del National Institute of Standards and Technology-NIST; los cálculos se hicieron empleando la fórmula,

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma_{pe} + \sigma_{coh} + \sigma_{incoh} + \sigma_{pair} + \sigma_{trip}}{uA} \quad (5)$$

Los valores de los coeficientes de atenuación máscicos, μ/ρ , para las 48 mezclas y compuestos (asumiendo homogeneidad total) están reportados en la tabla 4 del NIST, y fueron obtenidos por la simple ley de aditividad, principio que también será utilizado para el cálculo de las mezclas propuestas en este estudio,

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (6)$$

Con los datos del NIST y el Software WinXCom, se realizaron los cálculos y las gráficas de la sección eficaz para cada tipo de interacción en (barn/átomo) de acuerdo a las energías incidentes en (MeV). Estas probabilidades de interacción permitieron calcular los coeficientes máscicos de atenuación, y el comportamiento de las secciones eficaces en función de la energía incidente para polímeros, compuestos y mezclas.

3. Resultados

Con el programa WinXCom [20], el cual se fundamenta en el informe descriptivo original de Berger y Hubbell [21, 22], la base de datos de NBS / NIST subyacente [23], se calcularon, a partir de la sección eficaz de las diferentes interacciones de la radiación con la materia, los coeficientes de atenuación del polipropileno para las diferentes energías, gráfico mostrado en la figura 2.

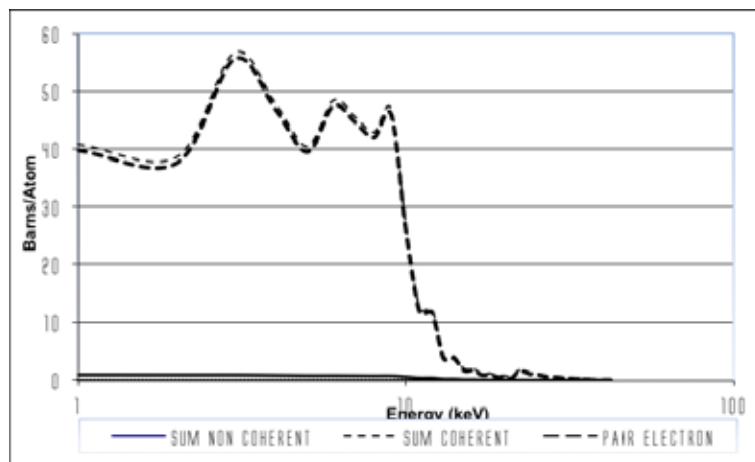


Figura 2. Atenuación del polipropileno a partir de la interacción radiación materia.

La figura 3, muestra los resultados de la atenuación másica del PVC y PP para energías hasta de 1 MeV, las cuales se presentan junto a la línea base que es la atenuación del Pb, se puede observar que para energías cercanas a los 100 keV la atenuación de estos polímeros es muy baja comparada con la del Pb, esto indica que el tipo de polímero usado como matriz para la fabricación de barreras atenuadoras no contribuye a la atenuación; por tanto, su uso debe satisfacer únicamente propiedades mecánicas, fotoquímicas y fotofísicas según la aplicación de la barrera atenuadora.

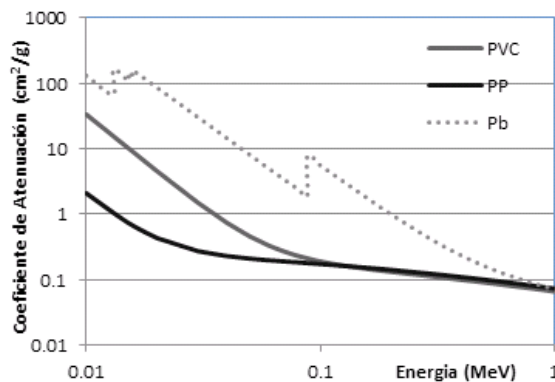


Figura 3. Atenuación másica del PVC y PP para energías hasta de 1 MeV.

