

ANÁLISIS DE HOMOGENEIDAD EN MALLAS DE POLÍMERO REFORZADO CON BaSO_4 FABRICADAS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

A. Guerra, R. Agustin.Serrano, E. Moreno

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
Pue. Puebla,

ariadna.guerrah@alumno.buap.mx, ricardo.agustin@correo.buap.mx,
emoreno@fcfm.buap.mx

RESUMEN

Este proyecto analiza la distribución del sulfato de bario (BaSO_4) en escamas de mallas impresas en 3D, desarrolladas como alternativas al plomo en vestimentas de protección radiológica. Se fabricaron dos tipos de escamas: tipo hoja y con punta redonda utilizando una mezcla de 70% resina fotosensible y 30% BaSO_4 en peso. La homogeneidad de la distribución del compuesto se evaluó mediante radiografías y análisis con el software ImageJ. Los resultados mostraron desviaciones estándar de 22.562 para la escama tipo hoja, 11.426 para la de punta redonda y 1.908 para el collarín plomado de referencia. Esto resalta la necesidad de optimizar el diseño y proceso de impresión para mejorar la homogeneidad de la distribución del BaSO_4 dentro de las mallas.

Palabras clave: Impresión 3D, BaSO_4 , homogeneidad de distribución.

ABSTRACT

This study investigates the distribution of barium sulfate (BaSO_4) within 3D printed mesh scales developed as a lead free alternative for radiological protective garments. Two types of scales, leaf shaped and rounded tip, were fabricated using a 70% of photosensitive resin and 30% of BaSO_4 mix by weight. The homogeneity of BaSO_4 distribution was assessed through radiographic imaging and quantitative analysis using ImageJ software. Standard deviation values were 22.562 for the leaf shaped scale, 11.426 for the rounded tip scale, and 1.908 for conventional leaded collar used as a reference. These findings highlight the need to optimize both the design and the printing process to improve the uniformity of BaSO_4 distribution within the printed meshes.

Key words: 3D printing, BaSO_4 , homogeneity of distribution.

1. INTRODUCCIÓN

La radiación ionizante, aunque indispensable en procedimientos clínicos de diagnóstico como son las radiografías, tomografías y mamografías, representa un riesgo potencial para la salud tanto de los pacientes como del personal ocupacionalmente expuesto (POE). Para

mitigar estos riesgos, una de las principales estrategias en el área de protección radiológica es el uso de vestimenta de blindaje [1]. Generalmente, estos dispositivos se fabrican con plomo (Pb), gracias a su alta densidad y número atómico, lo que le otorga una excelente capacidad para atenuar la radiación ionizante.

Sin embargo, la toxicidad, peso elevado y poca flexibilidad del plomo, genera incomodidad y posibles riesgos para la salud en usos prolongados. Estas desventajas han impulsado la búsqueda e investigación de materiales alternativos que ofrezcan una protección eficiente sin comprometer la seguridad ni la comodidad del usuario.

En esta línea, las tecnologías de impresión 3D han cobrado relevancia, ya que permiten fabricar estructuras complejas y personalizadas incorporando materiales atenuadores como óxido de gadolinio [2] o sulfato de bario (BaSO_4) [3]. No obstante, para asegurar una protección efectiva con materiales compuestos, es fundamental lograr una distribución uniforme del componente atenuador. Una dispersión desigual puede generar zonas de baja densidad, reduciendo la eficacia del blindaje.

2. OBJETIVO

En el presente proyecto se evaluó la homogeneidad en la distribución de BaSO_4 en escamas integradas a mallas, ambas diseñadas y fabricadas mediante impresión 3D. Para ello se utilizaron dos diferentes geometrías de escamas, una con forma de hoja y otra con punta redonda, para optimizar el diseño de estas estructuras de modo que puedan ser una alternativa funcional y segura al plomo en vestimentas de protección radiológica.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Radiación ionizante y protección radiológica

La radiación ionizante es una forma de energía capaz de desprender electrones de los átomos con los que interactúa [4]. Se utiliza ampliamente en el diagnóstico médico por imagen, en procedimientos como radiografías, mamografías y tomografías, debido a su capacidad para atravesar tejidos y generar imágenes internas del cuerpo.

Sin embargo, la exposición a esta radiación puede tener efectos adversos para la salud, ya sea en dosis altas, o en dosis bajas durante un periodo largo de tiempo. Estos efectos se dividen en dos categorías: determinísticos y estocásticos, según exista o no un umbral de dosis para que estos puedan manifestarse.

Los efectos determinísticos presentan un umbral mínimo de dosis, por encima del cual se producen daños evidentes y cuya gravedad aumenta con la dosis. Entre ellos se encuentran el síndrome de irradiación aguda, que puede afectar distintos sistemas del organismo, como el hematopoyético (provocando hemorragias, anemia, entre otros síntomas), el gastrointestinal (causando efectos como vómito o diarrea) y el nervioso central (donde se manifiestan efectos como la pérdida de conciencia y coordinación muscular), así como quemaduras en la piel y, en casos extremos, la muerte [5].

Por otro lado, los efectos estocásticos no presentan un umbral definido, en este caso, la probabilidad de ocurrencia aumenta con la dosis, aunque su gravedad no depende de ella. Los principales efectos estocásticos incluyen ciertos tipos de cáncer inducido por radiación como el de mama o piel, así como daños genéticos hereditarios [6].

Debido a estos riesgos, la protección radiológica se basa en tres principios fundamentales: la justificación de los procedimientos, optimización (bajo el criterio ALARA, por sus siglas en inglés: As Low As Reasonably Achievable), y limitación de dosis. En particular, el POE, como técnicos radiólogos y médicos intervencionistas, requieren el uso de barreras físicas y vestimenta especializada para reducir su exposición acumulada. En este contexto, el desarrollo de materiales atenuadores de radiación que sean eficientes, seguros, livianos y cómodos resulta esencial para garantizar una práctica clínica segura y sostenible.

3.2 Plomo (Pb) y BaSO₄ como materiales atenuadores de radiación

En el ámbito del diagnóstico por imagen, el plomo (Pb) ha sido uno de los materiales de referencia para la protección radiológica. Esto se debe a su alta densidad (11.35 g/cm³) y número atómico ($Z = 82$), propiedades que le confieren una excelente capacidad de atenuación frente a la radiación ionizante, principalmente a través del efecto fotoeléctrico y el efecto Compton.

Gracias a estas características, el plomo se emplea comúnmente en elementos de protección personal como mandiles, chalecos, guantes y collarines. Estos dispositivos requieren espesores entre 0.25 a 1.00 mm equivalentes de Pb, dependiendo del nivel de exposición. Sin embargo, su elevada densidad también representa una desventaja significativa: el peso de la vestimenta (varía entre 1.5 a 12.5 kg) puede causar incomodidad y fatiga muscular durante su uso prolongado [7].

Por otra parte, la toxicidad del plomo representa otra limitación importante, una exposición prolongada al plomo puede afectar negativamente al sistema cardiovascular, inmunológico y neurológico, así como trastornos cognitivos. Aunque la mayoría de las prendas protectoras incorporan recubrimientos para evitar el contacto directo con este, el desgaste o almacenamiento inadecuado pueden comprometer esta barrera. Las desventajas mencionadas han motivado la búsqueda de alternativas más seguras, ligeras y sostenibles.

El sulfato de bario (BaSO₄), también conocido como barita, es un mineral que destaca como una alternativa prometedora, debido a su peso específico, que varía entre 4.3 a 4.6 g/cm³, ser inerte, no contaminante, muy común y no tóxico. El bario, con un número atómico de 56, proporciona al BaSO₄ una capacidad de atenuación significativa, especialmente al emplearse en concentraciones adecuadas y distribuciones homogéneas dentro de un material compuesto [8].