La figura 4 muestra la atenuación del óxido de wolframio y sulfato de bario para energías incidentes hasta de 1 MeV, junto a la línea base correspondiente a la atenuación del Pb; se puede observar que los tres materiales son buenos atenuadores y para energías entre los 50 keV y los 100 keV se pueden usar con resultados de atenuación muy similares.

Lo anterior permite inferir que para la práctica de R-X en procedimientos de Odontología, Mamografía y R-X convencional ($E < 100$ keV) teóricamente estos dos materiales pueden sustituir al plomo.

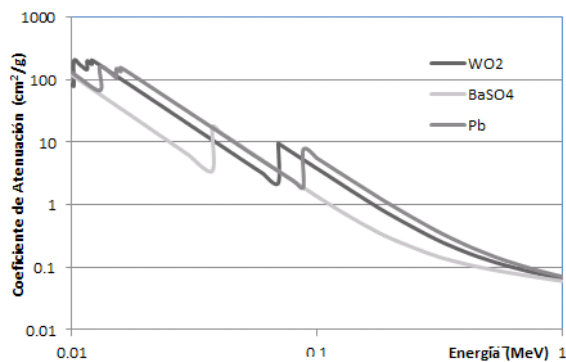


Figura 4. Atenuación de dos aditivos.

En la figura 5 se presentan los coeficientes de atenuación de diferentes mezclas de óxido de wolframio (IV) con PVC, así: 50 % WO_2 y 50 % de PVC, 15 % WO_2 y 85 % de PVC y 10 % WO_2 y 90 % de PVC, con el propósito de evaluar la variación de los coeficientes de atenuación a partir de la línea base. También, evaluar la variación de los coeficientes

de atenuación entre las mezclas para las diferentes energías con el propósito de planificar la preparación de los materiales para una etapa de experimentación, en este contexto.

Se observa que la muestra que contiene el 50 % de material atenuador se aproxima considerablemente a la curva del plomo y por tanto la decisión de las concentraciones para fines prácticos estará basada en las propiedades que se requieran según la aplicación.

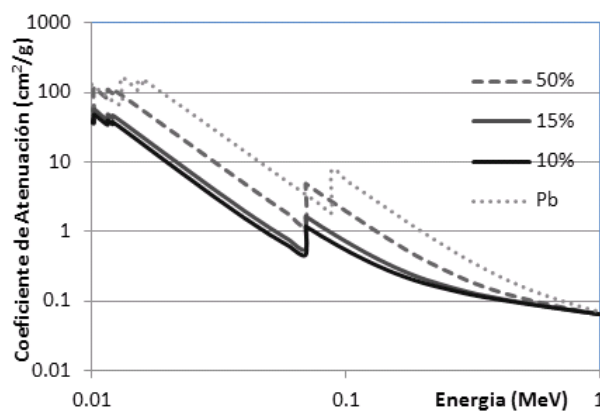


Figura 5. Atenuación para diferentes concentraciones de WO₂ en PVC.

4. Discusión

Es importante ver en las bases de datos del NIST, una herramienta muy importante para la construcción teórica de los materiales atenuadores y los cálculos de los coeficientes de atenuación a partir de las secciones eficaces para los diferentes tipos de interacción radiación- materia.

Dado el alto costo de los elementos y compuestos atenuadores, es importante de desarrollar los compuestos atenuadores con matrices poliméricas de bajo costo, cuyo único requisito es que permitan obtener las propiedades mecánicas adecuadas para las diferentes aplicaciones. Por ejemplo, para uso en protección personal como protectores de tiroides, gonadales y chalecos. Para energías bajas, en el rango de 30 keV a 150 keV en donde el HVL del Pb es del orden de los 0.3mm, se pueden obtener materiales con plomo en donde sus HVL sean similares al Pb.

Los elementos y compuestos atenuadores ensayados se seleccionaron con base en el umbral máximo de absorción de energía (K en keV), de los elementos puros con mayor atenuación, teniendo como referente el del plomo ($K=88.0$ KeV), se seleccionó el tungsteno ($K=69.5$ keV), que es el más próximo y el bario ($K=37.4$ keV), con un valor medio y descartando el elemento con el coeficiente de absorción más bajo, el del cadmio ($K=26.7$ keV) [2]. Así se evaluó la respuesta de los materiales como WO₂ y el BaSO₄ en la interacción radiación-materia, la cual resultó similar a la del Pb; sin embargo, el costo de estos materiales supera ampliamente al del Pb, por esto, el trabajo presenta una primera etapa en el desarrollo de los materiales atenuadores libres de plomo.

5. Conclusiones

Las matrices poliméricas evaluadas, por estar constituidas por átomos con bajo Z (carbono e hidrógeno principalmente), presentan coeficientes de atenuación muy bajos; como se puede evidenciar en la figura 2, donde el PP pierde todo su efecto atenuador por encima de los 10 keV, el PP pierde gran parte de su capacidad atenuadora, lo que se corrobora en la figura-3, donde las curvas para materiales poliméricos se unifican y los coeficientes de atenuación para PP y PVC caen a valores cercanos a $0,1 \text{ cm}^2/\text{g}$. por tanto la selección de la matriz polimérica estará basada solo en disponibilidad, costo y propiedades mecánicas, ya que en cuanto a poder de atenuación, no inciden en el comportamiento del compuesto a desarrollar.

El coeficiente de atenuación másico aumenta con el contenido de sustancia atenuadora (WO_2); sin embargo, solo con la experimentación y la caracterización de propiedades mecánicas de los materiales se evidenciará si es posible cargar la matriz polimérica a niveles tan altos como 50 %.

Con la matrices poliméricas se espera conseguir las propiedades adecuadas para las diferentes aplicaciones, ya que los elementos atenuadores puros carecen de las propiedades mecánicas necesarias para su uso real.

En términos económicos, es claro que los costos de estos materiales alternativos al plomo son muy altos, por esta razón deben evaluar, además de polímeros cargados, el desarrollo de recubrimientos con películas de espesor del orden de 10^{-6} m que provean alta capacidad atenuadora.

Este trabajo mostró que abordar la investigación de nuevos materiales desde el punto de vista teórico es conveniente para direccionar la fase de experimentación. Se observó que el óxido de wolframio y el sulfato de bario son atenuadores viables que para algunos rangos de energía son más eficientes que el plomo.

Se concluye además que la fase experimental con recubrimientos de material atenuador sobre sustrato polimérico, permitirá evaluar la viabilidad de los materiales desde el punto de vista económico. También se infiere que los materiales óptimos desde el análisis teórico, orientan la fase experimental, sin embargo, se requiere una caracterización de sus propiedades para evaluar las modificaciones que permitan llevarlos a aplicaciones reales.

Referencias

- [1] OIEA, «Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación». Colección de Seguridad N.º 120, Viena, 1997.
- [2] H. S. B. D. a. E. M.-H. J. P. McCaffrey, «J. P. McCaffrey, H. Shen, B. DRadiation Attenuation by Lead and Nonlead Materials Used in Radiation Shielding Garments». *J. P. McCaffrey, H. Shen, B. Downton, and E. Mainegra-Hing. Radiation Attenuation by Lead and Nonlead Materials us Med. Phys.* 34, 530 (2007); <http://dx.doi.org/10.1118/1.2426404>., vol. 34, n.º 2, pp. 529, 530, 2007.
- [3] S.-C. Kim, K.-R. Dong y W.-K. Chung, «Medical Radiation Shielding Effect by Composition of Barium Compounds.» *Annals of Nuclear Energy*, vol. 47, pp. 1-5, 2012.