Asimismo, el BaSO₄ ha sido estudiado en el desarrollo de nuevos materiales atenuadores en combinación con resinas fotosensibles utilizadas en impresión 3D. Por ejemplo, el trabajo “Estudio de factibilidad de protección radiológica usando polímero cargado con BaSO₄” [3] demostró que una placa con un espesor de 0.29 cm, impresa con una mezcla de 70% resina

fotosensible y 30% BaSO₄ en peso puede reducir en un 50% la radiación incidente. No obstante, para que esta capacidad atenuadora sea efectiva de manera uniforme es importante que la distribución del material atenuador dentro del polímero sea homogénea, una distribución desigual puede generar zonas de baja densidad, comprometiendo la protección radiológica del dispositivo. Por ello, el análisis de homogeneidad en estructuras impresas con polímeros cargados con BaSO₄ es esencial para garantizar su eficiencia en aplicaciones clínicas.

4. METODOLOGÍA

4.1 Diseño de prototipos

El diseño tridimensional de la malla base se desarrolló utilizando el software SolidWorks 2023. Cada eslabón que la compone cuenta con una base en forma de “H”, que incorpora conectores y salientes para permitir tanto la interconexión entre eslabones como la integración de escamas (Figura 1).

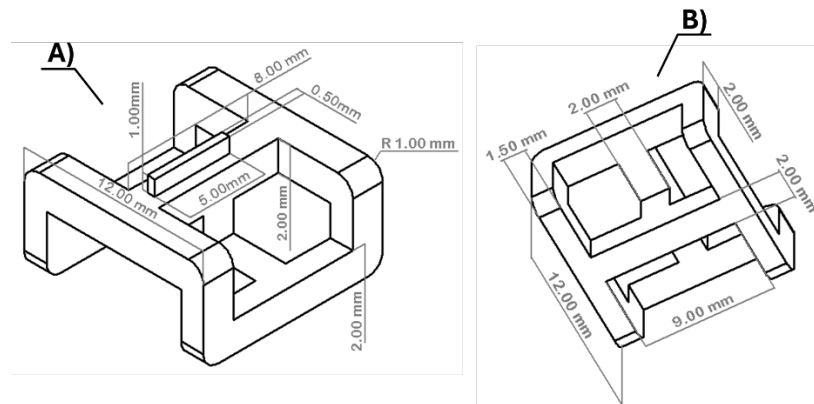


Figura 1. Plano tridimensional del eslabón (en SolidWorks): A) vista isométrica; B) vista inferior

La malla base, compuesta por una disposición de 6×6 eslabones, se generó mediante la unión de múltiples réplicas del eslabón anteriormente mencionado. Durante este proceso de diseño se mantuvo una separación mínima entre los eslabones, para asegurar su movilidad durante el proceso de impresión 3D (Figura 2).

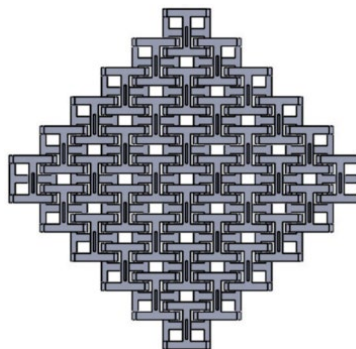


Figura 2. Vista superior de la malla ensamblada de 6×6 eslabones (en SolidWorks)

Con el objetivo de cubrir los huecos generados entre los eslabones y evaluar distintas configuraciones estructurales, se desarrollaron dos tipos de escamas con geometrías distintas: una con forma de hoja y otra con punta redonda.

La escama tipo hoja se obtuvo a partir de un modelo preexistente descargado de la plataforma Marker World [9], del cual se extrajo y modificó una escama individual utilizando Meshmixer, con el fin de adaptarla al sistema de eslabones (Figura 3). Posteriormente, el modelo fue importado a SolidWorks 2023, donde se incorporó una ranura para permitir su acoplamiento a la malla (Figura 4).