- [4] S. Tuscharoen, J. Kaewkhao, P. Limsuwan y W. Chewpraditkul, «Structural, Optical and Radiation Shielding Properties of BaO-B₂O₃-Rice Husk Ash Glasses,» *Procedia Engineering*, vol. 32, pp. 734-739, 2012.
- [5] S. Kaewjaeng, J. Kaewkhao, P. Limsuwan y U. Maghanemi, «Effect of BaO on Optical, Physical and Radiation Shielding Properties of SiO₂-B₂O₃-Al₂O₃-CaO-Na₂O Glasses System,» *Procedia Engineering*, vol. 32, pp. 1080-1086, 2012.
- [6] N. Noor Azman, S. Siddiqui y I. Low, «Characterisation of Micro-Sized and Nano-Sized Tungsten Oxide-Epoxy Composites for Radiation Shielding of Diagnostic X-rays,» *Materials Science and Engineering C*, vol. 33, pp. 4952-4957, 2013.
- [7] N. Chanthima y J. Kaewkhao, «Investigation on Radiation Shielding Parameters of Bismuth Borosilicate Glass from 1 keV to 100 GeV,» *Annals of Nuclear Energy*, vol. 55, pp. 23-28, 55 2013.
- [8] Y. Elmahroug, B. Tellili y C. Souga, «Determination of Shielding Parameters for Different Types of Resins,» *Annals of Nuclear Energy*, vol. 63, pp. 619-623, 2014.
- [9] J. Wook Shin y e. a., «Polyethylene/Boron-Containing composites,» *Thermochimica Acta*, vol. 585, pp. 5-9, 2014.
- [10] S. Agosteo, A. Mereghetti, E. Sagia y M. Silari, «Shielding Data for Hadron-Therapy ion Accelerators: Attenuation of Secondary Radiation in Concrete,» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, vol. 319, pp. 154-167, 2014.
- [11] M. Kharita, S. Yousef y M. AlNassar, «Review on the Addition of Boron Compounds to Radiation Shielding Concrete,» *Progress in Nuclear Energy*, vol. 53, pp. 207-211, 2011.
- [12] E. Calzada, F. Grünauer, B. Schillinger y H. Türck, «Reusable Shielding Material for Neutron- and Gamma-Radiation,» *Reusable Shielding Material for Neutron- and Gamma-Radiation*, vol. 651, pp. 77-80, 2011.
- [13] M. Maslehuddin, A. Naqvi, M. Ibrahim y Z. Kalakada, «Radiation Shielding Properties of Concrete with Electric arc Furnace Slag Aggregates and Steel Shots,» *Annals of Nuclear Energy*, vol. 53, pp. 192-196, 2013.
- [14] I. Akkurt, H. Akyıldırım, B. Mavi, S. Kilincarslan y C. Basyigit, «Radiation Shielding of Concrete Containing Zeolite,» *Radiation Measurements*, vol. 45, pp. 827-830, 2010.
- [15] «Mechanical Properties of UHMWPE/Sm₂O₃ Composite Shielding Material,» *Journal Of Rare Earths*, vol. 28, p. 482, 2010.
- [16] B. Kim, H. Lee, E. Kim y S.-H. Lee, «Intrinsic Electromagnetic Radiation Shielding/Absorbing Characteristics of Polyaniline-Coated Transparent thin Films,» *Synthetic Metals*, vol. 160, pp. 1838-1842, 2010.
- [17] NIST, 1996. [En línea]. Available: www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm.
- [18] National Institute of Standards and Technology, [En línea]. Available: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/chap2.html>.
- [19] National Institute of Standards and Technology, [En línea]. Available: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/chap3.html>.
- [20] M. J. Berger y J. H. Hubbell. [En línea]. Available: <http://physics.nist.gov/xcom>.
- [21] L. Gerward, N. Guilbert, K. B. Jensen y H. Levr, «X-ray absorption in matter. Reengineering XCOM,» *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 60, pp. 23-24, 2001.
- [22] L. Gerward, N. Guilbert, K. B. Jensen y H. Levr, «WinXCom – A Program for Calculating X-ray Attenuation Coefficients,» *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 71, pp. 653-654, 2004.
- [23] G. M. 2. U. National Institute of Standards and Technology, «XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer». USA Patente NBSIR 87-3597 (1987), 1999.