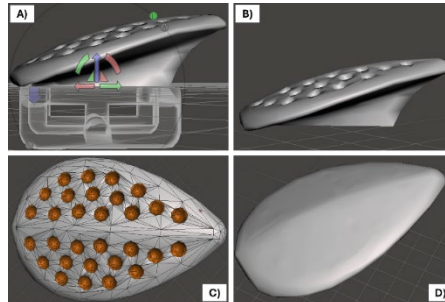


Figura 3. Modificación de escama tipo hoja en Meshmixer: A) corte de base; B) vista lateral; C) relleno de huecos; D) escama final

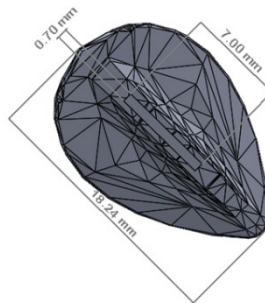


Figura 4. Vista inferior de la escama tipo hoja con su ranura de acoplamiento (en SolidWorks)

El segundo modelo de escama fue diseñado con un grosor constante y presenta una curvatura frontal optimizada para su integración en la malla. Adicionalmente, se le diseñó una base inclinada con una ranura para permitir su acoplamiento y movilidad al ensamblarse con los eslabones de la malla (Figura 5).

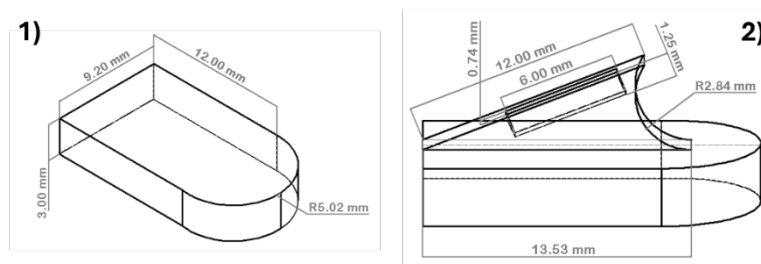


Figura 5. Plano tridimensional de escama con punta redonda (en SolidWorks): 1) base; 2) inclinación y ranura

4.2 Impresión de prototipos

Una vez obtenidos los modelos, se preparó una mezcla compuesta de 70% resina estándar fotosensible y un 30% en peso de BaSO_4 en polvo, utilizando agitación magnética para asegurar una distribución homogénea de este componente atenuador. Esta mezcla fue implementada en la impresora Crealty LD-002H para la fabricación de las escamas (Figura 6).

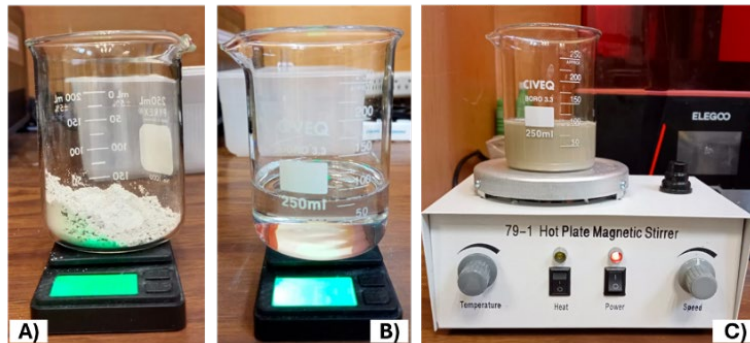


Figura 6. Preparación del material de impresión: A) pesaje de BaSO_4 ; B) pesaje de resina; C) agitación magnética de la mezcla

Finalmente, las escamas impresas fueron ensambladas en mallas base previamente impresas con resina estándar, completando así los prototipos finales (Figura 7).



Figura 7. Prototipo ensamblado con una de las configuraciones de escamas

5. RESULTADOS

5.1 Proceso de análisis de homogeneidad

Para el análisis de la homogeneidad en la distribución de BaSO_4 , se tomaron radiografías, tanto de las mallas ensambladas como de un collarín plomado de referencia, utilizando el sistema de rayos X M1450kv CT System de Nikon (Figura 8).

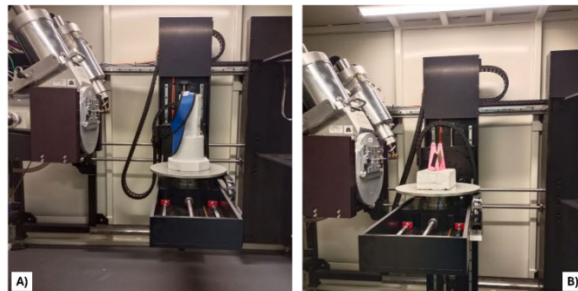


Figura 8. Toma de radiografías: A) montaje del collarín plomado; B) montaje del prototipo de malla

Los parámetros de exposición utilizados en cada caso fueron los siguientes:

- **Mallas:** 170 kV, 170 μ A y 1 fotograma por segundo (fps)
- **Collarín plomado:** 355 kV, 335 μ A y 1.41 fps

Posteriormente las imágenes obtenidas fueron analizadas con el software ImageJ, donde se realizó una evaluación local de la homogeneidad de cada tipo de escama y del collarín plomado de referencia (Figura 9).

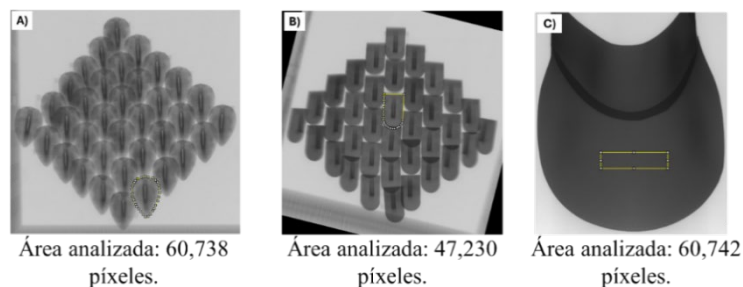


Figura 9. Áreas para análisis de homogeneidad en ImageJ: A) escama tipo hoja; B) escama con punta redonda; C) collarín plomado

A cada una de las áreas seleccionadas se les realizó un perfil de escalas de grises mediante histogramas generados por ImageJ y el programa OriginPro 8.5, con el objetivo de evaluar la dispersión de los valores de intensidad. La desviación estándar de los histogramas se utilizó como indicador principal de homogeneidad en la distribución del material atenuador. Una menor desviación estándar refleja una mayor uniformidad en la distribución del material. A continuación, se presentan los histogramas correspondientes para cada muestra (Figuras 10 y 11).

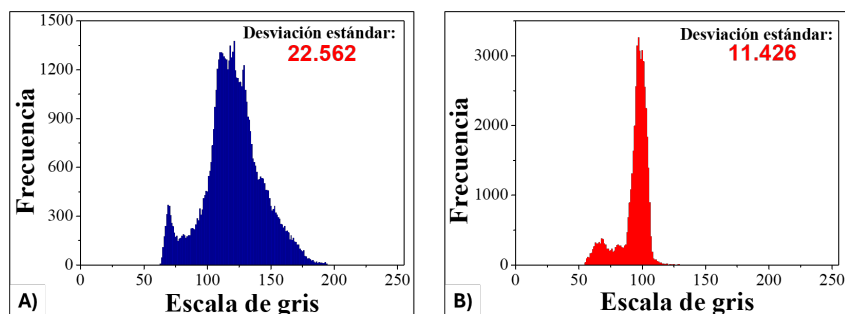


Figura 10. Histogramas de escala de grises: A) escama tipo hoja; B) escama de punta redonda

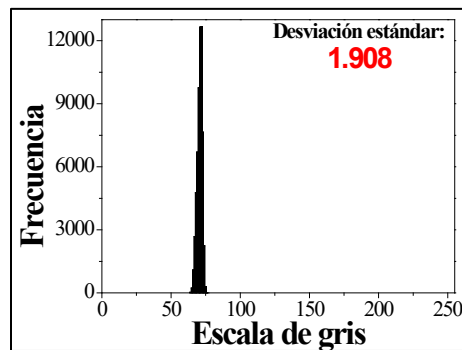


Figura 11. Histograma de escala de grises del collarín plomado

6. CONCLUSIONES

Los resultados mostraron que la escama tipo hoja presentó una mayor desviación estándar (22.562), atribuida su forma irregular, mientras que la escama de punta redonda, con geometría más uniforme, mostró una menor desviación (11.426). Sin embargo, ambos valores superan significativamente al del collarín plomado de referencia (1.908). Esto sugiere que, además del diseño geométrico, el método de impresión 3D también influye en la homogeneidad del BaSO_4 . Adicionalmente, se observó que las escamas tipo hoja, en comparación con las escamas de punta redonda, ofrecen mejor cobertura en las uniones de la malla debido a su forma amplia y adaptable.

Como trabajo a futuro, se propone optimizar tanto la concentración de BaSO_4 como el diseño geométrico de las escamas, buscando geometrías más regulares que aseguren una mejor cobertura y distribución del material atenuador. Este estudio presenta un avance hacia el desarrollo de vestimentas de blindaje más ligeras, personalizadas y libres de plomo, impresas en 3D. Si se mejora la homogeneidad del material, estas estructuras podrían ser aplicables en entornos clínicos de diagnóstico.

7. AGRADECIMIENTOS

- Los autores agradecen al Laboratorio de Física Médica y al Laboratorio Interdisciplinario de impresión 3D para la Innovación Tecnológica, pertenecientes a la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la BUAP, por el apoyo y la asistencia técnica brindados.
- Asimismo, al Dr. Jorge Raúl Cerna Cortez, responsable del Centro Avanzado de Pruebas Analíticas No Destructivas de la BUAP.
- Al alumno Alejandro Castro Méndez y a la Dra. Gabriela Esquina Arenas, responsable del Laboratorio de Innovación y Materiales Aplicados, por la discusión y el apoyo técnico en la toma de radiografías de las mallas y el collarín.

8. REFERENCIAS

- [1] Poveda B., J.F. y Plazas, M.C., “Elementos de protección radiológica en salas de intervencionismo,” Revista Colombiana De Cardiología, 27, 82-87, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rccar.2020.01.002>.

- [2] Ogul, H., Gultekin, B., Yildiz, H., Us, H., y Bulut, F., “Novel 3D-Printed lead-free radiation protection apron in the medical X-ray and thermal neutron energy range,” *Radiation Physics and Chemistry*, 219, 111686, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111686>.
- [3] Coyotl Ojeda, M.N., Agustin Serrano, R., y Moreno Barbosa, E., “Estudio de factibilidad de protección radiológica usando polímero cargado con BaSO₄ mediante impresión 3D LCD,” XIII Congreso Nacional y III Internacional de Tecnología Aplicada a Ciencias de la Salud. CDMX-México. (2023).
- [4] Carlyle Bushong, S., “Conceptos de radiología,” en **Manual de radiología para técnicos: Física, biología y protección radiológica**, novena ed., cap. 1, pp. 2-15, 2010.
- [5] Carlyle Bushong, S., “Efectos tardíos de la radiación,” en **Manual de radiología para técnicos: Física, biología y protección radiológica**, novena ed., cap. 36, pp. 549-567, 2010.
- [6] Carlyle Bushong, S., “Efectos inmediatos de la radiación,” en **Manual de radiología para técnicos: Física, biología y protección radiológica**, novena ed., cap. 35, pp. 534-548, 2010.
- [7] Carlyle Bushong, S., “Control de la dosis de radiación profesional,” en **Manual de radiología para técnicos: Física, biología y protección radiológica**, novena ed., cap. 40, pp. 613-629, 2010.
- [8] Huañec Huilca, F.F., y Fiori Chíncaro, G.A., “Eficacia del concreto y la baritina como atenuadores de rayos X. Una revisión de la literatura,” *Revista Científica Odontológica*, 8(1), 1-9.
- [9] MarkerWorld user @Sirius3D, Elven Leaf Armor, MarkerWorld, <https://makerworld.com/es/models/541705-elven-leaf-armor#profileId-459265>.